

平成 29 年度原子力規制庁委託成果報告書

耐津波設計・フラジリティ評価手法の整備に
係る防潮堤水理試験（波圧影響）
（平成 29 年度分）

大成建設株式会社

平成 30 年 3 月

本報告書は、原子力規制委員会原子力規制庁からの委託により実施した業務の成果をとりまとめたものです。

本報告書に関する問い合わせは、原子力規制庁までお願いします。

目 次

1	概要	1-1
1.1.	事業概要	1-1
1.2.	既往の研究	1-2
2	試験方法	2-1
2.1.	試験装置	2-1
2.1.1.	試験縮尺	2-1
2.1.2.	試験水槽と試験模型	2-2
2.1.3.	計測項目及び計測方法	2-7
2.2.	試験ケース	2-10
2.2.1.	通過波検定試験	2-10
2.2.2.	波力/波圧試験	2-11
2.3.	試験手順	2-14
2.3.1.	波検定	2-14
2.3.2.	通過波検定試験	2-14
2.3.3.	波力/波圧試験	2-14
2.3.4.	波力・モーメントの算定方法	2-15
3.	通過波検定試験	3-1
3.1.	水位時系列	3-1
3.2.	通過波浸水深と流速	3-8
3.3.	通過波のフルード数と比エネルギー	3-16
4.	波力/波圧試験 (TypeA : 非越流固定模型)	4-1
4.1.	水位と圧力の時系列計測結果	4-1
4.2.	波力・モーメントの時系列と最大波力作用時の圧力分布	4-34
5.	波力/波圧試験 (TypeB : 越流固定模型)	5-1
5.1.	水位と圧力の時系列計測結果	5-1
5.2.	波力・モーメントの時系列と最大波力作用時の圧力分布	5-34
5.3.	越流量	5-59
6.	波力/波圧試験 (TypeC : 越流ひずみ模型)	6-1
6.1.	模型の振動特性	6-1
6.2.	水位と圧力およびひずみの時系列計測結果	6-4
6.3.	波力・モーメントの時系列と最大波力作用時の圧力分布	6-43
6.4.	ひずみの時系列と最大波力作用時のひずみ分布	6-71
7.	試験結果の考察	7-1
7.1.	通過波	7-1
7.2.	段波波圧と持続波圧	7-5
7.2.1.	段波領域と持続波領域	7-5
7.2.2.	フルード数と水深係数の関係 (TypeA)	7-6

7.2.3.	越流による波力の低減効果 (TypeA vs. TypeB)	7-9
7.2.4.	越流時の波力評価 (TypeB)	7-11
7.2.5.	固定模型 (TypeB) とひずみ模型 (TypeC) の波力の比較	7-15
7.2.6.	段波波圧と持続波圧の比較	7-16
7.3.	段波波力と持続波力の比較	7-21
7.3.1.	段波波圧と持続波圧による堤体変位及びひずみの比較	7-21
7.3.1.	静的波力による動的ひずみの評価	7-24
8.	数値シミュレーション	8-1
8.1.	シミュレーション手法と解析条件	8-1
8.2.	解析ケース	8-3
8.3.	解析結果	8-6
8.3.1.	通過波検定試験の水位再現結果	8-6
8.3.2.	通過波検定試験の流速再現結果	8-23
8.3.3.	波力/波圧試験の水位再現結果	8-40
8.3.4.	波力/波圧試験の波力再現結果	8-57
8.3.5.	波力/波圧試験の越流量再現結果	8-94
8.4.	構造解析と解析条件	8-103
8.4.1.	解析モデル	8-103
8.4.2.	材料特性	8-104
8.4.3.	解析結果	8-105
9.	既往データによる波圧特性評価の妥当性検討	9-1
9.1.	既往データ	9-1
9.2.	フルード数と水深係数の関係	9-2
9.3.	越流による波力の低減効果	9-6
9.4.	段波波力と持続波力の比較	9-8
9.5.	越流時の波力評価	9-10
10.	漂流物衝突試験	10-1
10.1.	試験方法	10-1
10.2.	試験結果	10-3
11.	まとめ	11-1

1. 概要

1.1. 事業概要

本事業では、防潮堤に関する耐津波設計・フラジリティ評価手法の高度化を目的に、津波波圧特性及び構造応答の把握に着目した水理試験及びシミュレーション解析を実施し、津波波圧及び構造応答に関する試験データを取得した。越流時における持続波圧特性および段波波圧特性を把握することを目的に、縦断方向 2 次元条件の水理試験およびシミュレーション解析を、地形及び入力津波等が異なる複数の試験ケースについて実施し、津波波圧とひずみの特性及びそれらのばらつきに関するデータを取得した。単純勾配及び直立護岸（水平地形）の 2 種類の海底地形に対し、堤体の高さが十分に高く津波が越流しない場合、および高さが不十分であり堤体上を越流する場合の試験を実施した。さらに、越流する場合には堤体の津波進行方向ひずみ及びそれによって生じる変位を測定し、津波波力とひずみの特性について比較検討した。

実施した試験は、防潮堤を設置しない状態での通過波検定試験と、防潮堤模型前面に働く津波波力/波圧とひずみを測定する波力/波圧試験の 2 種類である。波力/波圧試験の対象とした堤体模型は鉛直板とし、前面に設置した圧力計により津波波圧を計測した。ひずみは堤体模型裏面に設置したひずみゲージで計測し、同時に堤体後方に設置したレーザー変位計により変位を計測した。

また、「平成 27 年度原子力施設等防災対策等委託費（耐津波設計・フラジリティ評価手法の整備に係る防潮堤水理試験（その 1）事業」及び「平成 28 年度原子力施設等防災対策等委託費（耐津波設計・フラジリティ評価手法の整備に係る防潮堤水理試験（障害物影響）事業」（以下「類似事業」という。）で取得した結果と併せて、水理試験結果及びシミュレーション解析結果を整理・分析することで、防潮堤に作用する津波波圧特性を評価するとともにシミュレーション解析手法の適用範囲を確認した。

また、津波来襲時の防潮堤の構造応答要因としては、津波の波力以外に漂流物の衝突が考えられる。そこで、流木および小型船舶の 2 種類の漂流物を対象に、漂流物の挙動を把握するための水理試験を実施した。防潮堤の沖側に漂流物を浮遊した状態に設置し、津波を作用させて漂流物の動きを動画に撮影した。この動画を解析することにより、漂流物挙動、漂流物移動速度について整理・分析した。

1.2. 既往の研究

内閣府による「津波避難ビル等に係るガイドライン」(2005)では、朝倉ら(2000)による水理実験結果に基づき、設計で考慮すべき津波波圧は、対象構造物の位置における通過波の最大浸水深の3倍(水深係数と呼ばれることが多い)の高さに対する静水圧としている。これは条件によっては過大評価となる場合があり、国土交通省による「津波に対し構造耐力上安全な建築物の設計法等に係る追加的知見について」では、陸上構造物の護岸からの距離や遮蔽物の有無により水深係数を低減できるとしている。

木原ら(2012)や高畠ら(2013)は、陸上構造物に作用する段波による津波波力に対して、数値解析から検討を実施し、構造物に津波が到達してからの波圧特性が経時的に衝撃波圧、極大波圧、準定常波圧の3段階に区別されることを示した。特に、準定常時の波圧は、非通過波の構造物前面での浸水深の静水圧分布におおむね従うことを報告している。有光ら(2012)は、ゲート急開により発生させた段波を陸上に設置した二次元および三次元構造物に作用させ、構造物前面に作用する波圧分布を計測した。実験の結果、段波衝突時の波圧分布は必ずしも静水圧分布に従うとは限らず、波圧の評価にはこれまでの浸水深に対する静水圧に、流速による運動量を付加することで、計測された津波波圧分布を良好に再現している。有川・大家(2014)は、各種形状の陸上構造物に作用する津波波圧に対して、防潮堤の有無の影響を水理実験により検討し、防潮堤を設置することで水深係数(津波波圧)が大きくなる傾向を示した。なお、陸上構造物全体に作用する津波波力については、FEMA(2008)や飯塚・松富(2000)などにより、一様流れ中の物体の抗力計算と同様の方法が提案されている。

津波波形によっては、最大津波波圧は必ずしも通過波の最大浸水深に対応するとは限らず、Asakuraら(2002)、榊山(2012)や池谷ら(2013)は水深係数をフルード数の関数として提案し、最大波圧を最大浸水深および最大浸水深発生時のフルード数から求めている。さらに、織田ら(2014)は水理実験結果および理論的アプローチにより、フルード数による水深係数の算定を時系列で実施し、榊山(2012)の水深係数の算定式が津波波力の時系列評価まで可能であることを示した。ただし、木原ら(2012)と同様に、遡上波の水位が短時間に上昇する場合、打ち上がった水塊の落下により大きな波力が働く場合があることを指摘している。

以下に、上述の評価式のうち、フルード数 Fr を用いた水深係数 α の主な提案式を示す。

松富・飯塚(1998) : $\alpha = 1.0 + 0.5(1.0 + \zeta)Fr^2$ ζ : 広義のエネルギー損失係数

Asakuraら(2002) : $\alpha = 1.0 + 1.2Fr$

榊山(2012) : $\alpha = 1.0 + 1.4Fr$

池谷ら(2013) : $\alpha = 1.0 + 1.3Fr$

織田ら(2014) : $\alpha = \left(2Fr^2 + \sqrt{1 + 8(1 + Fr)^2} - 2 \right)^{1/2}$

織田ら(2016) : $\alpha = 1 + \sqrt{2}Fr$

また、上述の津波波力の評価は、主に津波先端部の衝突による衝撃的な波力(段波波圧)を除いた、持続波圧に対するものであるが、木原ら(2016)は、段波波圧について理論的に推定方法を導出し、水理試験との良い一致を確認している。

堤体を津波が越流する場合の津波波力の算定手法としては、池谷ら（2013）が段波の理論に基づき導出しているが、水理試験による検証はされておらずモデルの解析精度については検証されていない。

構造物の応答を考慮した実験については、例えば有川ら（2007）が、津波力による構造物の変形・破壊挙動について検討するため、コンクリート板を用いた大規模な模型実験を行っている。その結果、衝撃的な津波波力でもコンクリート板は十分に破壊されることを示し、構造物によっては衝撃的な津波波力による変形が生じることを報告している。また、津波と構造物の連成解析手法として川崎ら（2015）は、段波状津波によるコンクリート構造物の変形を解析できるモデルを気液二相流体モデル OpenFOAM と構造解析モデル SeanFEM を組み合わせることで構築し、既往の実験結果を用いてモデルの妥当性を示している。さらに、有川ら（2017）は、5つの異なるシミュレーションを組み合わせ、津波の発生から構造物の破壊・浸水までの一連を階層的に計算できる手法を構築し、実験結果を良好に再現したことを報告している。

参考文献

- 朝倉良介・岩瀬浩二・池谷 毅・高尾 誠・金戸俊道・藤井直樹・大森正則（2000）：護岸を越流した津波に作用する波力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第47巻，pp.911-915.
- 有川太郎・中野史丈・大坪大輔・下迫健一郎・石川信隆（2007）：遡上津波力による構造物の変形・破壊挙動の検討，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.54, pp.841-845.
- 有川太郎・大家隆行（2014）：防潮堤背後の建物に作用する津波力に関する実験的検討，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.70, No.2, pp.I_806-I_810.
- 有川 太郎・関 克己・大木 裕貴・平野 弘晃・千田 優・荒木 和博・石井 宏一・高川 智博・下迫 健一郎（2017）：階層型連成シミュレーションによる高詳細津波遡上計算手法の開発，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.73, No.2, pp.I_325-I_330.
- 有光 剛・大江一也・川崎浩司（2012）：構造物前面の浸水深と流速を用いた津波波圧の評価手法に関する水理実験，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.69, No.2, pp.I_816-I_820.
- 池谷 毅・秋山義信・岩前伸幸（2013）：陸上構造物に作用する津波持続波圧に関する水理学的考察，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.69, No.2, pp.I_816-I_820.
- 織田幸伸・本田隆英・高島知行（2014）：陸上構造物に働く津波波力の時系列評価に関する研究，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.70, No.2, pp.I_796-I_800.
- 織田幸伸・本田隆英・小俣哲平（2016）：遡上津波の流体力に対する構造物幅の影響に関する水理実験，土木学会第71回年次学術講演会梗概集，II-172.
- 川崎 浩司・坂谷 太基・野中 哲也（2015）：段波状津波作用時のコンクリート構造物の変形に関する流体－構造解析，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.71, No.2, pp.I_949-I_954.
- 木原直人・高島大輔・吉井 匠・池野正明・太田一行・田中伸和（2012）：陸上構造物に対する津波流体力評価（その1）－有限幅構造物に対する非越流条件での数値的検討－，電力中央研究所報告，N12010.
- 木原直人・甲斐田秀樹（2016）：直立壁に作用する段波波圧の推定方法，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.72, No.2, pp.I_973-I_978.
- 国土交通省（2011）：津波に対し構造耐力上安全な建築物の設計法等に係る追加的知見について。

榊山 勉 (2012) : 陸上遡上津波の伝播と構造物に作用する津波波圧に関する研究, 土木学会論文
集 B2 (海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I_777-I_775.

高島大輔・木原直人・田中伸和 (2013) : 陸上構造物前面に作用する津波波圧に関する数値実験,
土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_851-I_855.

内閣府 (2005) : 津波避難ビル等に係るガイドライン, 68p.

松富英夫・飯塚秀則 (1998) : 津波の陸上流速とその簡易推定法, 海岸工学論文集, Vol.45,
pp.361-365.

Asakura, R, K. Iwase, T. Ikeya, M. Takao, T. Kaneto, N. Fujii and M. Ohmori (2002) : The
tsunami wave force acting on land structure, Proc. of 28th ICCE, ASCE, pp.1191-1202.

FEMA (2008) : Guidelines for design of structures for vertical evacuation from tsunamis,
FEMA P646, 158p.

2. 試験方法

2.1. 試験装置

2.1.1. 試験縮尺

想定する模型縮尺は 1/80 とし，試験諸元はフルードの相似則に従って設定した．対象とする実際の現象の流速を $v=5.0$ m/s 程度，陸上部での浸水深 η を 4m 程度，水の動粘性係数 $\nu=1.14 \times 10^{-2}$ cm²/s (15°C) とすると，次式で求められるレイノルズ数 Re は，実機で 1.75×10^7 ，縮尺模型で 2.45×10^4 となる．

$$Re = v \eta / \nu$$

一般に，レイノルズ数が 10^4 以上であれば十分に大きく，乱流状態であると言えるため，縮尺模型による水の粘性の影響は無視できる程度に小さいと考えられる．

フルード則に基づく各物理量の縮尺は，模型の縮尺を λ （ここでは 1/80）とすると以下の通りとなる．本試験では，この縮尺に沿って各諸元を設定した．

長さの縮尺：	λ
時間の縮尺：	$\lambda^{1/2}$
流速の縮尺：	$\lambda^{1/2}$
圧力の縮尺：	λ
力の縮尺：	λ^3

なお，ひずみ計測における堤体模型の縮尺については，6章に後述する．

2.1.2. 試験水槽と試験模型

(1) 試験水槽と地形模型

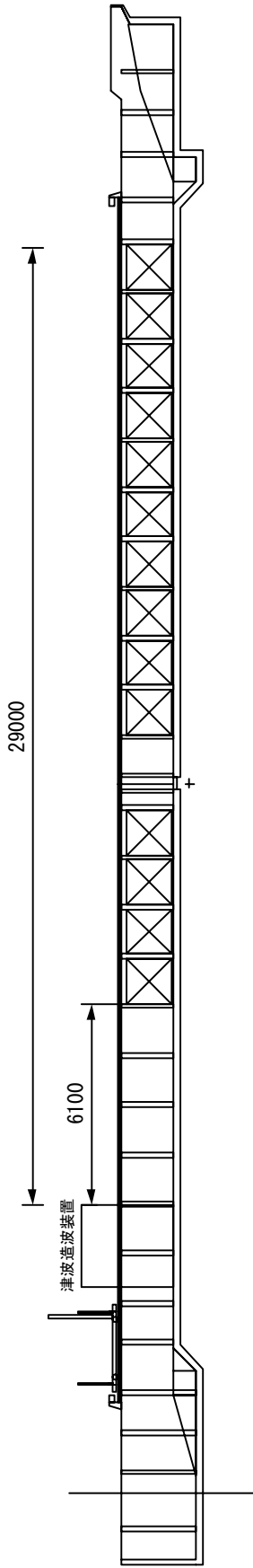
水理試験は、幅 80cm、長さ 47m、片面ガラス張りの二次元長水槽を用いて実施した（図- 2.1.1 (a)参照）。水槽の端部には、津波造波装置が設置されており、これにより津波を造波した。

本津波造波装置は、チャンバー式の津波造波装置で、前面に高さ 40cm で水槽幅の開口部があり、それ以外は密閉された容器（チャンバー）となっている。試験準備としてチャンバー内の空気を吸引し、水を吸い上げる。チャンバーの天井部分には、空気バルブが設置されており、造波時にはこれを解放することによりチャンバー内に空気が供給され、前面の開口部から水が吐き出されることにより、津波を造波する。空気バルブは複数設置されており、これらの空気バルブの解放タイミングを制御することにより、任意の波形の津波を造波することが可能である。

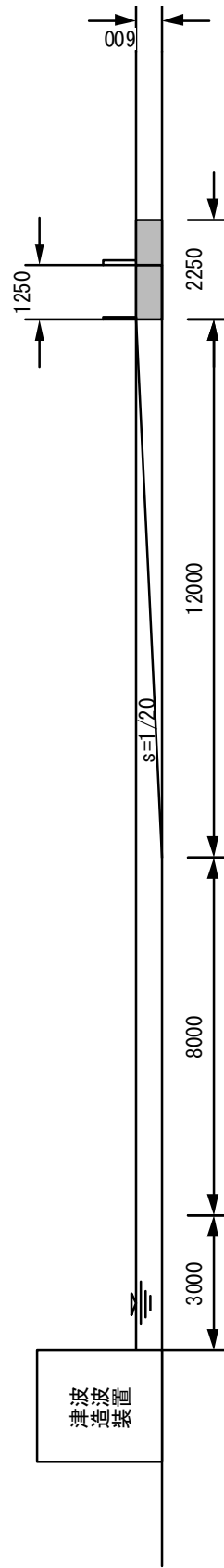
海底地形として、図- 2.1.1(b)、図- 2.1.1(c)に示す単純勾配タイプと直立護岸タイプの 2 種類を対象に試験を実施した。水深は 60cm とし、単純勾配タイプでは地形勾配 1/20 の一定斜面を設置した。直立護岸タイプでは護岸前面の水深 15cm、長さ 8m の水平海底地形を設置し、1/10 勾配の地形で水槽底面と擦り付けた。陸上地形は水平とし、汀線において水面と同一の高さとした。地形模型の表面は、塩ビ製とした。

(2) 防潮堤模型

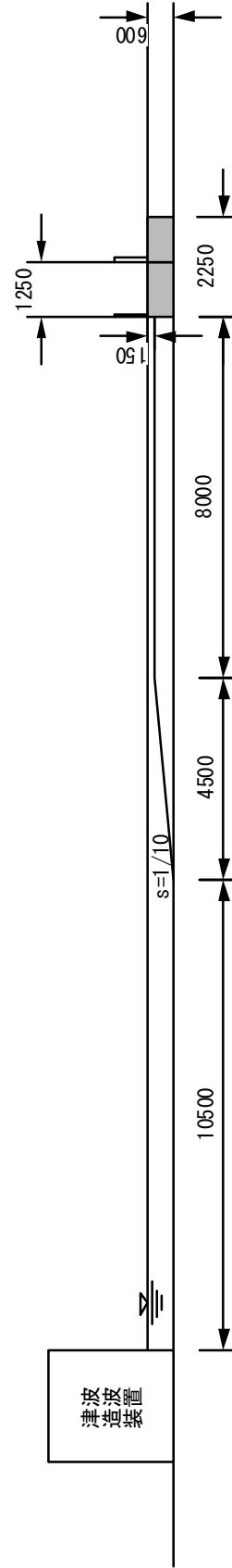
陸上部に設置した堤体模型の設置位置は、2 種類（図- 2.1.1(b)、図- 2.1.1(c)参照）とした。堤体模型はアルミ製とし、その厚さは実測値より $t = 8.25 \text{ mm}$ である。堤体模型の材料特性を、表- 2.1.1 に示す。堤体模型の高さを非越流、越流の 2 種類とし、非越流のケース（TypeA）では堤体模型を地形模型に剛に固定し、越流するケースについては、堤体を剛に固定したケース（TypeB、図- 2.1.2）とひずみを許容する固定としたケース（TypeC、図- 2.1.3）の 2 種類の固定方法として、合計 3 種類の模型を適用した。ひずみを許容する模型（TypeC）では、水槽の全幅 80cm のうち中央 60cm のみでひずみを許容する構造とし、ひずみを許容する部分と固定された部分の隙間（1mm）には、堤体模型裏側から柔らかいゴム板を貼ることで止水した。また、非越流ケースの堤体模型（TypeA）については、堤体上部も剛に固定した。いずれの模型も、模型前面には後述する圧力計を設置し、堤体に働く波力とモーメントを圧力の積分により算出した。ひずみの発生を許容するケース（TypeC）では、模型の裏面に設置したひずみゲージによりひずみを計測し、同時にレーザー変位計により水路縦断方向の変位を計測した。



(a) 試験水槽



(b) 単純勾配タイプ



(c) 直立護岸タイプ

図-2.1.1 試験水槽と試験模型

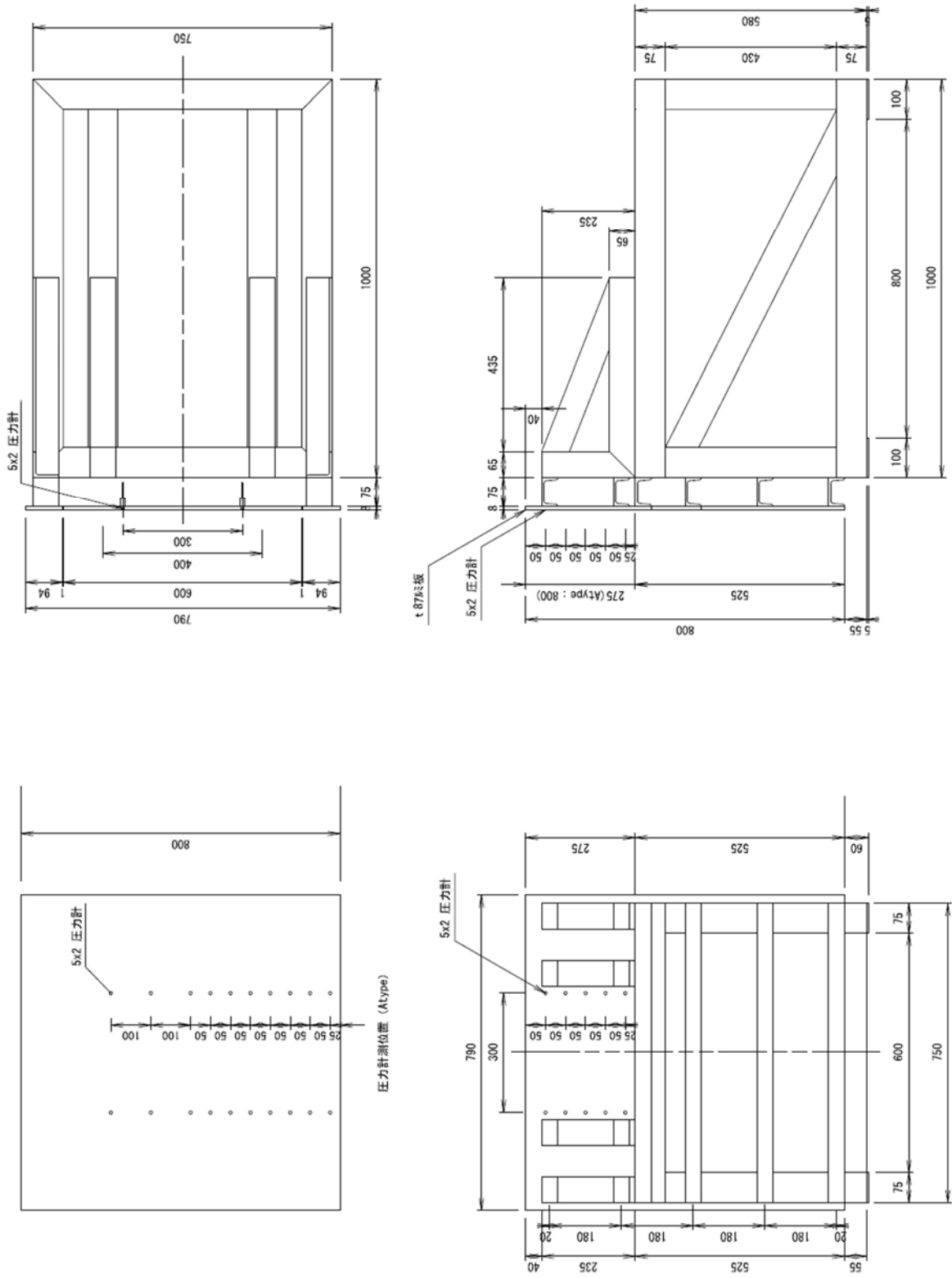


图-2.1.1.2 堤体模型 (固定模型)

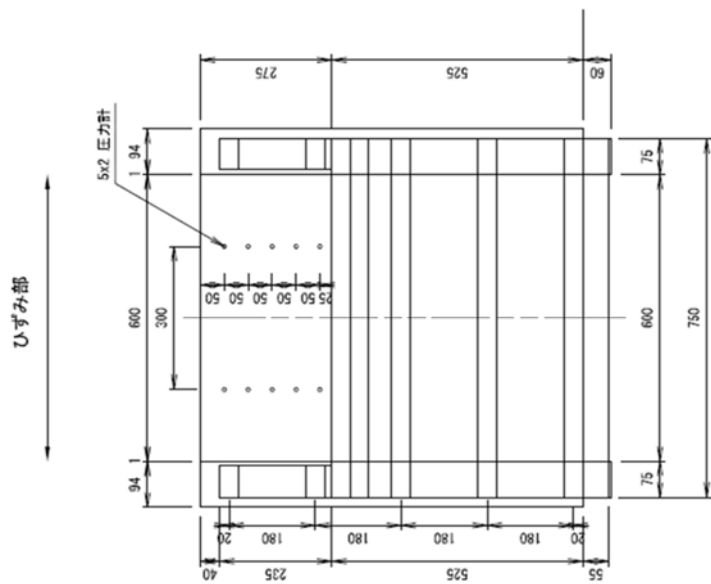
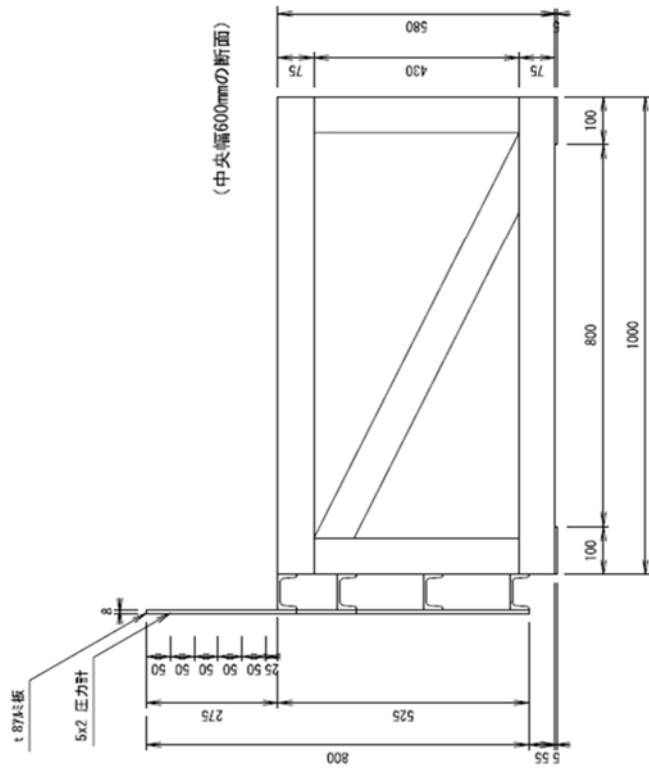
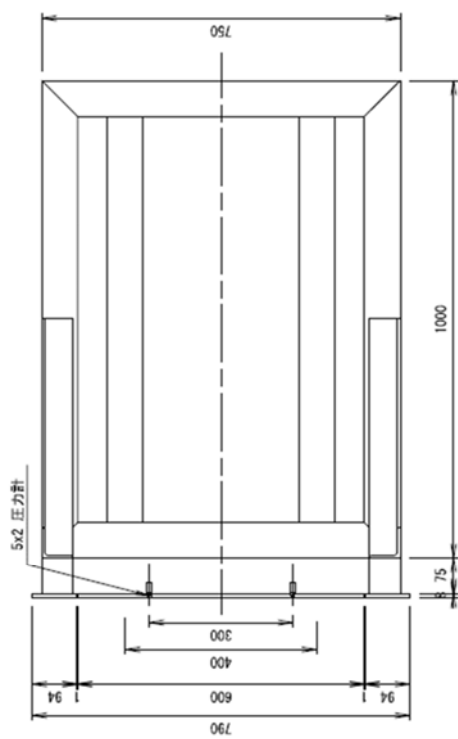


図-2.1.3 堤体模型 (ひずみ模型)

表- 2.1.1 堤体模型諸元 (単位幅 1m 当たり)

	単位	堤体模型 (アルミ製)
ヤング係数 E	kN/mm ²	70.6
高さ h	m	0.275
厚さ d	m	0.00825
断面二次モーメント I	m ⁴	4.6793E-08
曲げ剛性 EI	Nm ²	3.30E+03
密度 ρ	kg/m ³	2680
単位長さ質量 m	kg/m ²	22.1
固有周波数 ω ₁ ^{※1}	rad/s	568.3

※1 片持ち梁の1次モードとして、 $\omega_1 = \frac{3.516}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}$ より算出

2.1.3. 計測項目及び計測方法

計測項目は、水位、流速、圧力・波力、ひずみ、変位、および堤体模型衝突時の波形（動画）とした。各計測項目の計測位置を、図-2.1.4、図-2.1.5に示す。各計測値のサンプリング間隔は、1msとし、全てのデータを同時に計測した。なお、漂流物衝突試験の試験方法については、10章に後述する。

(1) 水位

水位は、容量式水位計により計測した。通過波検定においては、海底地形上での波の進行による波形の変化を記録するため、水位計を3mおきに配置した。陸上部では、干出した状態からの計測となるため、安定した計測結果が得られるよう、地形模型に穴を空け、津波の遡上前でも容量線の先端が水没した状態になるように設置した。

(2) 流速

流速は、電磁流速計、プロペラ流速計、底面電磁流速計、レーザー流速計の4種類を適切に配置して計測した。V3, V5, V7では常に流速計を水没させることが出来るため、電磁流速計により流速を計測した。V3, V5は水深が大きいため、上層下層の2点で計測し、V7では水深が小さいため初期水深の中央高さに設置した。陸上部（V8, V9）では、プロペラ流速計を設置した。なるべく浸水深が小さい範囲でも流速を計測するため、プロペラ流速計の設置位置は、地形模型と干渉しない範囲で底面近傍とした。なお、プロペラ流速計は、プロペラ部が完全に水没しないと流速が正しく計測できない。そのため、特にV9では遡上波の先端部分の流速が計測できないと考えられる。そこでV9では、底面電磁流速計による計測を併用し、プロペラ流速計の結果と整合していることを確認した上で、計測データとしては底面電磁流速計の値を採用した。また、いくつかのケースでは陸上部の流況が水深に比較して非常に大きな流速となる場合が考えられる。この場合、計測装置の後流が剥離して正しく計測出来ない可能性があるため、非接触の計測手法としてレーザードップラー流速計（LDV）による計測を実施し、計測結果の妥当性を確認した。

(3) 圧力・波力

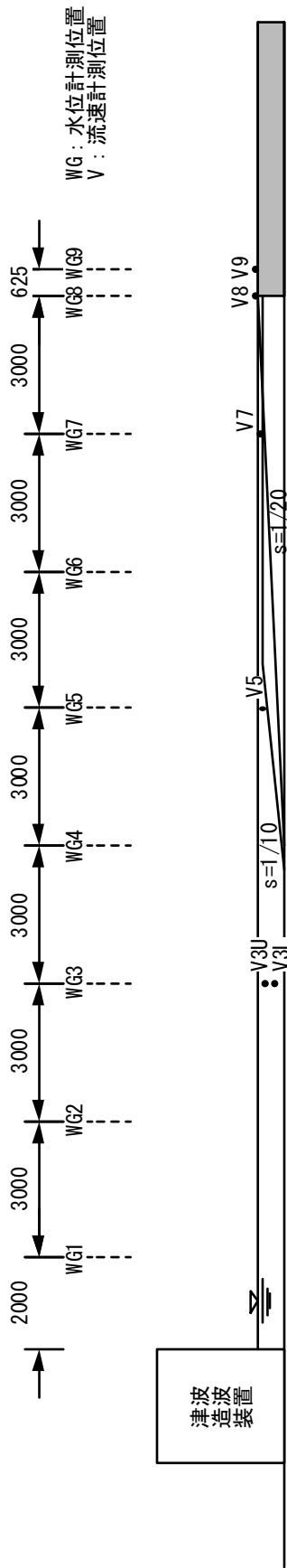
圧力は、超小型圧力計を使用し、図-2.1.5に示すように、堤体模型に圧力計を埋め込んで、圧力を計測した。設置間隔は、鉛直方向に5cm間隔とした。津波波力は、圧力計による圧力計測結果を積分して求めた。

(4) ひずみ・変位

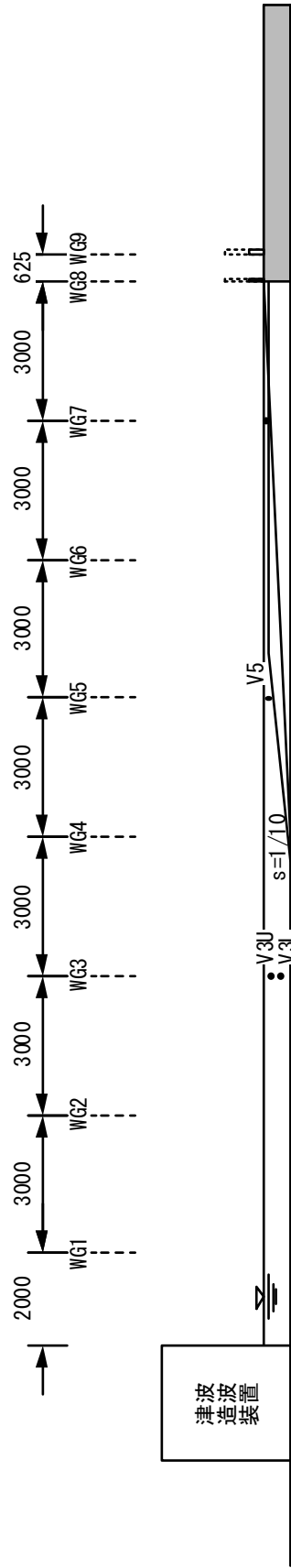
ひずみは堤体模型の裏側にひずみゲージを貼り付けて計測した。計測高さは圧力の計測と同じ高さとし、鉛直方向に5cm間隔とした。また、変位について、堤体模型の水平方向変位をレーザー変位計で堤体裏側から2点で計測した。なお変位計は、波の衝突により、計測装置自体が振動しないように、堤体模型や地形模型から独立させて固定した。

(5) 動画

堤体模型に衝突する津波の状況は、ハイスピードカメラにより撮影した。撮影スピードは、1000fpsとした。動画とその他の計測結果は同期をとり、水位や圧力と比較できるようにした。



(a) 通過波検定試験



(b) 波力/波圧試験

図-2.1.4 各計測項目の計測位置

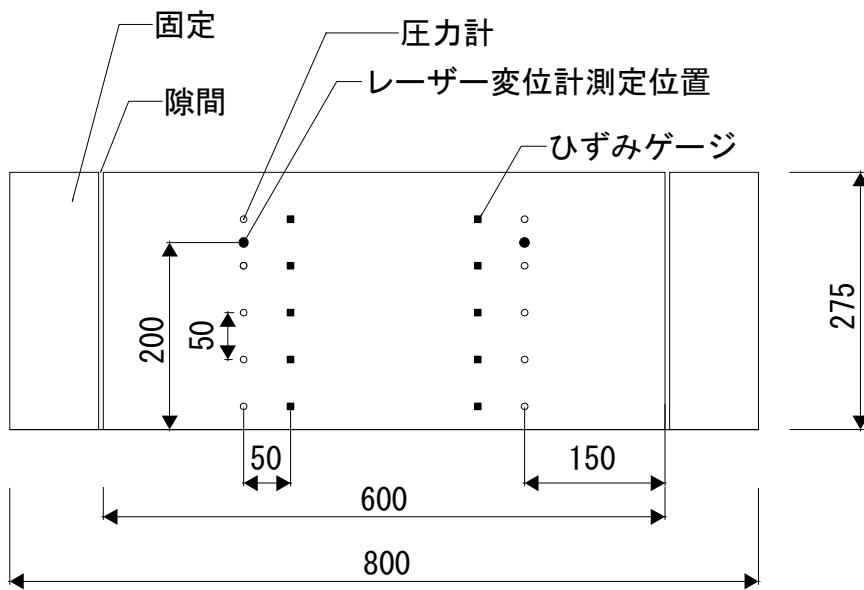
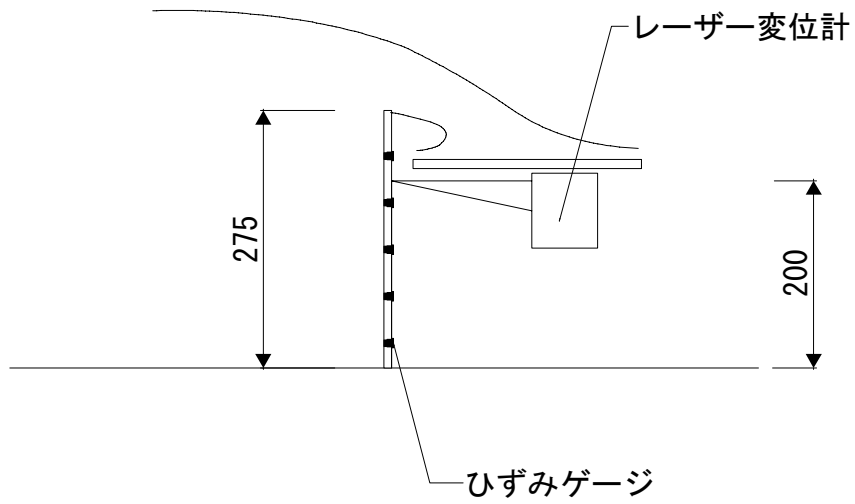


図- 2.1.5 圧力，ひずみ，変位の計測位置（単位：mm）

2.2. 試験ケース

2.2.1. 通過波検定試験

通過波検定試験の試験ケースを、表-2.2.1に示す。単純勾配ケースでは対象波形は7種類、直立護岸ケースでは対象波形は9種類とし、後述する波検定により造波波形を決定した。単純勾配タイプと直立護岸タイプの2種類の地形について、同様の試験を実施した。なお、計測結果の確認のため、同じ試験を3回繰り返した（合計造波回数48回）。

表-2.2.1 通過波検定試験の試験ケース

No	ケース名	地形	波形	繰り返し
1	S-Wc11-0-0	単純勾配 S	Wc11	3
2	S-Wc12-0-0		Wc12	
3	S-Wc13-0-0		Wc13	
4	S-Wc21-0-0		Wc21	
5	S-Wc22-0-0		Wc22	
6	S-Wc31-0-0		Wc31	
7	S-Wc32-0-0		Wc32	
9	F-Wc11-0-0	直立護岸 F	Wc11	
10	F-Wc12-0-0		Wc12	
11	F-Wc13-0-0		Wc13	
12	F-Wc14-0-0		Wc14	
13	F-Wc15-0-0		Wc15	
15	F-Wc21-0-0		Wc21	
16	F-Wc22-0-0		Wc22	
18	F-Wc31-0-0		Wc31	
19	F-Wc32-0-0		Wc32	

2.2.2. 波力/波圧試験

波力/波圧試験における試験ケースを、表- 2.2.2 に示す。堤体模型のケースは、TypeA：波が越流しない高さにしたケース，TypeB：波が越流する高さとし，堤体を剛に固定したケース，TypeC：波が越流する高さとし，ひずみの発生を許容するケース，の3種類とした。模型の設置位置を2種類に変えて，単純勾配タイプと直立護岸タイプの2種類の地形について同様の試験を実施した。なお，試験毎のばらつきを確認するため，同じ試験をA，Cについては15回，Bについては3回繰り返した。また，非越流時の波力/波圧とひずみ関係を確認する目的で，TypeCの堤体模型が汀線位置のケースのみ，波高の小さなケース（Wc10, Wc20, Wc30）について試験を実施した。（合計造波回数 1074 回）

表- 2.2.2 波圧/波力試験の試験ケース

(1) 単純勾配タイプ地形

No	ケース名	地形	波形	堤体	堤体位置	繰り返し
1	S-Wc11-A-1	単純勾配 S	Wc11	A	0m	15
2	S-Wc12-A-1		Wc12	A		
3	S-Wc13-A-1		Wc13	A		
4	S-Wc21-A-1		Wc21	A		
5	S-Wc22-A-1		Wc22	A		
6	S-Wc31-A-1		Wc31	A		
7	S-Wc32-A-1		Wc32	A		
8	S-Wc11-B-1		Wc11	B		3
9	S-Wc12-B-1		Wc12	B		
10	S-Wc13-B-1		Wc13	B		
11	S-Wc21-B-1		Wc21	B		
12	S-Wc22-B-1		Wc22	B		
13	S-Wc31-B-1		Wc31	B		
14	S-Wc32-B-1		Wc32	B		
15	S-Wc10-C-1		Wc10	C		3
16	S-Wc11-C-1		Wc11	C	15	
17	S-Wc12-C-1		Wc12	C		
18	S-Wc13-C-1		Wc13	C		
19	S-Wc20-C-1		Wc20	C	3	
20	S-Wc21-C-1		Wc21	C	15	
21	S-Wc22-C-1		Wc22	C		
22	S-Wc30-C-1		Wc30	C		
23	S-Wc31-C-1		Wc31	C	15	
24	S-Wc32-C-1		Wc32	C		
25	S-Wc11-A-1		Wc11	A		0.625m
26	S-Wc12-A-1		Wc12	A		
27	S-Wc13-A-1		Wc13	A		
28	S-Wc21-A-1		Wc21	A		
29	S-Wc22-A-1		Wc22	A		
30	S-Wc31-A-1		Wc31	A		
31	S-Wc32-A-1		Wc32	A		
32	S-Wc11-B-1		Wc11	B	3	
33	S-Wc12-B-1		Wc12	B		
34	S-Wc13-B-1		Wc13	B		
35	S-Wc21-B-1		Wc21	B		
36	S-Wc22-B-1		Wc22	B		
37	S-Wc31-B-1		Wc31	B		
38	S-Wc32-B-1		Wc32	B	15	
39	S-Wc11-C-1		Wc11	C		
40	S-Wc12-C-1		Wc12	C		
41	S-Wc13-C-1		Wc13	C		
42	S-Wc21-C-1		Wc21	C		
43	S-Wc22-C-1		Wc22	C		
44	S-Wc31-C-1		Wc31	C		
45	S-Wc32-C-1		Wc32	C		

表- 2.2.2 波圧/波力試験の試験ケース

(2) 直立護岸タイプ地形

No	ケース名	地形	波形	堤体	堤体位置	繰り返し
45	F-Wc11-A-1	直立護岸 F	Wc11	A	0m	15
46	F-Wc12-A-1		Wc12	A		
47	F-Wc13-A-1		Wc13	A		
48	F-Wc14-A-1		Wc14	A		
49	F-Wc15-A-1		Wc15	A		
50	F-Wc21-A-1		Wc21	A		
51	F-Wc22-A-1		Wc22	A		
52	F-Wc31-A-1		Wc31	A		
53	F-Wc32-A-1		Wc32	A		
54	F-Wc11-B-1		Wc11	B		
55	F-Wc12-B-1		Wc12	B		
56	F-Wc13-B-1		Wc13	B		
57	F-Wc14-B-1		Wc14	B		
58	F-Wc15-B-1		Wc15	B		
59	F-Wc21-B-1		Wc21	B		
60	F-Wc22-B-1		Wc22	B		
61	F-Wc31-B-1		Wc31	B		
62	F-Wc32-B-1		Wc32	B		
63	F-Wc10-C-1		Wc10	C	0.625m	3
64	F-Wc11-C-1		Wc11	C		
65	F-Wc12-C-1		Wc12	C		
66	F-Wc13-C-1		Wc13	C		
67	F-Wc14-C-1		Wc14	C		
68	F-Wc15-C-1		Wc15	C		
69	F-Wc20-C-1		Wc20	C		
70	F-Wc21-C-1		Wc21	C		
71	F-Wc22-C-1		Wc22	C		
72	F-Wc30-C-1		Wc30	C		
73	F-Wc31-C-1		Wc31	C		
74	F-Wc32-C-1		Wc32	C		
75	F-Wc11-A-1		Wc11	A		
76	F-Wc12-A-1		Wc12	A		
77	F-Wc13-A-1		Wc13	A		
78	F-Wc14-A-1	Wc14	A			
79	F-Wc15-A-1	Wc15	A			
80	F-Wc21-A-1	Wc21	A			
81	F-Wc22-A-1	Wc22	A			
82	F-Wc31-A-1	Wc31	A			
83	F-Wc32-A-1	Wc32	A			
84	F-Wc11-B-1	Wc11	B			
85	F-Wc12-B-1	Wc12	B			
86	F-Wc13-B-1	Wc13	B			
87	F-Wc14-B-1	Wc14	B			
88	F-Wc15-B-1	Wc15	B			
89	F-Wc21-B-1	Wc21	B			
90	F-Wc22-B-1	Wc22	B			
91	F-Wc31-B-1	Wc31	B			
92	F-Wc32-B-1	Wc32	B			
93	F-Wc11-C-1	Wc11	C			
94	F-Wc12-C-1	Wc12	C			
95	F-Wc13-C-1	Wc13	C			
96	F-Wc14-C-1	Wc14	C			
97	F-Wc15-C-1	Wc15	C			
98	F-Wc21-C-1	Wc21	C			
99	F-Wc22-C-1	Wc22	C			
100	F-Wc31-C-1	Wc31	C			
101	F-Wc32-C-1	Wc32	C			

2.3. 試験手順

2.3.1. 波検定

試験に先立ち、試験に用いる造波波形を決定した。本装置で用いる津波造波装置はチャンバー式で、複数の給気バルブの制御により任意波形を造波することが可能となる。波検定では、この複数の給気バルブの開放タイミングと、それぞれのバルブの開口面積を変更しながら、目的の波形状が造波出来るように試行錯誤的に繰り返し造波を行った。目的の波形状は、WG3における波形の計測結果が目的波形に一致するように確認した。

2.3.2. 通過波検定試験

通過波検定試験は、波検定で決定した波形について、堤体模型を設置しないで図-2.1.4に示した位置で水位と流速を時系列で計測した。各堤体模型設置位置における水位（浸水深） η と流速 V の計測結果の時系列を整理した。また同時に、高速度カメラ及び通常のビデオカメラで通過波形状を撮影した。

2.3.3. 波力/波圧試験

堤体模型を設置し、波検定で決定した波形を作用させて堤体模型に働く波力を計測した。圧力の計測値から波力およびモーメントを求める際には、後述するように鉛直方向の圧力の計測値を線形補完し、積分して堤体単位幅あたりの波力を算出した。各計測項目の時系列計測結果を整理し、段波波圧と持続波圧の最大値をそれぞれ波力の最大値として時系列から求めた。繰り返し計測した結果については、その平均値と最大・最小値について整理した。ひずみやレーザー変位計で計測した変位についても、同様に時系列計測結果の整理を行い、段波波圧作用時の最大変位と持続波圧作用時の最大変位をそれぞれ時系列から求めた。また同時に、高速度カメラ及び通常のビデオカメラで通過波形状を撮影した。高速度カメラは、計測結果と同期を取り、波力の時系列を同時に表示できるように動画を編集した。

2.3.4. 波力・モーメントの算定方法

波力およびモーメントは、堤体模型前面に設置した圧力計の計測結果から求めた。圧力は、図-2.1.5 に示す 2 測線で計測しているため、現象の 2 次元性（水槽幅方向に一様）を確認した上で、各高さの圧力を 2 つの圧力計による計測結果の平均値とした。波力の算定は、各圧力計の値に、高さ方向のピッチ 0.05m を乗じて合計することにより算出した（図- 2.3.1 参照）。これは、各高さの圧力計の間の圧力を線形補完したことになる。なお、越流するケースでは 0.05m ピッチの圧力計に対して、最上段に圧力の計測できない範囲が生じる。これについては、最上段 2 つの圧力計の値を外挿した台形状の圧力分布の力を求め、これを加えることにより堤体全体に働く波力を算出した。堤体の底面位置に働くモーメントについても、図- 2.3.1 示した短冊状の波圧を仮定し、それぞれの力に底面からの距離を乗じた値を合計して求めた。

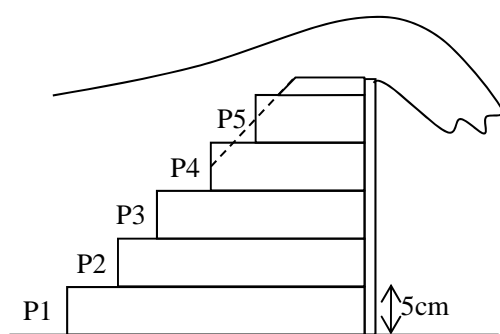


図- 2.3.1 波力の算定方法

3. 通過波検定試験

3.1. 水位時系列

図- 3.1.1, 図- 3.1.2 に, 試験に用いた津波の WG3 地点における沖波の目標水位時系列, 計測水位時系列を示す. Wc11~13, Wc21~22, Wc31~32 それぞれで, 周期特性は同じとし, 波高を変化させた. Wc11~13 は孤立波形状の津波, Wc21~22, Wc31~32 は正弦波形状の津波である. 波高については Wc11~13 は 0.15, 0.2, 0.25m の 3 種類, Wc21~22, Wc31~32 は 0.15, 0.2m の 2 種類とした. また, 直立護岸のケースでは Wc11~13 と同じ周期特性で, 汀線付近で碎波する波形として Wc14~15 の 2 波を加えた.

各計測点における単純勾配および直立護岸の水位時系列計測結果を, 図- 3.1.3, 図- 3.1.4 にそれぞれ示す. なお, 試験はそれぞれ 3 回繰り返しているが, ここには 1 回目の結果を示した. 単純勾配のケースでは, 汀線位置である WG8(η 8)において, 波形の立ち上がり時に短時間の水位上昇が現れているケースがある. 単純勾配では, 汀線位置まで徐々に水深が小さくなるため, 波形の前傾化が顕著となり, 汀線近傍で碎波する. この時, 巻き波状態で計測点を通過するため短時間の水位上昇が現れる. 計測された水位は碎波状態の水位を計測しているため, 底面から連続する水深を計測しているものではないことに注意が必要である. 直立護岸のケースでは, WG7(η 7)の計測結果に, 短周期の波が含まれているケースがある (例えば Wc15). これは, 津波の進行とともに先端部分が非線形性, 分散性により分裂したものである.

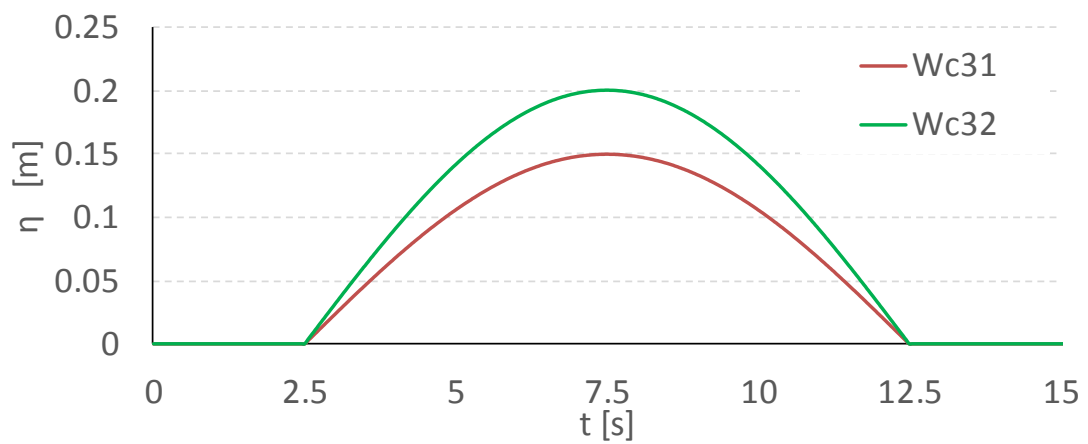
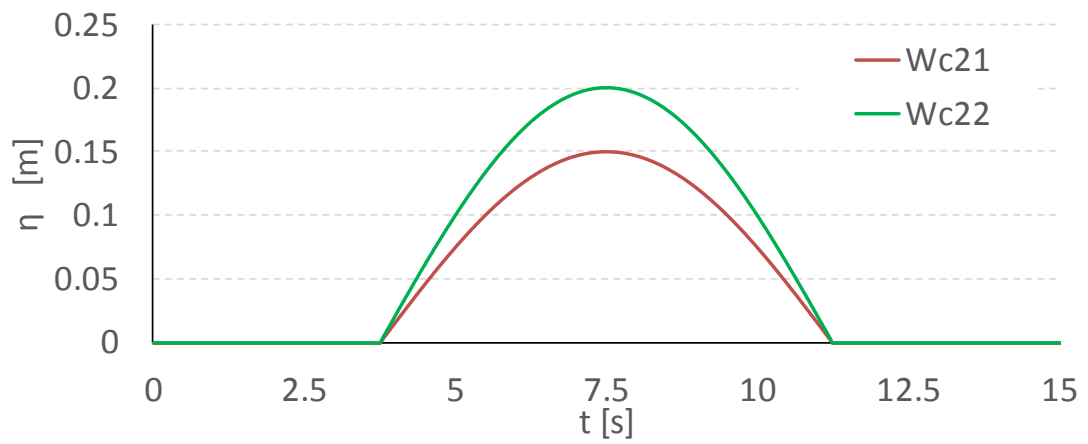
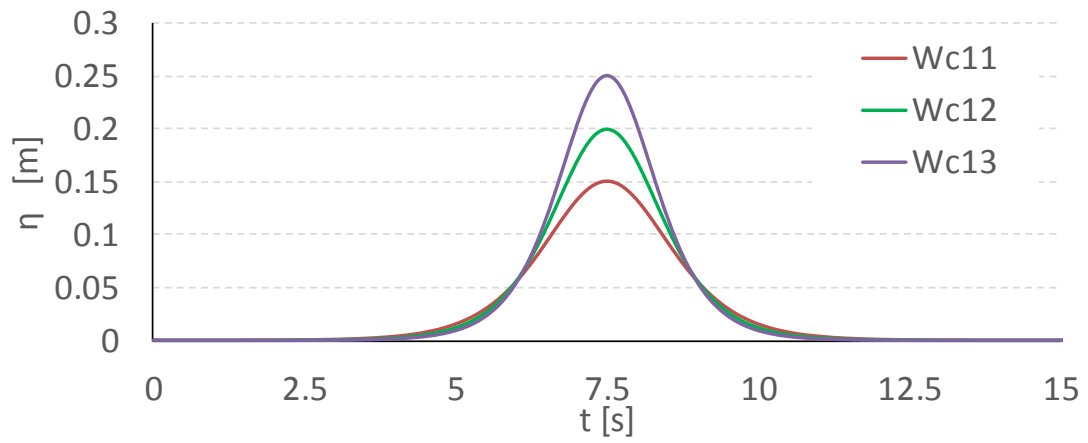


図- 3.1.1 入射津波の目標波形(η 03)

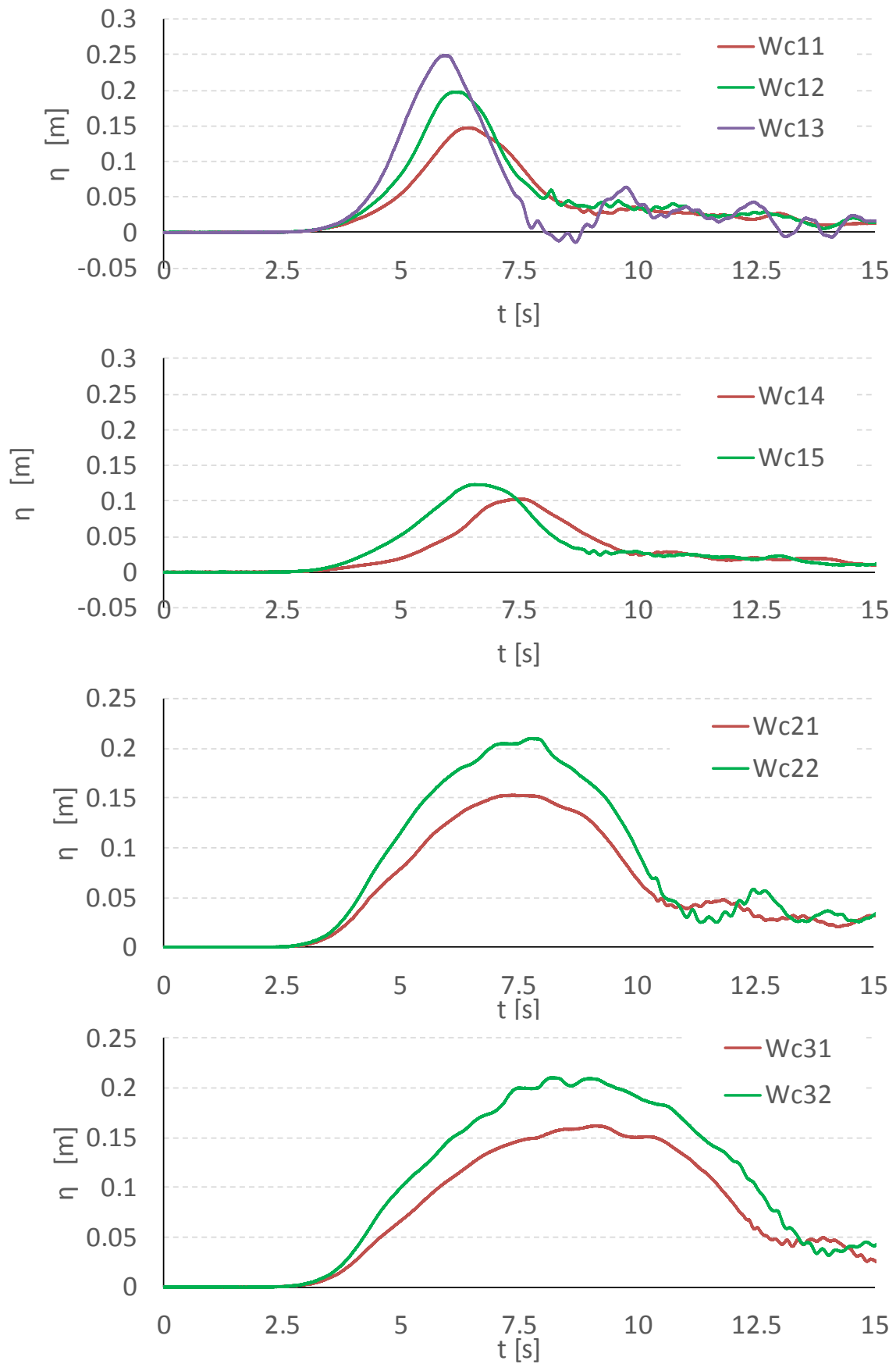


図- 3.1.2 入射津波の水位計測結果(η 03)

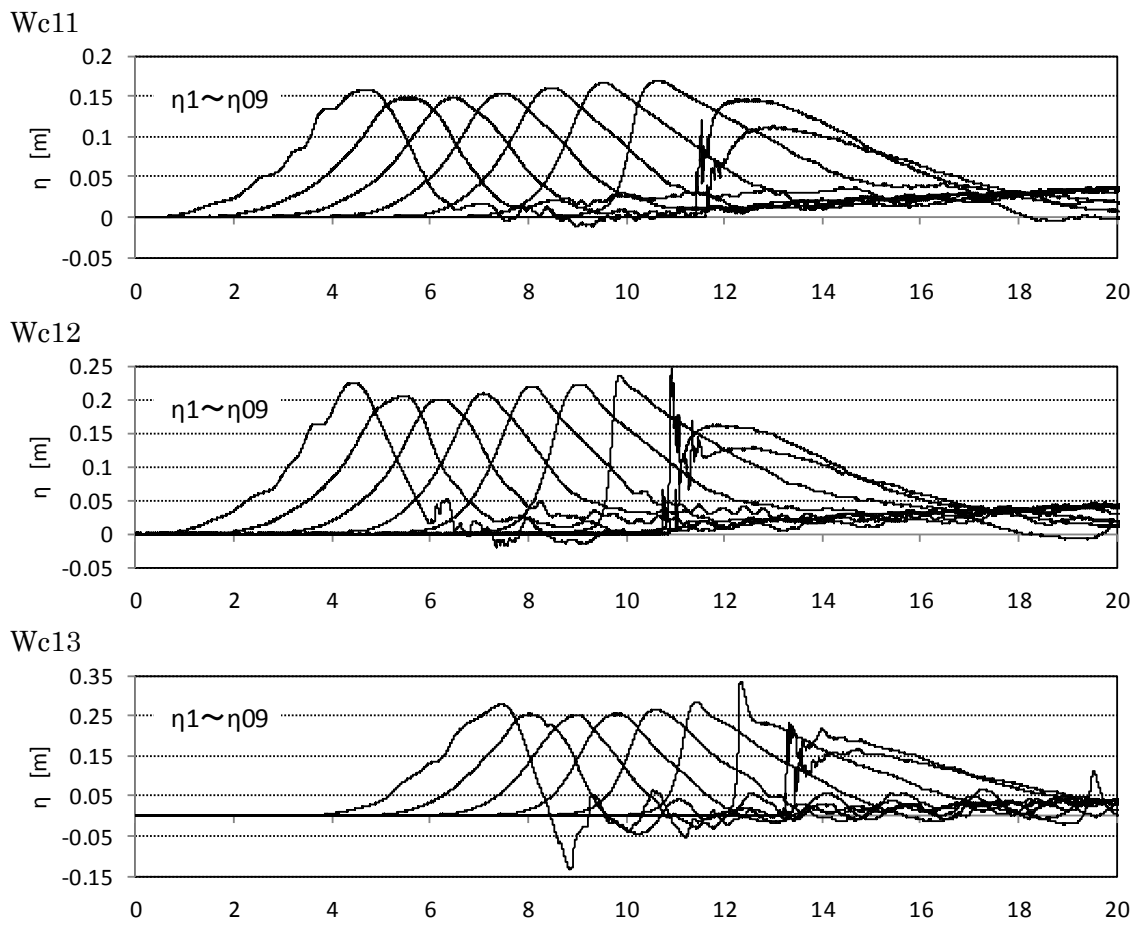


図- 3.1.3 各測定点の水位時系列 (単純勾配, $\eta_1 \sim \eta_7$: 海域, η_8 : 汀線, η_9 : 陸上部)

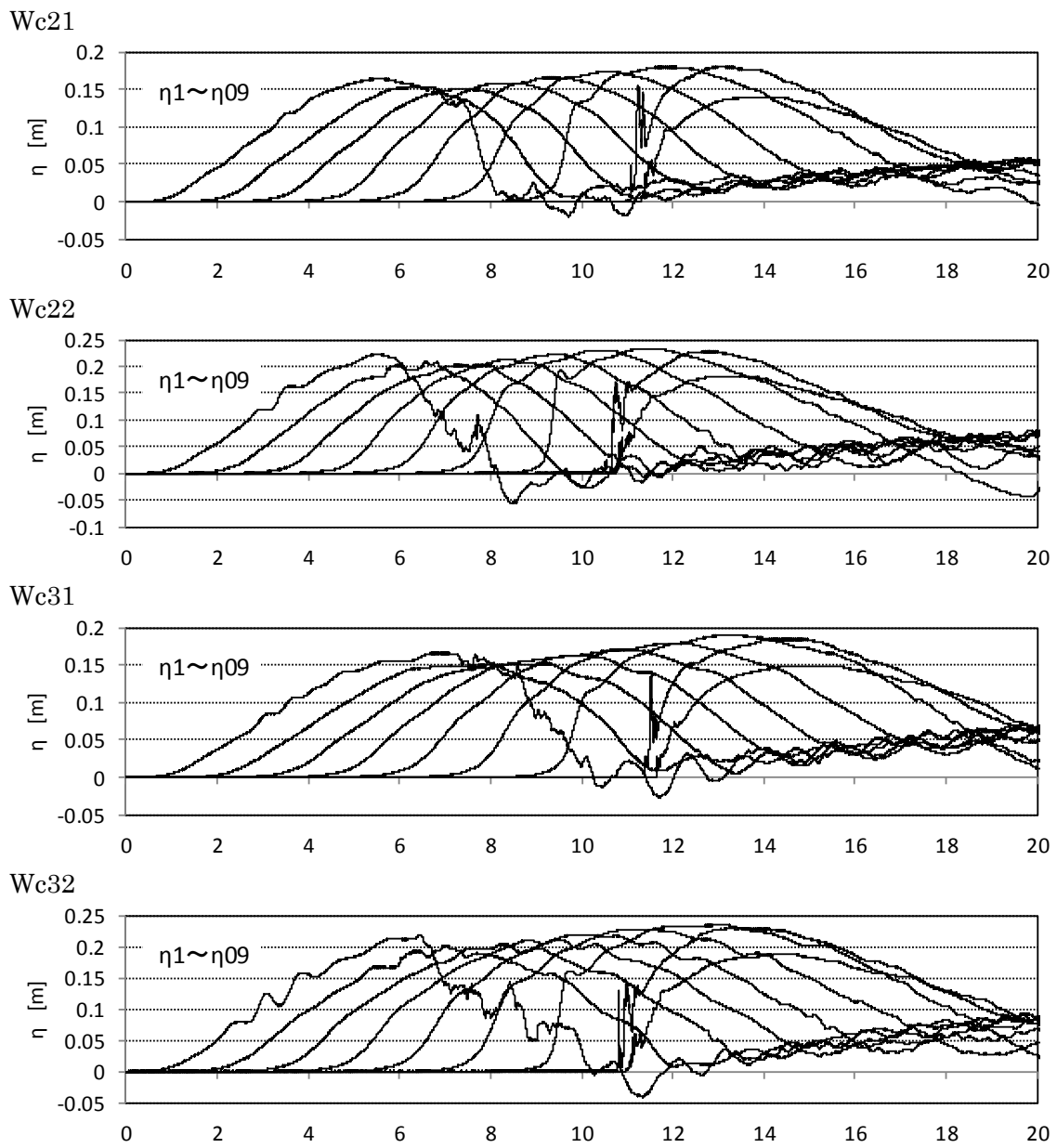


図-3.1.3 各測定点の水位時系列（単純勾配， $\eta 1 \sim \eta 7$ ：海域， $\eta 8$ ：汀線， $\eta 9$ ：陸上部）

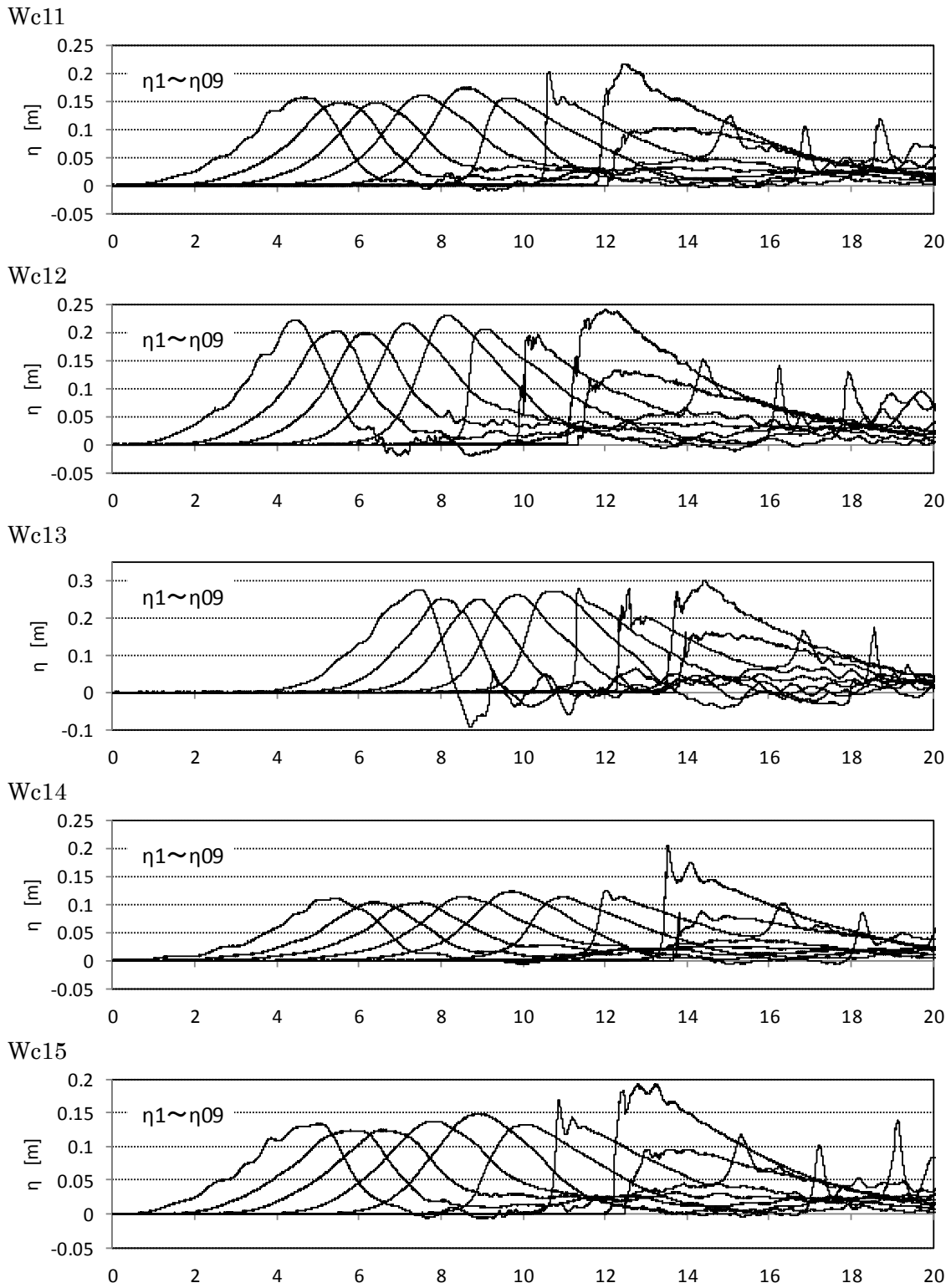


図- 3.1.4 各測定点の水位時系列 (直立護岸, $\eta 1 \sim \eta 7$: 海域, $\eta 8$: 汀線, $\eta 9$: 陸上部)

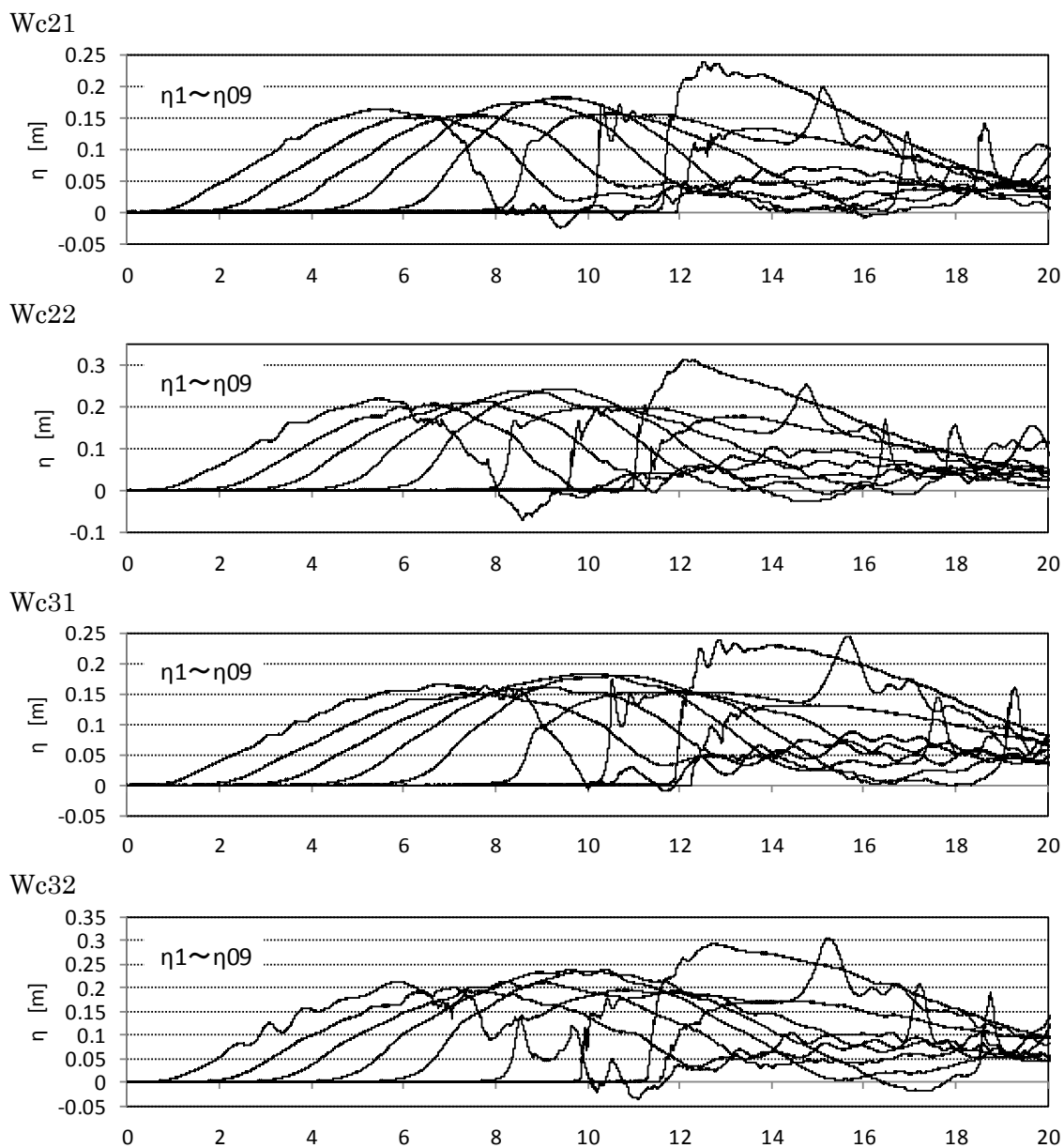


図- 3.1.4 各測定点の水位時系列（直立護岸， $\eta 1 \sim \eta 7$ ：海域， $\eta 8$ ：汀線， $\eta 9$ ：陸上部）

3.2. 通過波浸水深と流速

陸上物の堤体模型設置位置における浸水深、流速の時系列変化を、図- 3.2.1、図- 3.2.2 にそれぞれ示す。陸上部 (P.09) の流速については、プロペラ流速計、底面電磁流速計による計測結果をそれぞれ、V09、V09B として示した。なお、P.08 では、地形が屈曲しており底面電磁流速計を設置できないため、プロペラ流速計の計測のみとしている。プロペラ流速計の結果と底面電磁流速計の結果を比較すると、流速の計測結果はほぼ一致している。ただし、プロペラ流速計の計測結果では、波形の到達した直後の流速の計測結果が小さい。プロペラ流速計では、津波の到達直後は水位が低く、流速計のプロペラ部分が完全に没水していないため、計測結果が小さくなっていると考えられる。以降の試験結果の解析では、P.09 については津波到達時の流速の立ち上がり大きい底面電磁流速計の計測結果を採用している。

浸水深は波形により様々な形状を呈しているが、流速は津波到達時が最も大きく、時間とともに単調に小さくなることが分かる。後述するフルード数の変化からも明らかのように、遡上した津波は、最初に水深が小さく流速の大きい射流の状態であり、時間とともに徐々に流速が低下して常流の状態へと遷移していることが分かる。

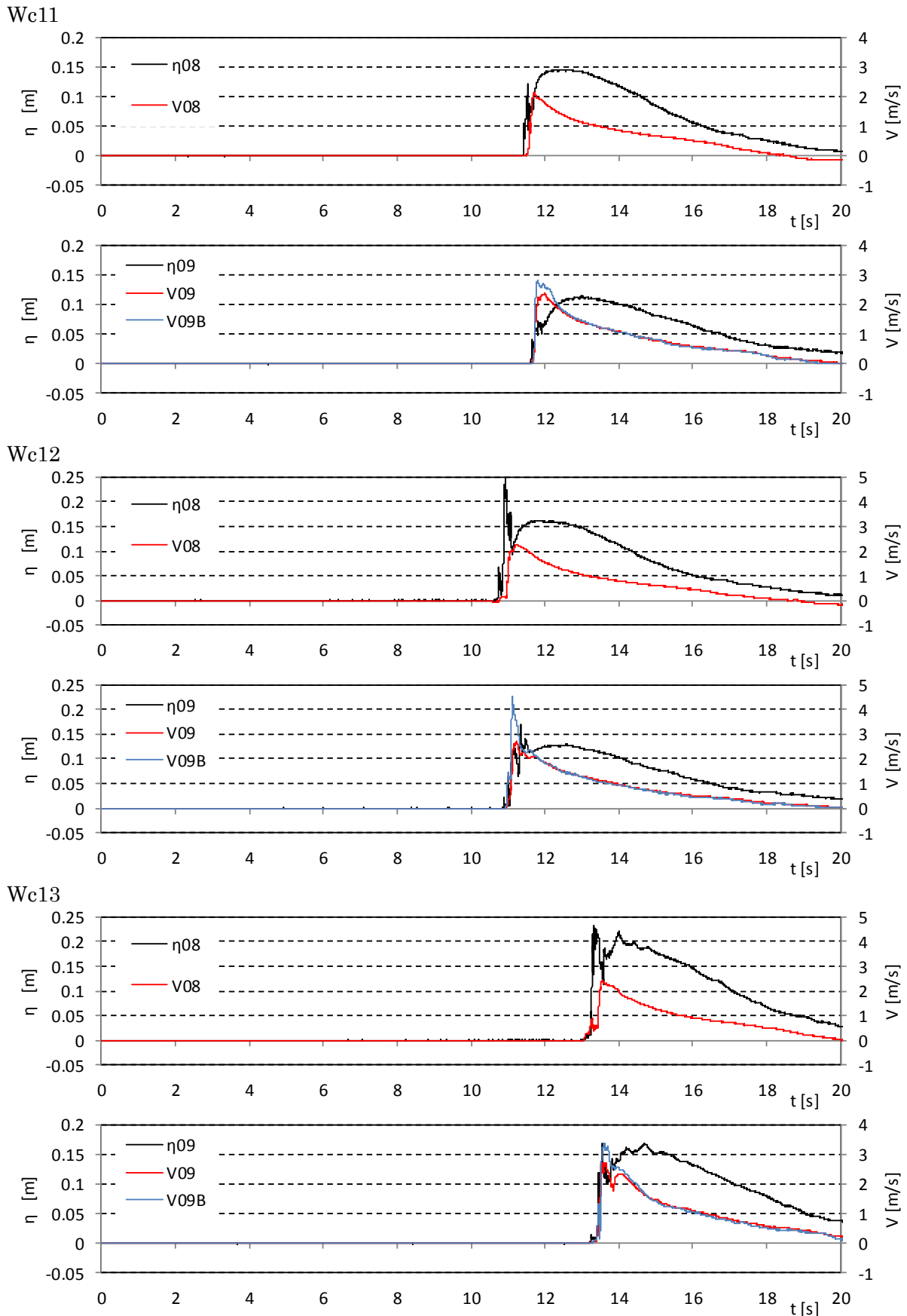


図- 3.2.1 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配)

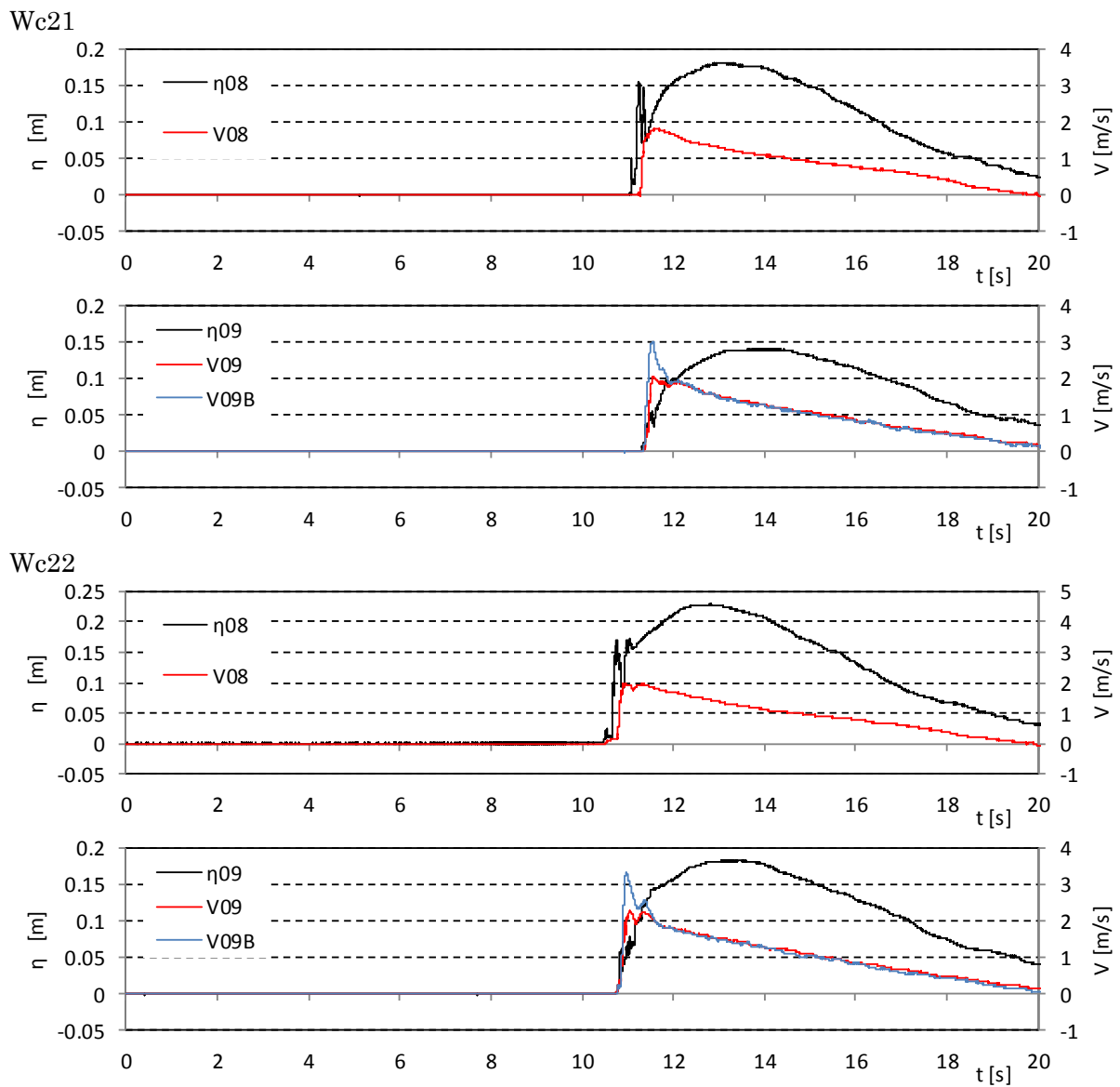


図- 3.2.1 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配)

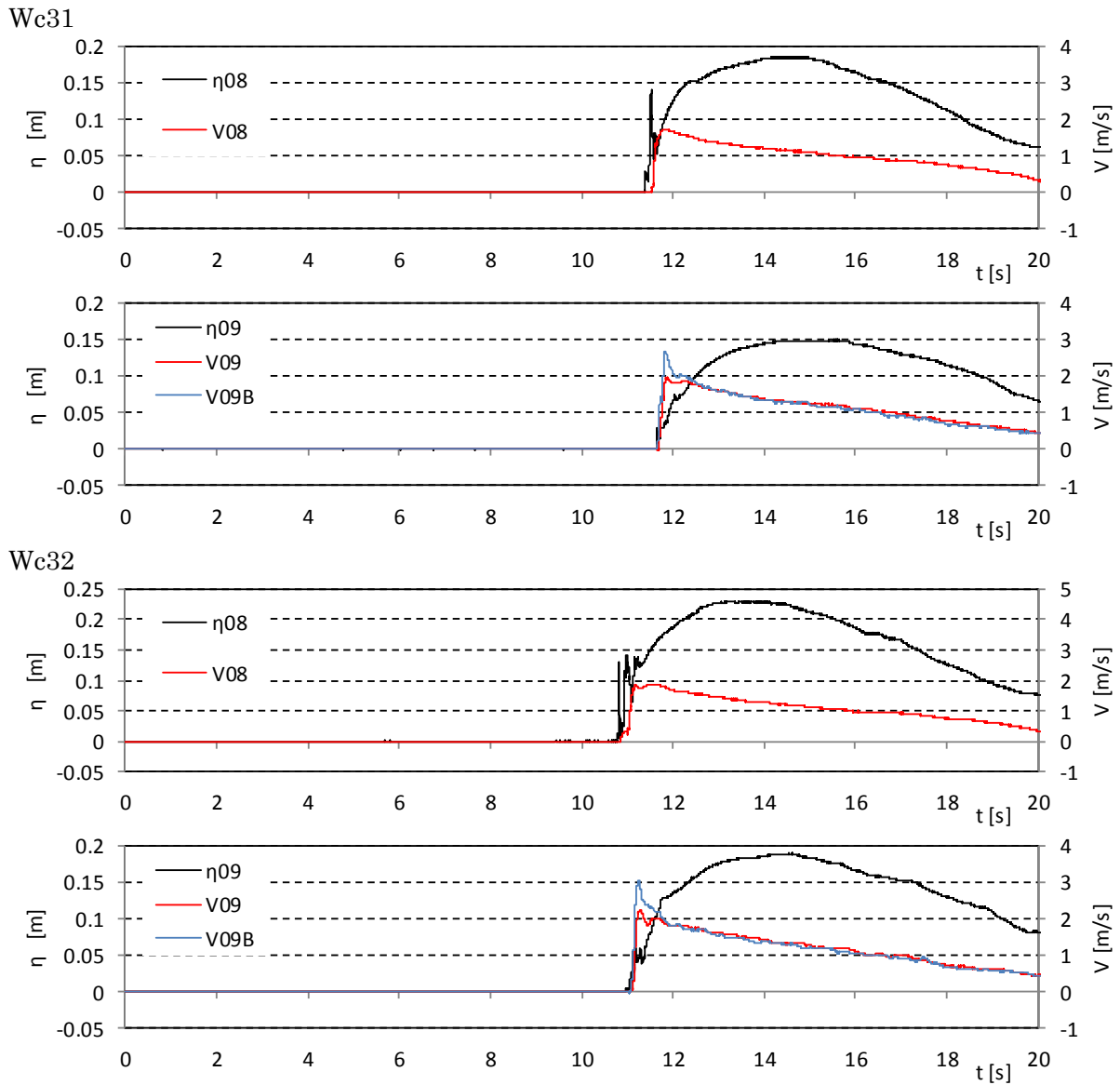


図- 3.2.1 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (単純勾配)

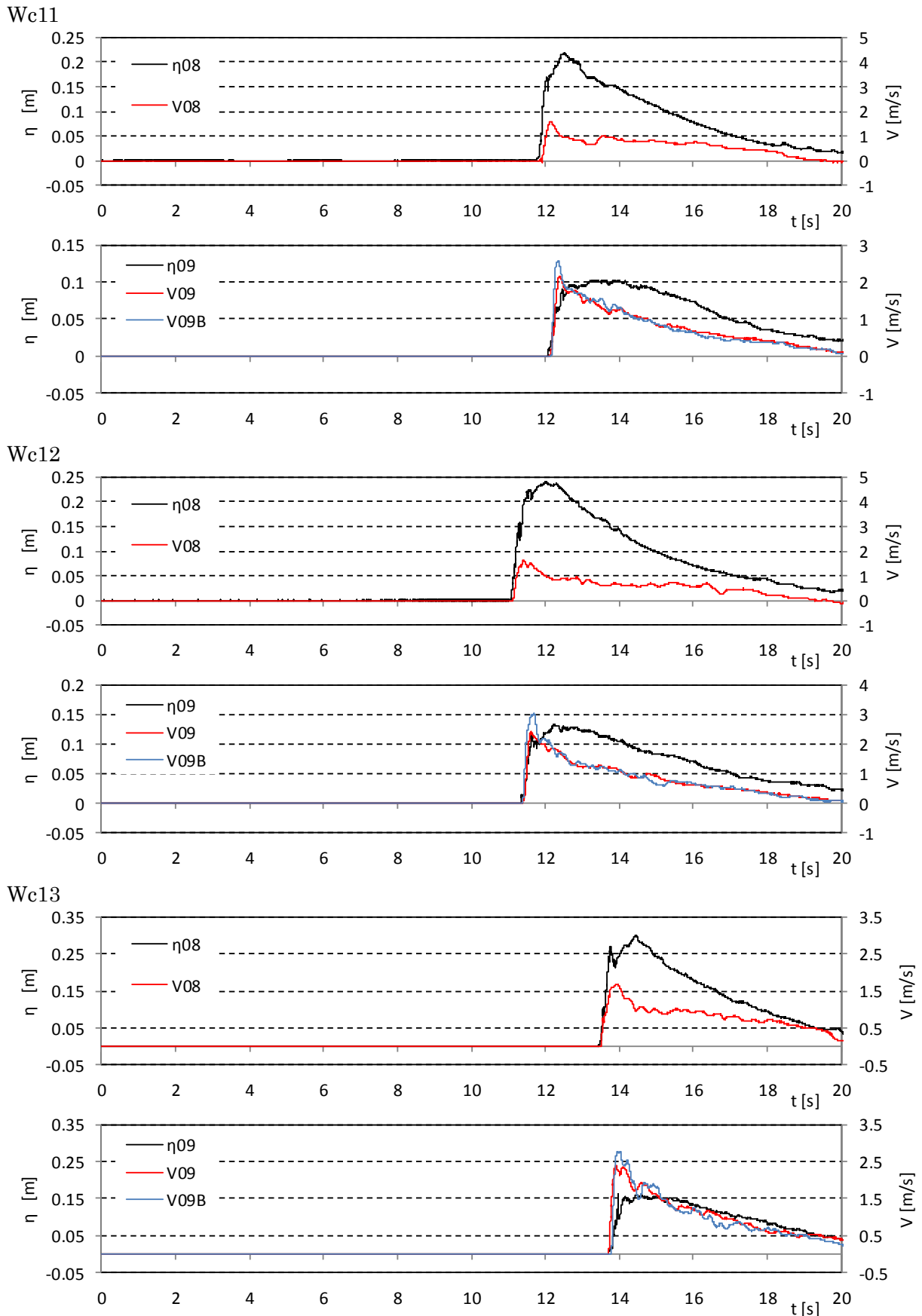


図- 3.2.2 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸)

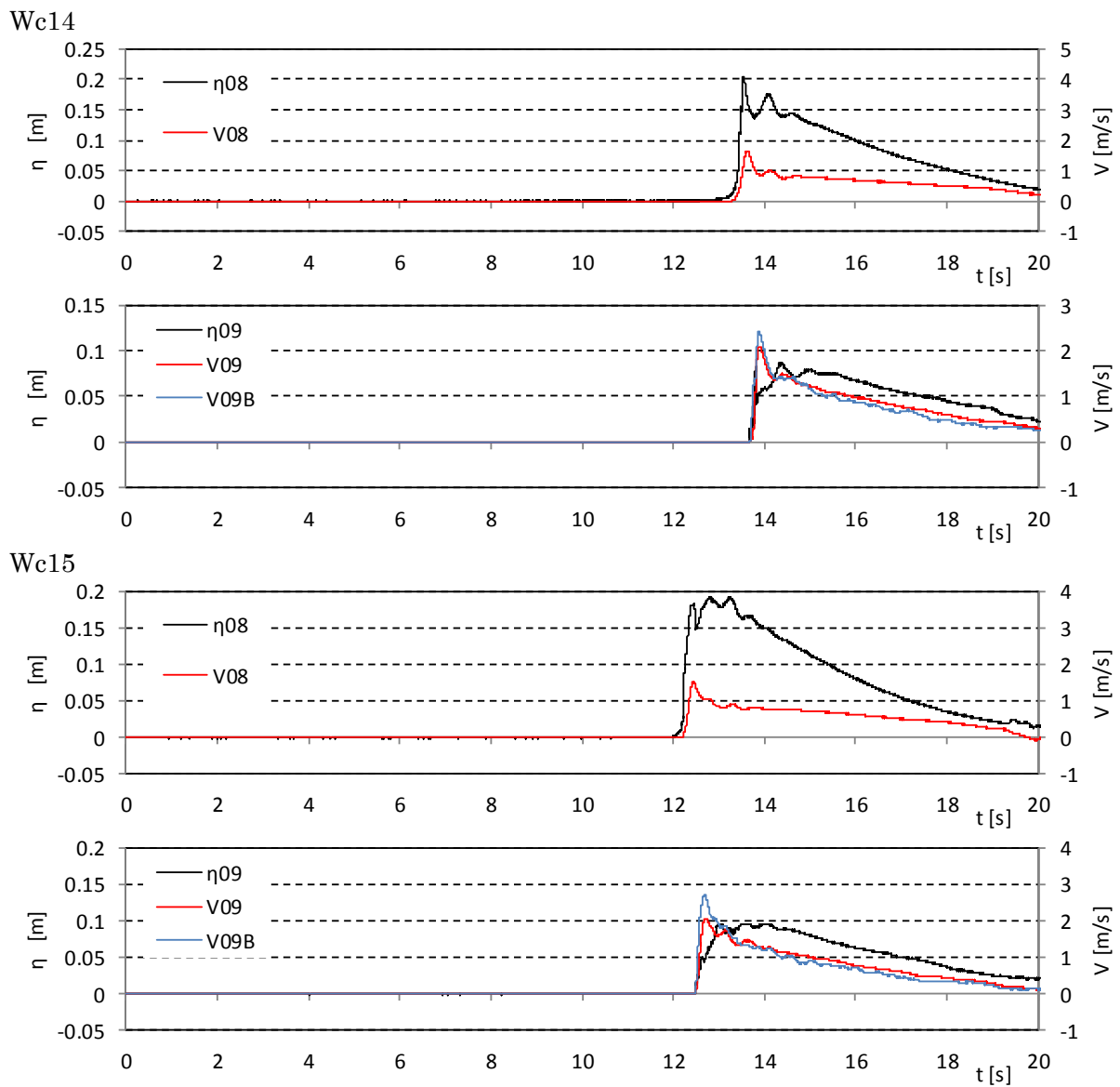


図-3.2.2 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸)

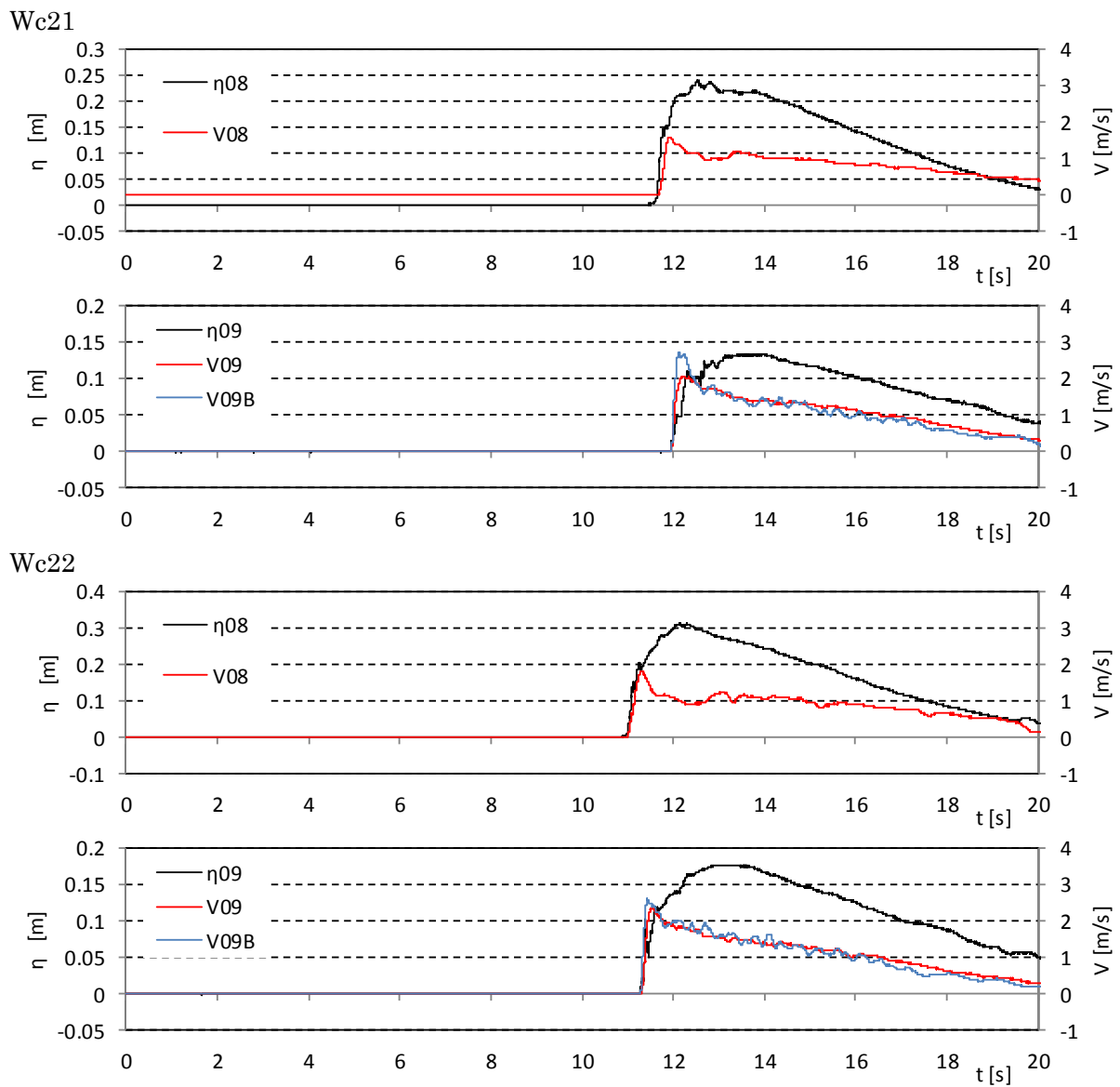


図-3.2.2 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸)

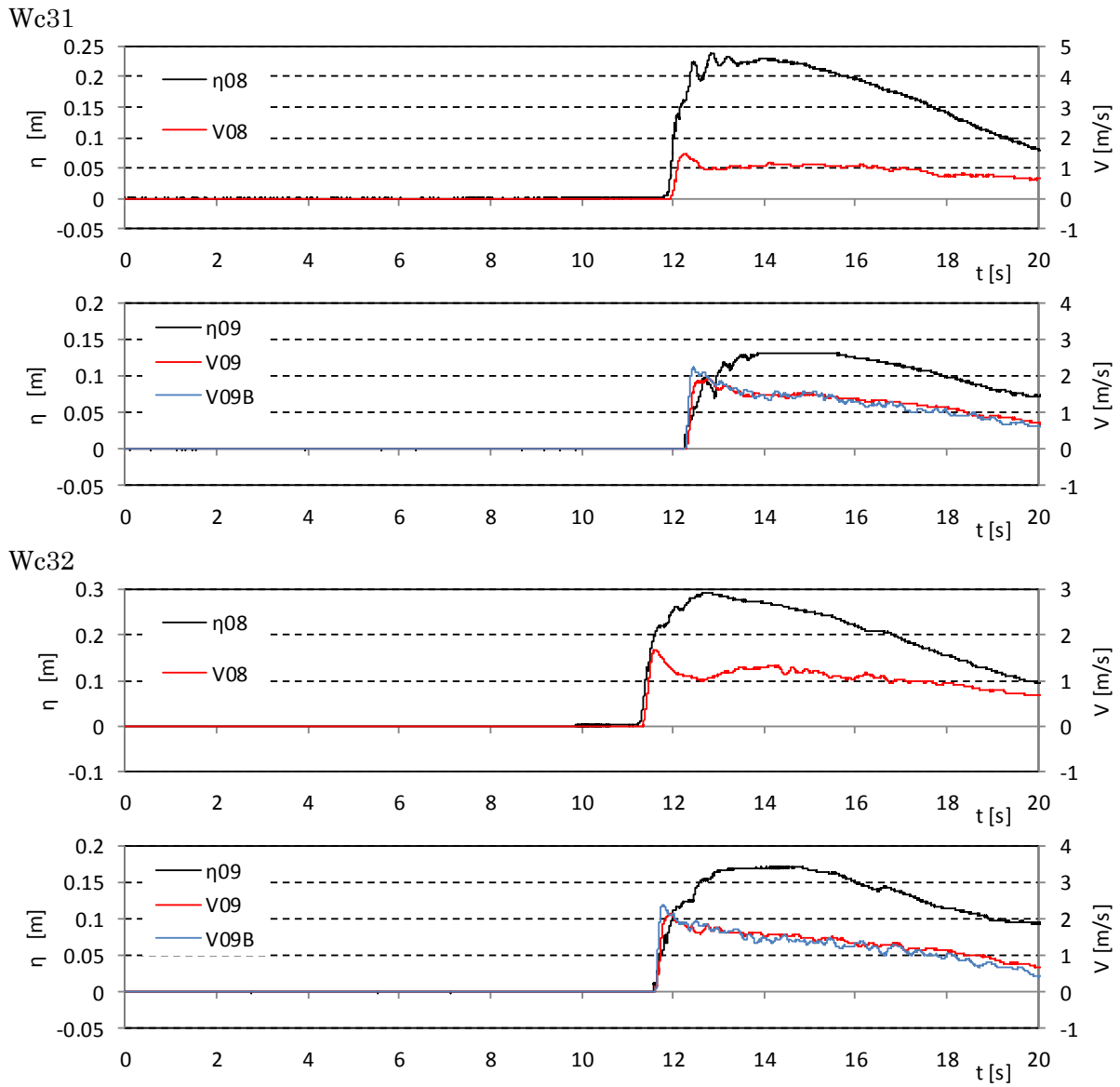


図-3.2.2 防潮堤設置位置における浸水深と流速の時系列 (直立護岸)

3.3. 通過波のフルード数と比エネルギー

防潮堤位置における通過波の浸水深、比エネルギー、フルード数の時系列を、図- 3.3.1, 図- 3.3.2 に示す。ここで比エネルギー E は、以下の式によって算出される。

$$E = \eta + \frac{V^2}{2g}$$

また、一般にフルード数 Fr は、同じ時間の水位と流速から求められ、以下の式によって算出される無次元数である。

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g\eta}}$$

ここで、 η は通過波の浸水深、 V は通過波の流速である。

図- 3.3.1, 図- 3.3.2 によると、フルード数は、概略津波到達時に最大値を示し、その後流速と同様に、時間経過とともに小さくなることが分かる。一方、比エネルギーについては、最大値は津波到達時に生じ、その後徐々に低下するものの、フルード数に比較するとその低下の程度は小さく、最大浸水深発生までの間は緩やかに低下している。

直立護岸の汀線位置 (P.08) では、波形の初期においてフルード数が 1.0~1.3 の最大値を示し、その後 0.7 程度のほぼ一定値となっている。護岸を越流する際には、支配断面が汀線の少し陸側（下流側）に発生していると考えられ、支配断面では $Fr=1$ となる。そのため汀線位置では、これよりも少し小さい値でほぼ一定値を示していると考えられる。また、単純勾配と直立護岸を比較すると、単純勾配では P.08 と P.09 で、堤体模型の設置位置によらず類似の時系列を示しているのに対し、直立護岸では、両者が異なった時系列形状となっている。このことから、直立護岸の汀線位置に堤体模型を設置したケースでは、他のケースとは異なった流況となっていることが想定される。

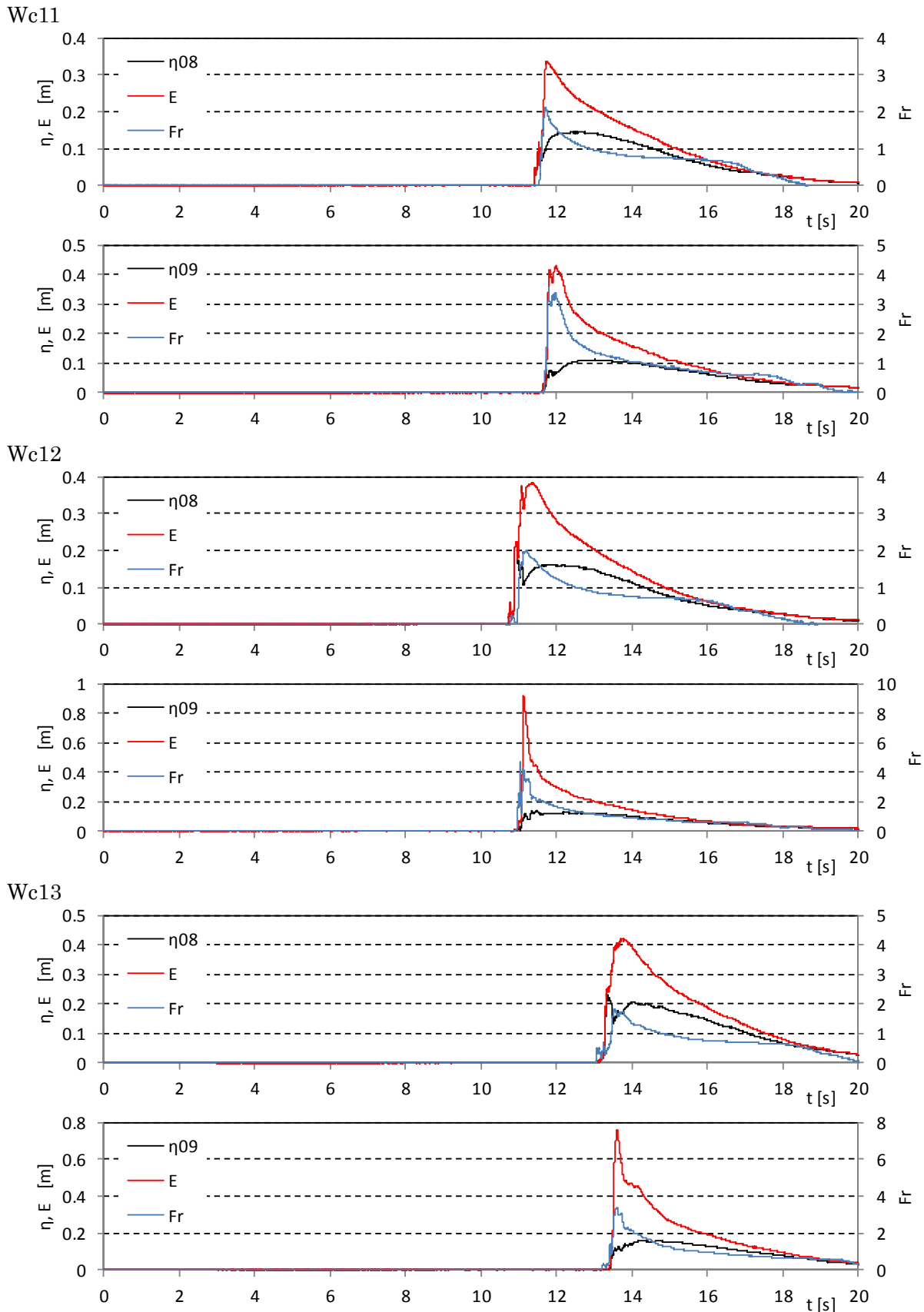


図- 3.3.1 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列 (単純勾配)

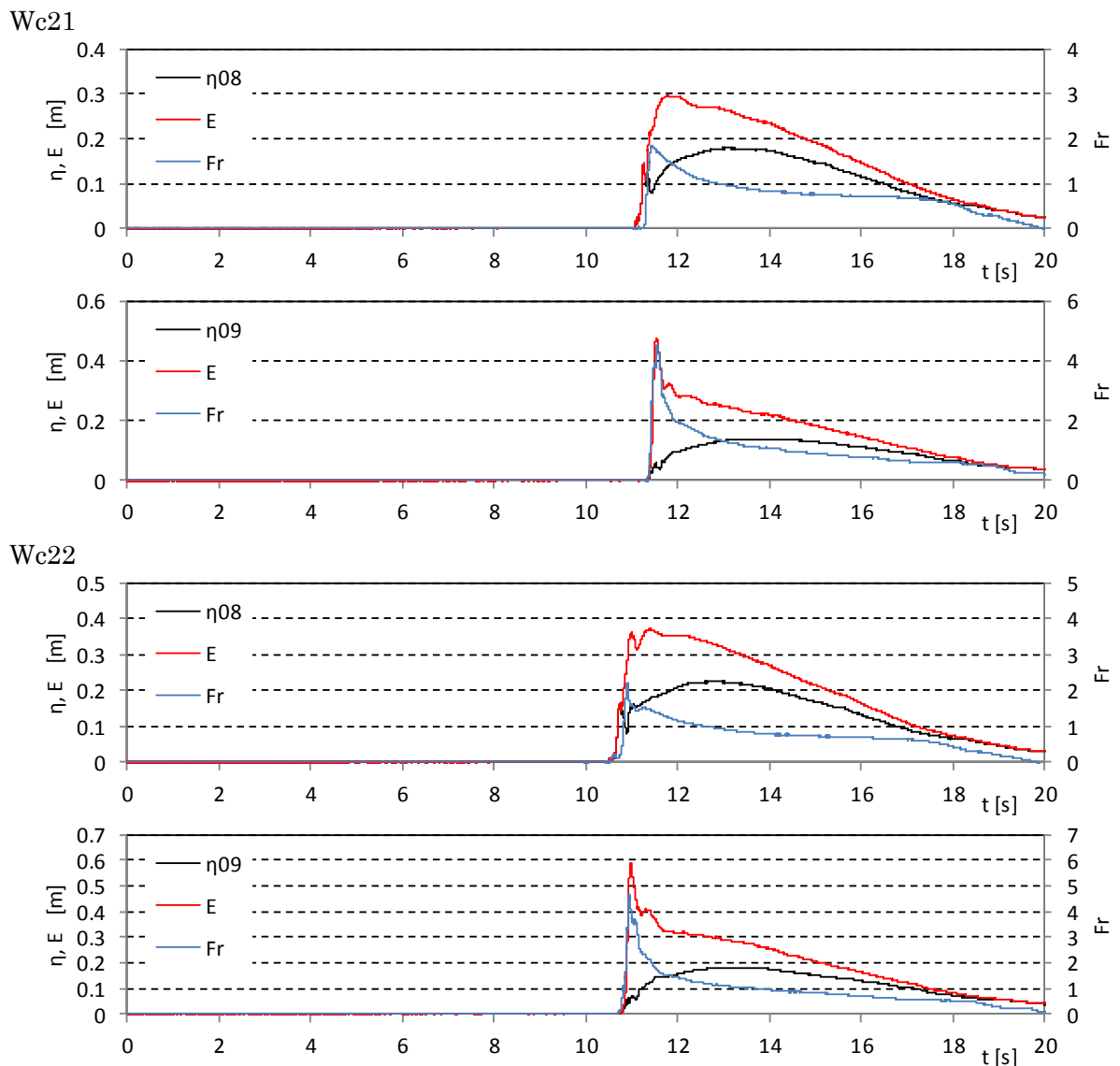
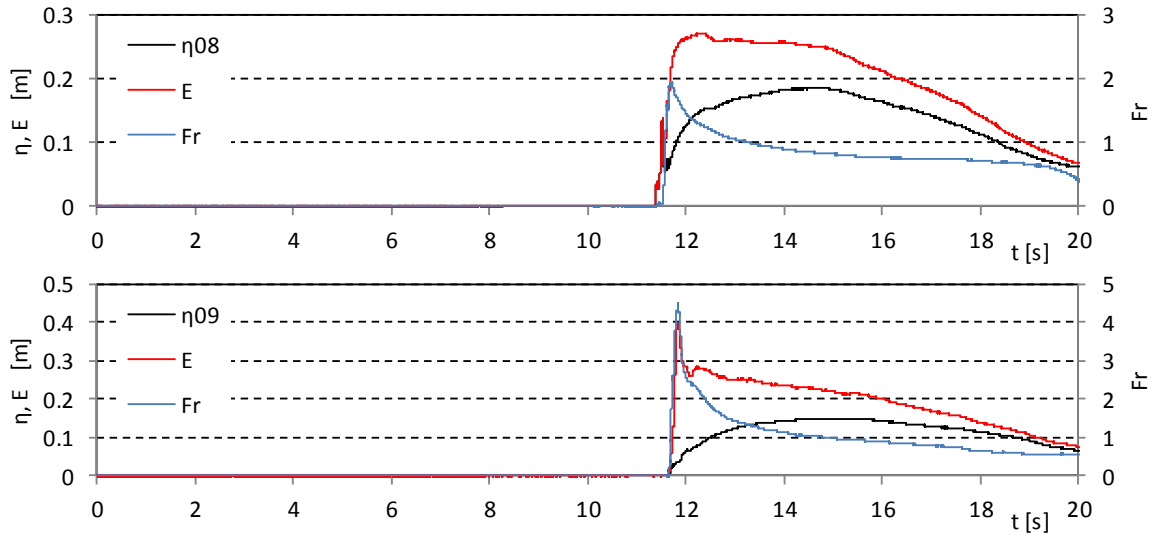


図- 3.3.1 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列 (単純勾配)

Wc31



Wc32

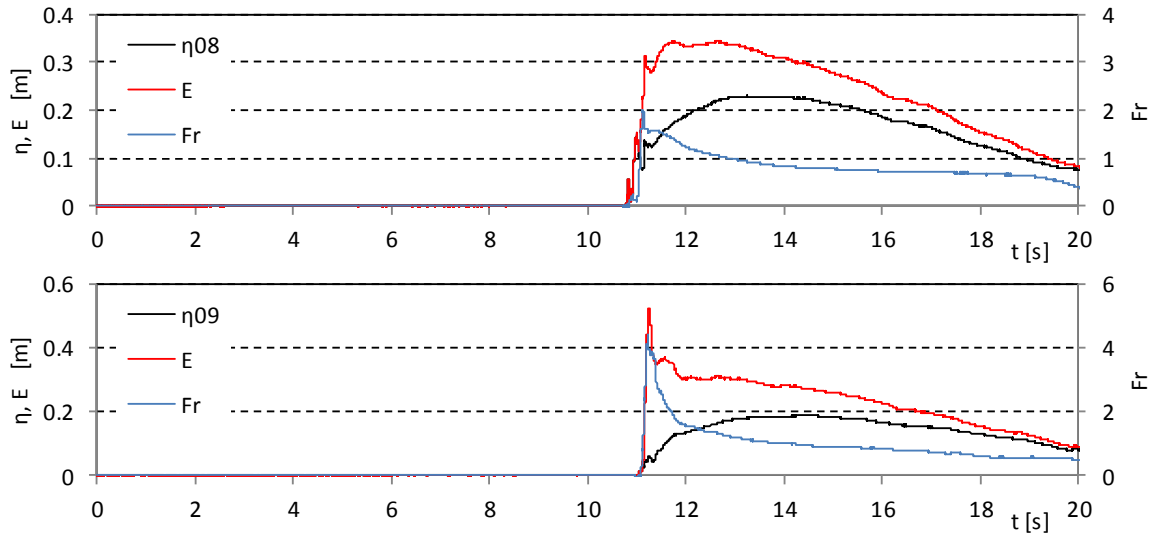


図- 3.3.1 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列 (単純勾配)

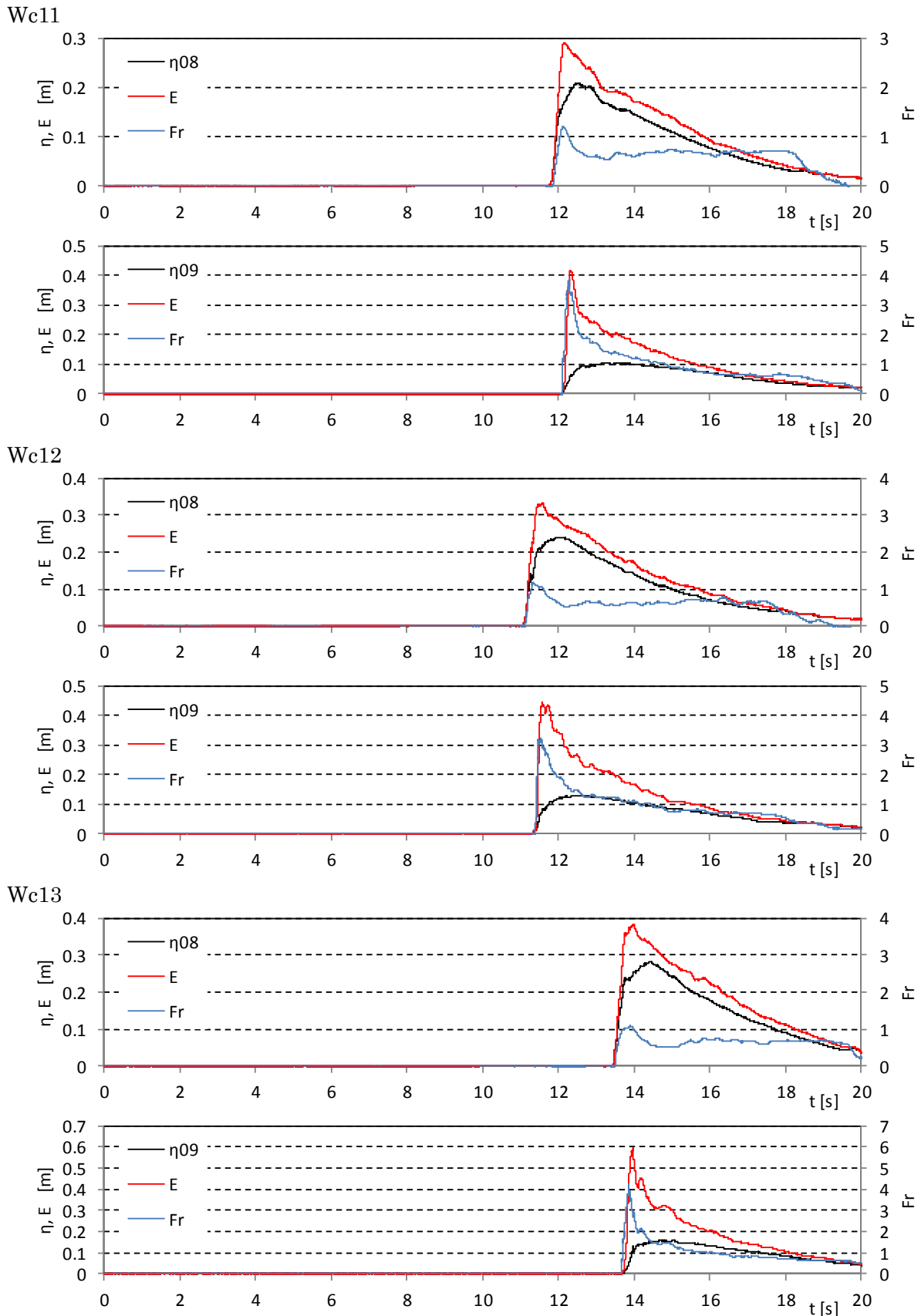
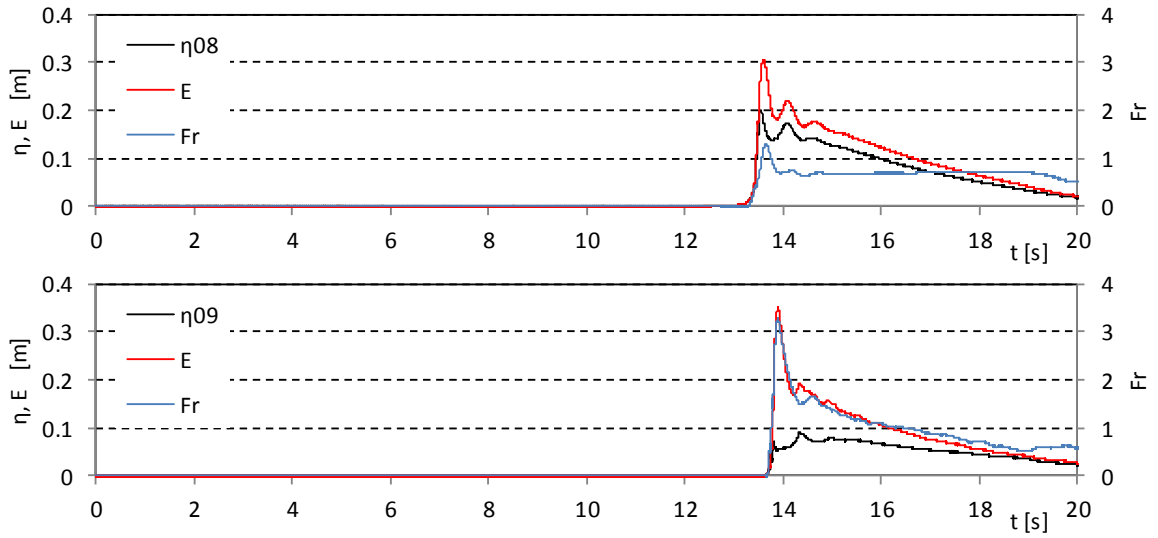


図- 3.3.2 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列 (直立護岸)

Wc14



Wc15

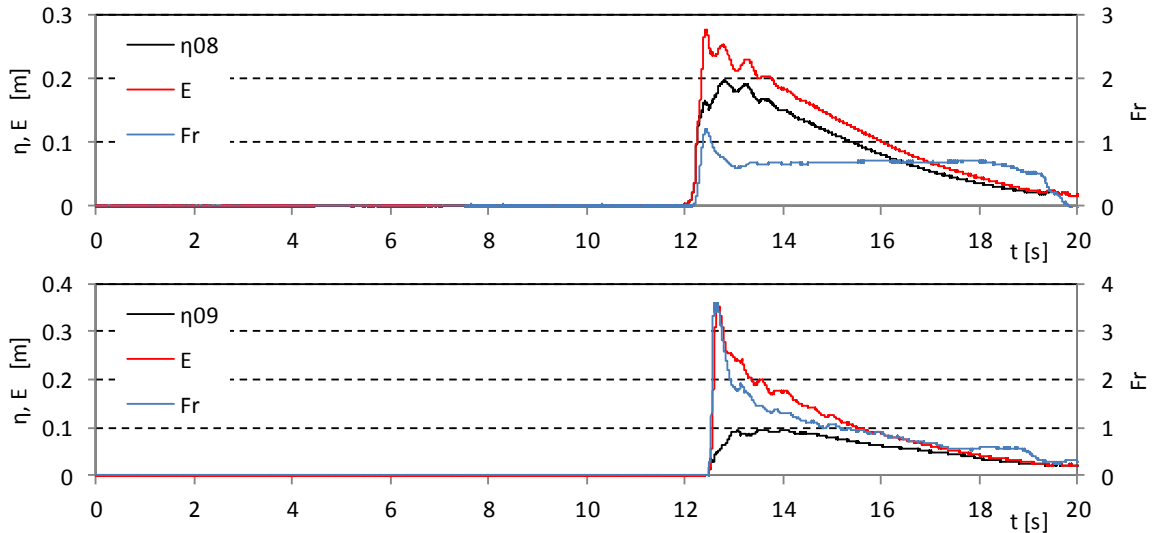
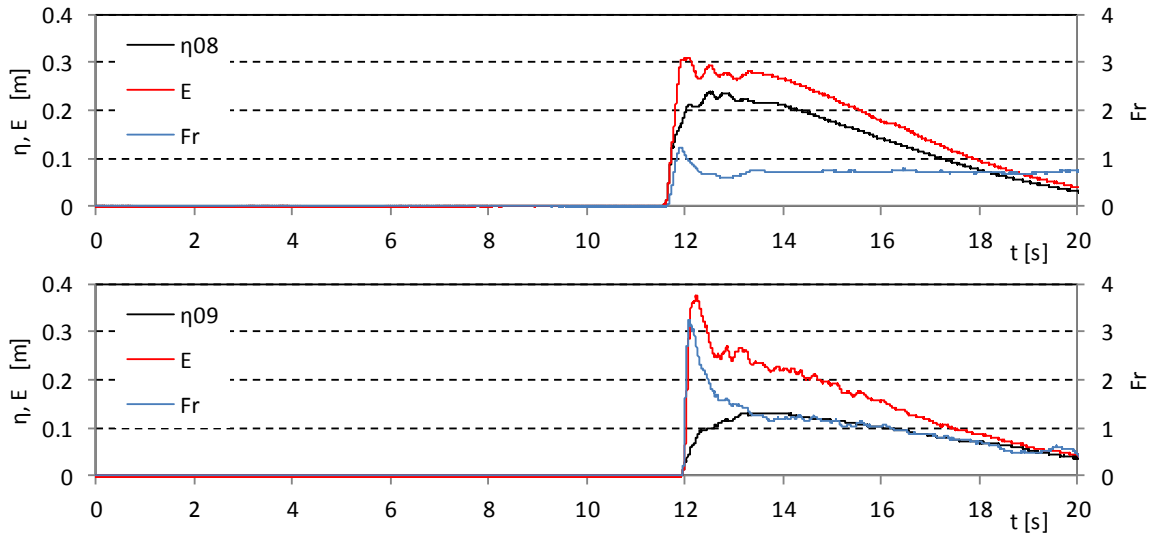


図- 3.3.2 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列 (直立護岸)

Wc21



Wc22

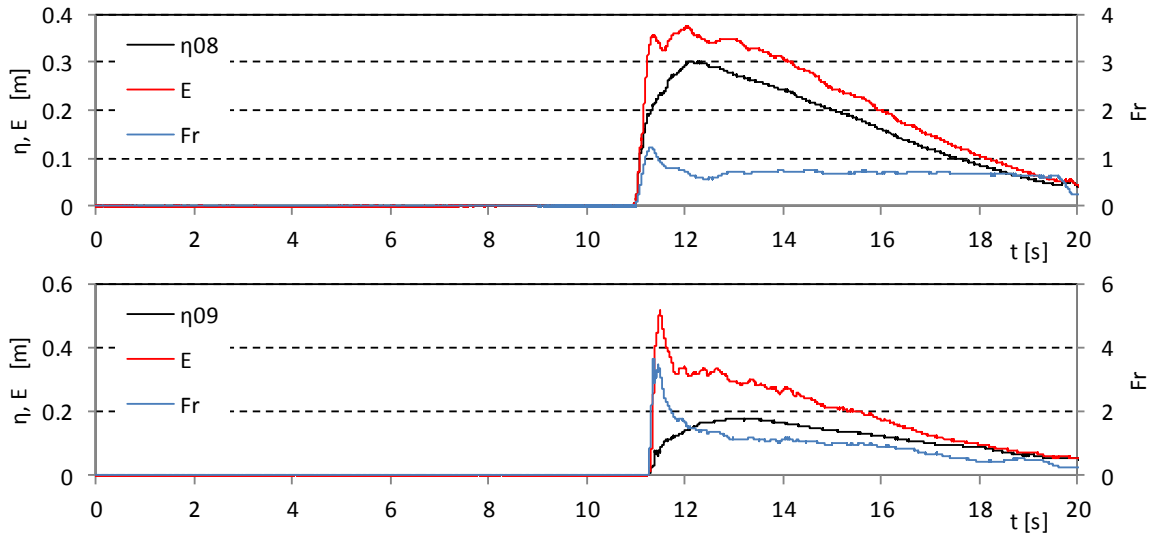
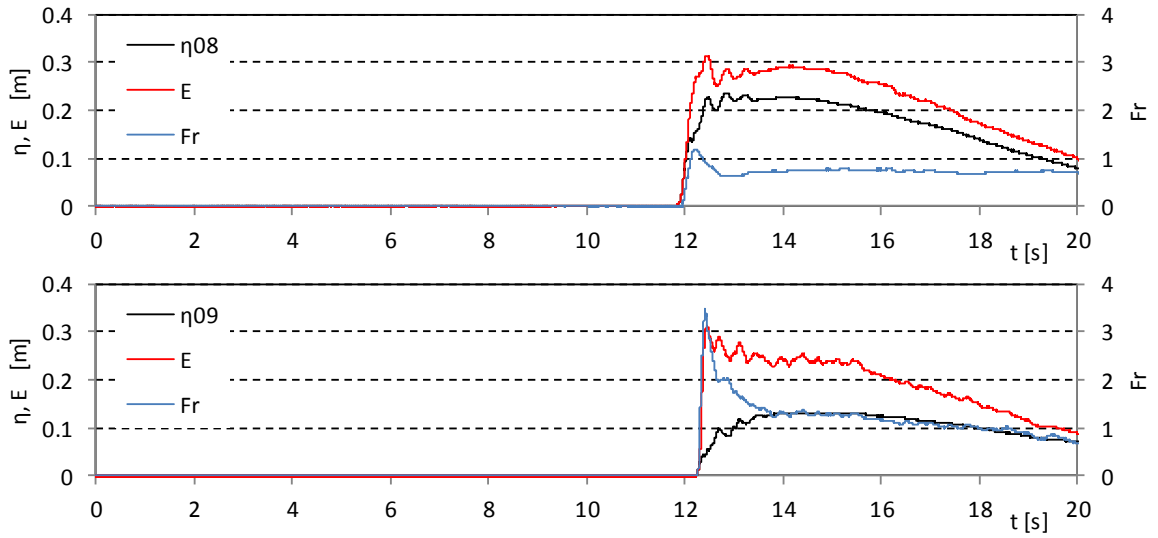


図- 3.3.2 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列 (直立護岸)

Wc31



Wc32

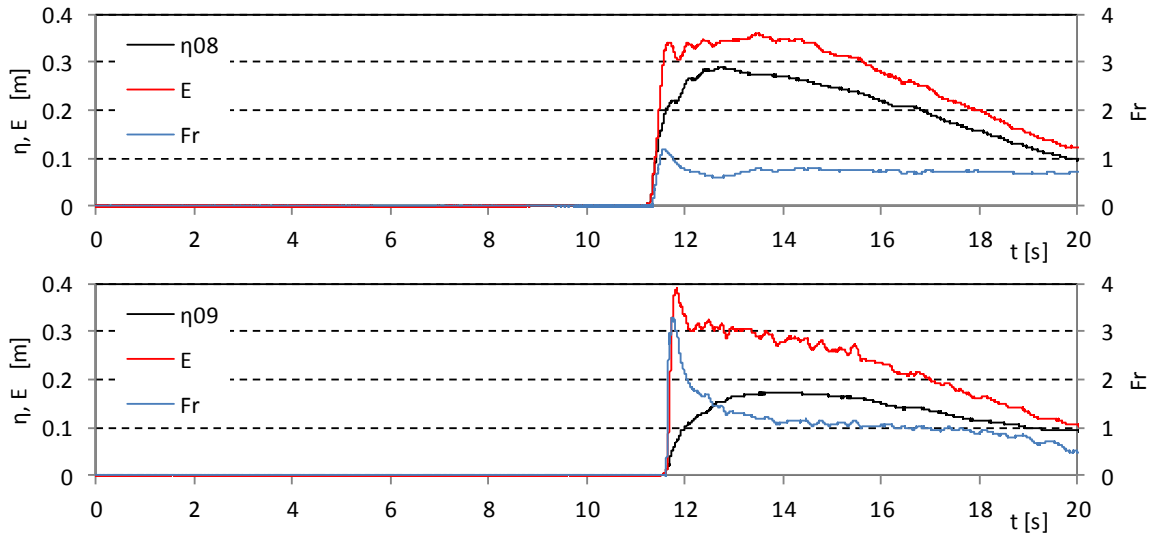


図- 3.3.2 防潮堤設置位置における浸水深, Fr 数, 比エネルギーの時系列 (直立護岸)

4. 波力/波圧試験 (TypeA : 非越流固定模型)

4.1. 水位と圧力の時系列計測結果

非越流時の波力/波圧試験の計測結果を、単純勾配タイプ地形について、図-4.1.1, 図-4.1.2に、直立護岸タイプ地形について、図-4.1.3, 図-4.1.4にそれぞれ示す。同図には、沖波の代表水位時系列 $\eta 03$, $\eta 05$, $\eta 07$ と、陸上部の水位時系列 $\eta 08$, $\eta 09$, 堤体に設置した圧力計により計測した圧力 P の時系列計測結果及び圧力計の計測結果を鉛直方向に積分することにより算出した波力 F の計測結果を示した。各圧力計の設置高さは、P1が底面から 0.025m , それ以降 0.05m ピッチで等間隔に鉛直上方向に設置している。計測は各ケース 15 回繰り返しており、ここには 1 回目の結果を示した。

津波到達時に衝撃的な圧力が発生し、その後、比較的滑らかに変動していることが分かる。また、津波到達時の衝撃的な圧力は P1, P2 といった底面付近にのみ発生しており、その後時間変動が緩やかになると、各計測点の圧力波形が等間隔となり静水圧に近い圧力分布となっていることが分かる。波力と圧力の時系列を比較すると、津波到達時の衝撃的な力については、波力よりも圧力の結果でより卓越している。津波到達時の衝撃的な圧力は底面付近に集中しているため、鉛直方向に積分した波力は、圧力の変動ほど卓越した力とはなっていないことが分かる。堤体の構造的な安定性を考えた場合、この衝撃的な段波領域の力は作用点が底面近傍となるため、後続の持続波領域の準定常的な力の方がモーメント荷重を考えた場合影響が大きいと考えられる。

単純勾配と直立護岸を比較すると、汀線位置に堤体模型を設置したケースでは、津波到達時の段波波圧による力が直立護岸では現れていない。直立護岸の汀線位置に堤体がある場合、堤体模型は護岸の延長線上となるため、作用する津波の水平流速が小さくなり、衝撃的な力が生じていないと考えられる。

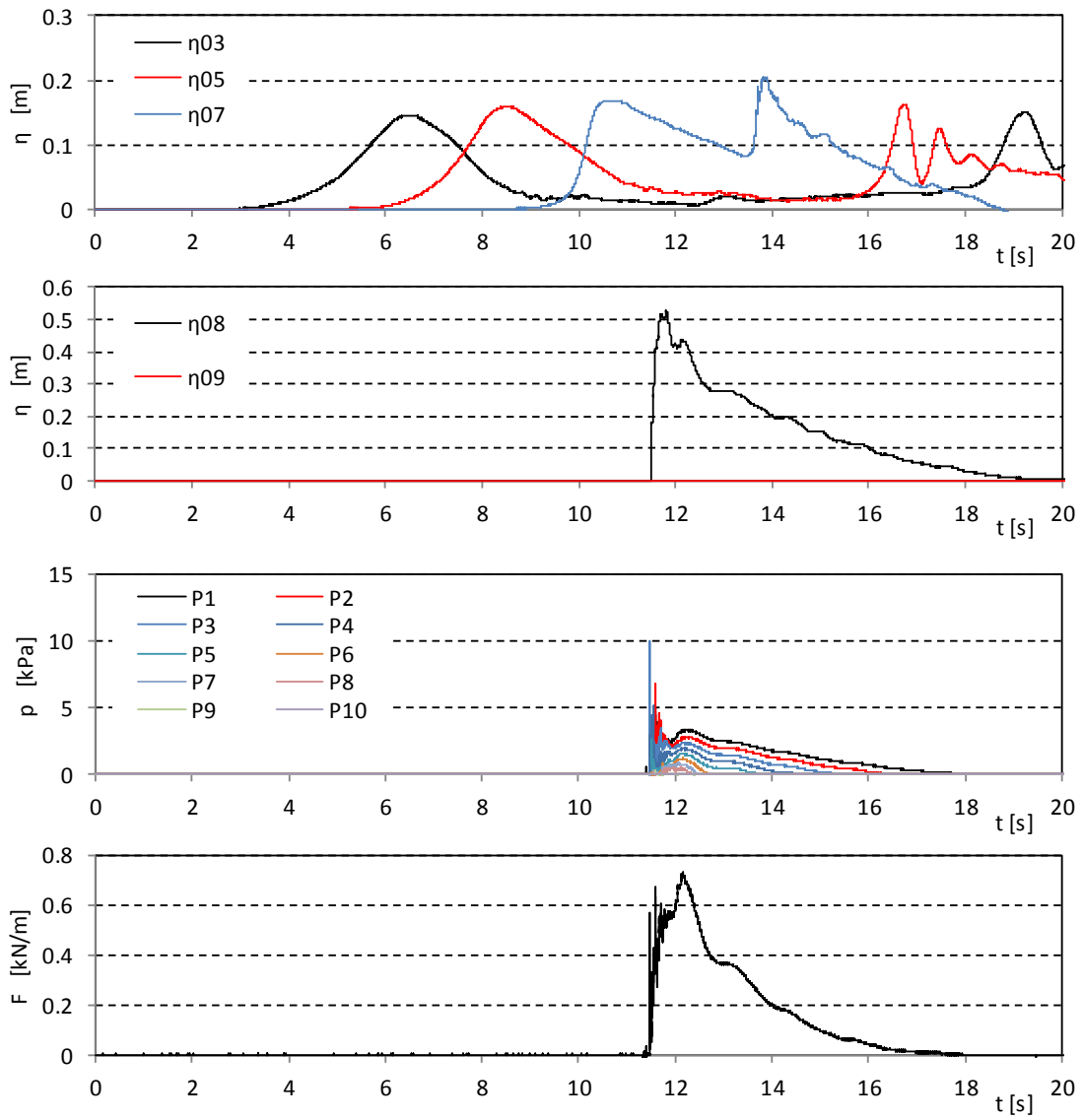


図- 4.1.1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0m, Wc11)

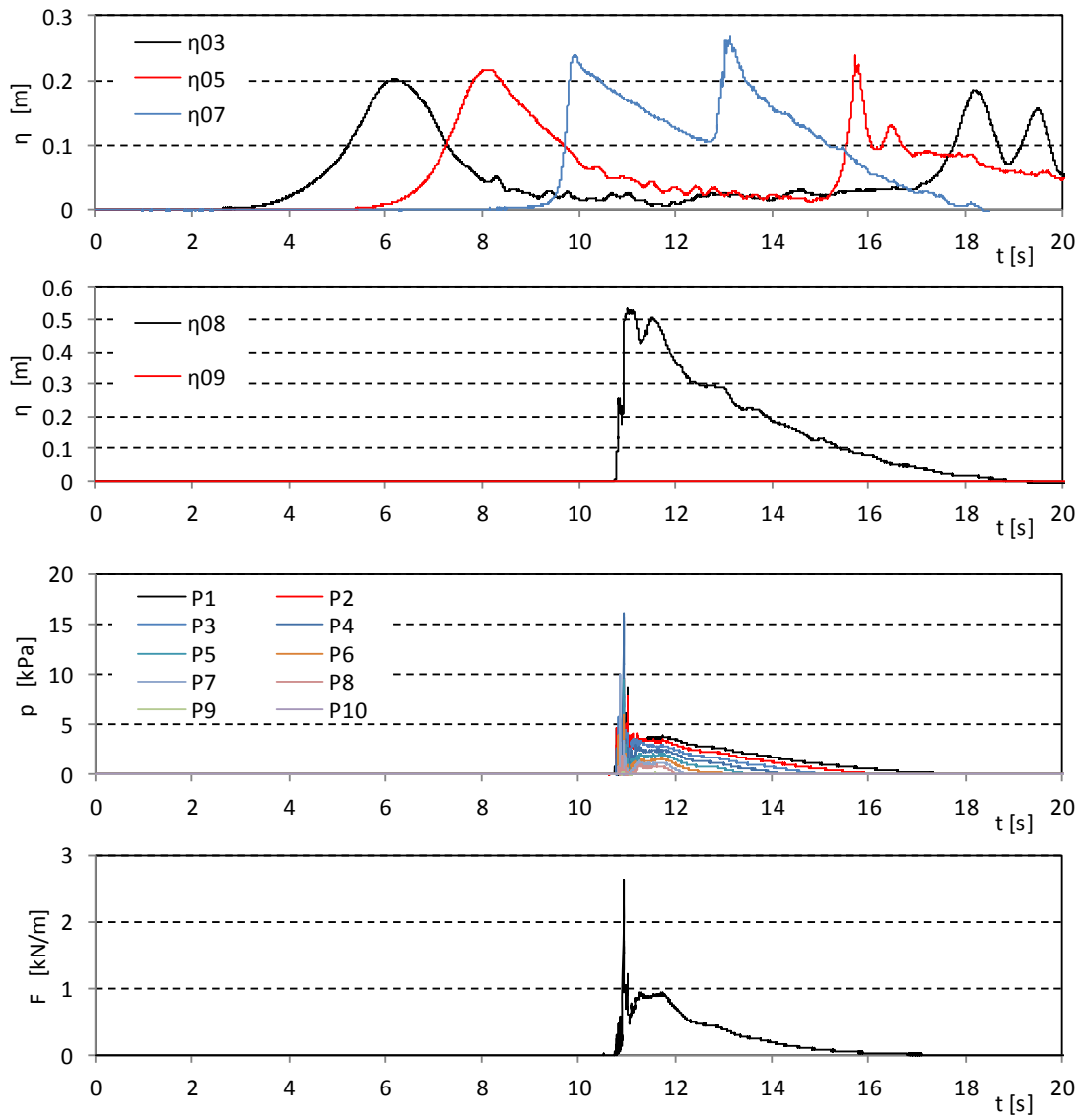


図- 4.1.1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0m, Wc12)

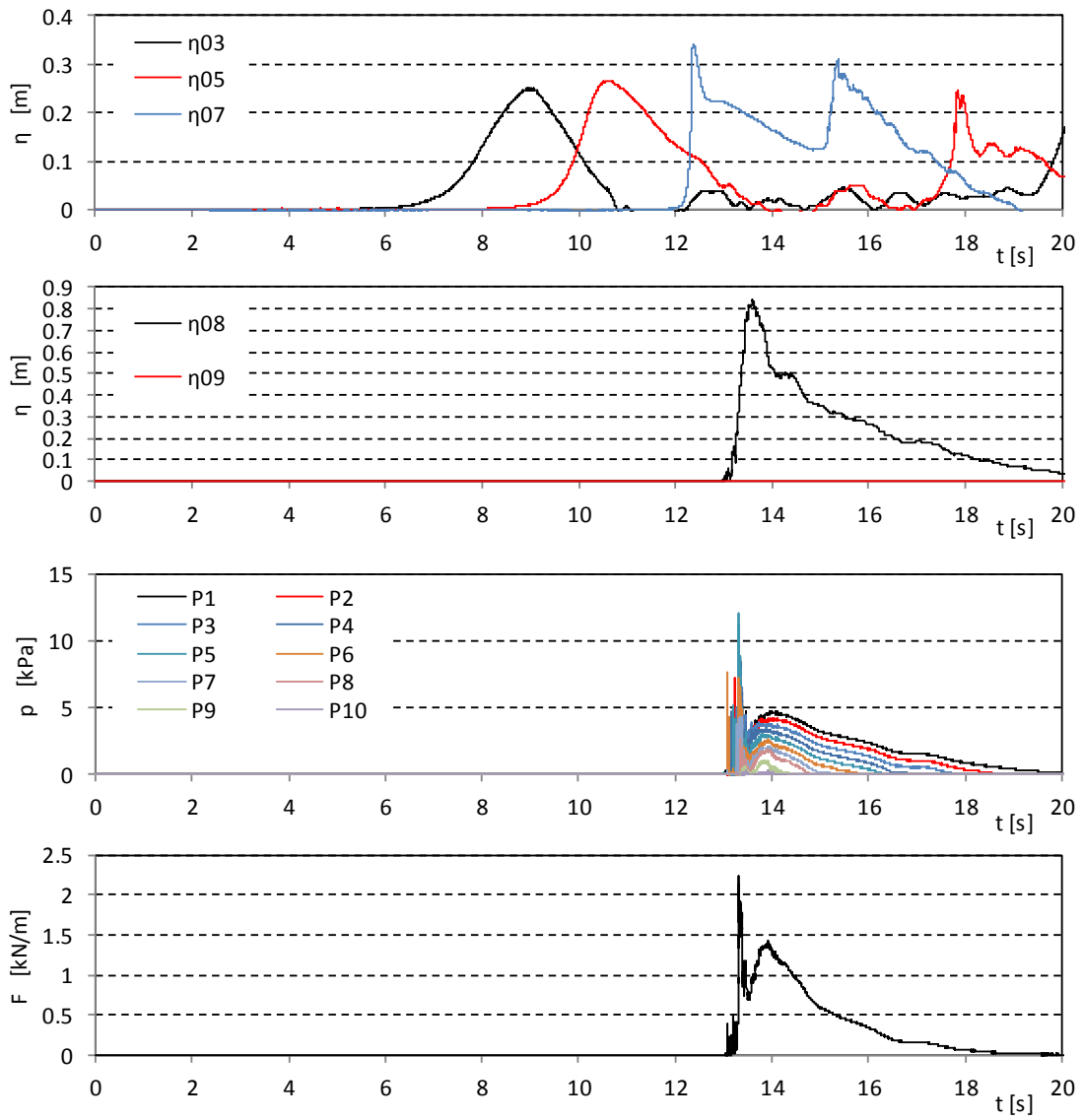


図- 4.1.1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0m, Wc13)

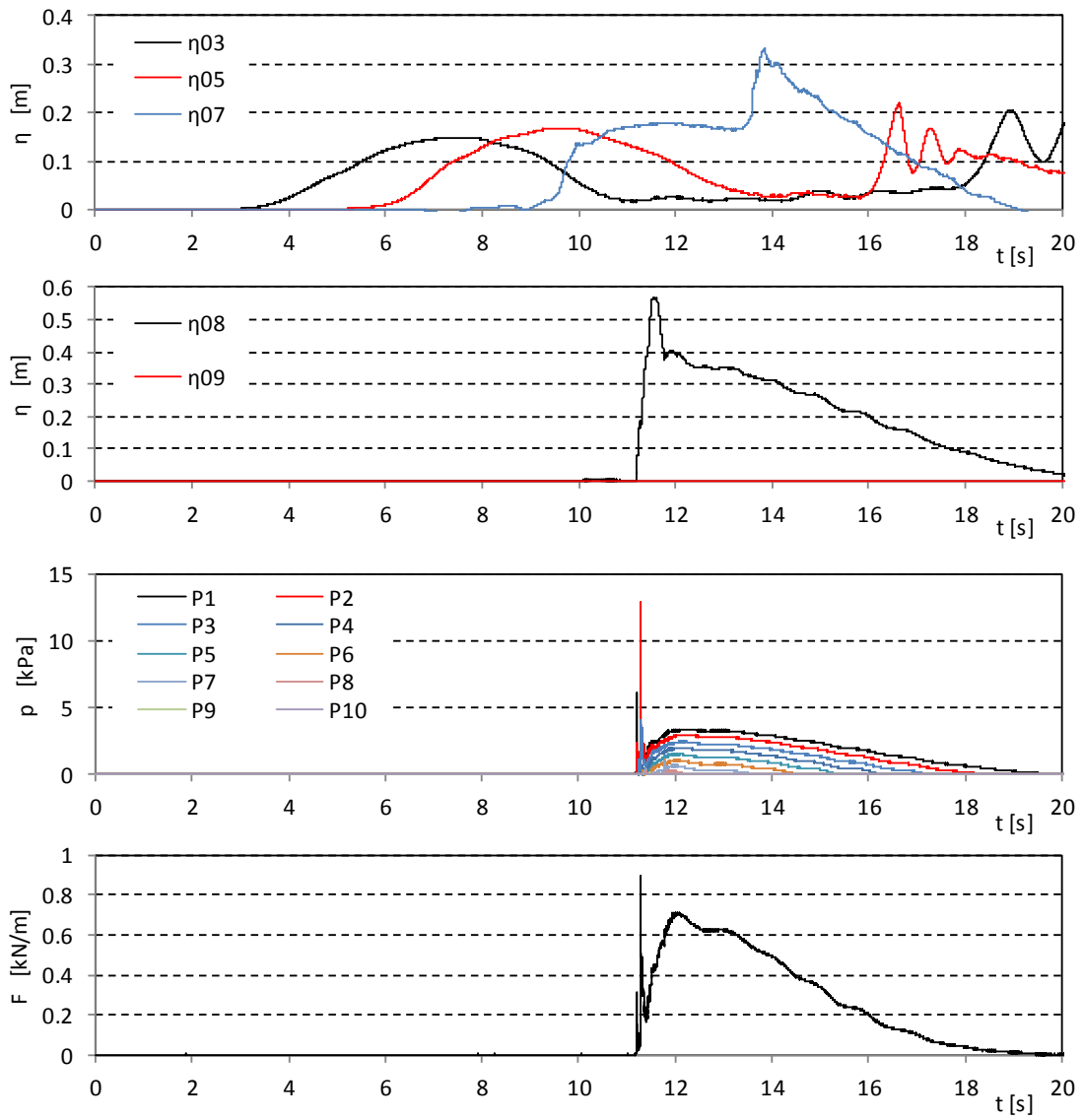


図- 4.1.1 波力/波圧試験の計測結果（単純勾配，堤体 TypeA，設置位置 0m，Wc21）

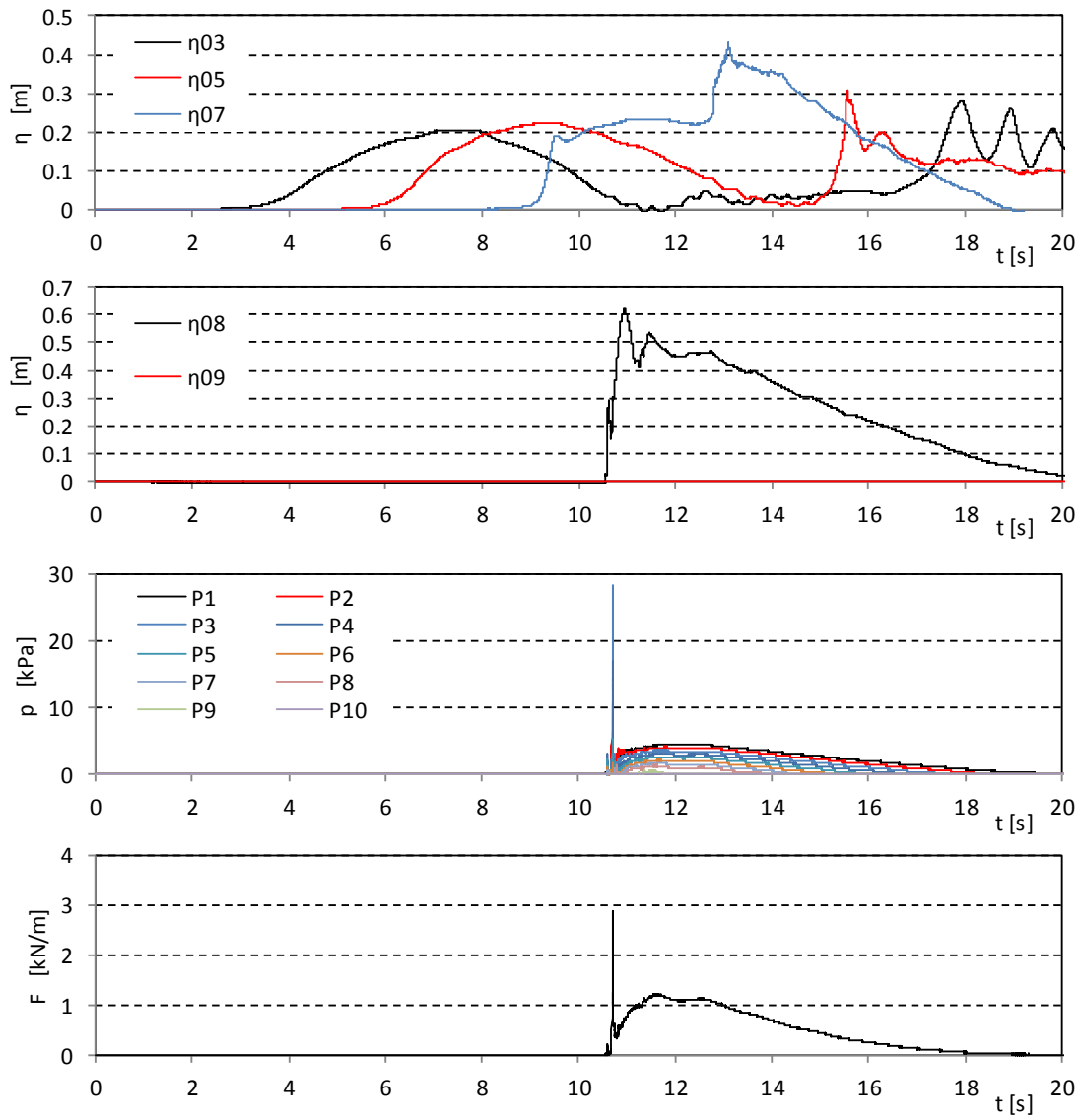


図- 4.1.1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0m, Wc22)

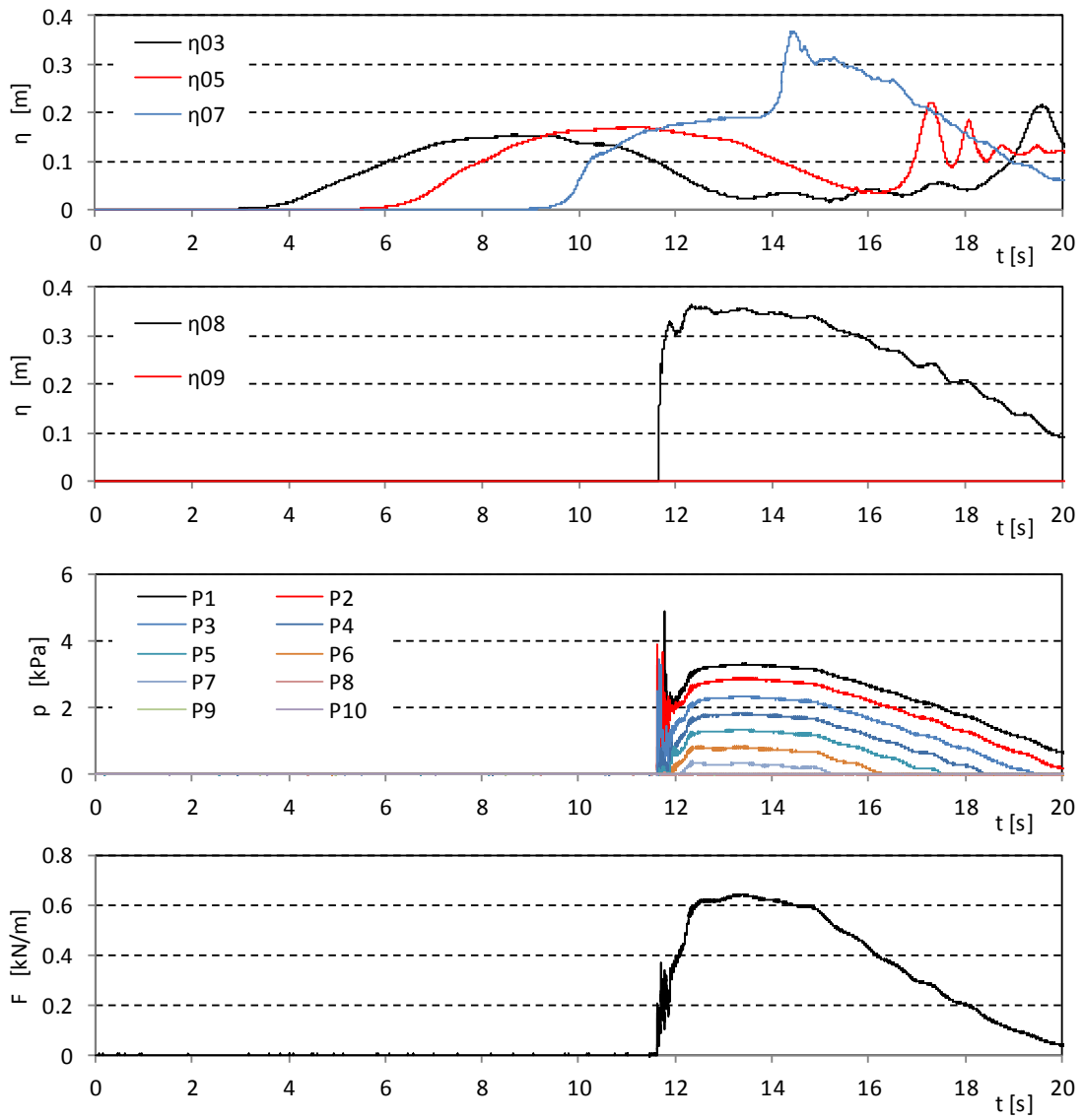


図- 4.1.1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0m, Wc31)

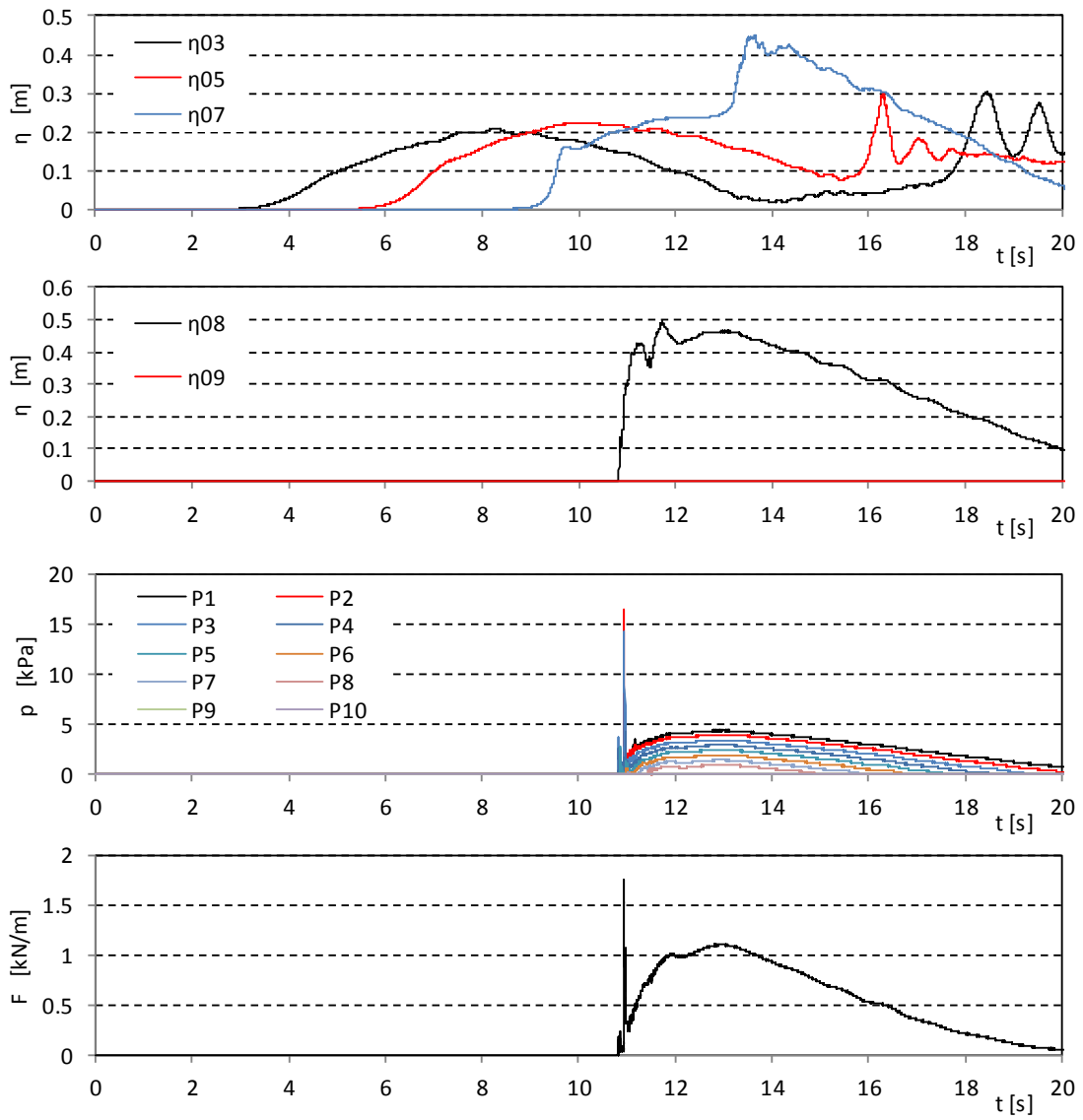


図- 4.1.1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0m, Wc32)

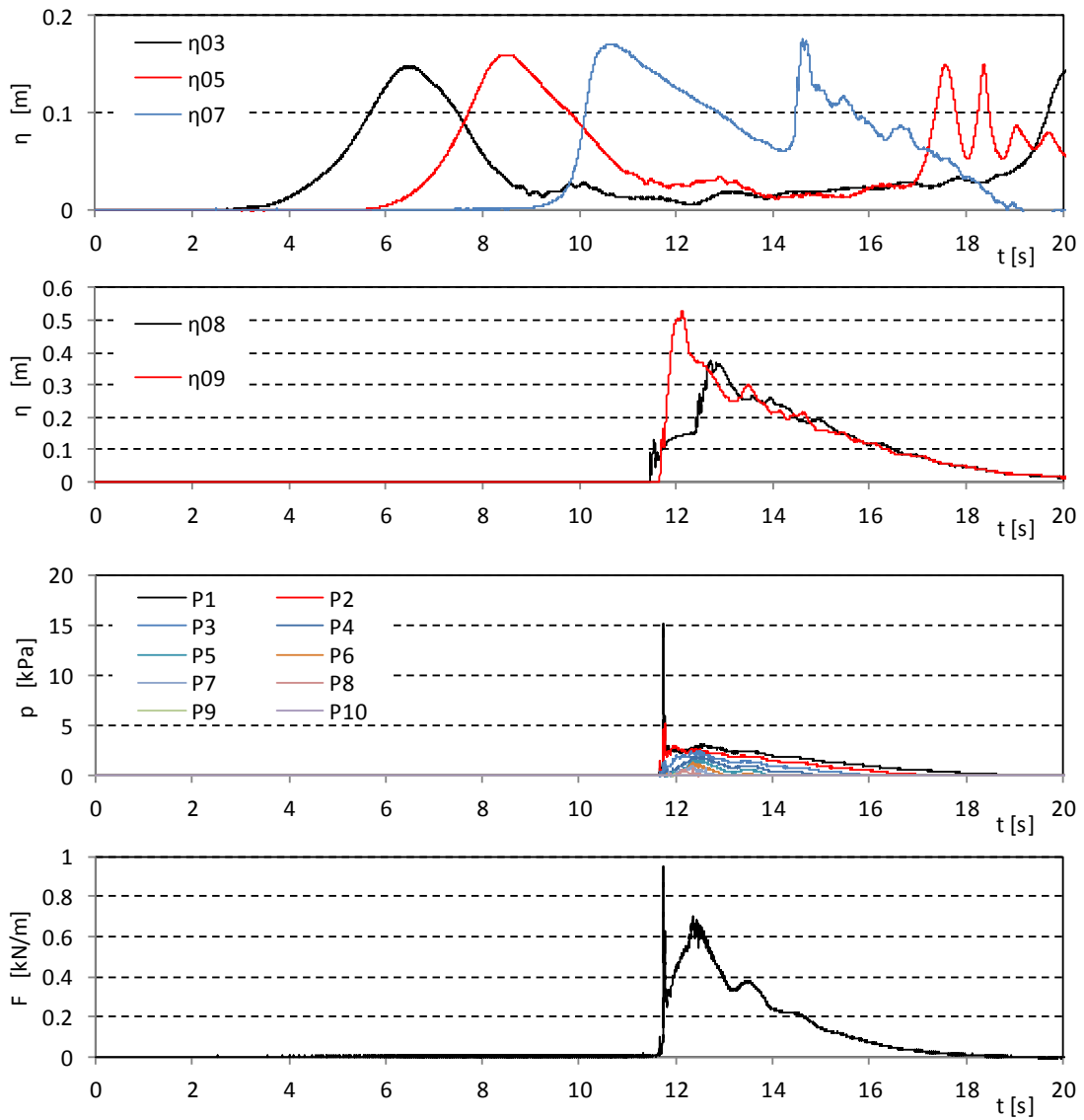


図- 4.1.2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m, Wc11)

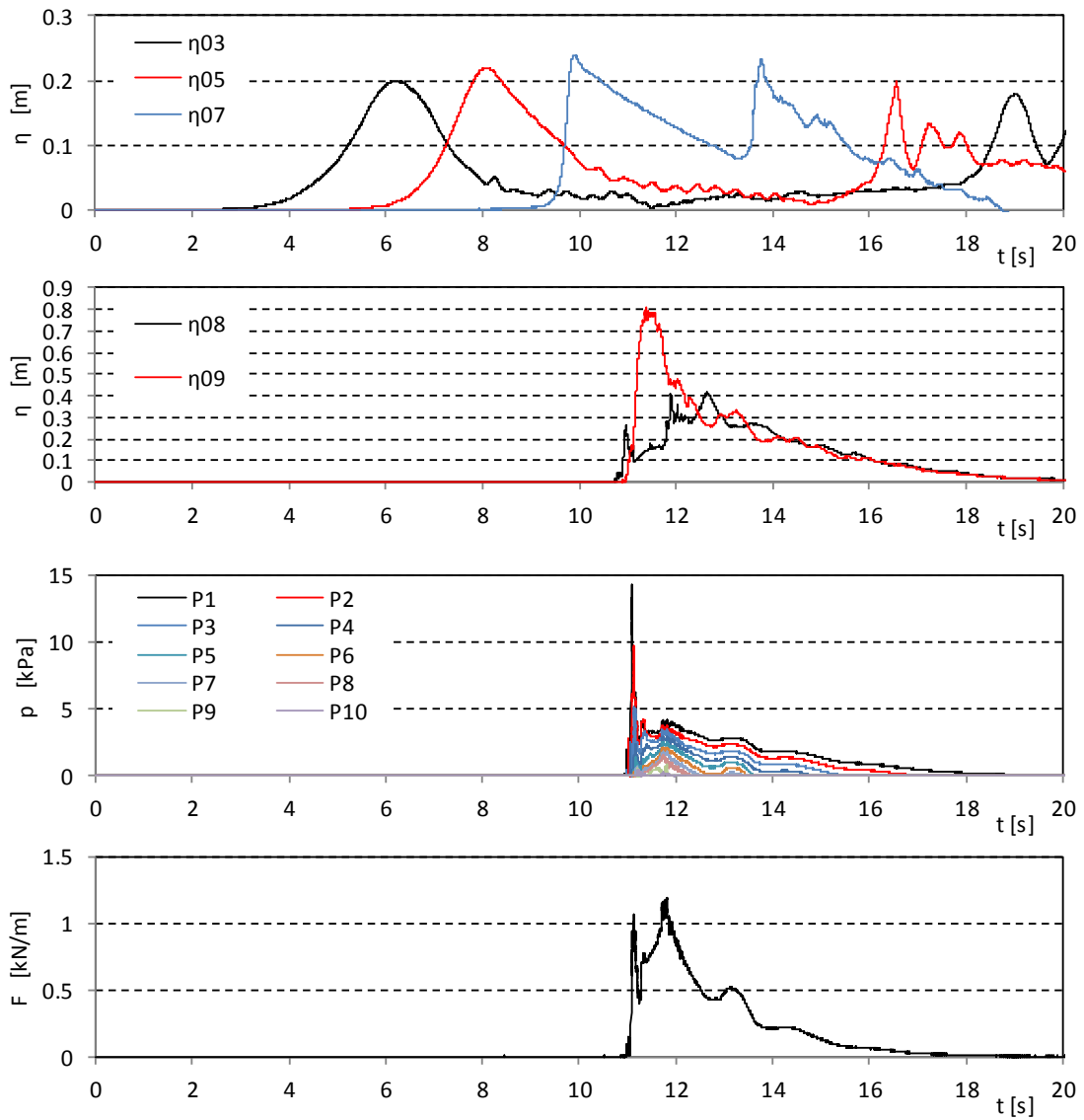


図- 4.1.2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m, Wc12)

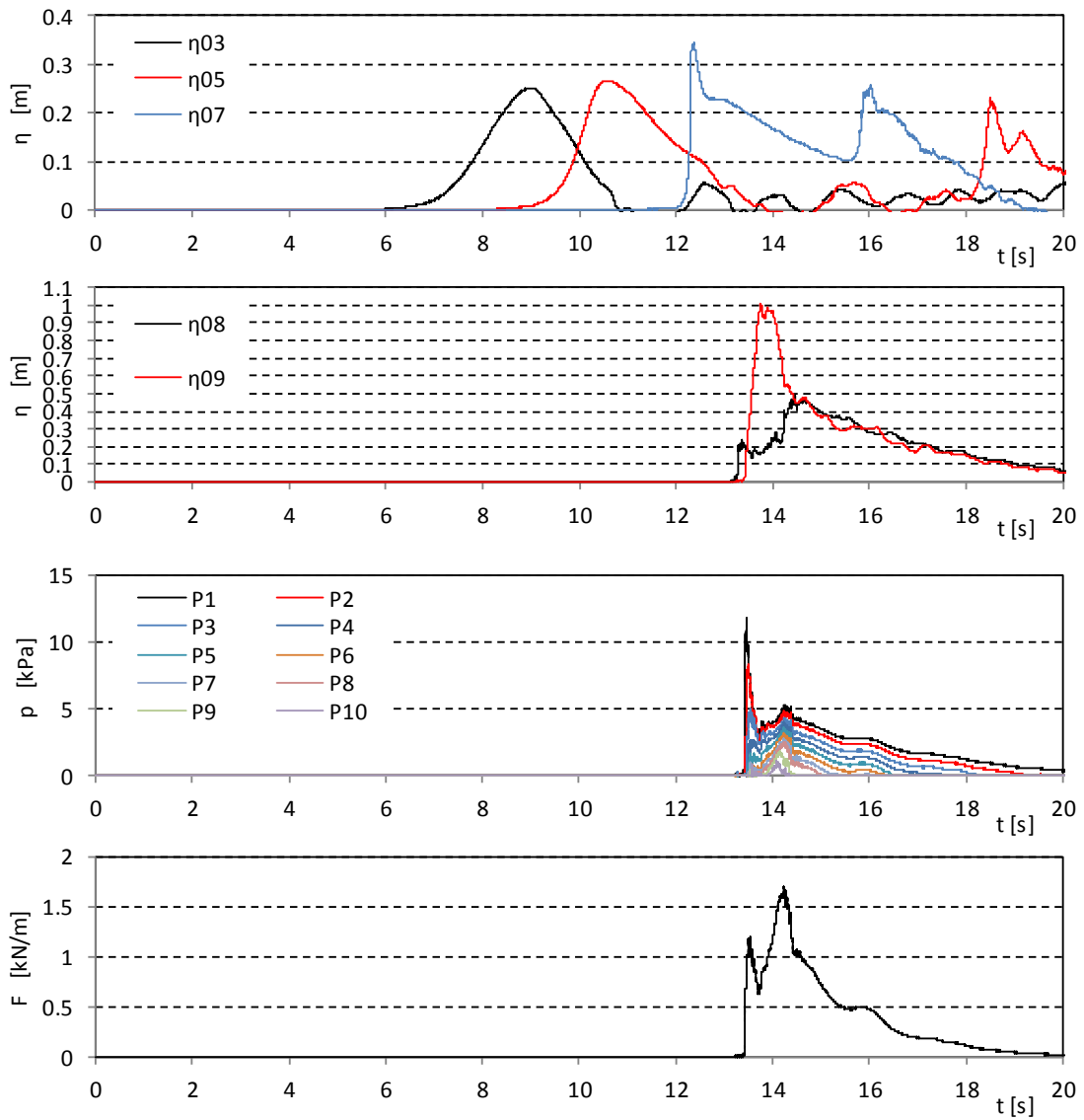


図- 4.1.2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m, Wc13)

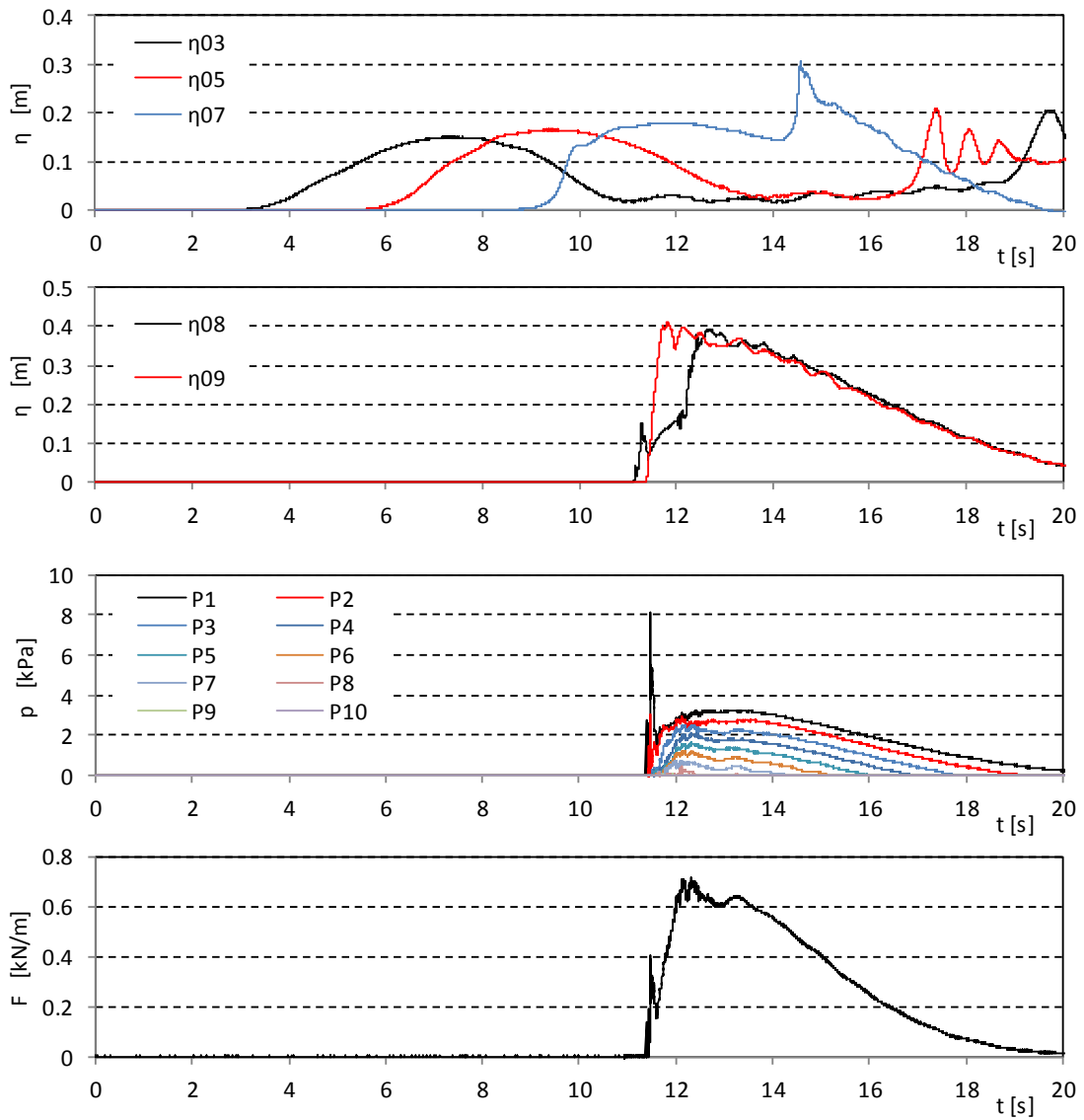


図- 4.1.2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m, Wc21)

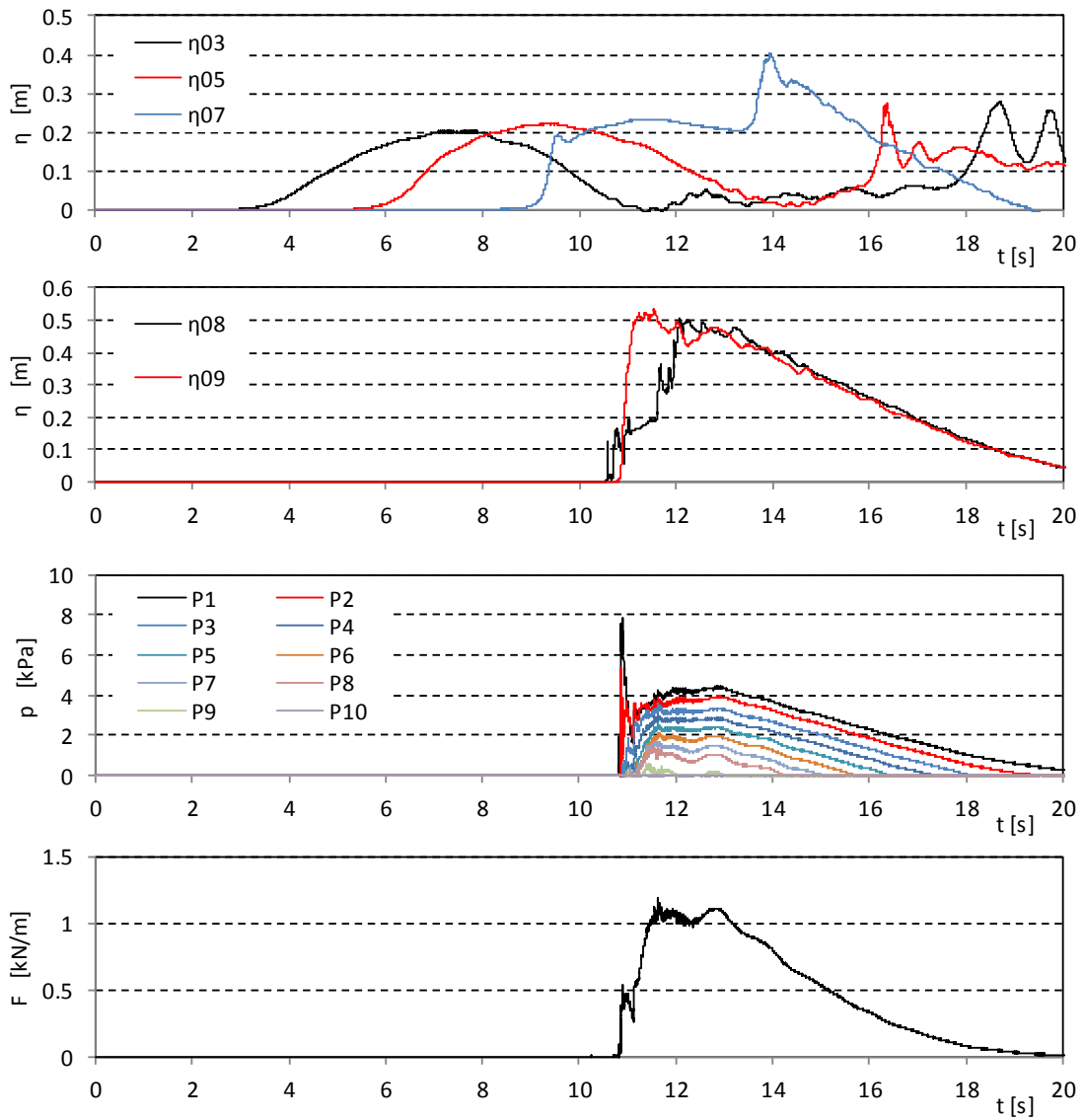


図- 4.1.2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m, Wc22)

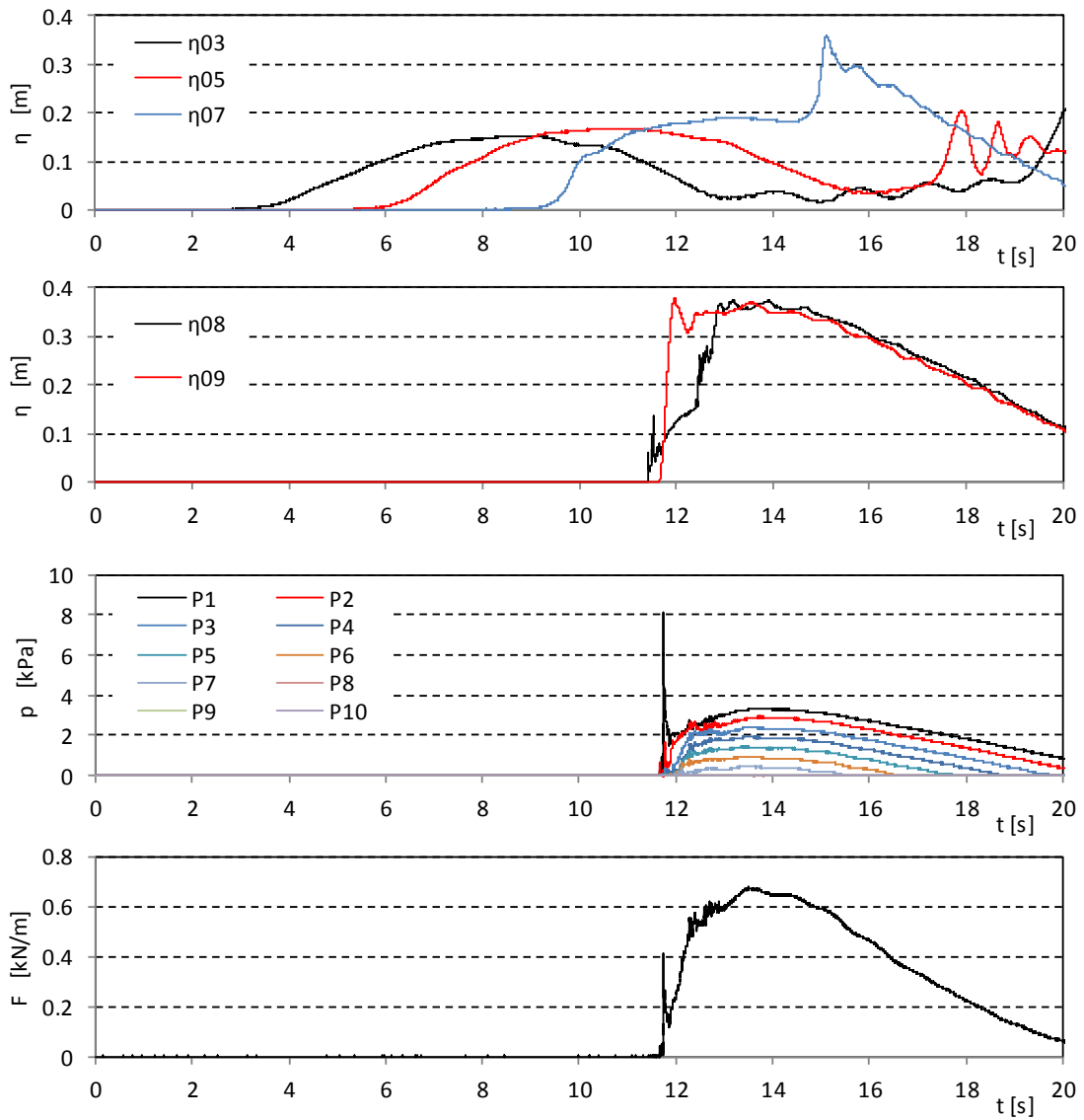


図- 4.1.2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m, Wc31)

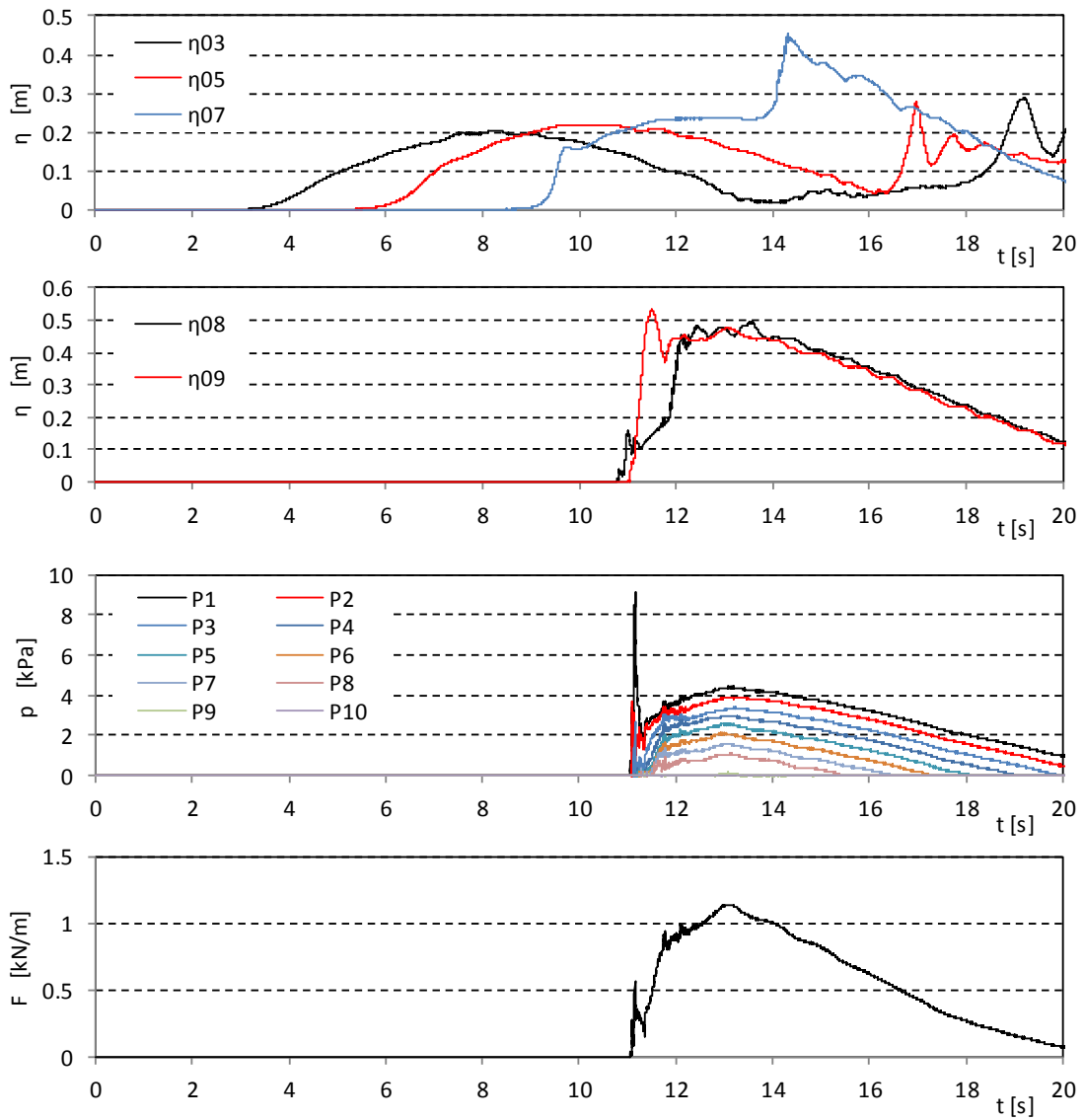


図- 4.1.2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m, Wc32)

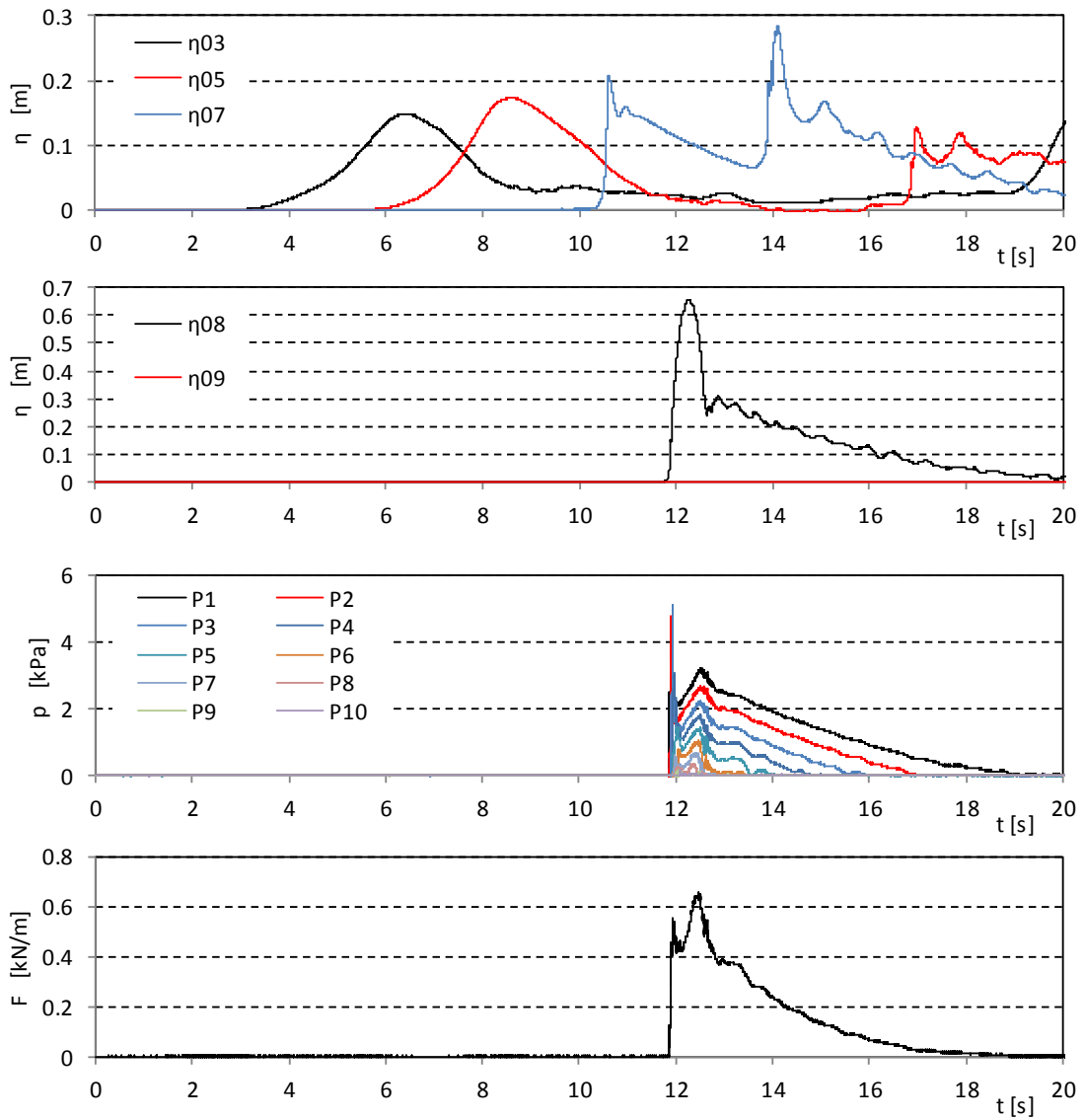


図- 4.1.3 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0m, Wc11)

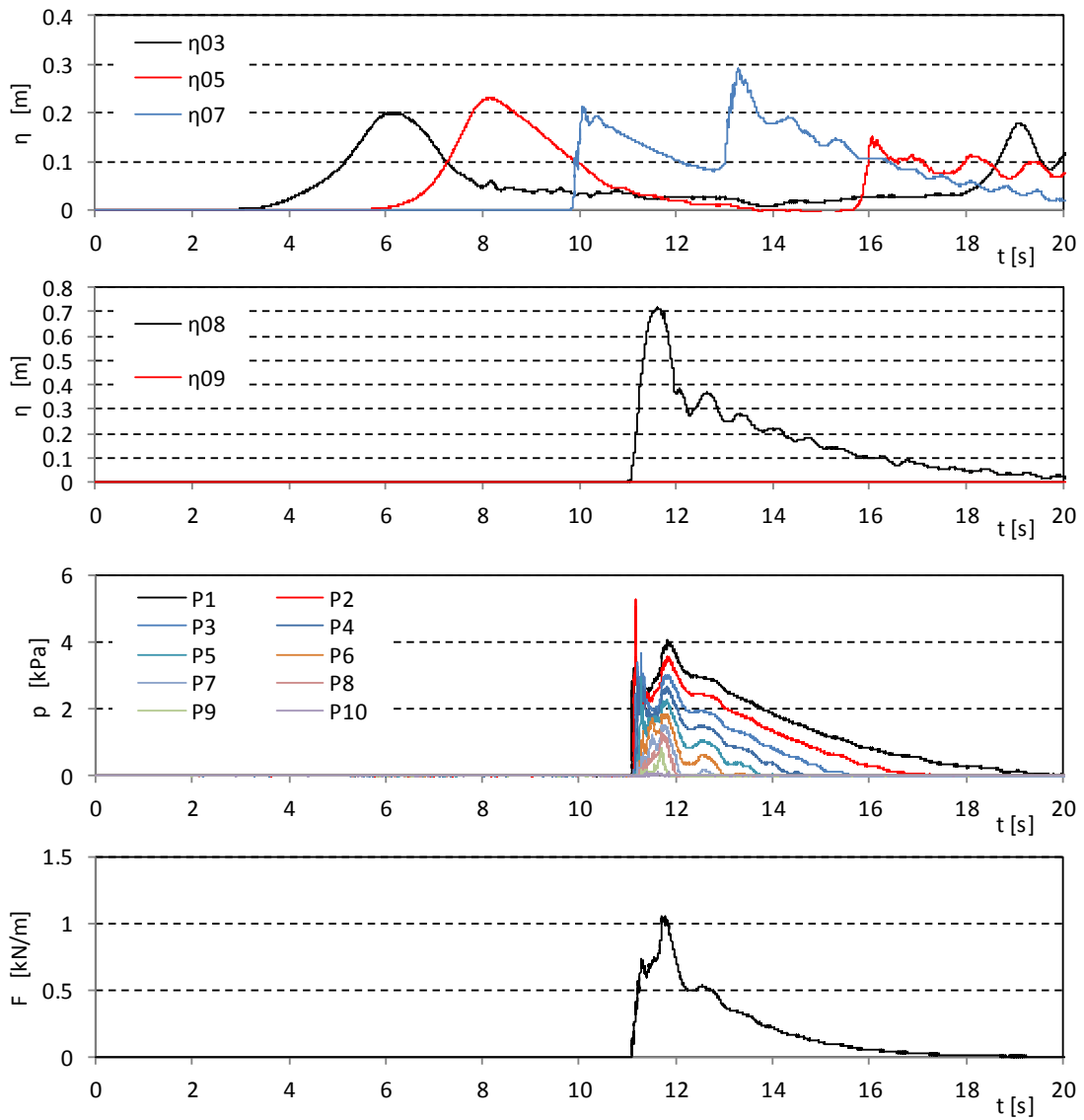


図- 4.1.3 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0m, Wc12)

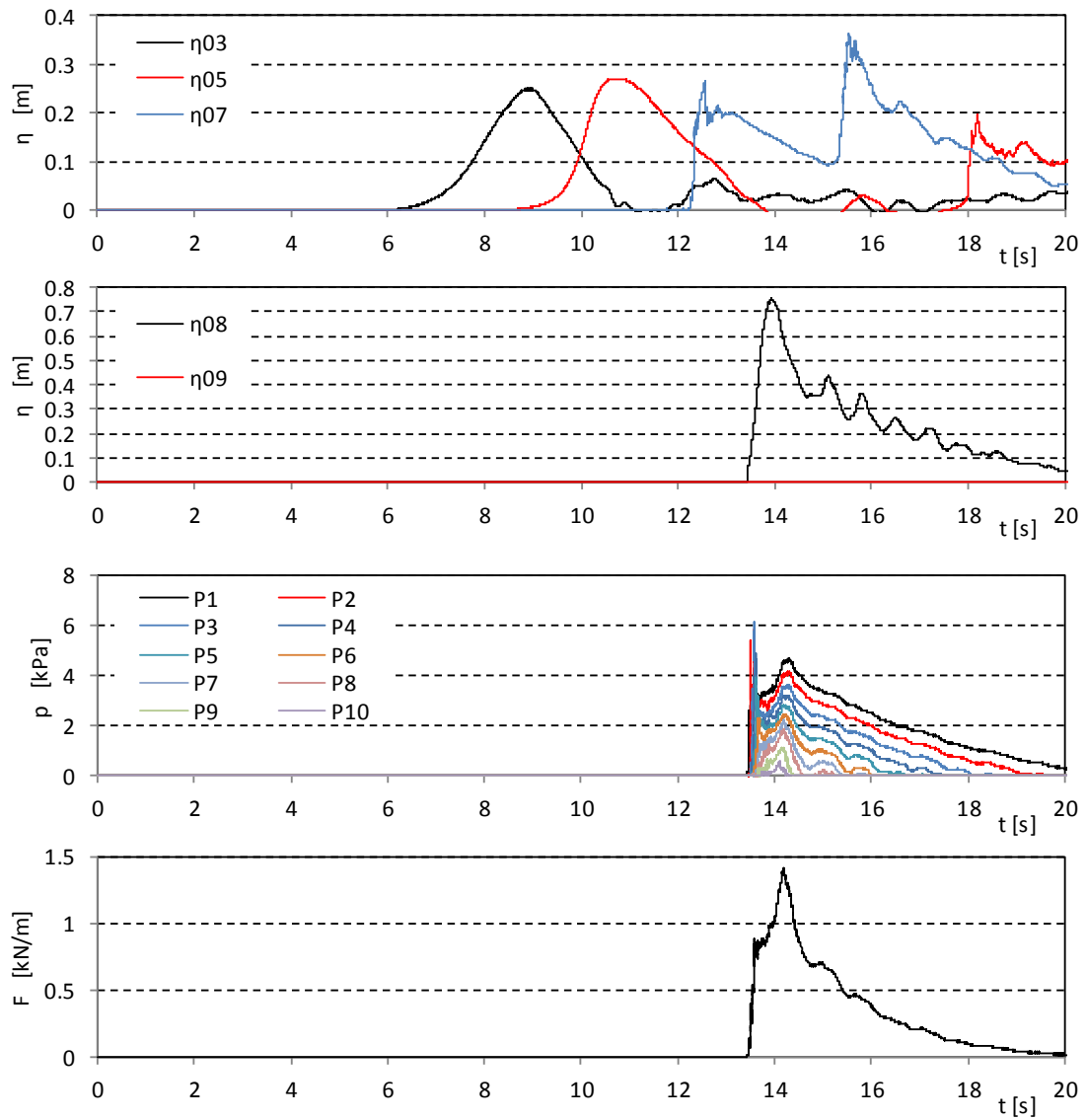


図- 4.1.3 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0m, Wc13)

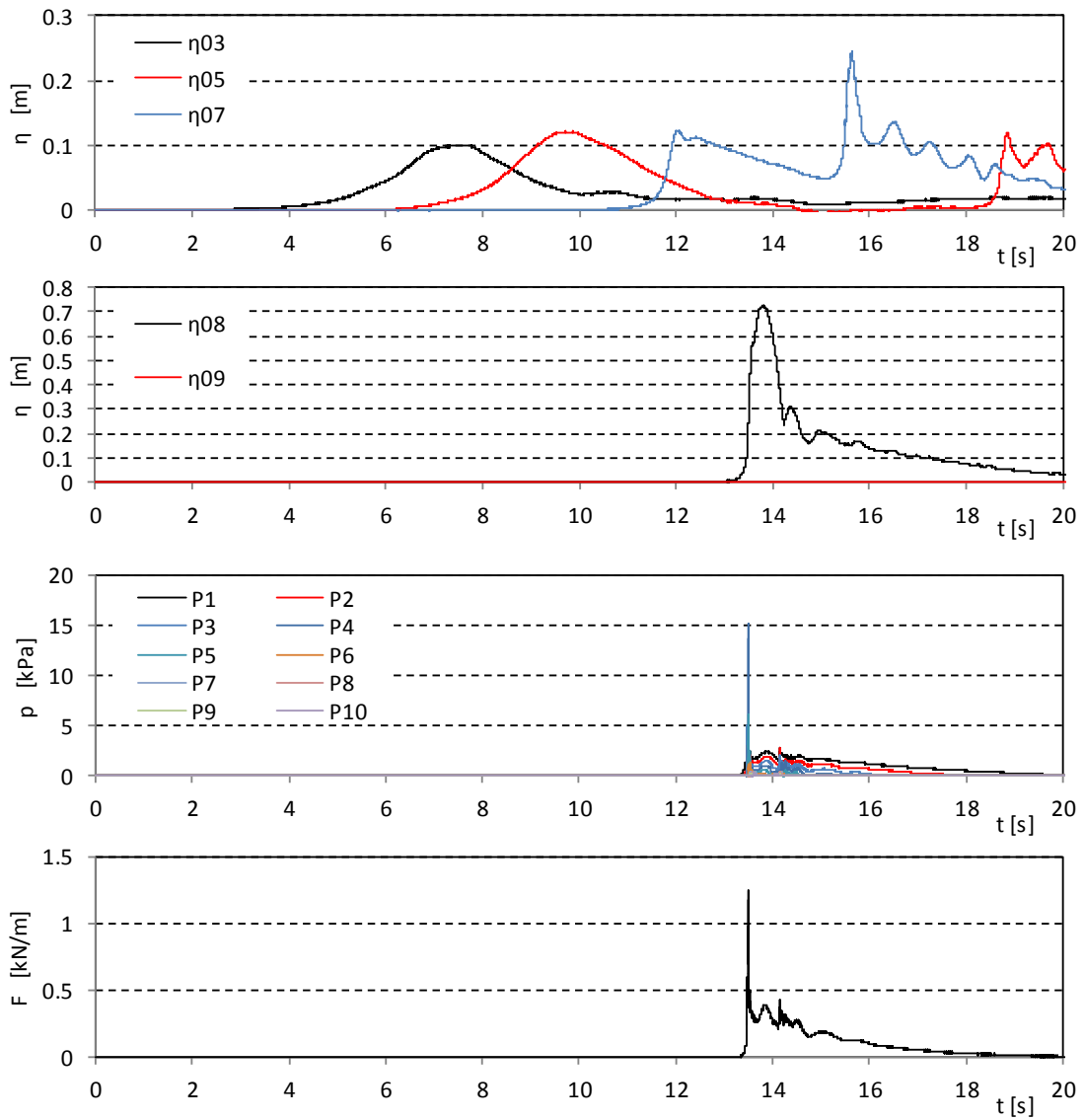


図- 4.1.3 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0m, Wc14)

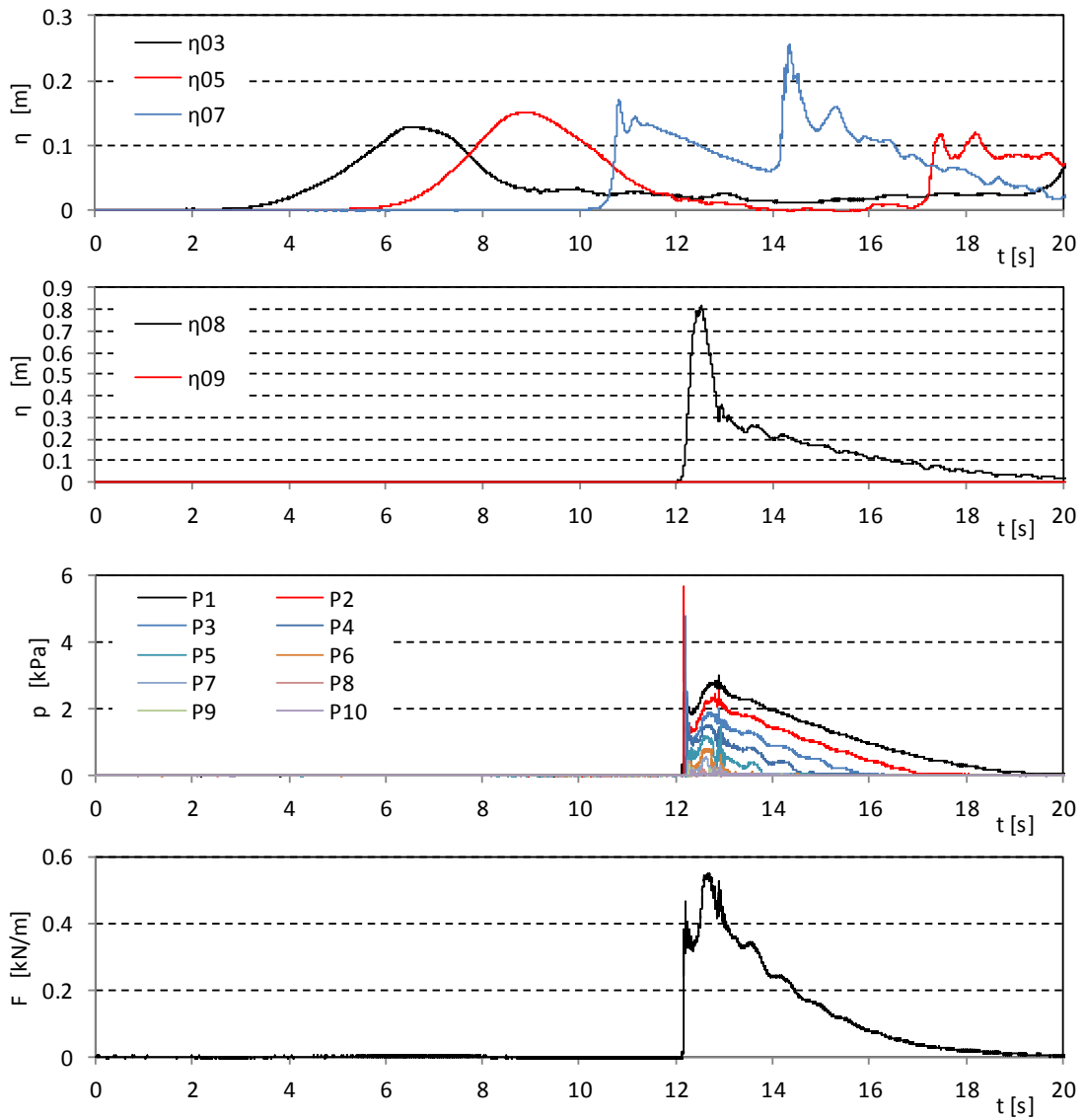


図- 4.1.3 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0m, Wc15)

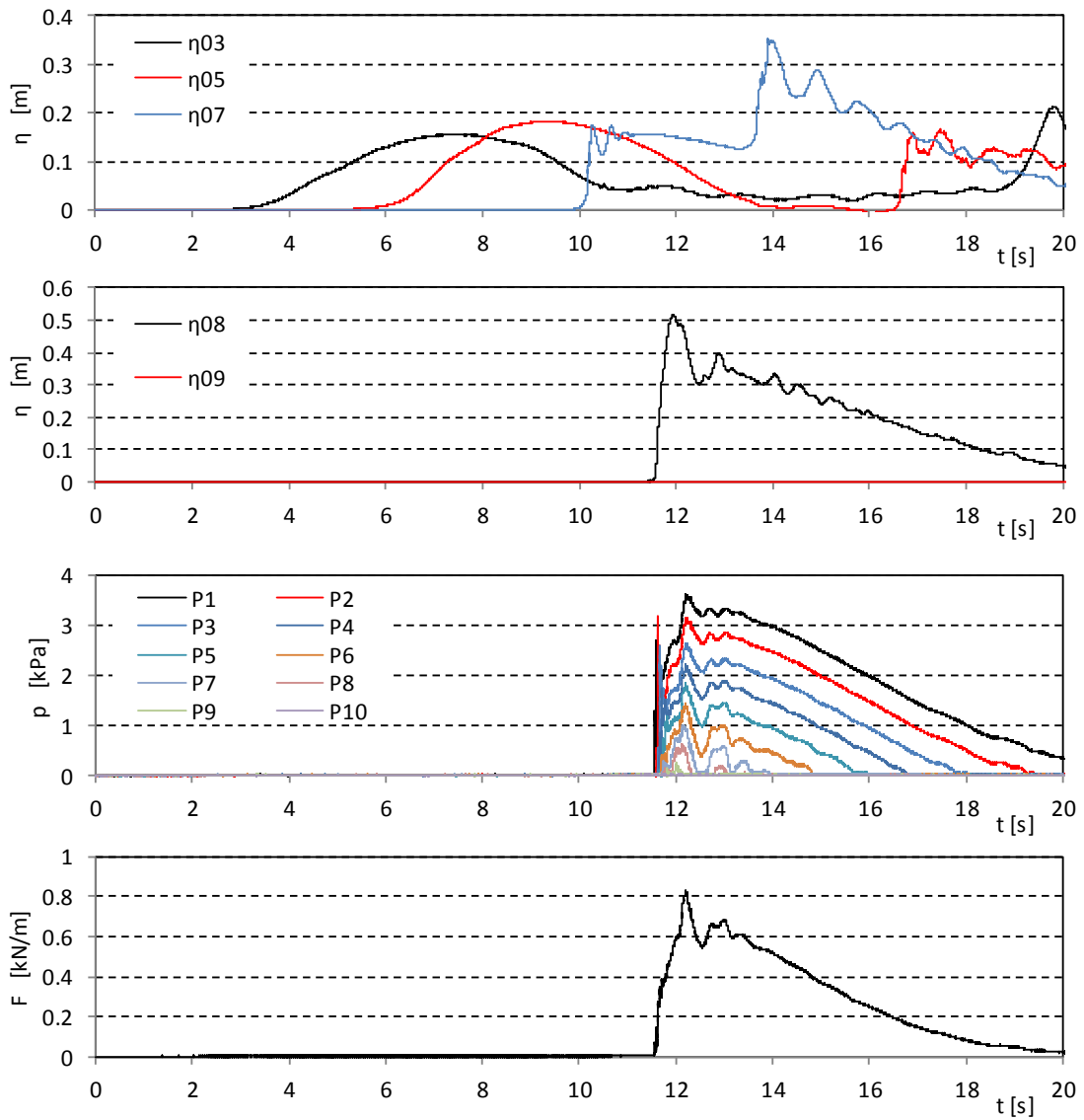


図- 4.1.3 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0m, Wc21)

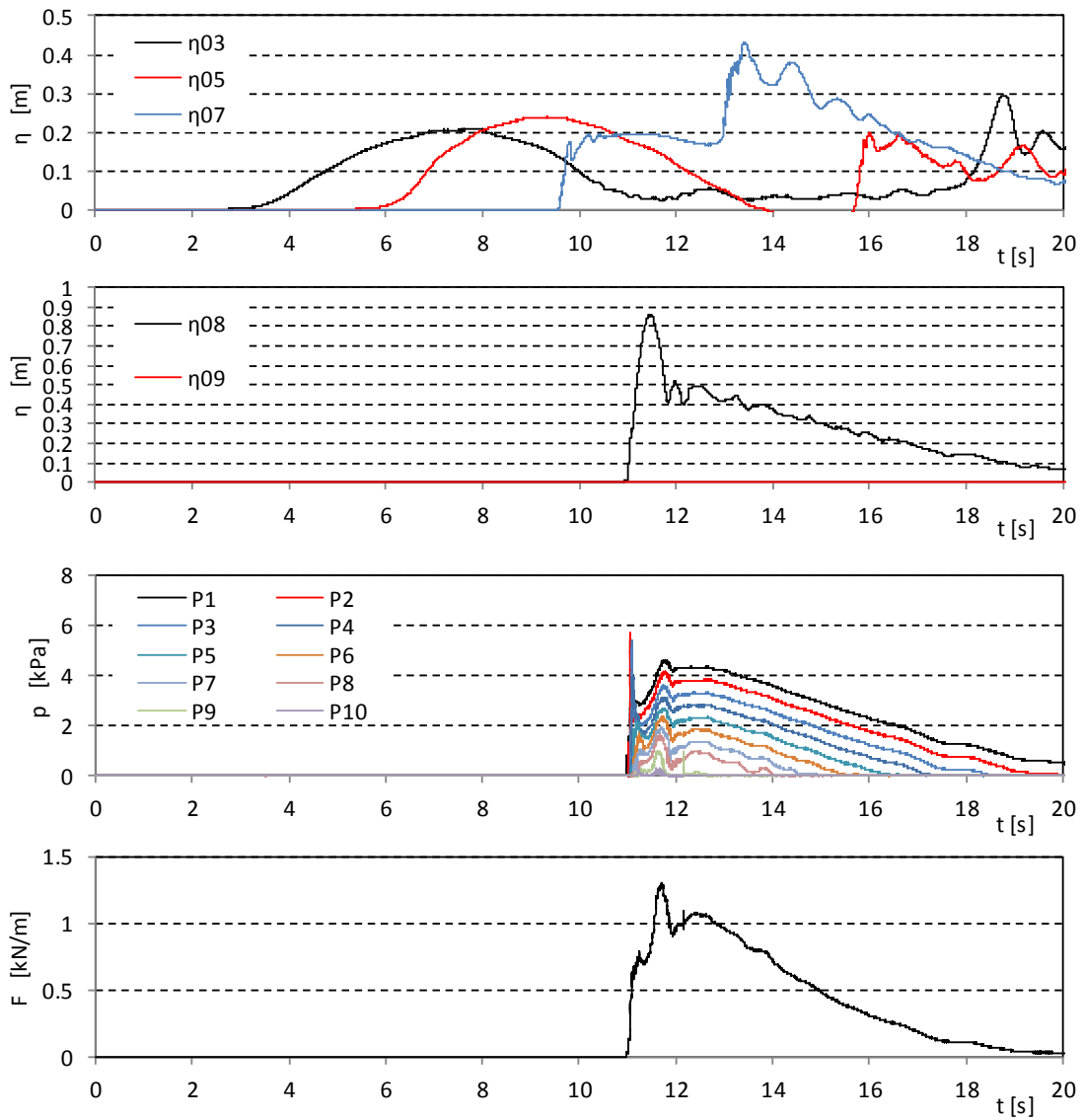


図- 4.1.3 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0m, Wc22)

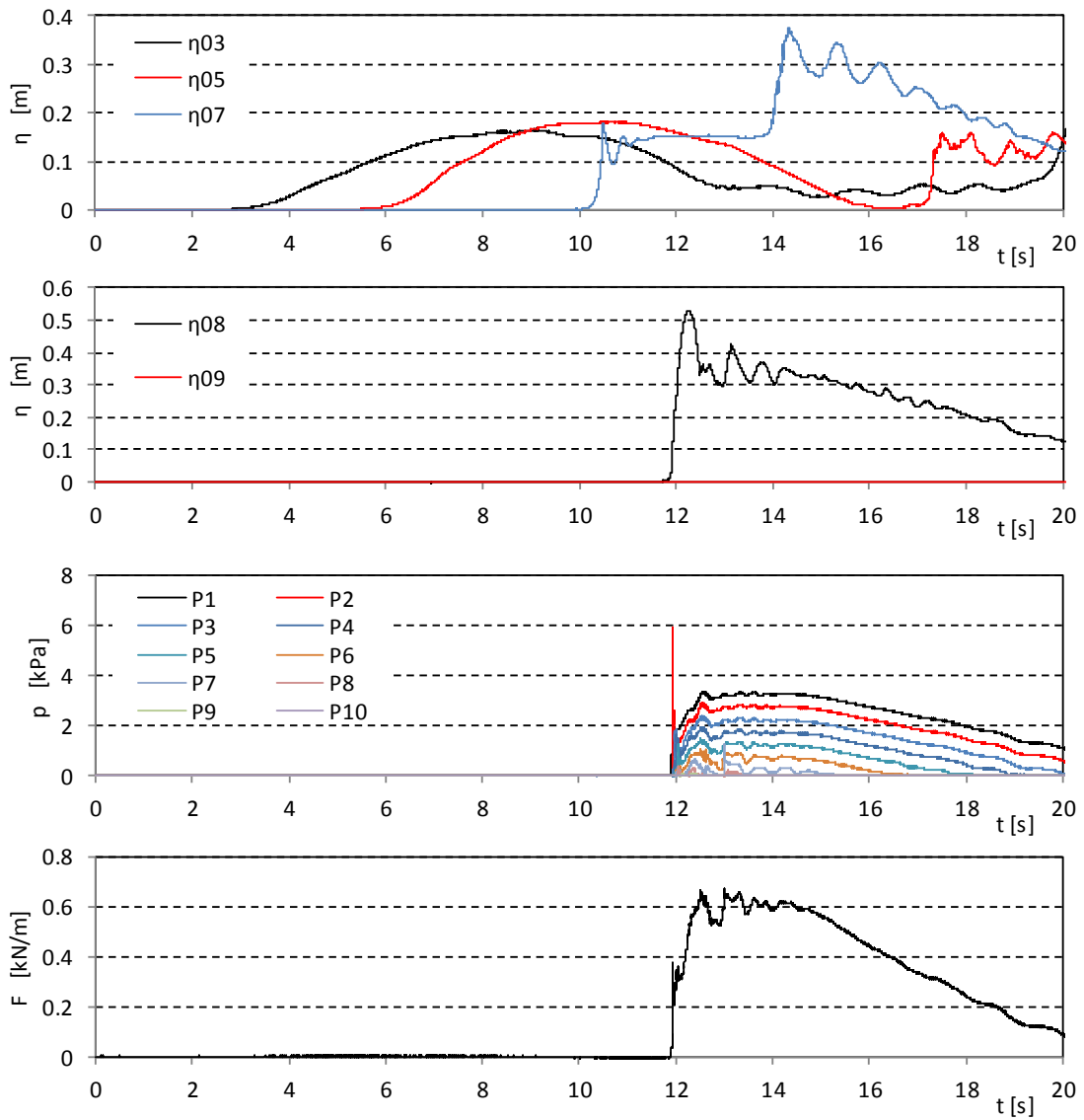


図- 4.1.3 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0m, Wc31)

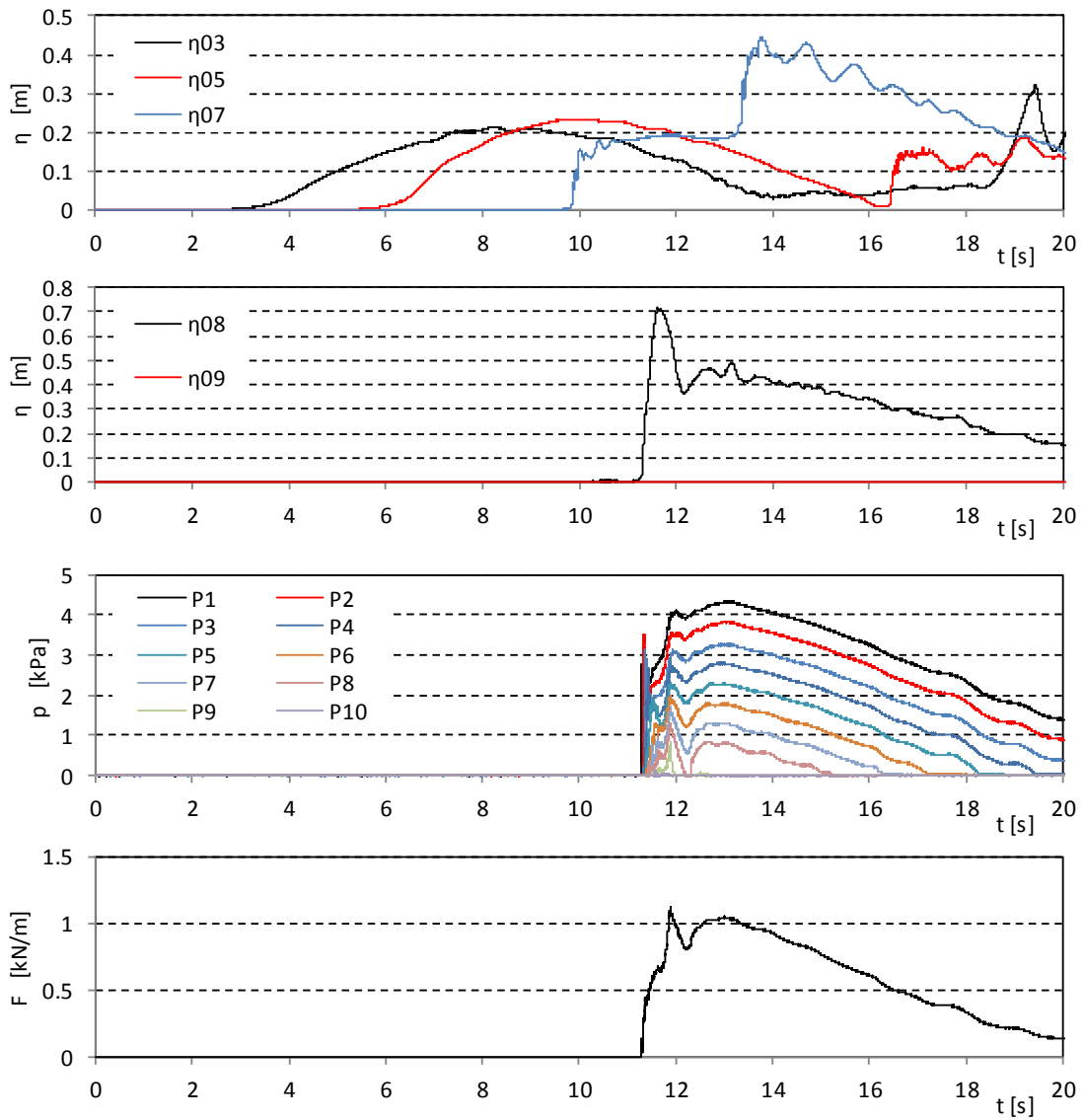


図- 4.1.3 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0m, Wc32)

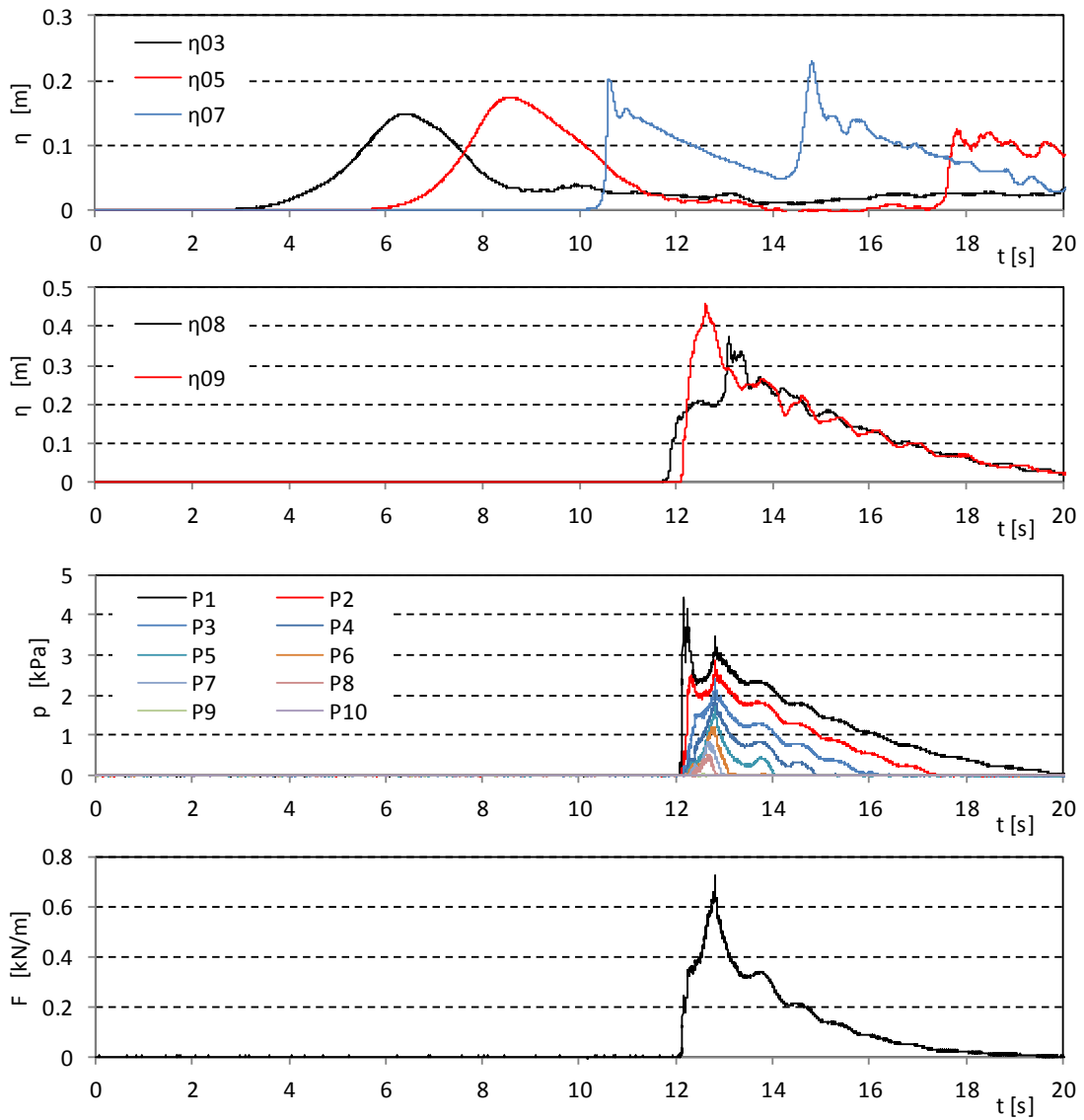


図- 4.1.4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m, Wc11)

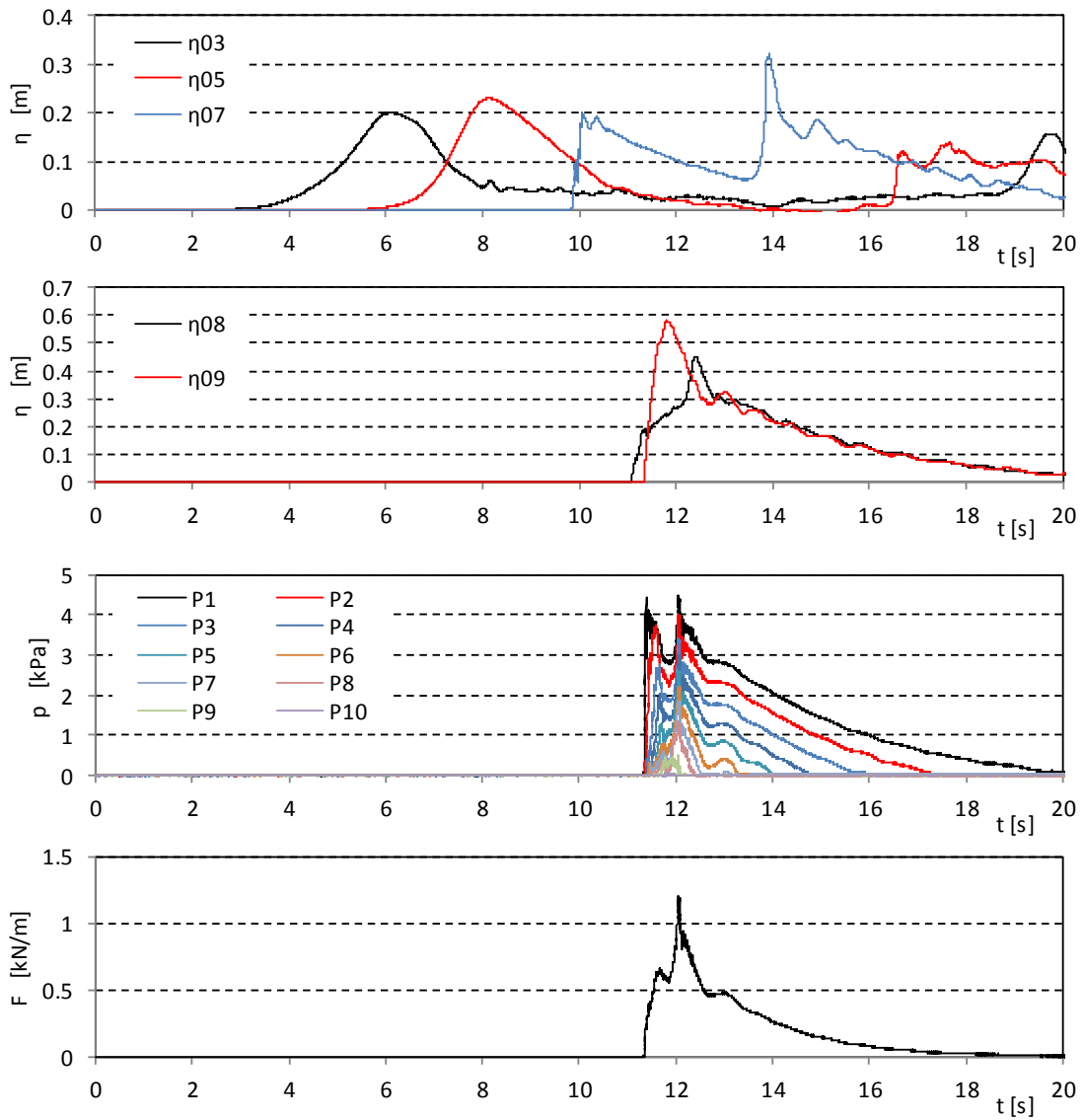


図- 4.1.4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m, Wc12)

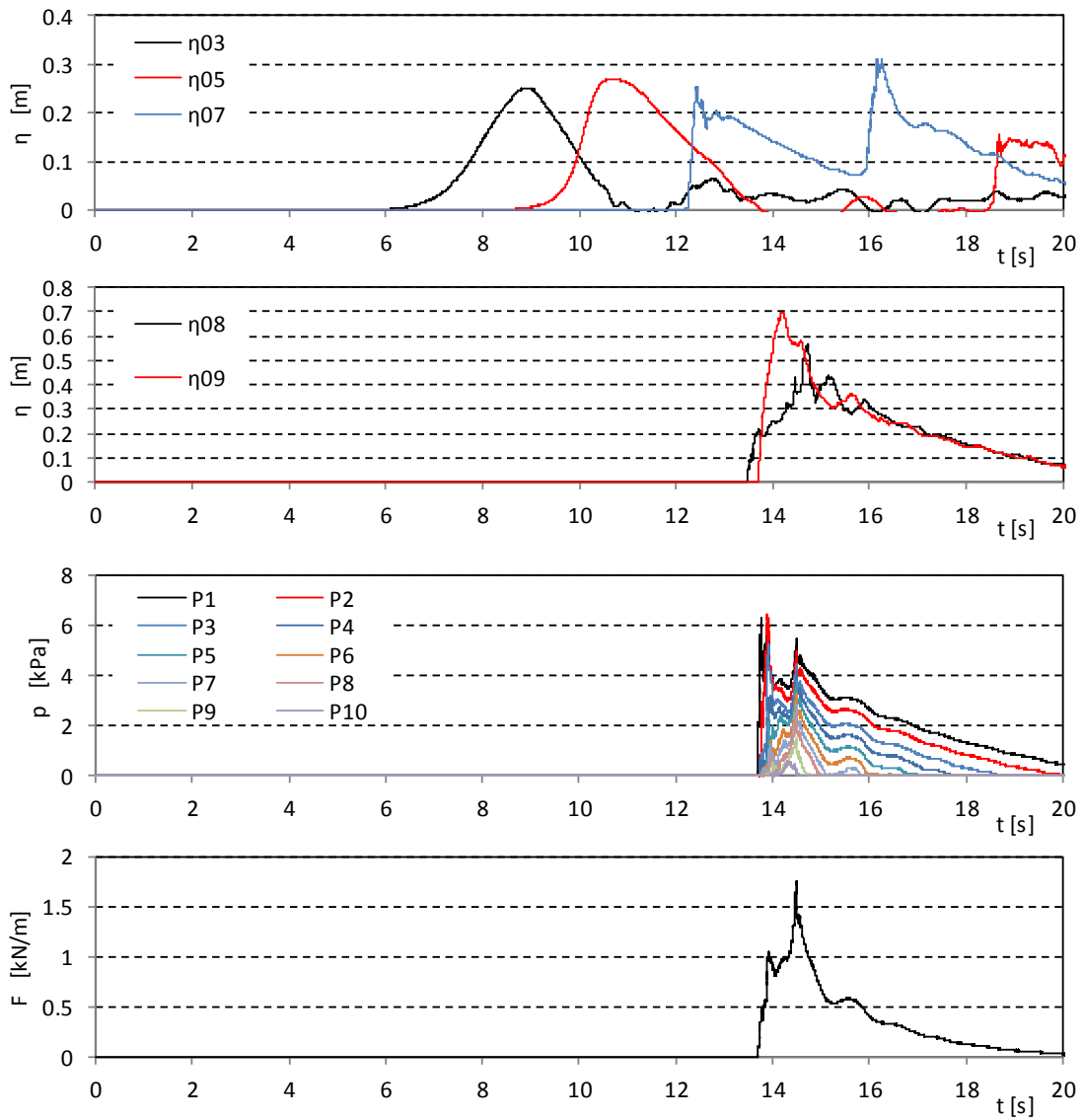


図- 4.1.4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m, Wc13)

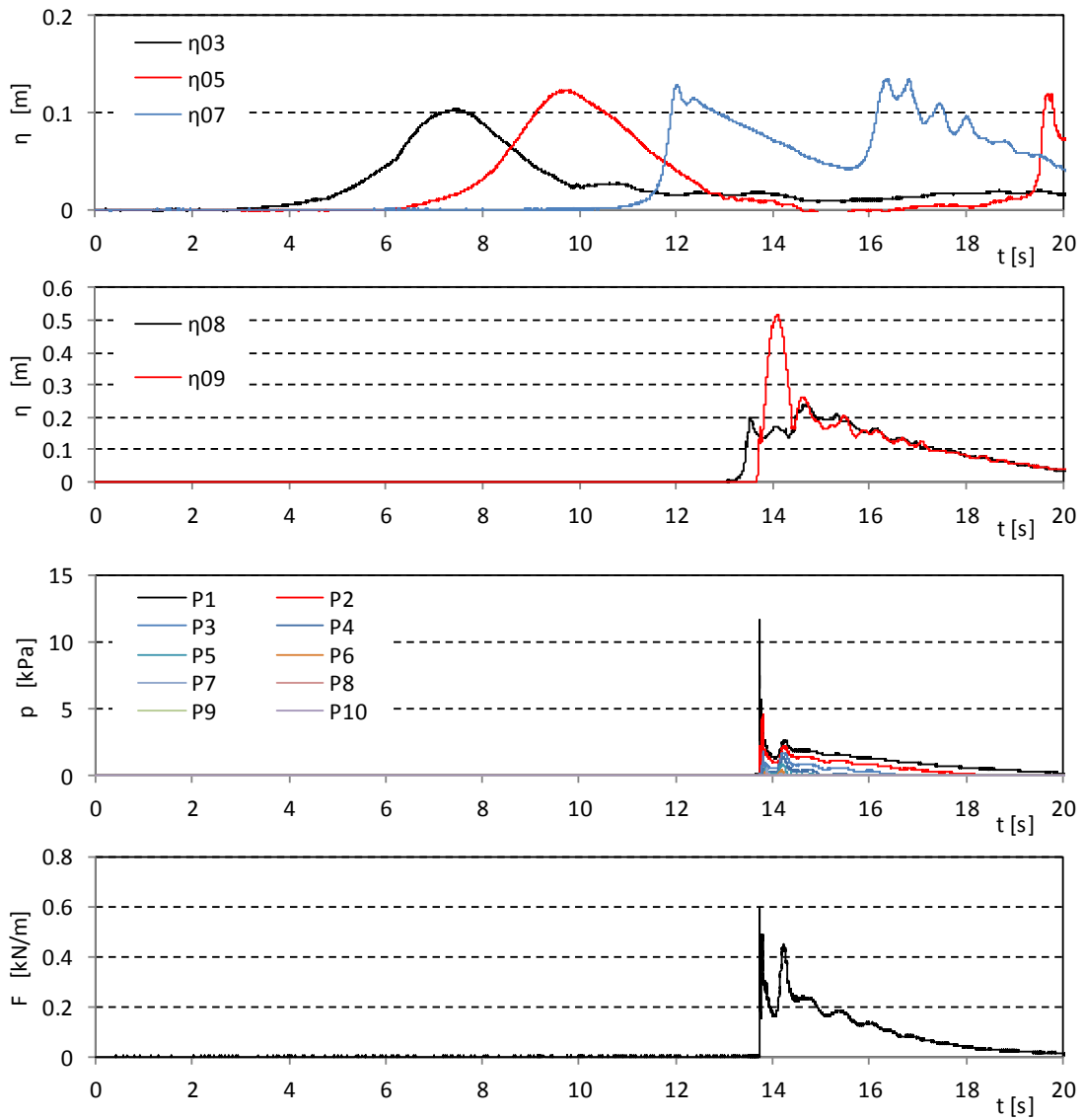


図- 4.1.4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m, Wc14)

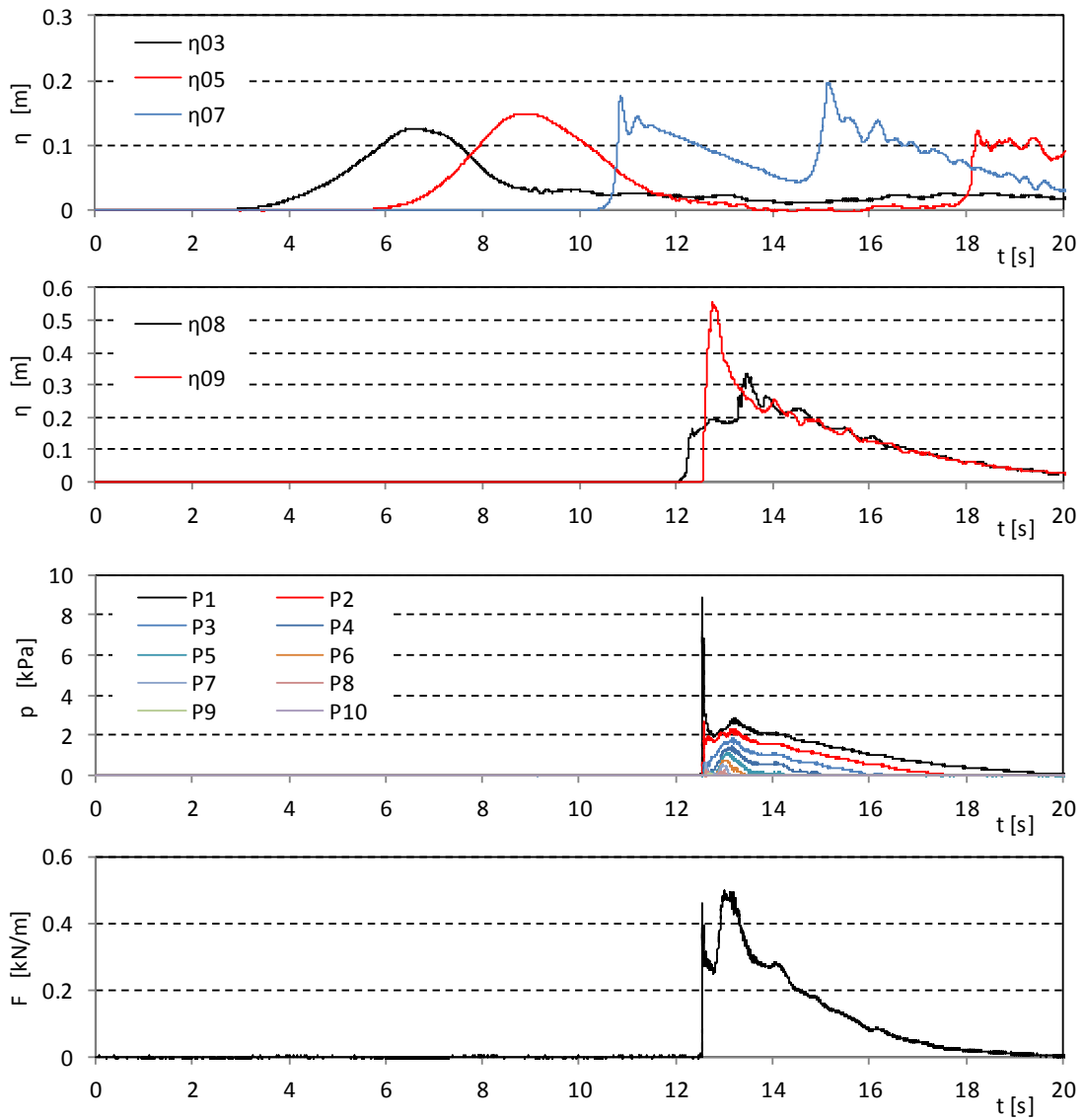


図- 4.1.4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m, Wc15)

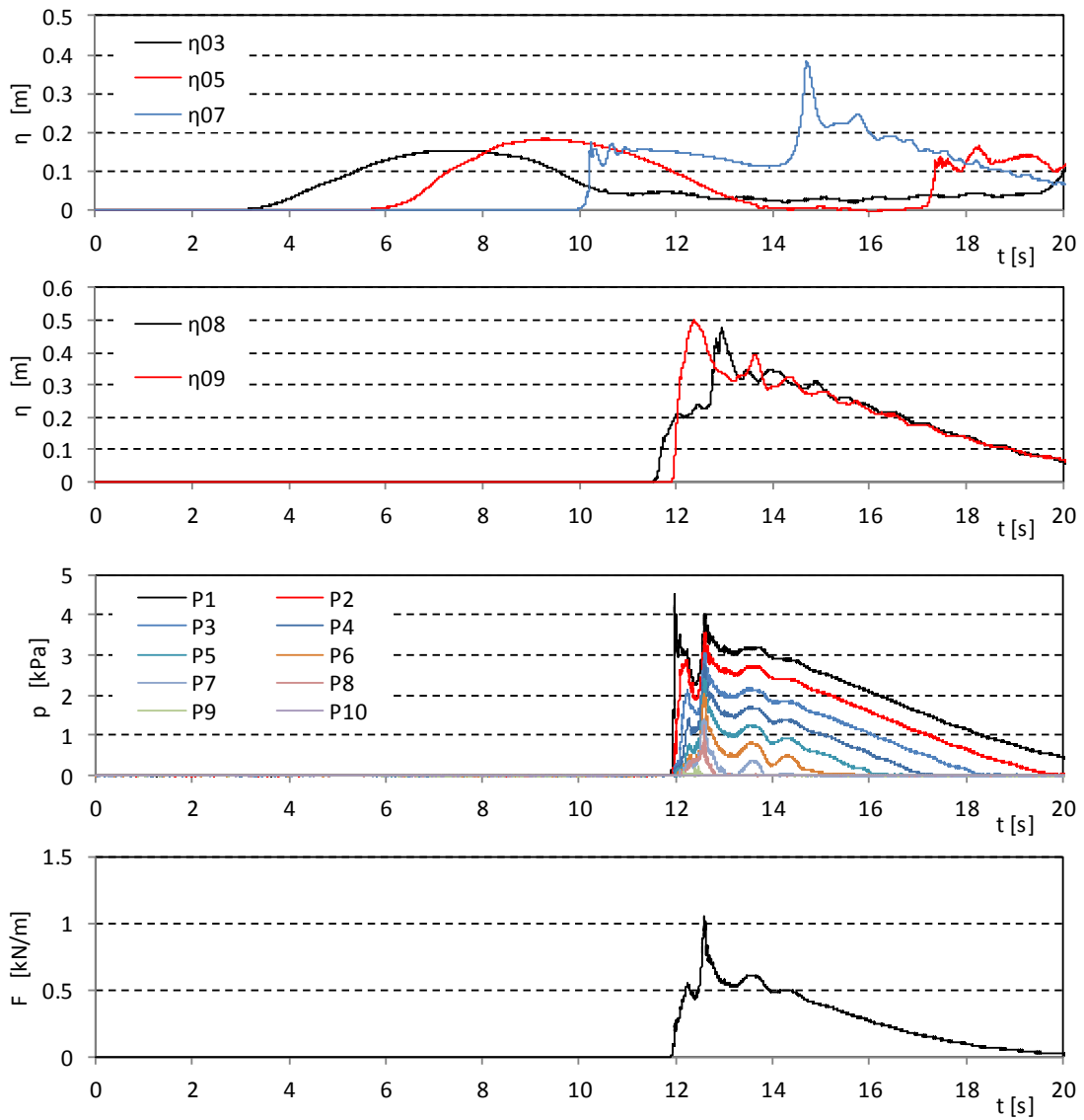


図- 4.1.4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m, Wc21)

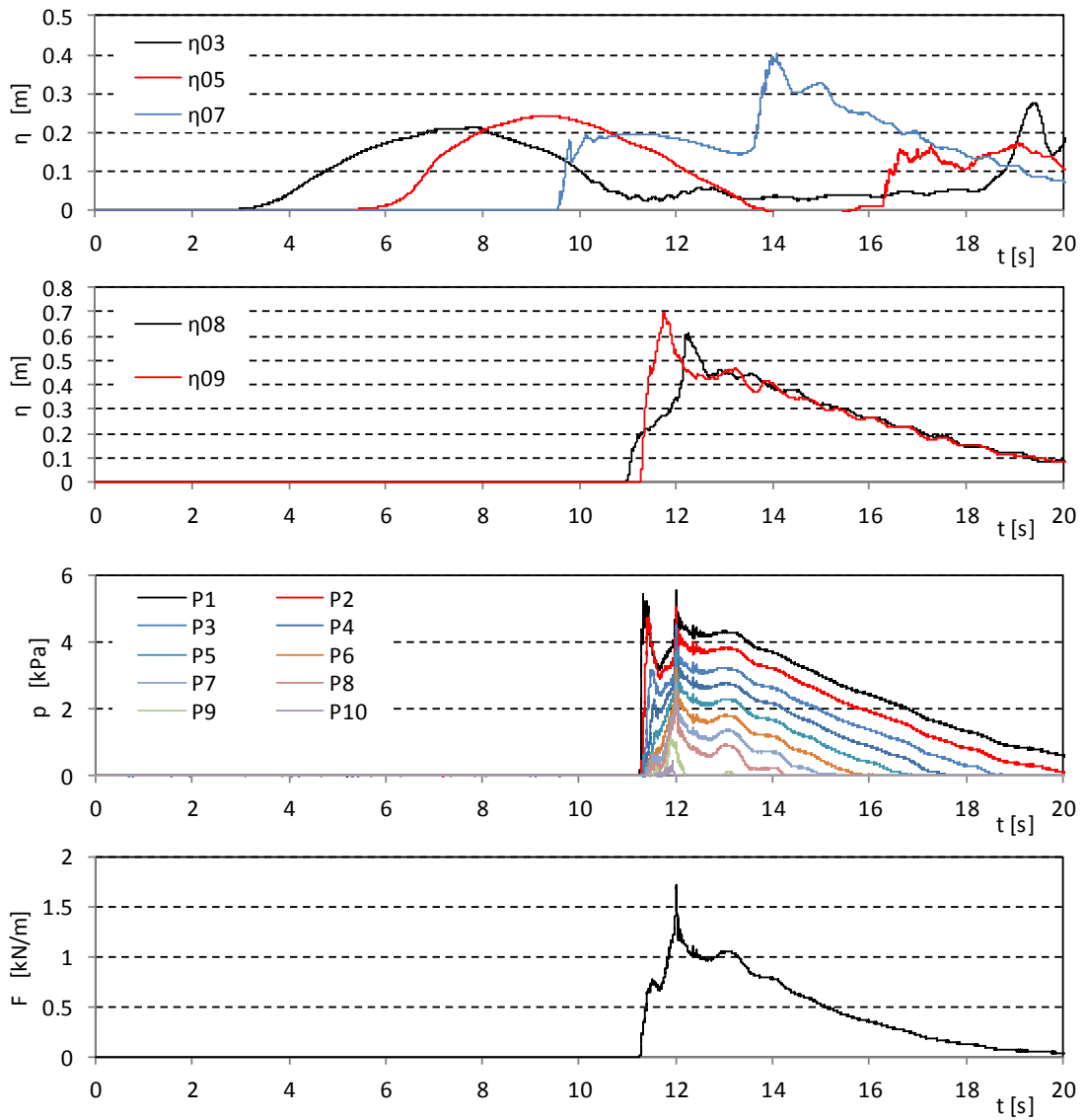


図- 4.1.4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m, Wc22)

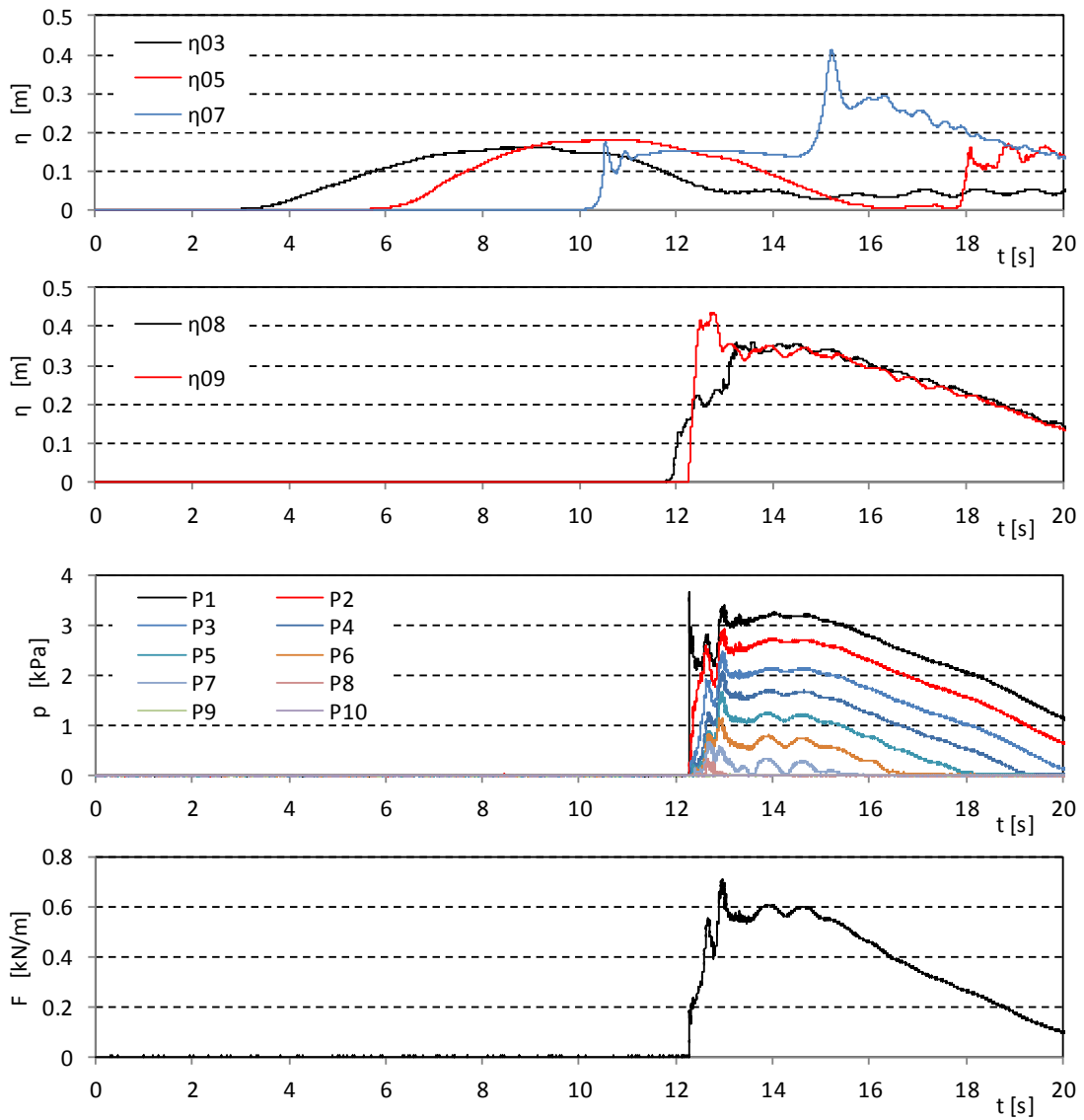


図- 4.1.4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m, Wc31)

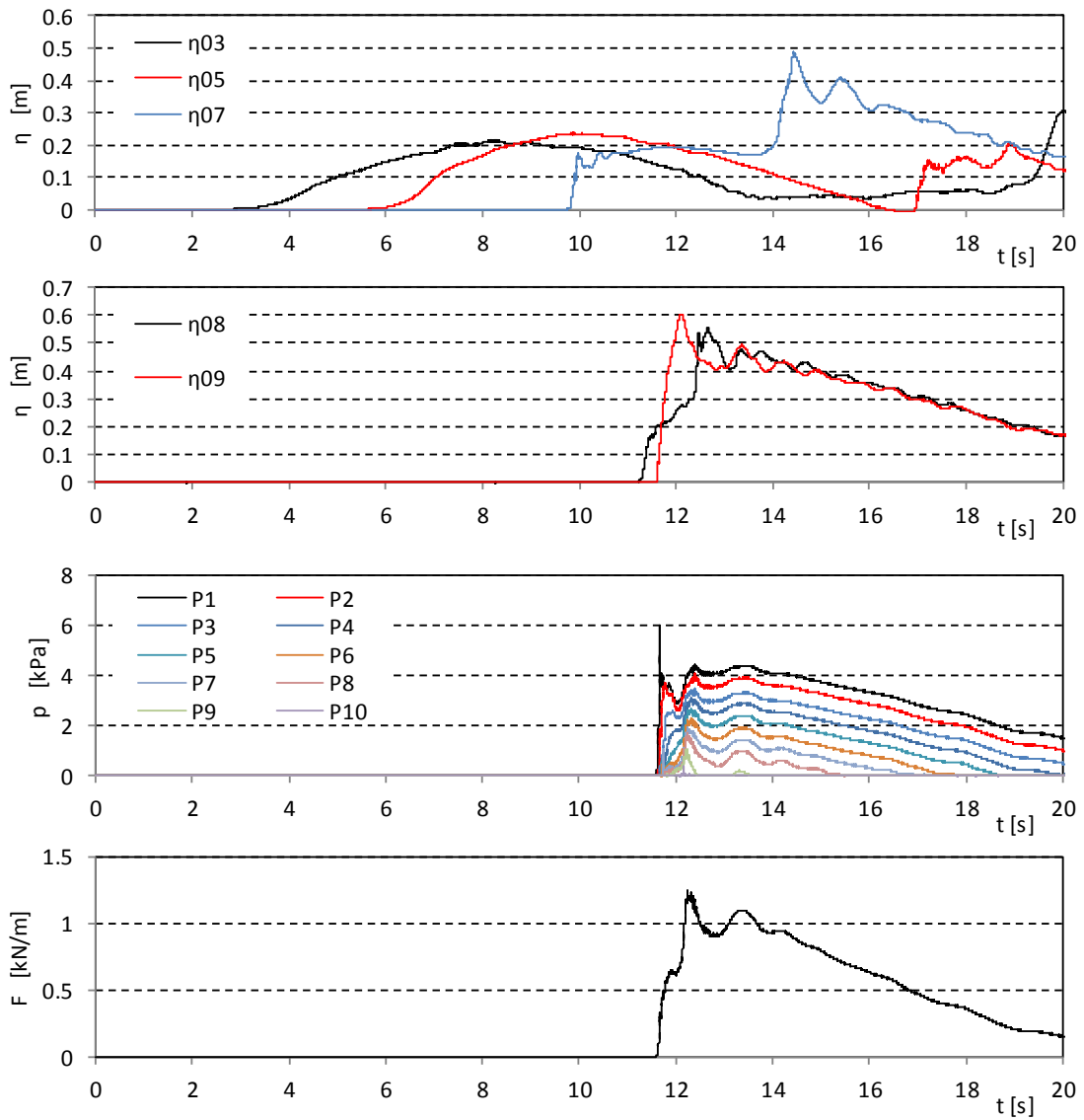


図- 4.1.4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m, Wc32)

4.2. 波力・モーメントの時系列と最大波力作用時の圧力分布

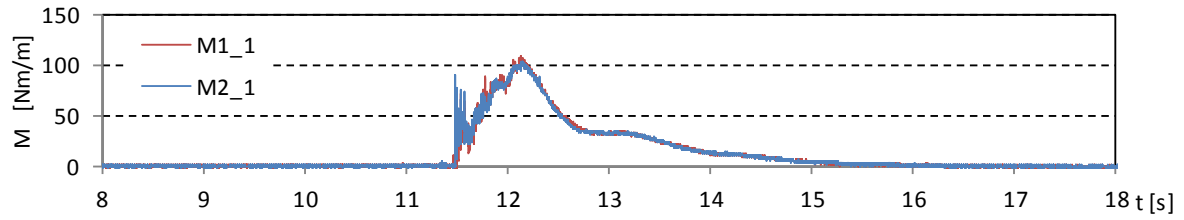
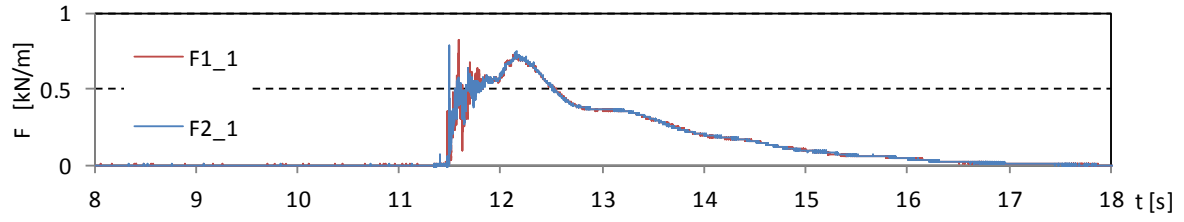
図- 4.2.1～図- 4.2.4 に、堤体前面の 2 測線で計測した圧力から、それぞれ波力およびモーメントを積分により求めた結果を示す。15 回繰り返し試験のうち、1 回目の結果を示した。津波到達時の衝撃的な波力を除き、2 測線の波力とモーメントの計測結果はほぼ一致しており、水路横断方向に一様に津波が作用していることが分かる。一方で、津波到達時には 2 測線で若干の違いが確認される。津波が堤体に衝突すると、水塊が壁面に沿って上方に打ち上げられ、流況が乱れて壁面に働く圧力も不均一になると考えられる。

図- 4.2.5～図- 4.2.8 に、段波波力および持続波力最大時の、段波波圧および持続波圧の鉛直圧力分布を示す。各点は、同じ高さの 2 測線の圧力計の計測結果の平均値を示しており、15 回の繰り返し試験のそれぞれの計測結果を示した。なお、段波波圧および持続波圧の算出方法については、7.1 に後述する。

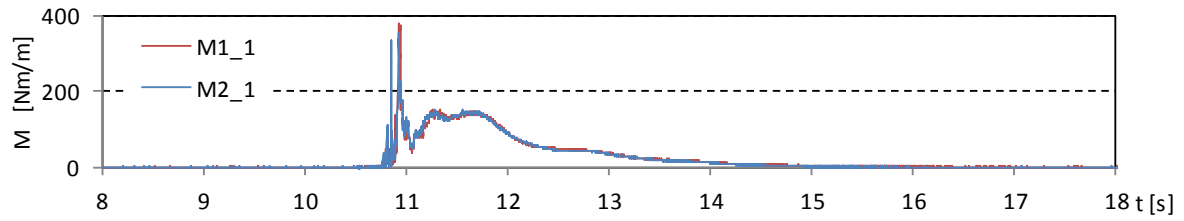
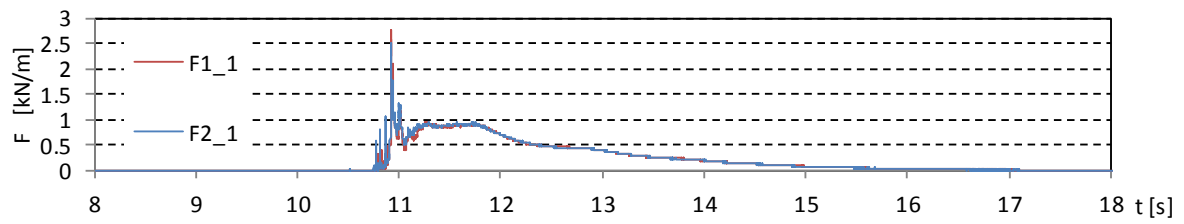
持続波圧に関しては、15 回のばらつきが比較的小さいことが分かる。またその分布形状も直線的である。直立護岸の堤体設置位置 0.625m の Wc13 など、一部 15 回のばらつきが大きいケースがあるが、これらのケースは一旦堤体に沿って上方に打ち上げられた水塊が、落下する際に最大波力が生じているケースである。また、持続波力の圧力分布の勾配は、概略静水圧分布に近い値ではあるが、厳密には静水圧分布よりも鉛直軸に対し勾配が小さくなっている。最大波力は、堤体前面水深が最大となり、水位が上昇から下降に転じる際に生じている。したがってこの時、鉛直方向に負の加速度が生じており、このため圧力勾配が ρg よりも小さくなっていると考えられる。

段波波圧に関しては、15 回の試行による圧力分布のばらつきが持続波圧よりも大きい。またその分布形状は、底面付近に圧力が集中しており、上方の圧力が小さいことが分かる。ただし、単純勾配の堤体設置位置 0m の Wc22 など、段波波圧が著しく大きいケースでは、底面よりも少し上の $z=0.2\text{m}$ 付近に圧力が集中している。これらのケースでは、砕波しながら堤体に津波が衝突しているため、巻き波の先端部分が直接堤体に衝突し、底面よりも上の部分に大きな圧力が生じていると考えられる。

Wc11



Wc12



Wc13

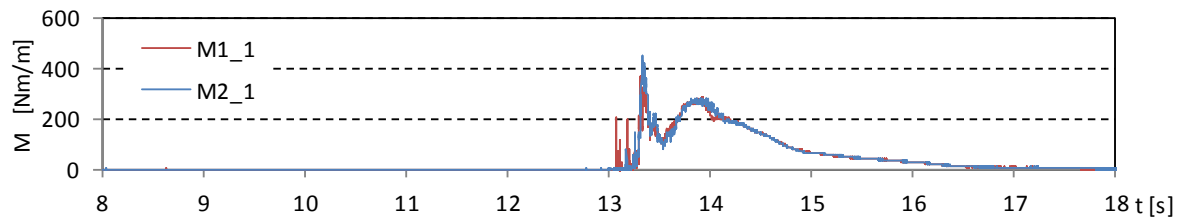
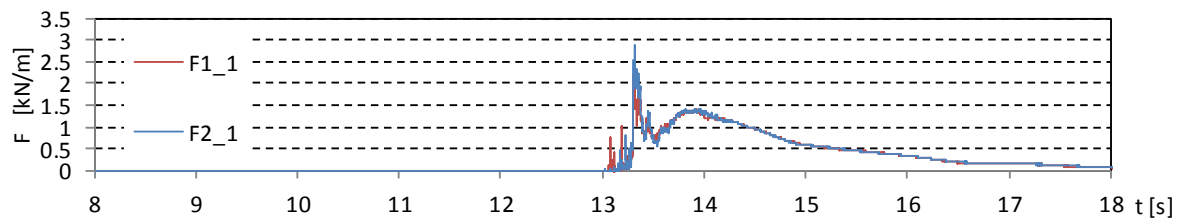
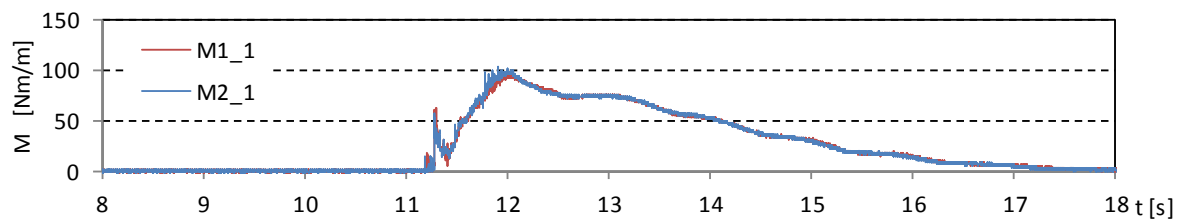
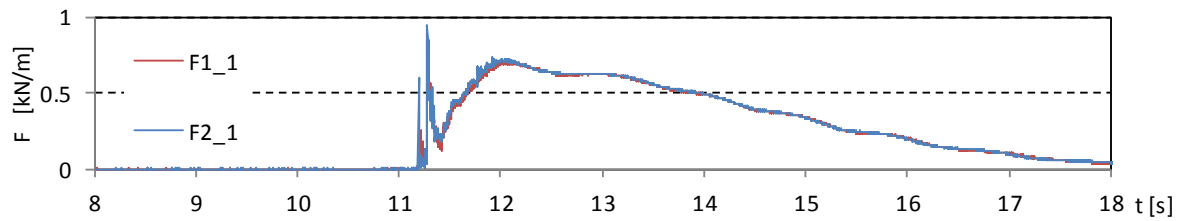


図- 4.2.1 津波波力の算出結果 (単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0m, 1回目)

Wc21



Wc22

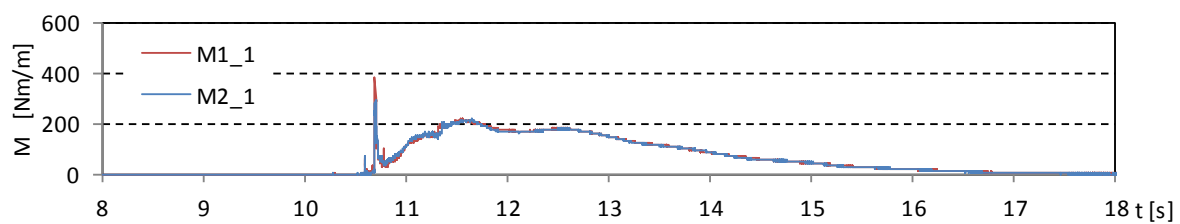
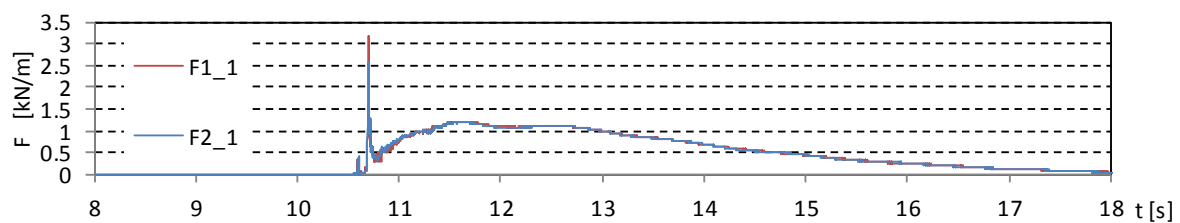
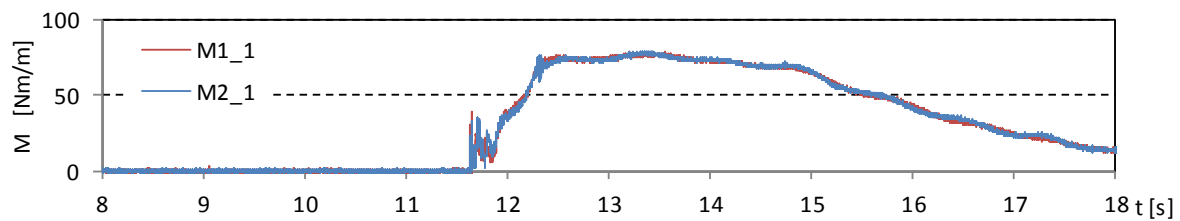
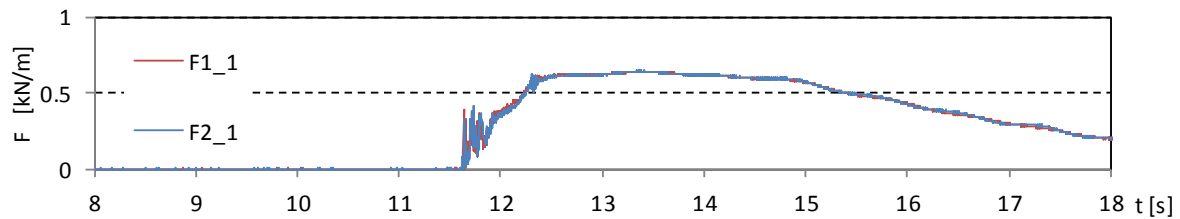


図- 4.2.1 津波波力の算出結果 (単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0m, 1 回目)

Wc31



Wc32

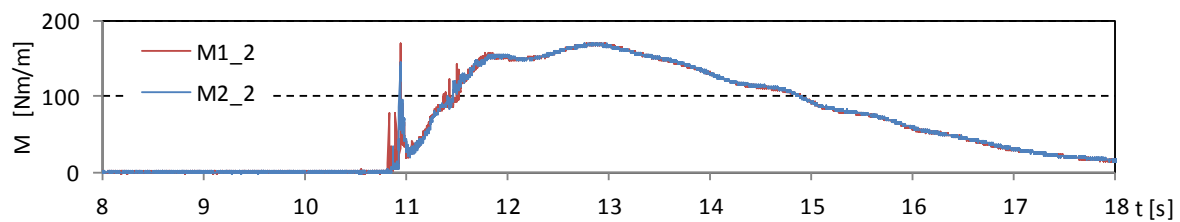
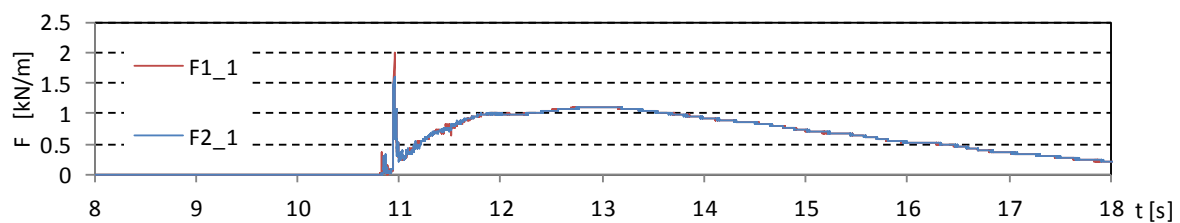
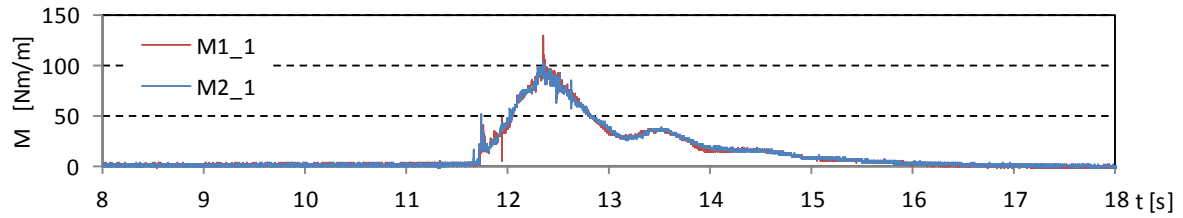
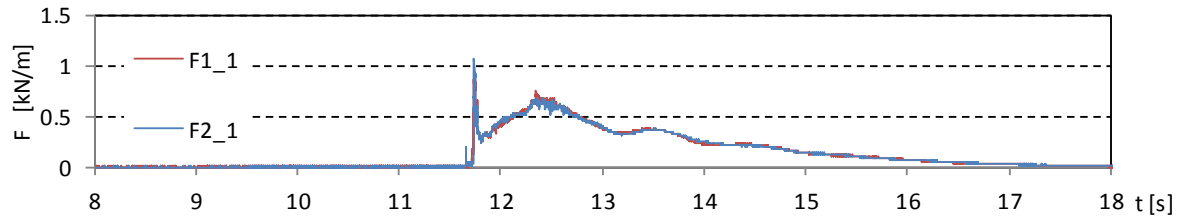
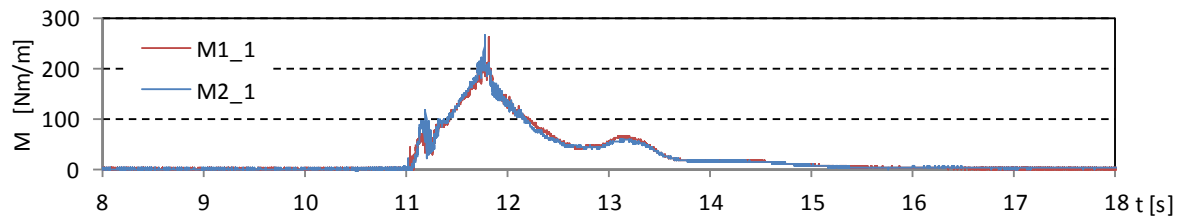
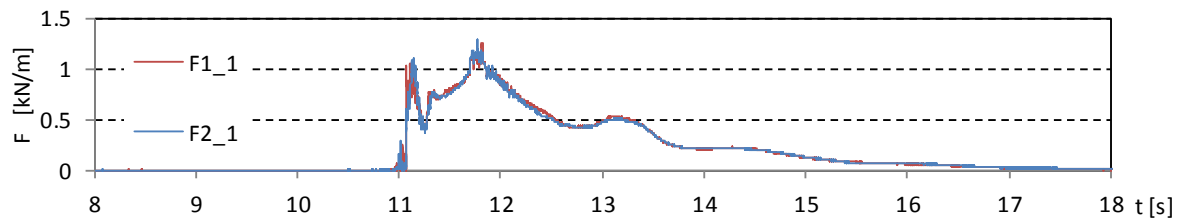


図- 4.2.1 津波波力の算出結果 (単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0m, 1回目)

Wc11



Wc12



Wc13

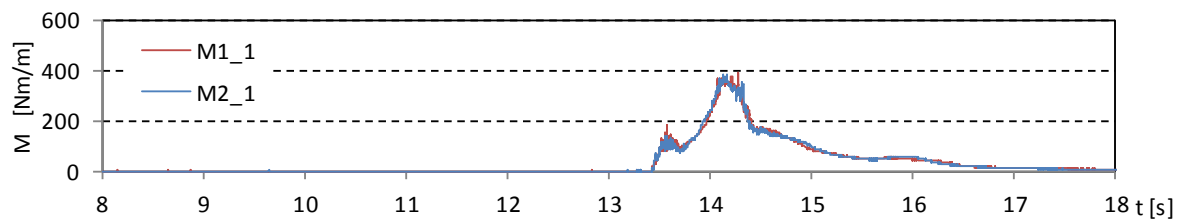
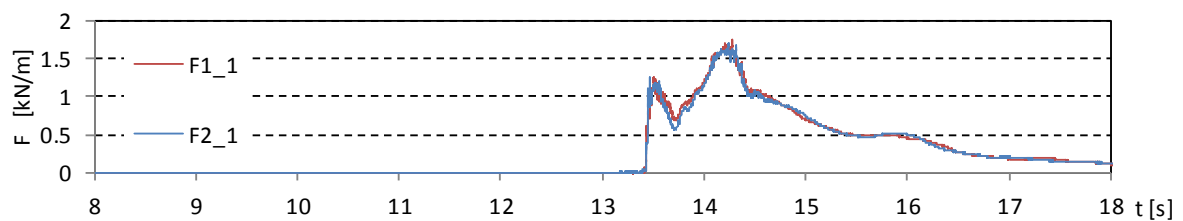
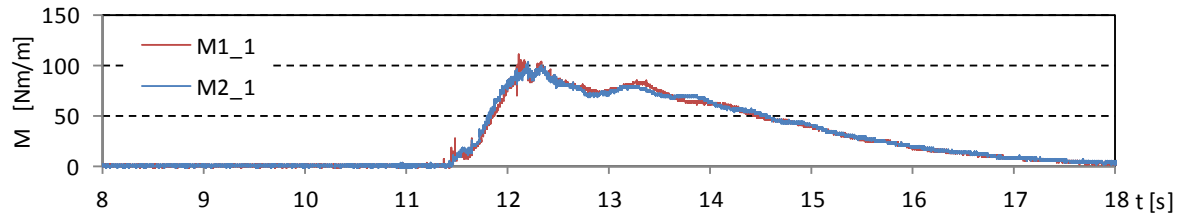
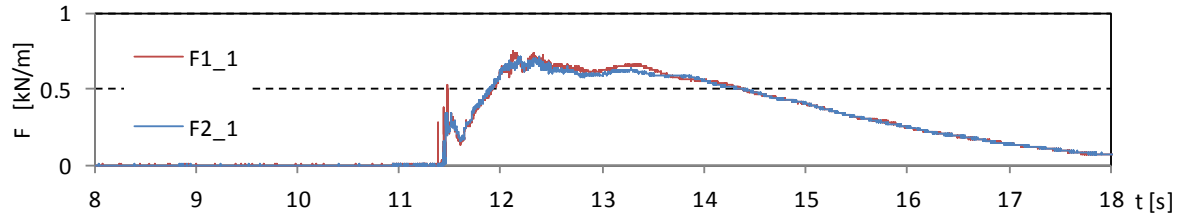


図- 4.2.2 津波波力の算出結果 (単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m, 1 回目)

Wc21



Wc22

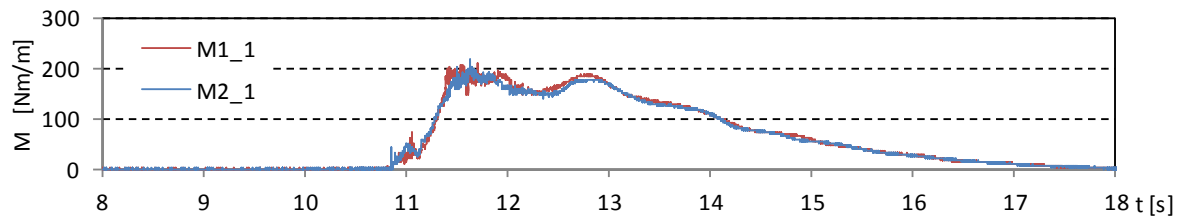
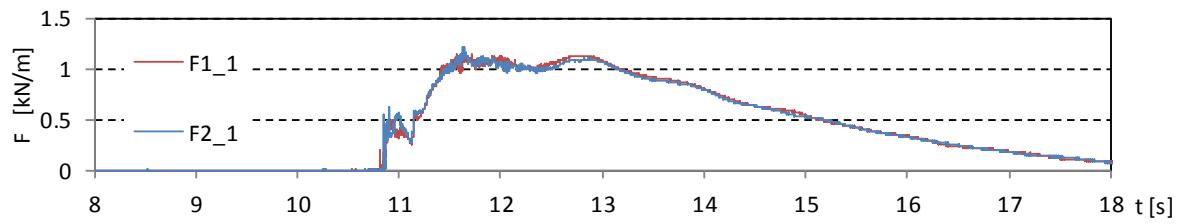
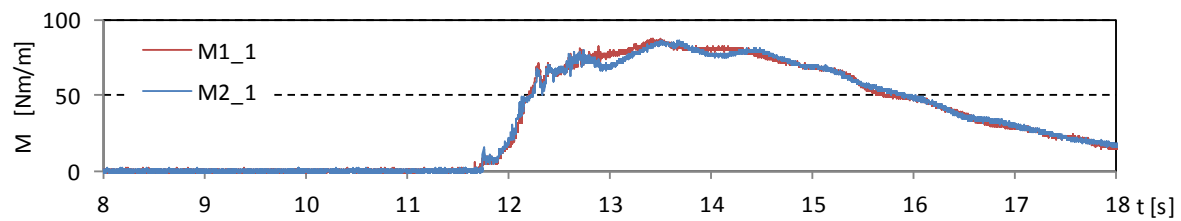
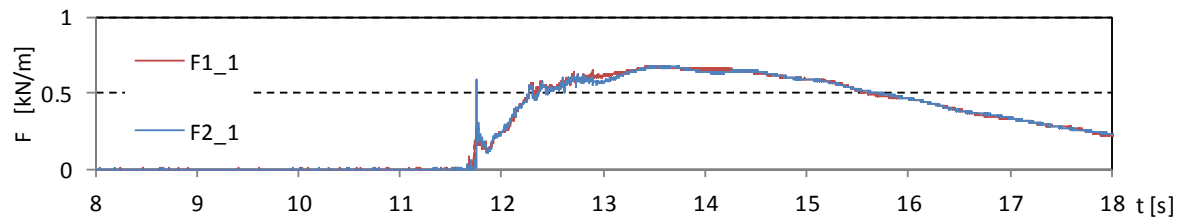


図- 4.2.2 津波波力の算出結果 (単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m, 1 回目)

Wc31



Wc32

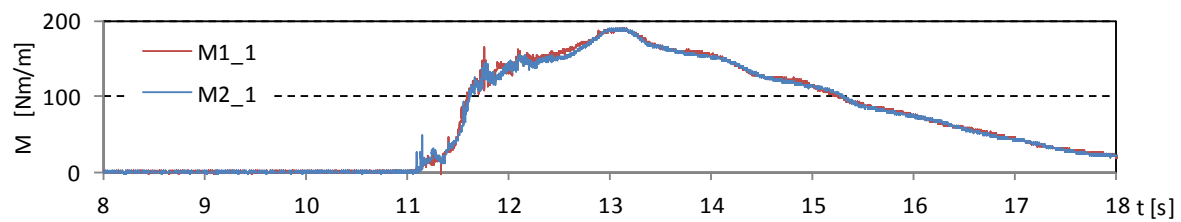
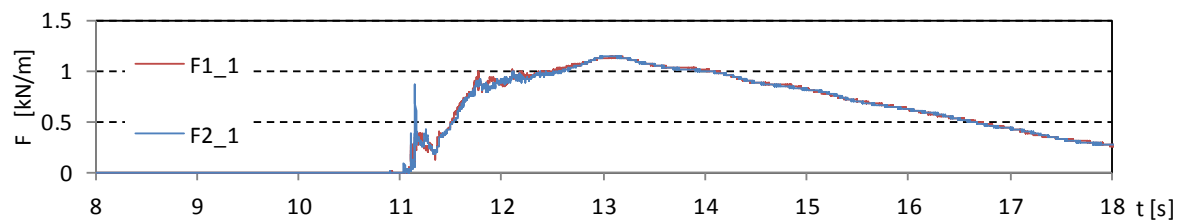
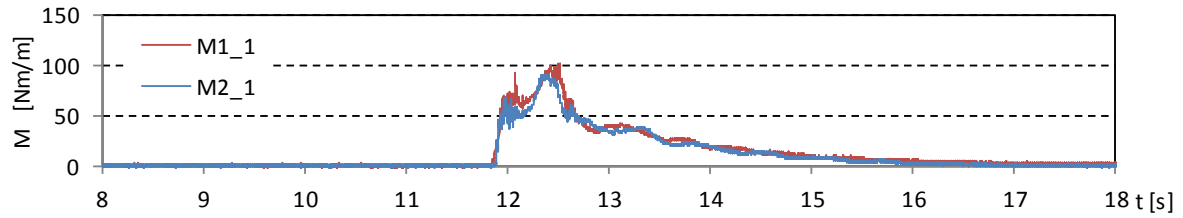
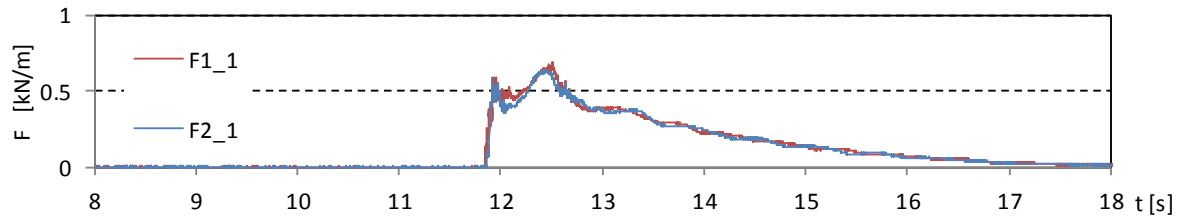
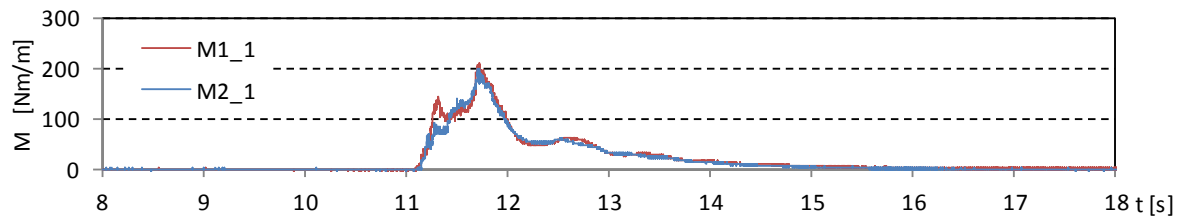
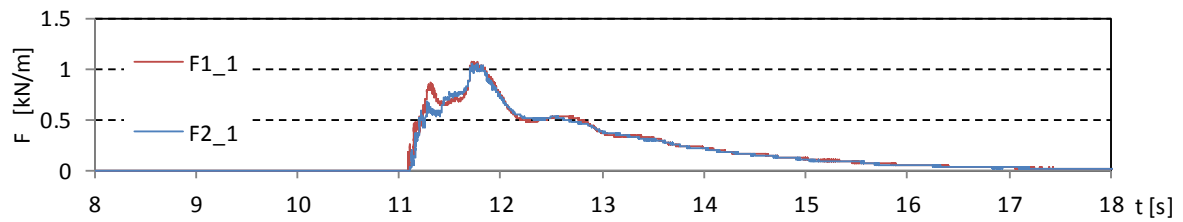


図- 4.2.2 津波波力の算出結果 (単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m, 1 回目)

Wc11



Wc12



Wc13

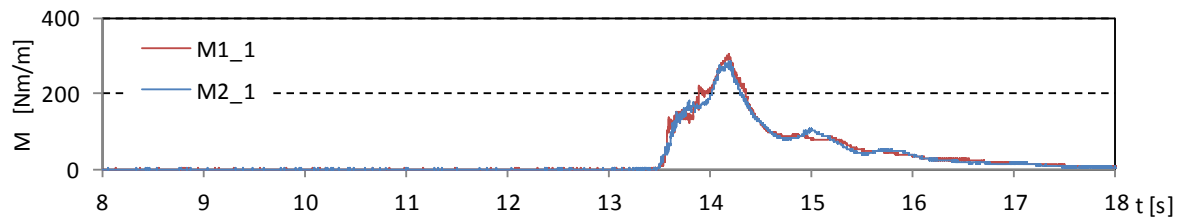
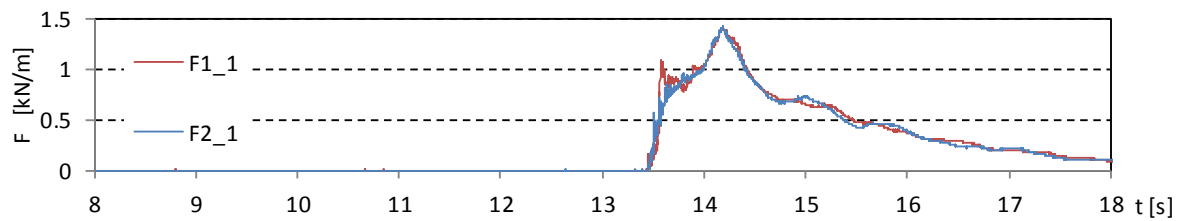
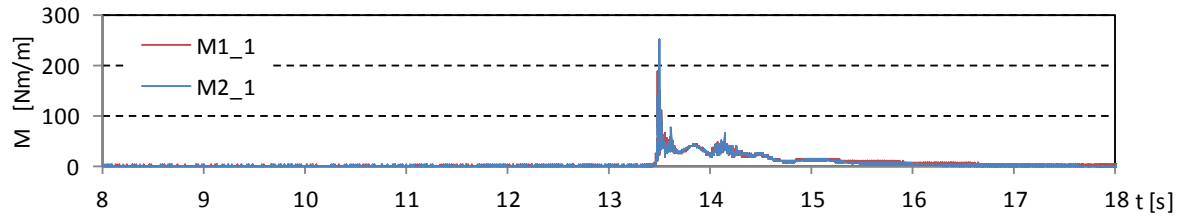
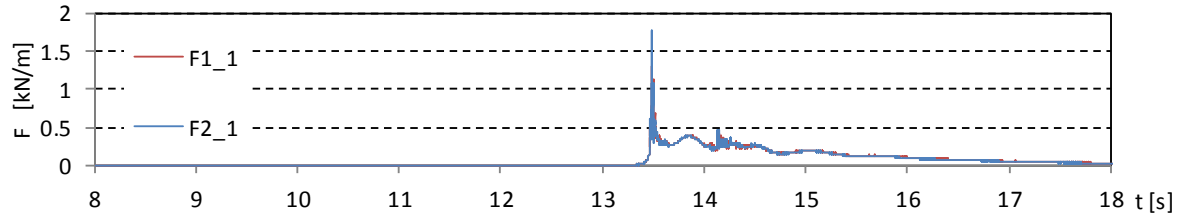


図- 4.2.3 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0m, 1回目)

Wc14



Wc15

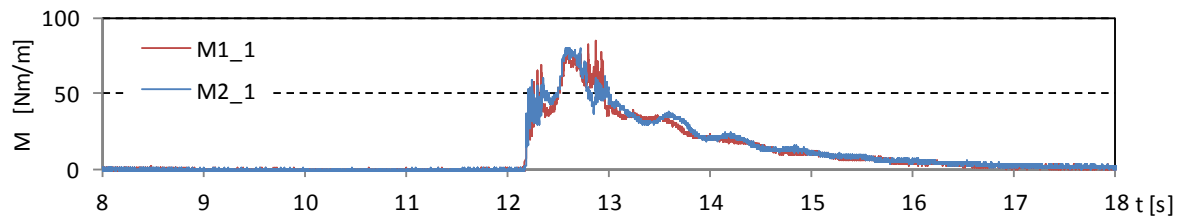
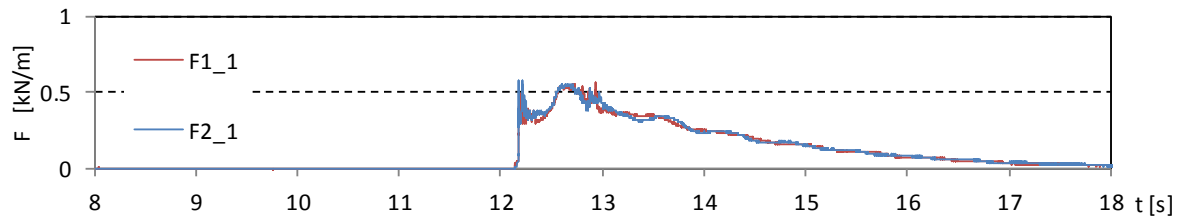
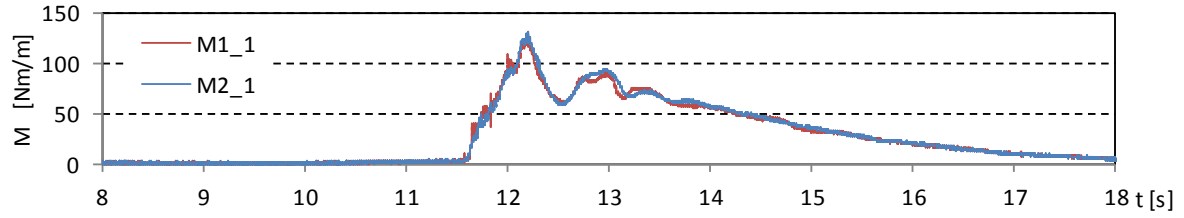
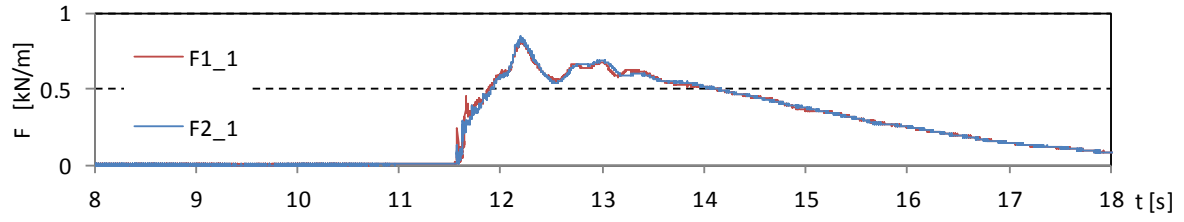


図- 4.2.3 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0m, 1回目)

Wc21



Wc22

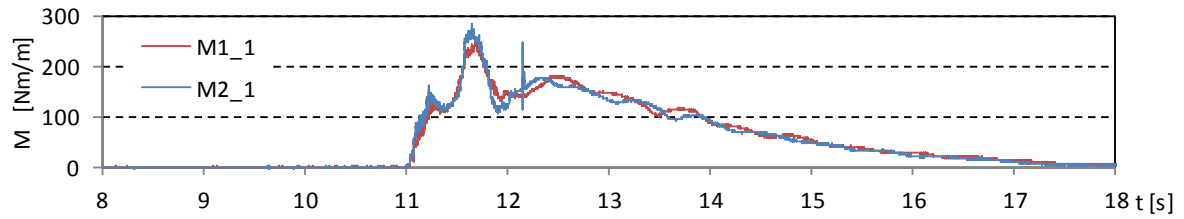
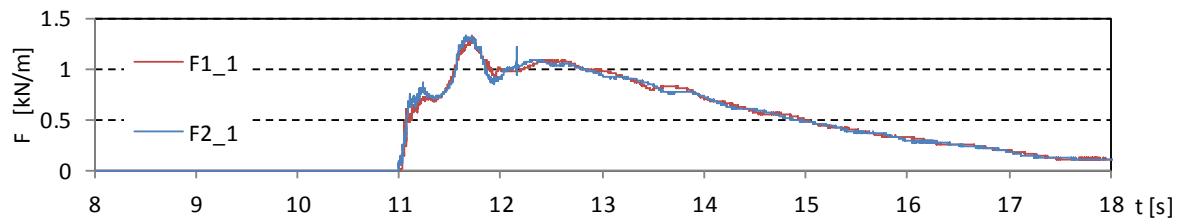
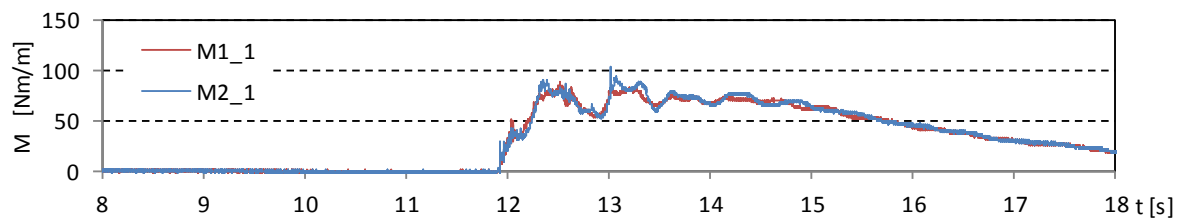
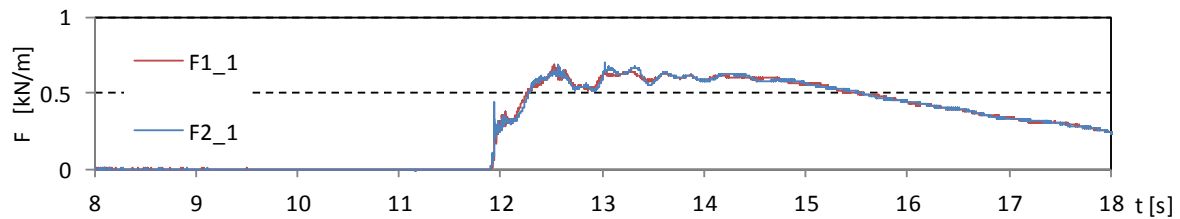


図- 4.2.3 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0m, 1回目)

Wc31



Wc32

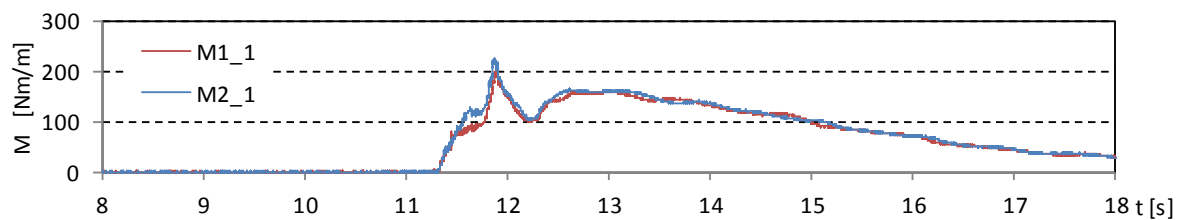
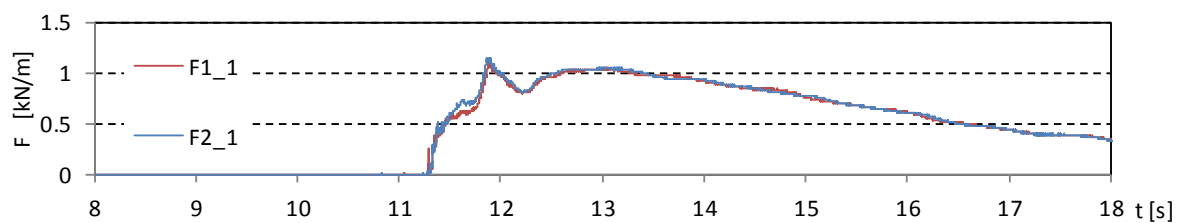
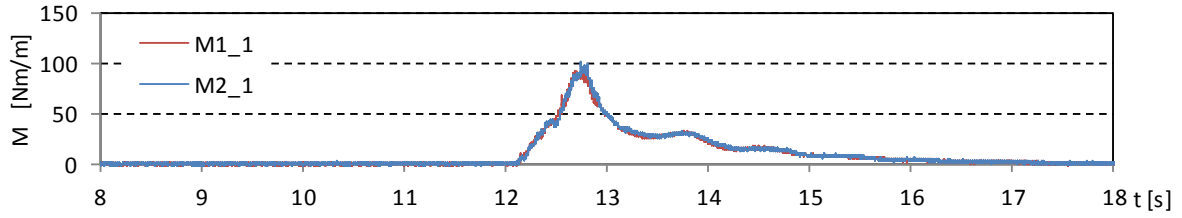
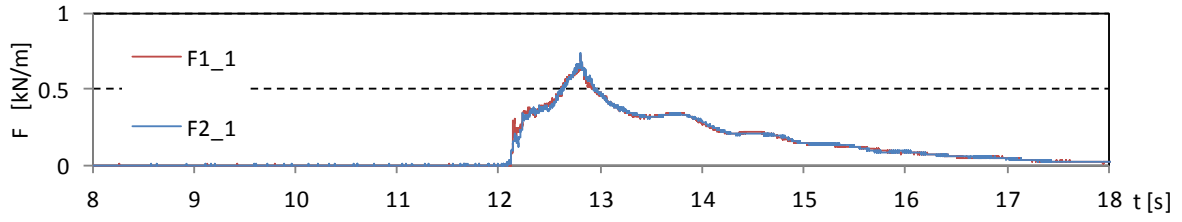
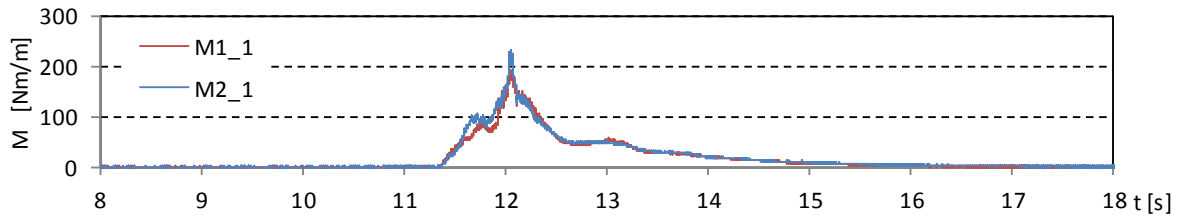
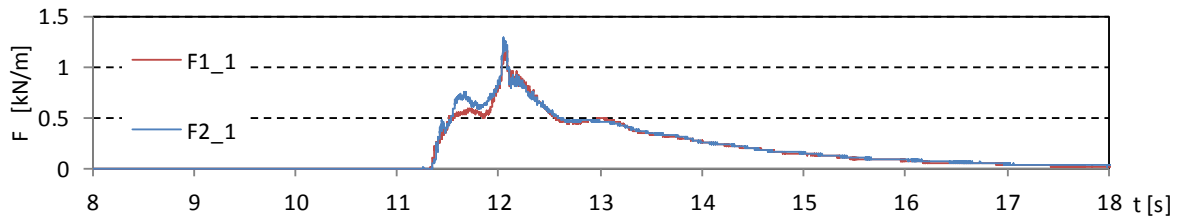


図- 4.2.3 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0m, 1回目)

Wc11



Wc12



Wc13

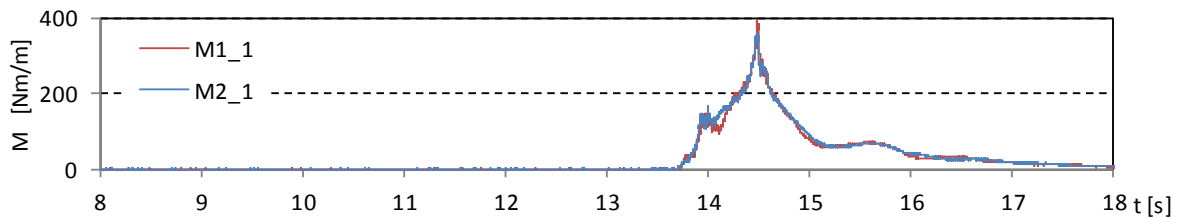
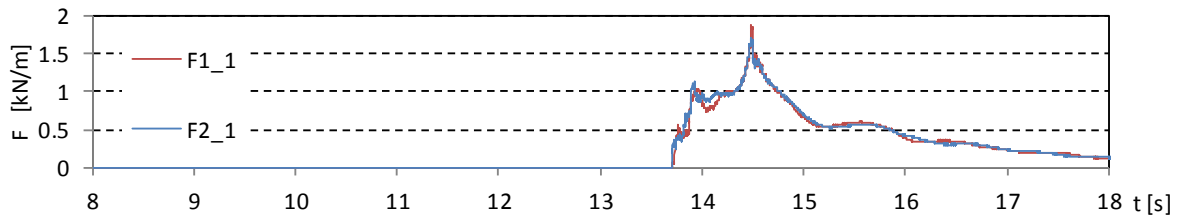
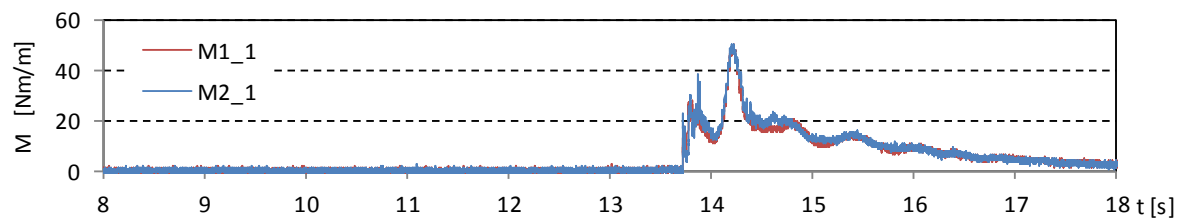
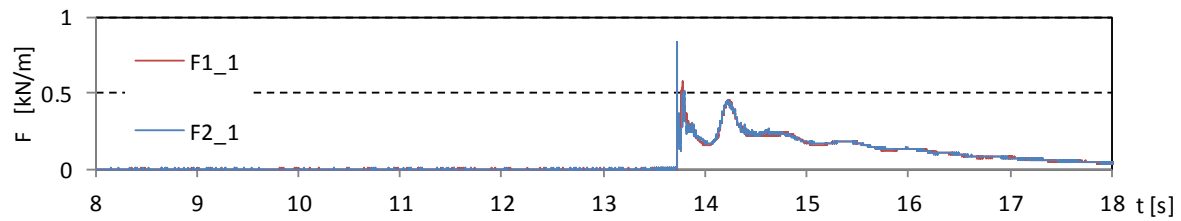


図- 4.2.4 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m, 1 回目)

Wc14



Wc15

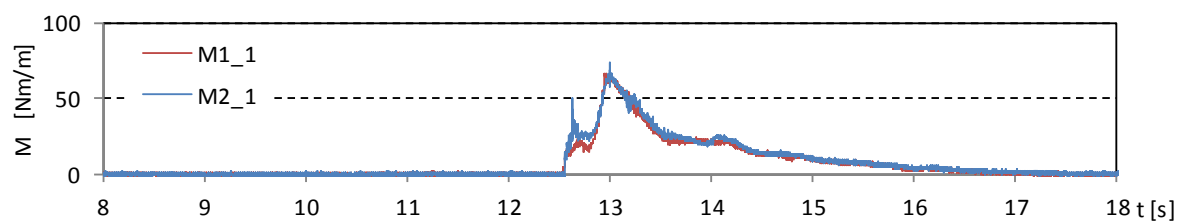
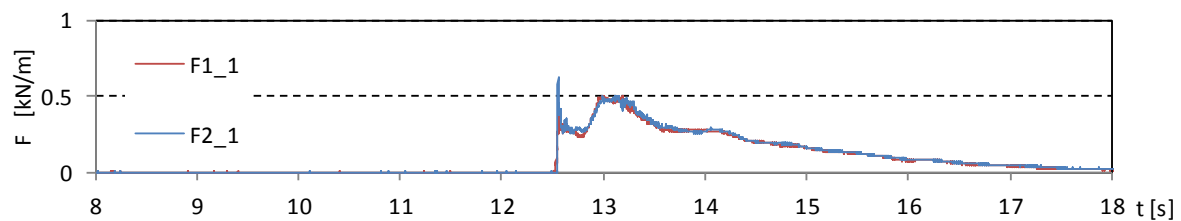
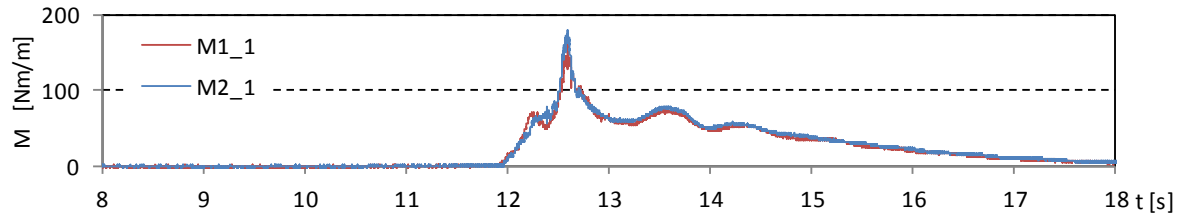
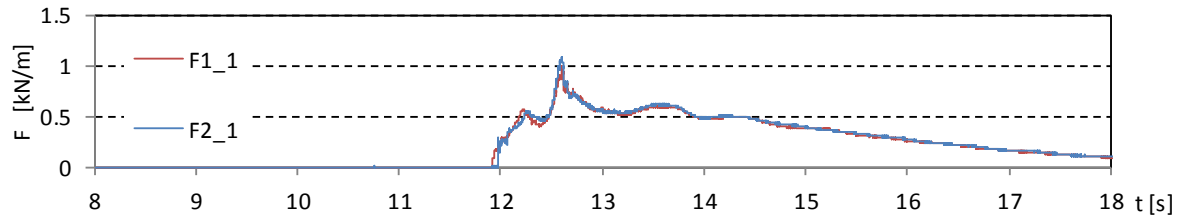


図- 4.2.4 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m, 1 回目)

Wc21



Wc22

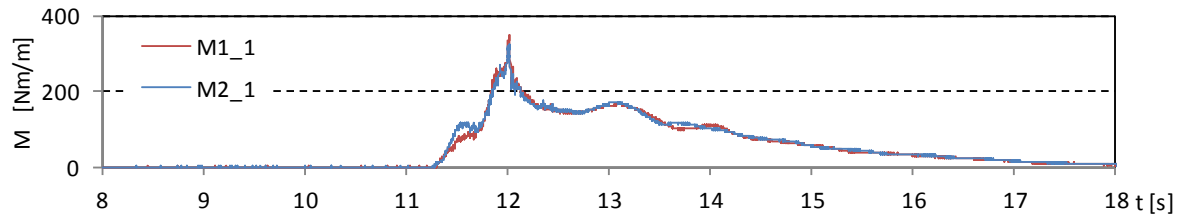
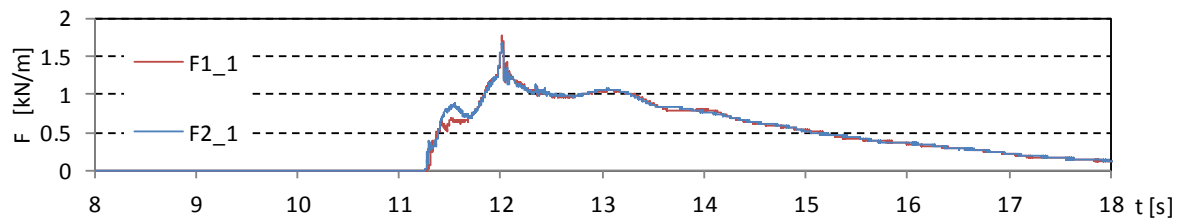
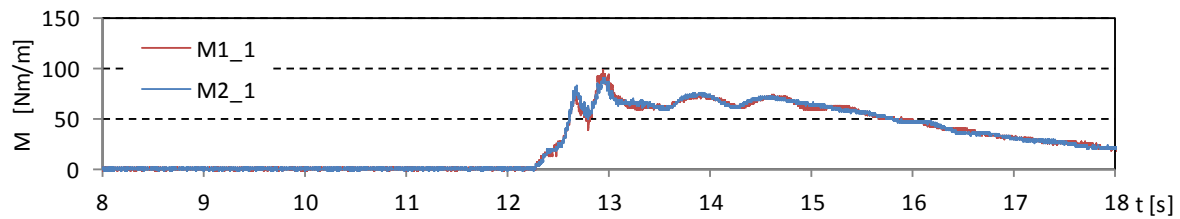
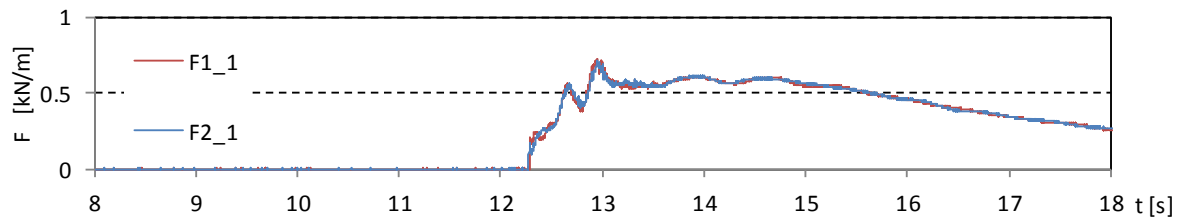


図- 4.2.4 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m, 1回目)

Wc31



Wc32

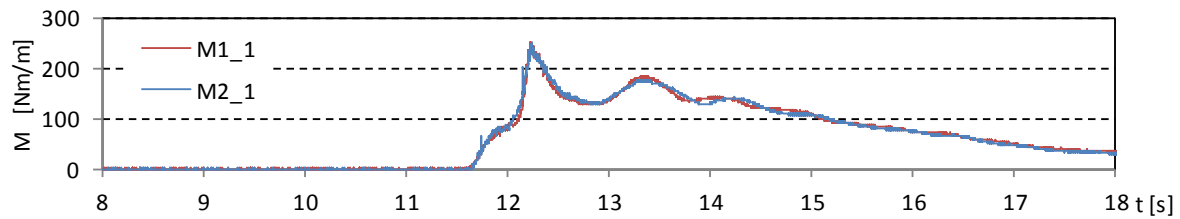
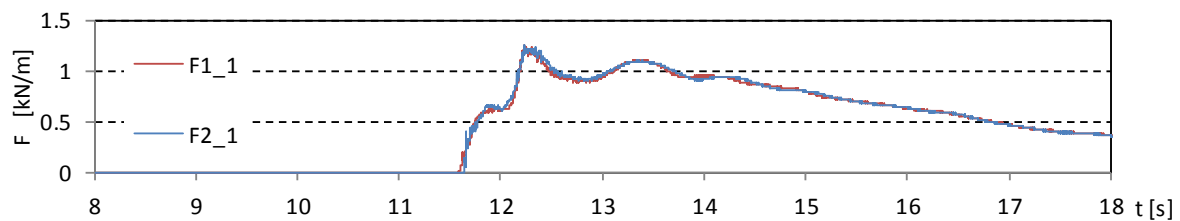


図- 4.2.4 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m, 1 回目)

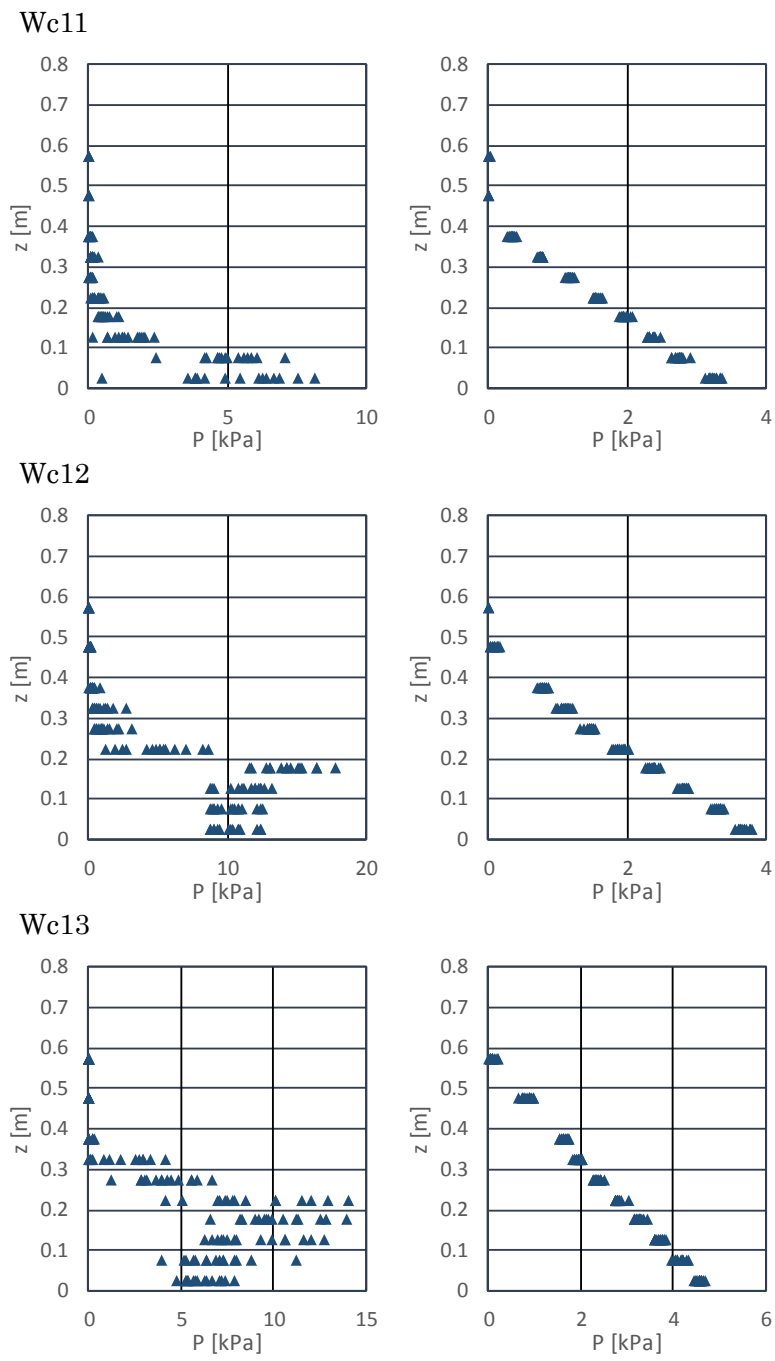


図- 4.2.5 圧力の鉛直分布 (左: 段波波圧, 右: 持続波圧, 単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0m)

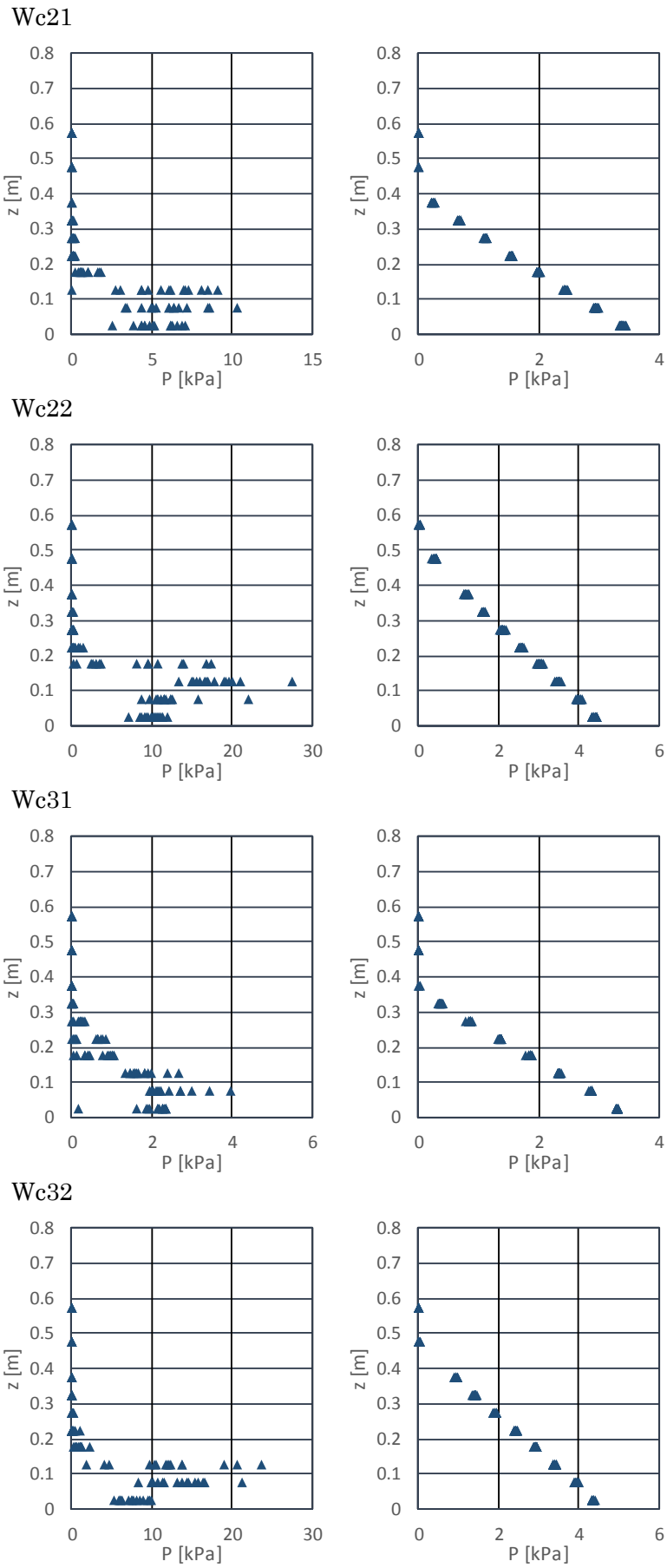


図- 4.2.5 圧力の鉛直分布 (左: 段波波圧, 右: 持続波圧, 単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0m)

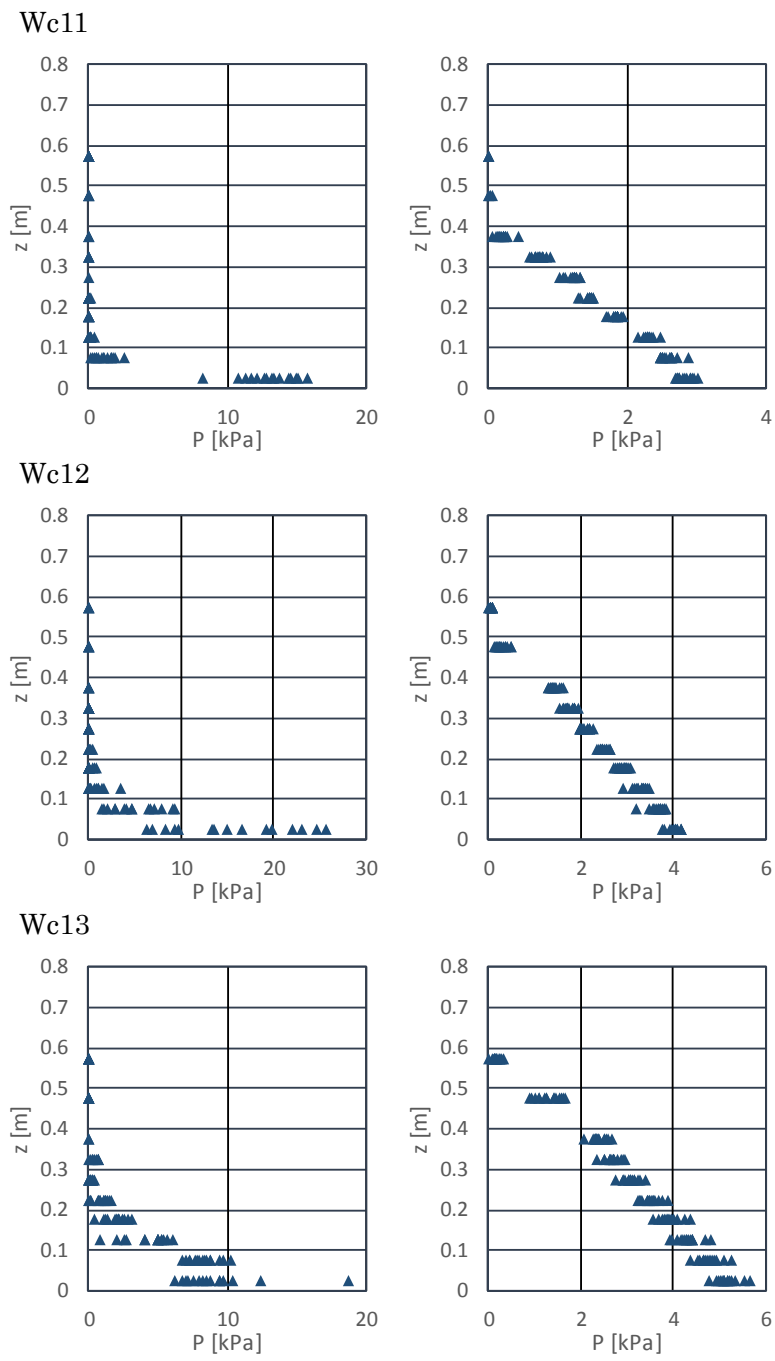


図- 4.2.6 圧力の鉛直分布(左:段波波圧, 右:持続波圧, 単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m)

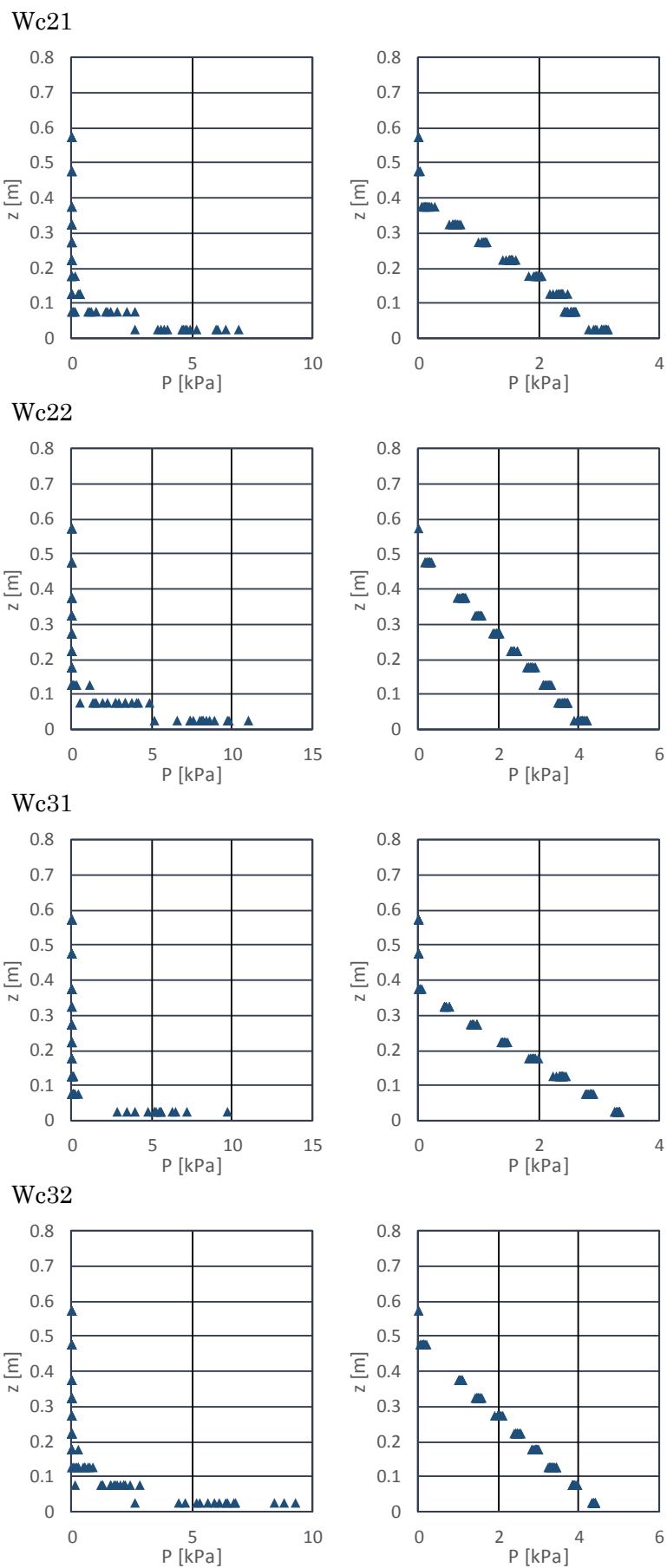


図- 4.2.6 圧力の鉛直分布(左:段波波圧,右:持続波圧,単純勾配,堤体 TypeA,設置位置 0.625m)

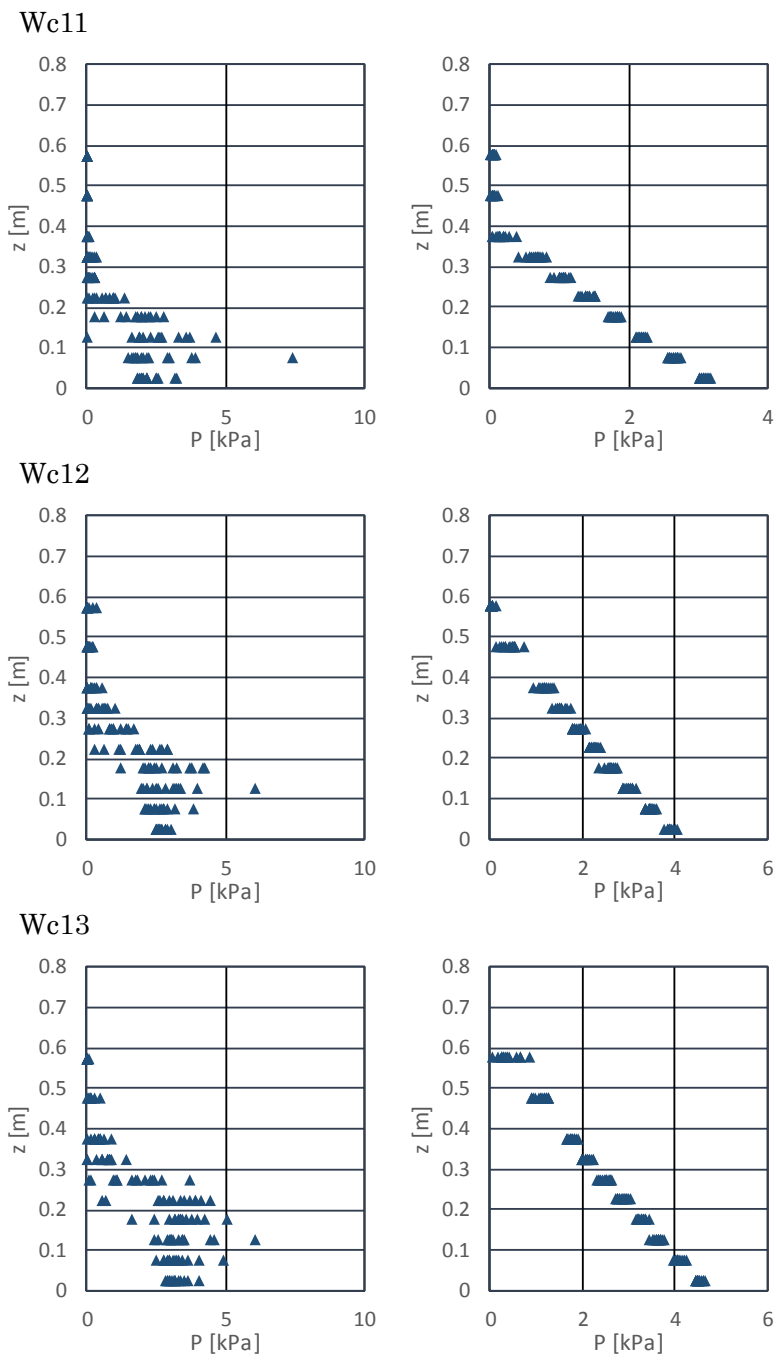
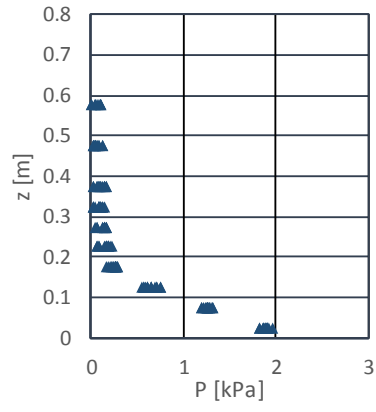
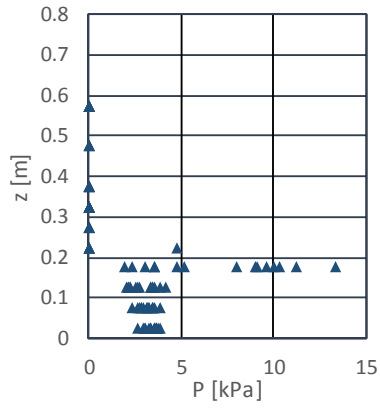


図- 4.2.7 圧力の鉛直分布 (左: 段波波圧, 右: 持続波圧, 直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0m)

Wc14



Wc15

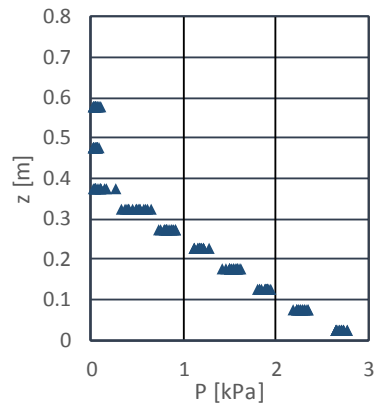
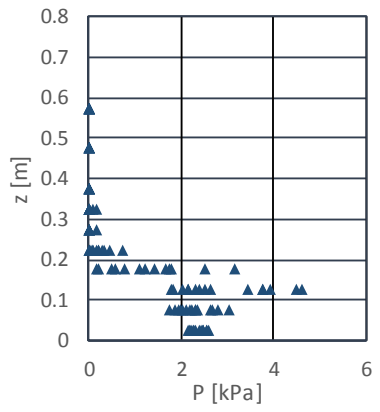


図- 4.2.7 圧力の鉛直分布 (左: 段波波圧, 右: 持続波圧, 直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0m)

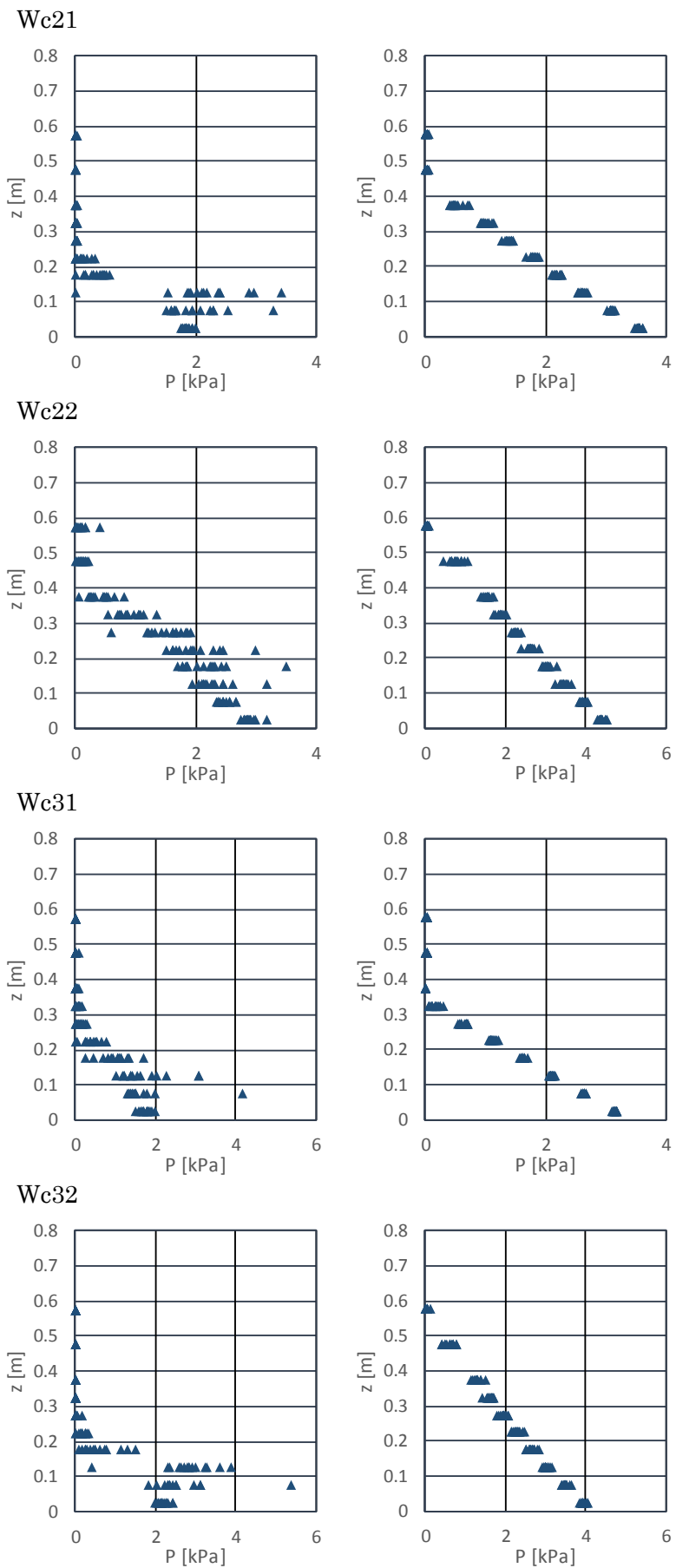


図- 4.2.7 圧力の鉛直分布 (左: 段波波圧, 右: 持続波圧, 直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0m)

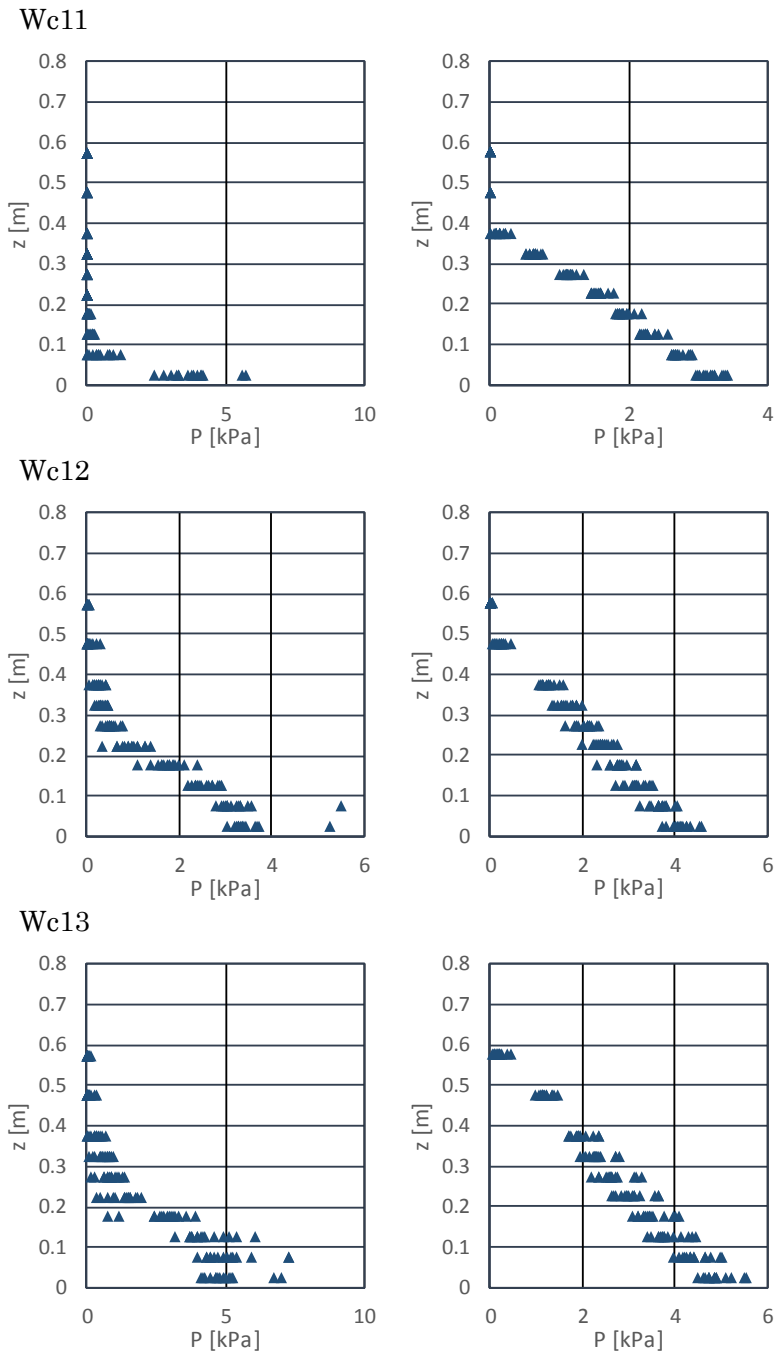


図- 4.2.8 圧力の鉛直分布(左:段波波圧,右:持続波圧,直立護岸,堤体 TypeA,設置位置 0.625m)

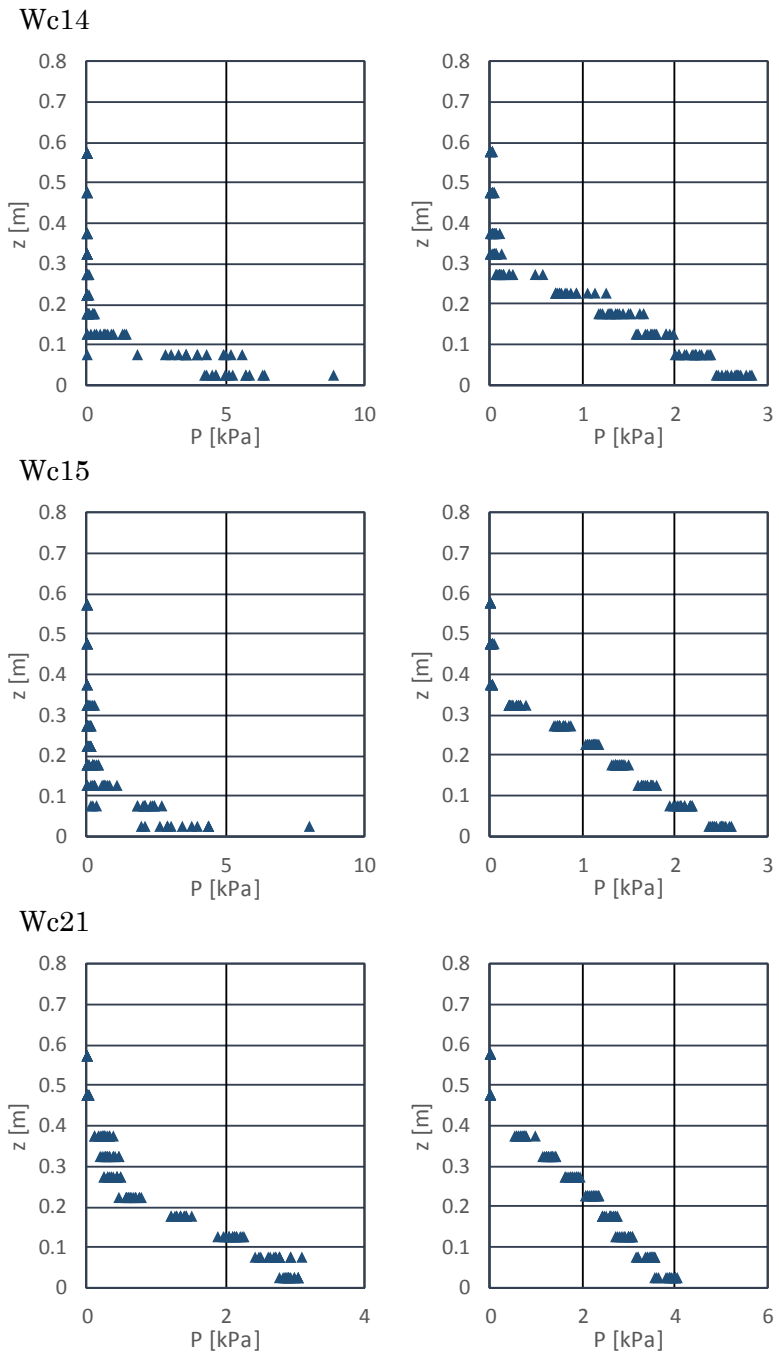


図- 4.2.8 圧力の鉛直分布(左:段波波圧,右:持続波圧,直立護岸,堤体 TypeA,設置位置 0.625m)

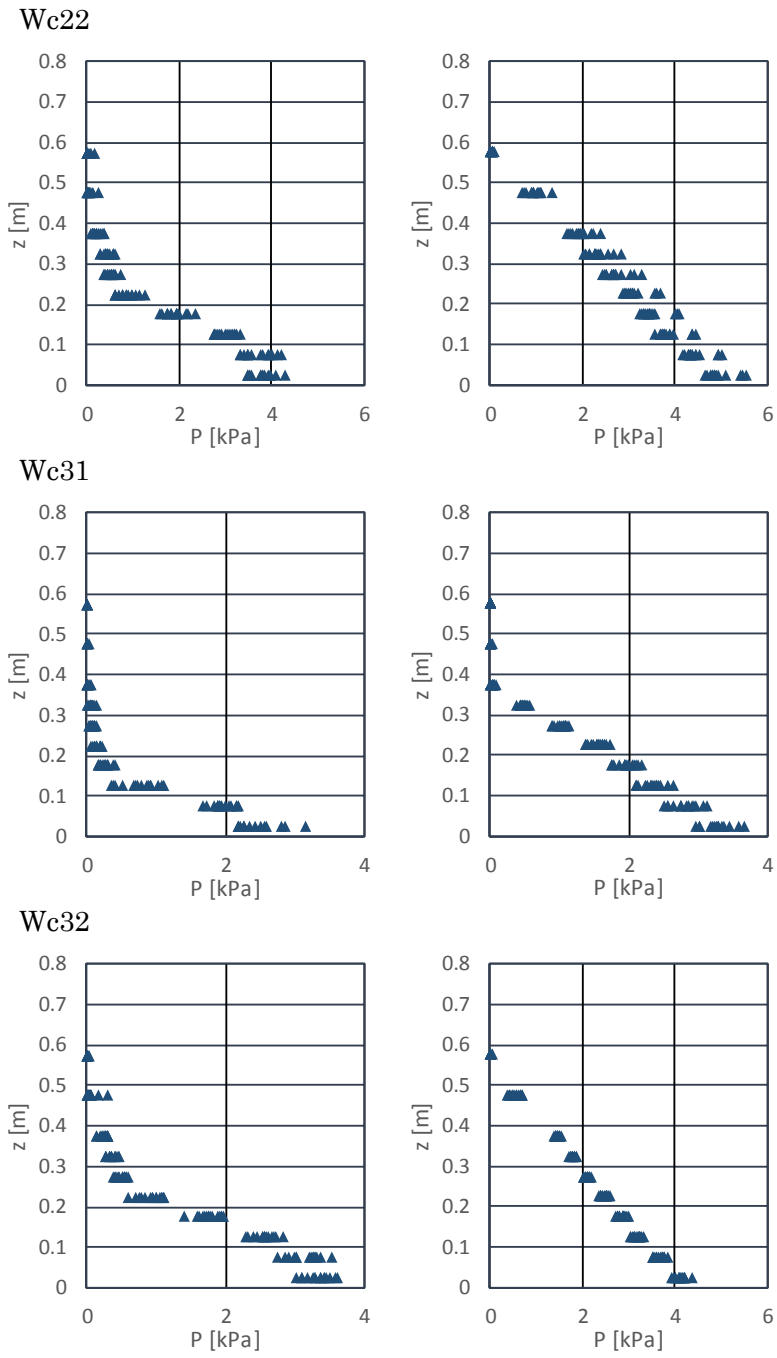


図- 4.2.8 圧力の鉛直分布(左:段波波圧, 右:持続波圧, 直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m)

5. 波力/波圧試験 (TypeB : 越流固定模型)

5.1. 水位と圧力の時系列計測結果

越流時の波力/波圧試験の計測結果を、単純勾配タイプ地形について、図- 5.1.1～図- 5.1.2 に、直立護岸タイプ地形について、図- 5.1.3～図- 5.1.4 にそれぞれ示す。同図には、沖波の代表水位時系列と、堤体に設置した圧力計により計測した圧力の時系列計測結果及び圧力計の計測結果を鉛直方向に積分することにより算出した波力、および 2 台のプロペラ流速計で計測した堤体上部の越流流速の計測結果を示した。各圧力計の設置高さは、P1 が底面から 0.025m、それ以降 0.05m ピッチで等間隔に鉛直上方向に設置している。2 台のプロペラ流速計の設置位置は堤体の直上で、圧力計の測線上になるように設置した。図中の V_{top_1} が水路ガラス面側、 V_{top_2} が水路壁側である。

水位の時系列形状は、非越流の場合とほぼ同じであるが、最大値が非越流の場合よりも小さくなっている。ただし、津波の先端が堤体に衝突して堤体前面の水位が上昇した後、越流する場合には、非越流に比較して比較的短時間に水位が減少している。津波衝突時には堤体に沿って水隕が上昇するが、そのときの上向きの流速は堤体の高さによらずほぼ同じなため、最高水位については越流、非越流に関わらず同程度になると考えられる。その後、非越流の場合には連続的に水が流入するため、ある程度水位が維持されるが、越流する場合は越流により水位が減少していると考えられる。

波力の時系列形状についても、全てのケースで非越流の場合とほぼ同様の時系列形状をしているが、波力最大値の大きさは非越流の場合よりも小さくなっている。ただし、衝突時の段波波力は非越流とほぼ同じであり、持続波力が小さくなっている。衝突時の段波波力は、堤体の底面付近に集中する圧力によって生じているため、堤体が低いことの影響がほとんど現れていないと考えられる。

波力の時系列と同様、圧力分布についても非越流と同じ特徴を示す。ただし、両者がともに静水圧形状となる場合も、越流の方が非越流のケースよりも圧力は小さくなっており、越流により圧力分布自体が低減していることが分かる。

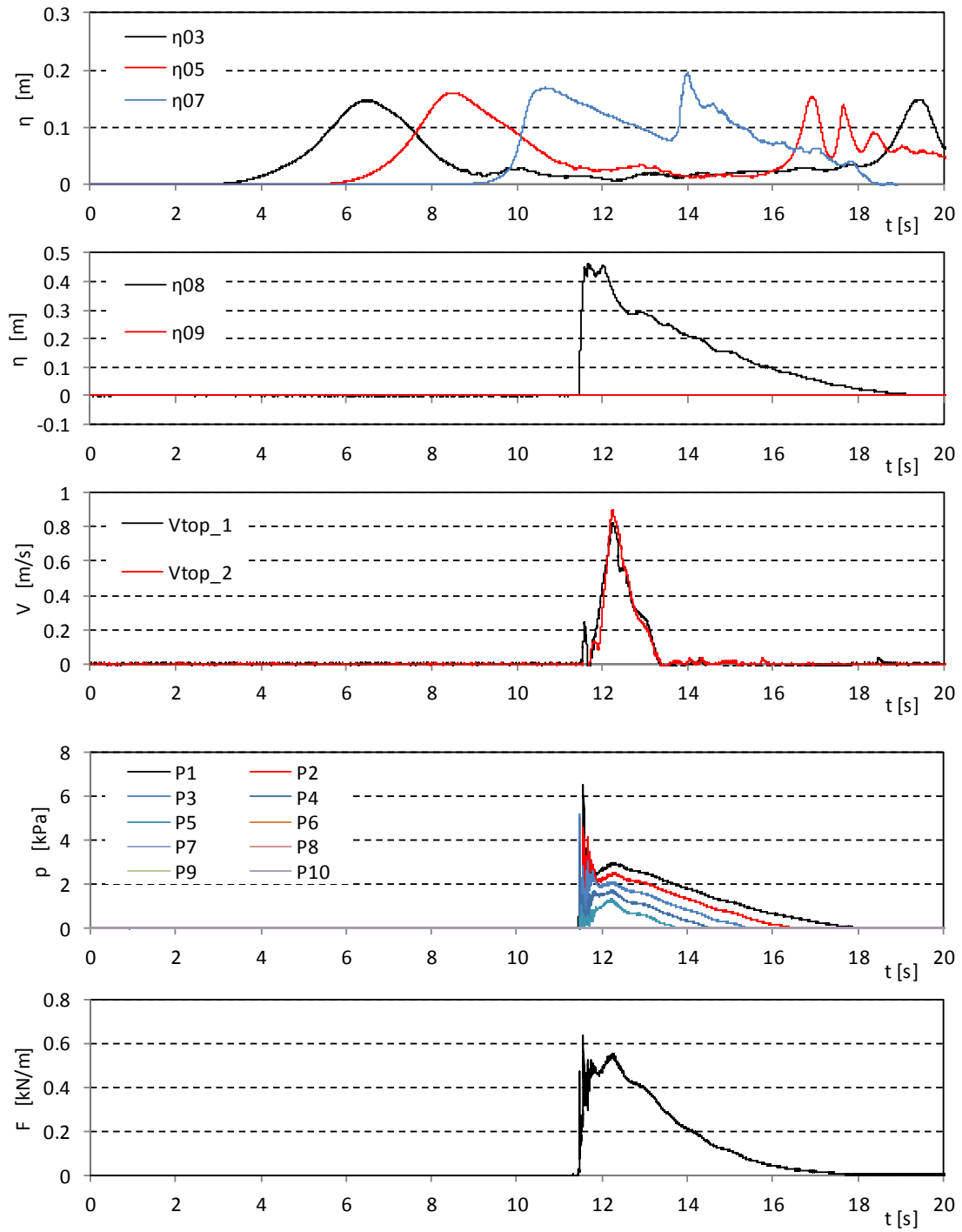


図- 5.1.1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0m, Wc11)

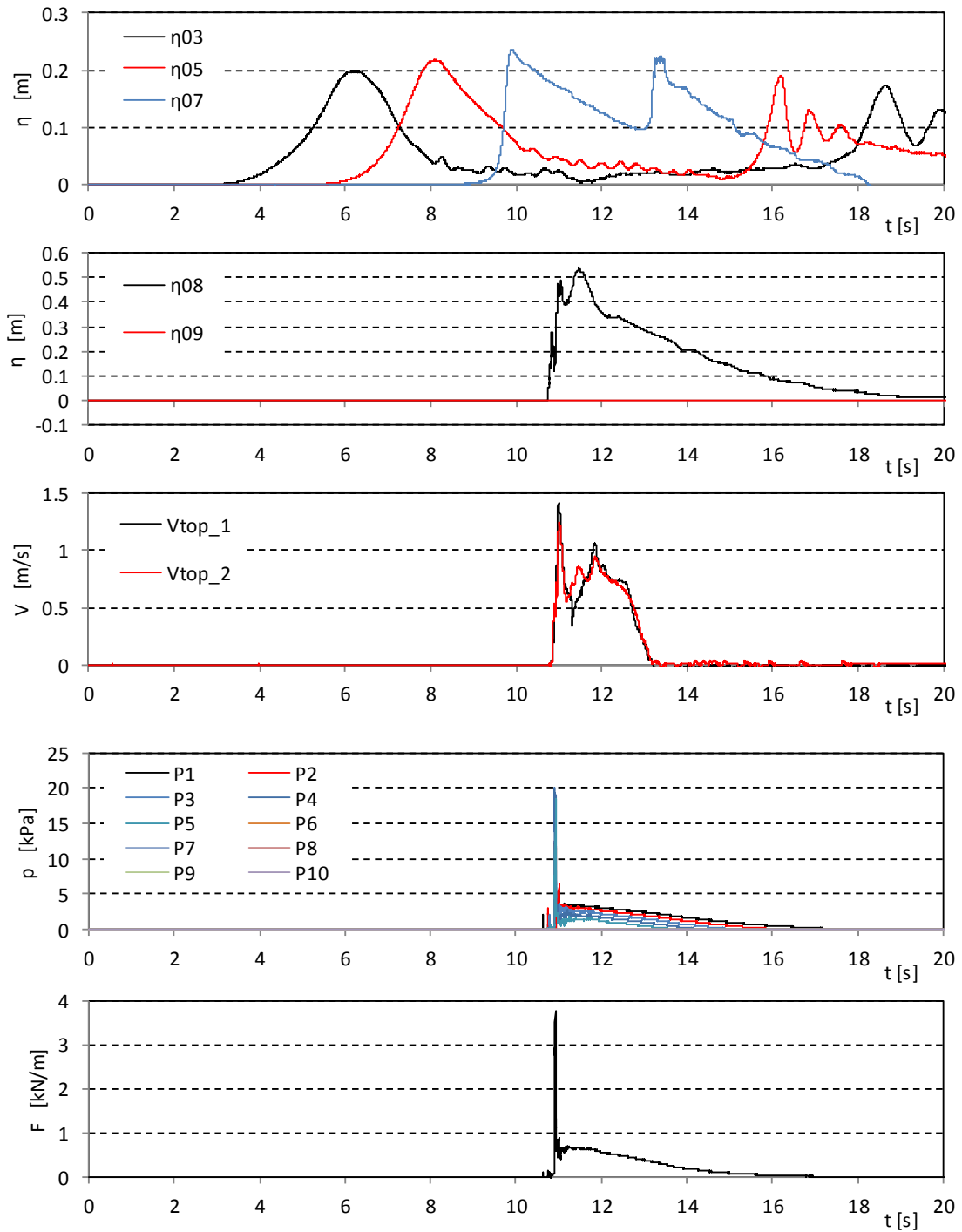


図- 5.1.1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0m, Wc12)

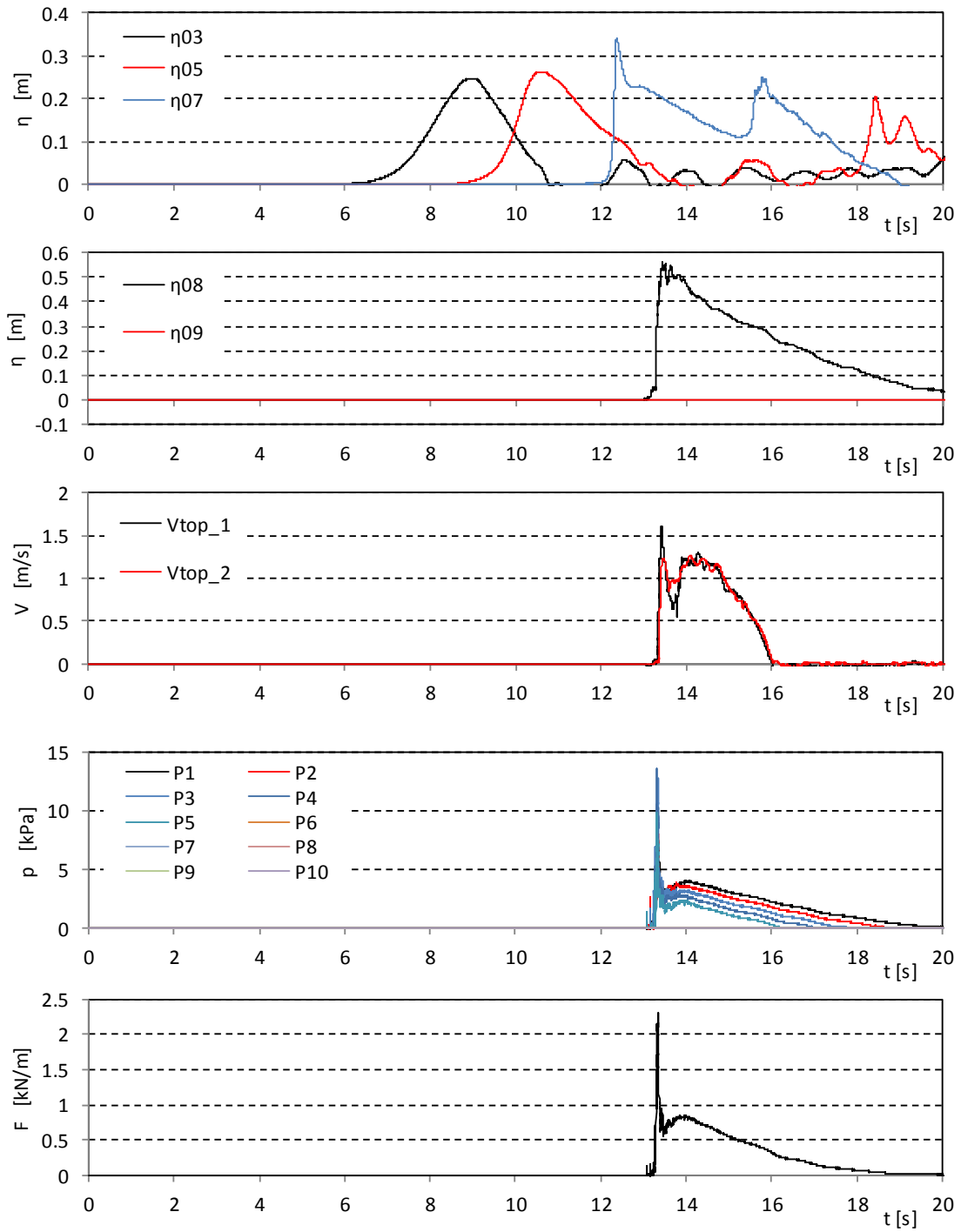


図- 5.1.1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0m, Wc13)

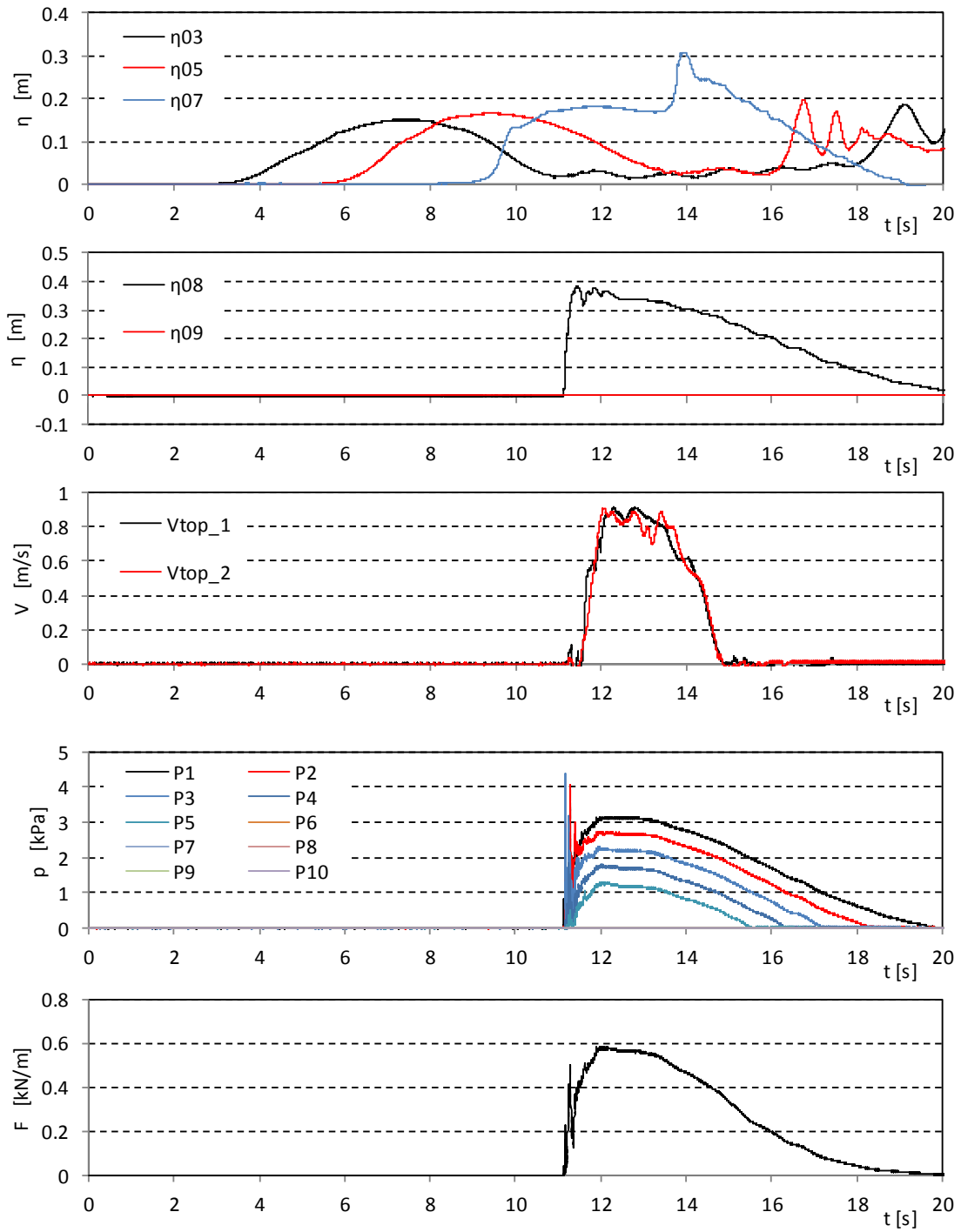


図- 5.1.1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0m, Wc21)

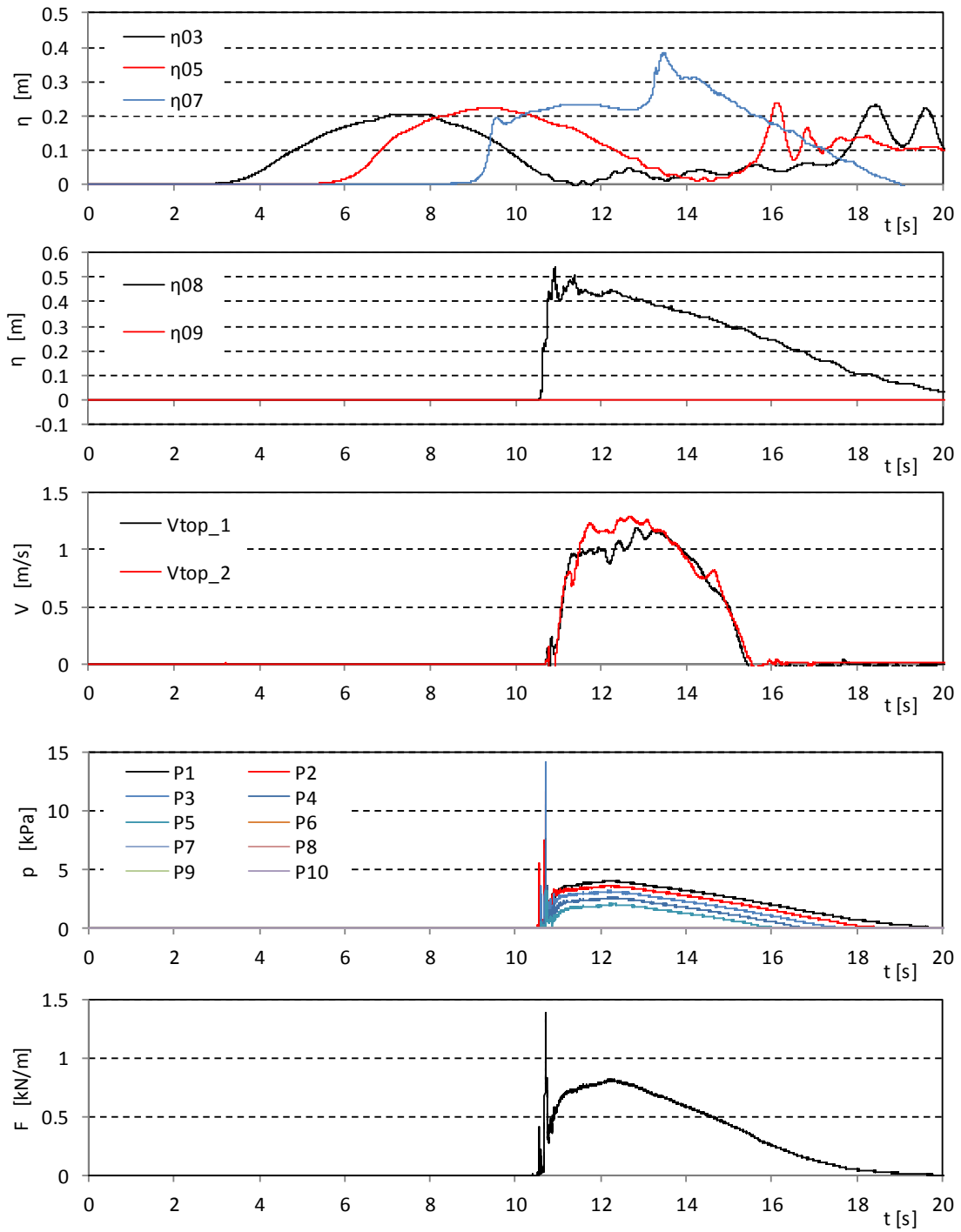


図- 5.1.1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0m, Wc22)

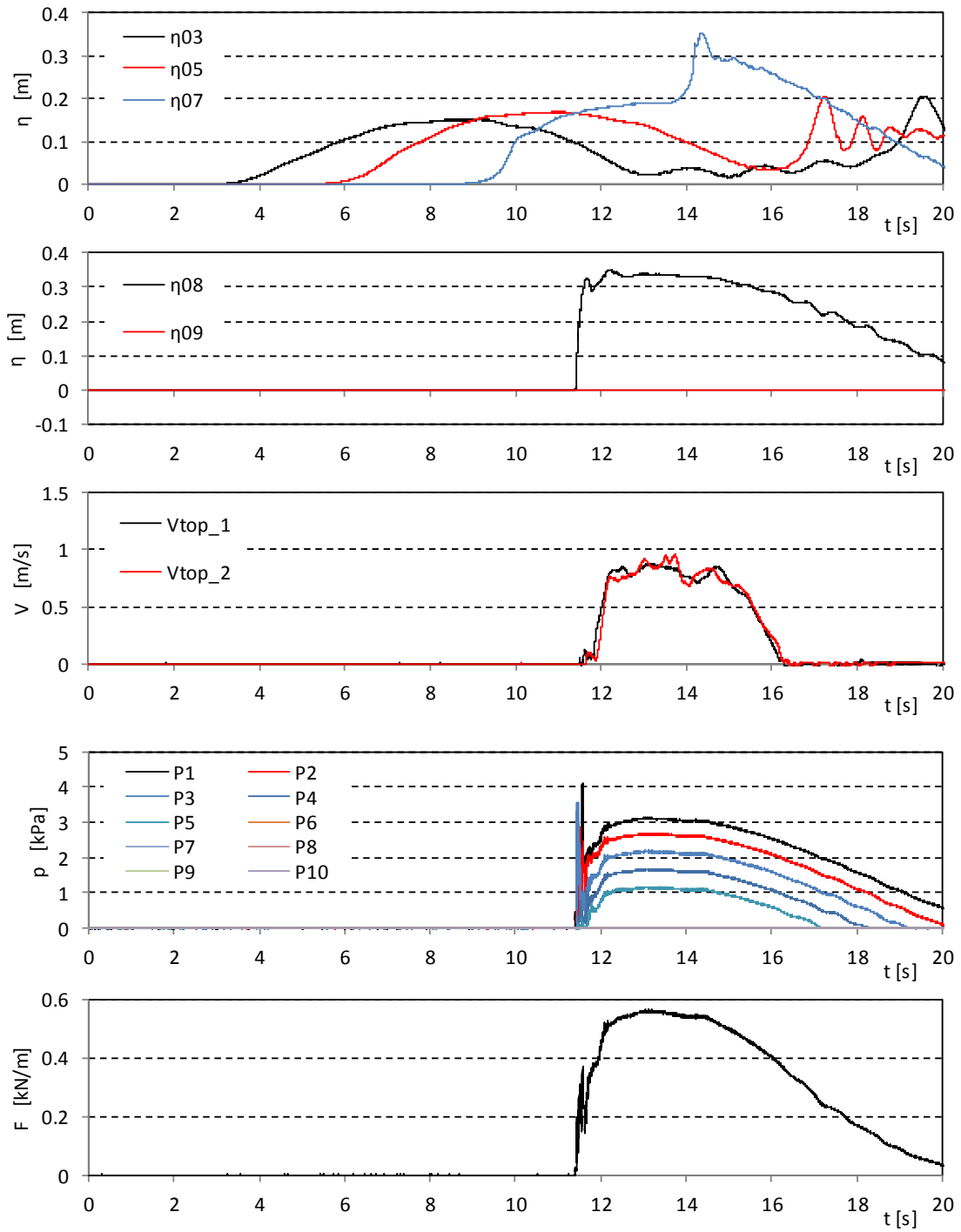


図- 5.1.1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0m, Wc31)

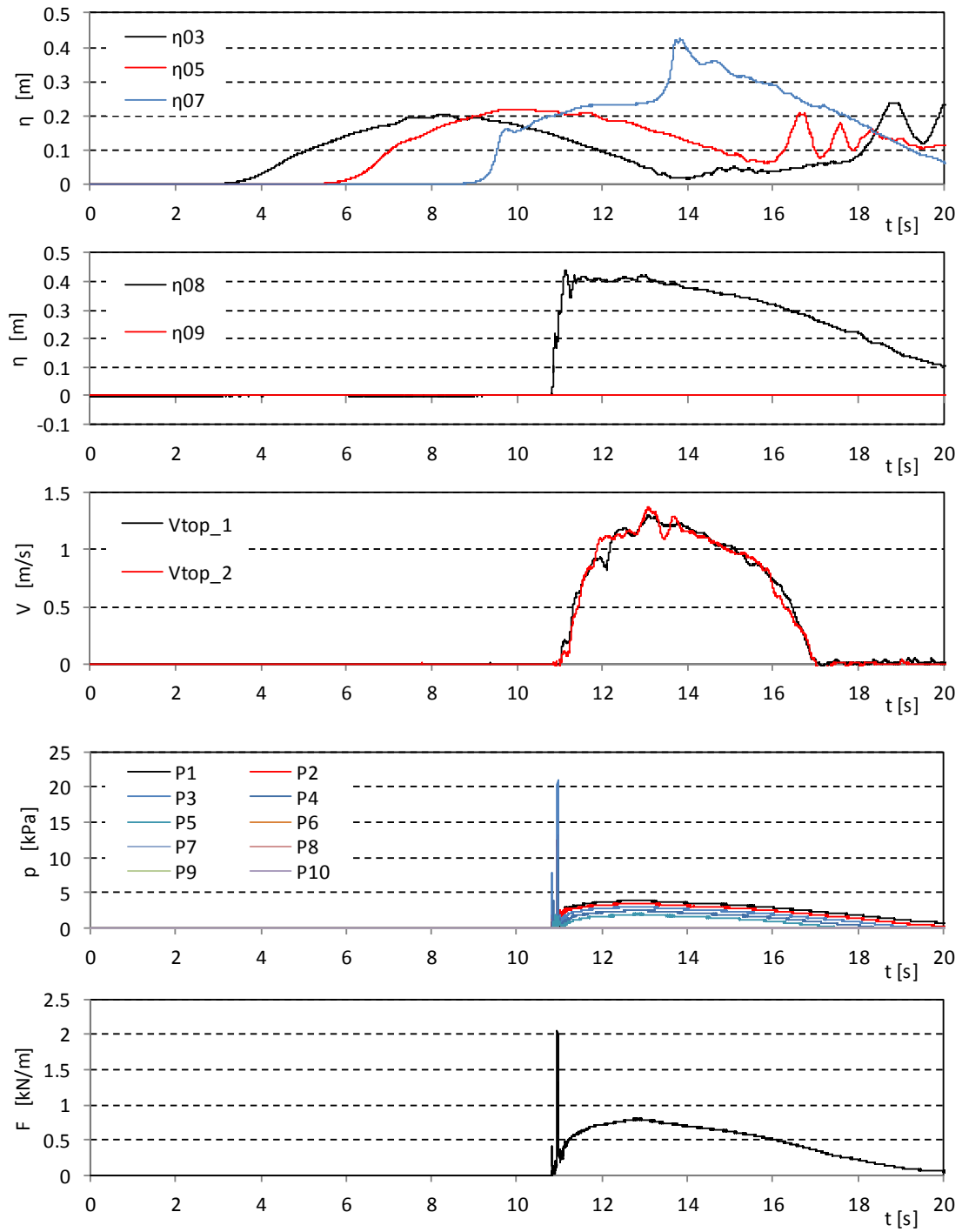


図- 5.1.1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0m, Wc32)

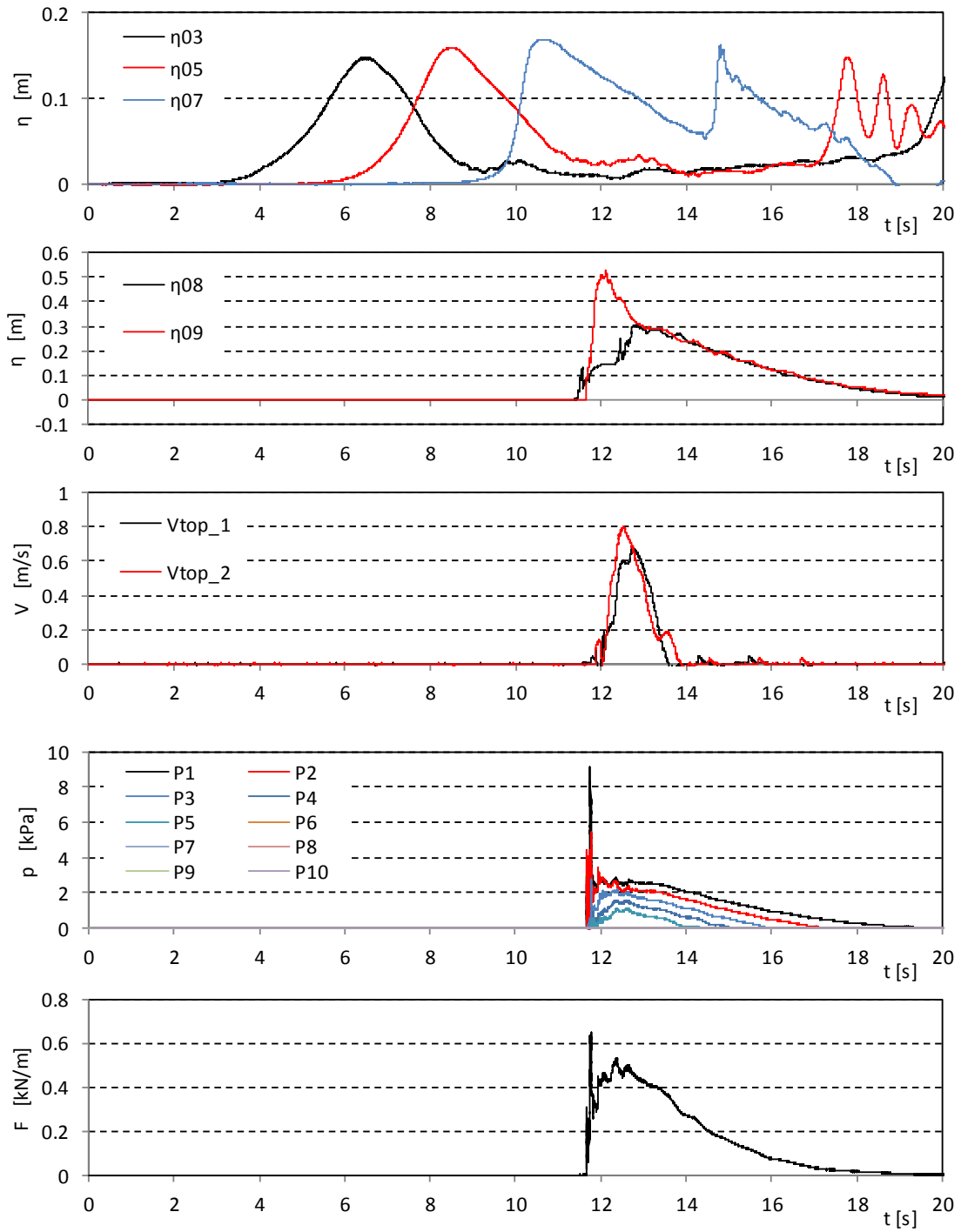


図- 5.1.2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m, Wc11)

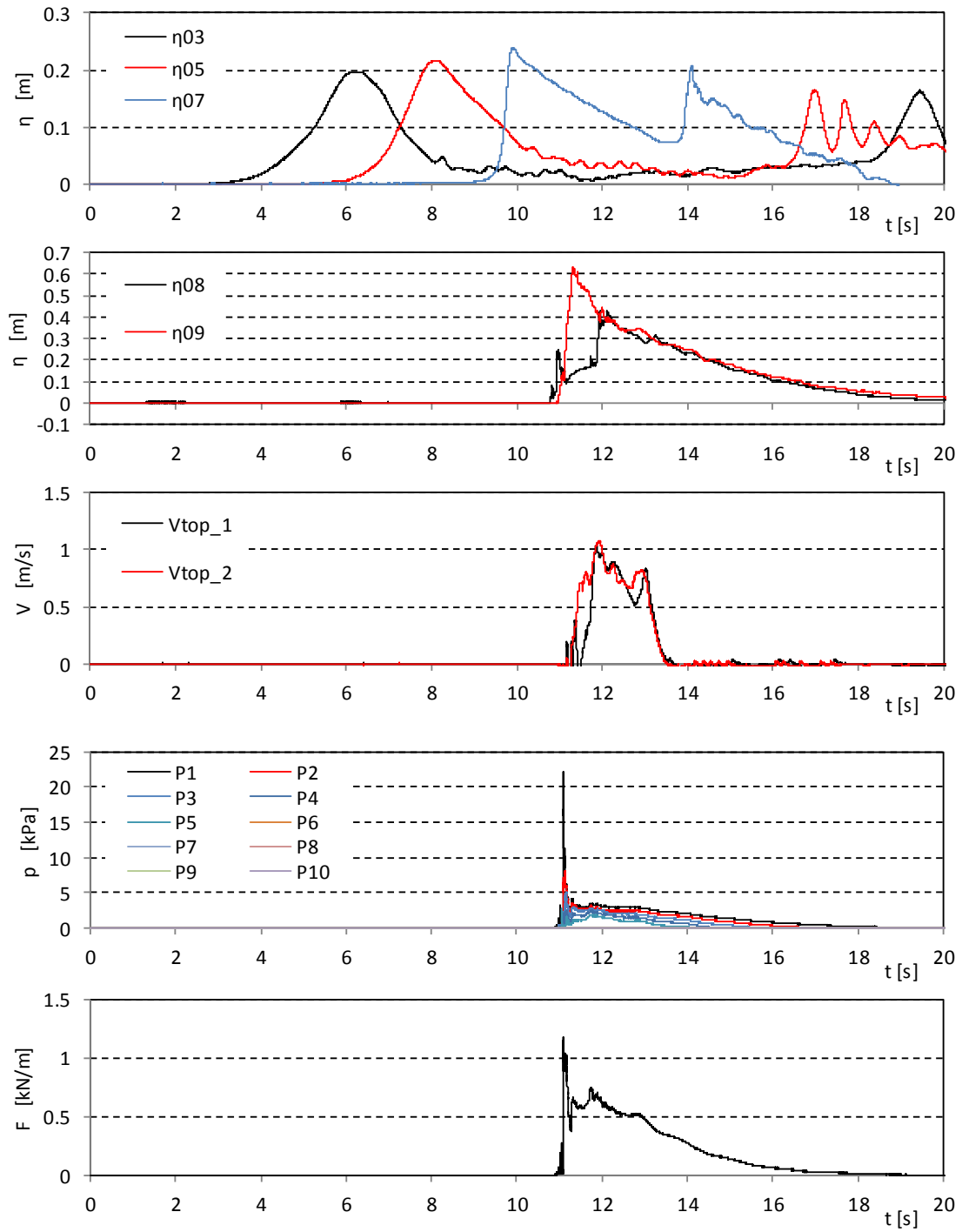


図- 5.1.2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m, Wc12)

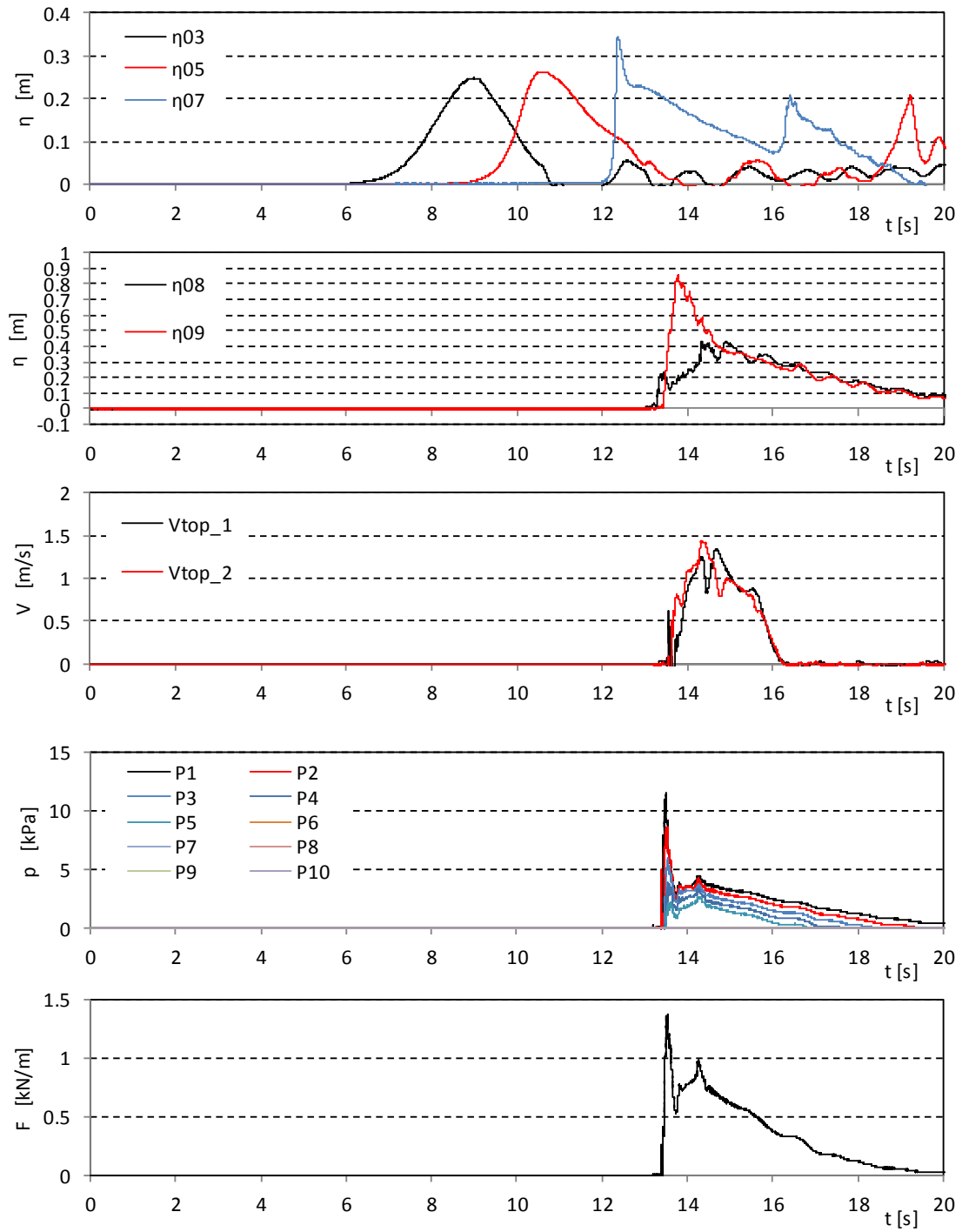


図- 5.1.2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m, Wc13)

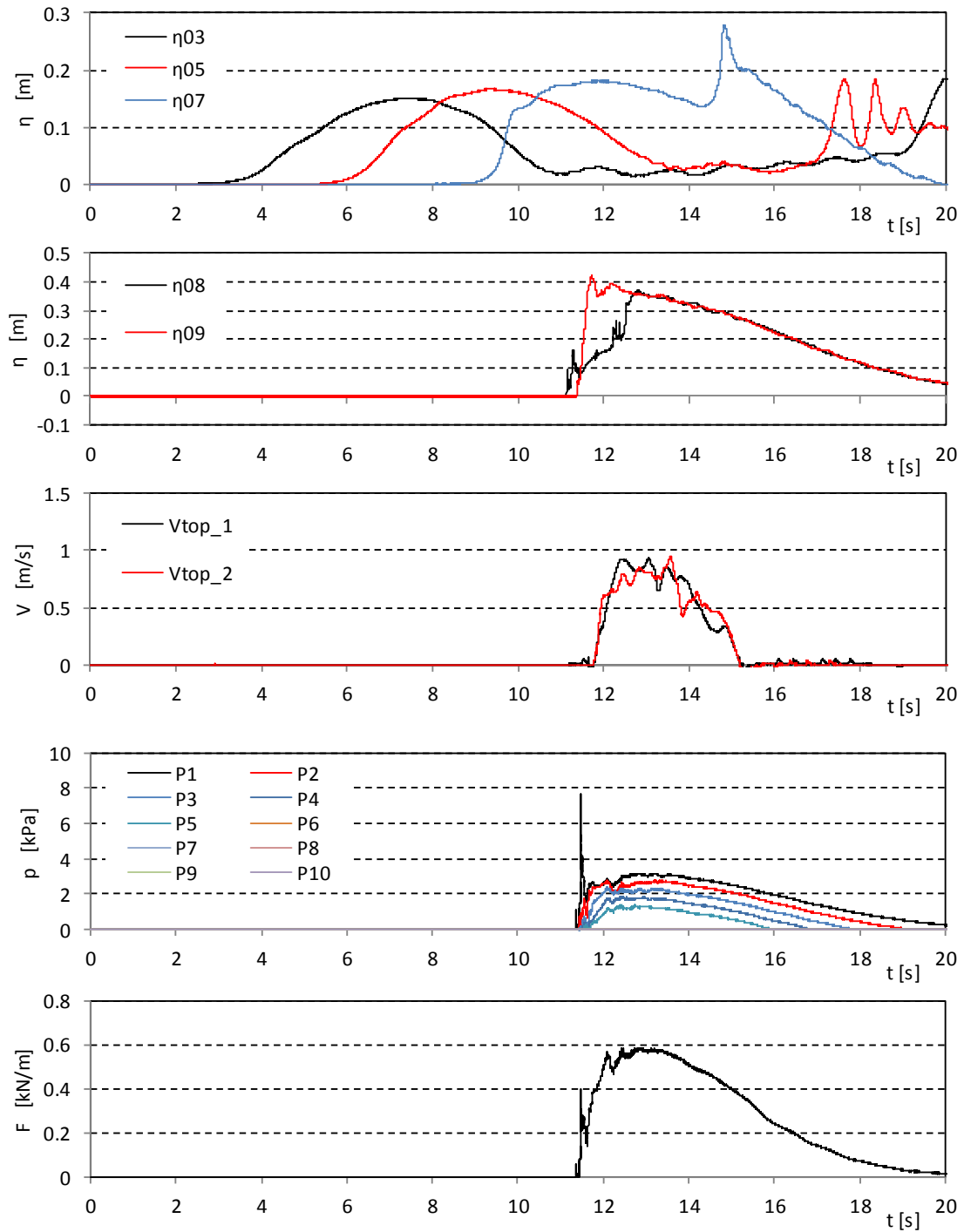


図- 5.1.2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m, Wc21)

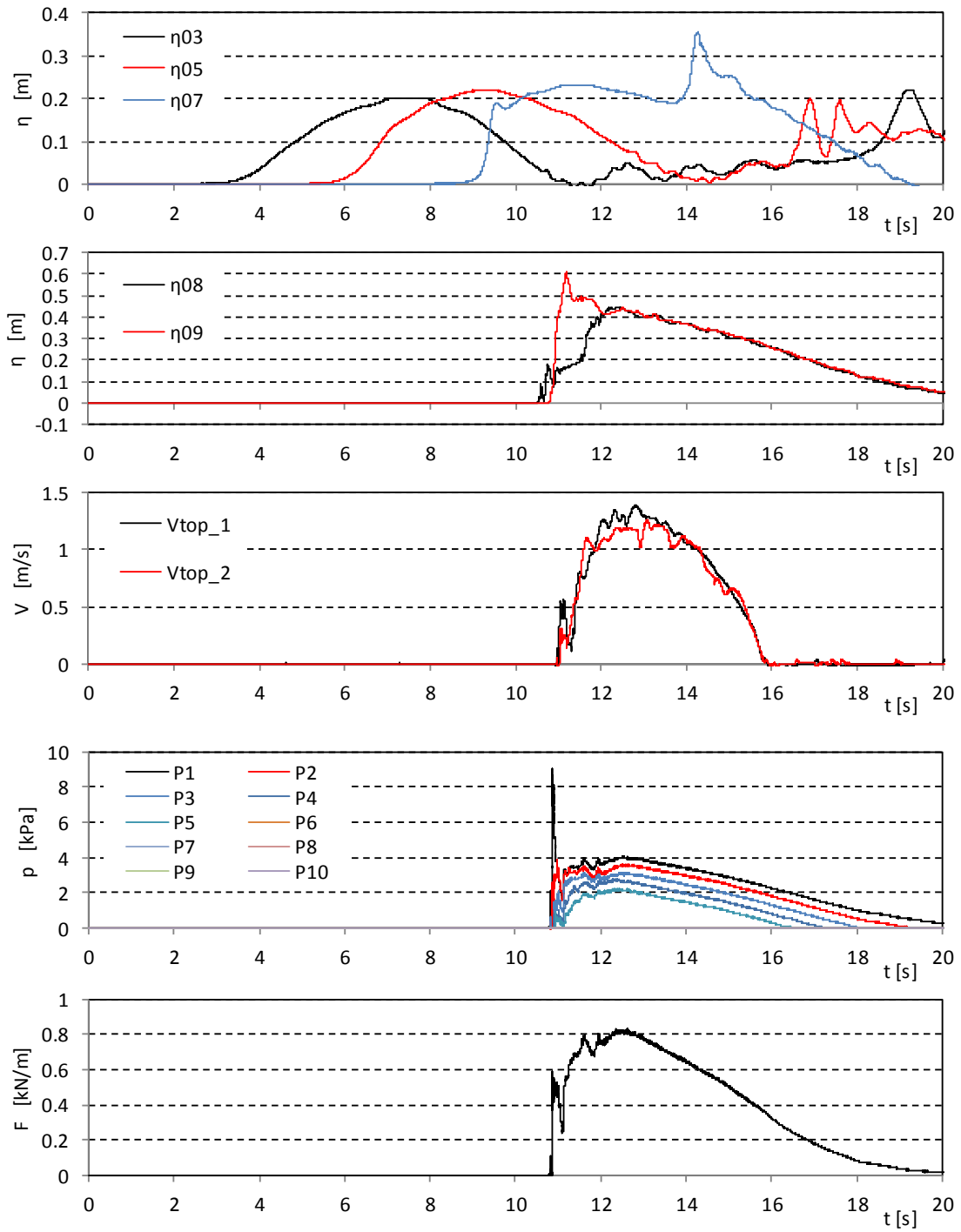


図- 5.1.2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m, Wc22)

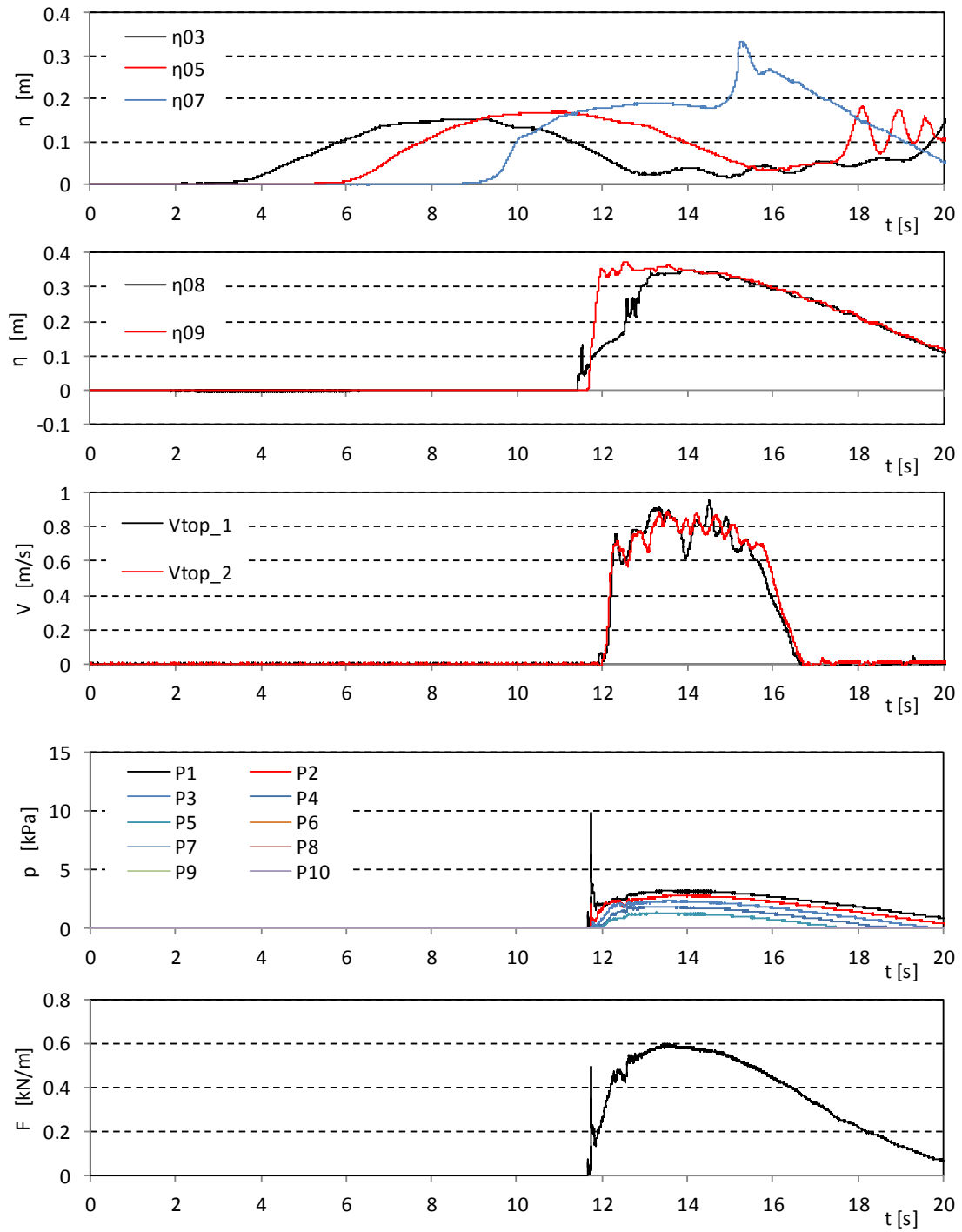


図- 5.1.2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m, Wc31)

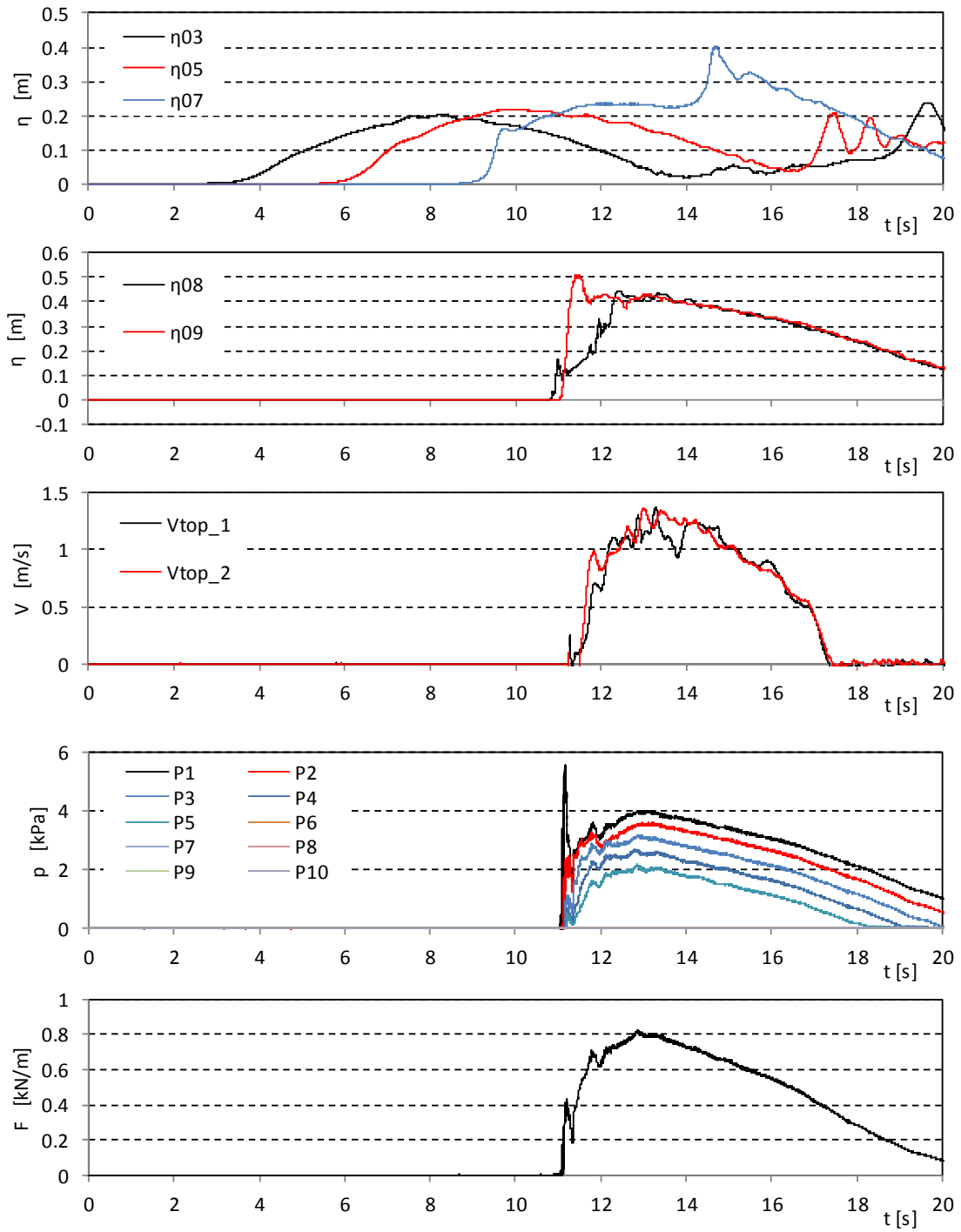


図- 5.1.2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m, Wc32)

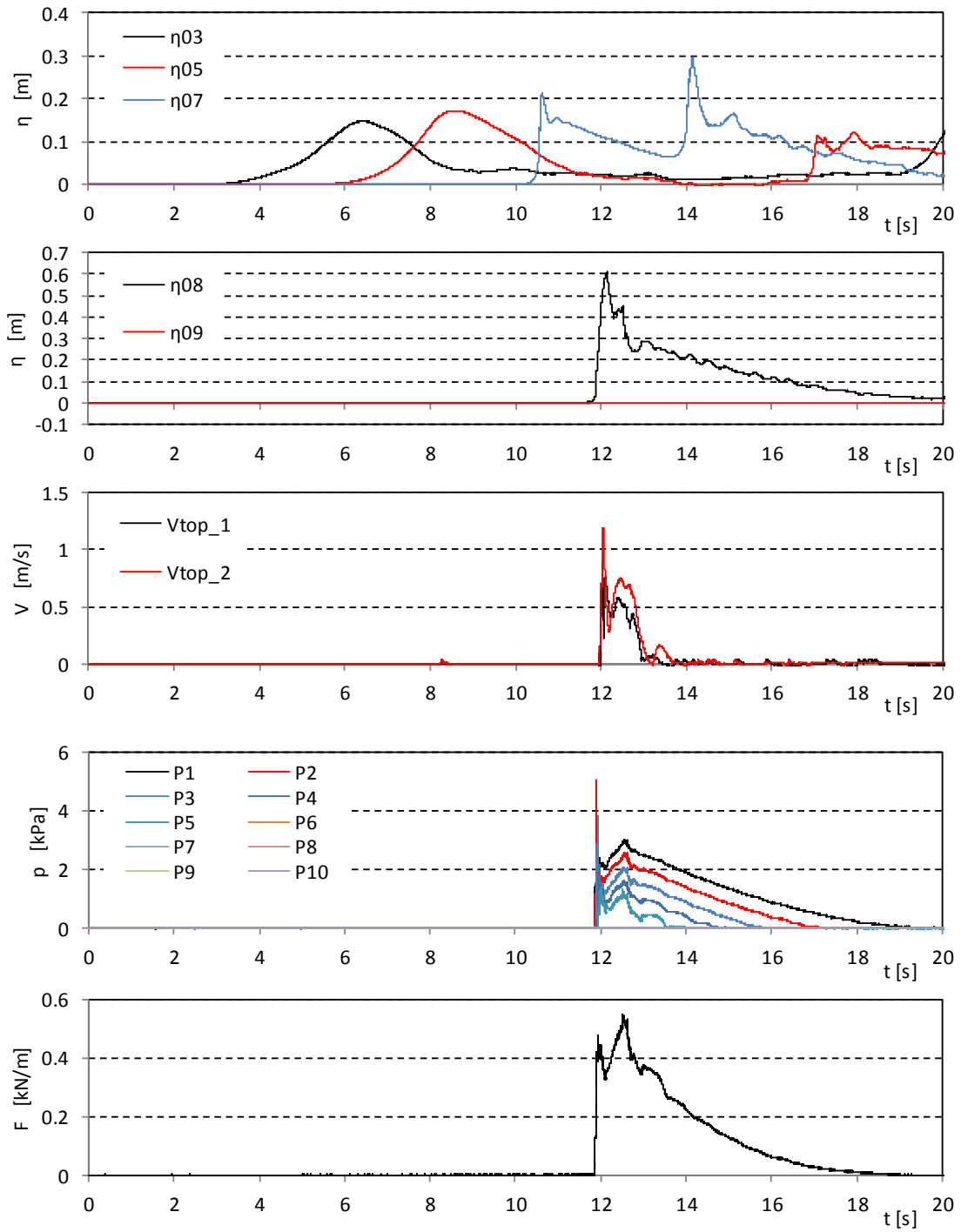


図- 5.1.3 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0m, Wc11)

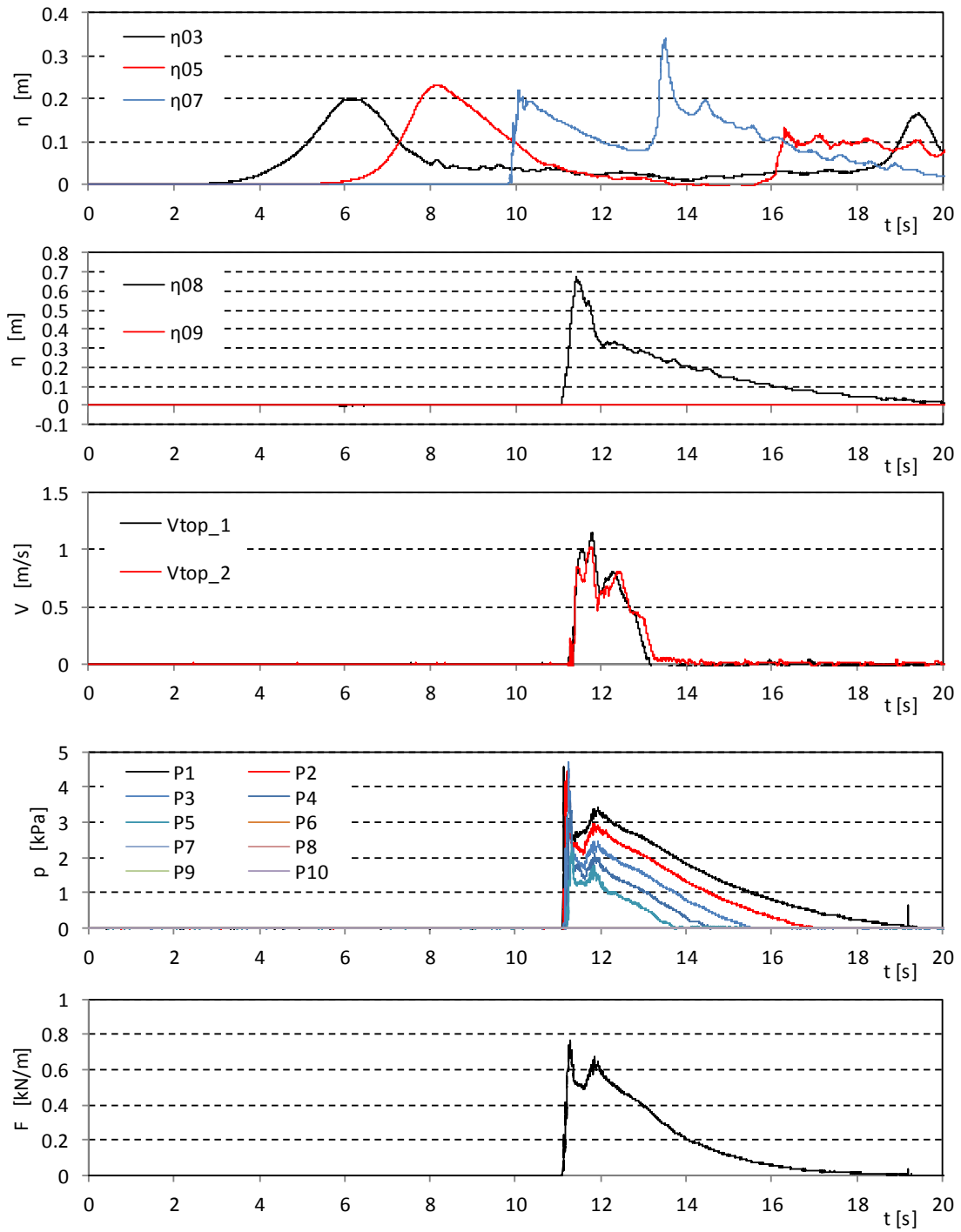


図- 5.1.3 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0m, Wc12)

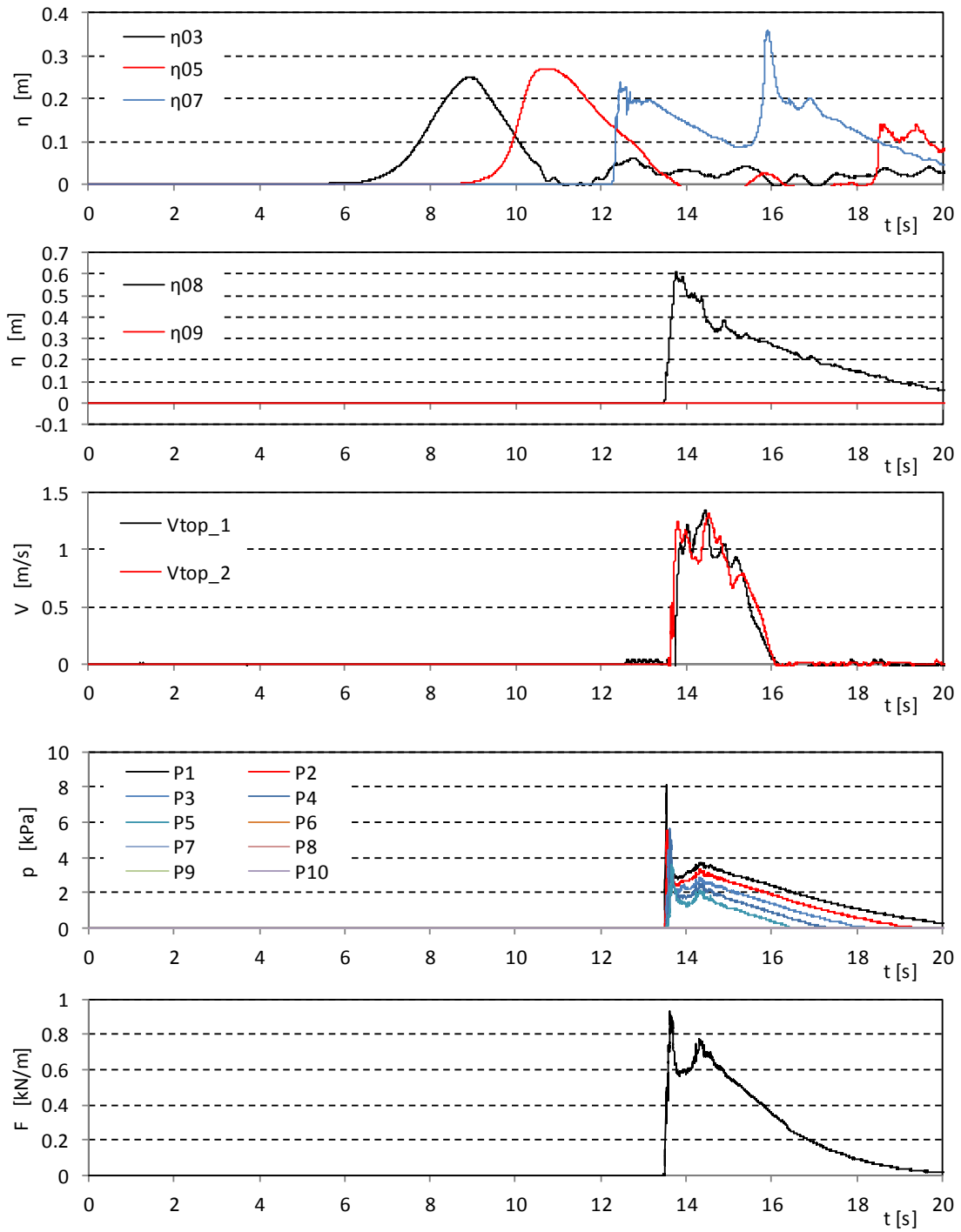


図- 5.1.3 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0m, Wc13)

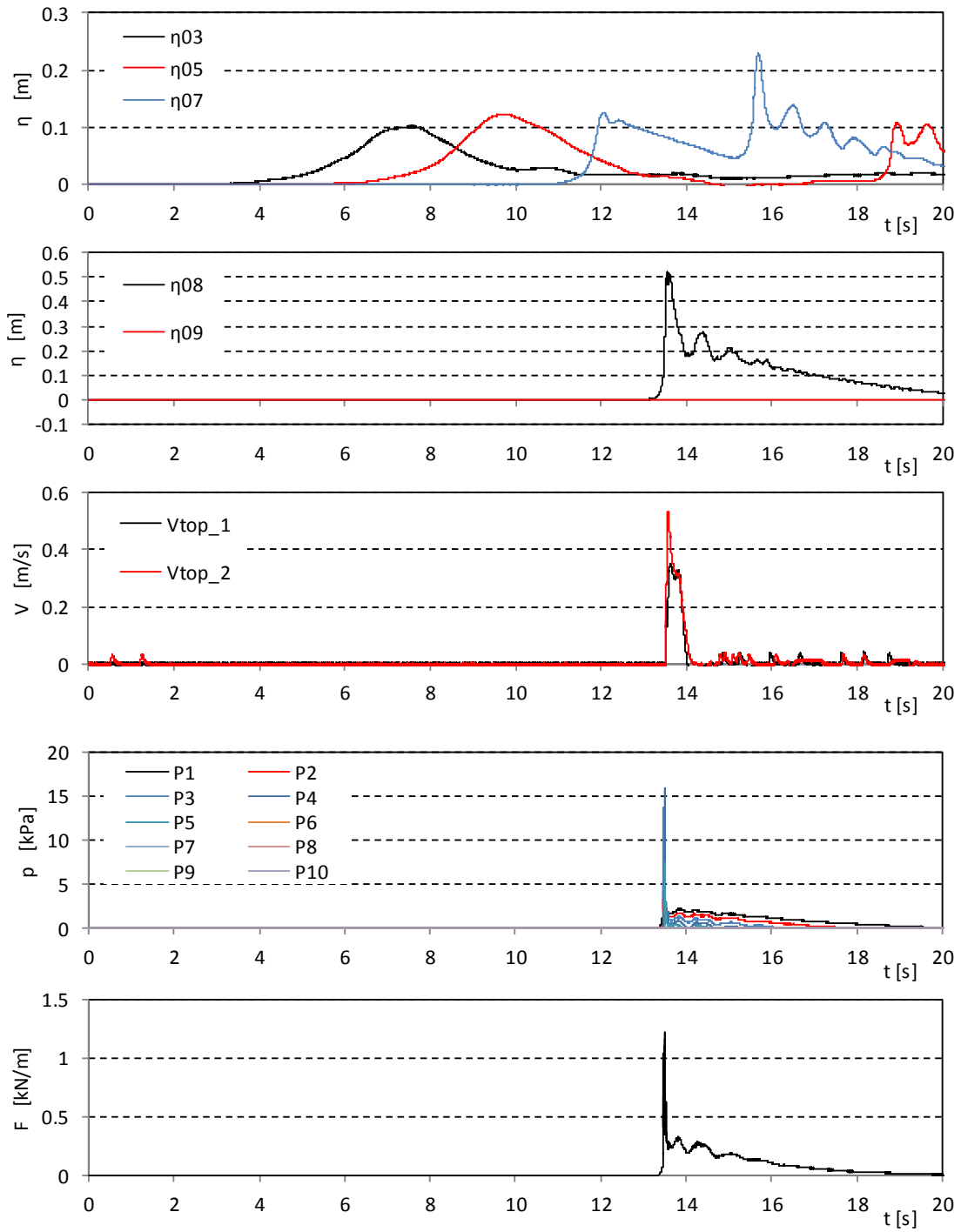


図- 5.1.3 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0m, Wc14)

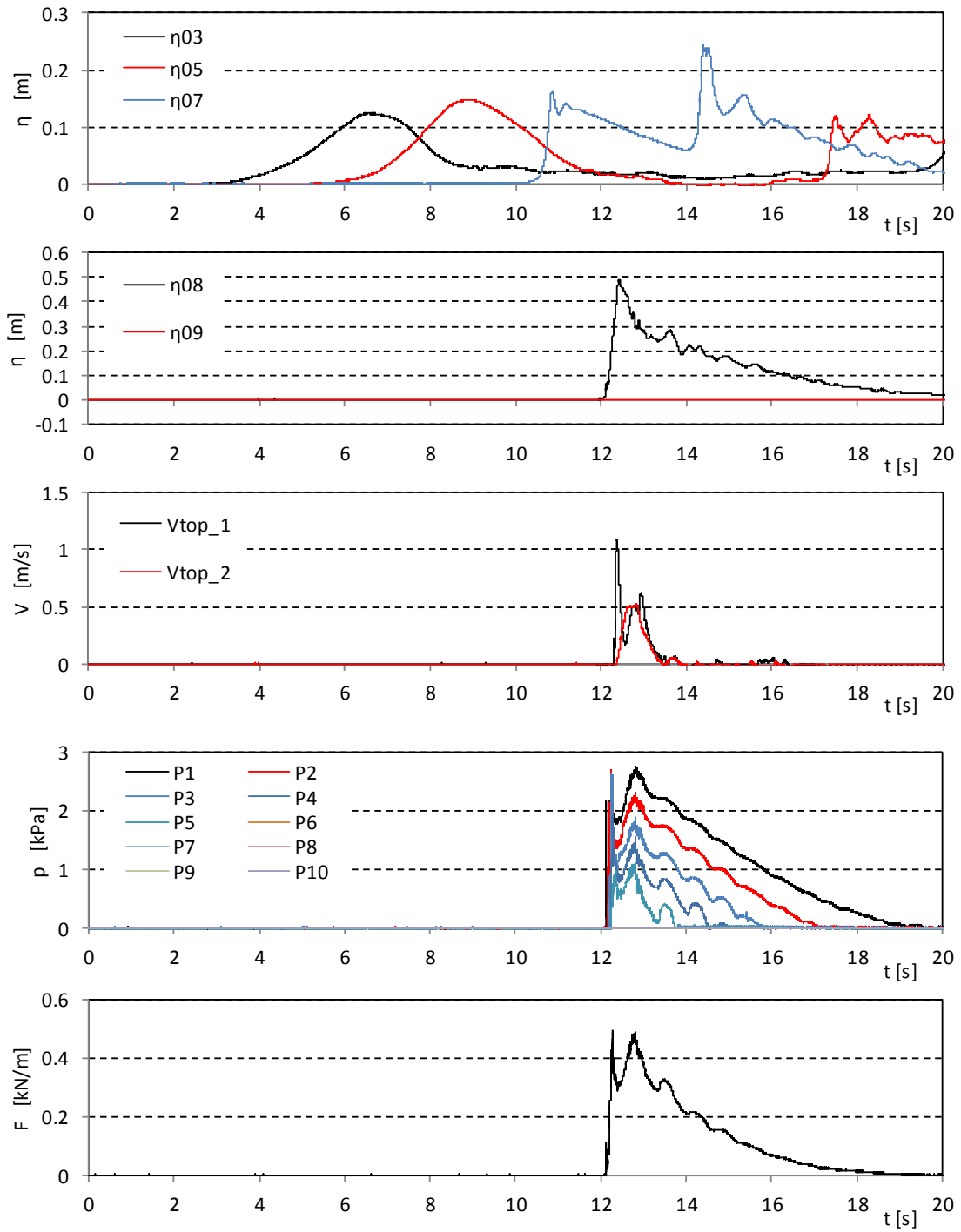


図- 5.1.3 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0m, Wc15)

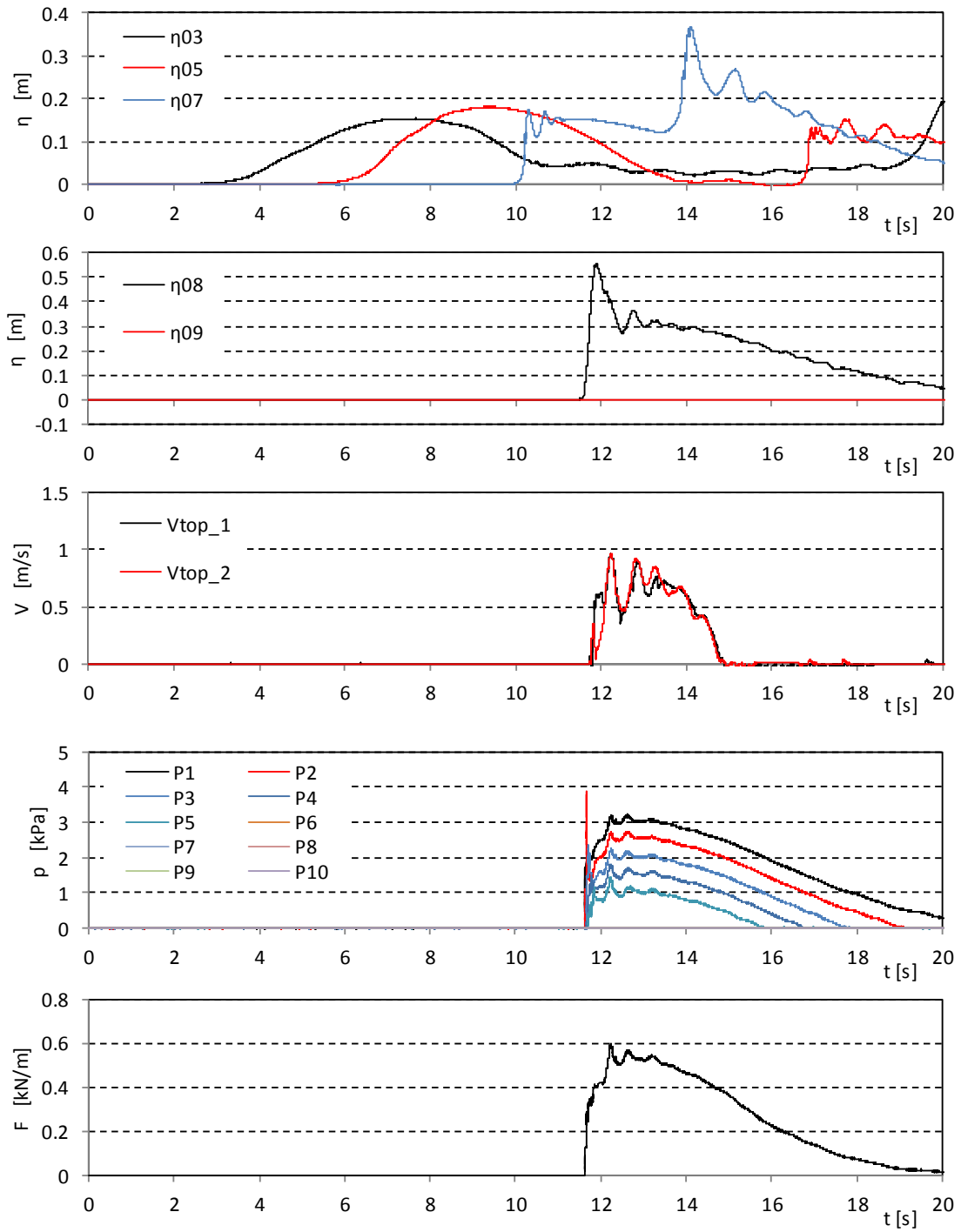


図- 5.1.3 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0m, Wc21)

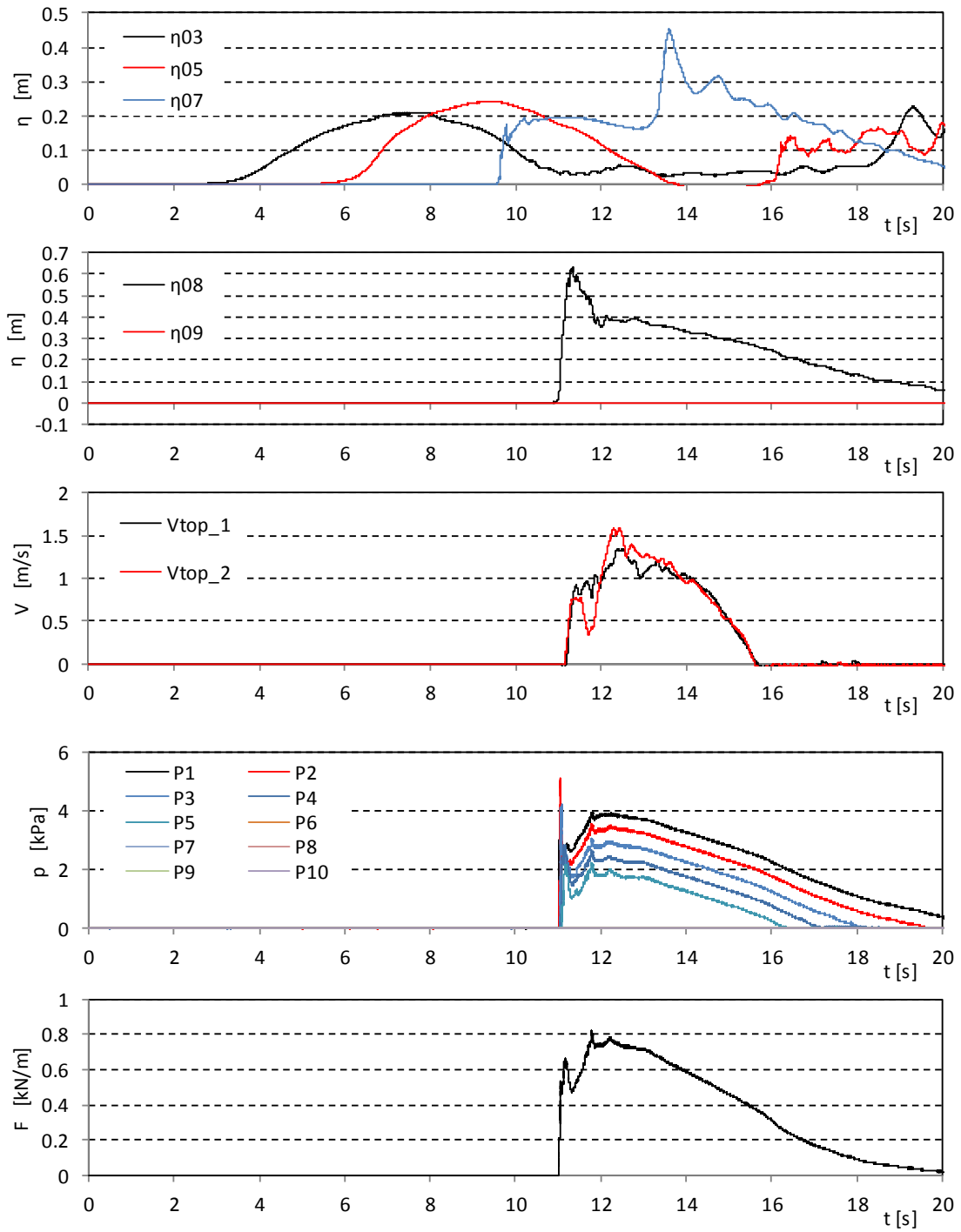


図- 5.1.3 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0m, Wc22)

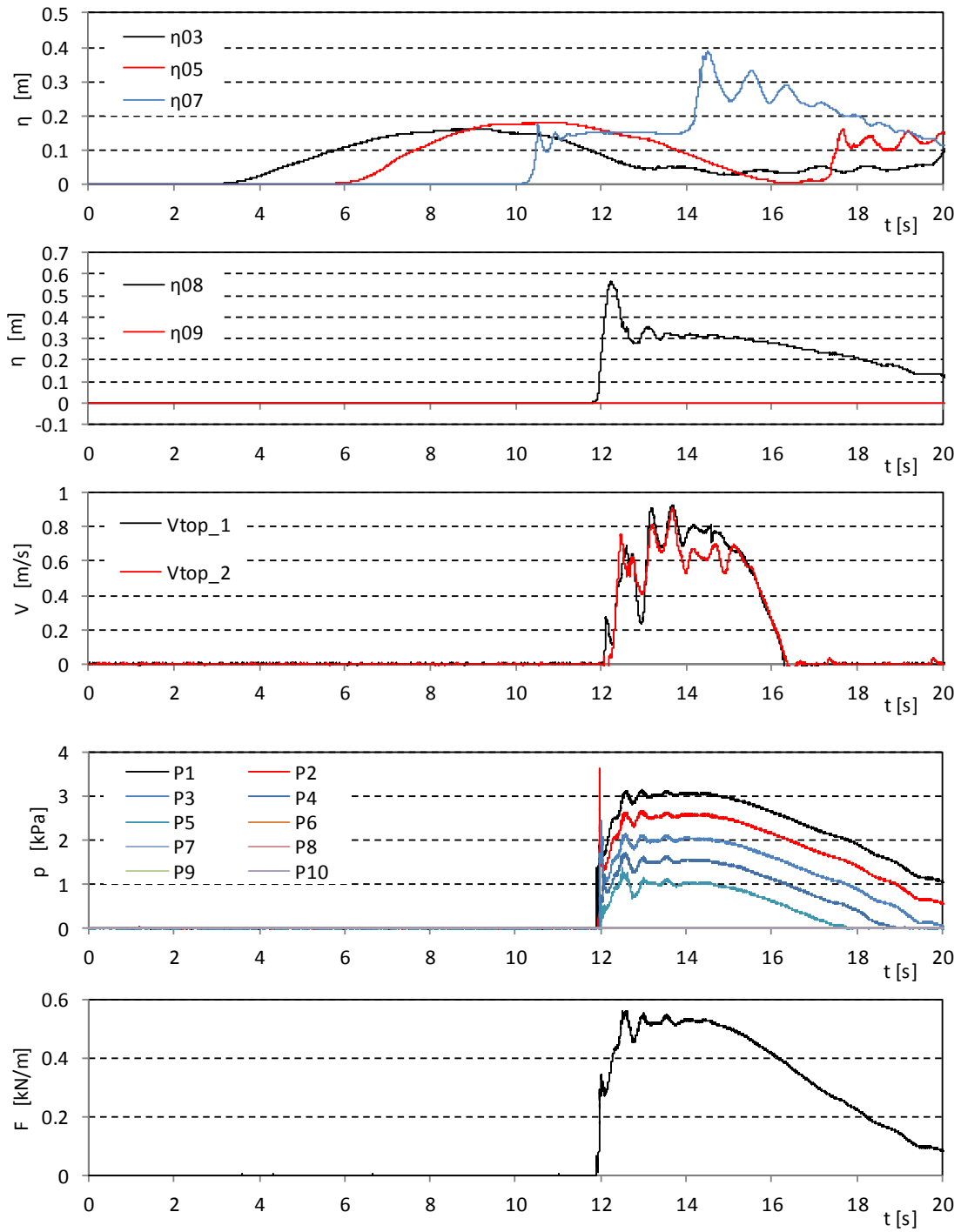


図- 5.1.3 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0m, Wc31)

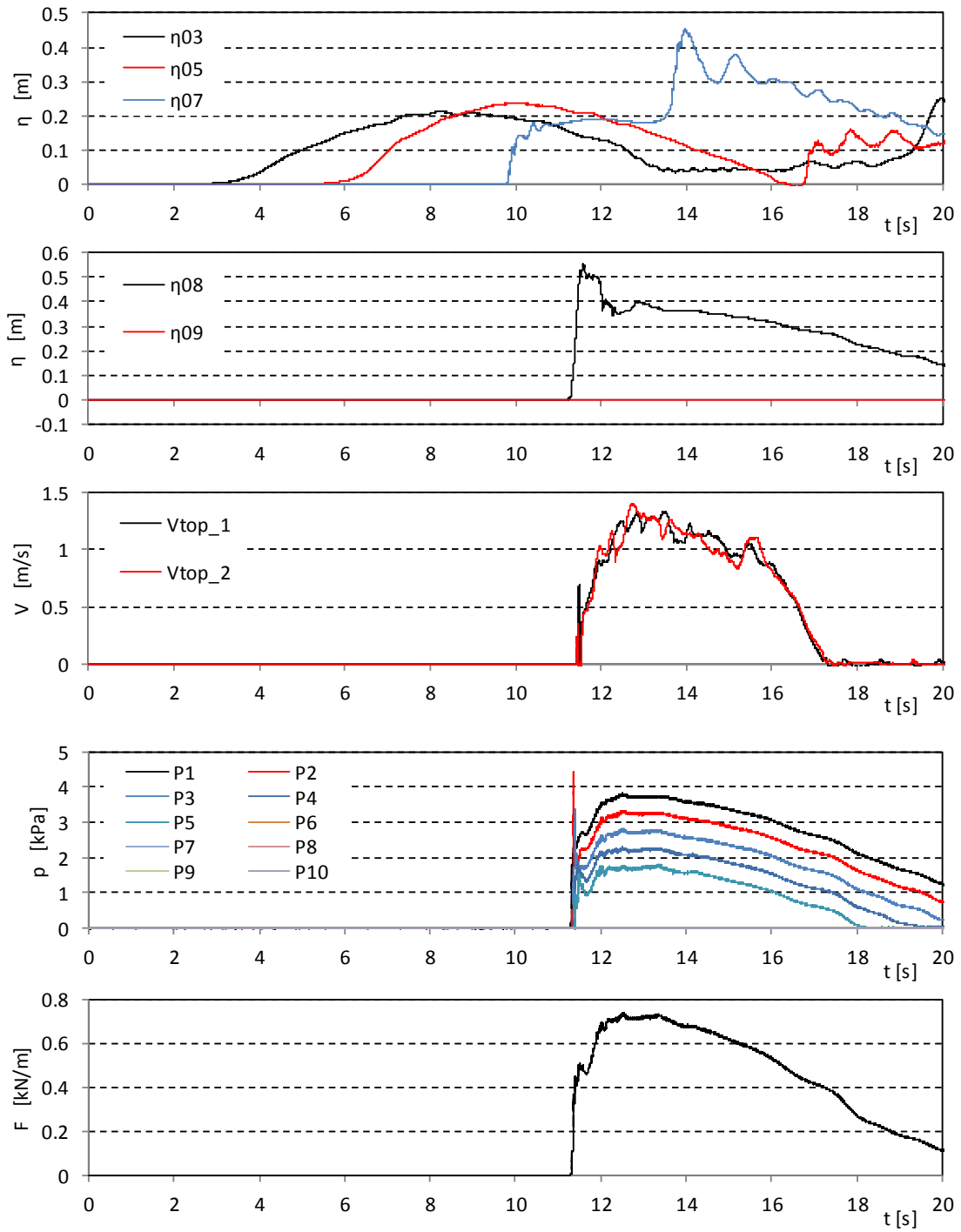


図- 5.1.3 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0m, Wc32)

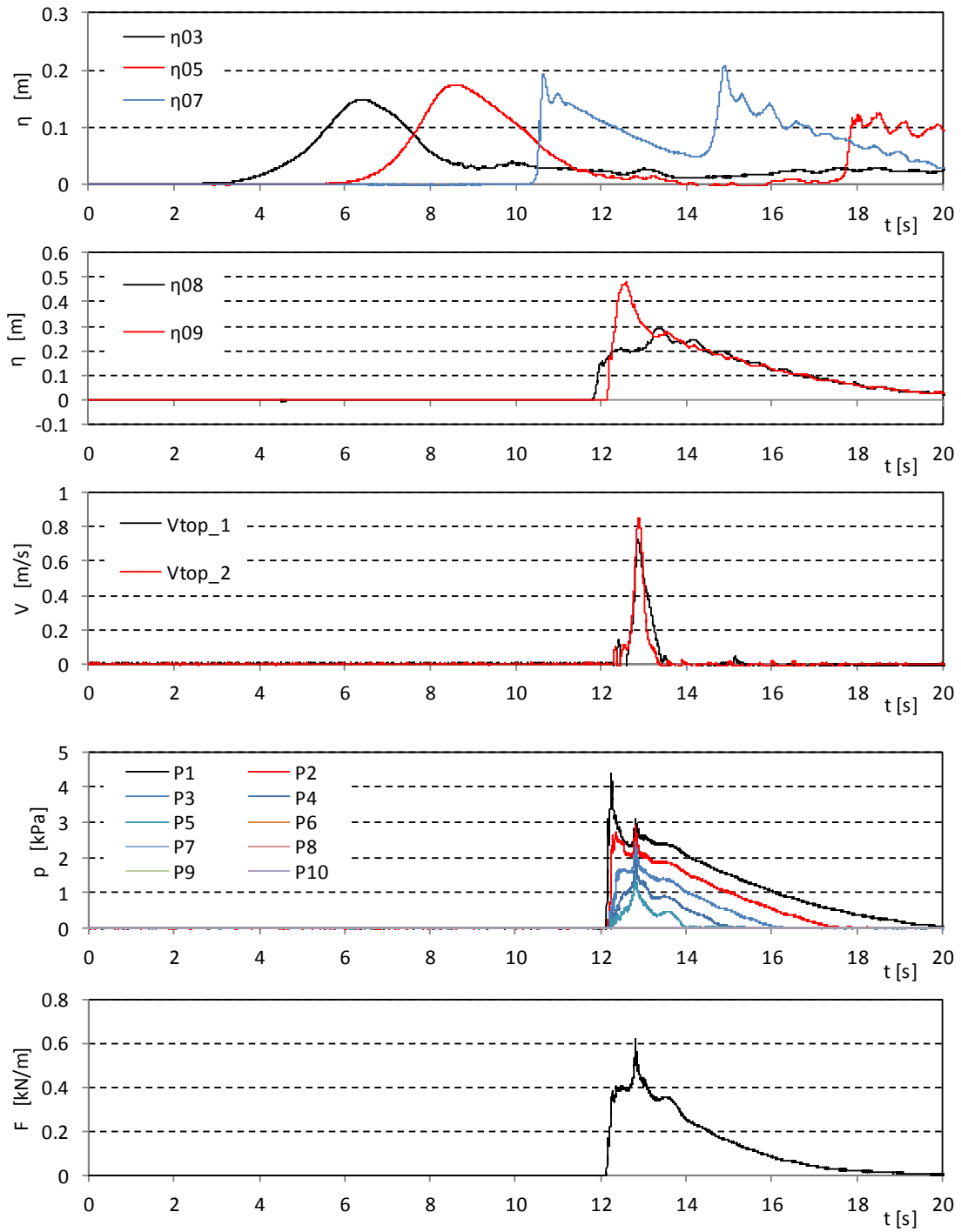


図- 5.1.4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m, Wc11)

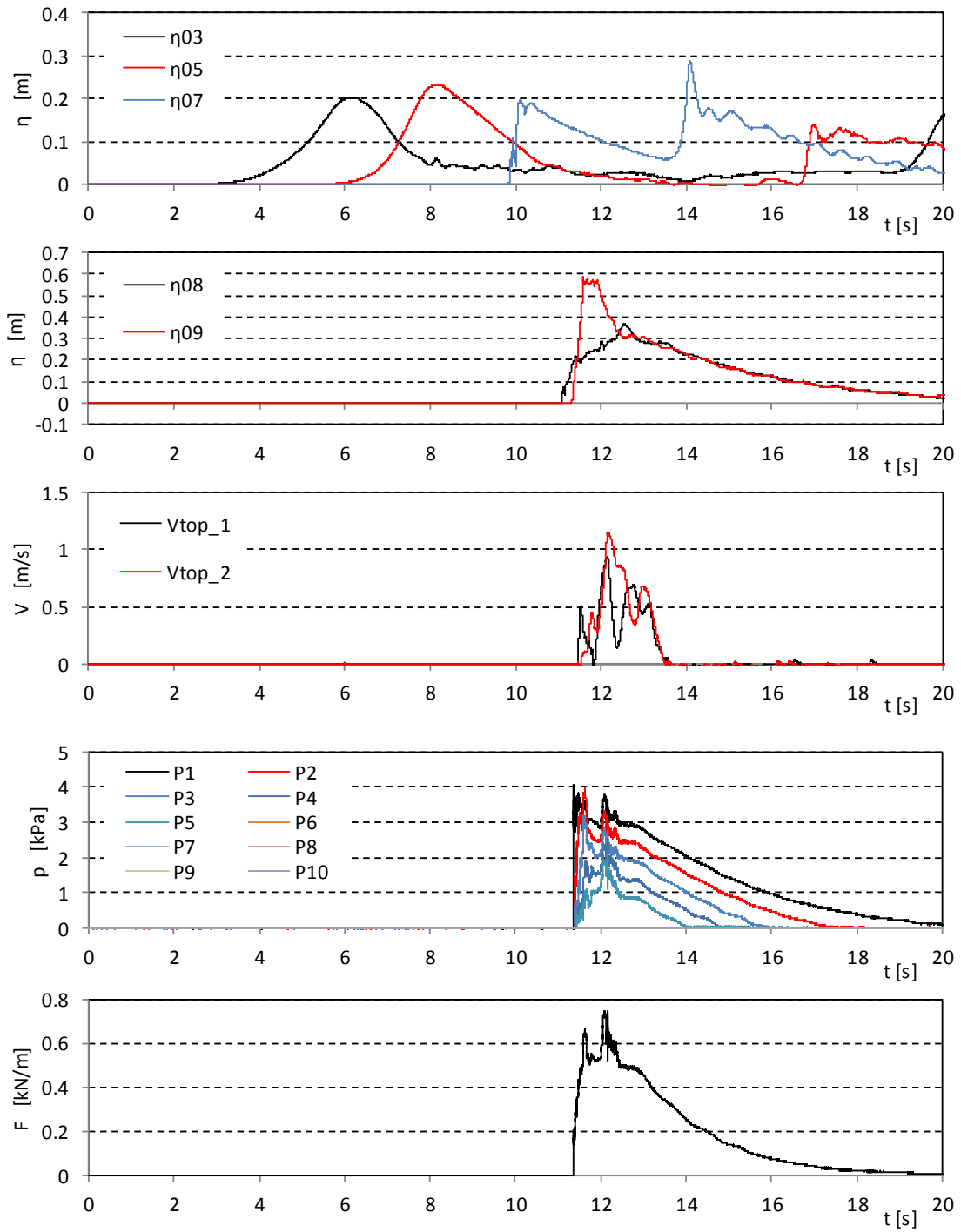


図- 5.1.4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m, Wc12)

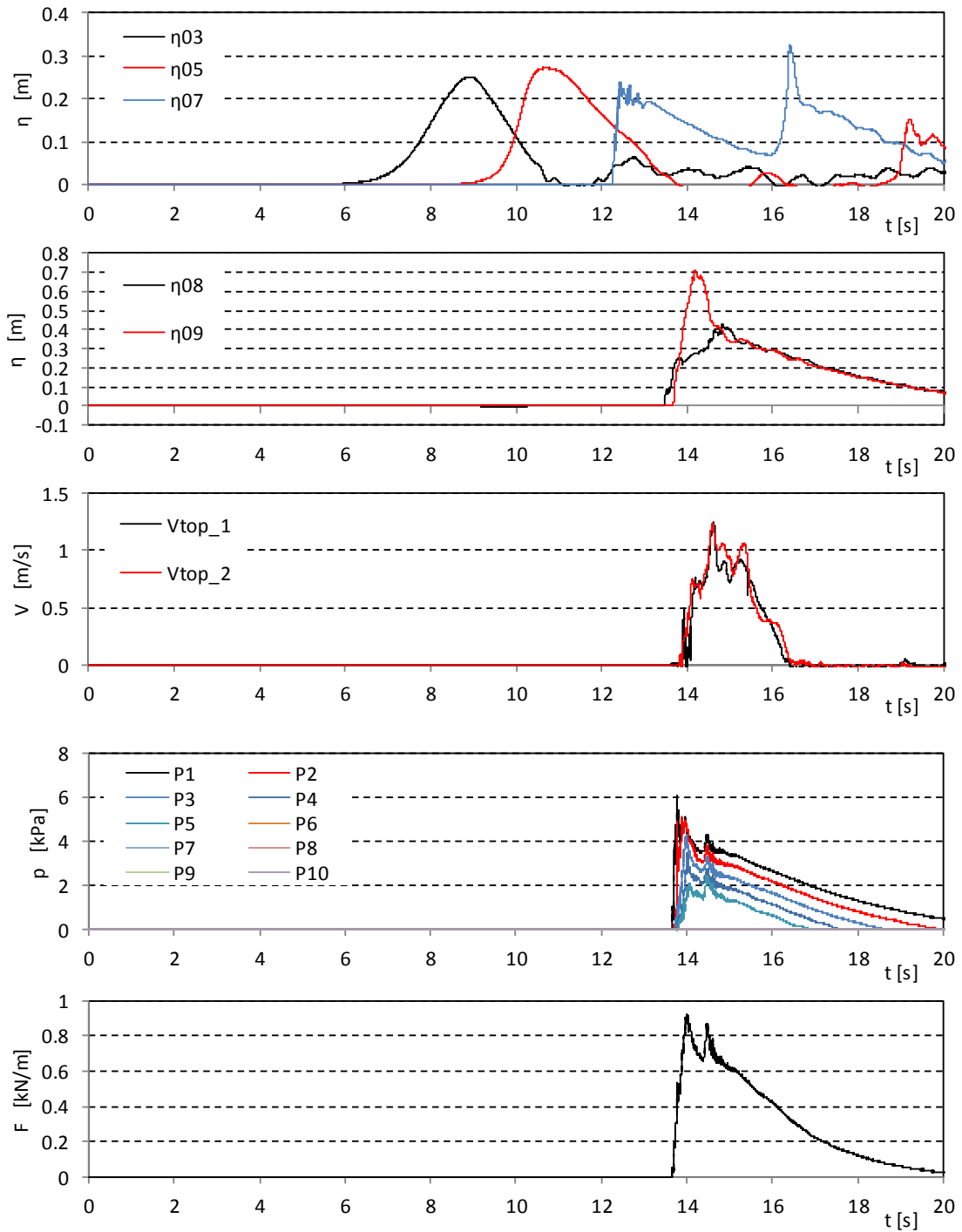


図- 5.1.4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m, Wc13)

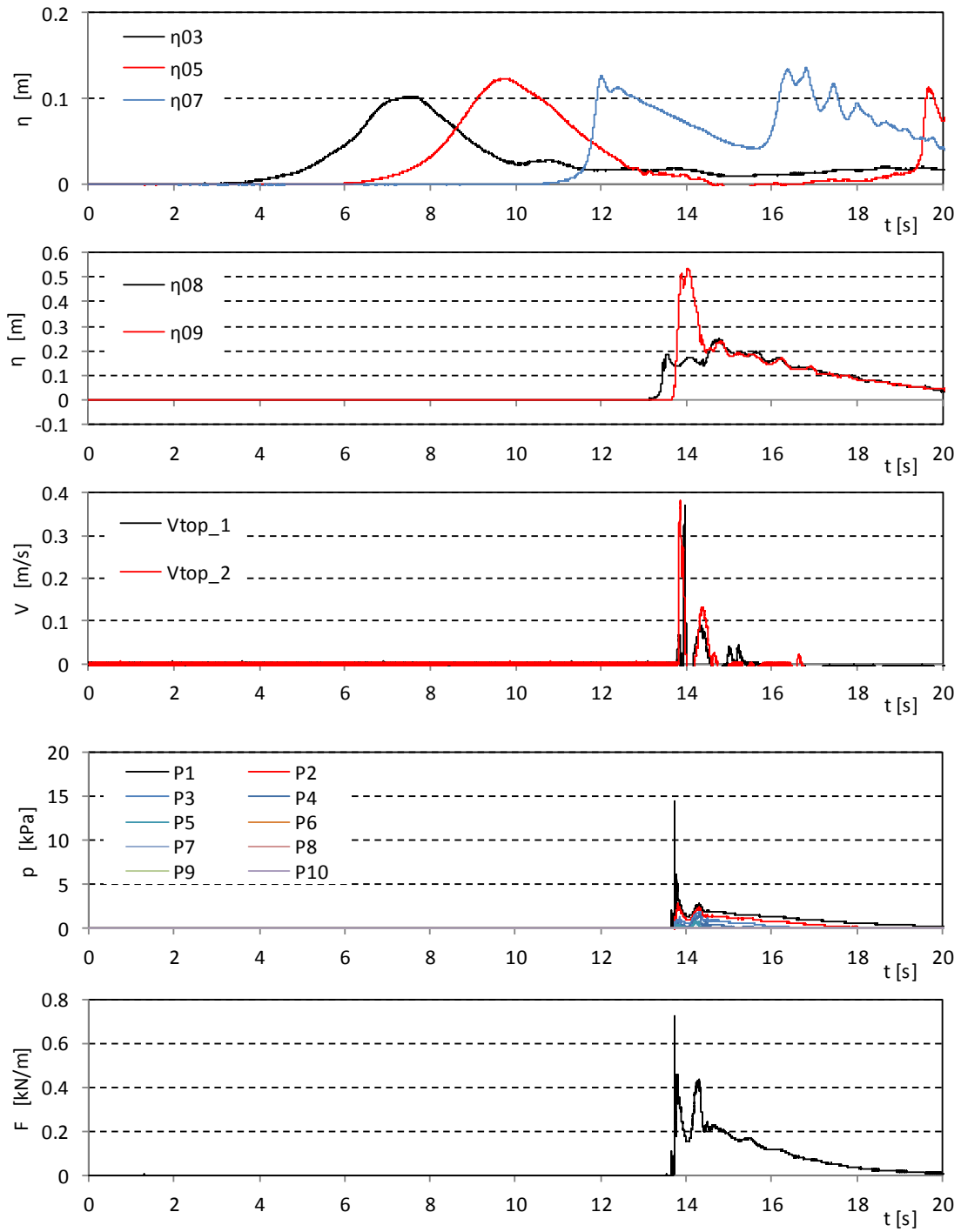


図- 5.1.4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m, Wc14)

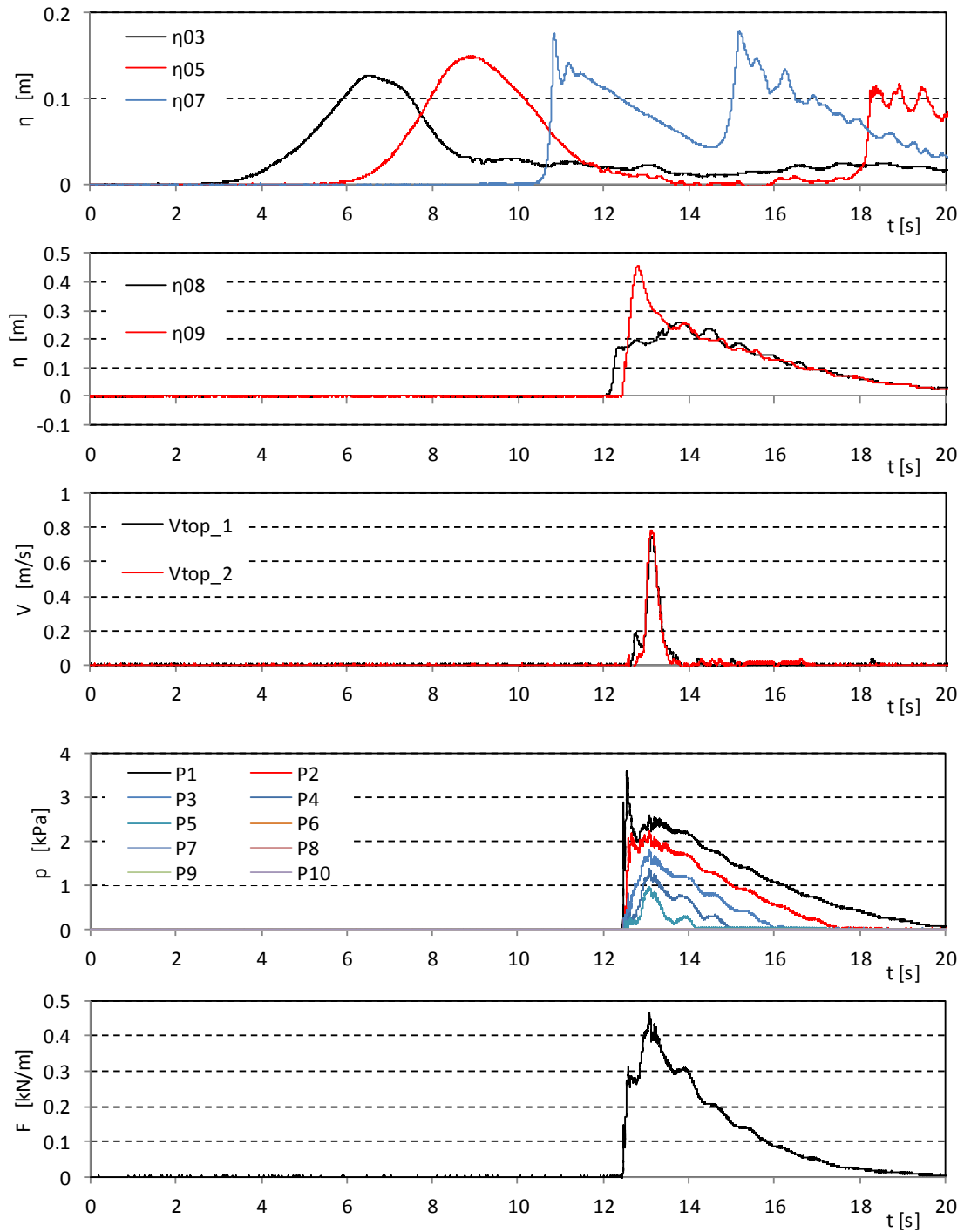


図- 5.1.4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m, Wc15)

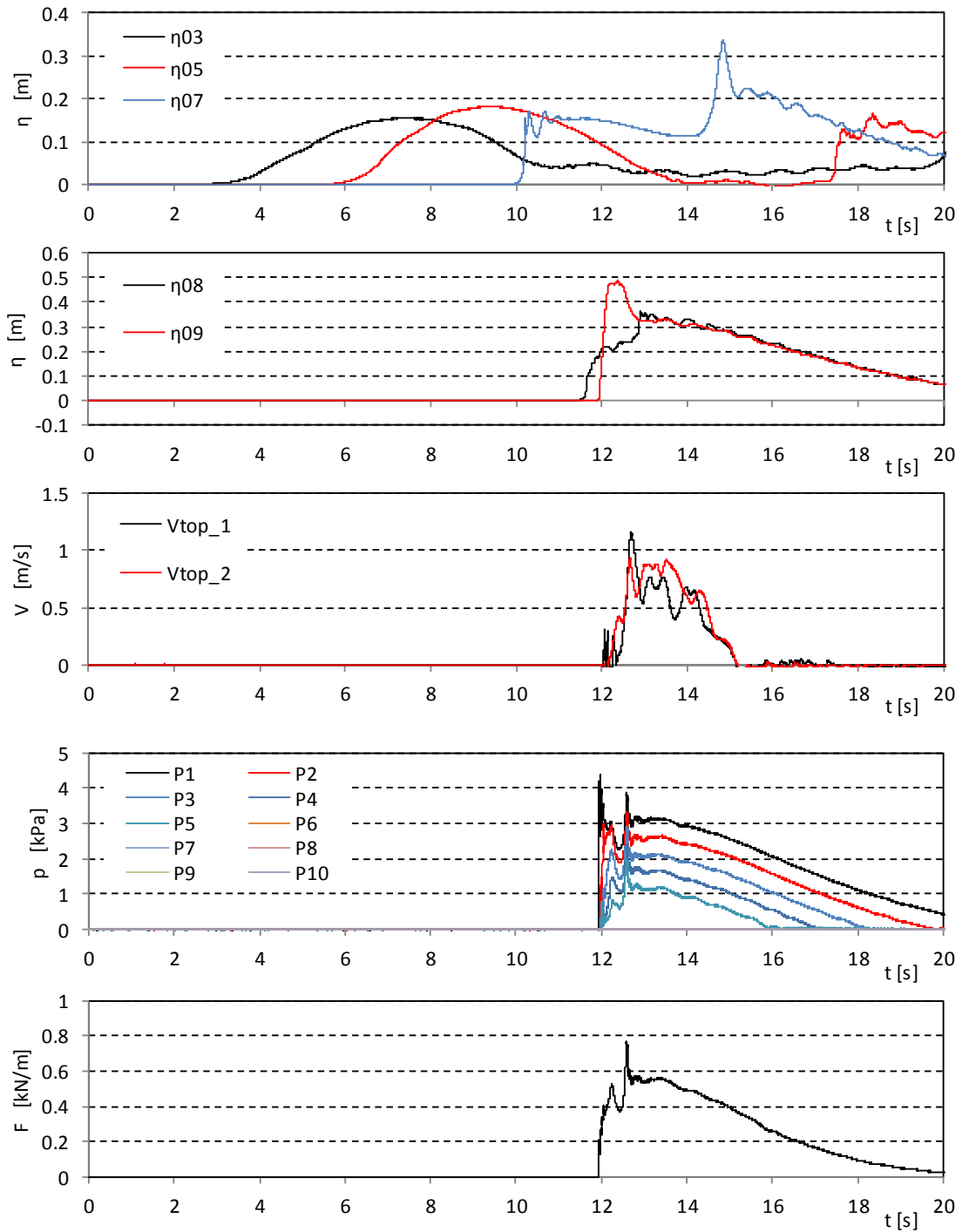


図- 5.1.4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m, Wc21)

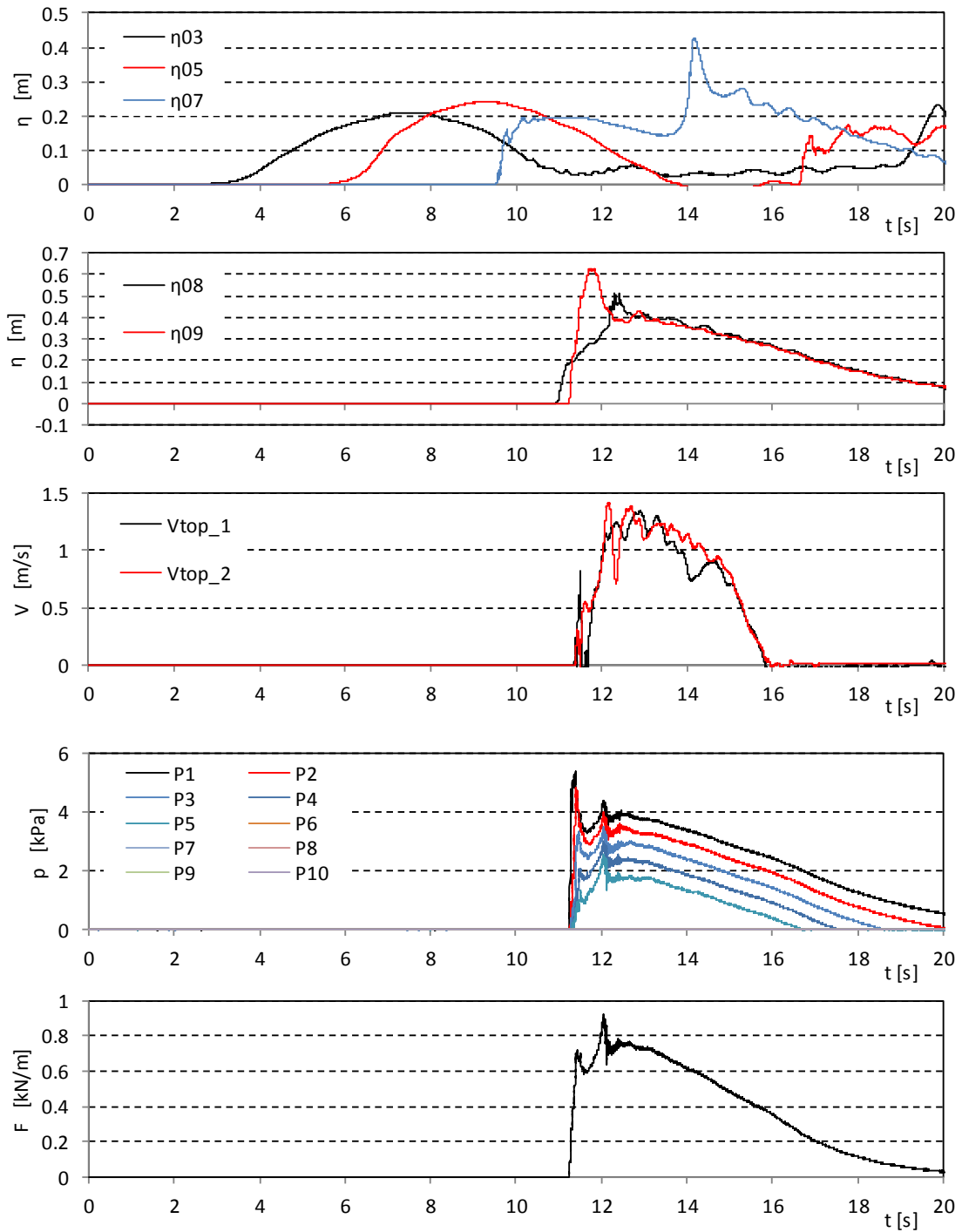


図- 5.1.4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m, Wc22)

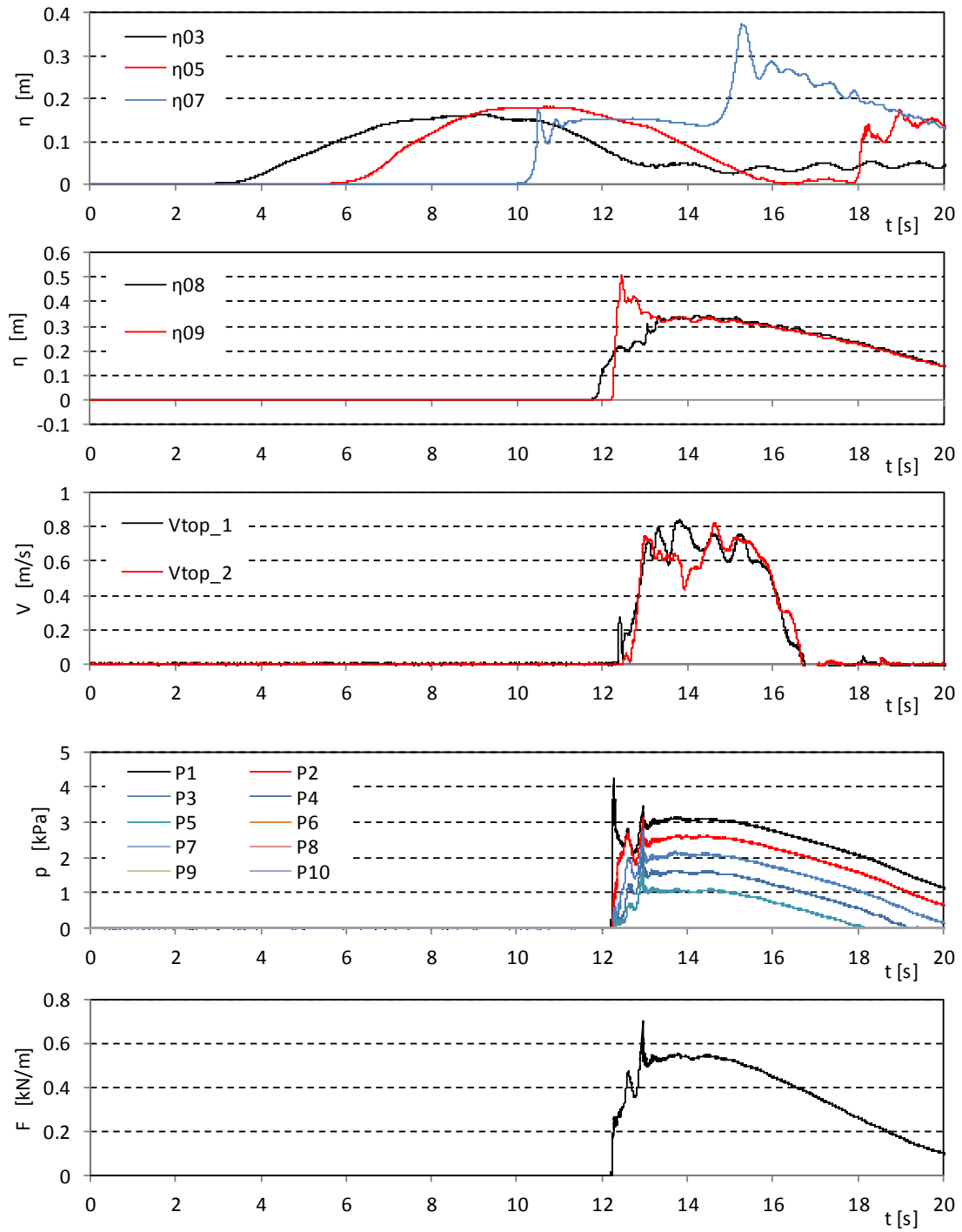


図- 5.1.4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m, Wc31)

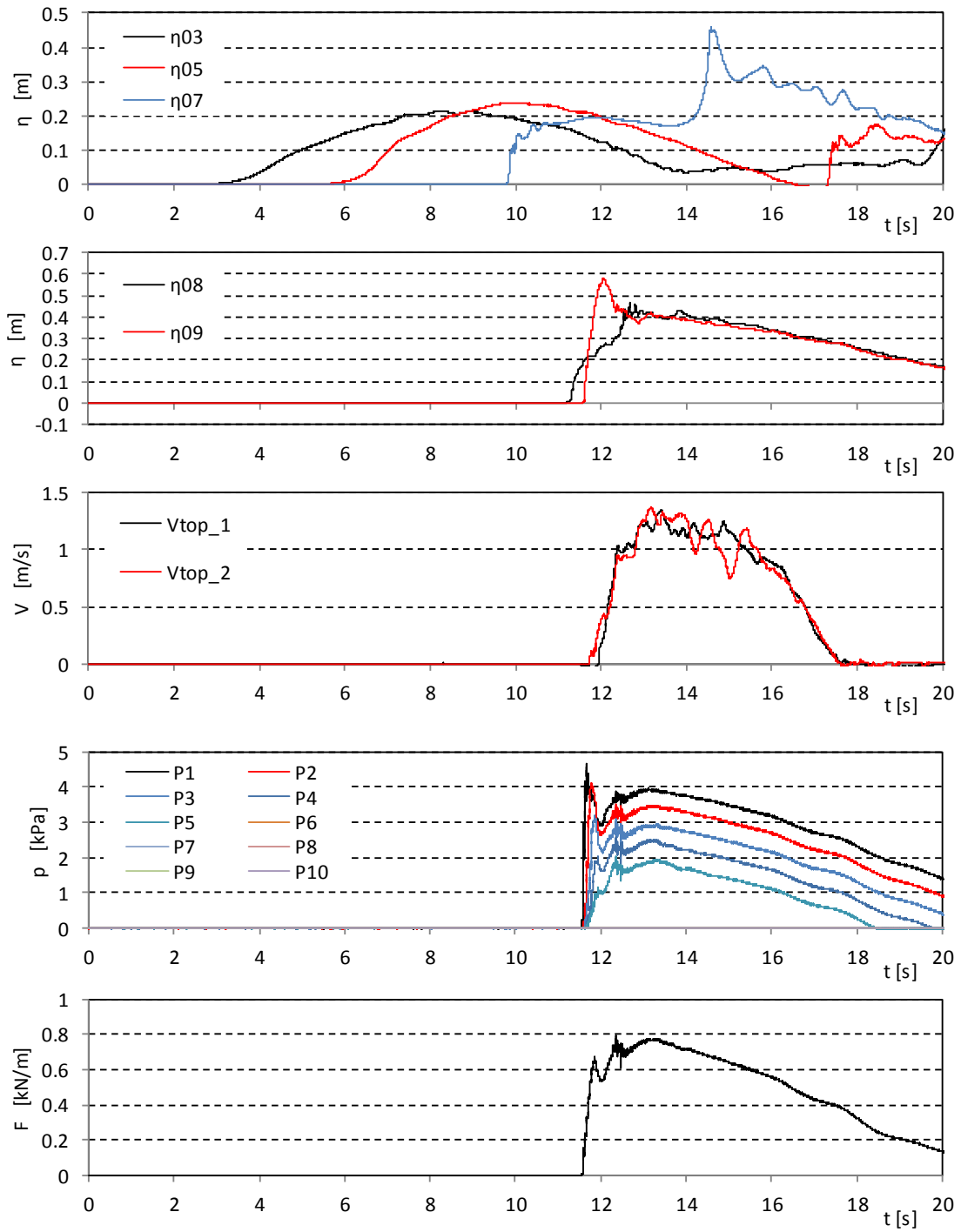


図- 5.1.4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m, Wc32)

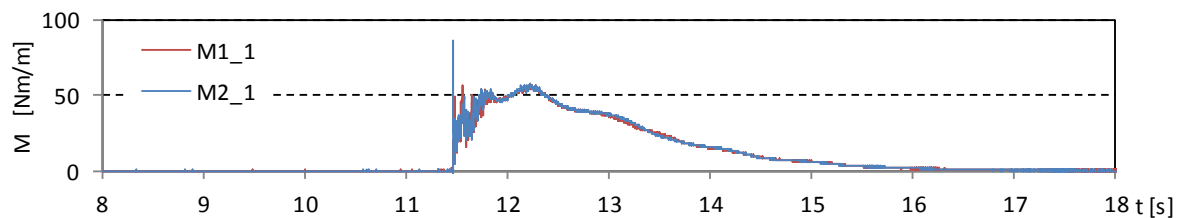
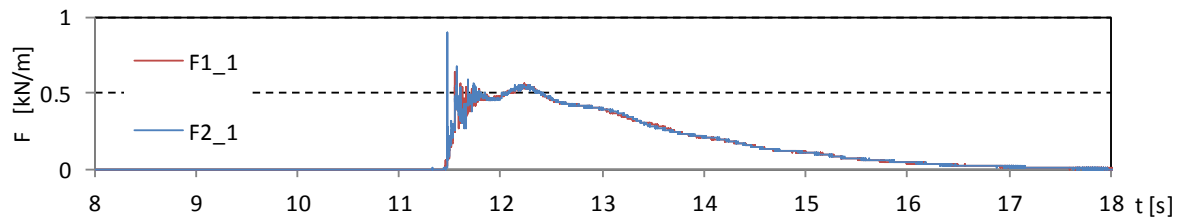
5.2. 波力・モーメントの時系列と最大波力作用時の圧力分布

図- 5.2.1～図- 5.2.4 に、堤体前面の 2 測線で計測した圧力から、それぞれ波力・モーメントを積分により求めた結果を示す。3 回繰り返し試験のうち、1 回目の結果を示した。また、段波波力および持続波力最大時の段波波圧および持続波圧の鉛直分布を、図- 5.2.5～図- 5.2.8 に示す。なお、段波波圧および持続波圧の算出方法については、7.1 に後述する。

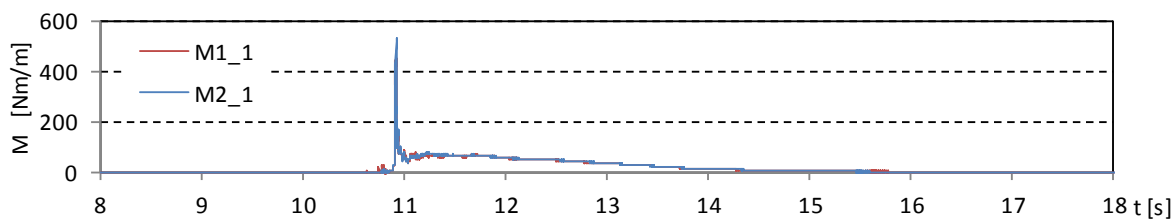
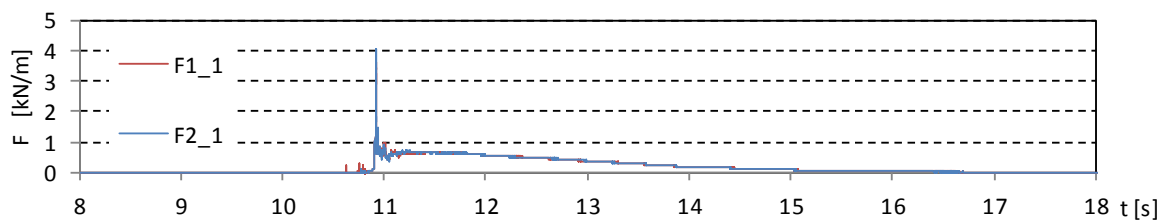
波力・モーメントの時系列については、その特徴は前述した非越流の場合と同様である。また、段波波力の最大値は非越流の場合とほぼ等しく、一方で特に持続波力が卓越するケースにおいては、持続波力の最大値が非越流の場合よりも小さくなっている。

圧力分布についても、非越流の場合と同じ特徴を示す。ただし詳細に比較すると、段波波圧に関しては非越流の場合とほぼ同じであるが、持続波圧に関しては、非越流の場合よりも圧力が小さくなっており、越流することにより、堤体に働く波圧自体が低下していることが分かる。

Wc11



Wc12



Wc13

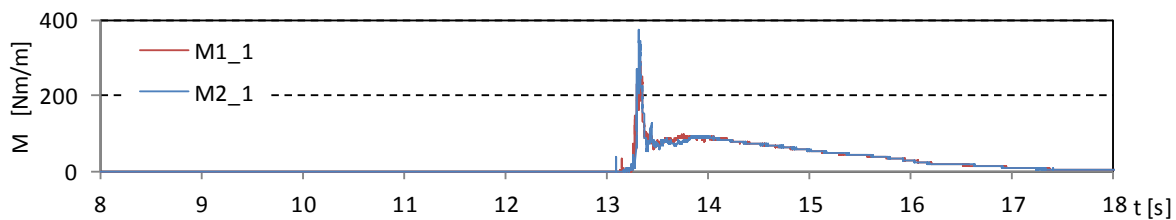
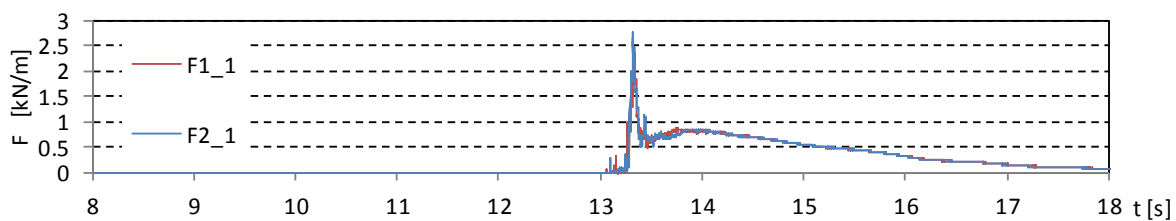
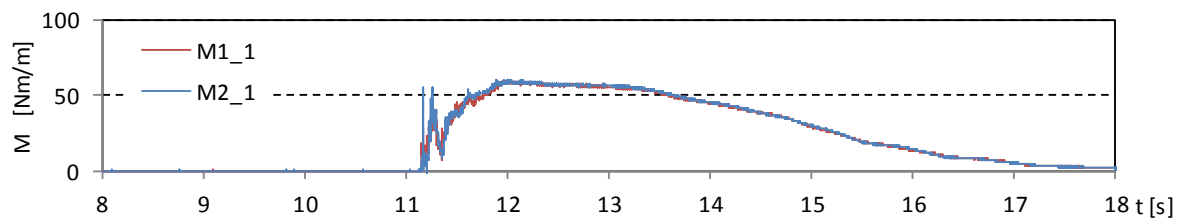
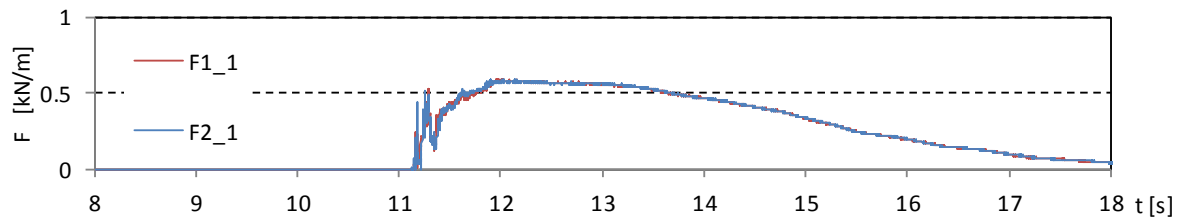


図- 5.2.1 津波波力の算出結果 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0m, 1回目)

Wc21



Wc22

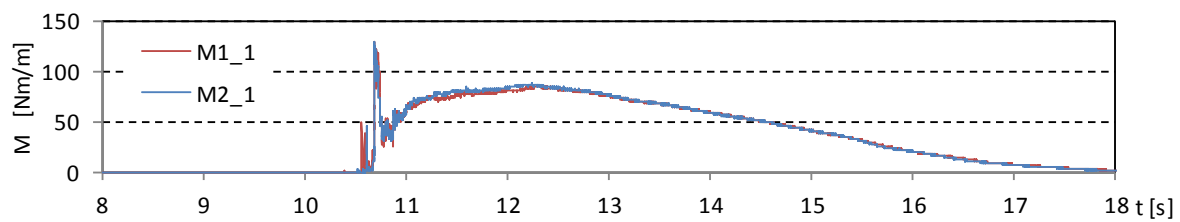
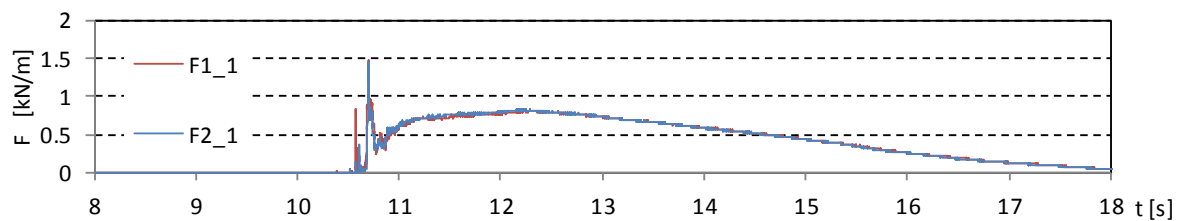
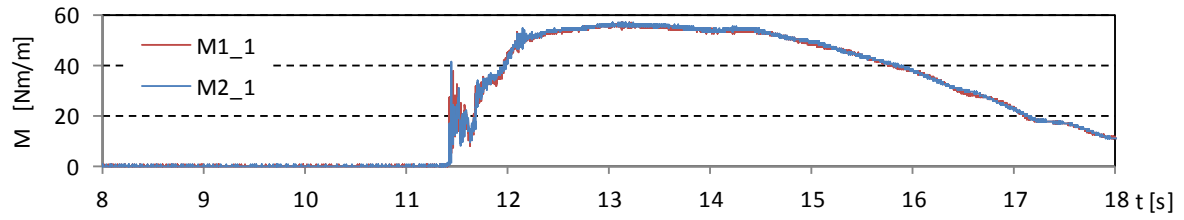
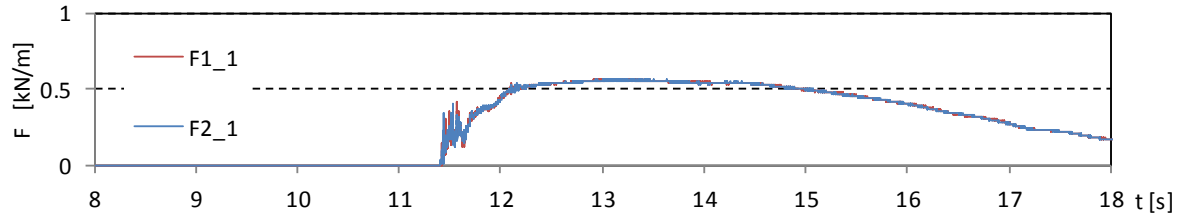


図- 5.2.1 津波波力の算出結果 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0m, 1回目)

Wc31



Wc32

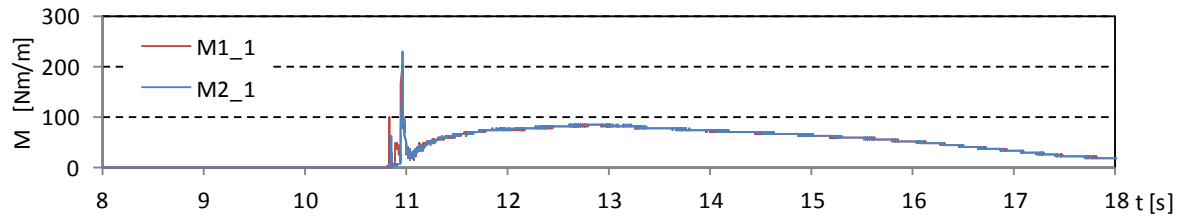
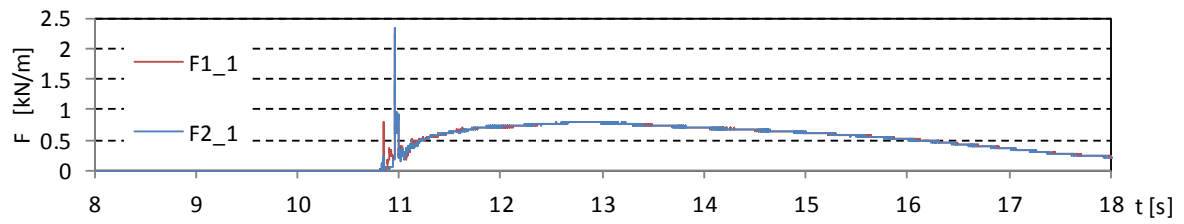
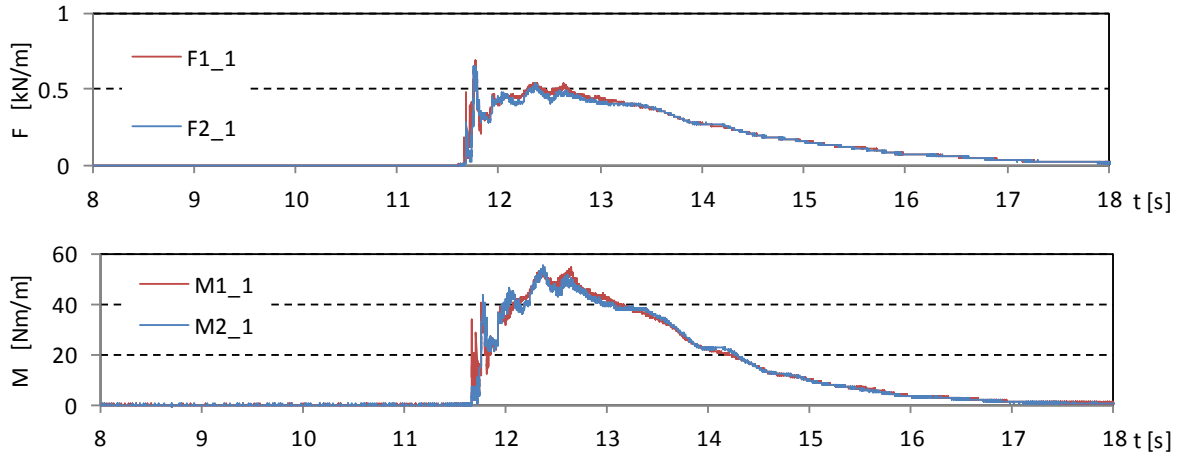
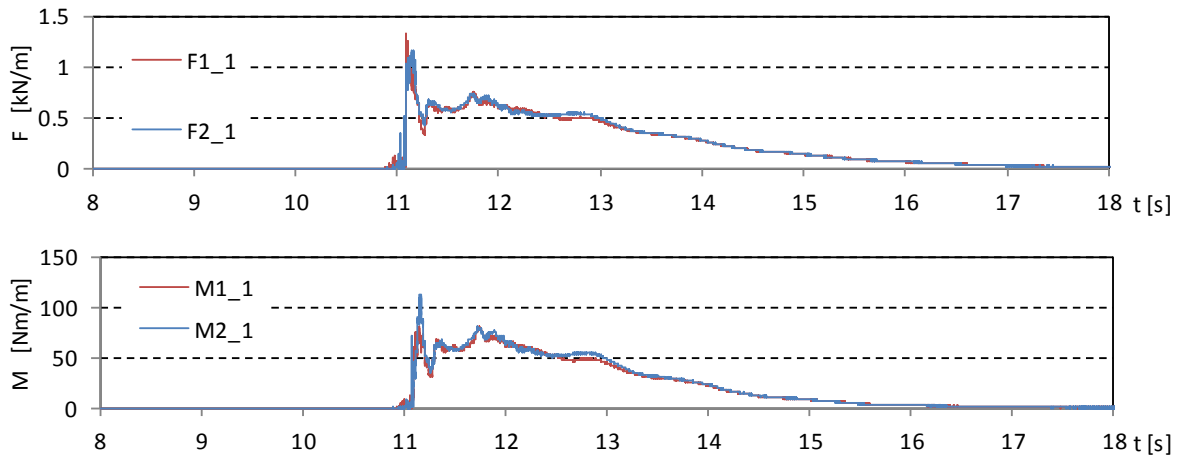


図- 5.2.1 津波波力の算出結果 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0m, 1回目)

Wc11



Wc12



Wc13

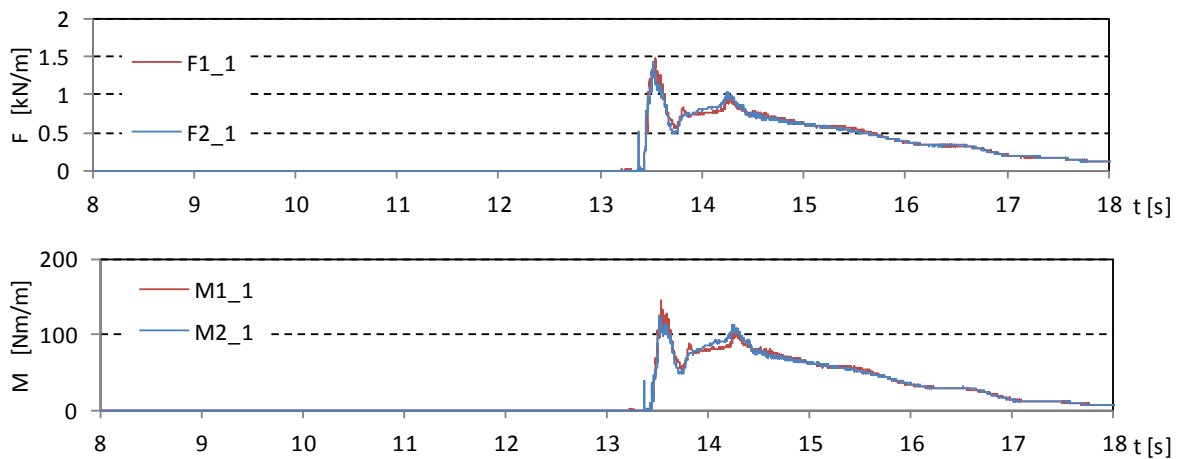
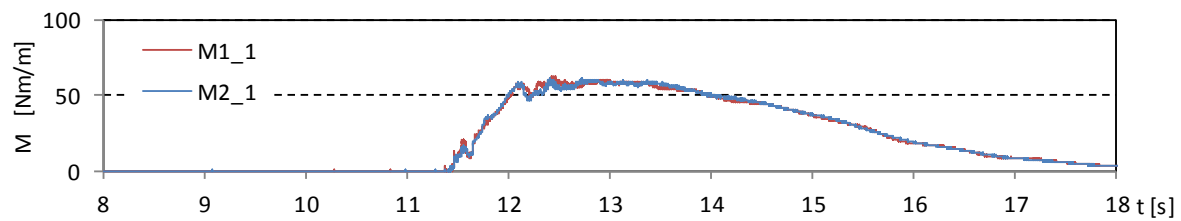
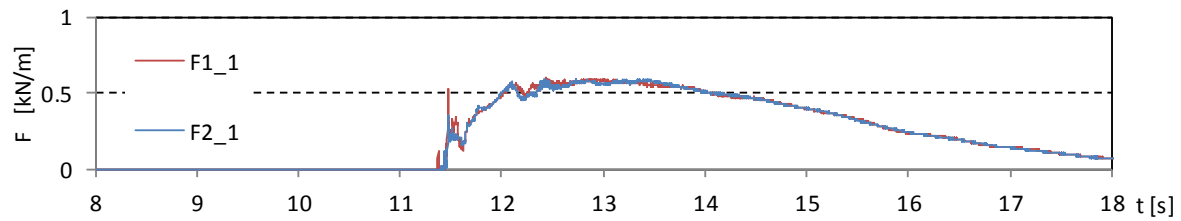


図- 5.2.2 津波波力の算出結果 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m, 1 回目)

Wc21



Wc22

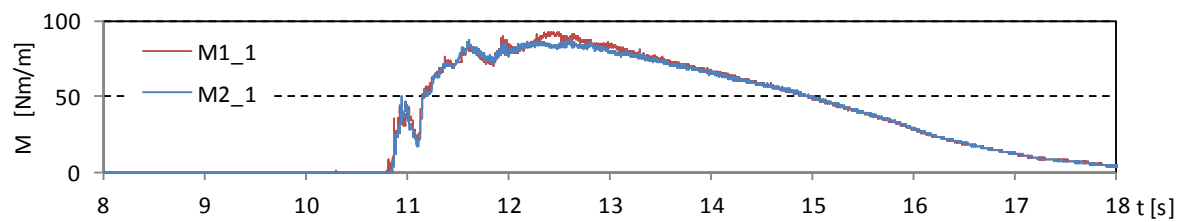
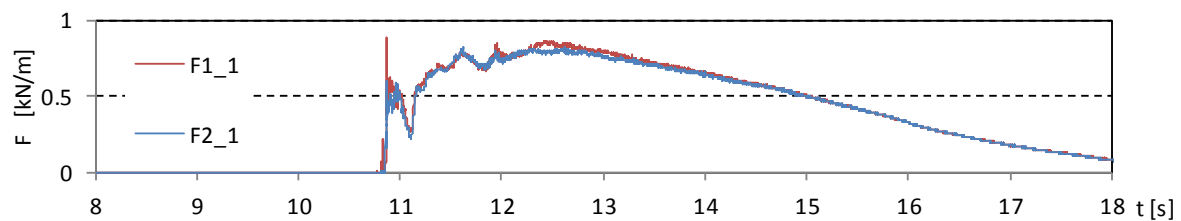
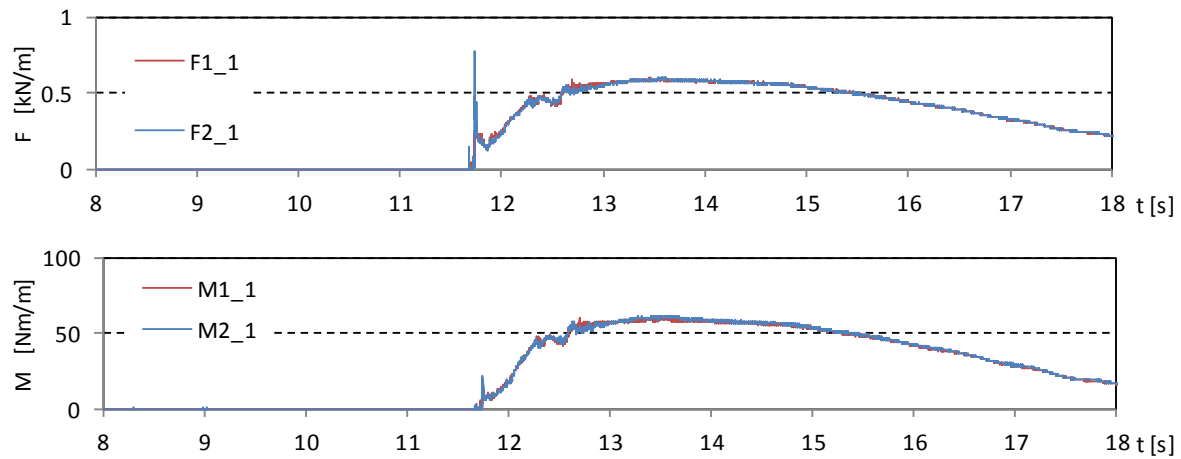


図- 5.2.2 津波波力の算出結果 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m, 1 回目)

Wc31



Wc32

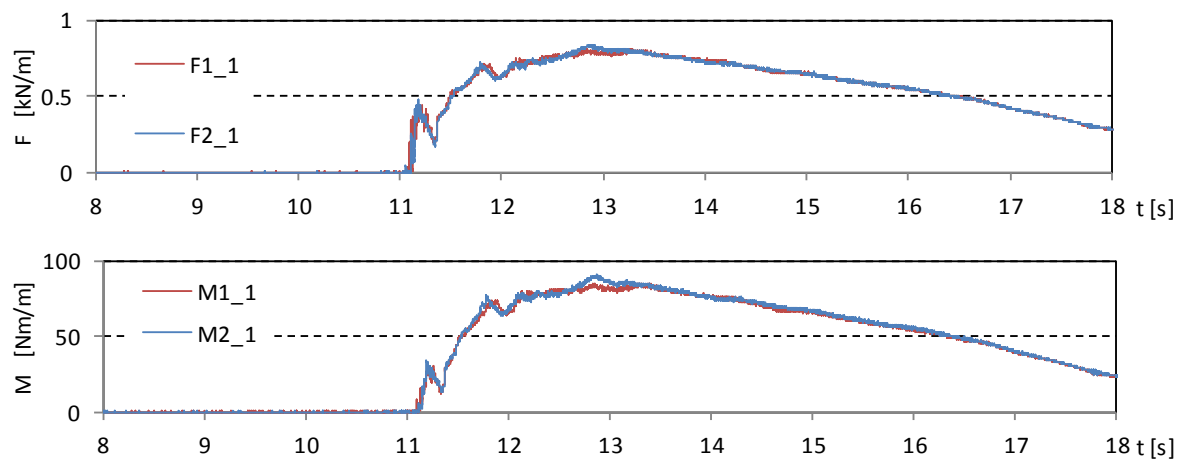
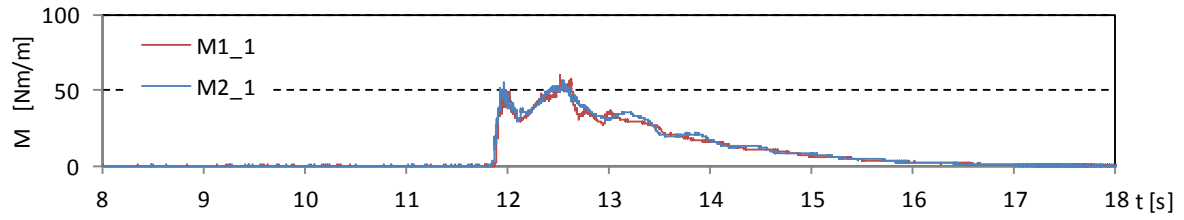
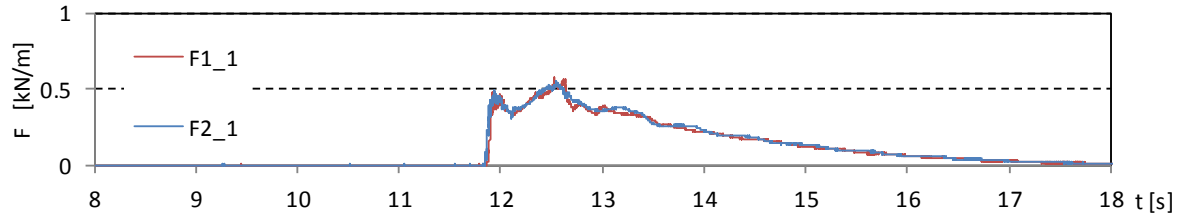
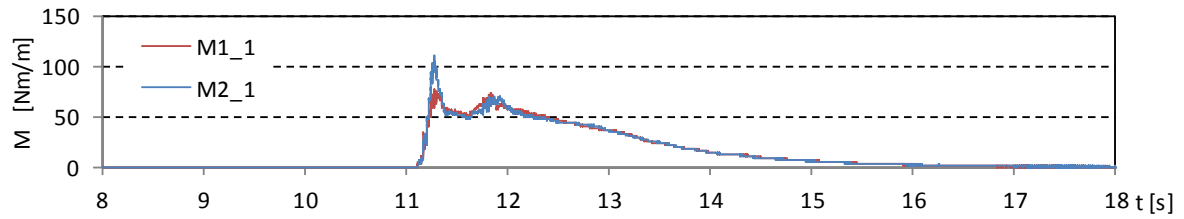
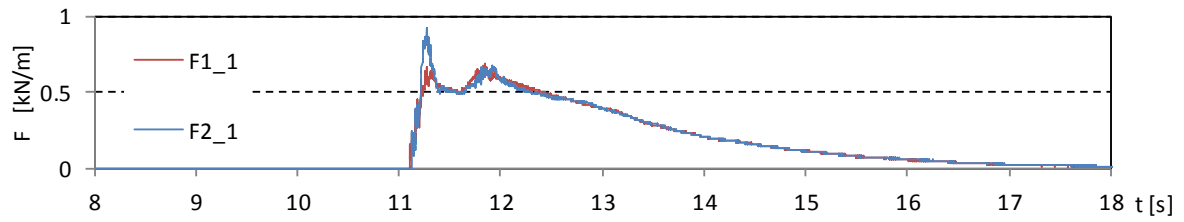


図- 5.2.2 津波波力の算出結果 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m, 1回目)

Wc11



Wc12



Wc13

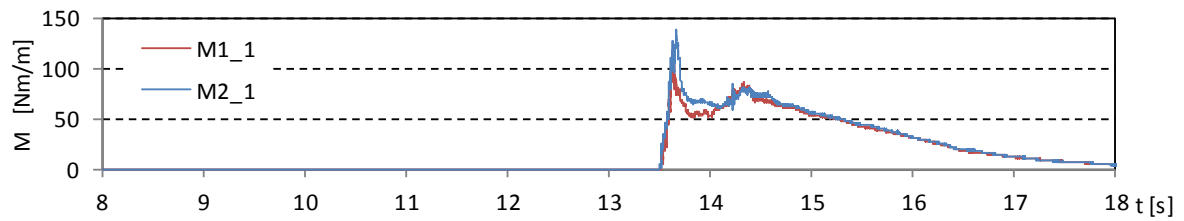
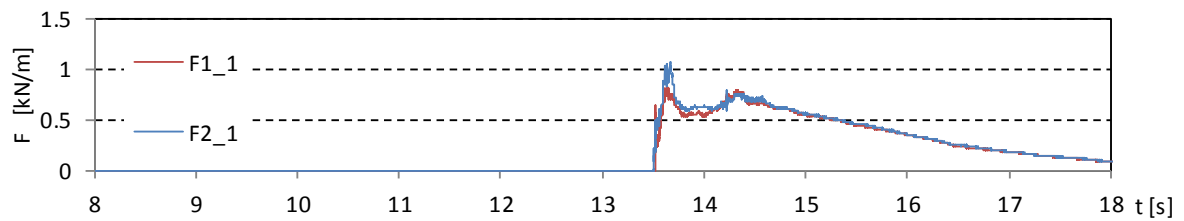
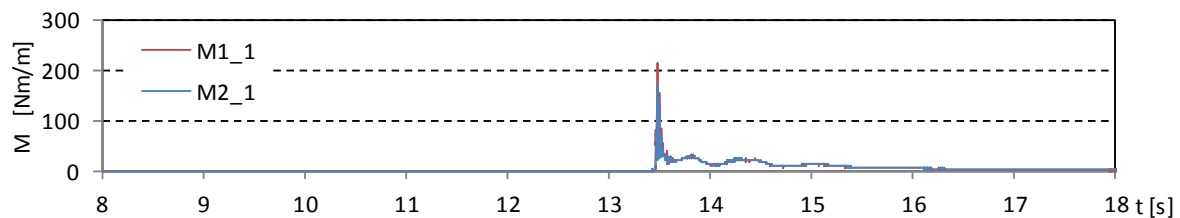
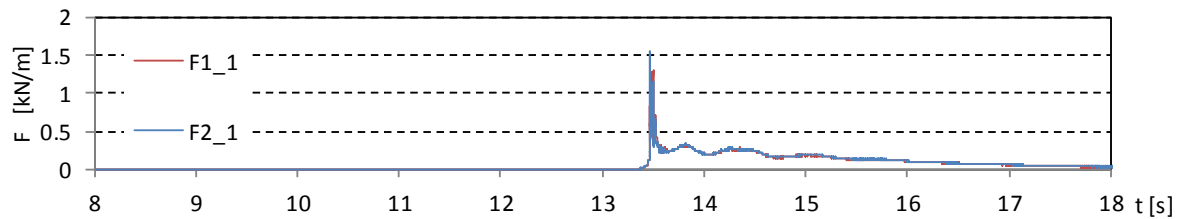


図- 5.2.3 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0m, 1回目)

Wc14



Wc15

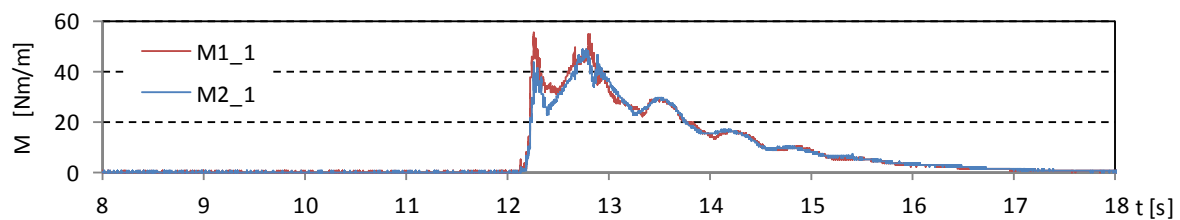
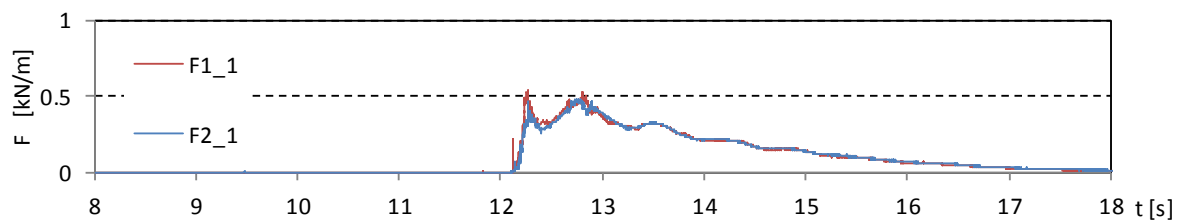
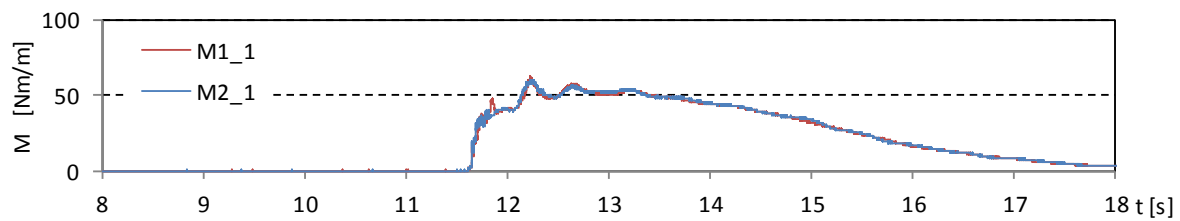
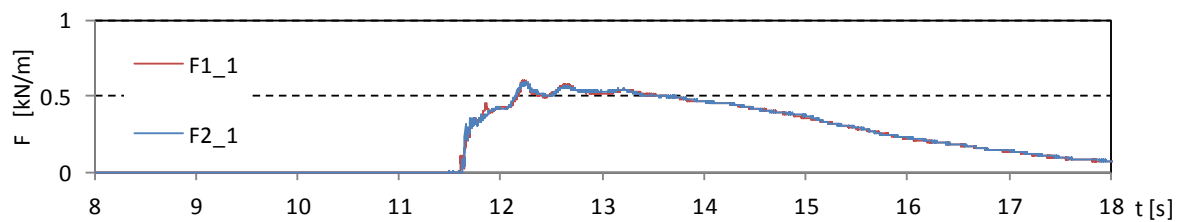


図- 5.2.3 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0m, 1 回目)

Wc21



Wc22

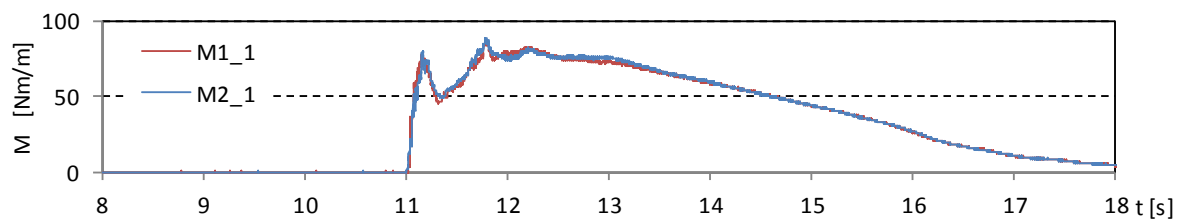
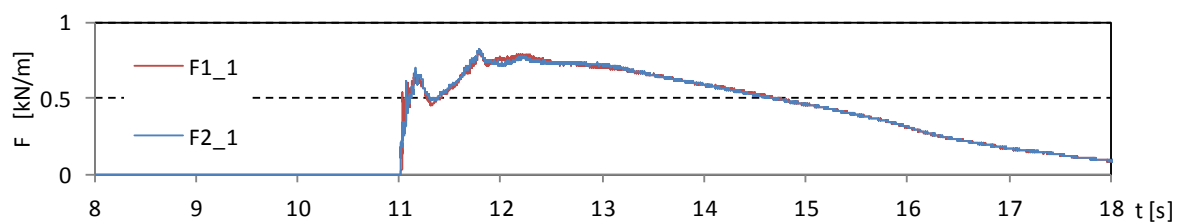
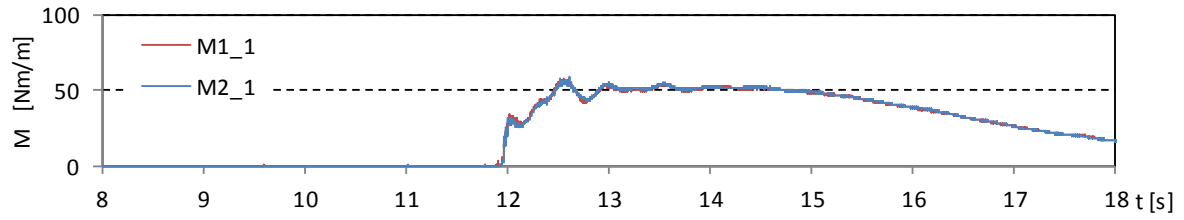
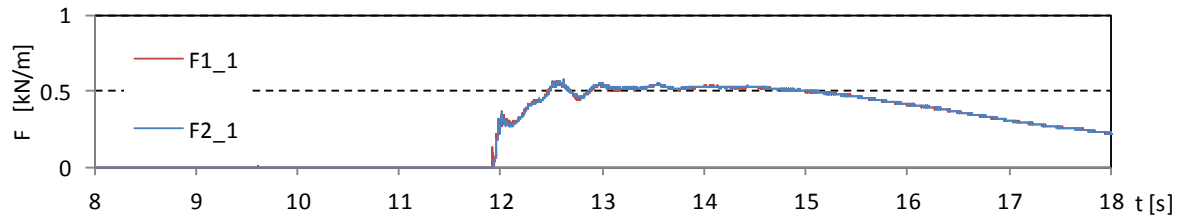


図- 5.2.3 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0m, 1回目)

Wc31



Wc32

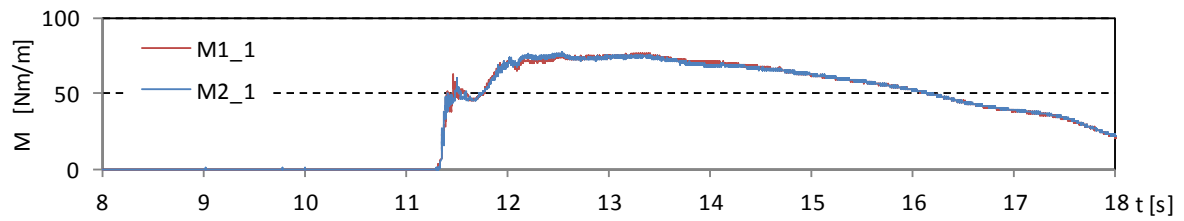
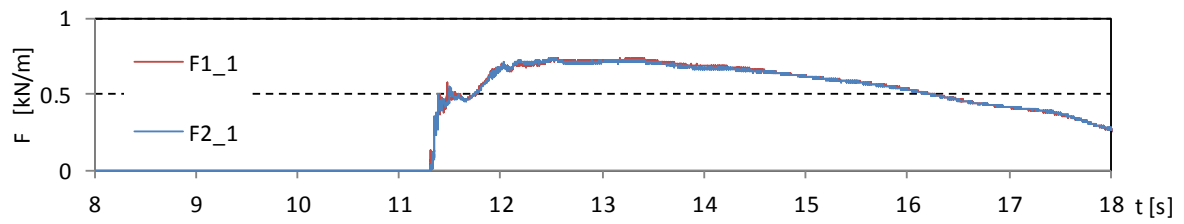
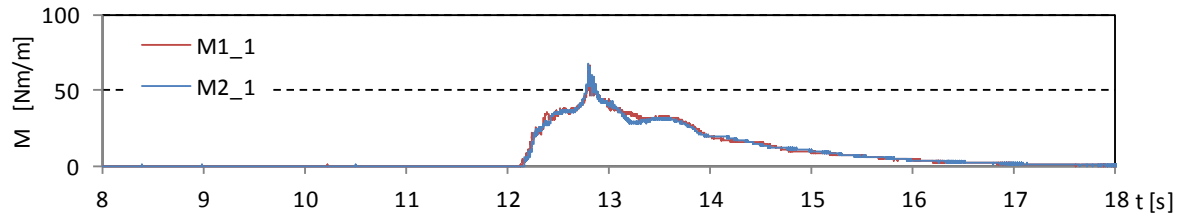
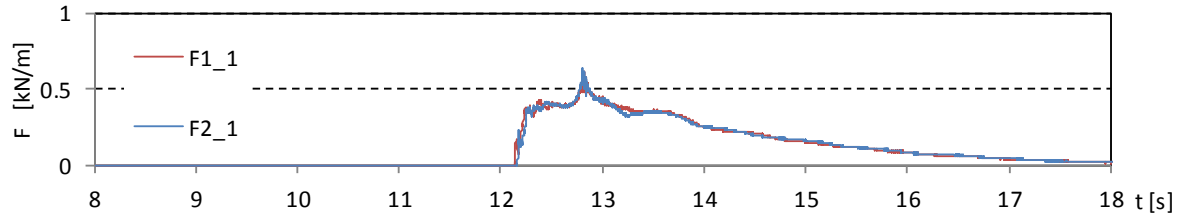
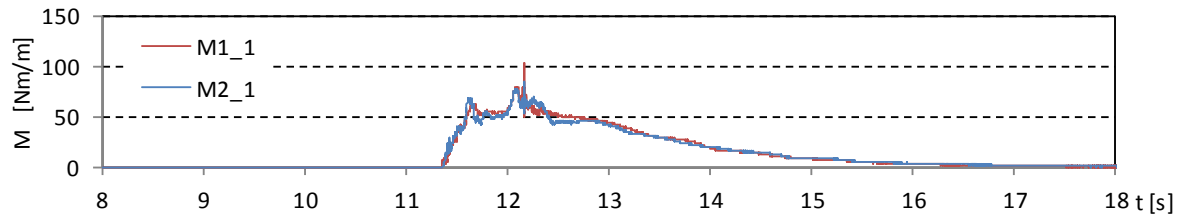
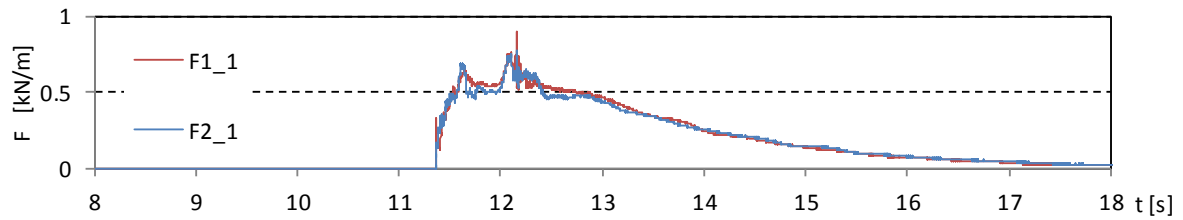


図- 5.2.3 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0m, 1回目)

Wc11



Wc12



Wc13

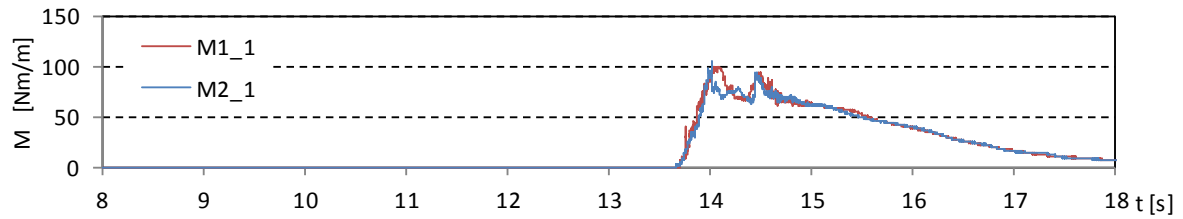
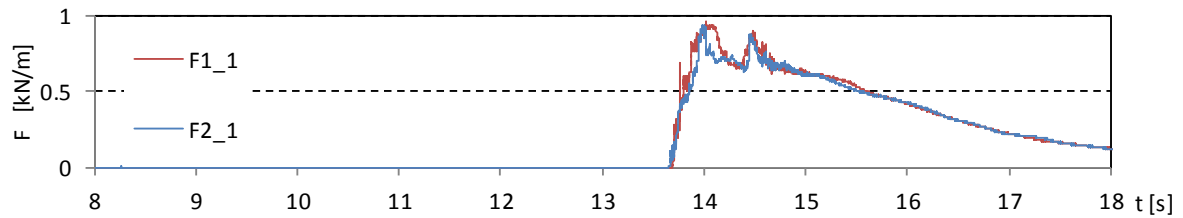
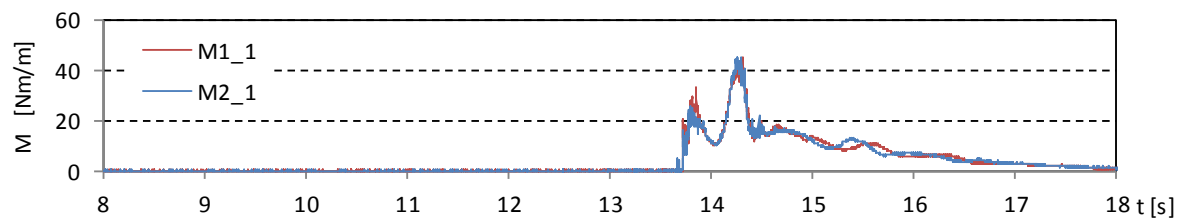
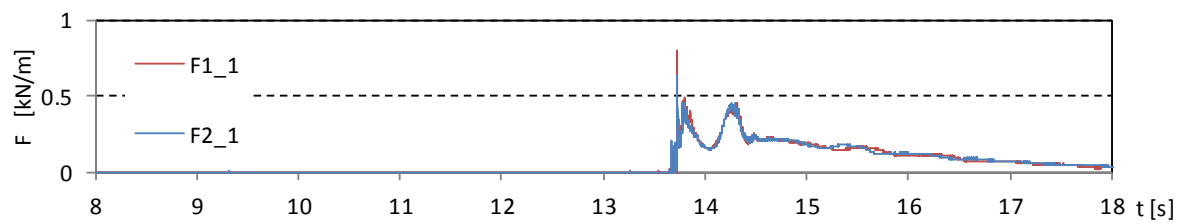


図- 5.2.4 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m, 1 回目)

Wc14



Wc15

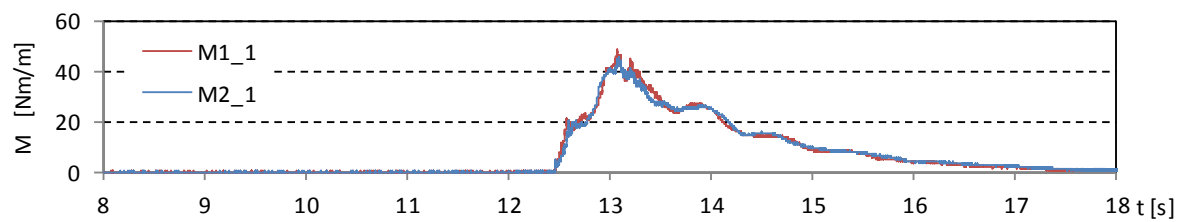
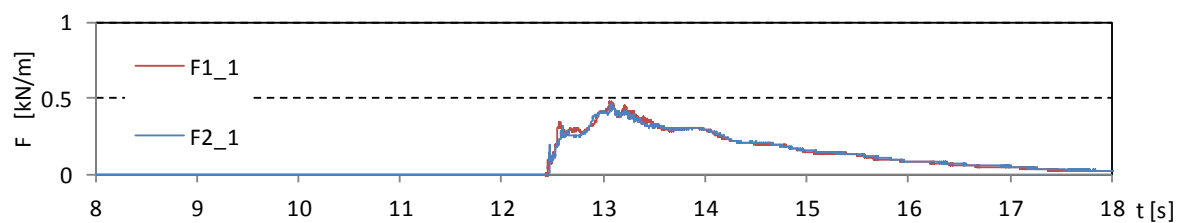
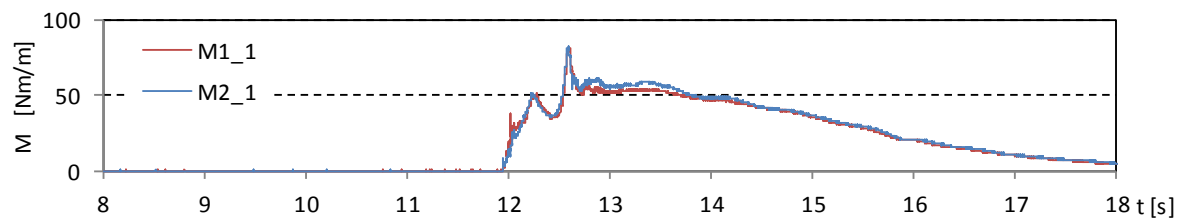
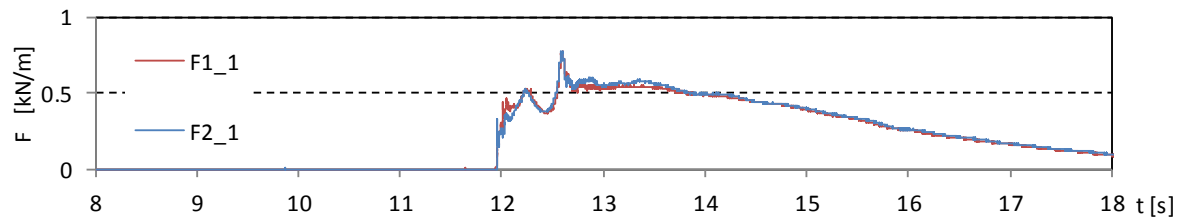


図- 5.2.4 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m, 1回目)

Wc21



Wc22

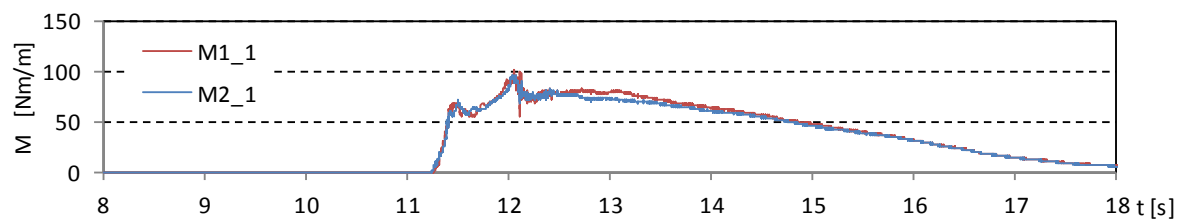
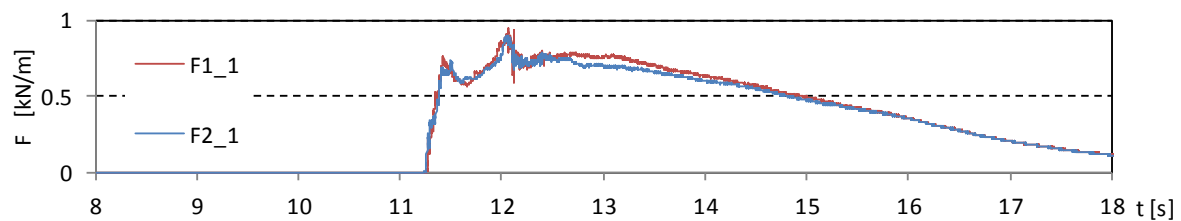
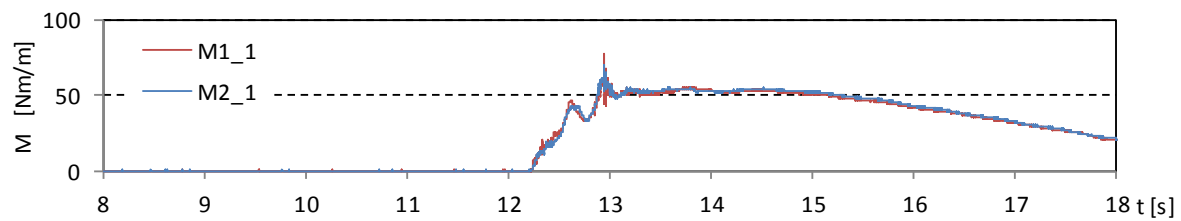
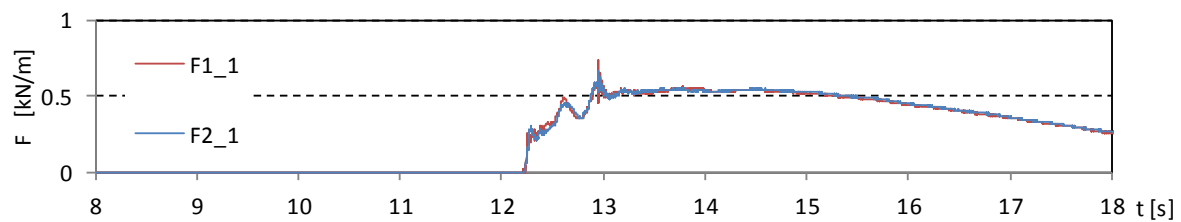


図- 5.2.4 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m, 1 回目)

Wc31



Wc32

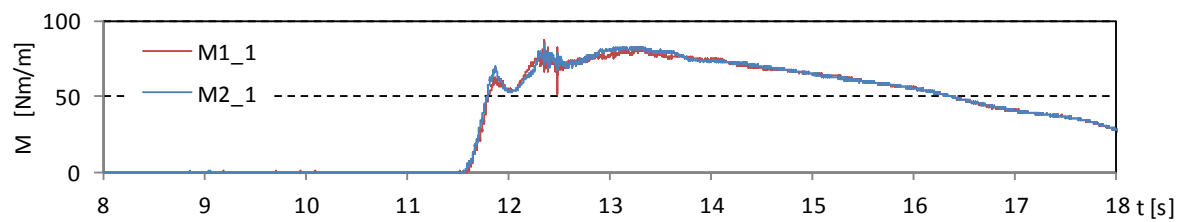
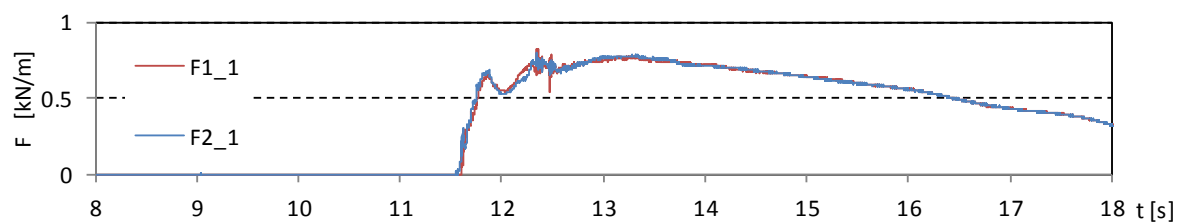


図- 5.2.4 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m, 1回目)

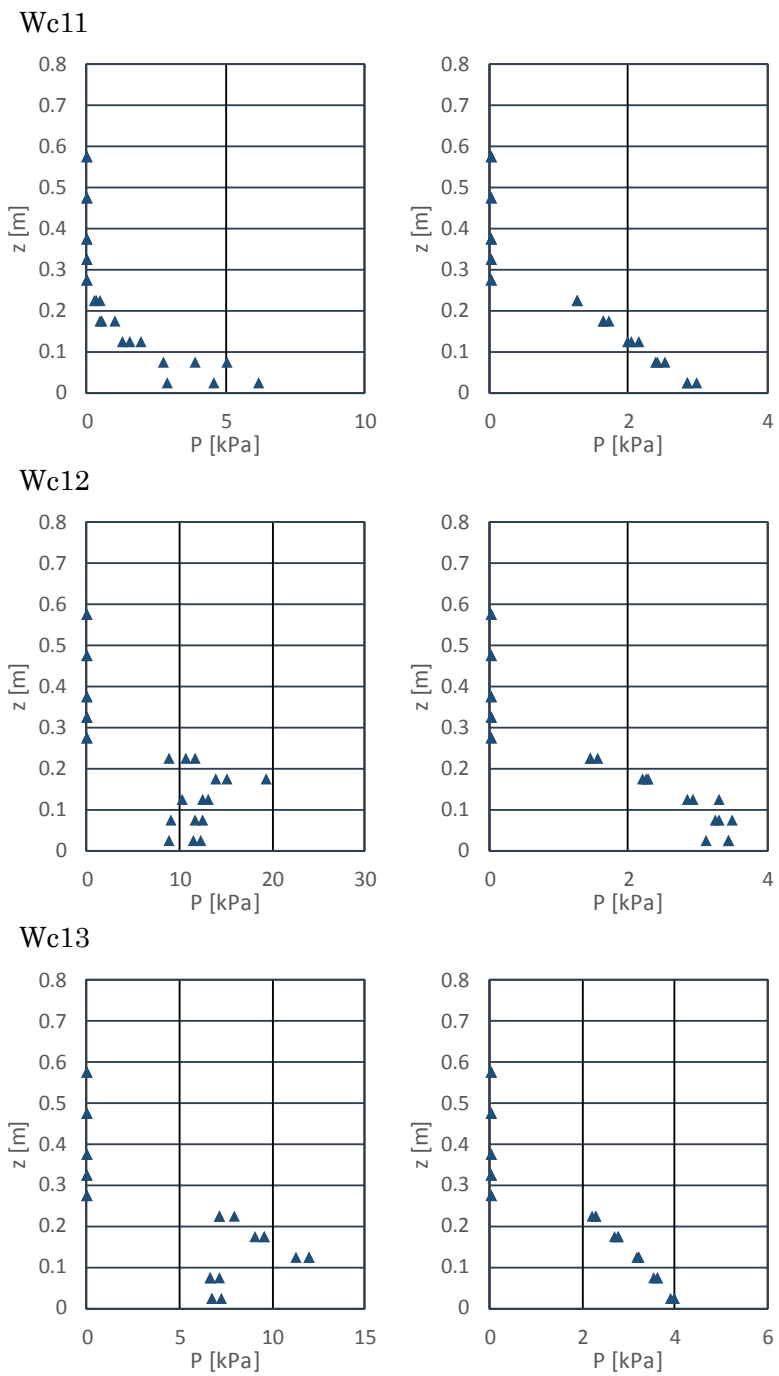


図- 5.2.5 圧力の鉛直分布 (左: 段波波圧, 右: 持続波圧, 単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0m)

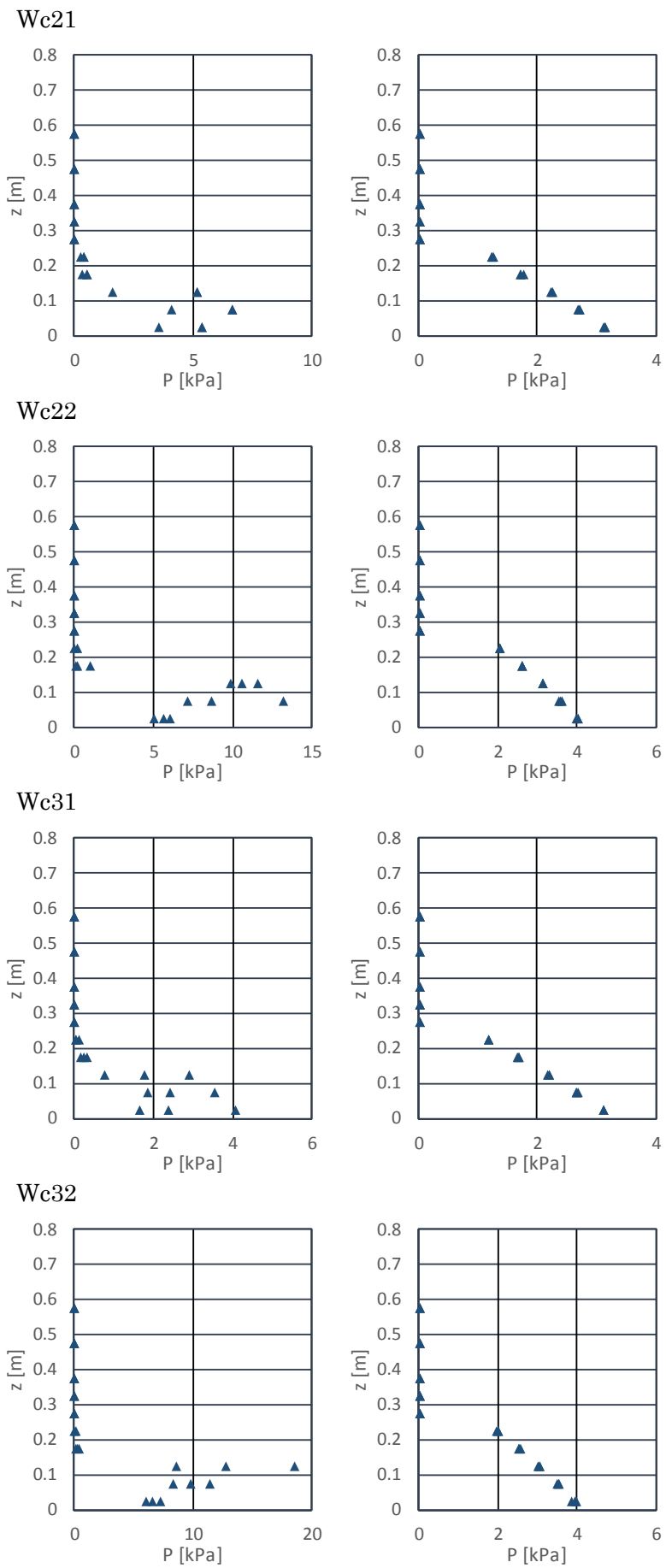


図- 5.2.5 圧力の鉛直分布 (左: 段波波圧, 右: 持続波圧, 単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0m)

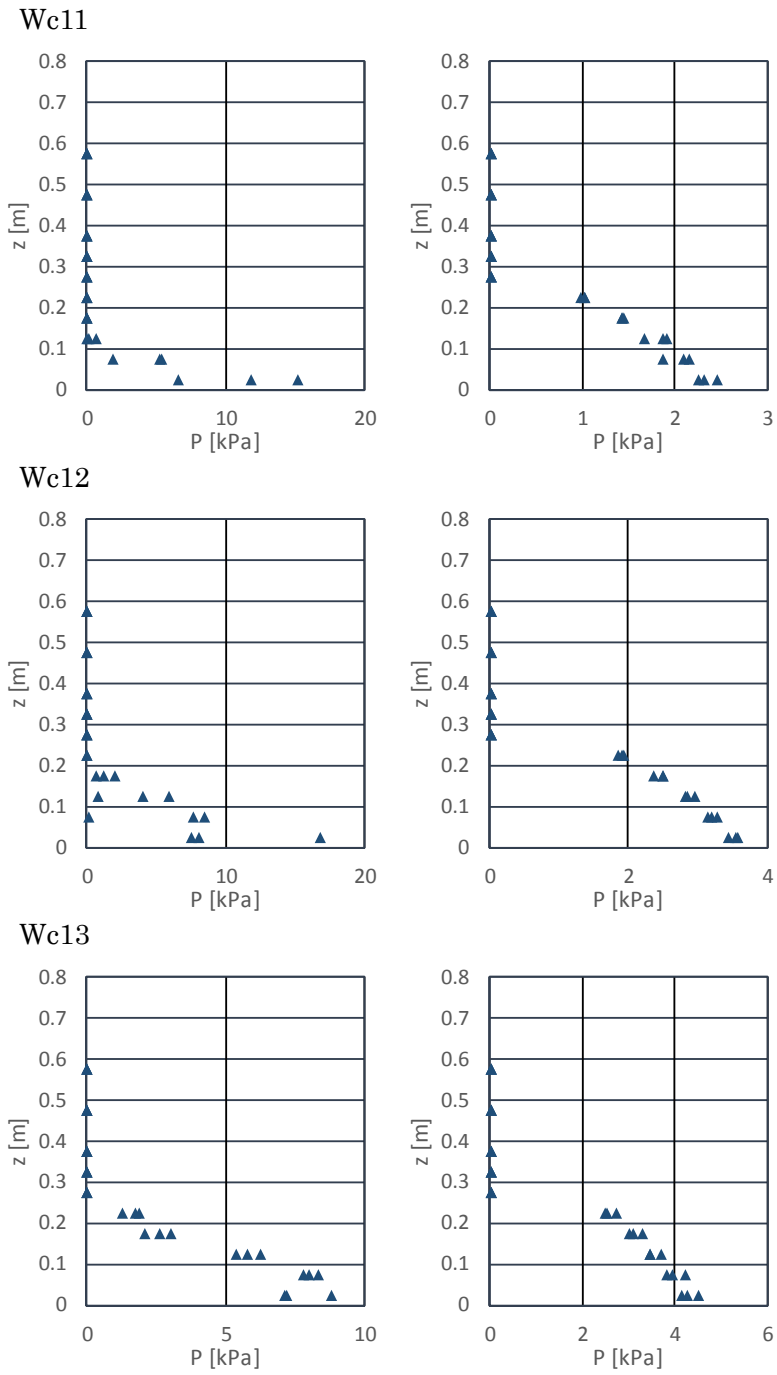


図- 5.2.6 圧力の鉛直分布(左:段波波圧,右:持続波圧,単純勾配,堤体 TypeB,設置位置 0.625m)

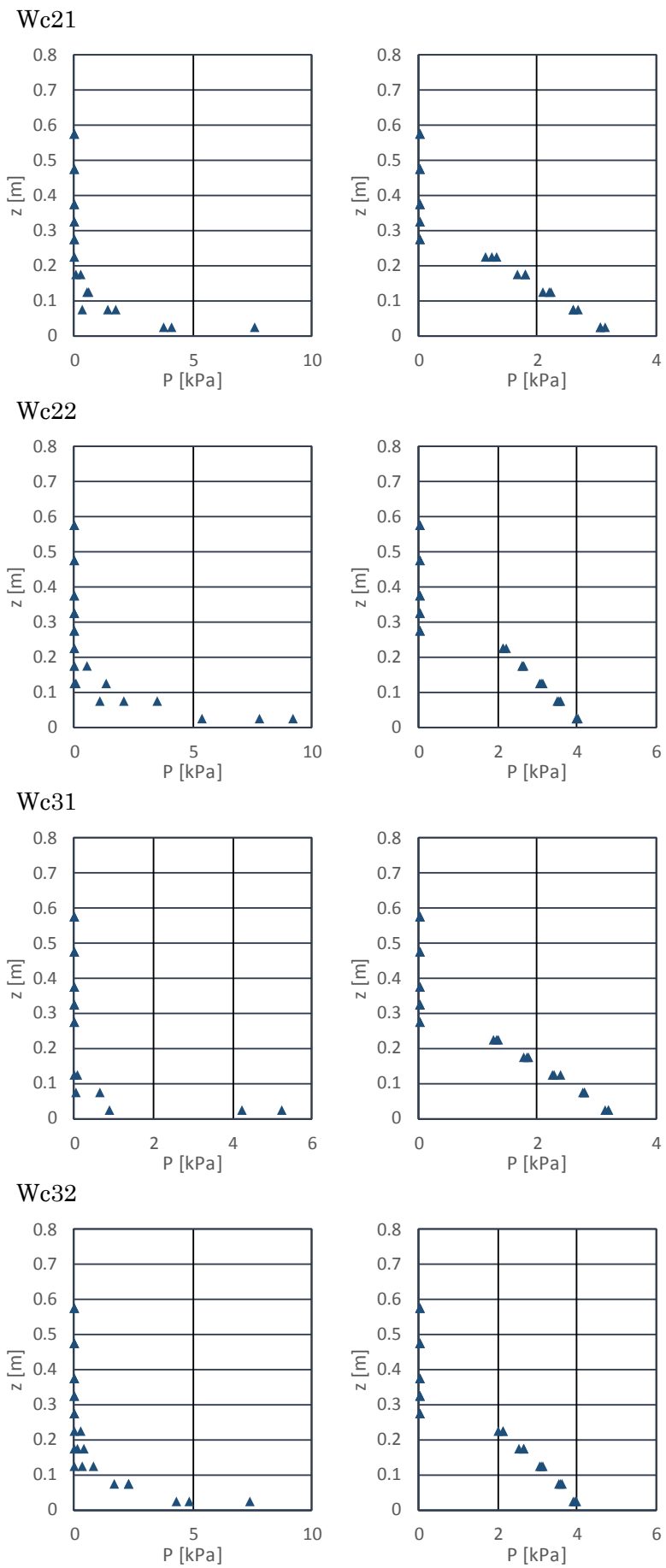


図- 5.2.6 圧力の鉛直分布(左:段波波圧, 右:持続波圧, 単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m)

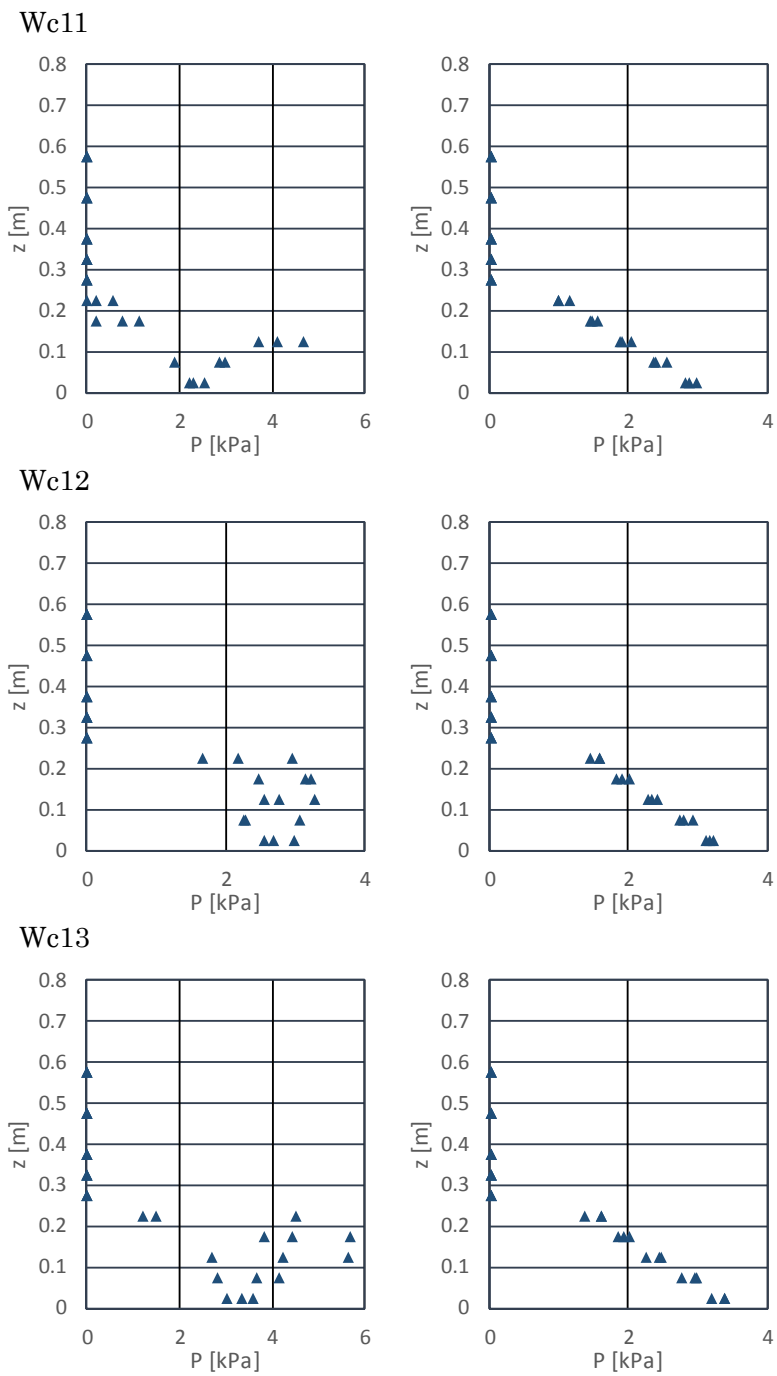
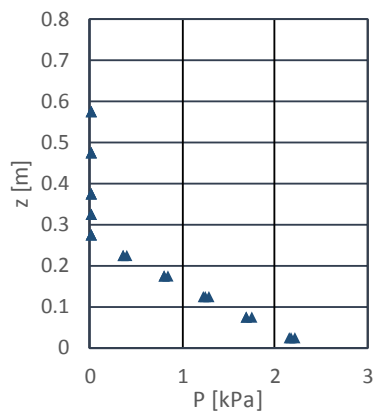
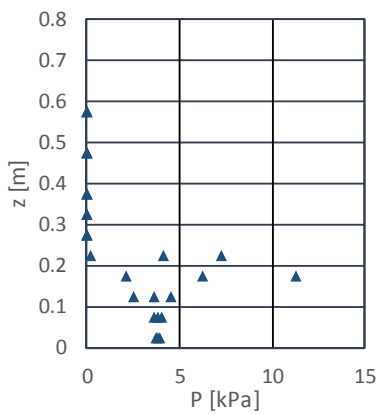


図- 5.2.7 圧力の鉛直分布 (左: 段波波圧, 右: 持続波圧, 直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0m)

Wc14



Wc15

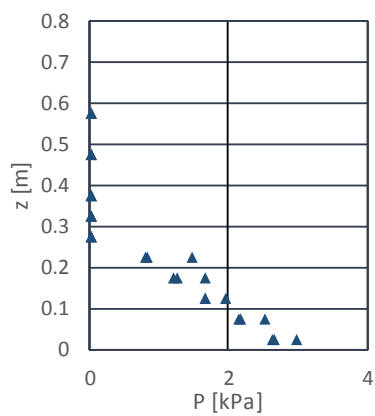
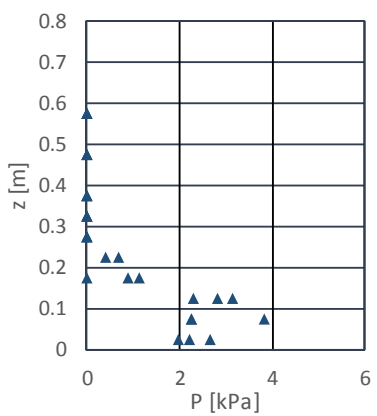
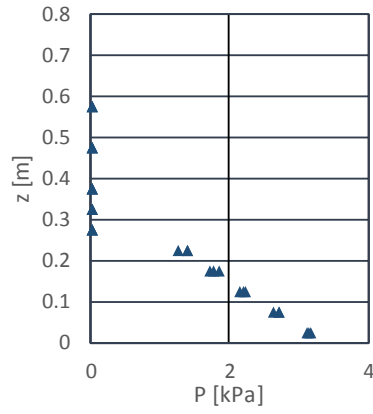
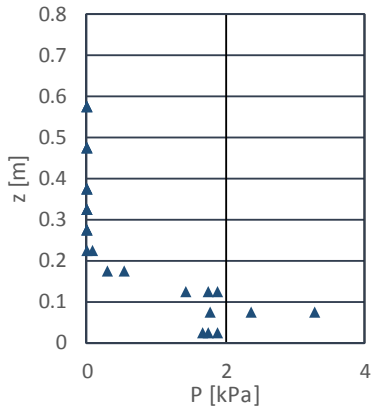
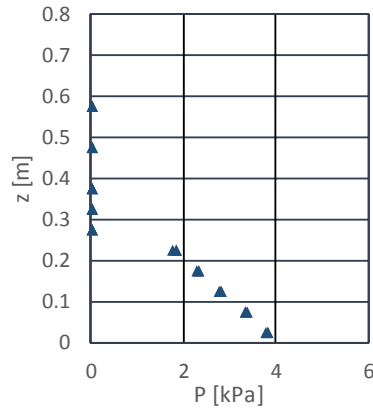
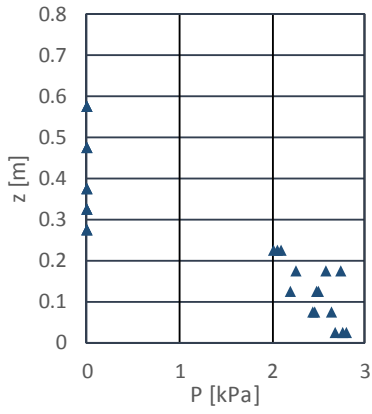


図- 5.2.7 圧力の鉛直分布 (左: 段波波圧, 右: 持続波圧, 直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0m)

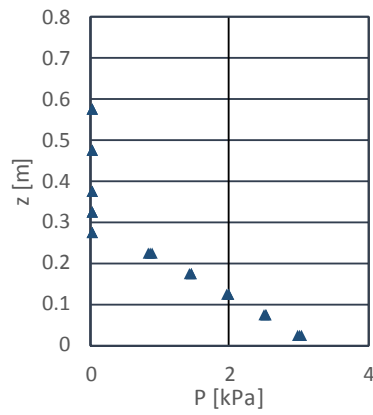
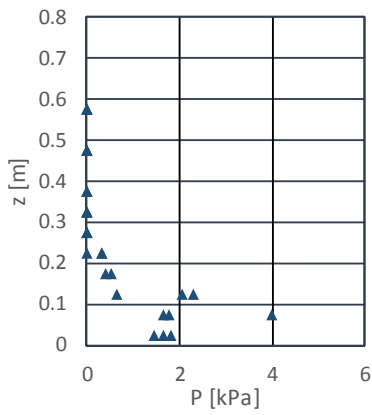
Wc21



Wc22



Wc31



Wc32

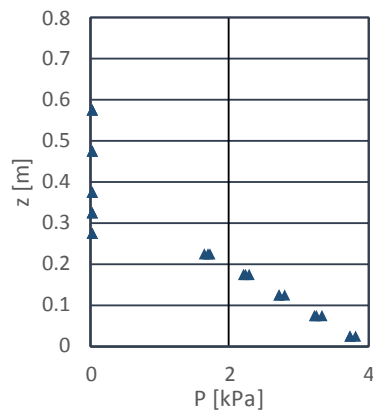
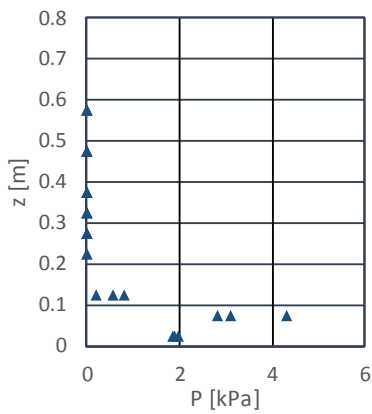


図- 5.2.7 圧力の鉛直分布 (左: 段波波圧, 右: 持続波圧, 直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0m)

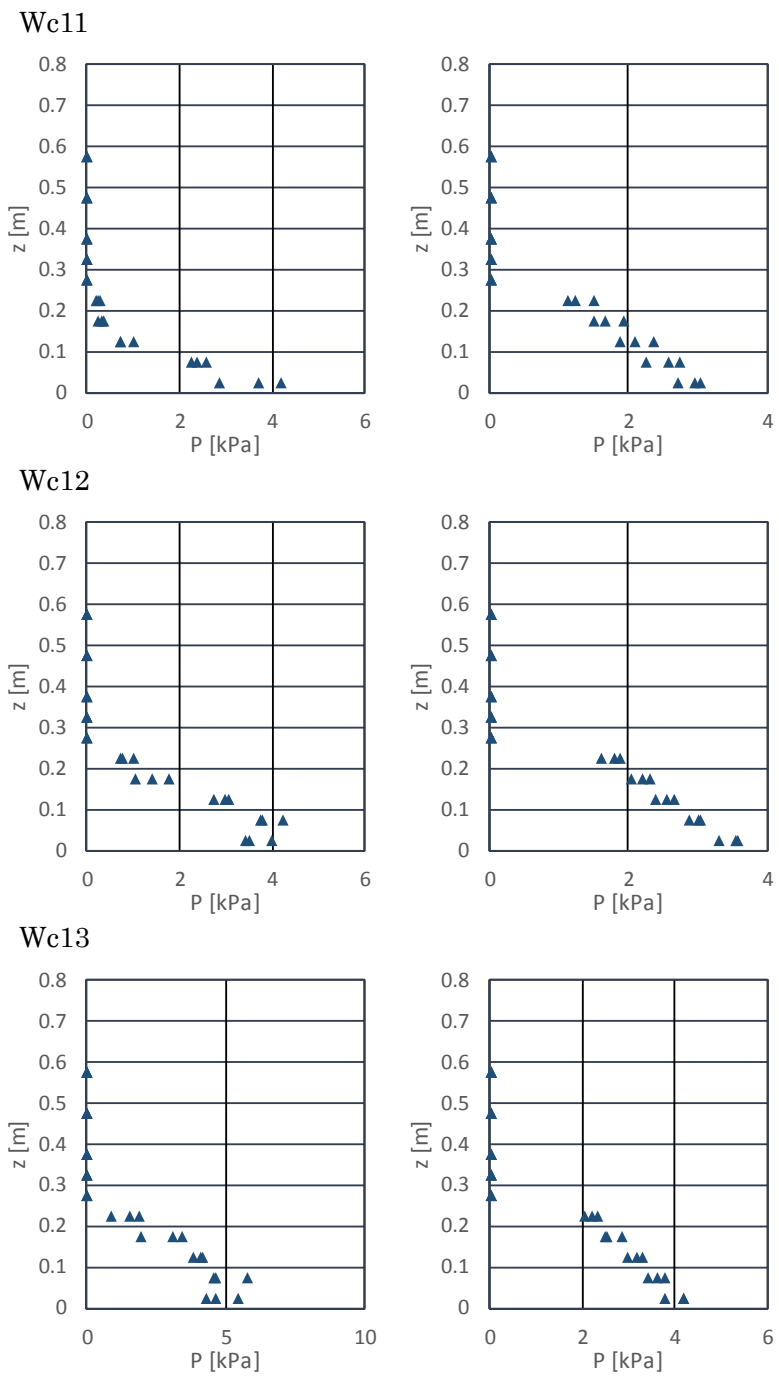
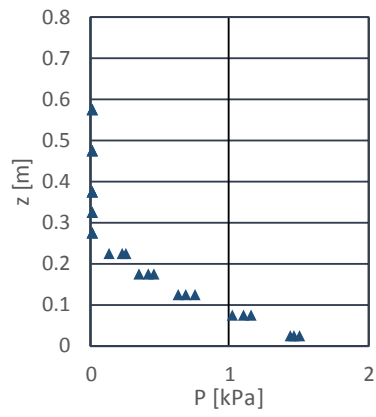
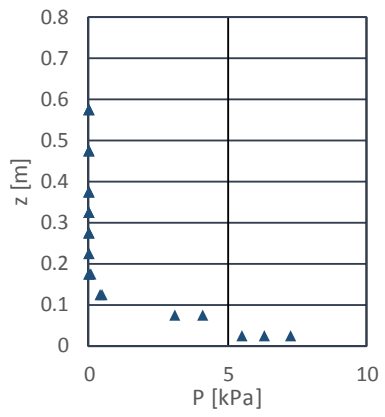


図- 5.2.8 圧力の鉛直分布(左:段波波圧, 右:持続波圧, 直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m)

Wc14



Wc15

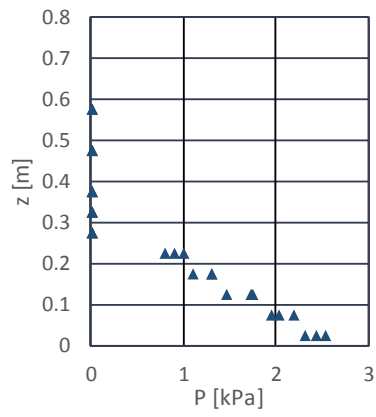
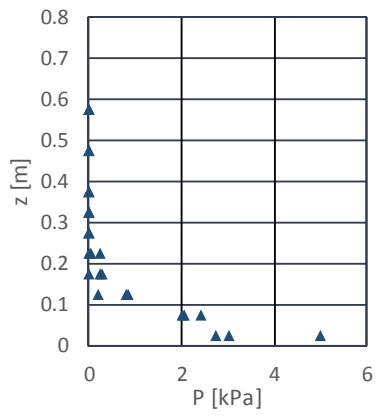


図- 5.2.8 圧力の鉛直分布(左:段波波圧,右:持続波圧,直立護岸,堤体 TypeB,設置位置 0.625m)

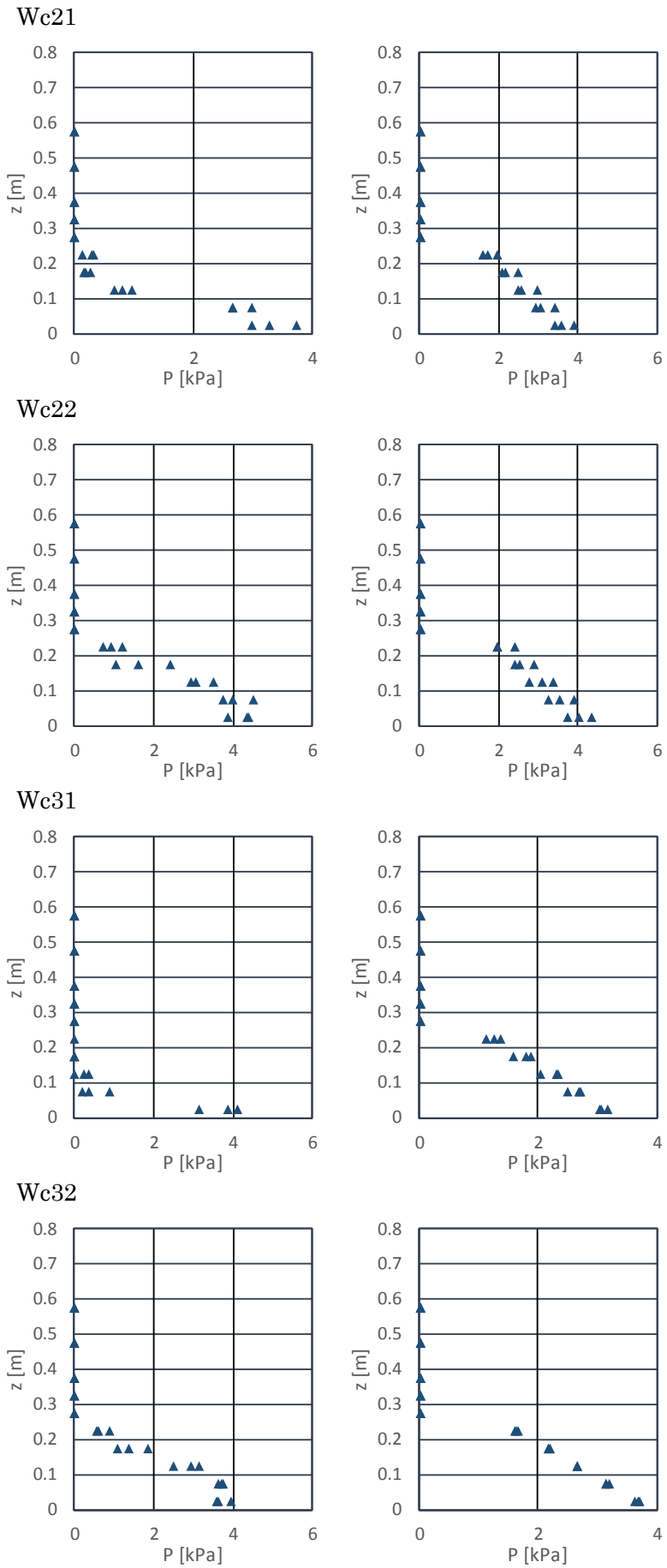


図- 5.2.8 圧力の鉛直分布(左:段波波圧,右:持続波圧,直立護岸,堤体 TypeB,設置位置 0.625m)

5.3. 越流量

越流量の計測結果を、図- 5.3.1～図- 5.3.4 に示す。ここで越流量は、堤体前面に設置した水位計の計測結果から求めた越流水深と、堤体模型上部に設置した流速計による流速の積として算出した。ただし、水位は堤体の上ではなく堤体模型の前面から 10mm 程度前方で計測しており、また越流時の流速は鉛直方向に一律ではないと考えられるため、ここで算出した流量は概略値となる。

堰上の堤体を越流する越流量 q は、流量係数を C を用いて、

$$q = C(\eta - h_d)^{3/2}$$

と表される。そこで図中には、 $(\eta - h_d)^{3/2}$ の時系列を同時に示し、 $(\eta - h_d)^{3/2}$ と q の関係図を下段に示した。なお、 $(\eta - h_d)^{3/2}$ と q の関係図では、時間的に反時計回りに関係が変化している。また流量係数 C の値は、一般には実験に基づいて定式化されたものがあるが、7.2.3 に後述する越流時の波力評価では、 $C = \sqrt{g}$ と仮定している。 $(\eta - h_d)^{3/2}$ と q の関係図には、この傾き \sqrt{g} の関係を破線で示した。

図- 5.3.1～図- 5.3.4 の時系列によると、越流の開始初期の段階では、 $(\eta - h_d)^{3/2}$ の値が q よりも先に大きくなるが、越流が継続するにしたがって、途中から q と $(\eta - h_d)^{3/2}$ が同様の時間変動を示すようになる。下段に示す $(\eta - h_d)^{3/2}$ と q との関係においても、越流初期の段階では $(\eta - h_d)^{3/2}$ が大きな値を示すが、最大越流量の発生時付近を境に、以降は両者の関係が \sqrt{g} の傾きに近い比例関係を呈することが分かる。津波到達直後は、鉛直方向に水塊が打ち上がるが越流はほとんど生じていない状況であり、このような場合、 $(\eta - h_d)^{3/2}$ は大きくなるが、 q は大きくならない。一方、越流量が大きくなると、 $(\eta - h_d)^{3/2}$ と q の関係は傾き \sqrt{g} の比例関係で近似できることがこの試験結果から確認できる。ただし、試験ケースによっては傾きは \sqrt{g} より小さいことから、 $C = \sqrt{g}$ は越流量を大きく評価する場合があると言える。

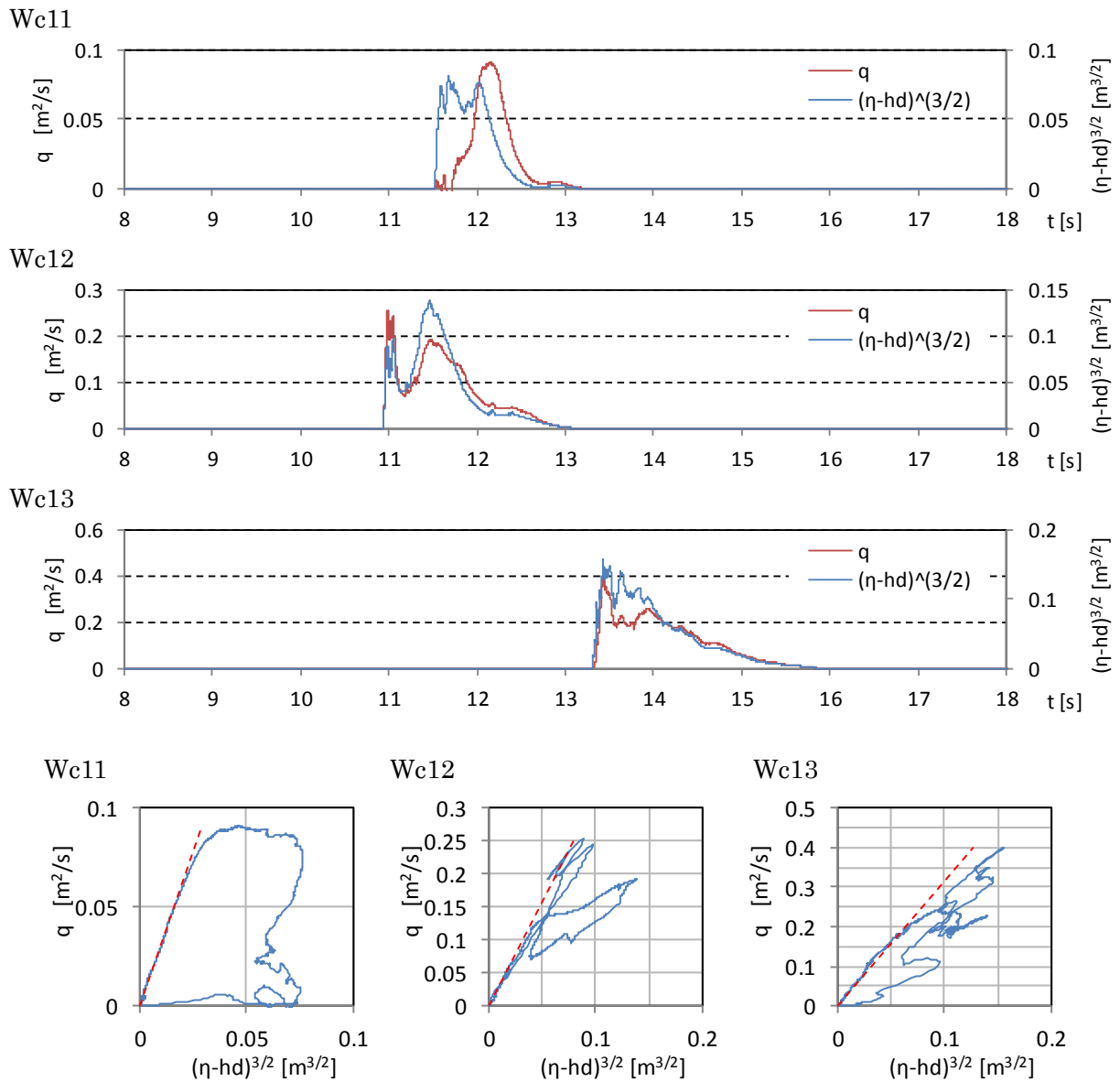


図- 5.3.1 越流量の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0m)

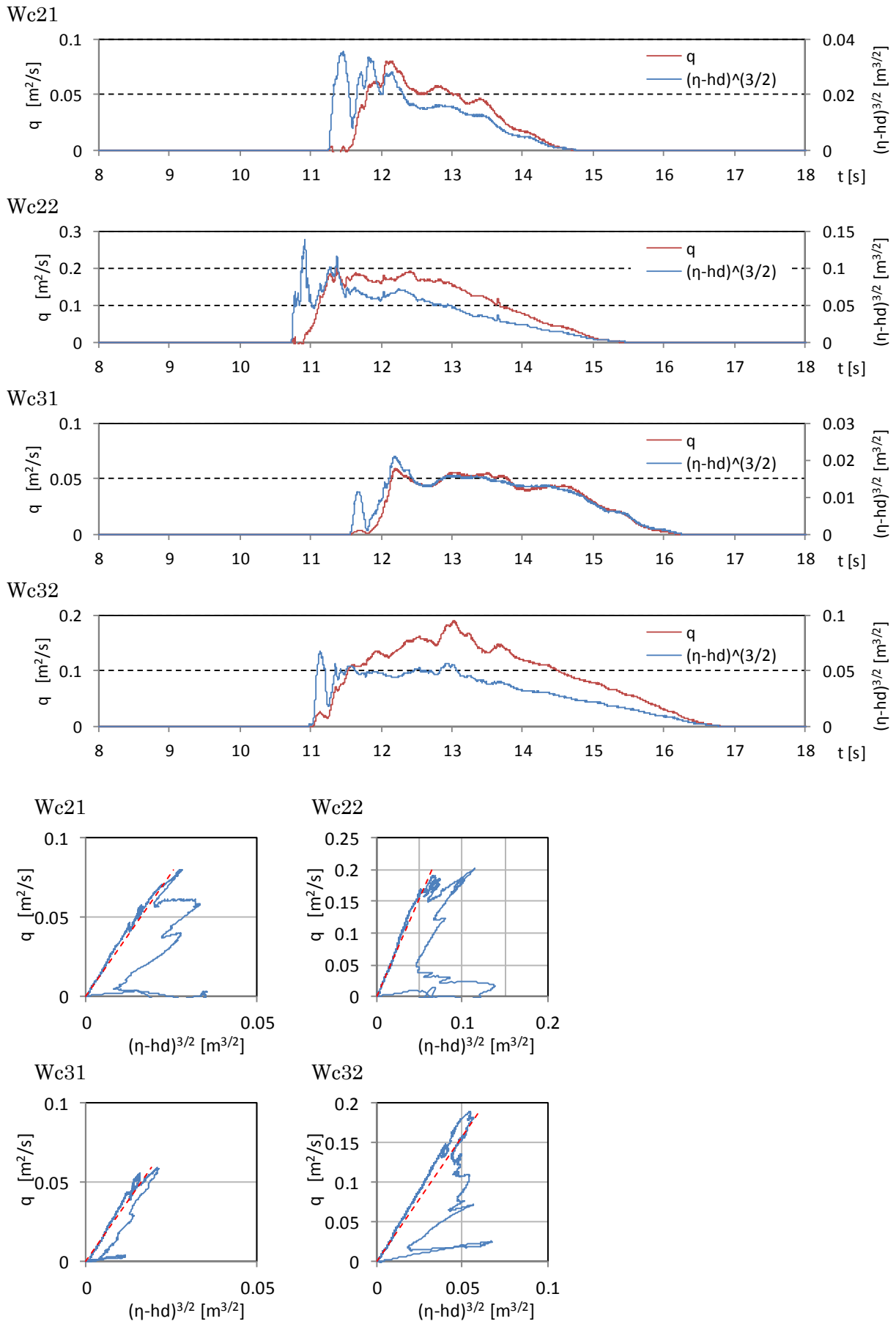


図- 5.3.1 越流量の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0m)

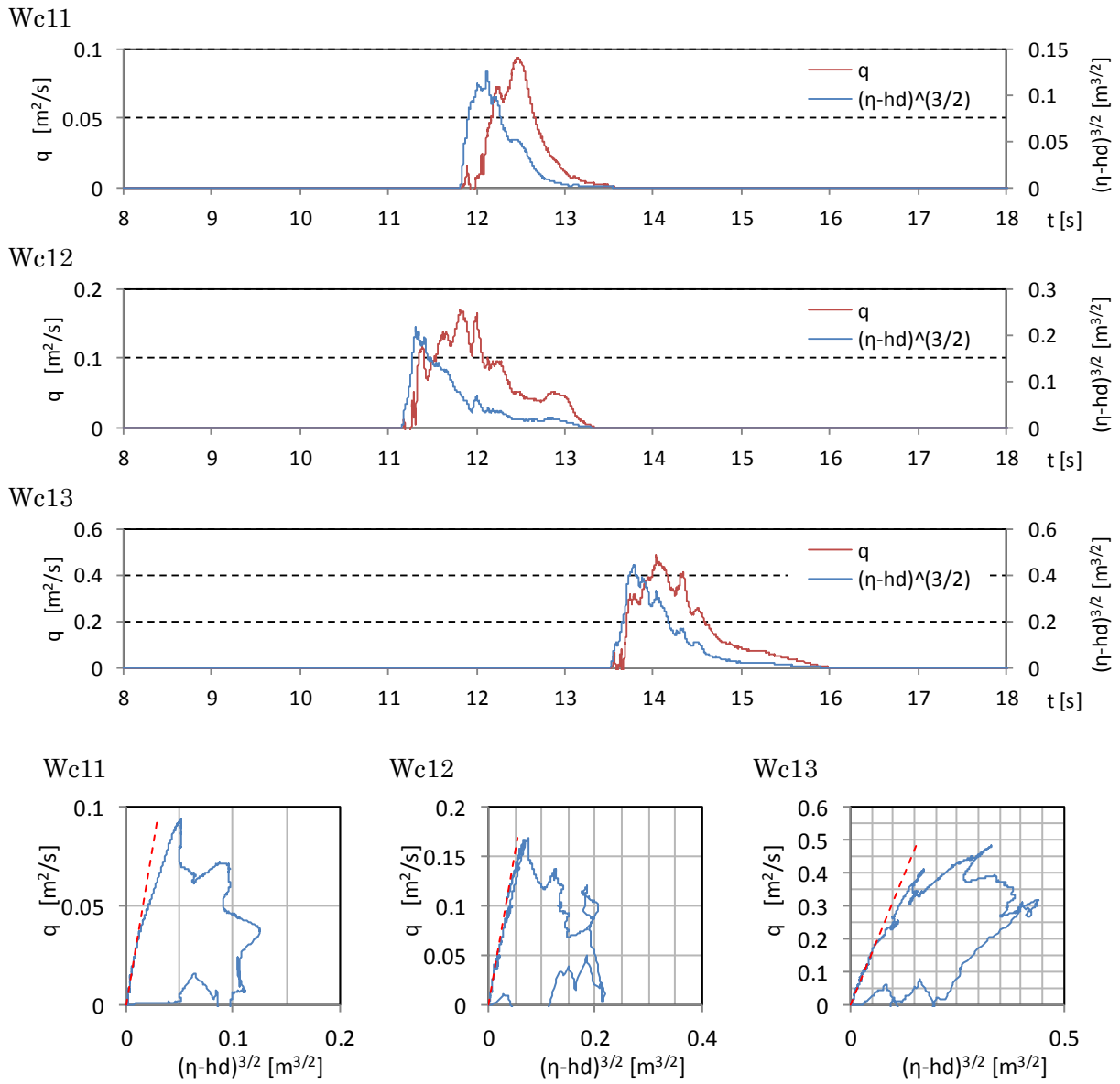


図- 5.3.2 越流量の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m)

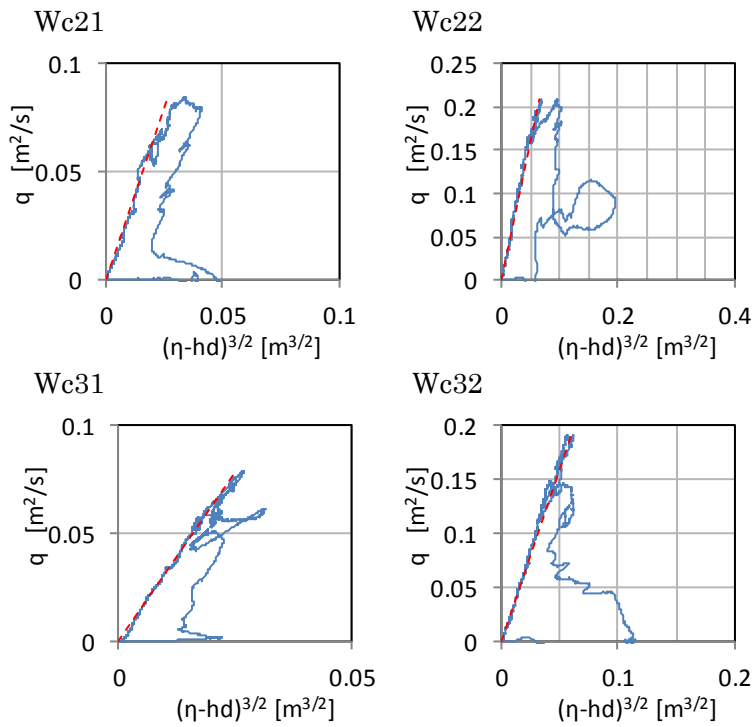
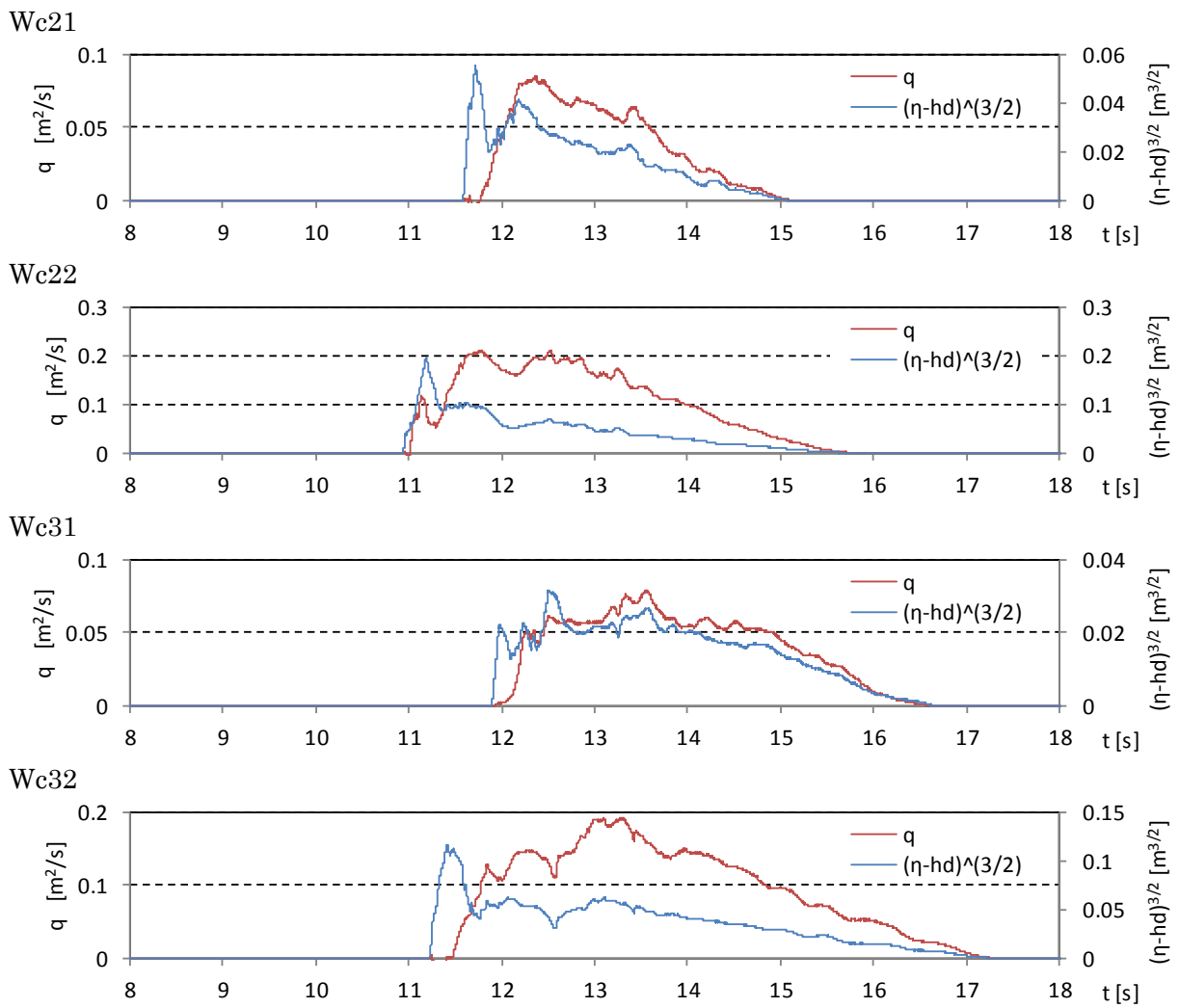


図-5.3.2 越流量の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m)

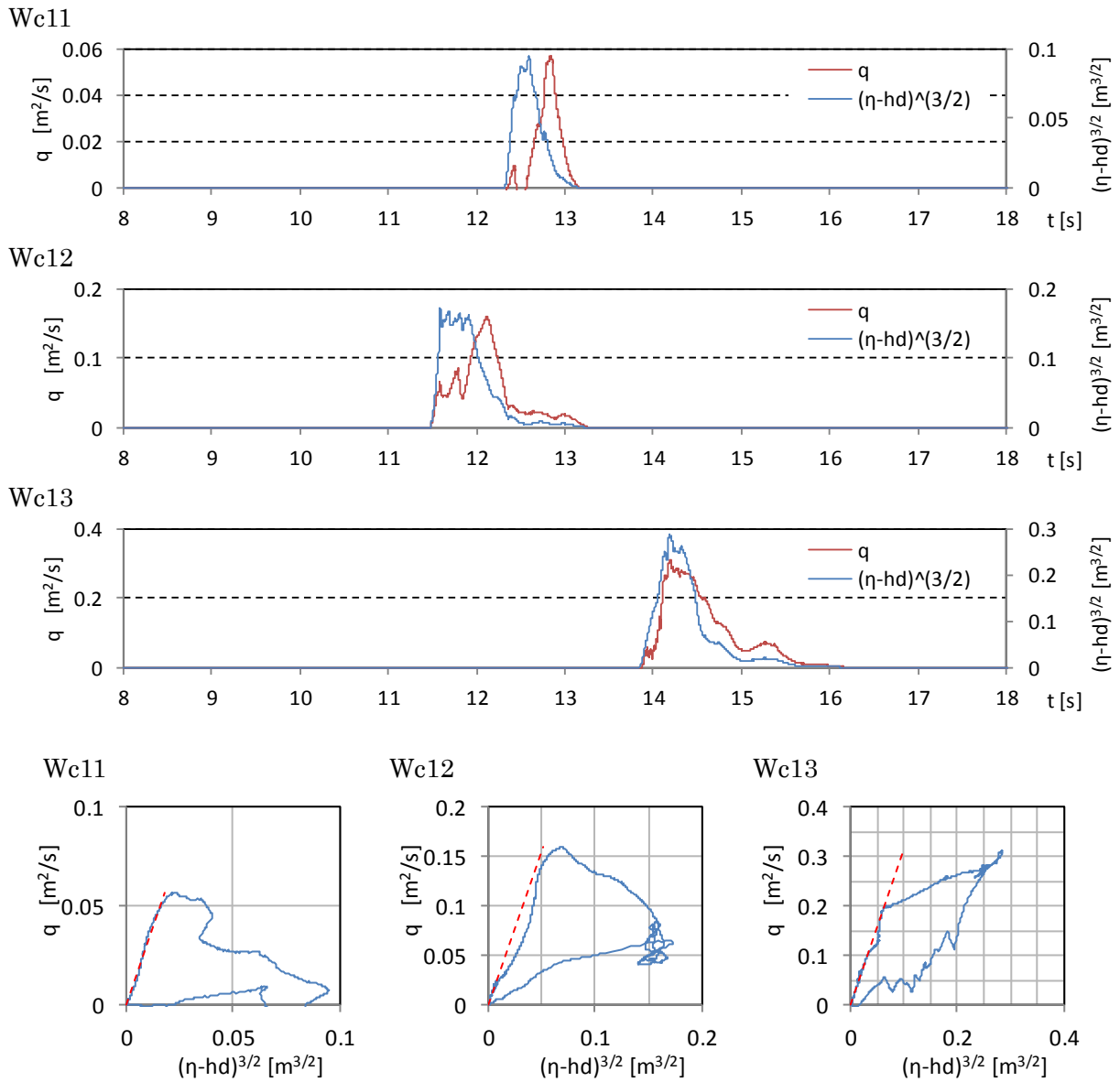


図- 5.3.3 越流量の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0m)

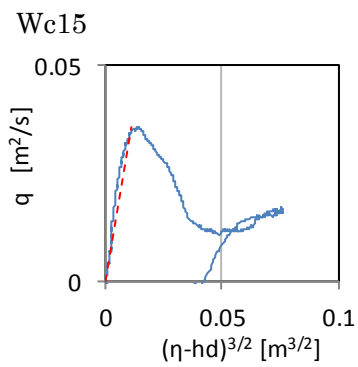
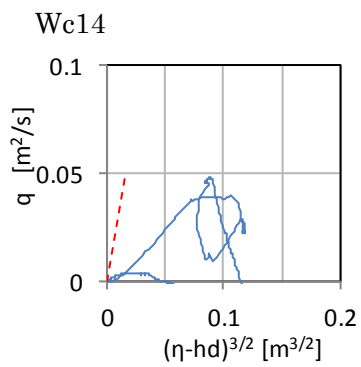
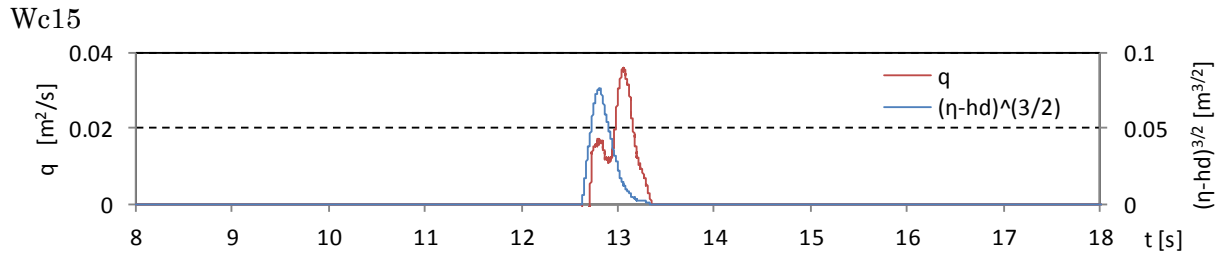
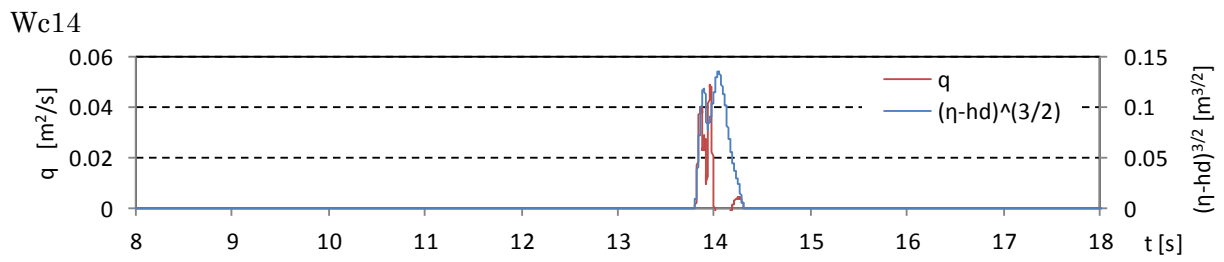


図- 5.3.3 越流量の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0m)

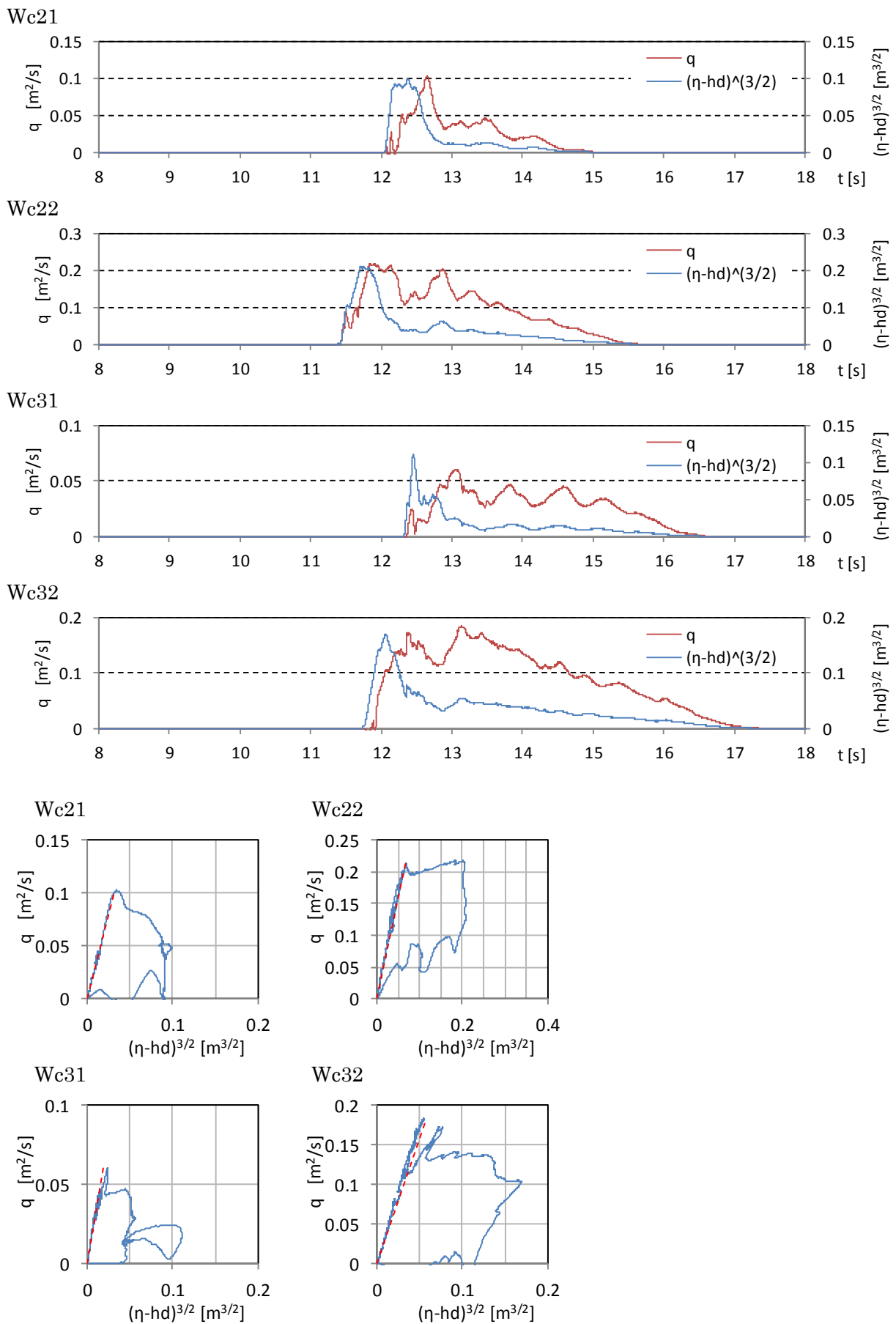


図- 5.3.3 越流量の計測結果（直立護岸，堤体 TypeB，設置位置 0m）

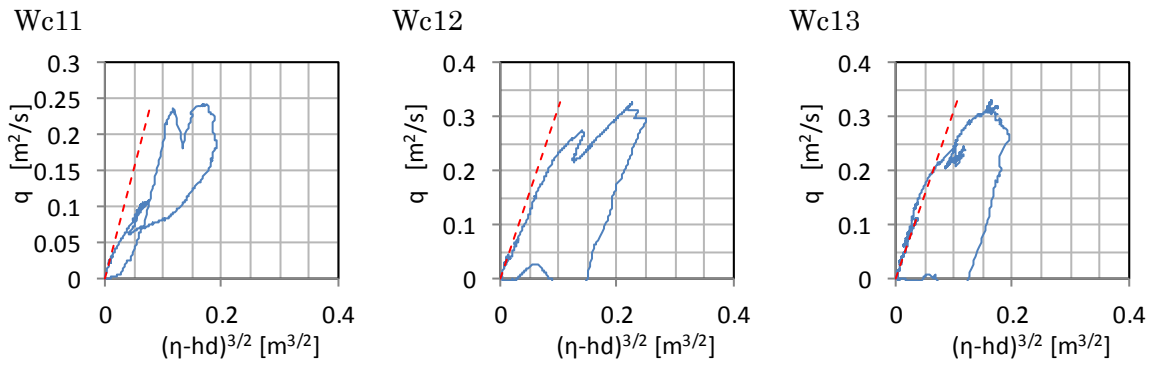
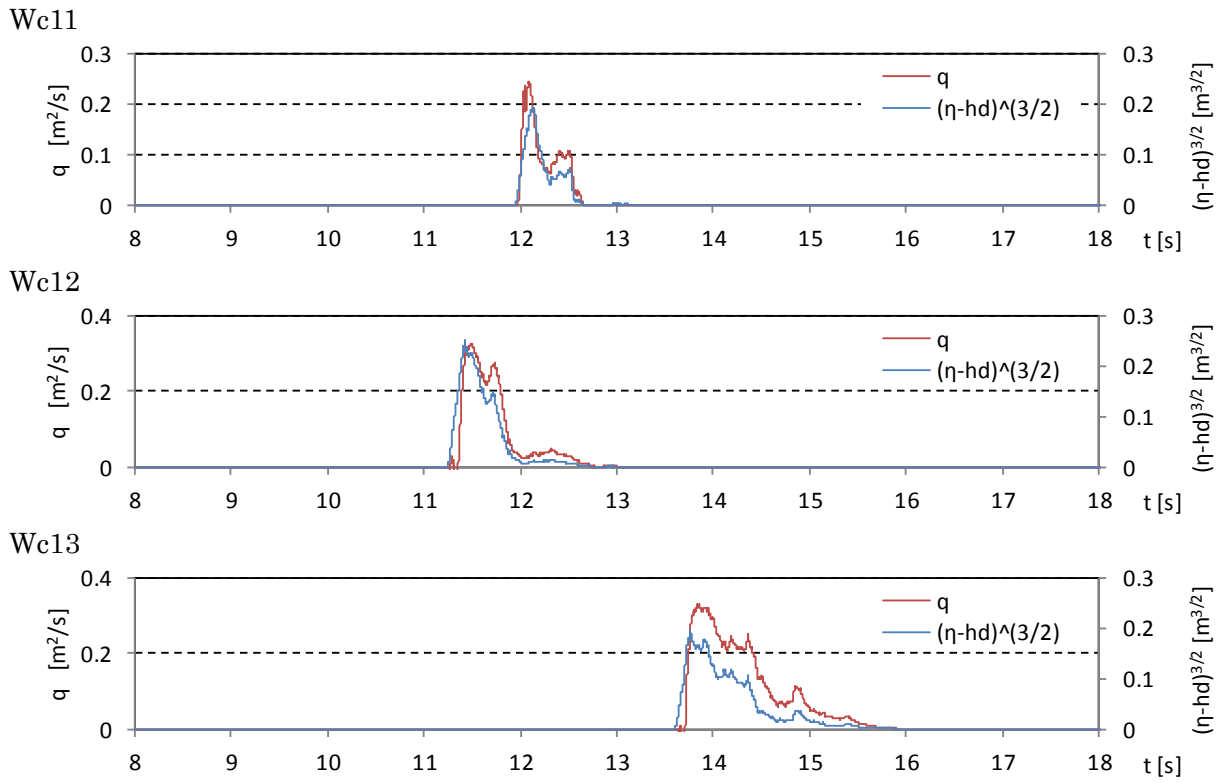


図- 5.3.4 越流量の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m)

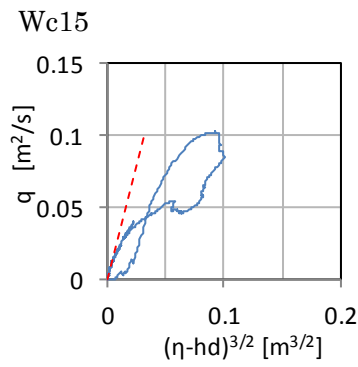
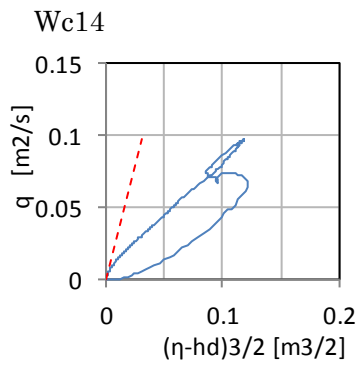
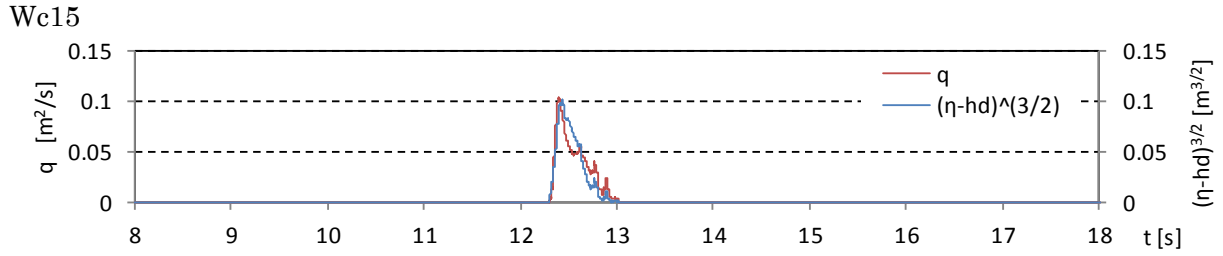
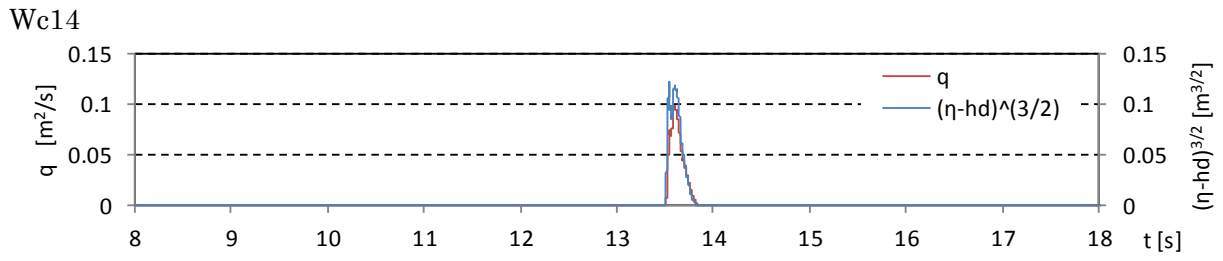


図- 5.3.4 越流量の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m)

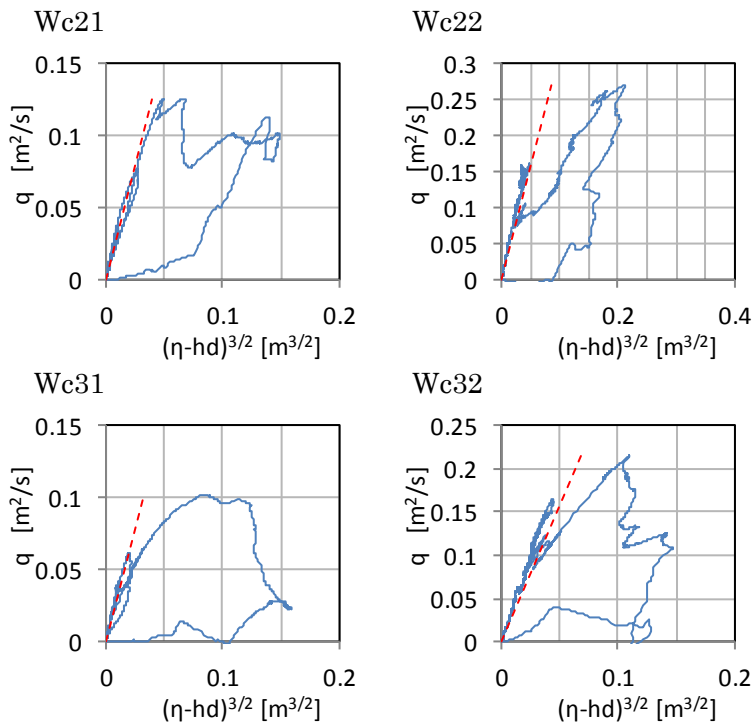
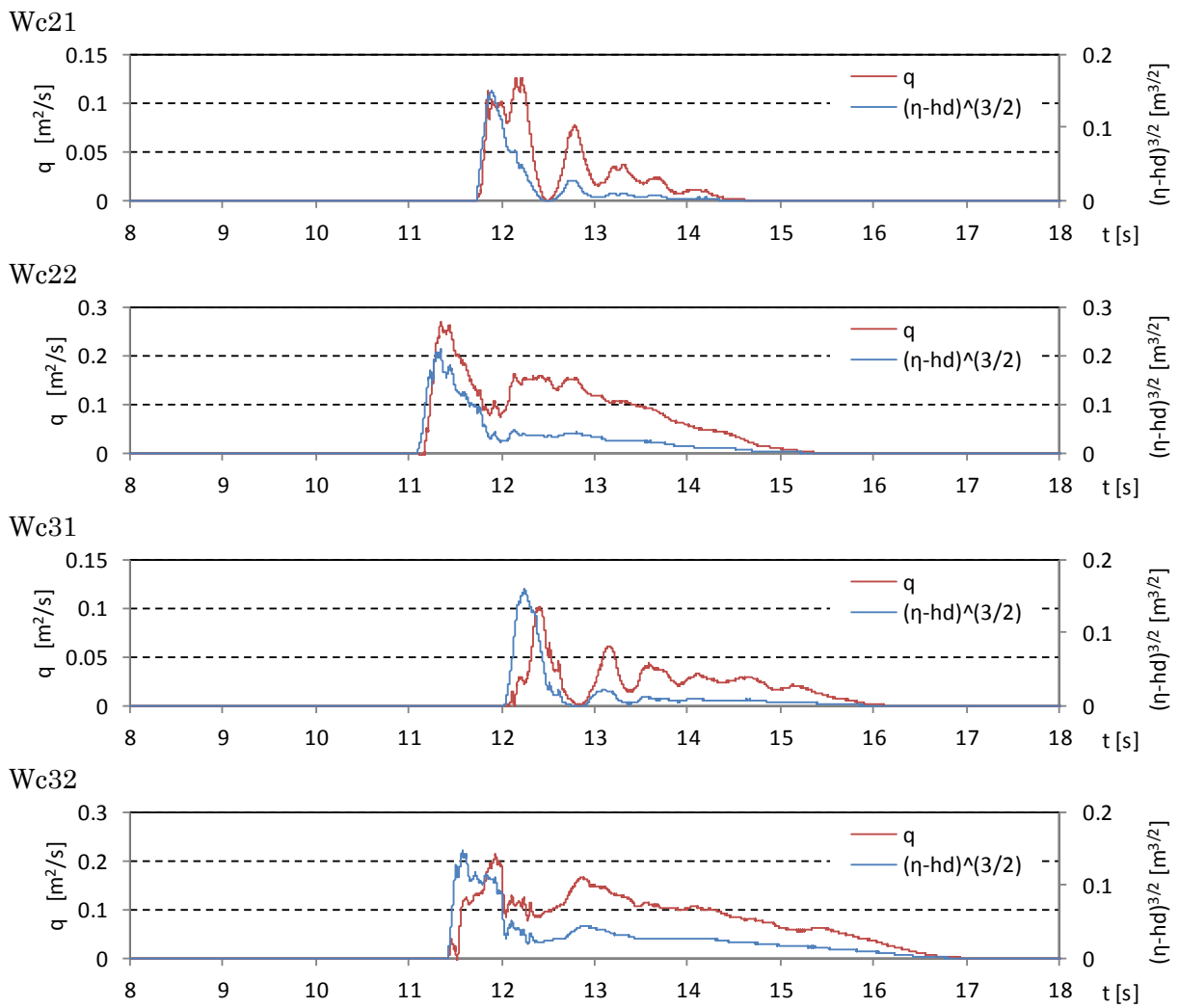


図-5.3.4 越流量の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m)

6. 波力/波圧試験 (TypeC : 越流ひずみ模型)

6.1. 模型の振動特性

試験に先立ち、試験模型に水平荷重を加えた場合の静的変化について確認した。試験は、堤体模型の上端部に水平方向に荷重を作用させて実施した。結果を図- 6.1.1 に示す。図中に示した実線は、片持ち梁を仮定した静的ひずみの理論値を示している。これによると、静的なひずみの発生特性は、ほぼ理論値に一致していることが分かる。

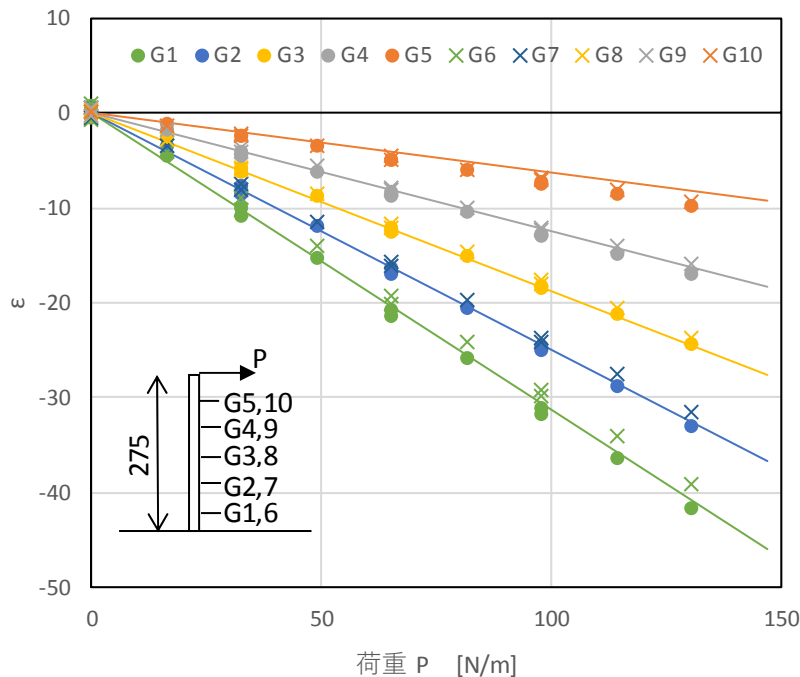


図- 6.1.1 荷重とひずみの関係

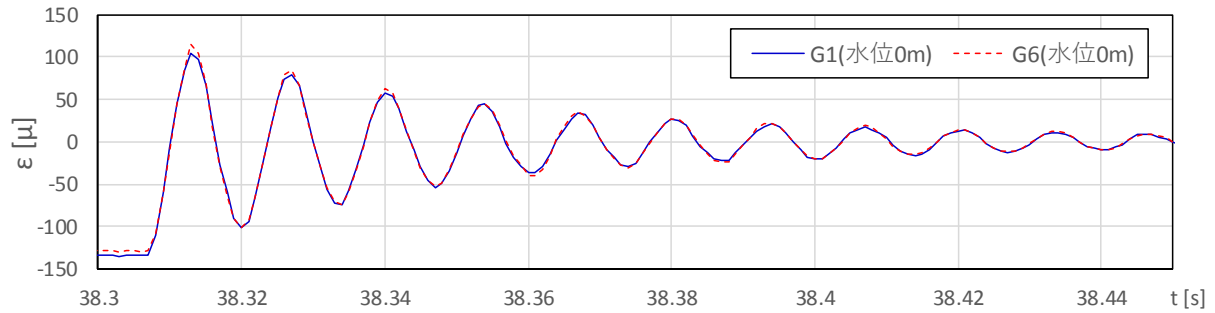
また、固有振動数および減衰率を確認するため、模型の自由振動試験を実施した結果を、図- 6.1.2 に示す。試験は、堤体模型の上端部に水平方向に荷重を作用させ、作用させた力を瞬間的に開放して、ひずみを時系列で計測して実施した。また、前面に水のない気中における計測と、前面に水深 0.1m, 0.2m の水が溜まった状態の計測を実施した。

片持ち梁の 1 次モードの固有周波数 ω は、次式により算出される。

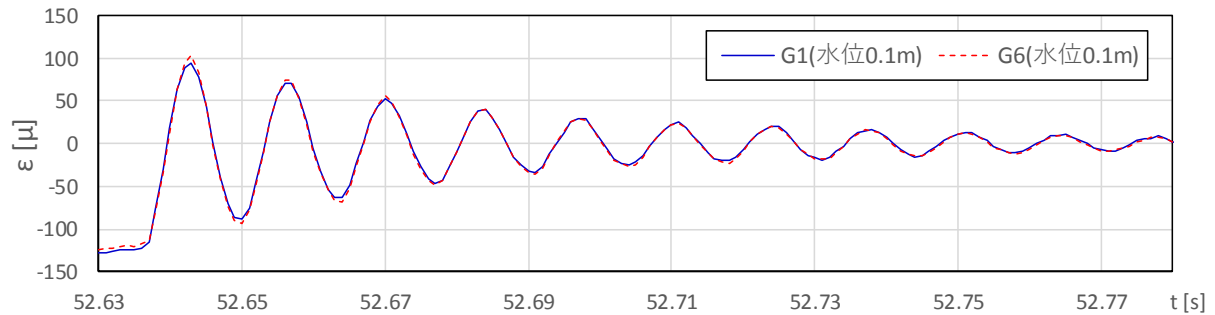
$$\omega_1 = \frac{3.516}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}$$

これによると、材料特性から求めた模型の固有周波数は 568 rad/s となる。一方、図- 6.1.2 の気中の測定結果から固有周波数を求めると 471 rad/s となり、これは、片持ち梁の式より求めた固有周波数よりも小さい。このことから、模型の剛性が理論値よりも小さいことが推察される。堤体模型の下端は、地形架台のフレームにボルトによってなるべく剛に設置しているが、完全に回転を許さない固定にはなっていないことが主な要因と考えられる。

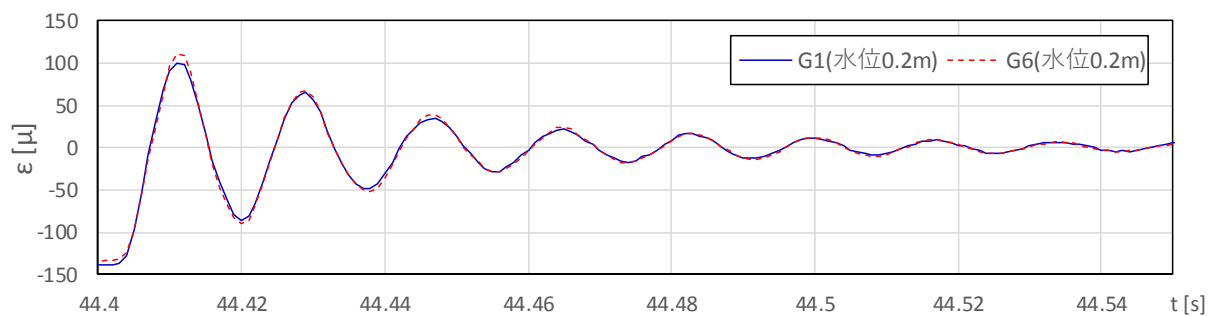
前面に水がある場合とない場合を比較すると、水位 0.1m の場合は、気中の場合と大きな違いはないが、水位 0.2m の場合には固有周波数が小さくなり、振動の減衰率も大きくなっている。これは、前面に水があることによる付加質量の影響により、見掛けの質量が大きくなるためと考えられる。堤体の変動は底面付近で小さく、上に行くほど大きいため、水位 0.1m では付加質量の影響が小さいが、水位 0.2m になるとその影響が大きくなるのが分かる。



(a) 気中 (水位 0m)



(b) 水中 (水位 0.1m)



(c) 水中 (水位 0.2m)

図- 6.1.2 自由振動実験におけるひずみの減衰

ここで、本試験に用いた堤体模型と、実際の防潮堤との特性の違いについて検討する。水理試験結果がフルード則に従うとすると、想定実機の高さは22m (0.275m×80) となる。また、固有周波数は、前述の自由振動試験の結果によると471 rad/s であり、フルード則にしたがって実機に換算すると52.7 rad/s となる。実機は、コンクリート製の台形断面となるのが一般的と考えられるが、ここでは理論式の適用できる長方形断面と三角形断面の場合の固有周期を検討する。長方形断面の場合、固有周波数は前述の片持ち梁の式により求められる。一方、実機の断面は堤頂側の幅が底面の幅よりも小さくなると考えられる。参考に、三角形断面の場合の固有周期は次式によって求められる。

$$\omega_1 = \frac{5.319h}{l^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho}}$$

コンクリートのヤング係数を30kN/mm²、密度を2,300kg/m³ とすると、長方形断面を仮定した場合、固有周波数が自由振動試験の結果を実機換算した52.7 rad/s となるには、堤体の厚さは6.95m 必要である。また、三角形断面を仮定した場合は、底面厚さ4.60m となる。実際は、鉄筋の影響等も含まれることを考慮すると、本試験は、実機として厚さ5~6m 程度のコンクリート製堤体を想定した試験となっていることが分かる。実際に適用される構造物を考えた場合、堤体の厚さはこれよりも薄いと考えられるため、その場合は固有周波数は小さくなる。

堤体の動的変動特性は、波力の時間変動と堤体の固有振動数が同調する場合に大きくなると考えられる。また波力は、振動波形ではなく単一のピーク波形であるため、複数の周波数成分の重ね合わせになっていると考えられる。試験結果によれば、波圧の振動数特性は構造物の固有振動数特性よりも十分小さい（周期が長い）と考えられるため、段波波圧と持続波圧による応答特性の定性的な関係は、水理試験によって評価できると考えられるが、堤体模型の剛性を変化させた試験等、固有振動数の影響については、今後より詳細な検討が必要である。

表- 6.1.1 水理模型と同等の固有周波数となる堤体サイズ

	単位	想定実機	
		長方形断面	三角形断面
高さ h	m	22	22
ヤング係数 E	kN/mm ²	30	30
密度 ρ	kg/m ³	2,300	2,300
単位長さ質量 m	kg/m ²	15,992	10,571
厚さ d	m	6.95	4.60
固有周波数 ω ₁	/s	52.7	52.7

6.2. 水位と圧力およびひずみの時系列計測結果

越流時の波力/波圧試験の計測結果を，単純勾配タイプ地形について，図- 6.2.1～図- 6.2.2 に，直立護岸タイプ地形について，図- 6.2.3～図- 6.2.4 にそれぞれ示す．同図には，沖波の代表水位時系列と，堤体に設置した圧力計により計測した圧力の時系列計測結果，圧力計の計測結果を鉛直方向に積分することにより算出した波力，ひずみゲージで計測したひずみ及びレーザー変位計による堤体変位の計測結果を示した．各圧力計の設置高さは，P1 が底面から 0.025m，それ以降 0.05m ピッチで等間隔に鉛直上方向に設置している．ひずみゲージの設置高さは各圧力計と同じ高さになるよう設置した．レーザー変位計は模型陸上部底面から 0.2m の位置に設置した．各計測項目は 2 測線で計測しており，ここには平均した結果を示した．また計測は各ケース 15 回繰り返しており，ここには 1 回目の結果を示した．

圧力，波力ともに，計測結果は TypeB の結果とほぼ同じになっている．堤体がひずむ場合，緩衝効果により波圧が低下すると考えられるが，本試験の範囲では顕著な緩衝効果はないことが分かる．ひずみの程度が小さく，また波力は単一の波形であるために波圧最大時に対して遅れてひずみが発生することがその要因として考えられる．

ひずみ及び変位の計測結果では，それぞれの波形ケースにおいて段波波圧および持続波圧に応じた堤体の変位が生じている．ただし，堤体設置位置 0m のケースでは段波波圧が卓越した場合はそれに応じて変位も顕著に発生するが，堤体設置位置 0.625m のケースでは，段波波圧が卓越した場合でも，それに対応した変位は概ね生じない傾向にあった．

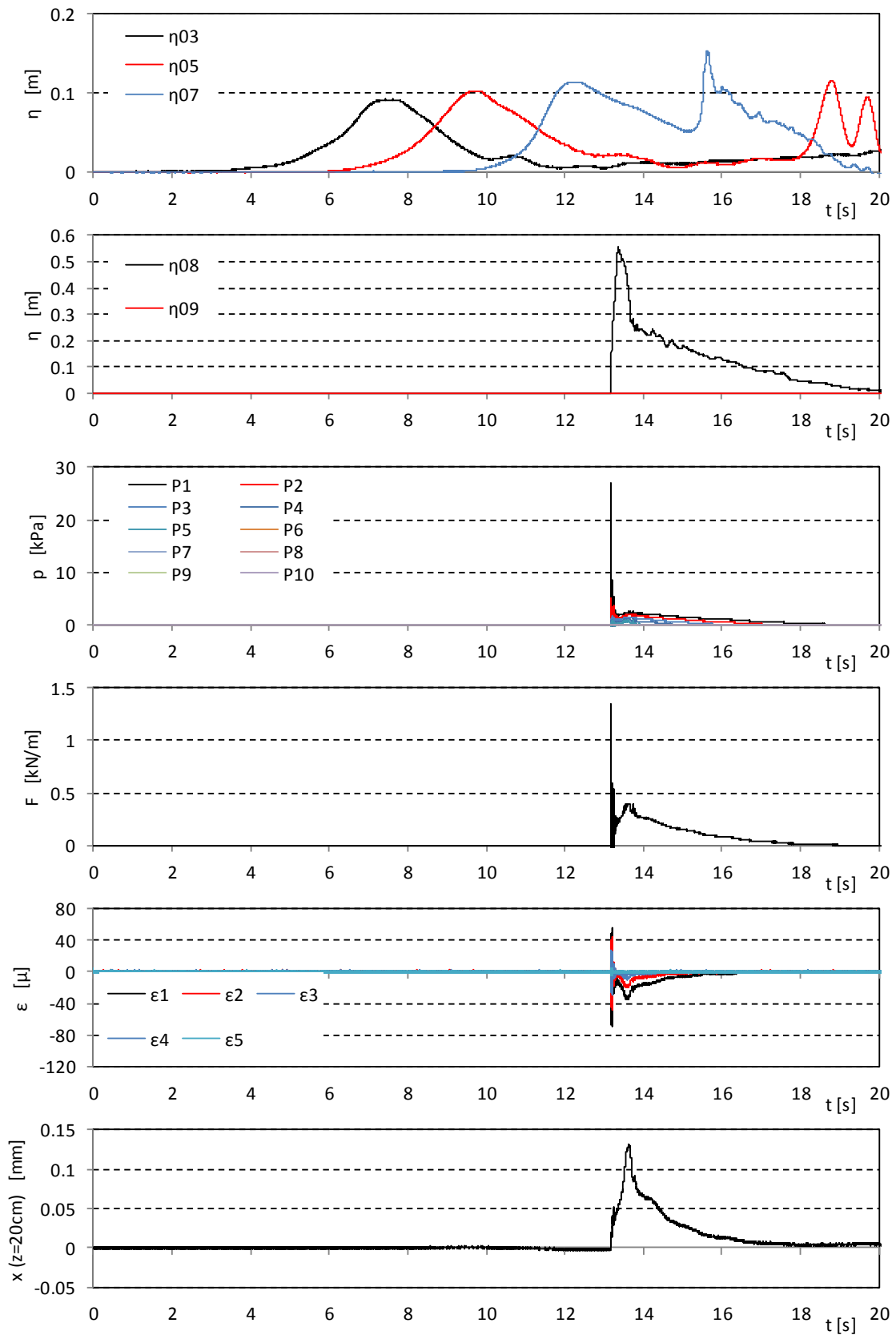


図- 6.2.1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, $Wc10$)

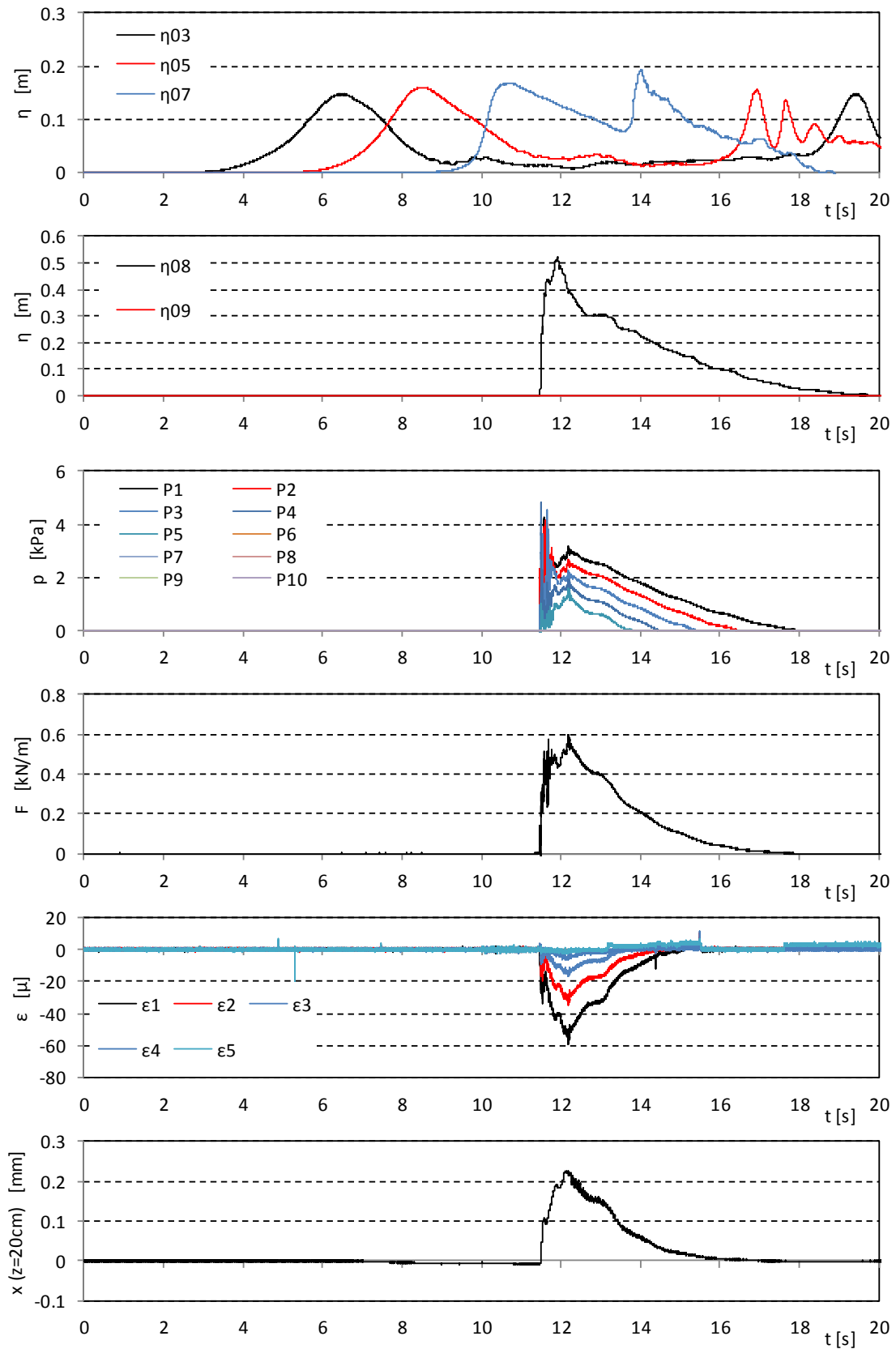


図- 6.2.1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, Wc11)

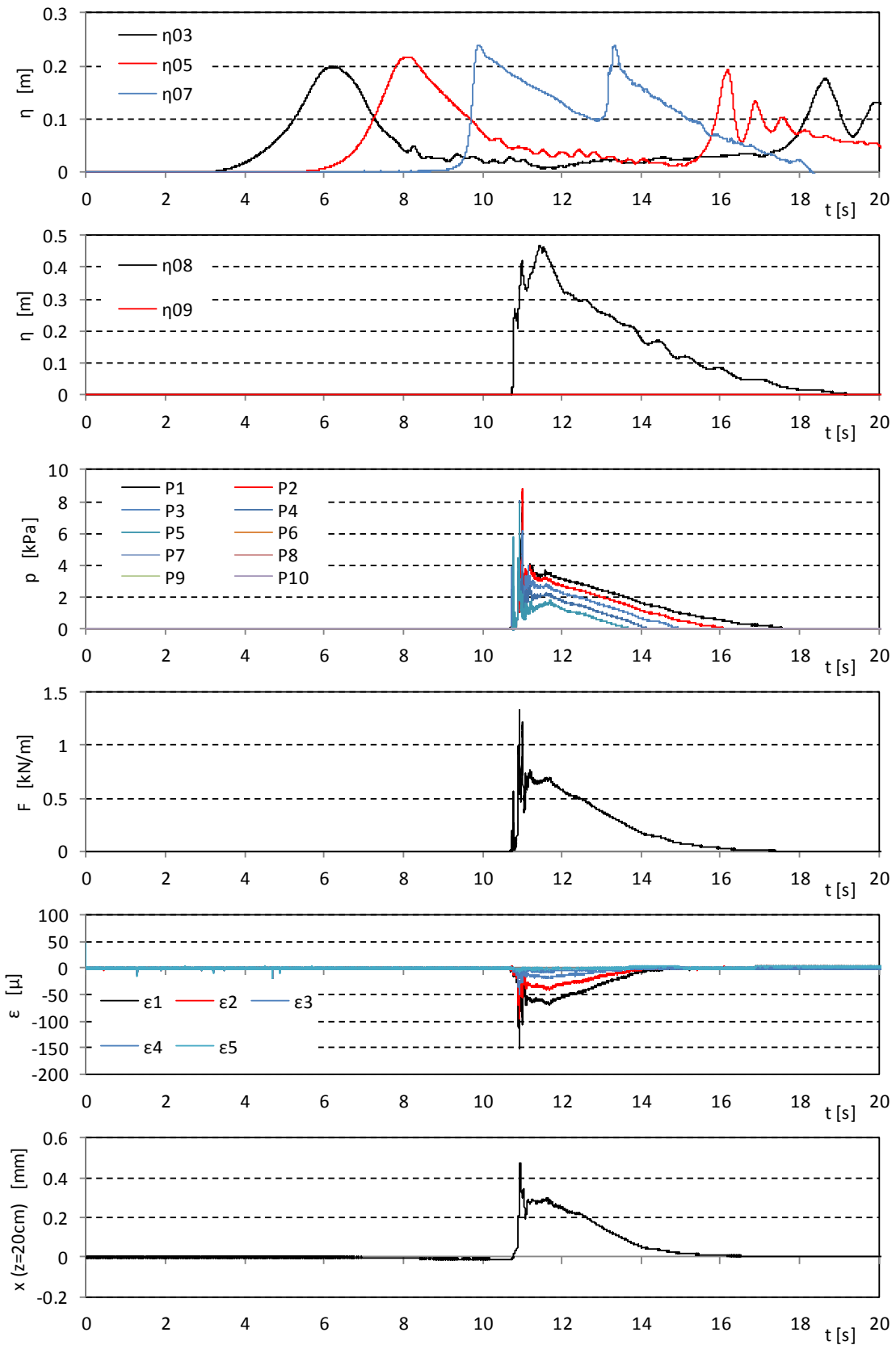


図- 6.2.1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, W_c12)

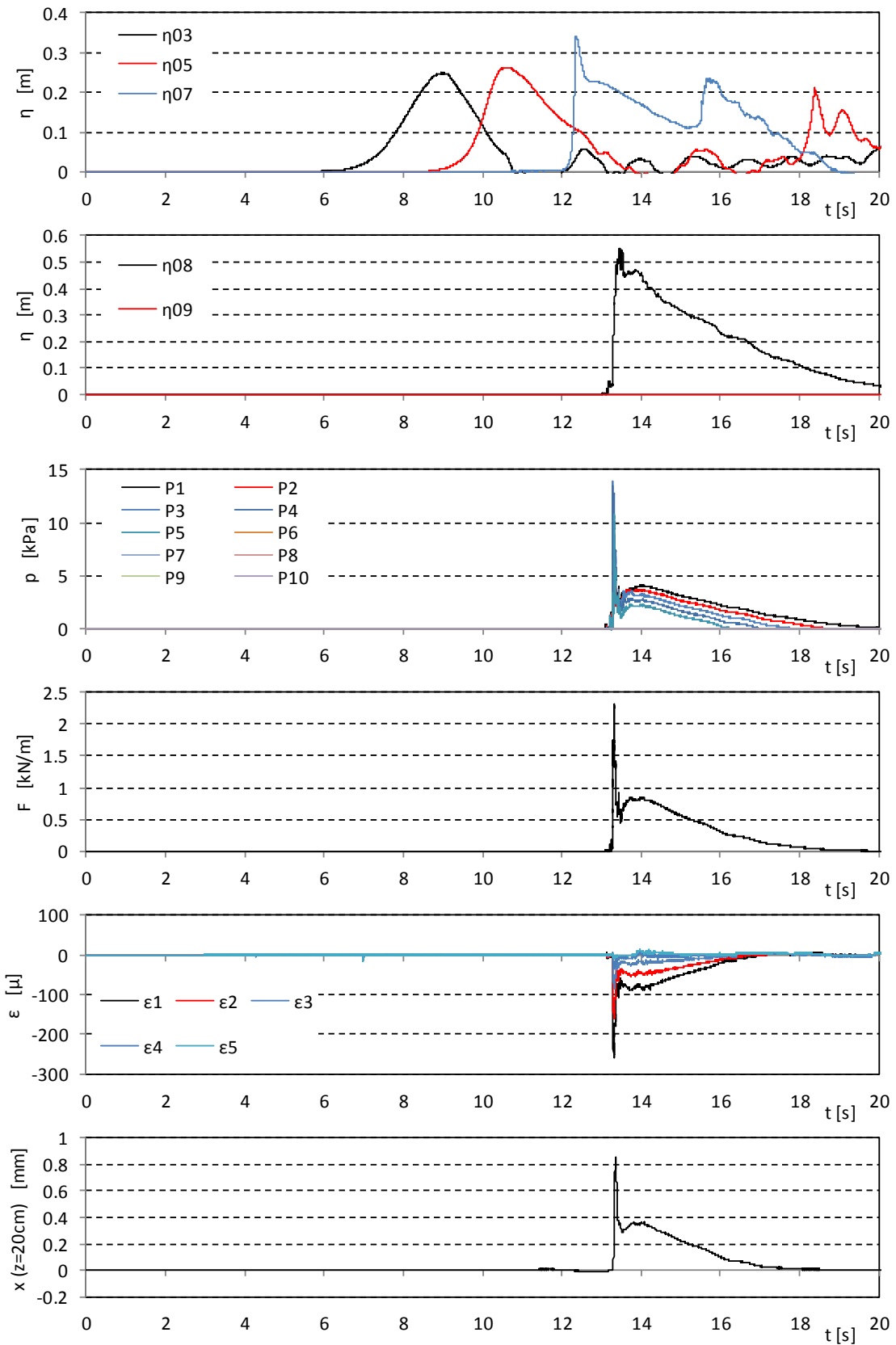


図- 6.2.1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, Wc13)

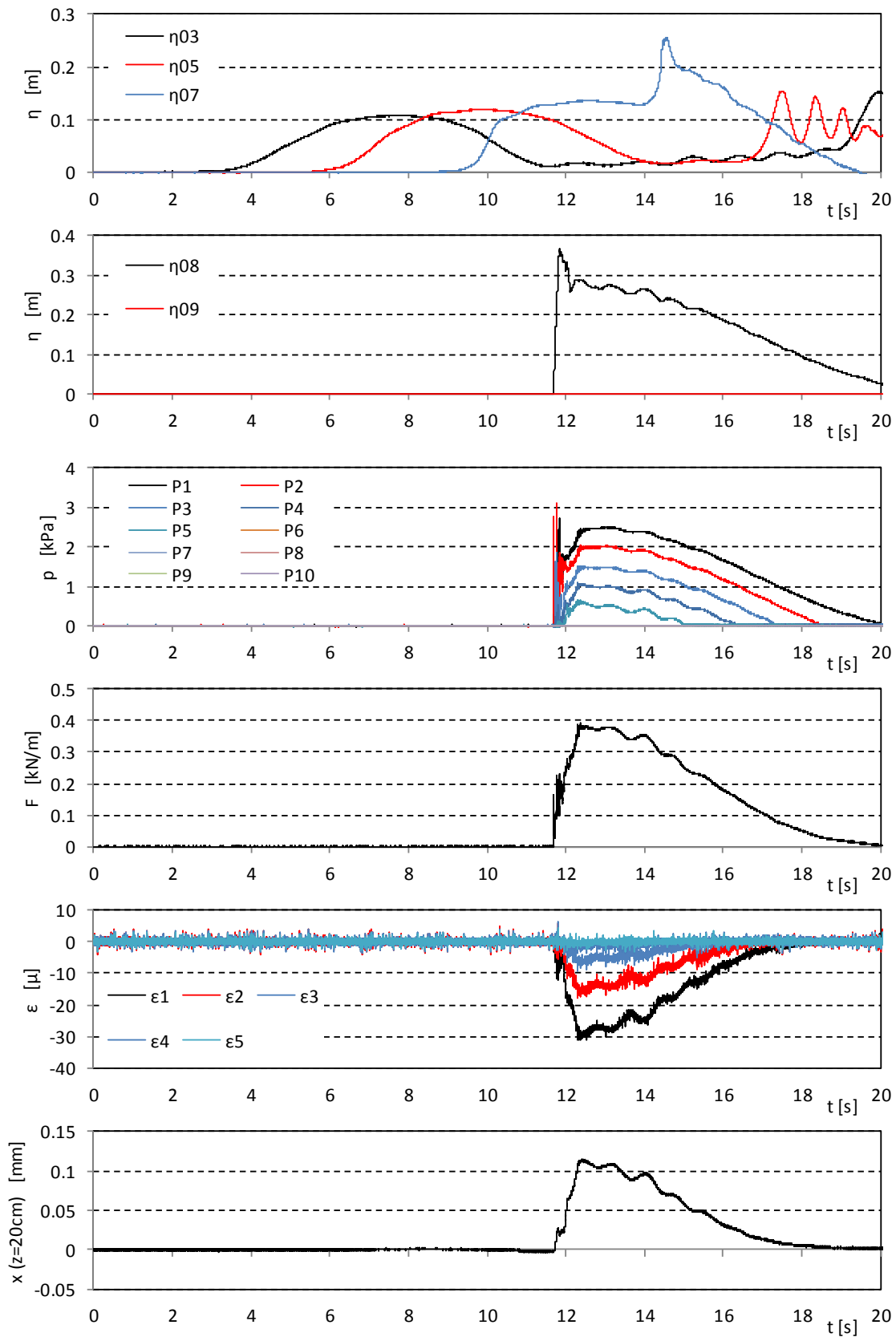


図- 6.2.1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, $Wc20$)

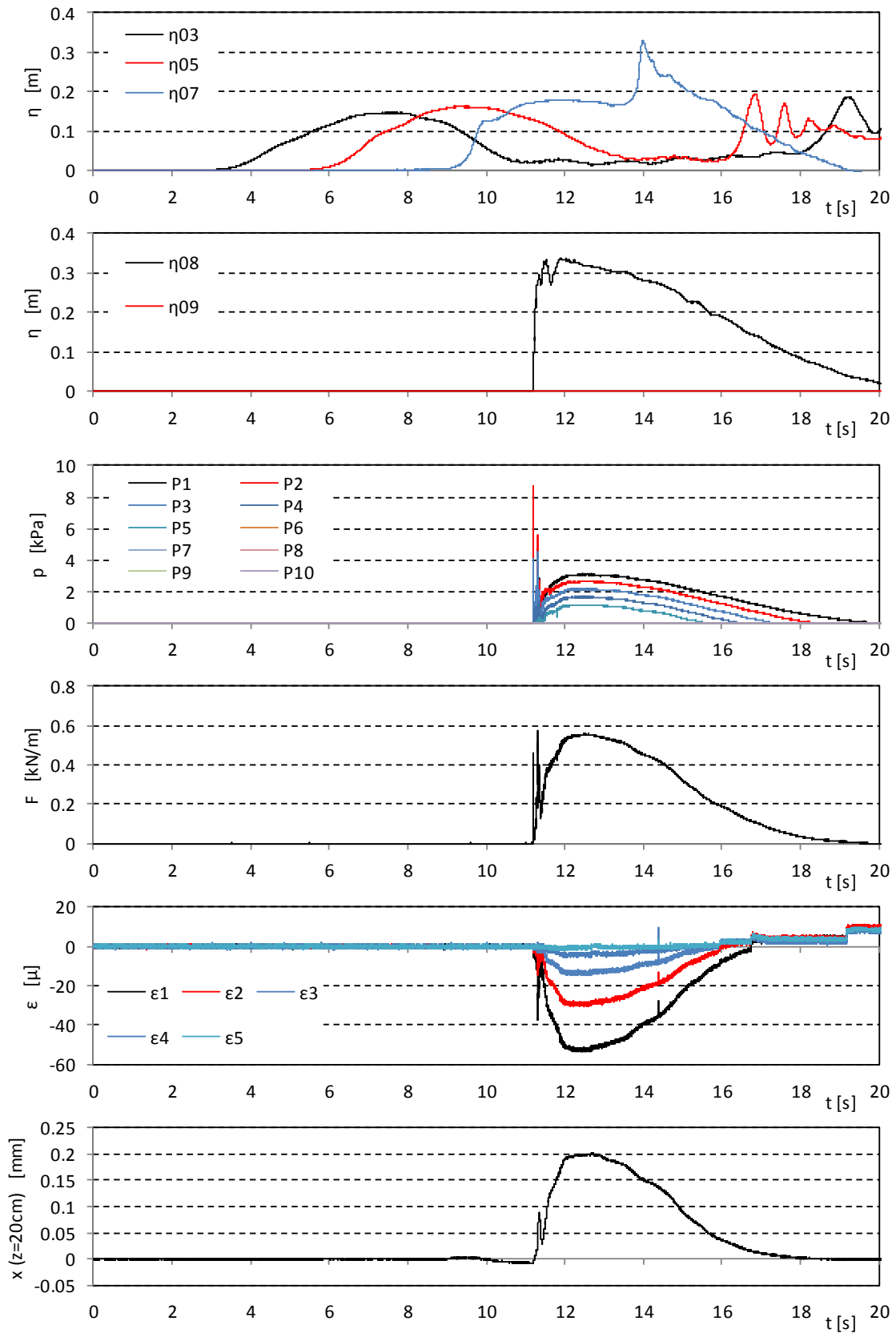


図- 6.2.1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, Wc21)

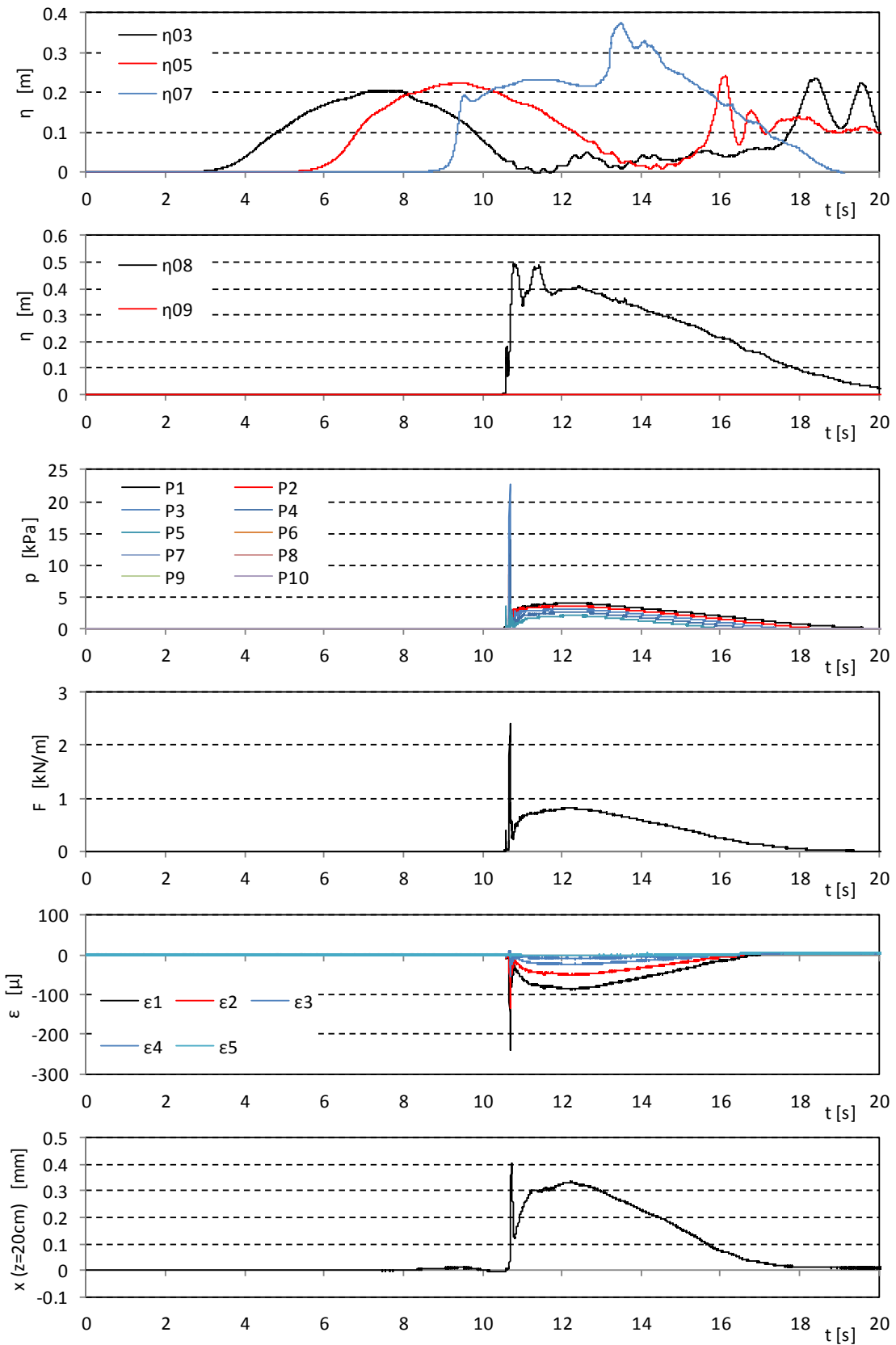


図- 6.2.1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, Wc22)

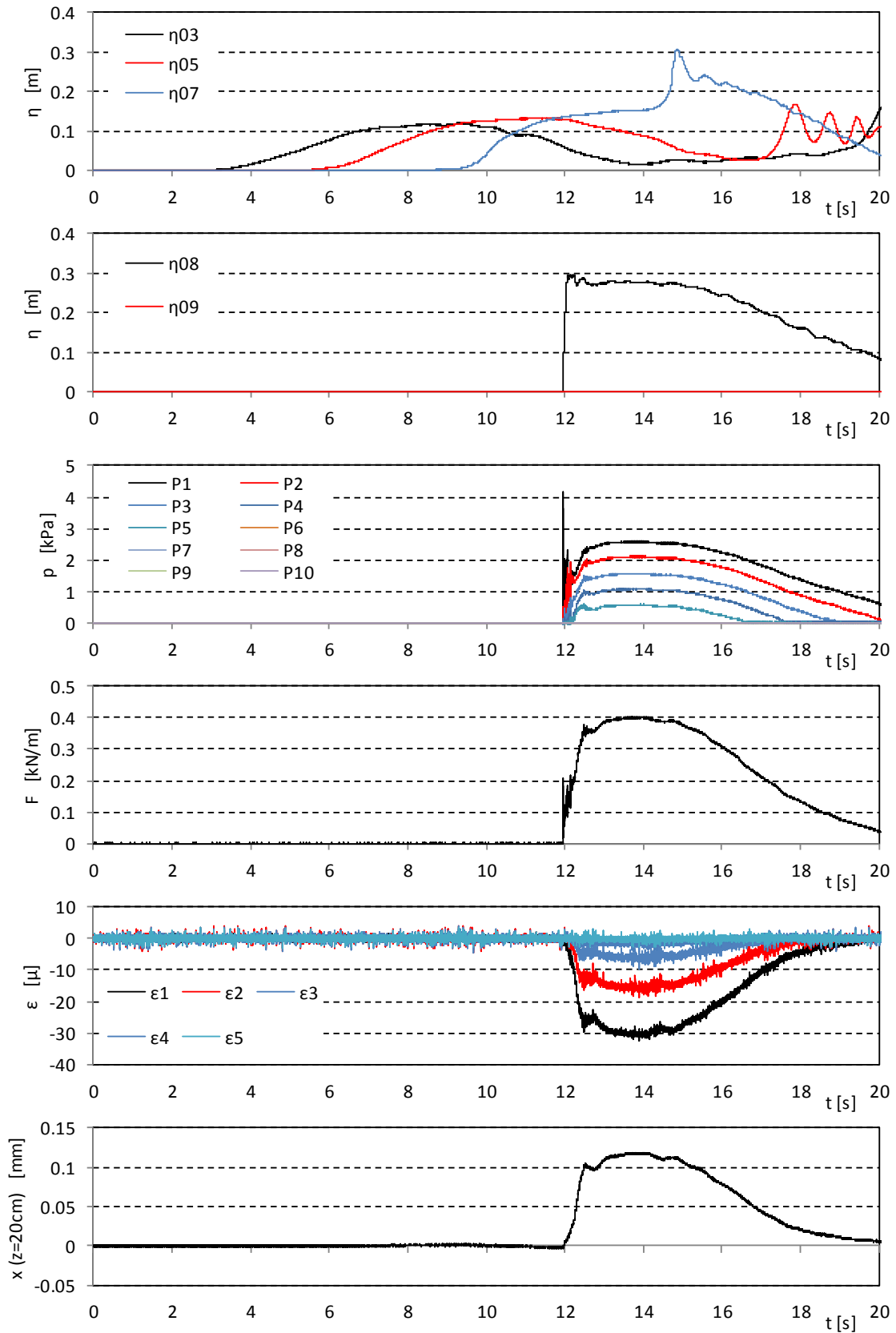


図- 6.2.1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, $Wc30$)

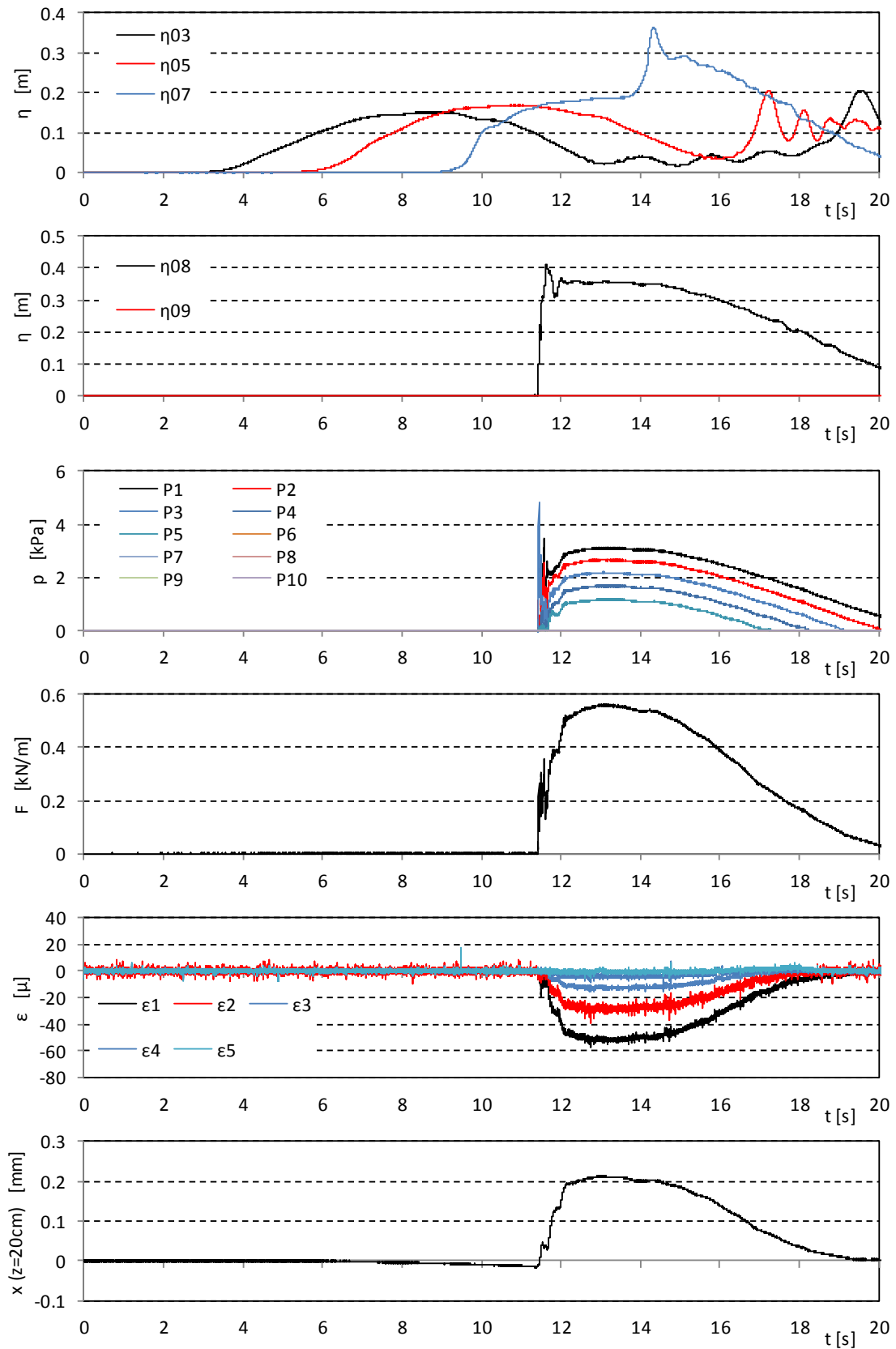


図- 6.2.1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, Wc31)

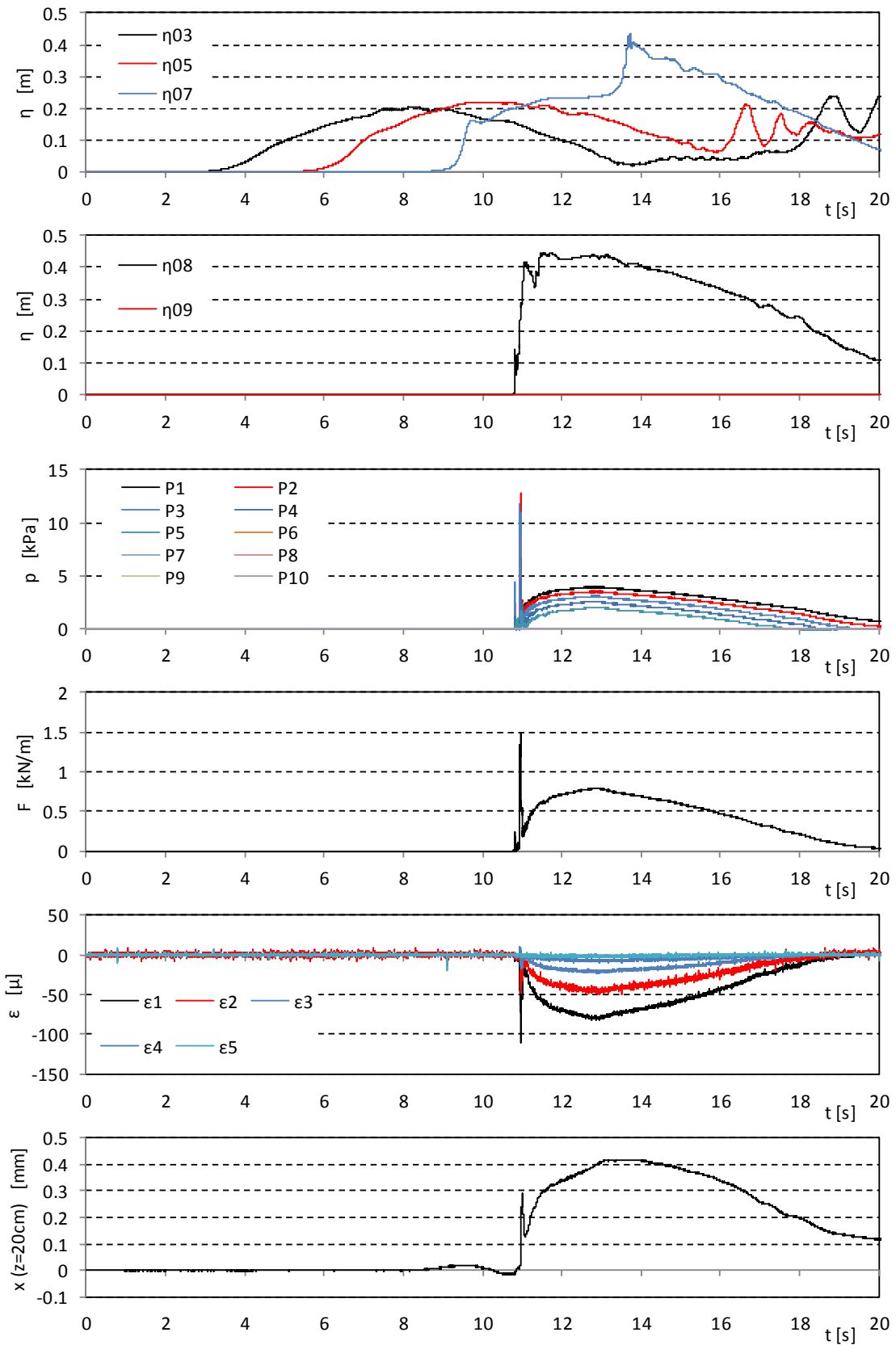


図- 6.2.1 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, Wc32)

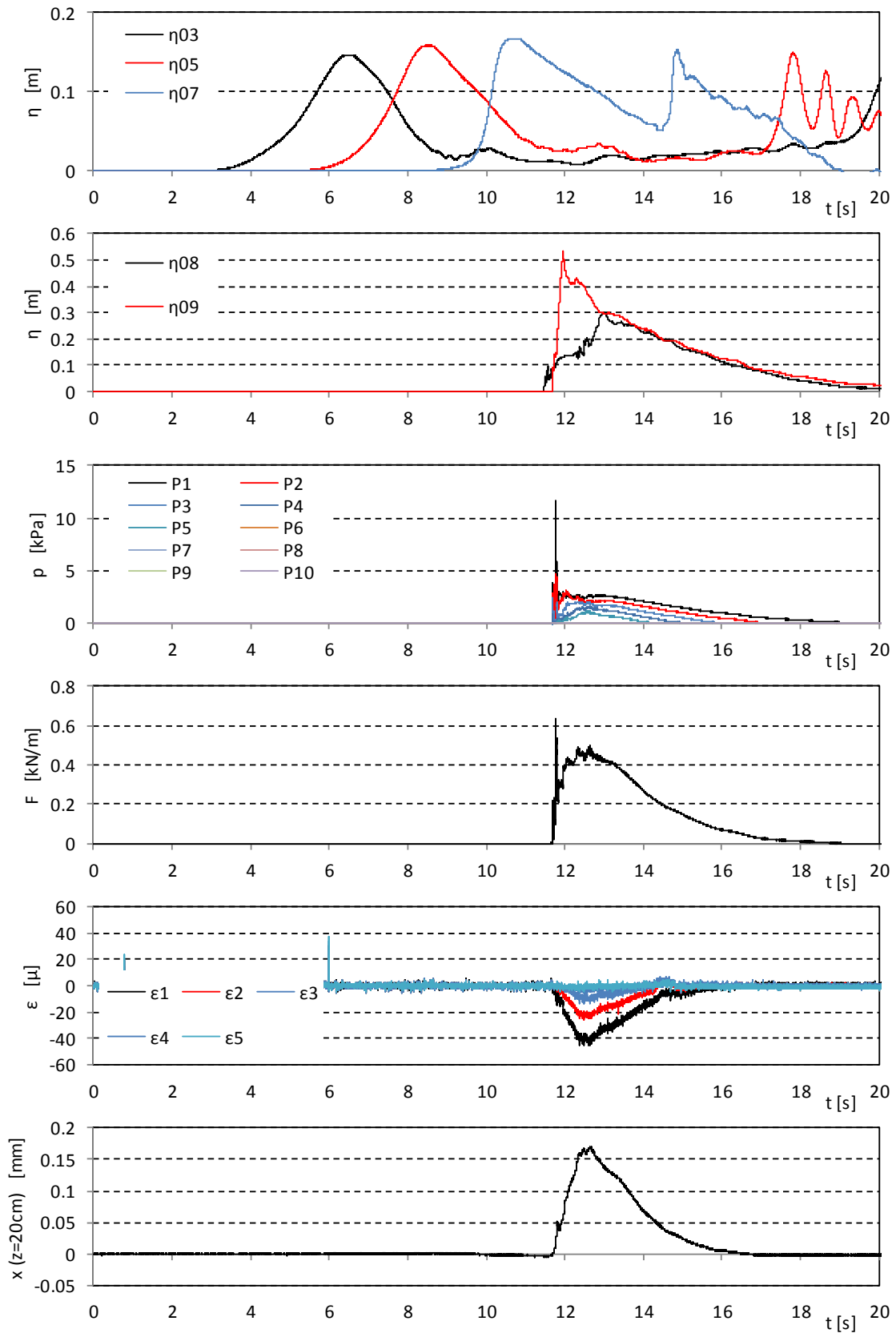


図- 6.2.2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m, Wc11)

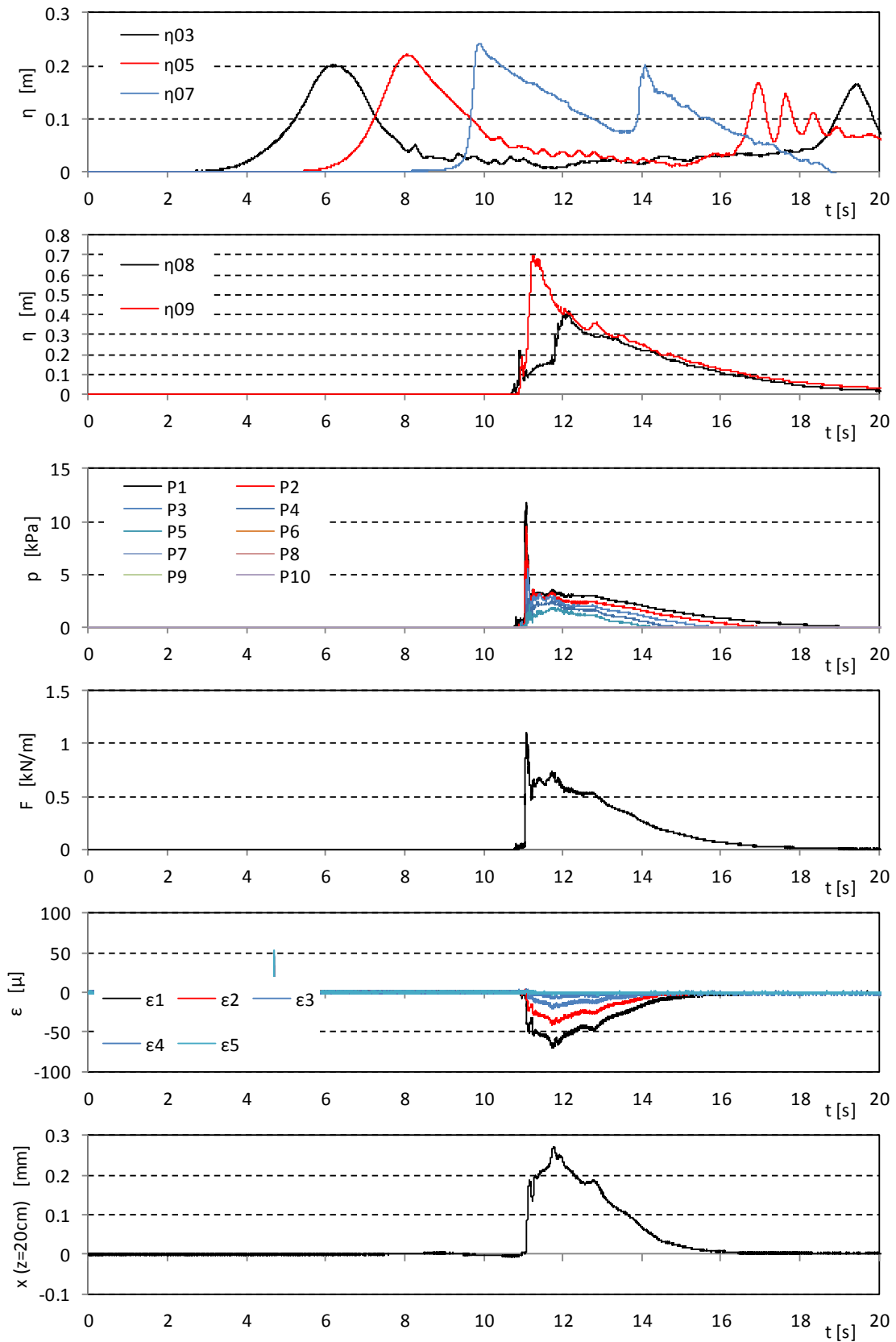


図- 6.2.2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m, Wc12)

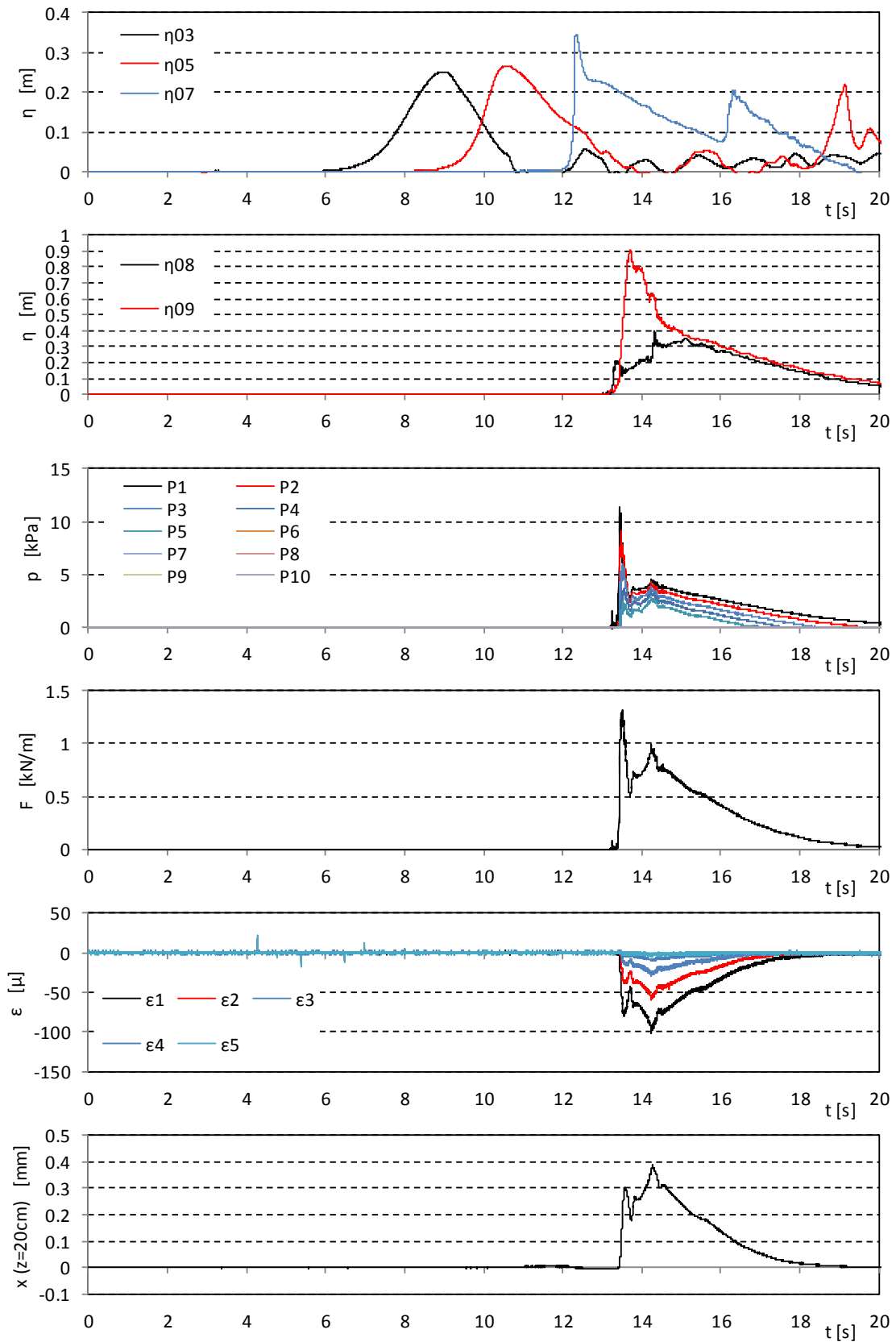


図- 6.2.2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m, Wc13)

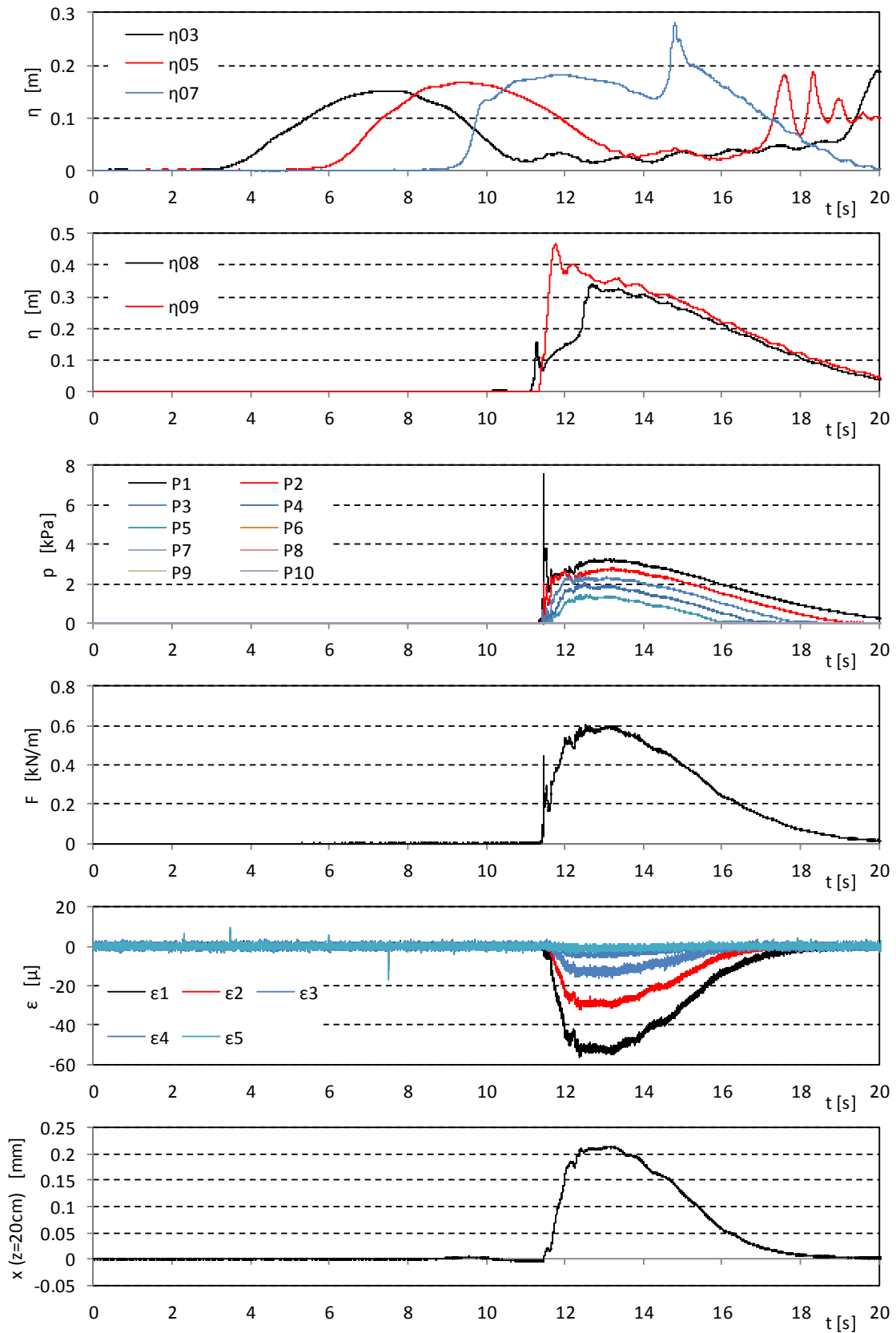


図- 6.2.2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m, Wc21)

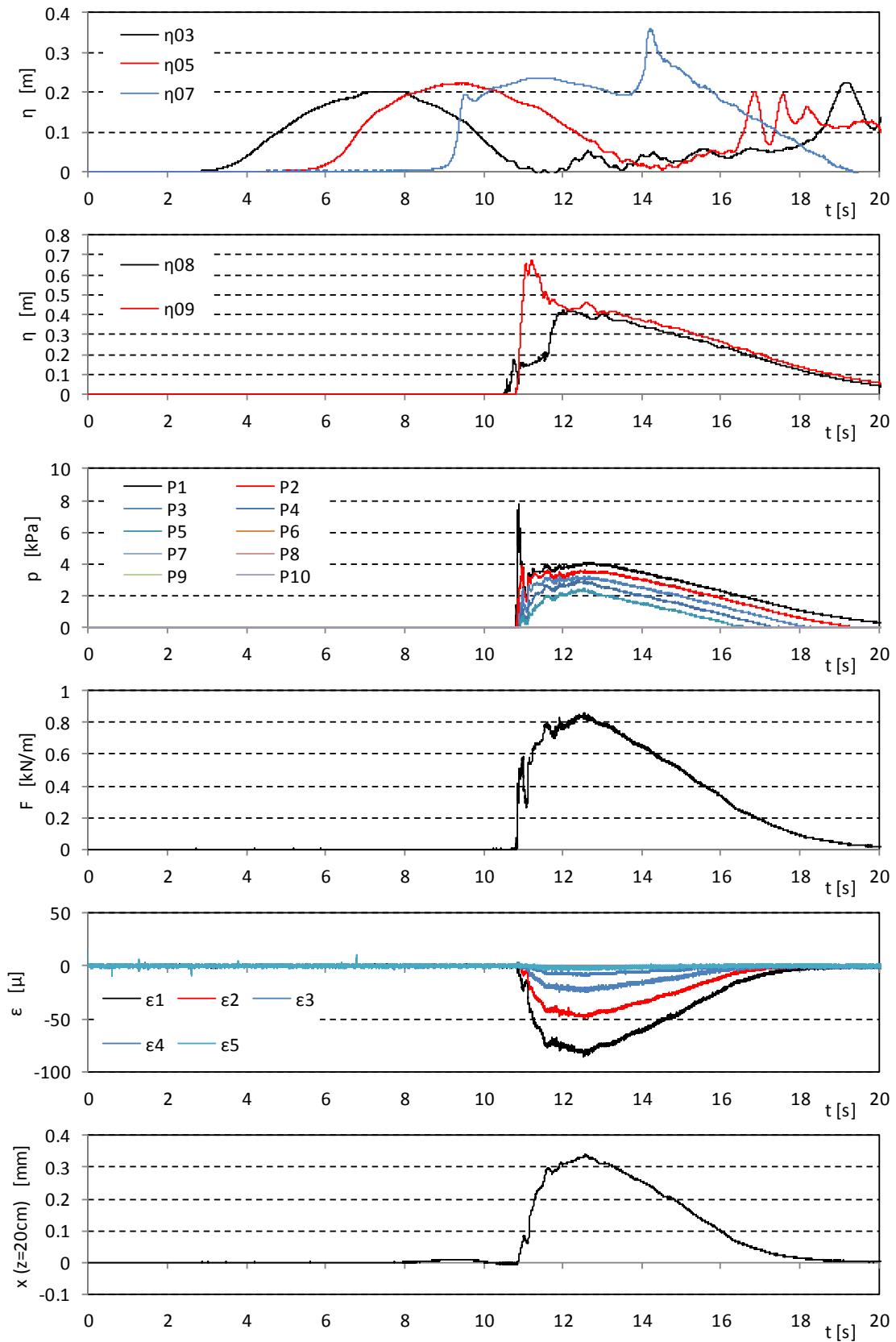


図- 6.2.2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m, Wc22)

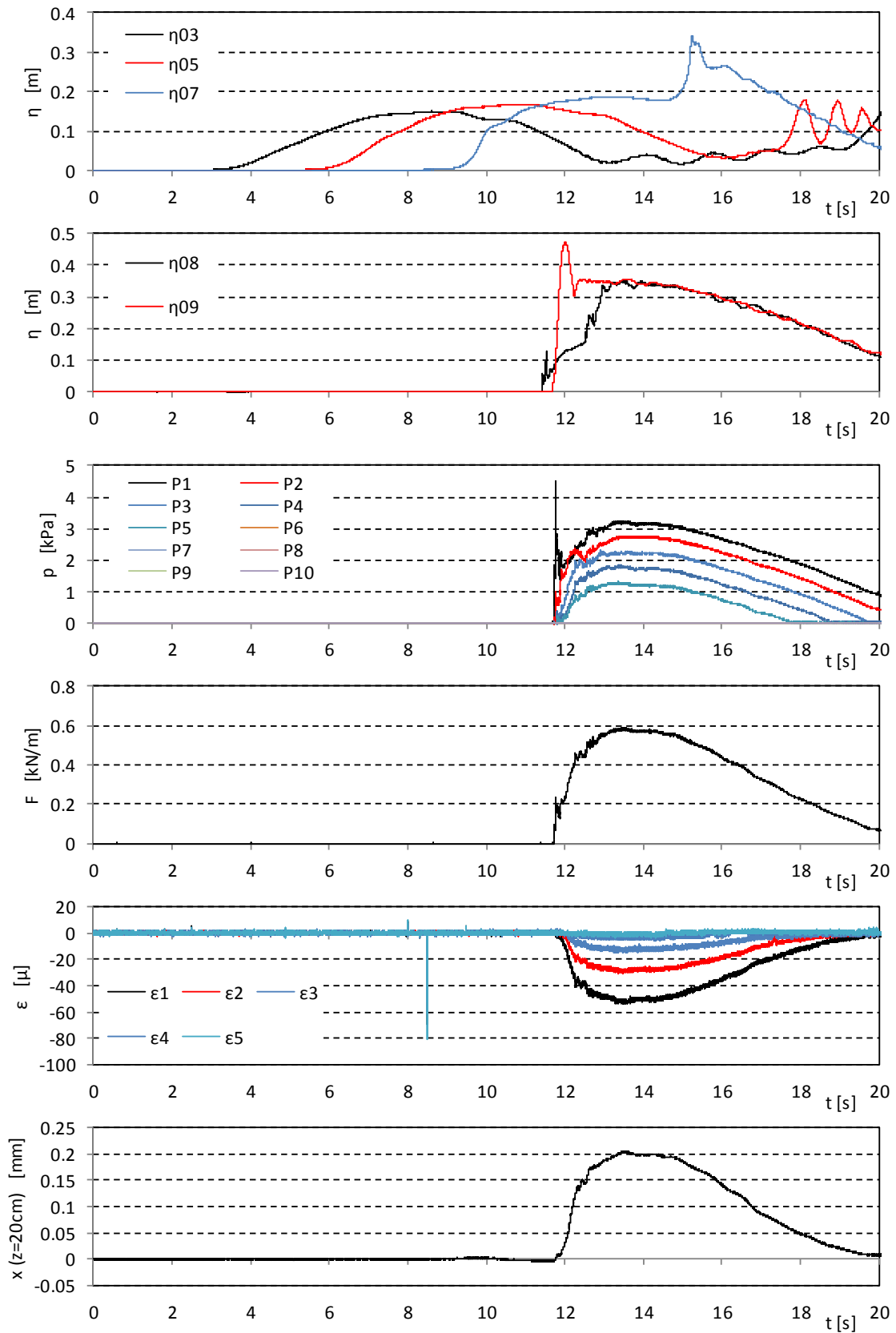


図- 6.2.2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m, Wc31)

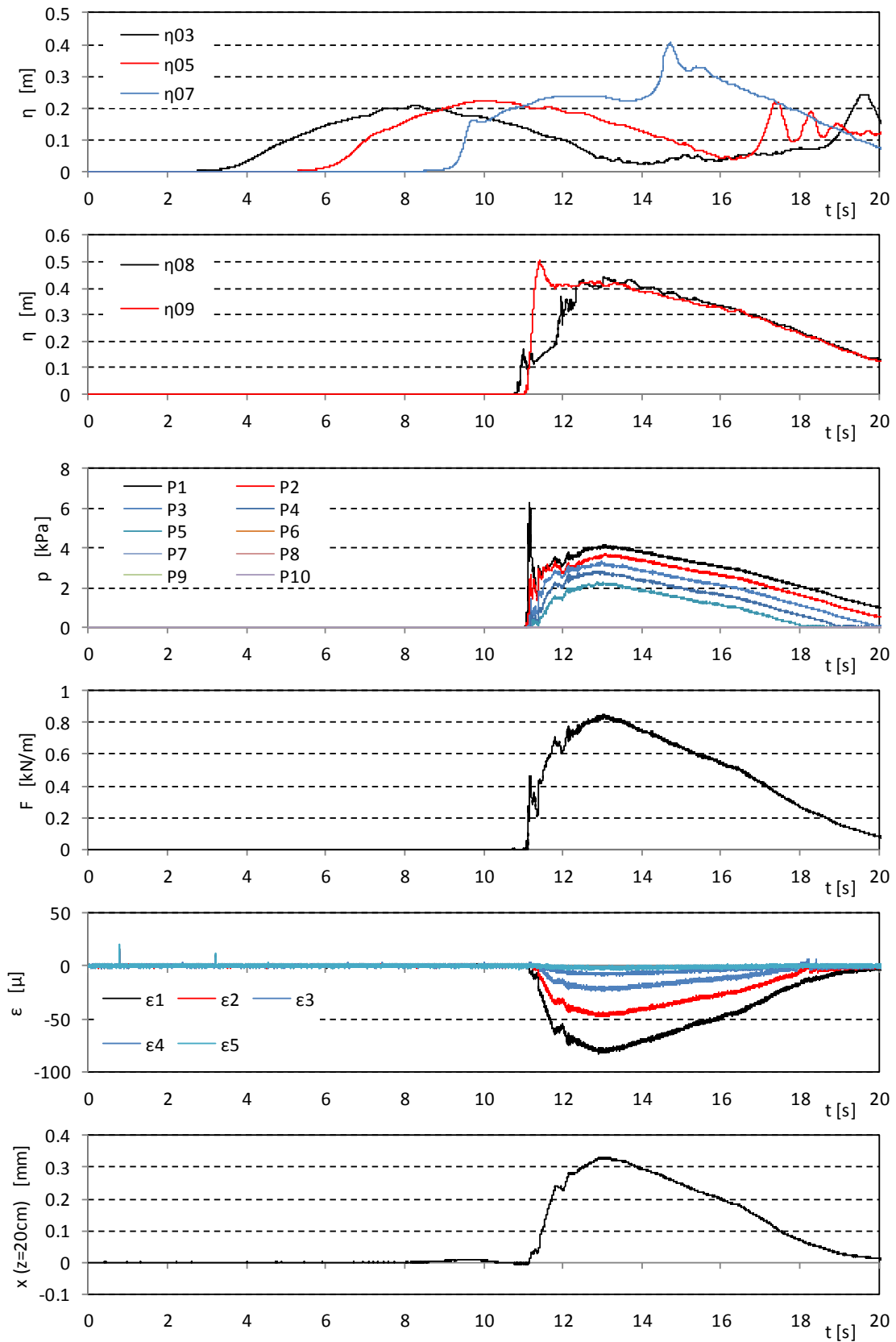


図- 6.2.2 波力/波圧試験の計測結果 (単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m, Wc32)

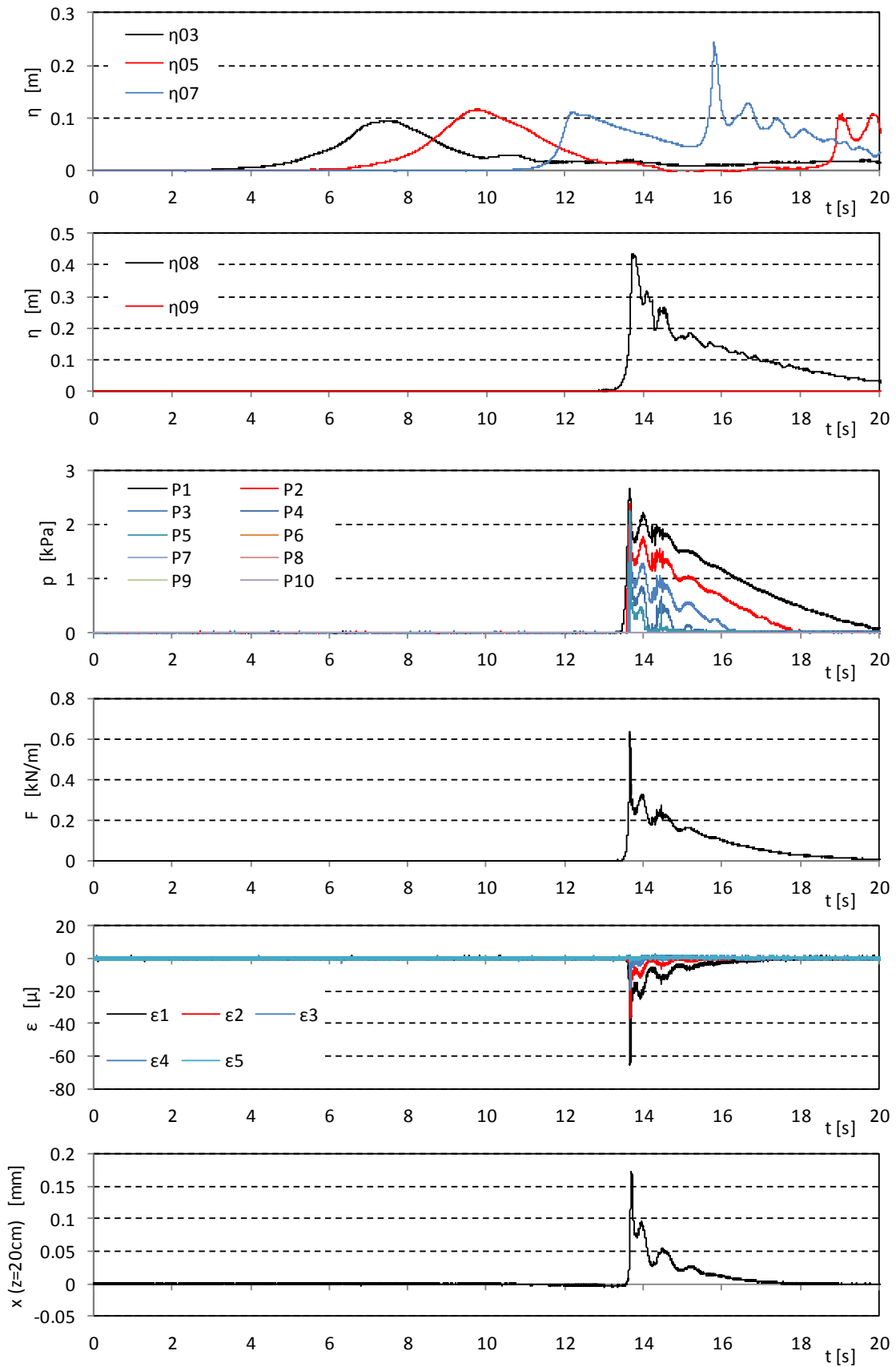


図- 6.2.3 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, Wc10)

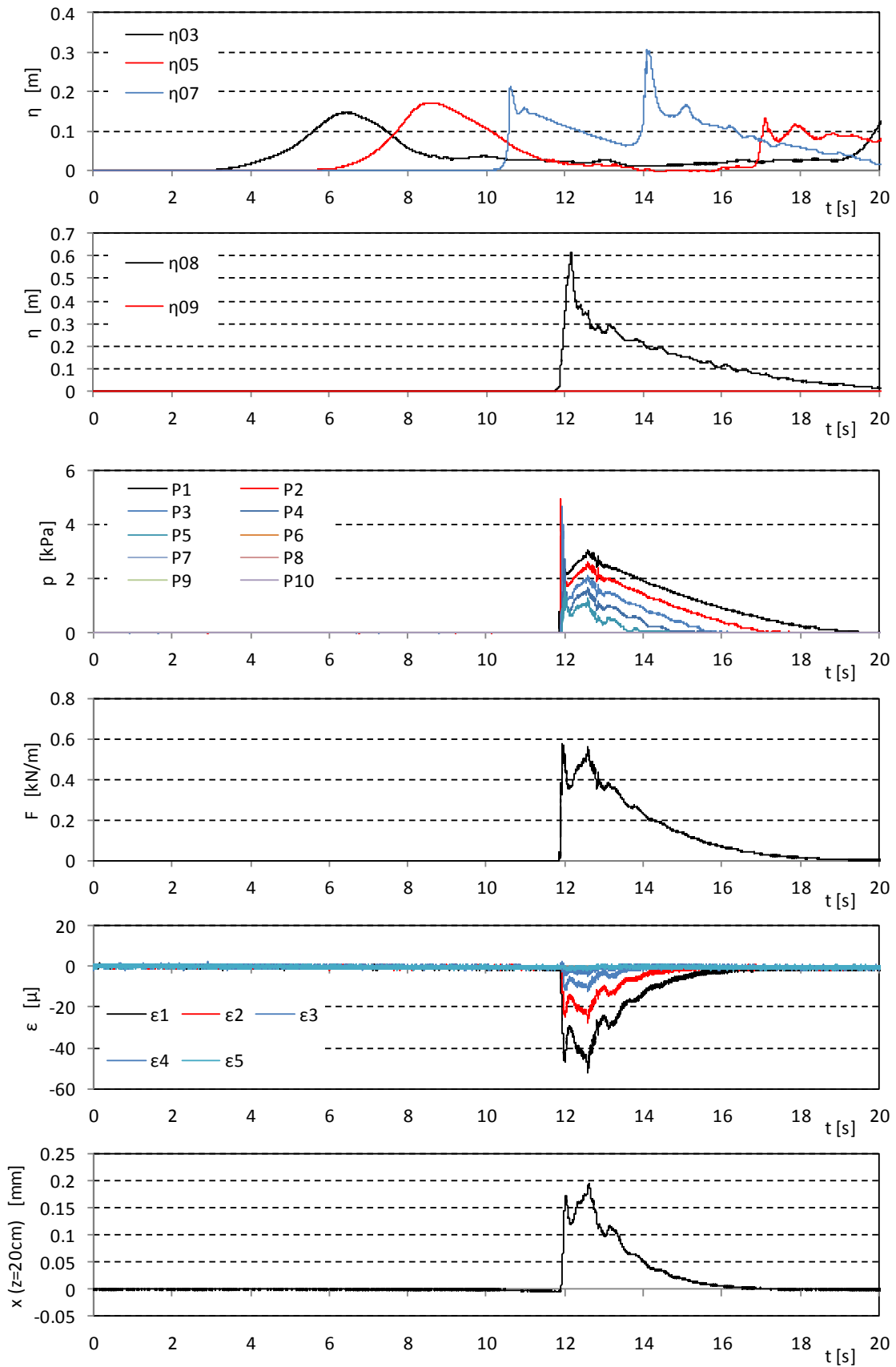


図- 6.2.3 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, Wc11)

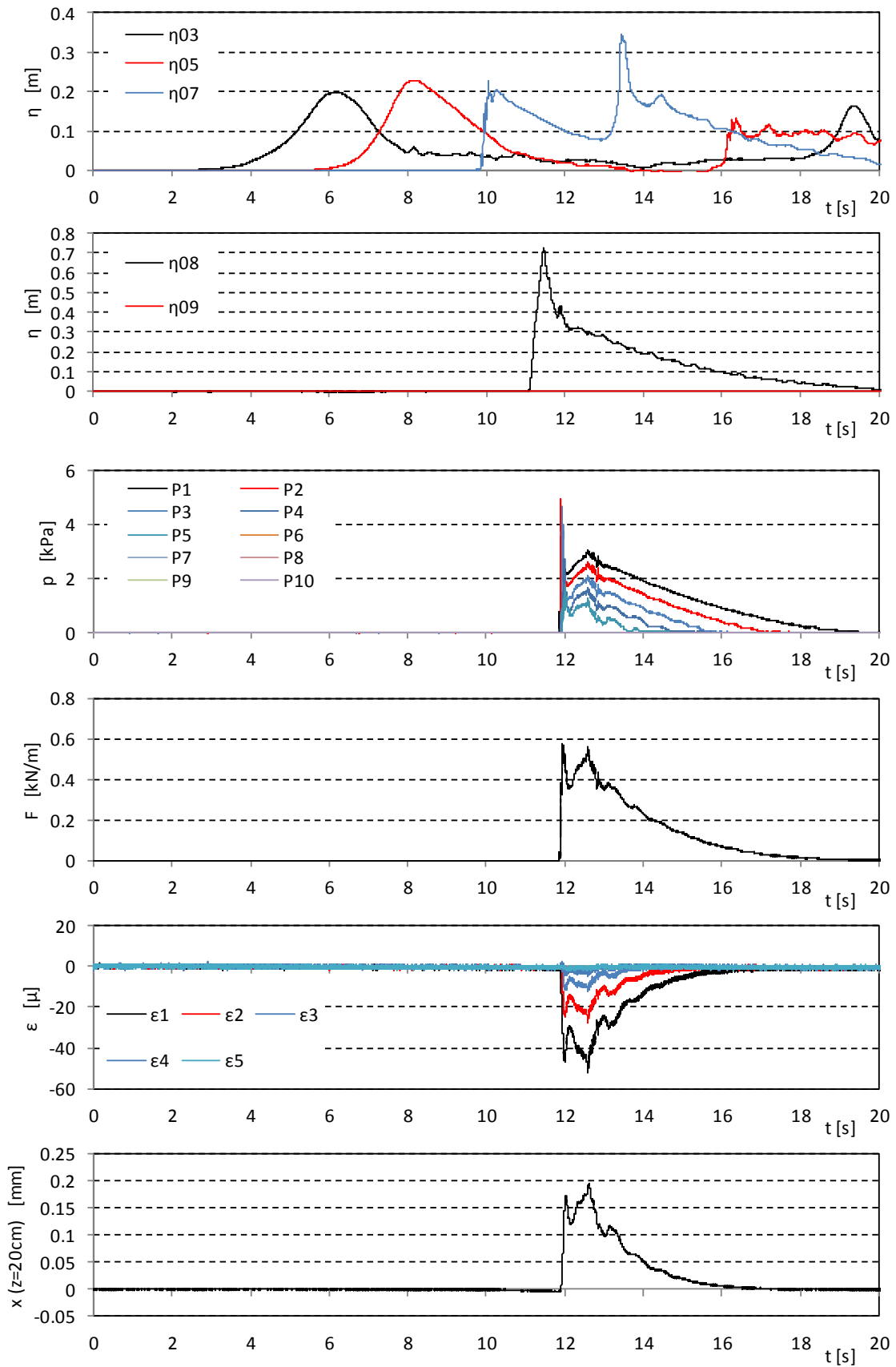


図- 6.2.3 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, Wc12)

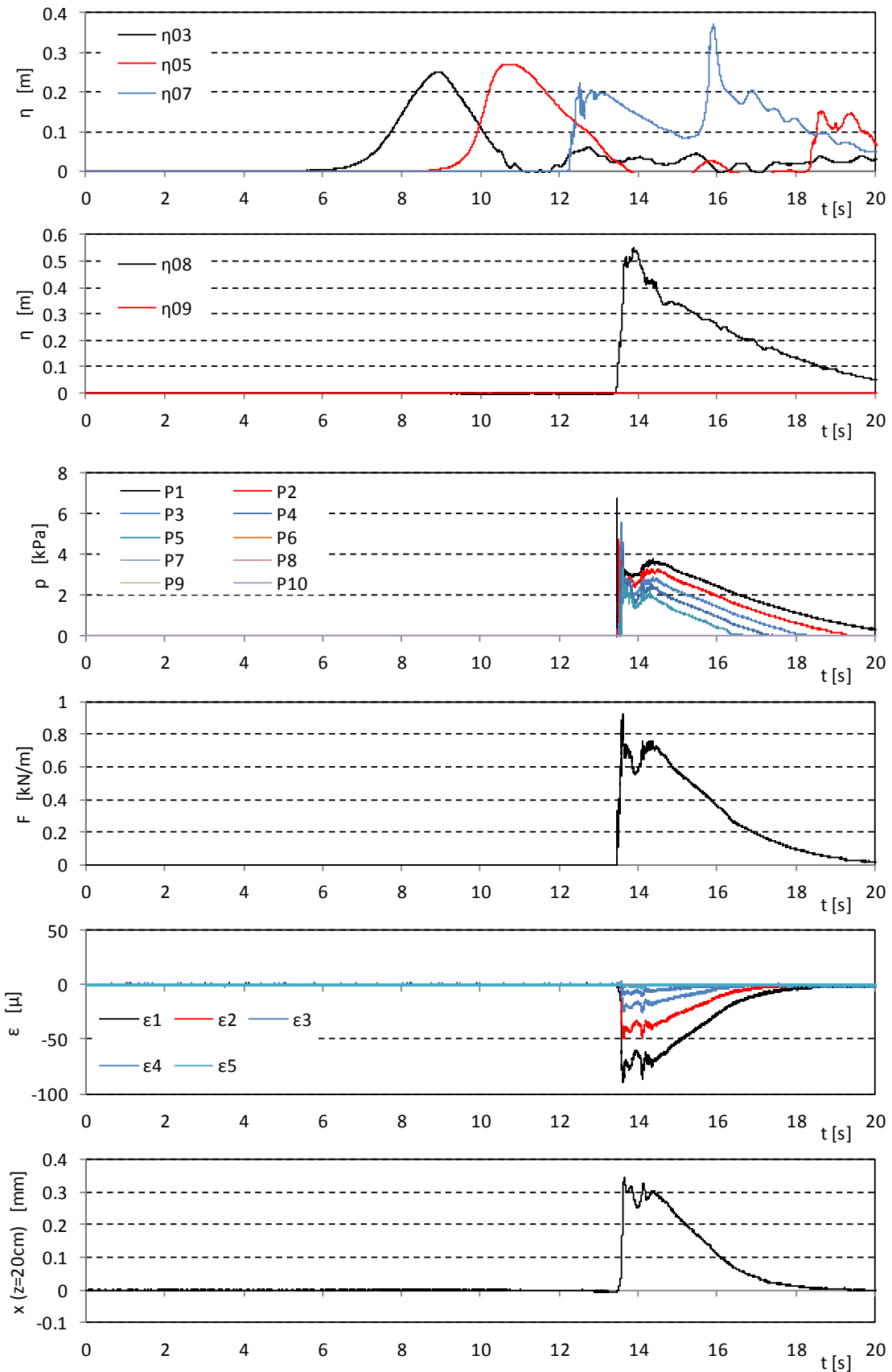


図- 6.2.3 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, Wc13)

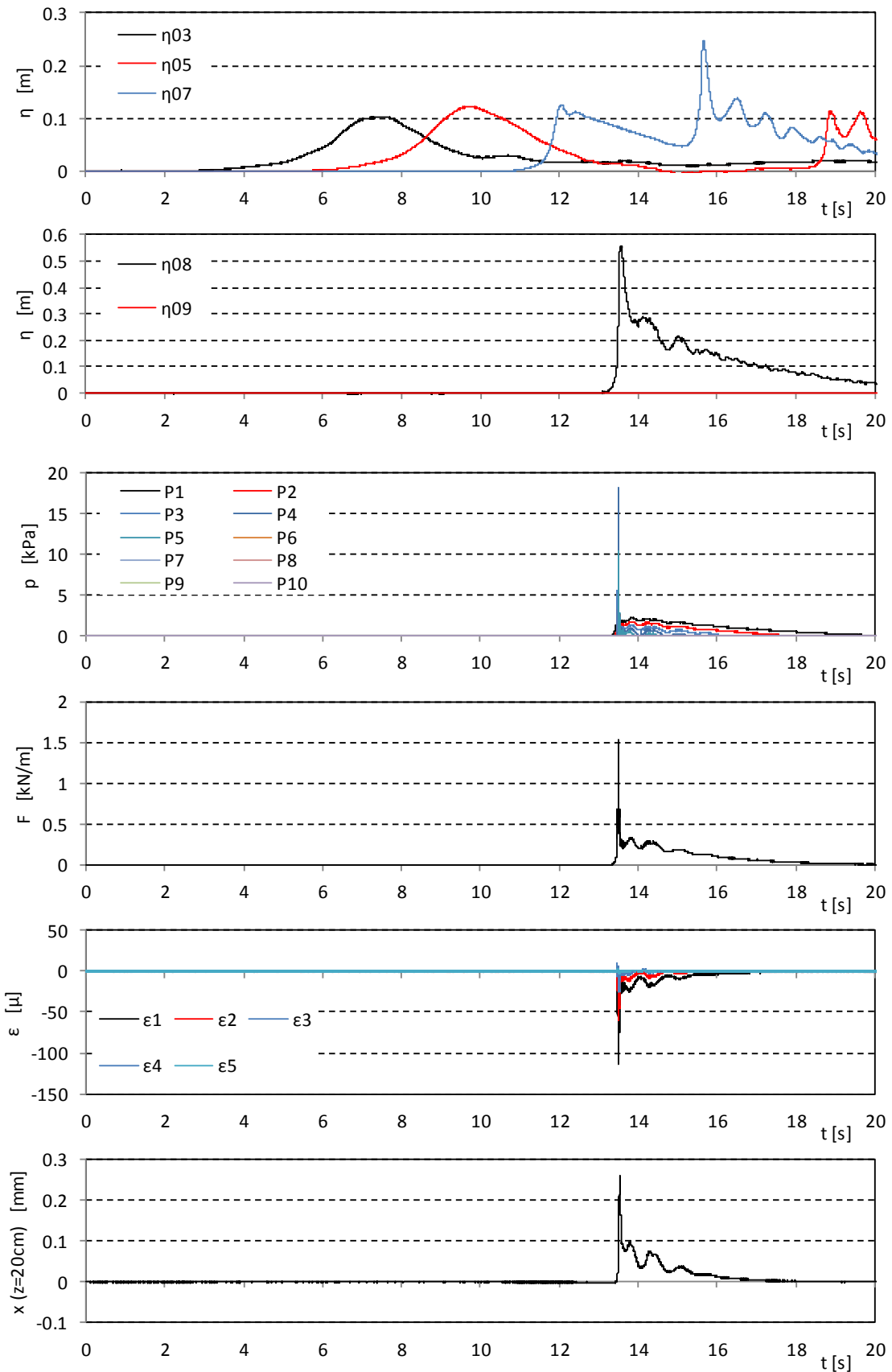


図- 6.2.3 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, Wc14)

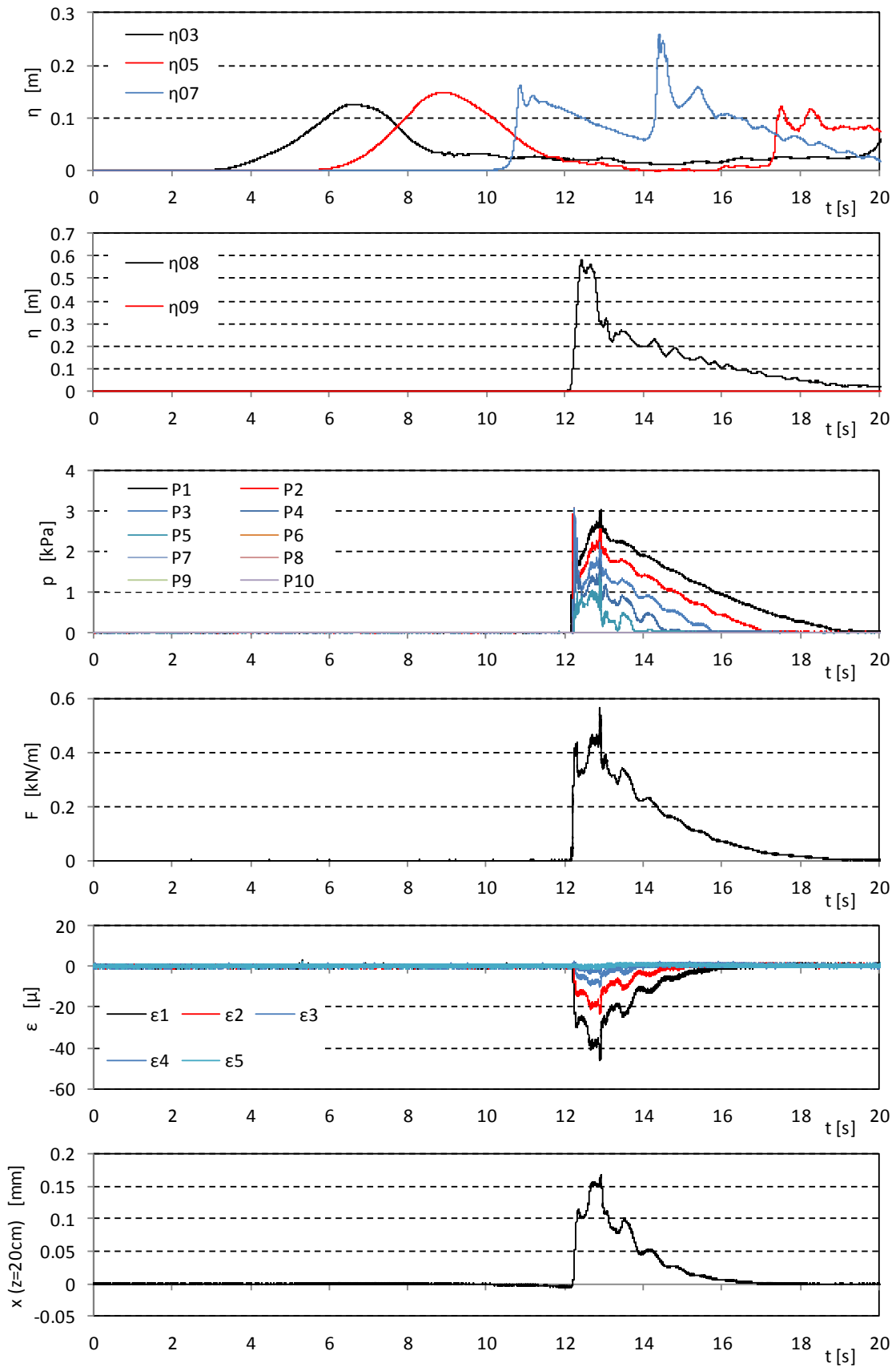


図- 6.2.3 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, Wc15)

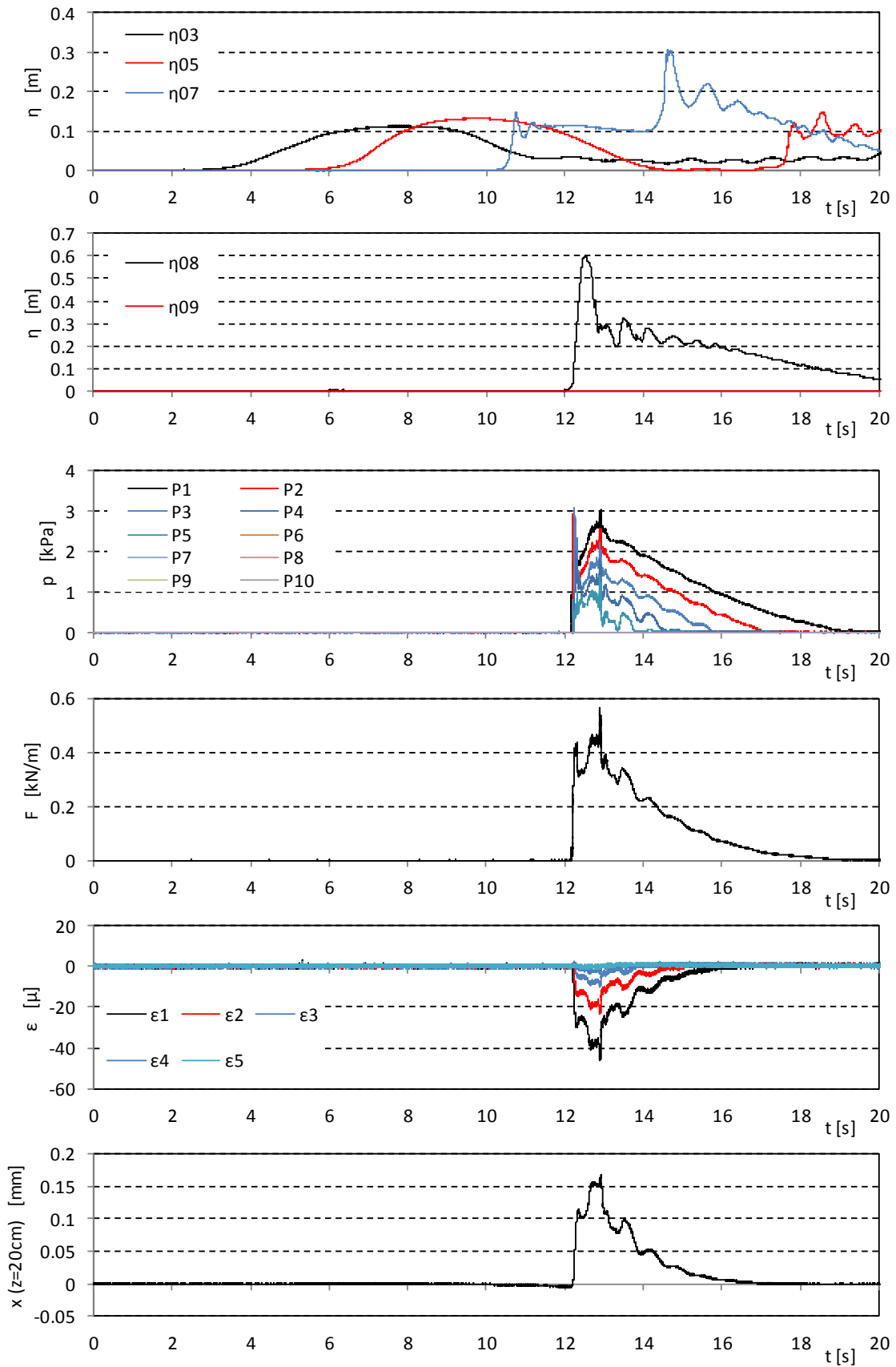


図- 6.2.3 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, Wc20)

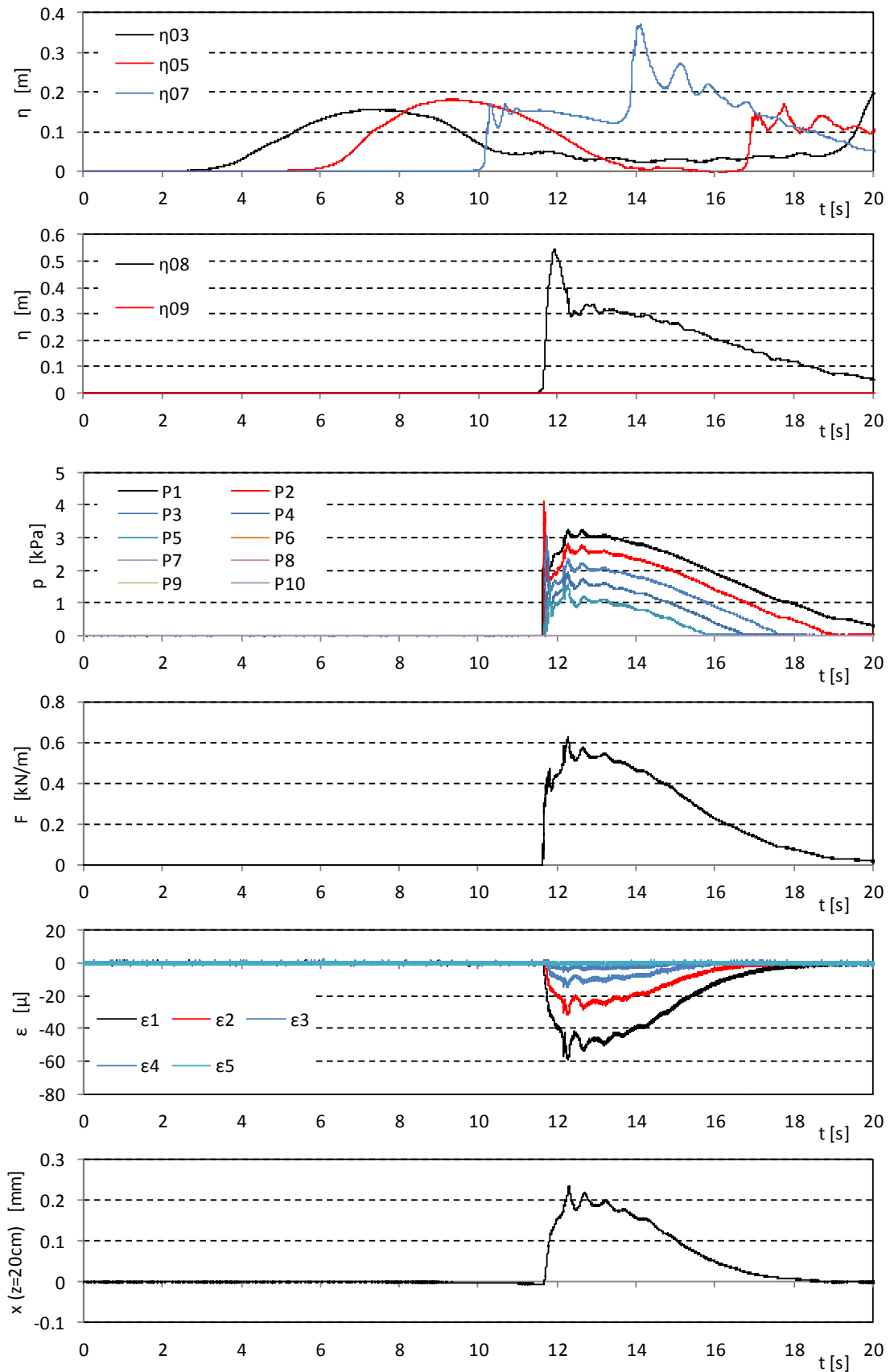


図- 6.2.3 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, Wc21)

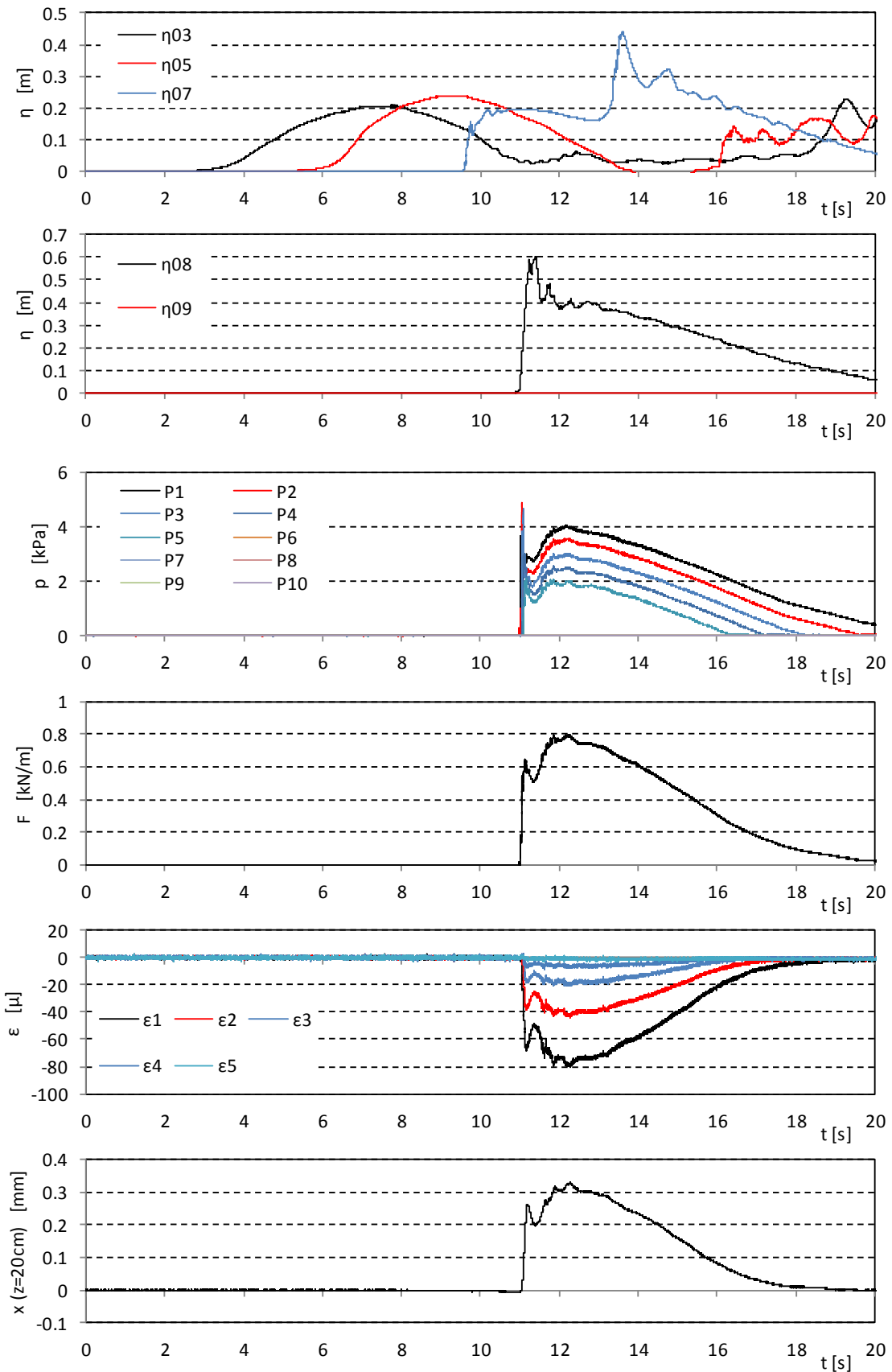


図- 6.2.3 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, Wc22)

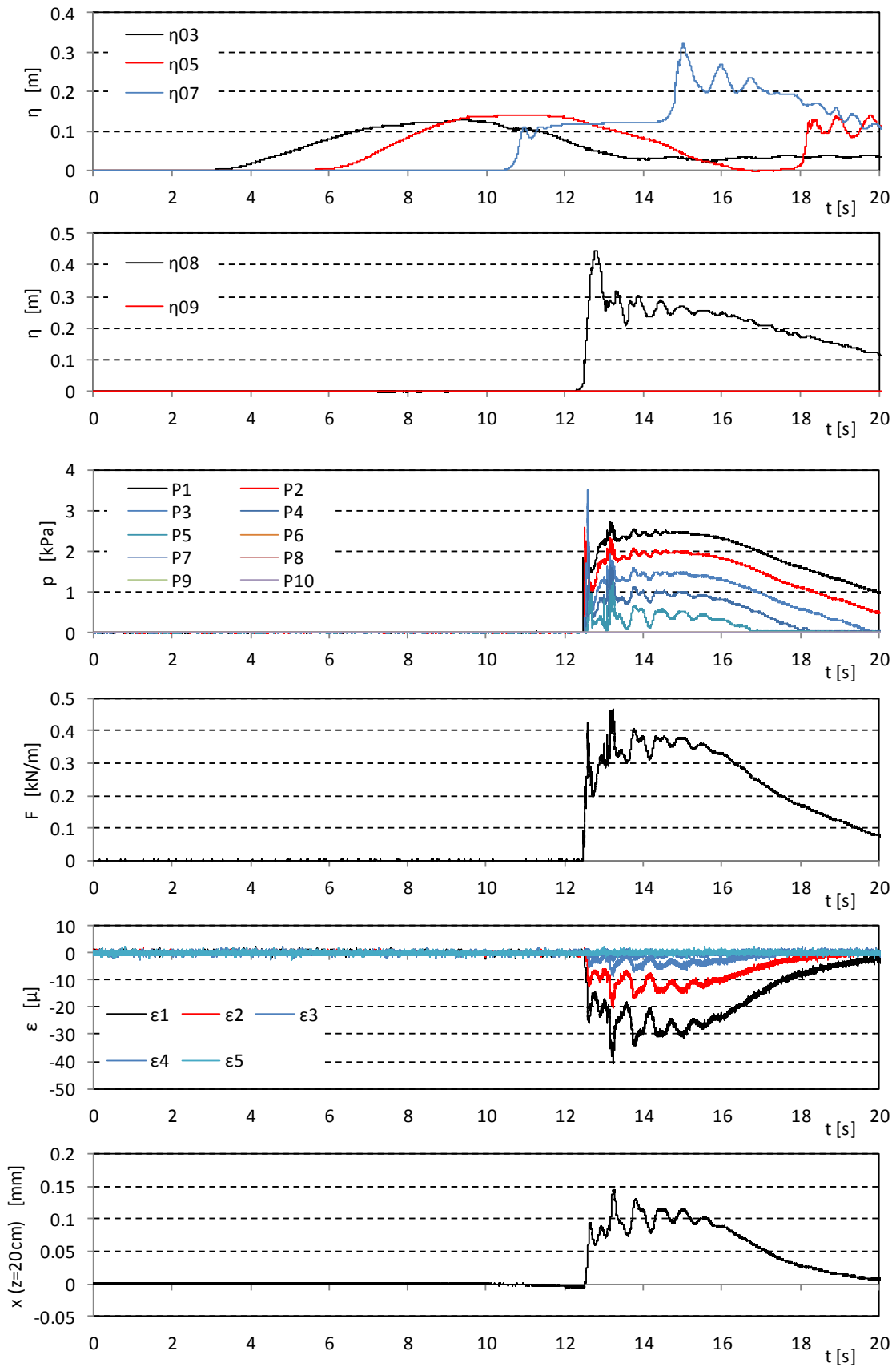


図- 6.2.3 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, Wc30)

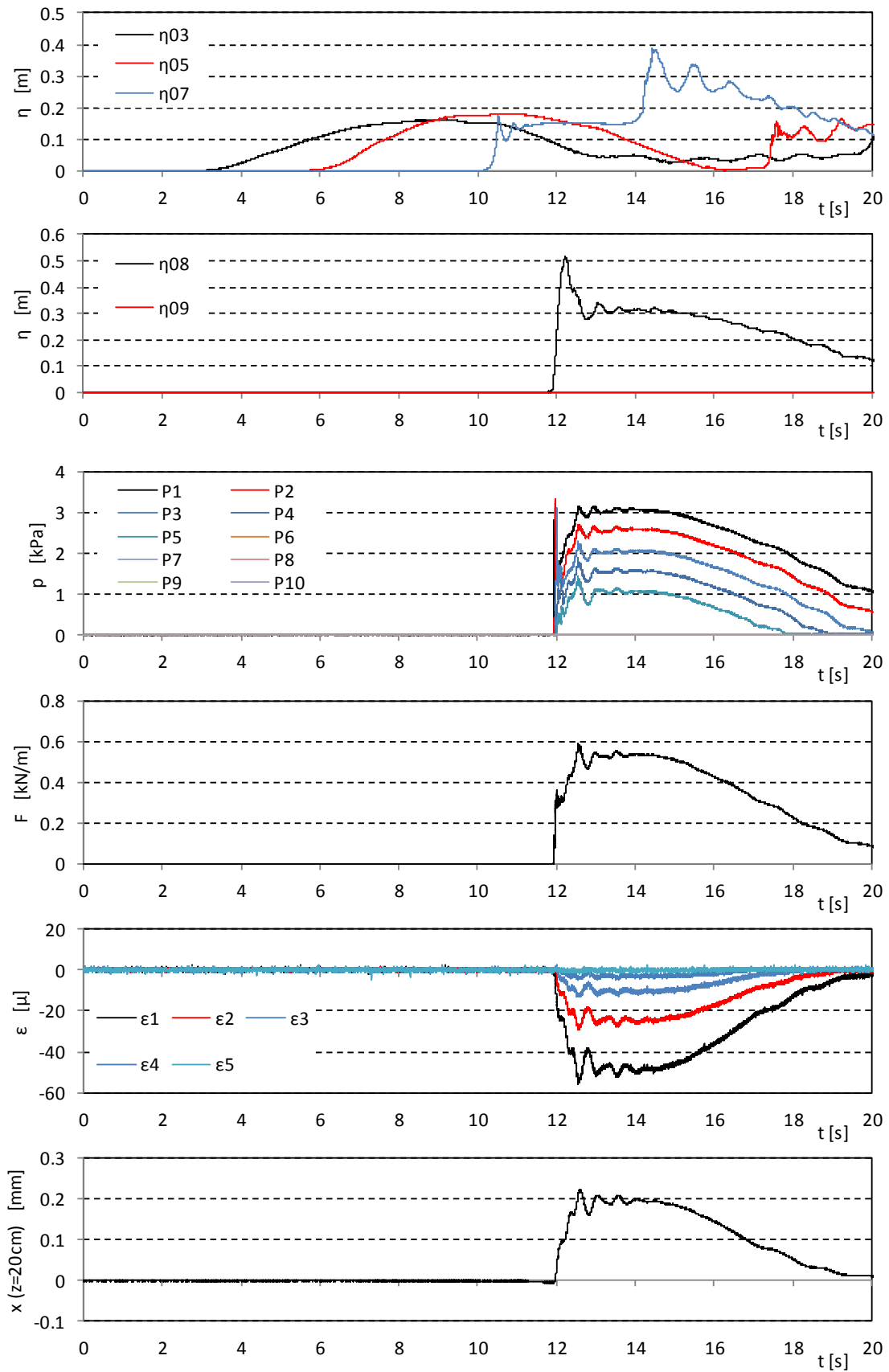


図- 6.2.3 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, Wc31)

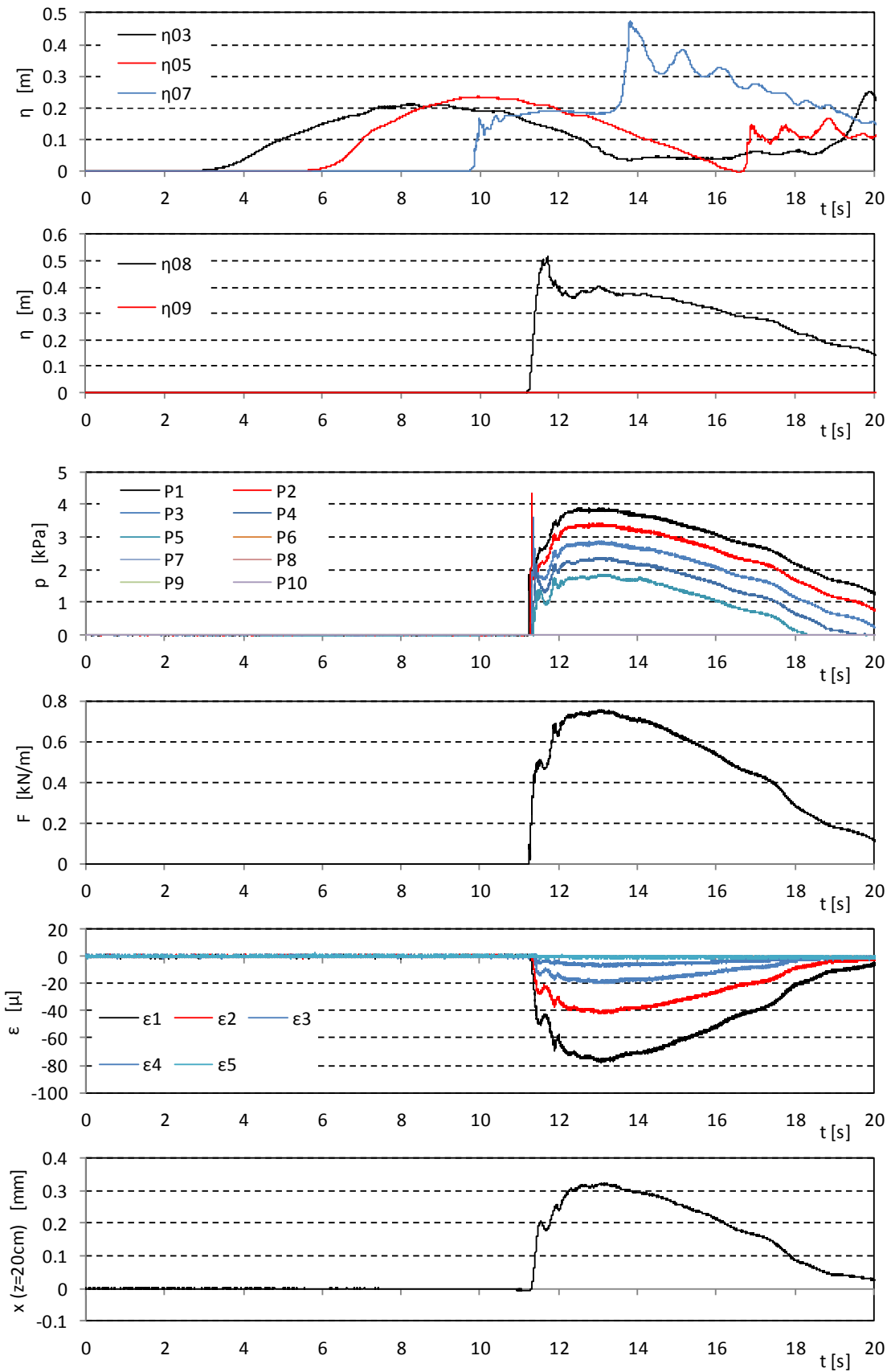


図- 6.2.3 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, Wc32)

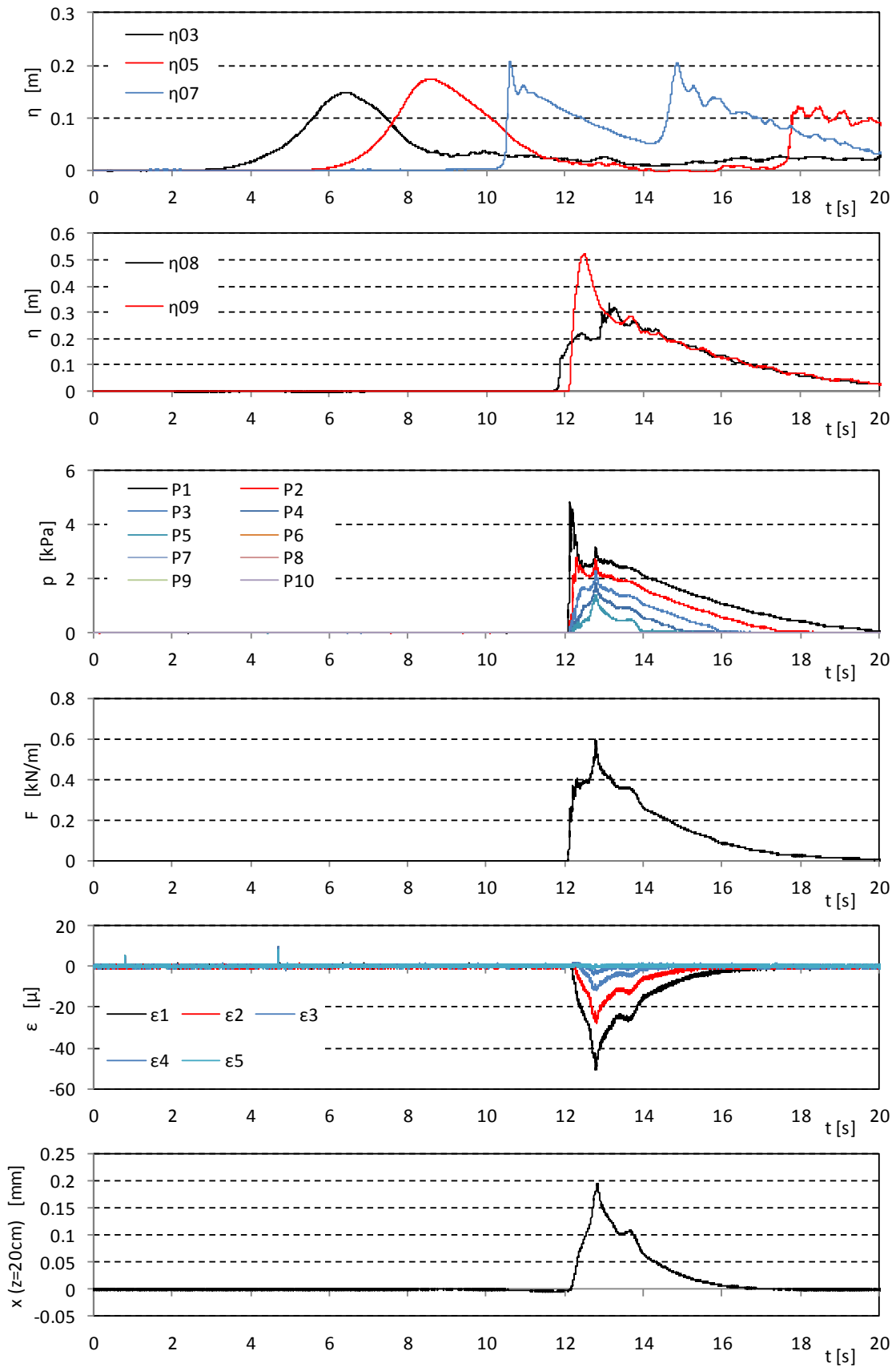


図- 6.2.4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m, Wc11)

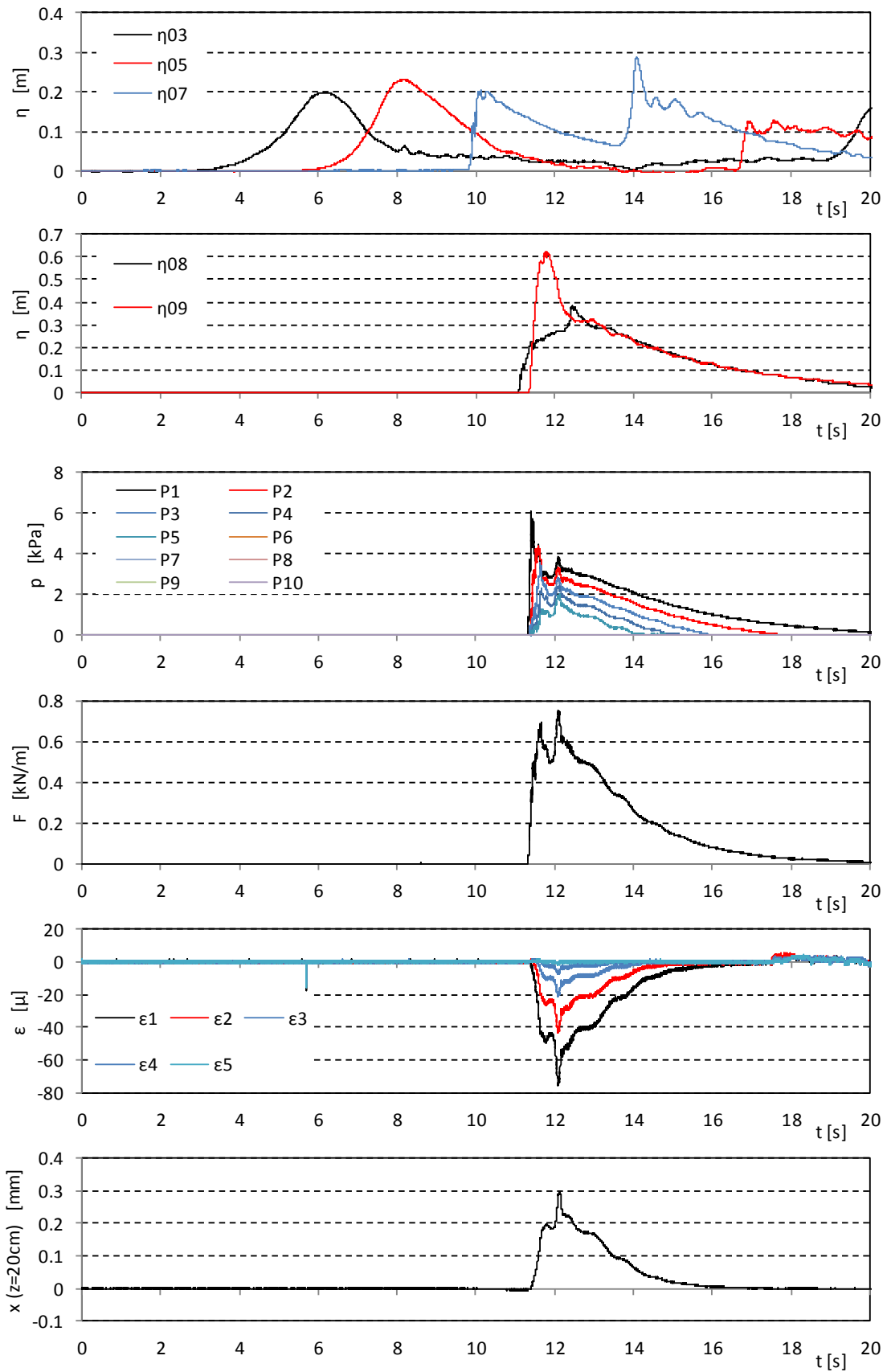


図- 6.2.4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m, Wc12)

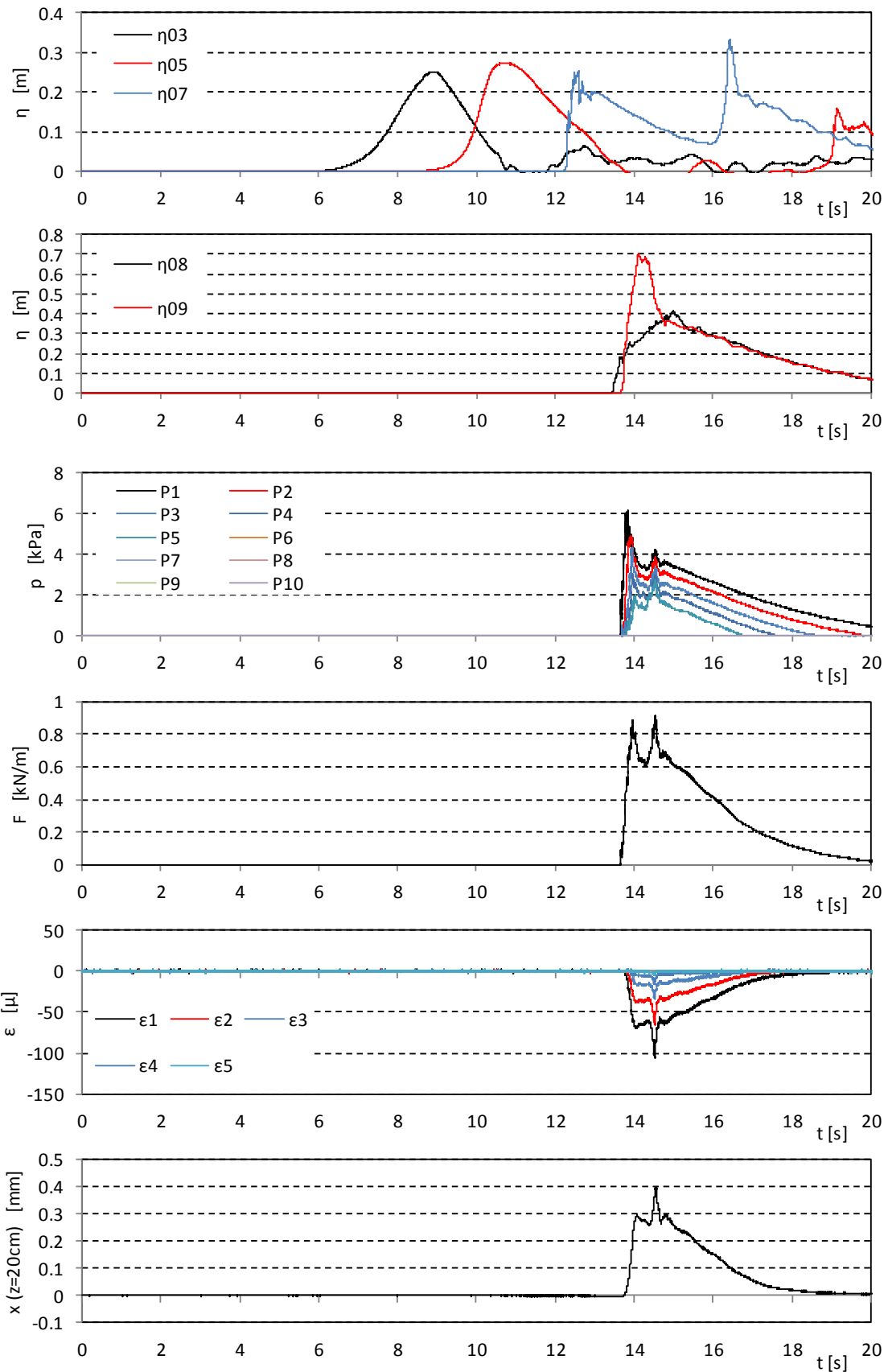


図- 6.2.4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m, Wc13)

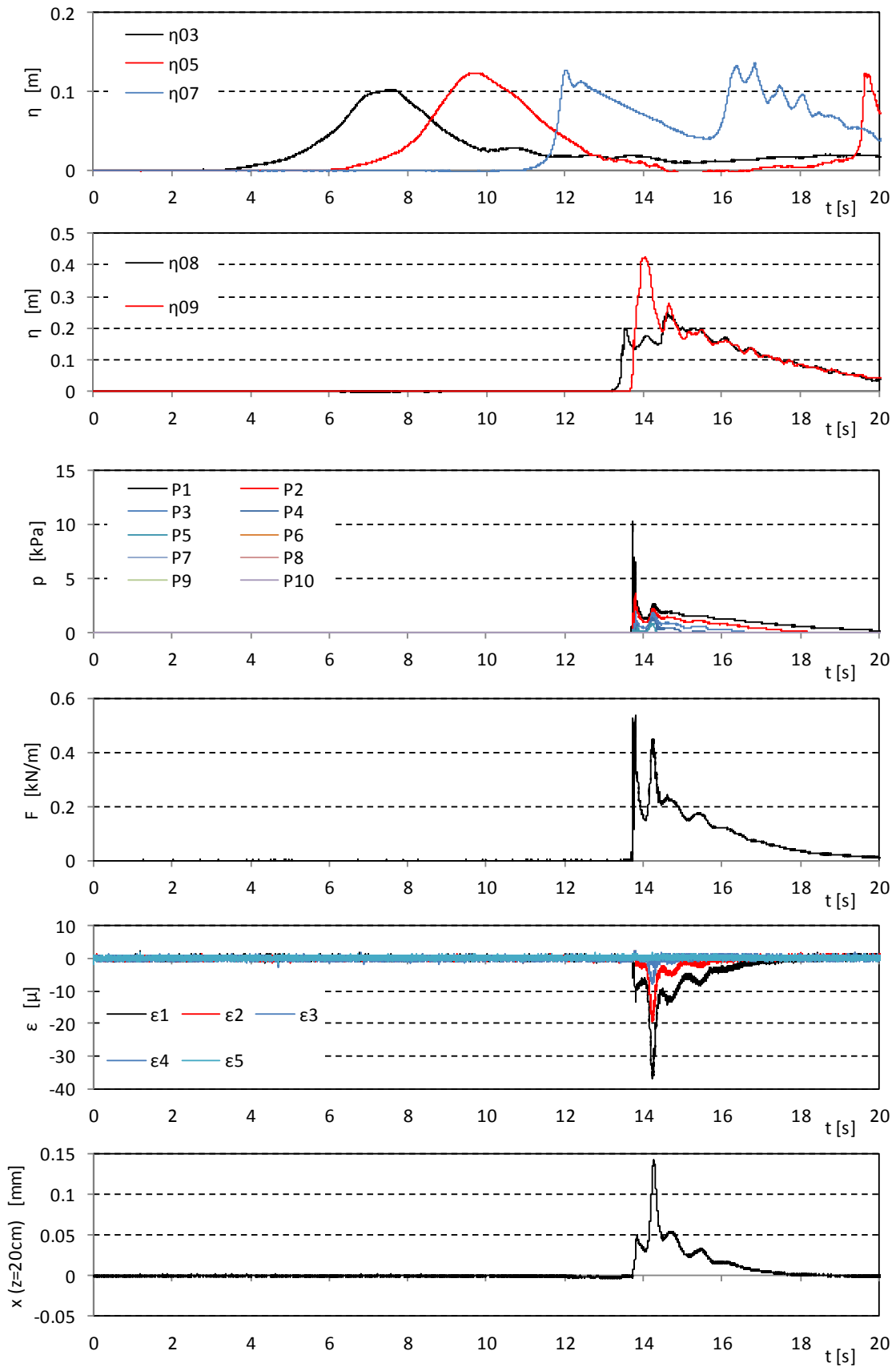


図- 6.2.4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m, Wc14)

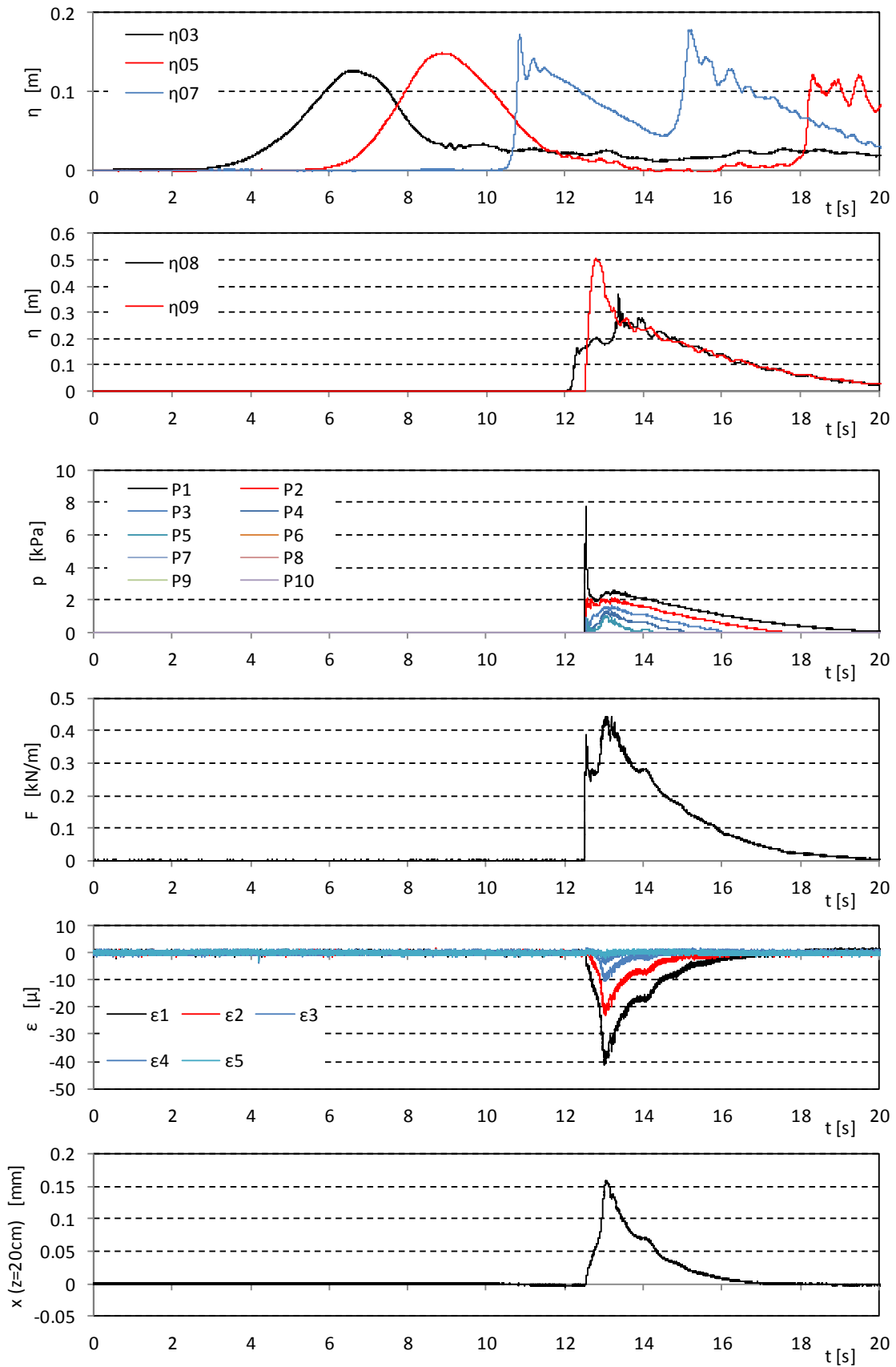


図- 6.2.4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m, Wc15)

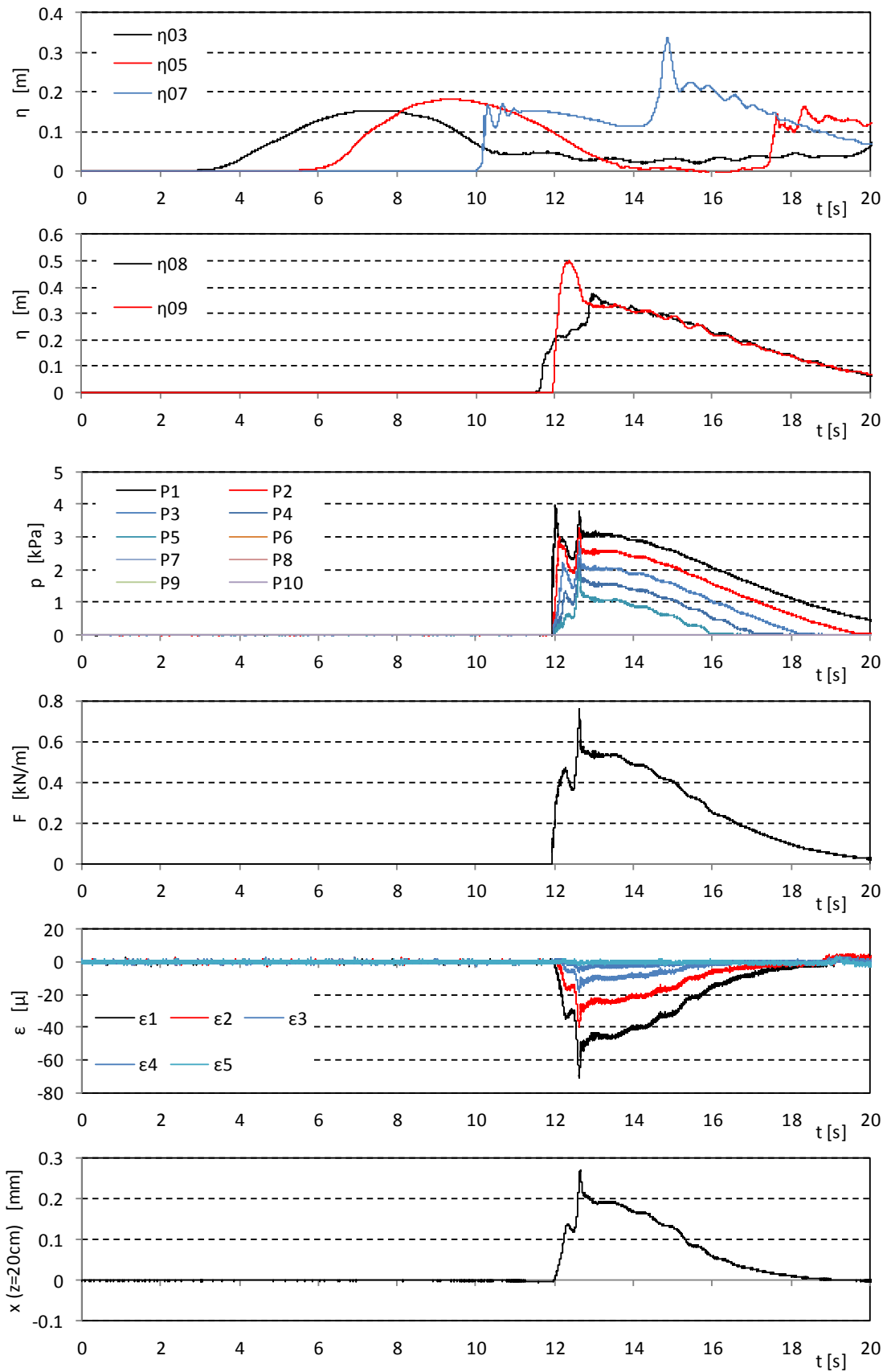


図- 6.2.4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m, Wc21)

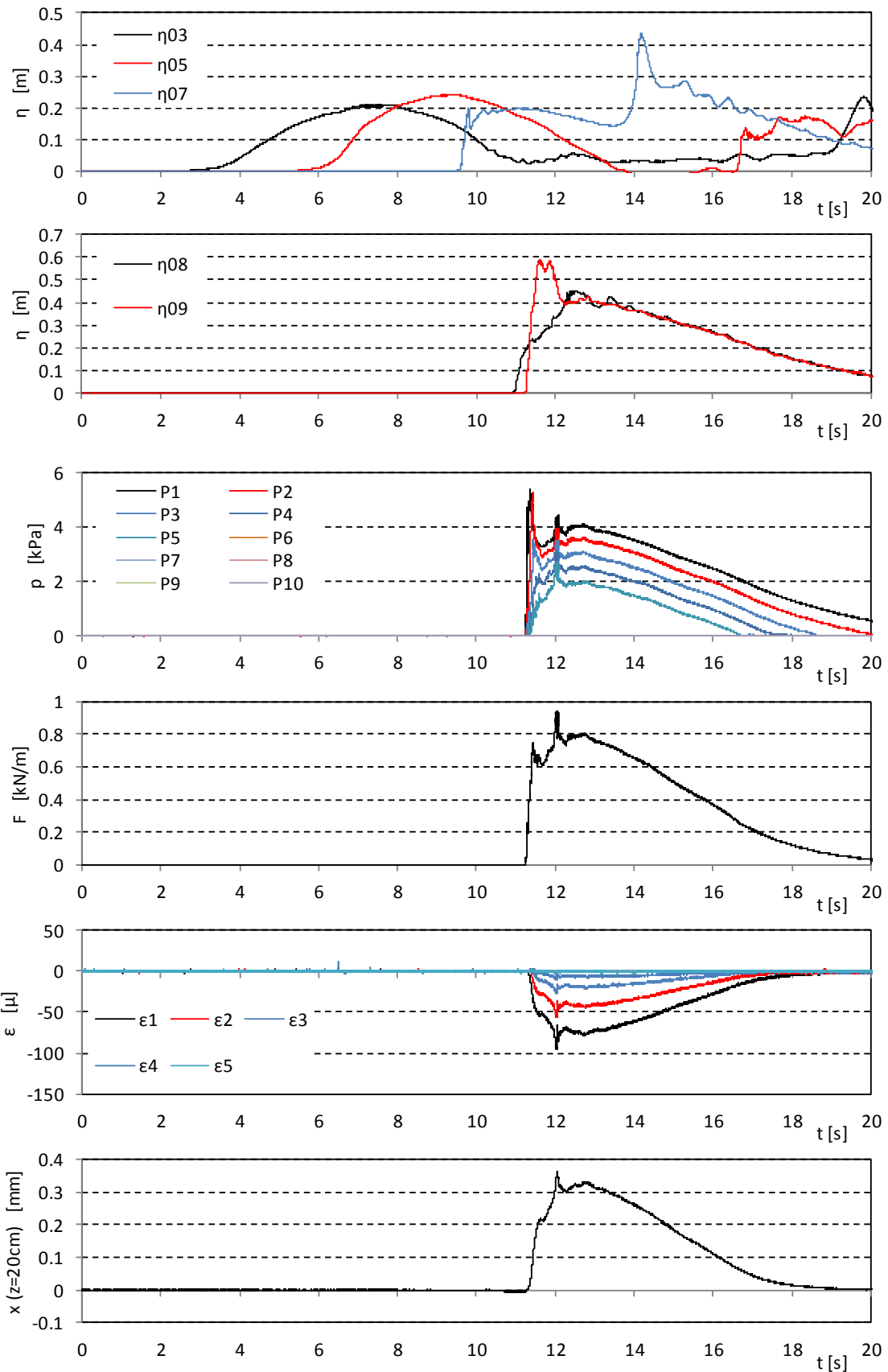


図- 6.2.4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m, Wc22)

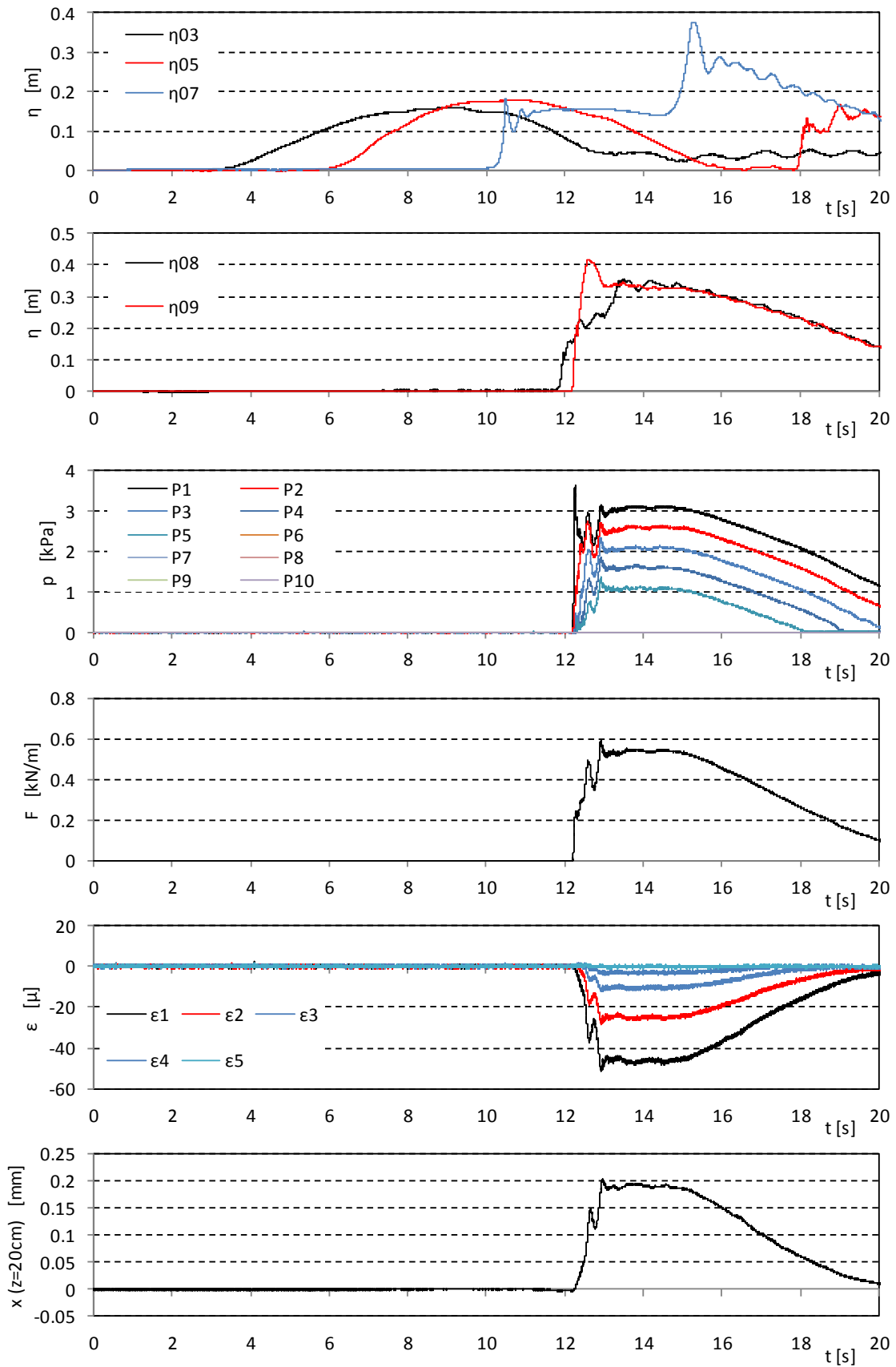


図- 6.2.4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m, Wc31)

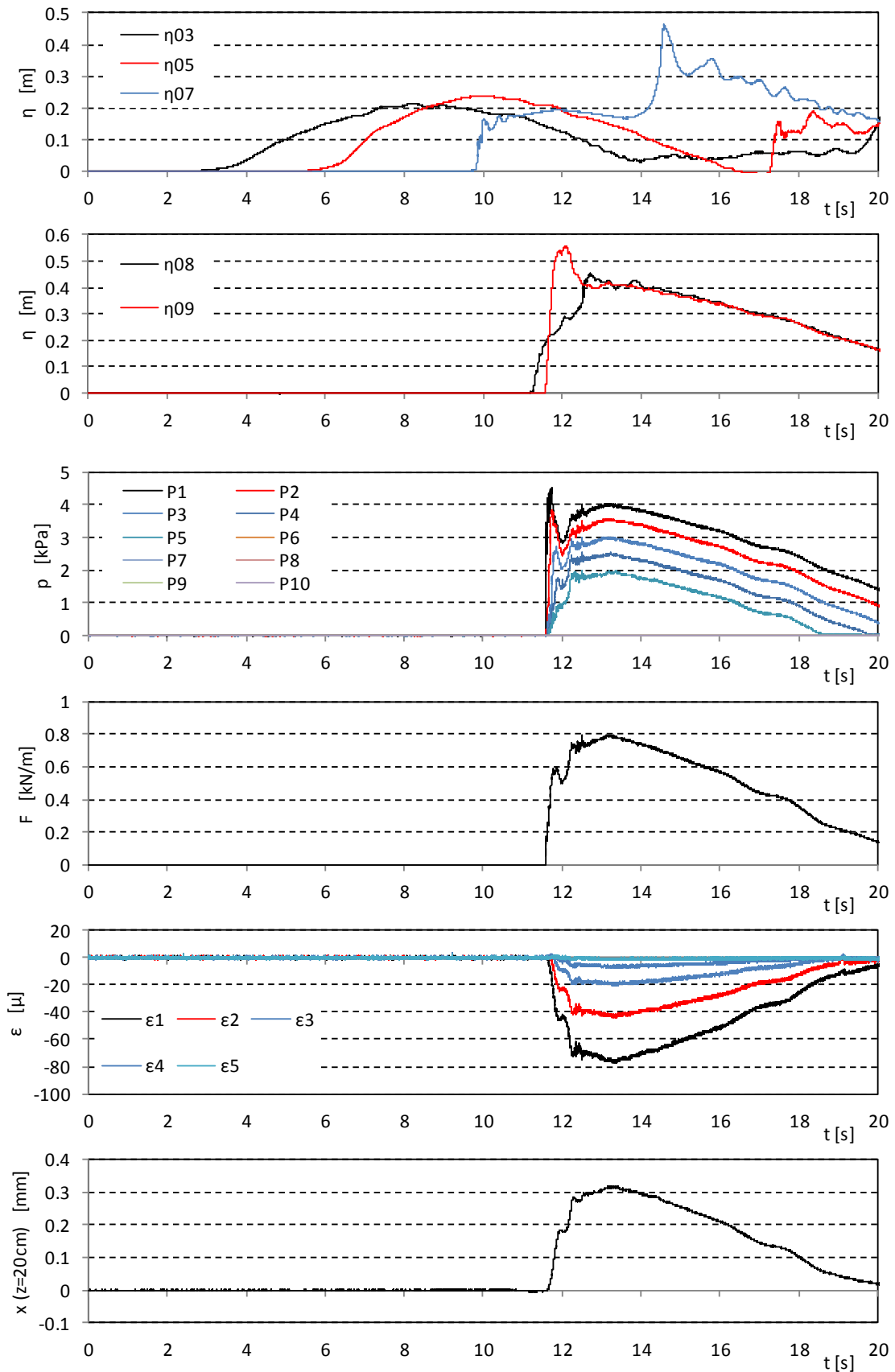
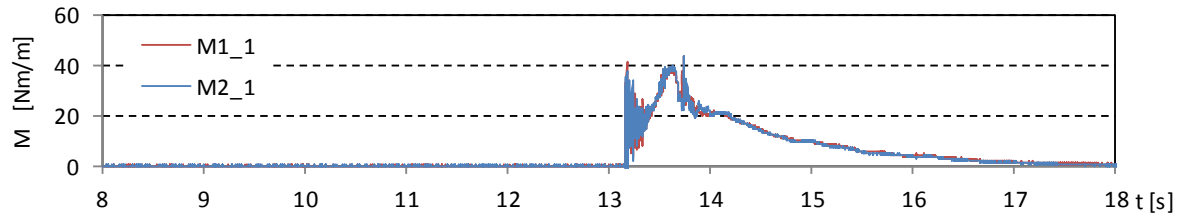
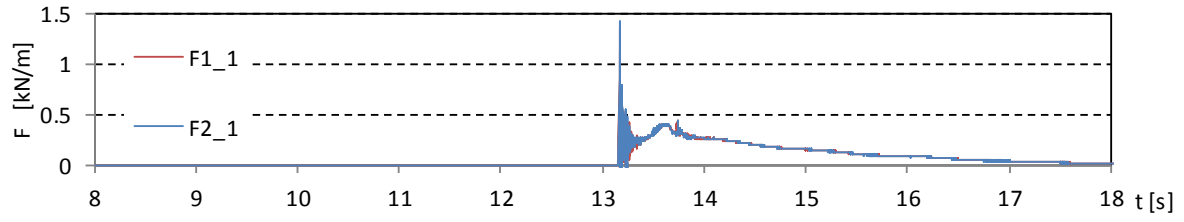


図- 6.2.4 波力/波圧試験の計測結果 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m, Wc32)

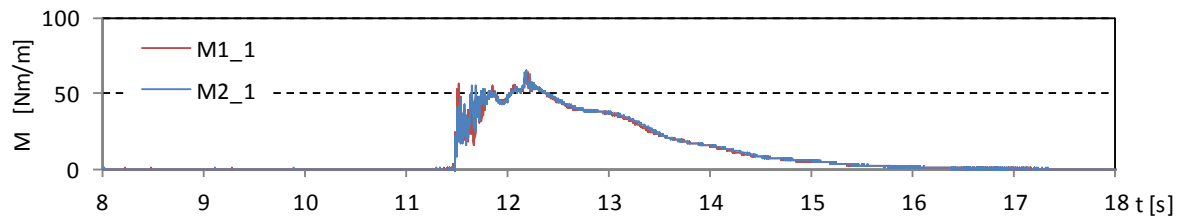
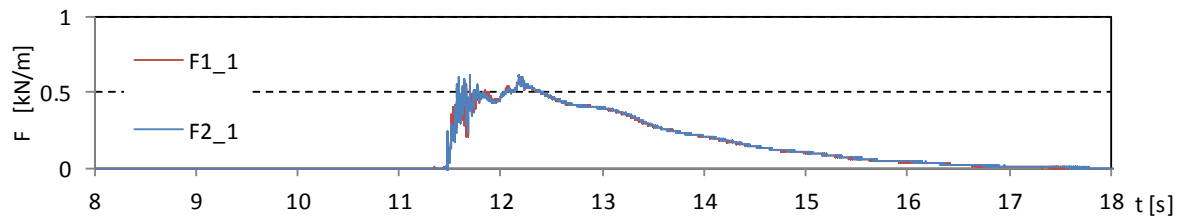
6.3. 波力・モーメントの時系列と最大波力作用時の圧力分布

図- 6.3.1～図- 6.3.4 に、津波波力・モーメントの時系列をまとめる。また、段波波力および持続波力最大時の段波波圧および持続波圧の鉛直分布を、図- 6.3.5～図- 6.3.8 に示す。前述したように、波圧の特性は、TypeB の結果とほぼ同じになることが確認できる。

Wc10



Wc11



Wc12

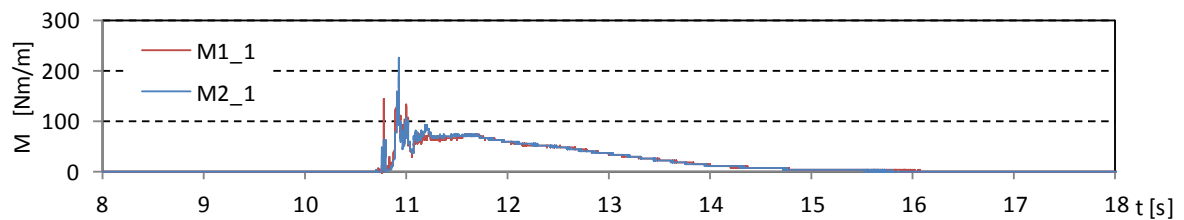
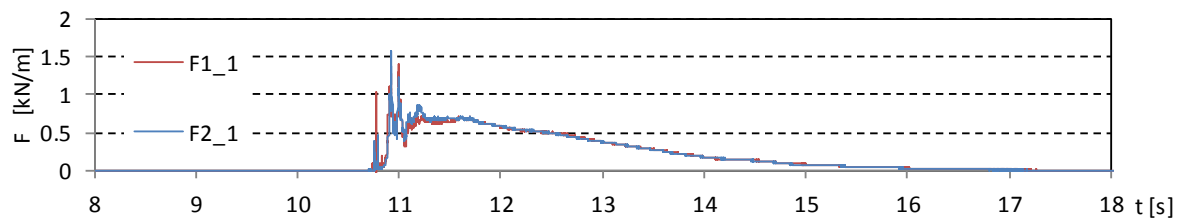


図- 6.3.1 津波波力の算出結果 (単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, 1 回目)

Wc13

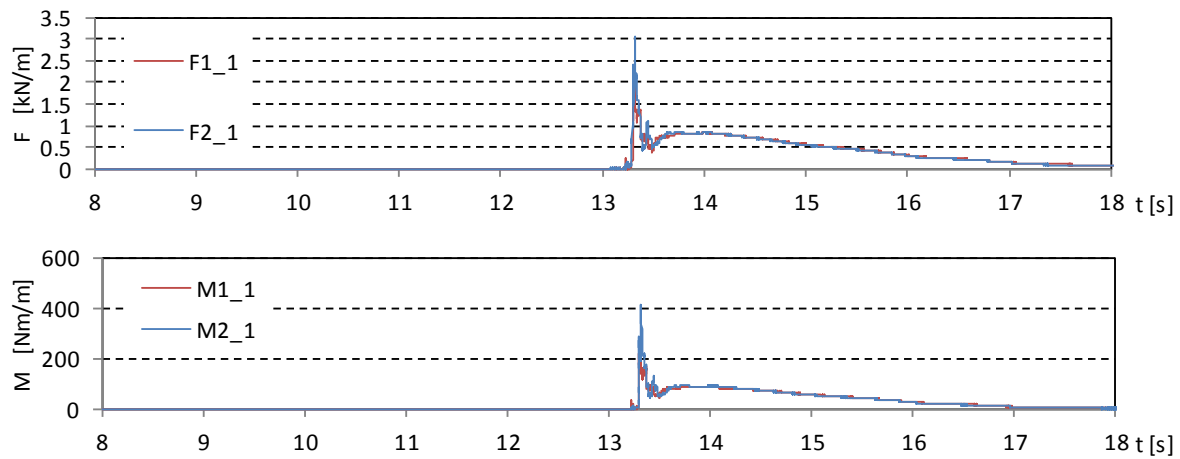
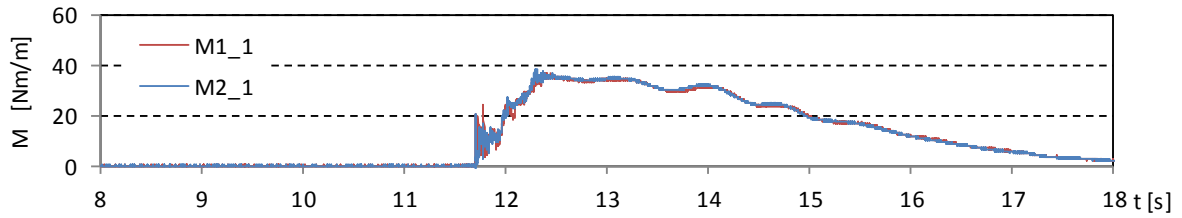
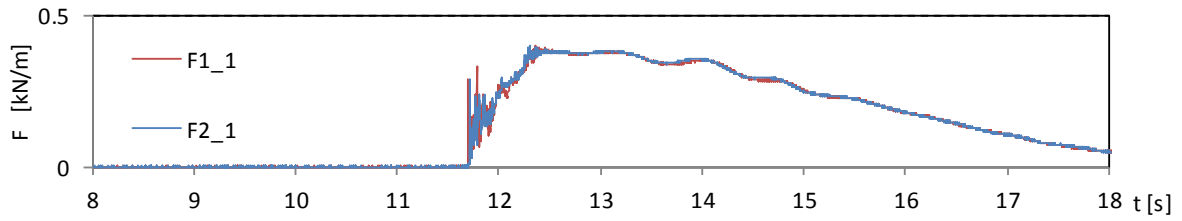
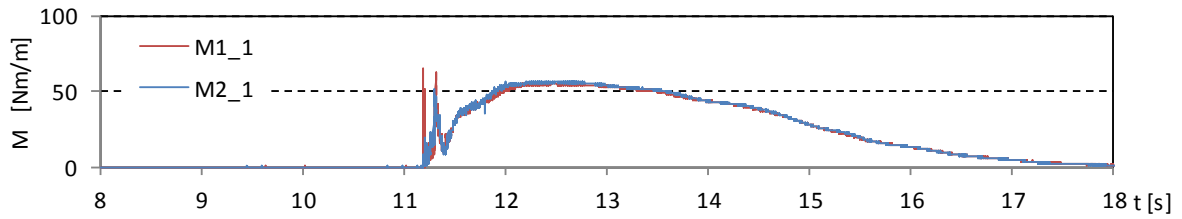
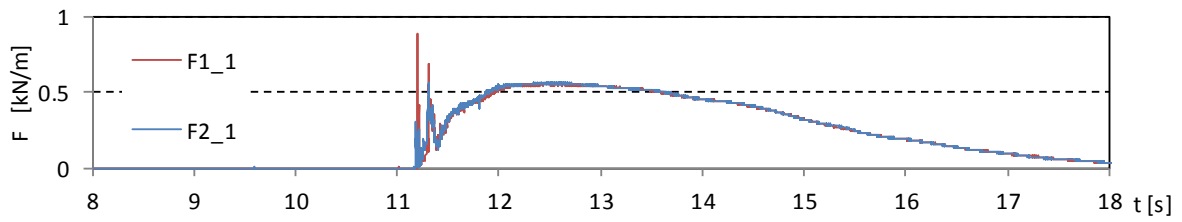


図- 6.3.1 津波波力の算出結果 (単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, 1 回目)

Wc20



Wc21



Wc22

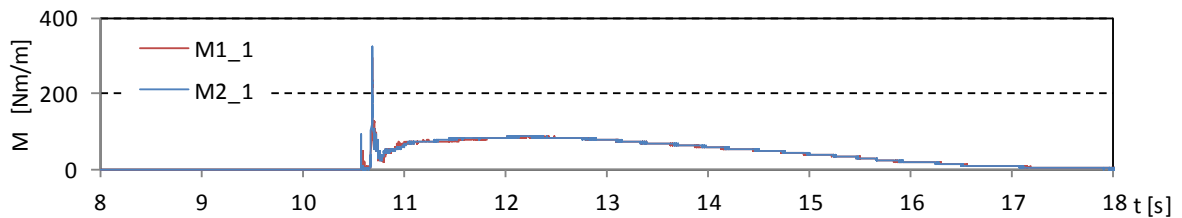
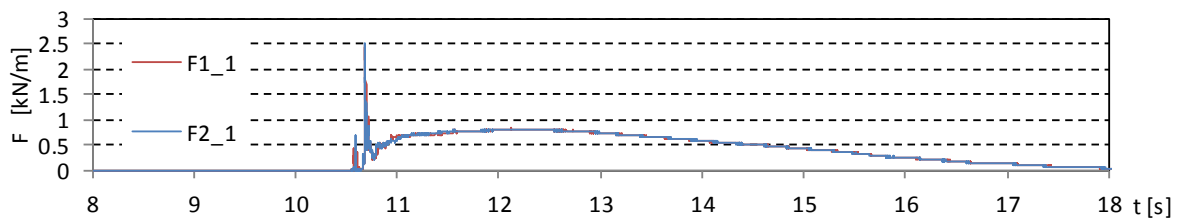
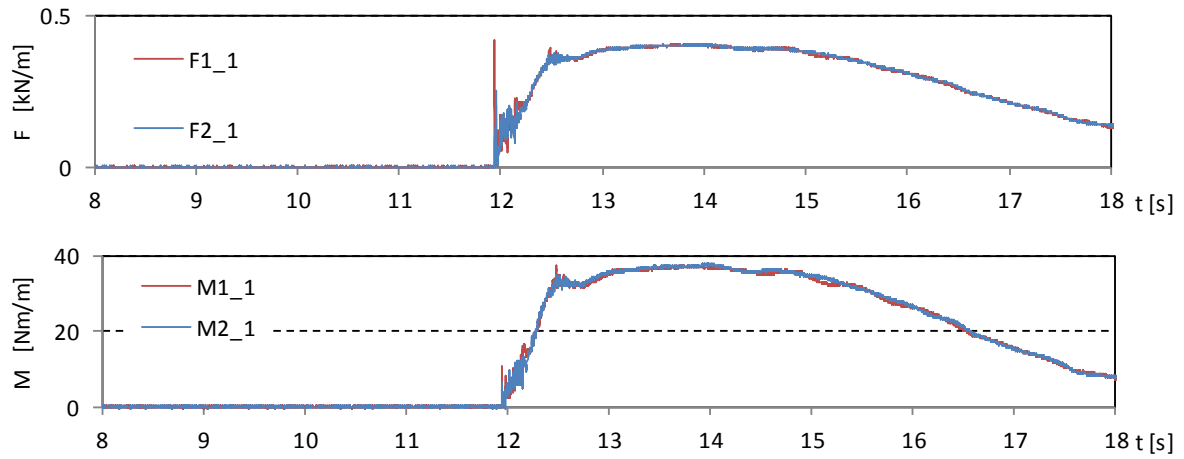
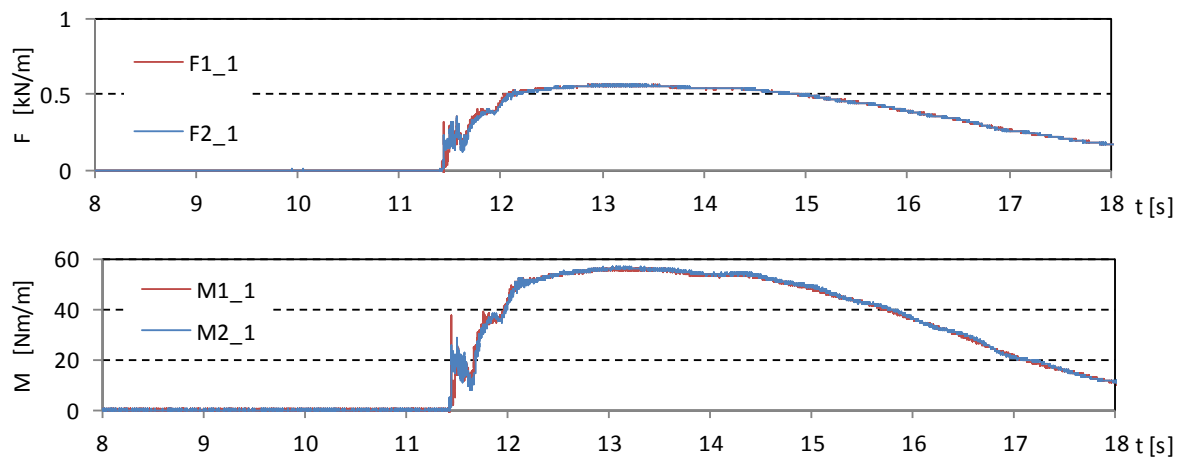


図- 6.3.1 津波波力の算出結果 (単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, 1 回目)

Wc30



Wc31



Wc32

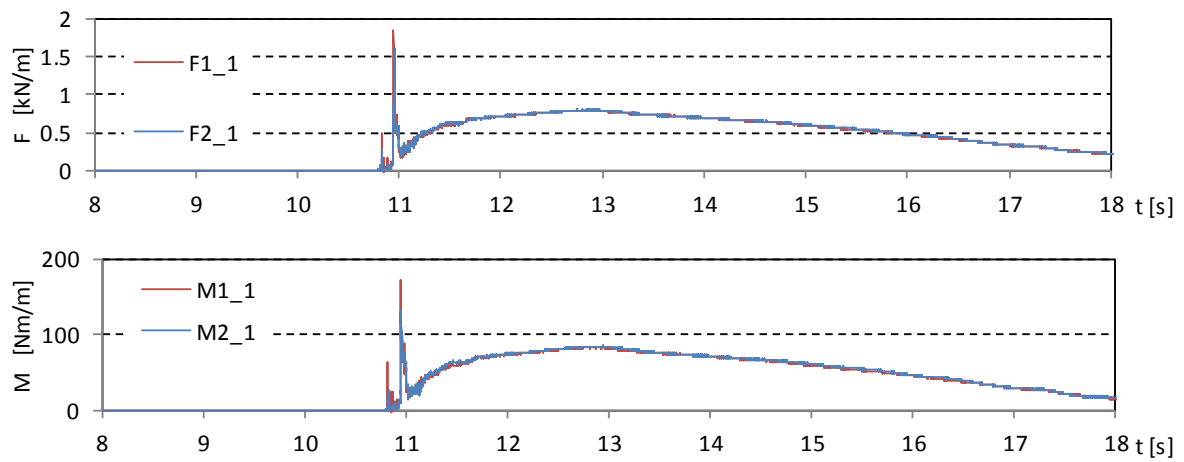
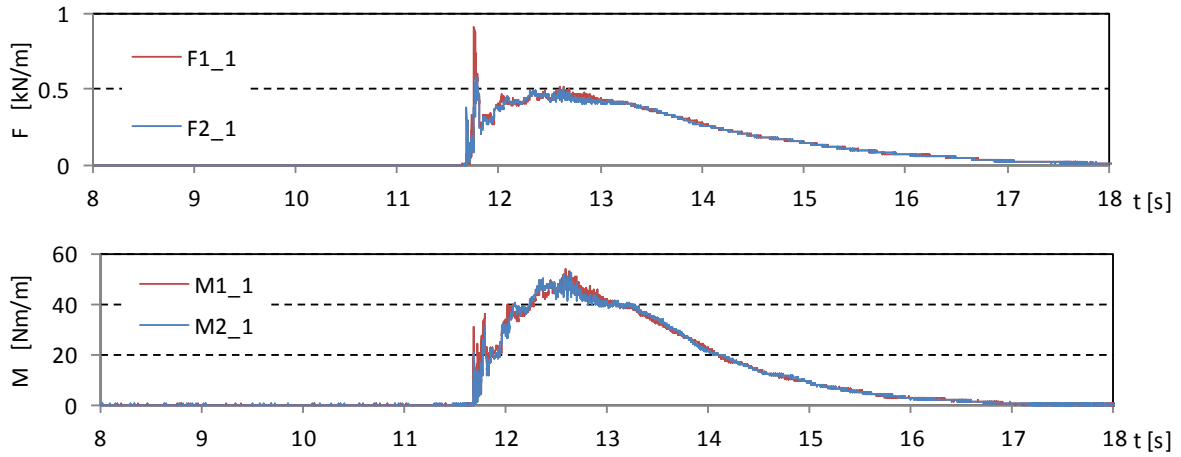
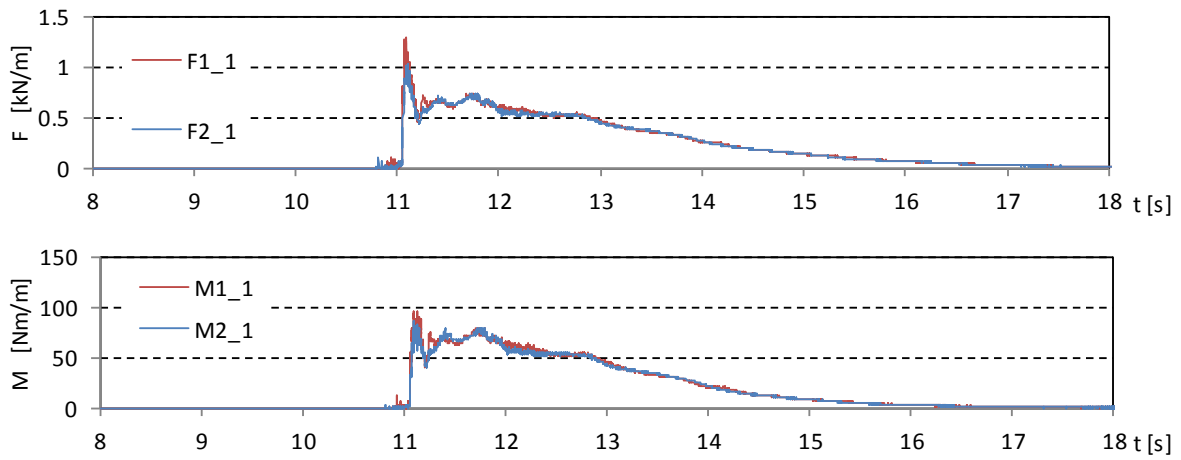


図- 6.3.1 津波波力の算出結果 (単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, 1 回目)

Wc11



Wc12



Wc13

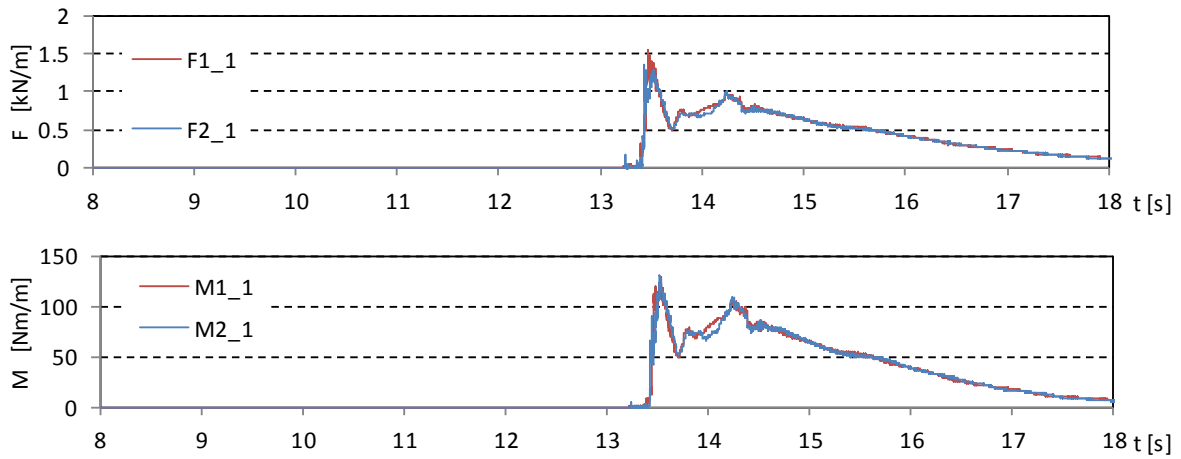
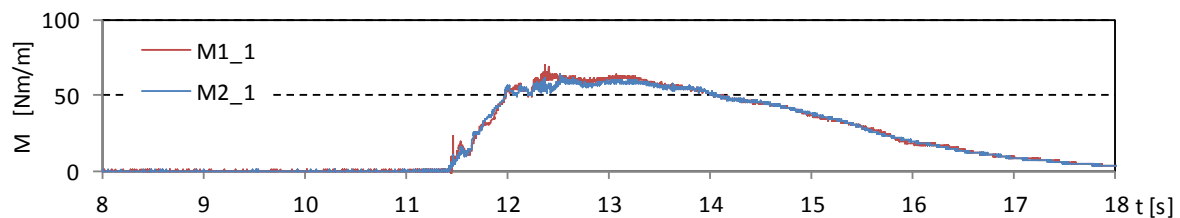
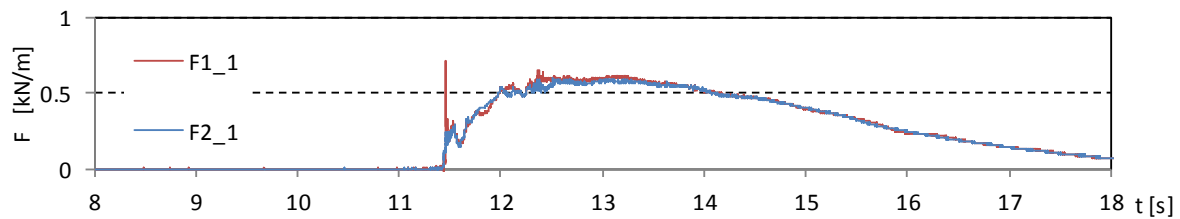


図- 6.3.2 津波波力の算出結果 (単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m, 1回目)

Wc21



Wc22

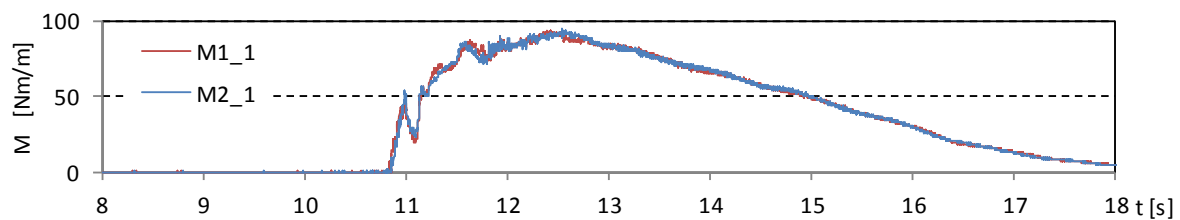
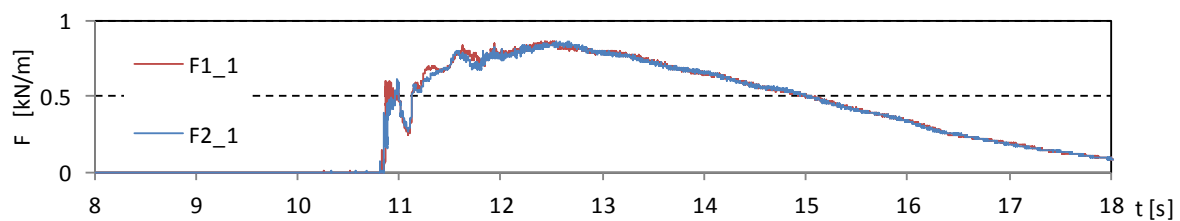
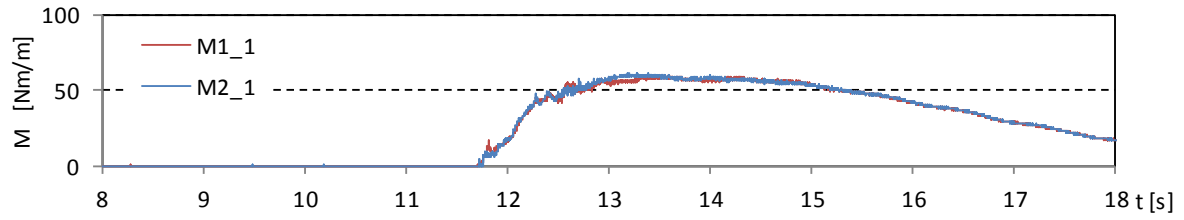
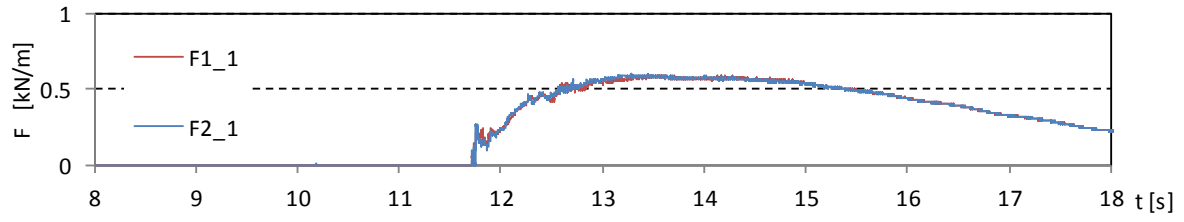


図- 6.3.2 津波波力の算出結果 (単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m, 1 回目)

Wc31



Wc32

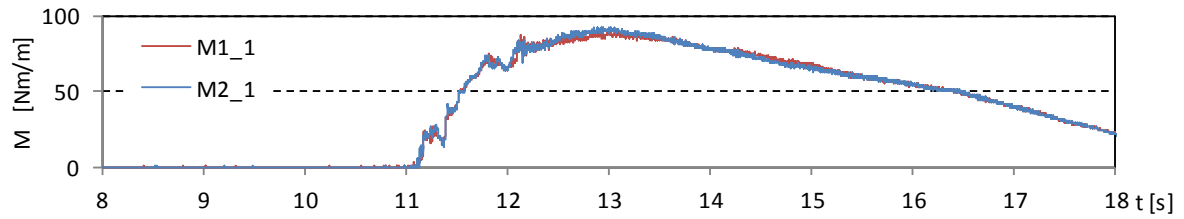
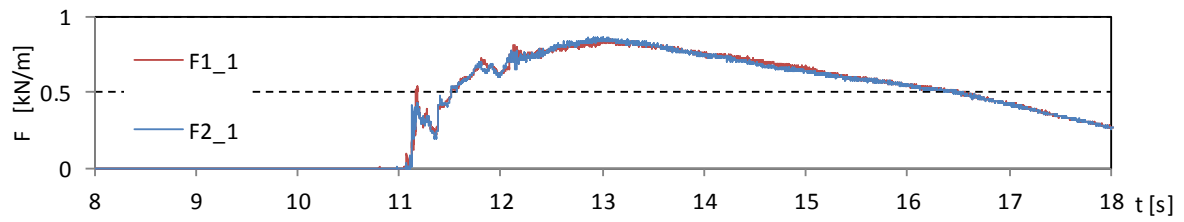
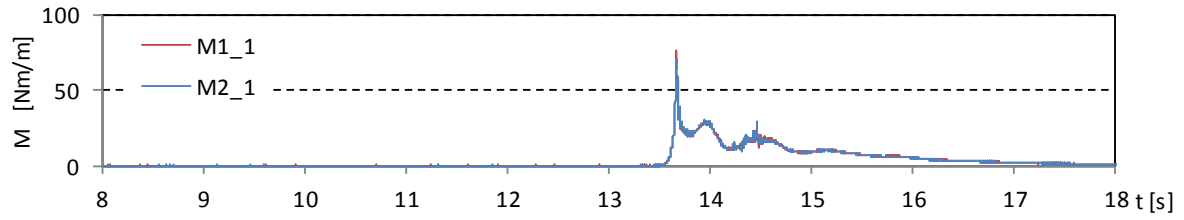
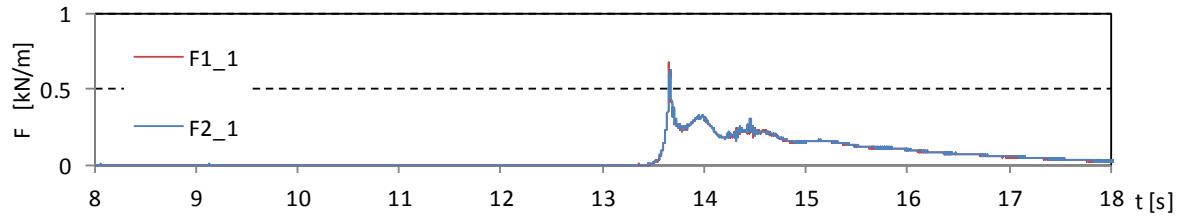
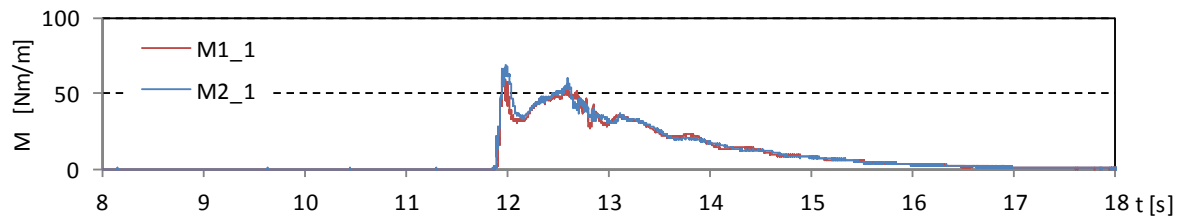
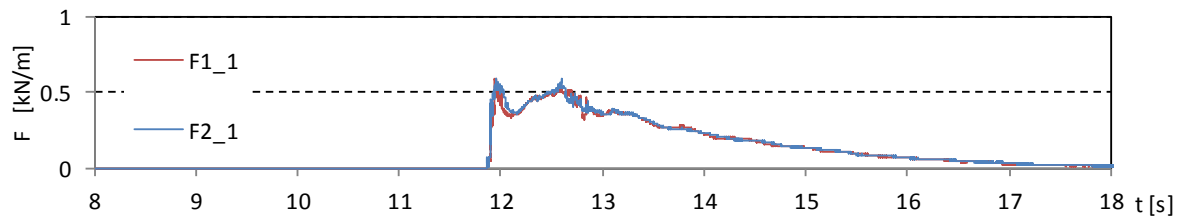


図- 6.3.2 津波波力の算出結果 (単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m, 1 回目)

Wc10



Wc11



Wc12

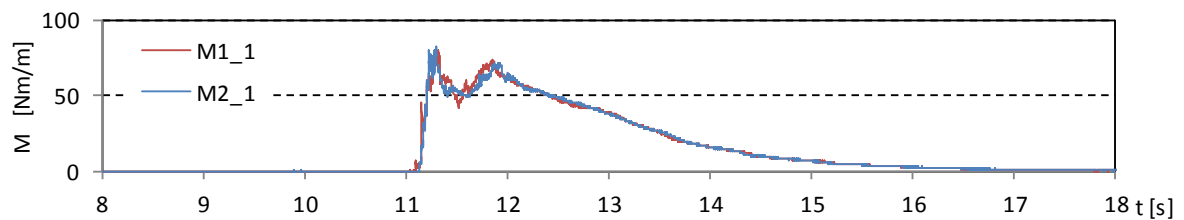
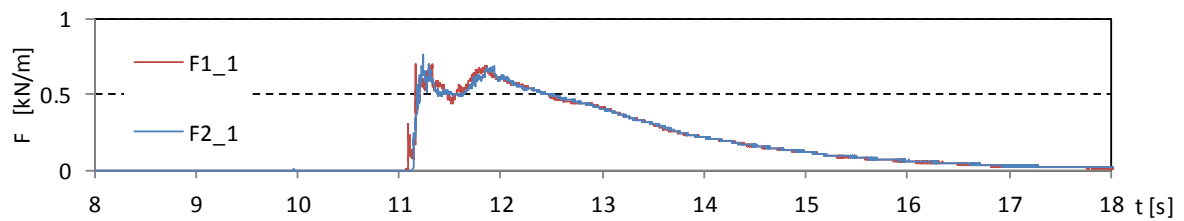
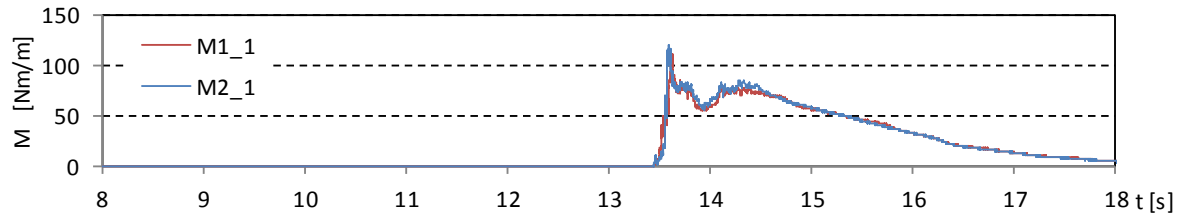
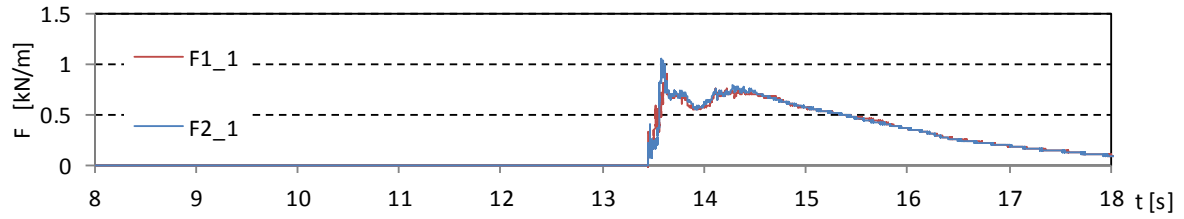
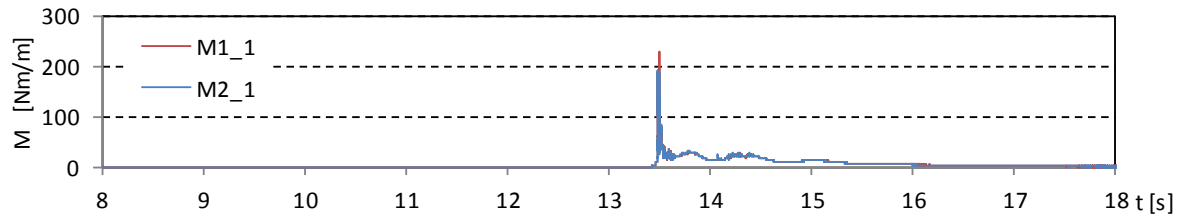
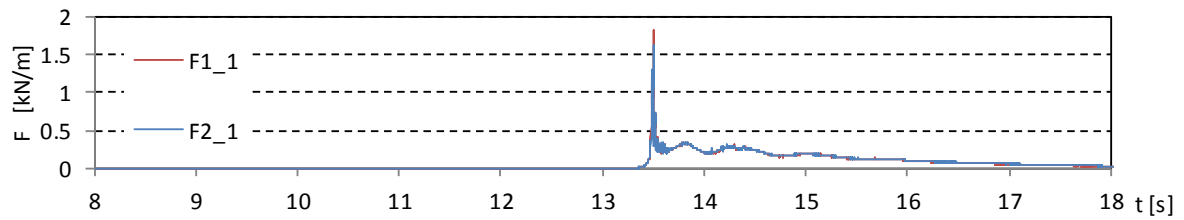


図- 6.3.3 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, 1 回目)

Wc13



Wc14



Wc15

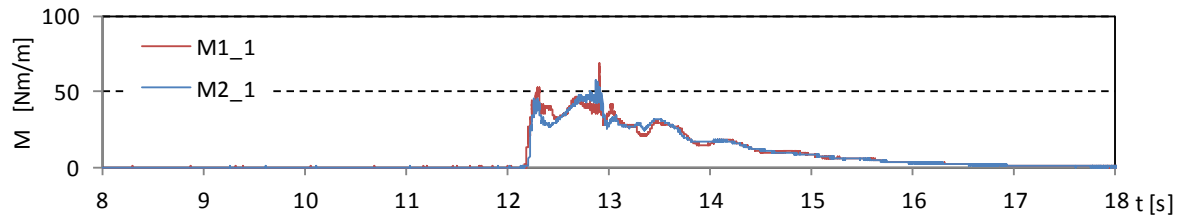
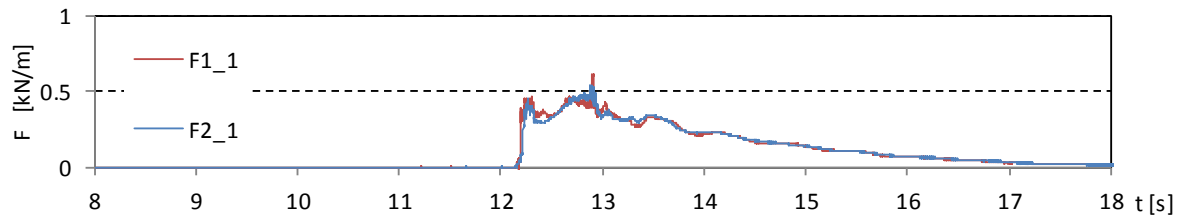
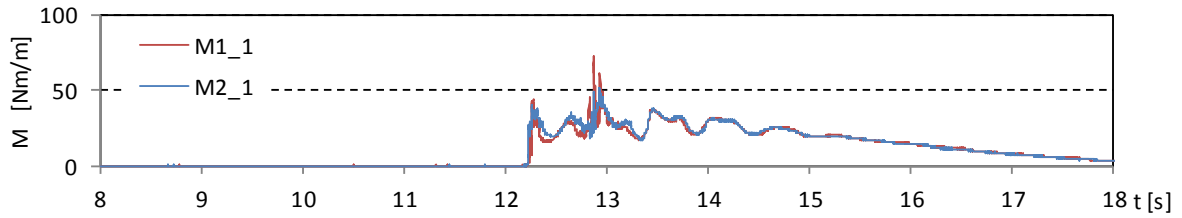
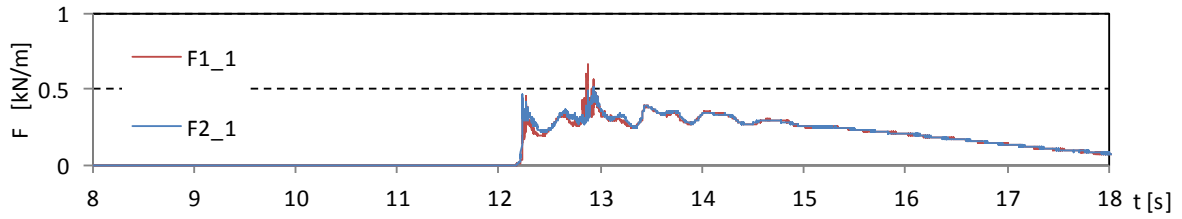
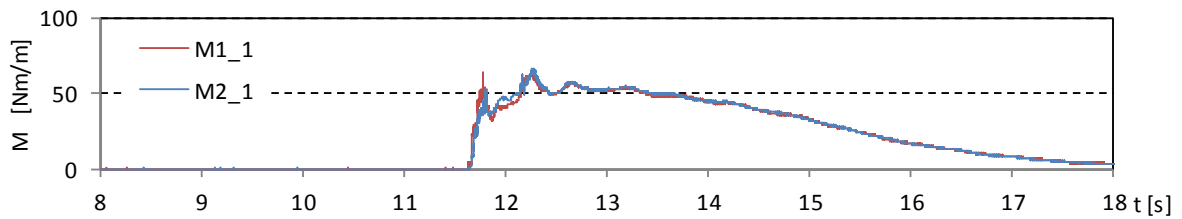
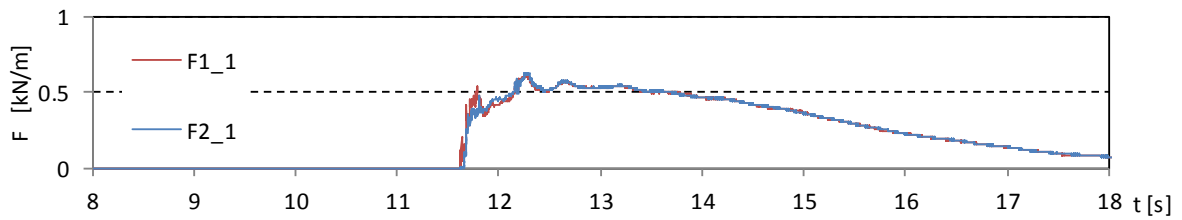


図- 6.3.3 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, 1 回目)

Wc20



Wc21



Wc22

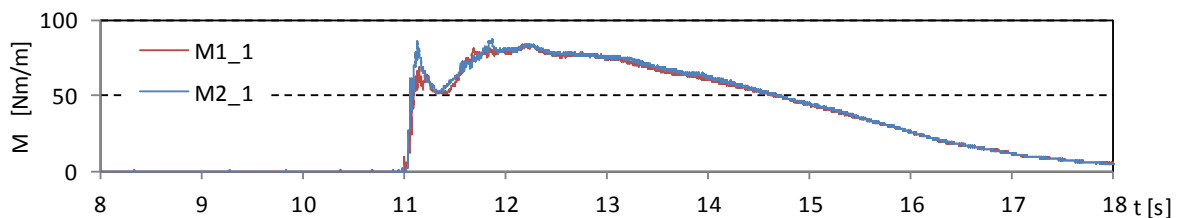
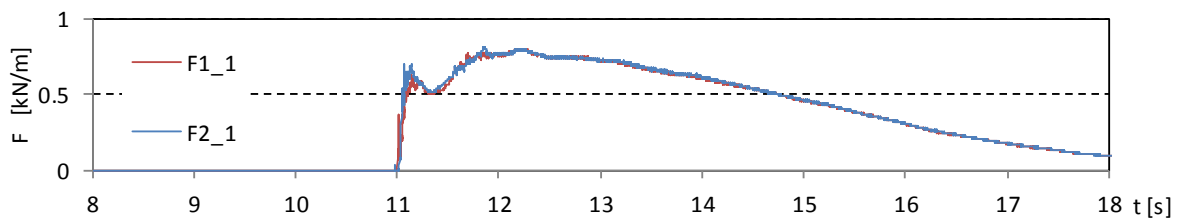
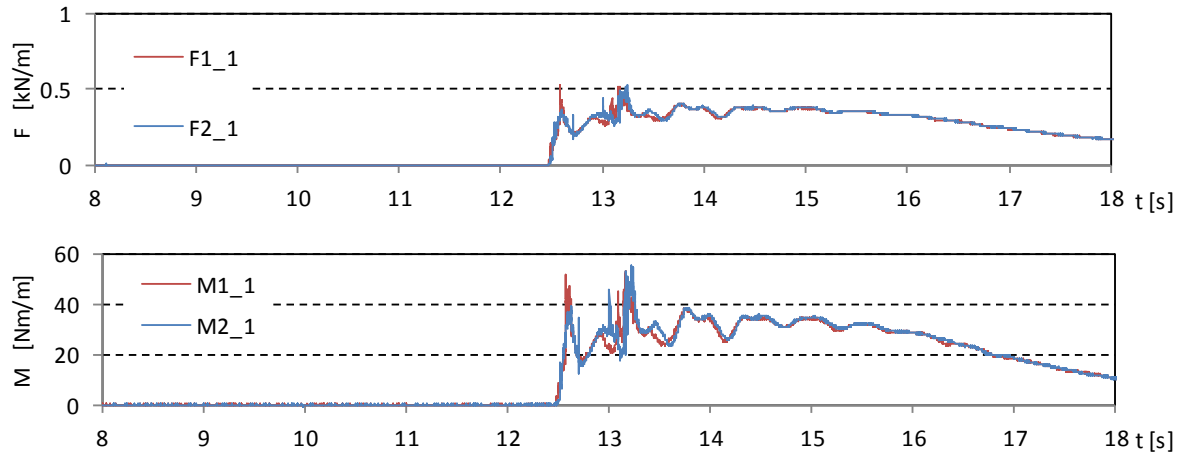
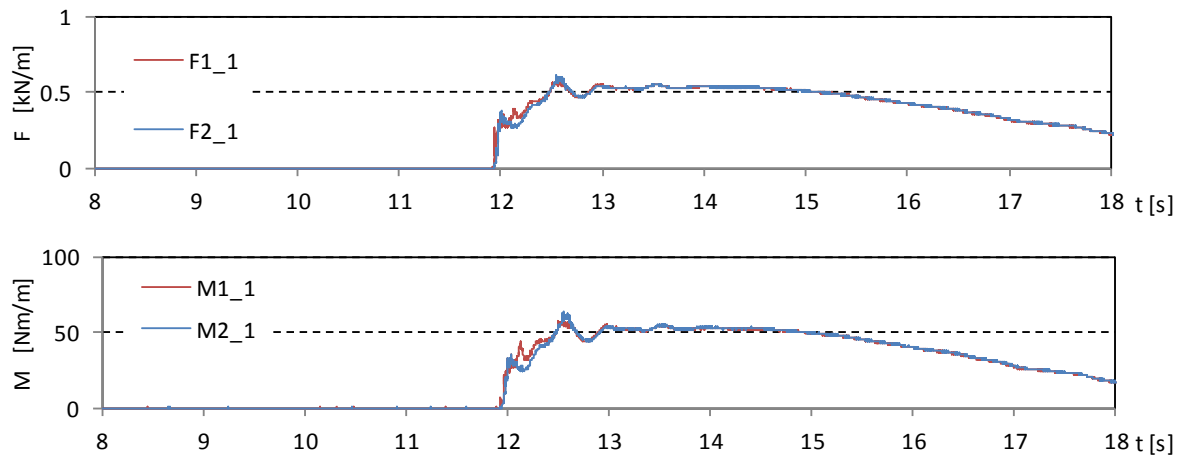


図- 6.3.3 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, 1 回目)

Wc30



Wc31



Wc32

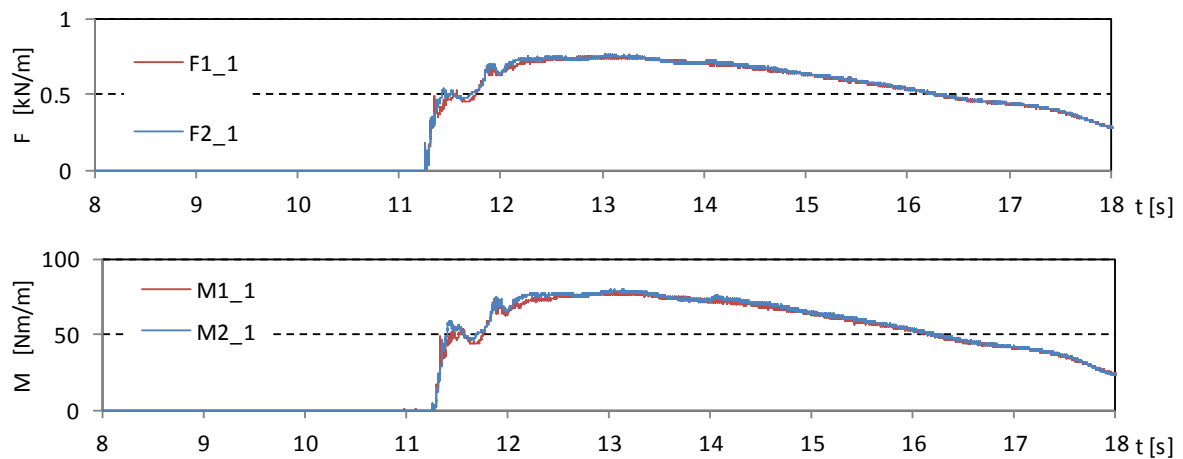
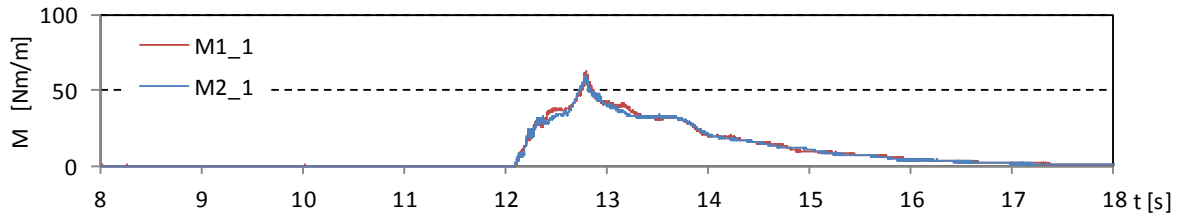
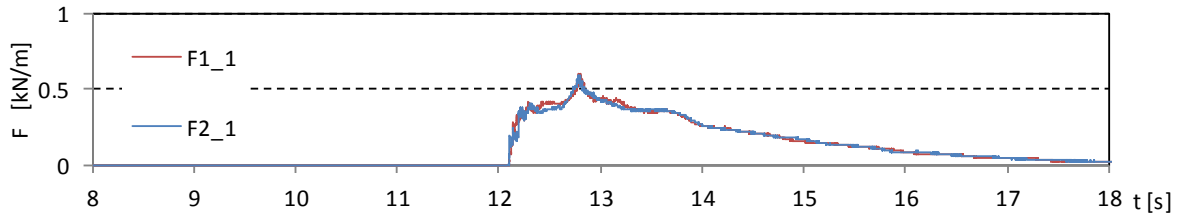
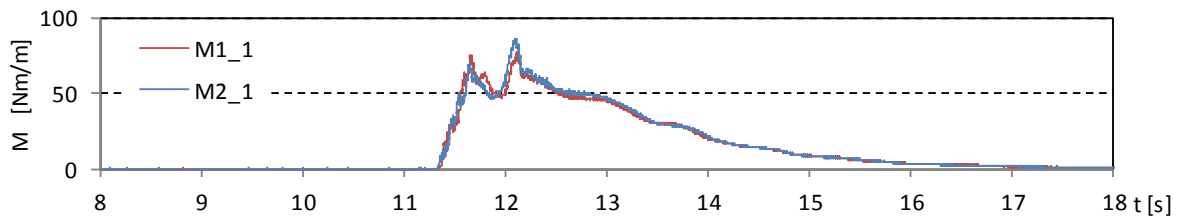
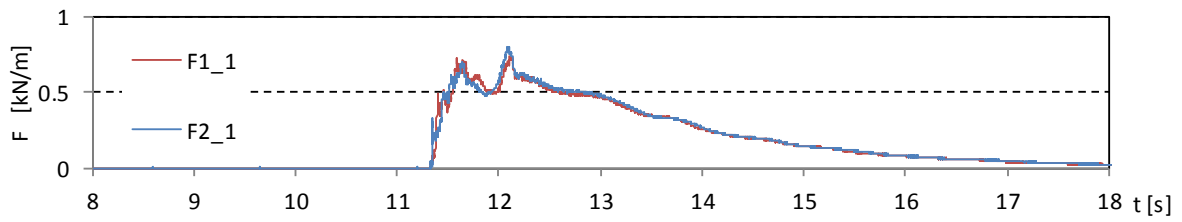


図- 6.3.3 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, 1 回目)

Wc11



Wc12



Wc13

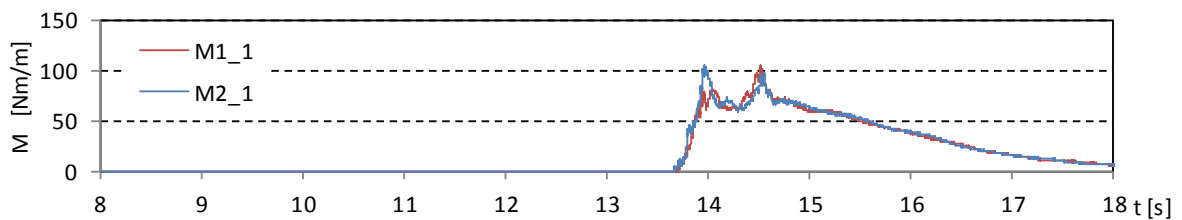
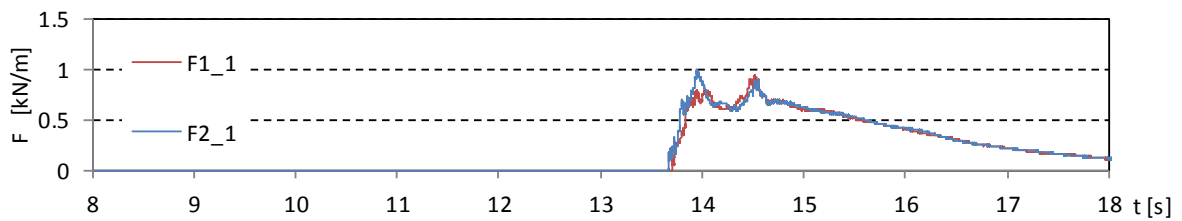
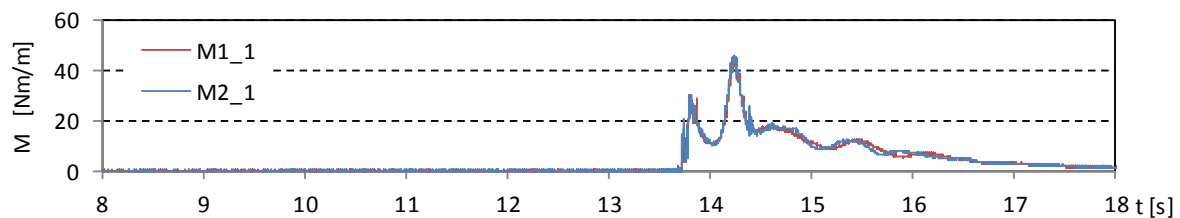
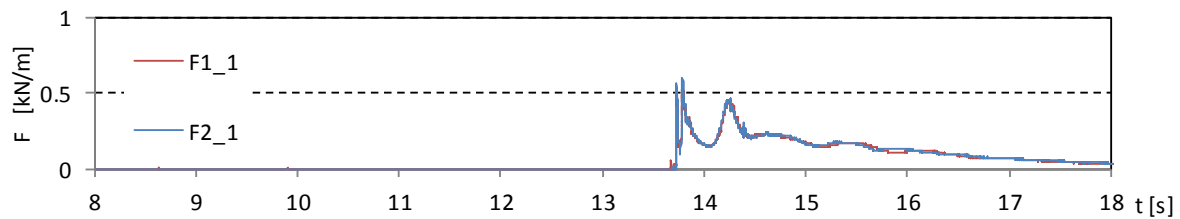


図- 6.3.4 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m, 1回目)

Wc14



Wc15

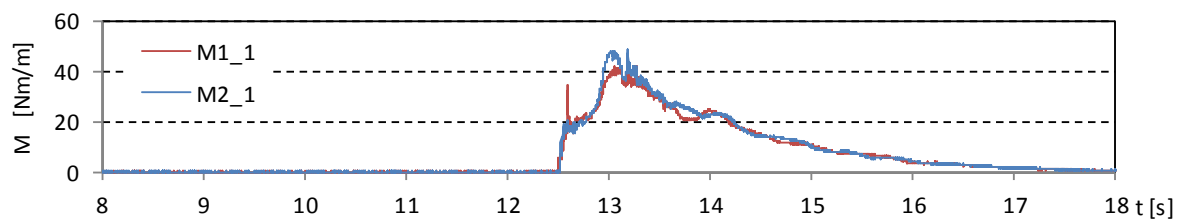
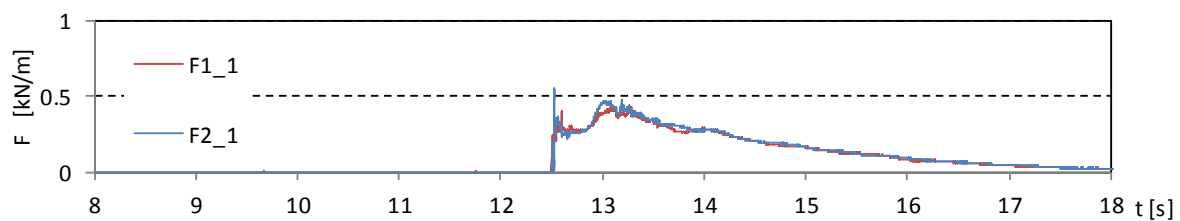
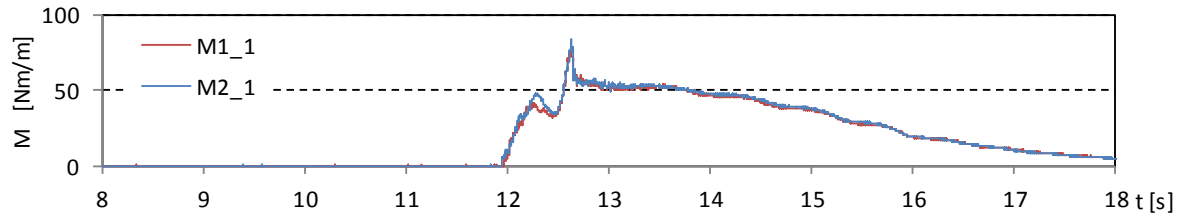
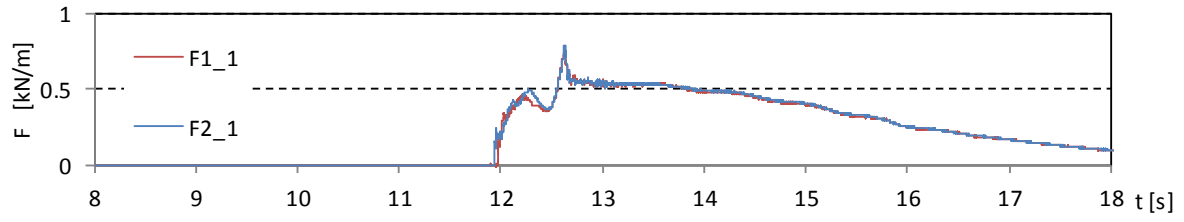


図- 6.3.4 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m, 1 回目)

Wc21



Wc22

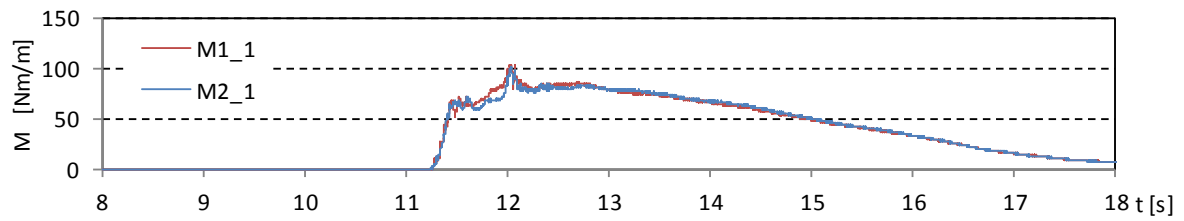
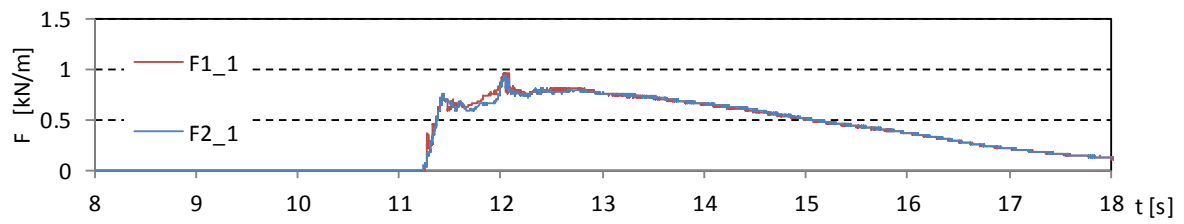
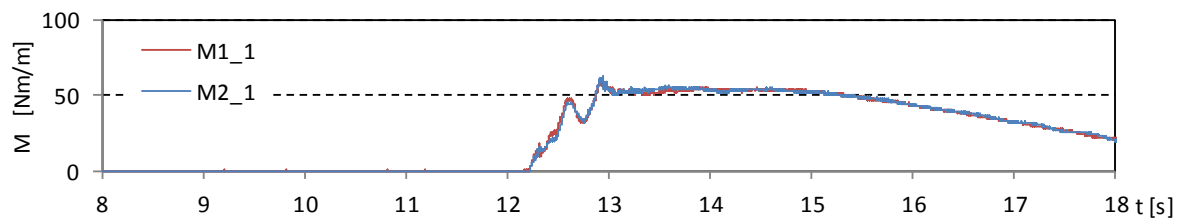
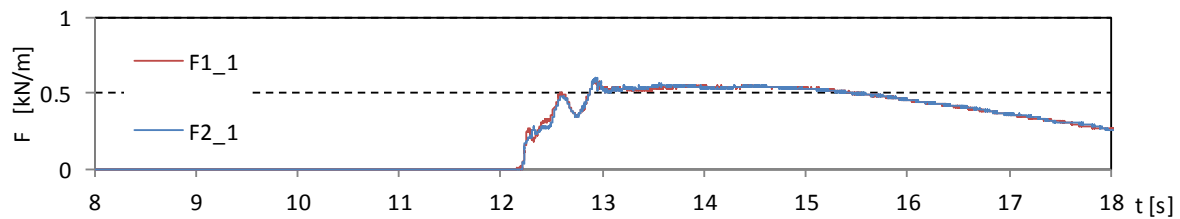


図- 6.3.4 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m, 1 回目)

Wc31



Wc32

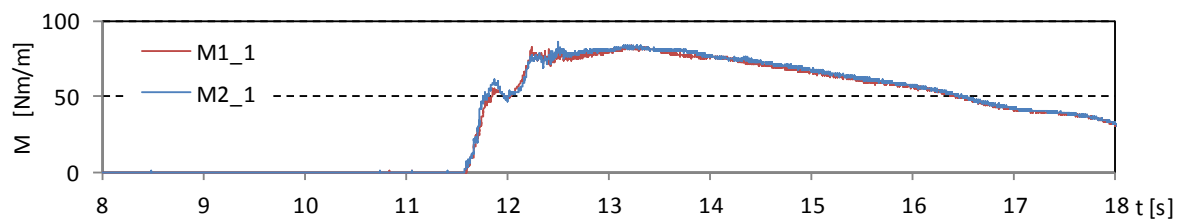
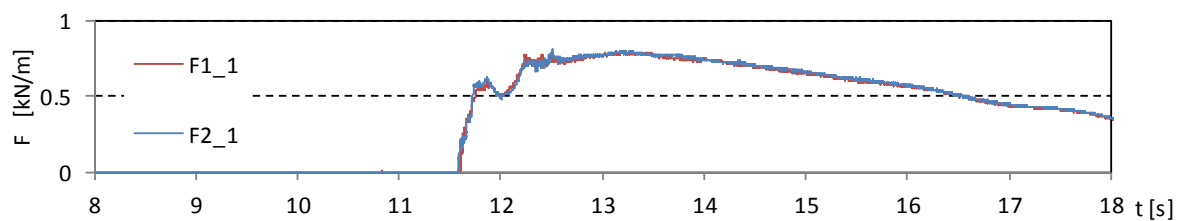


図- 6.3.4 津波波力の算出結果 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m, 1 回目)

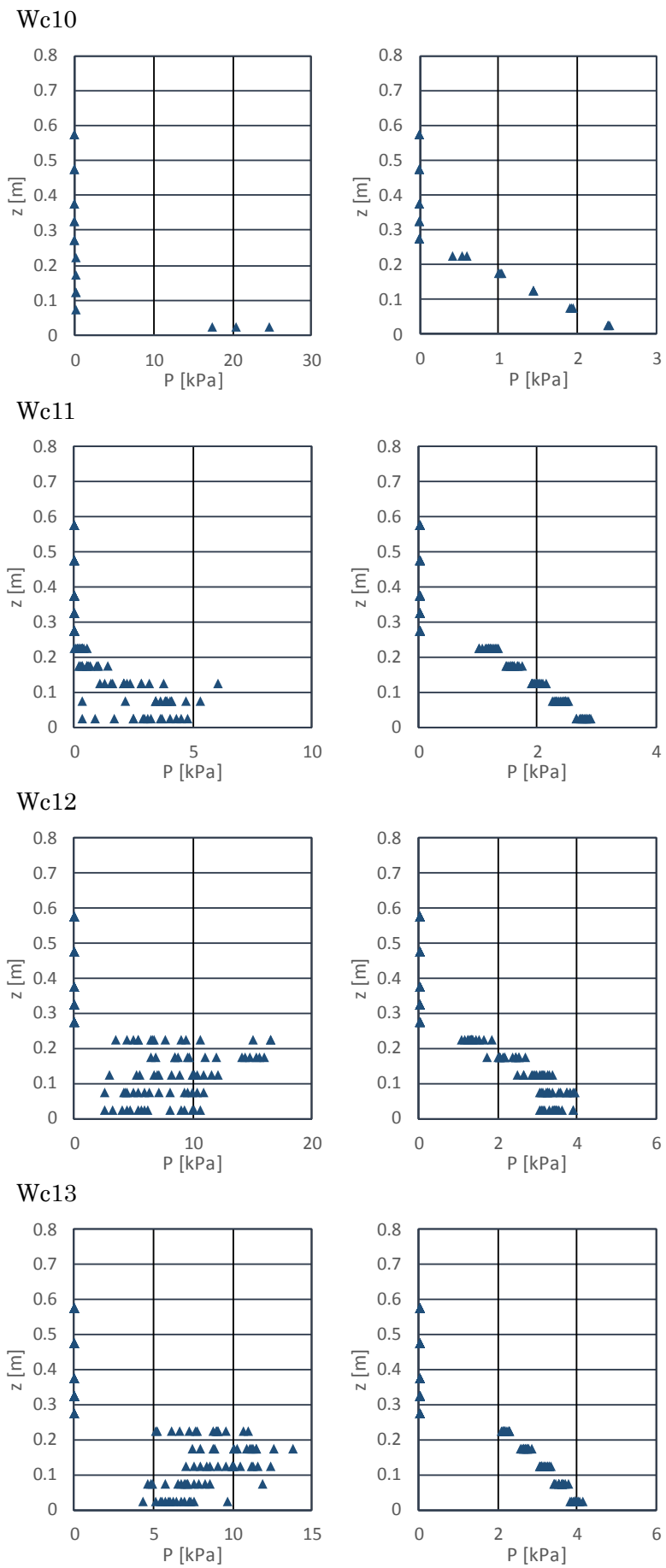


図- 6.3.5 圧力の鉛直分布 (左 : 段波波圧, 右 : 持続波圧, 単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0m)

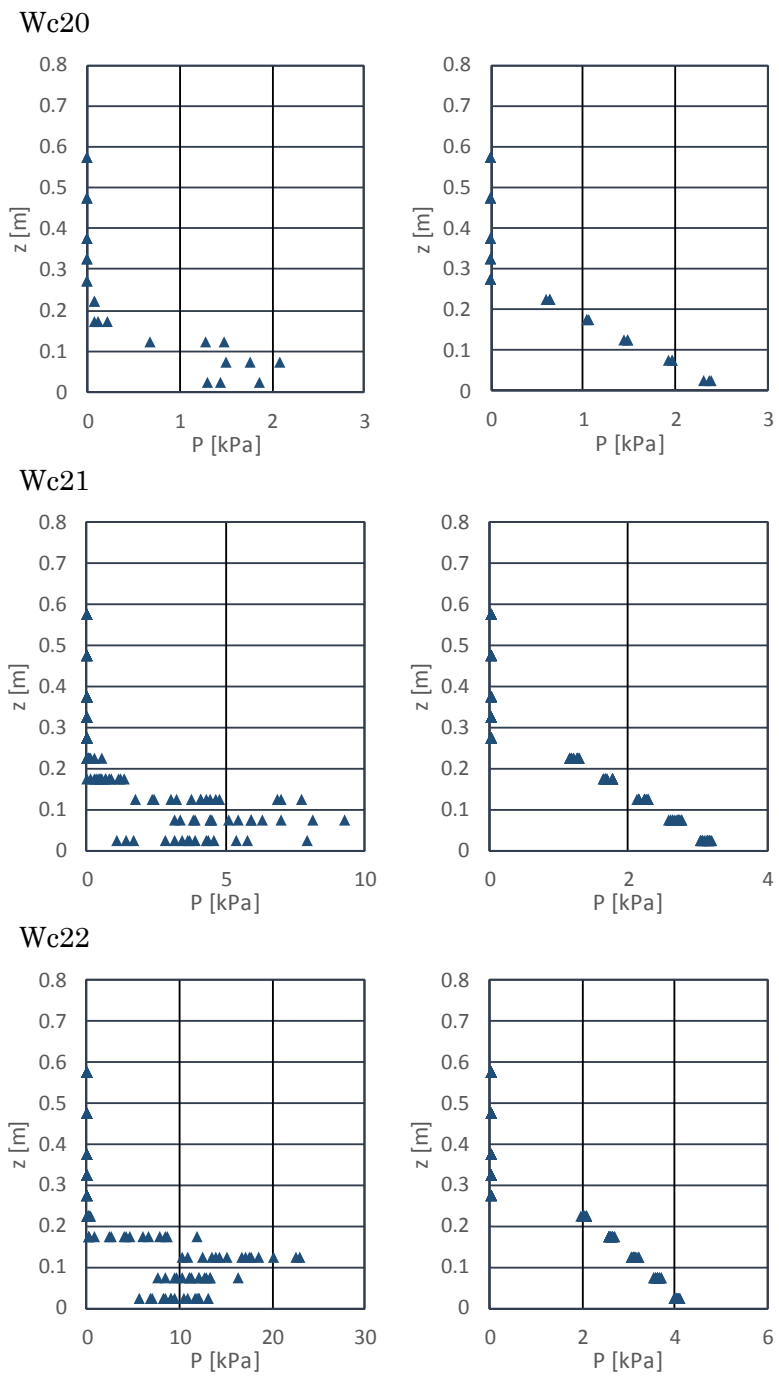


図- 6.3.5 圧力の鉛直分布 (左: 段波波圧, 右: 持続波圧, 単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0m)

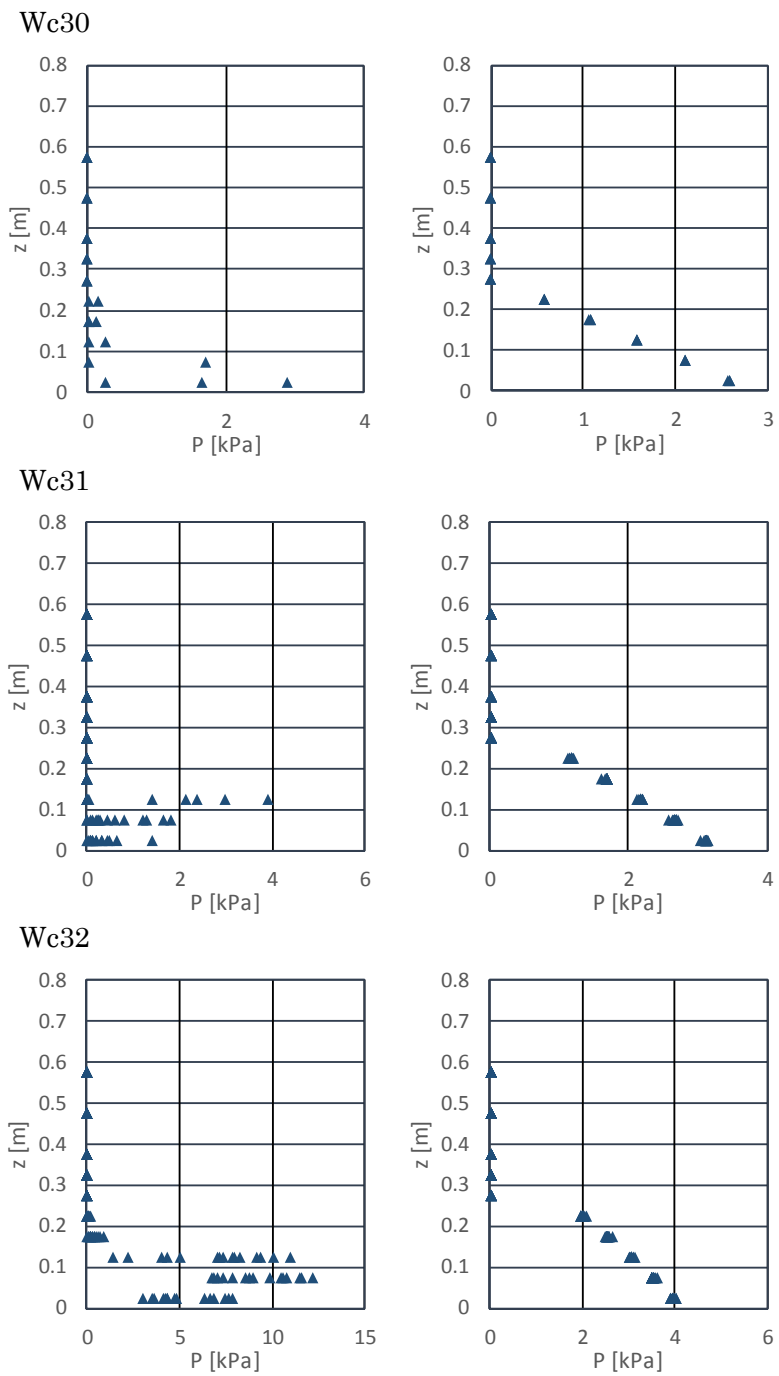


図- 6.3.5 圧力の鉛直分布 (左: 段波波圧, 右: 持続波波圧, 単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0m)

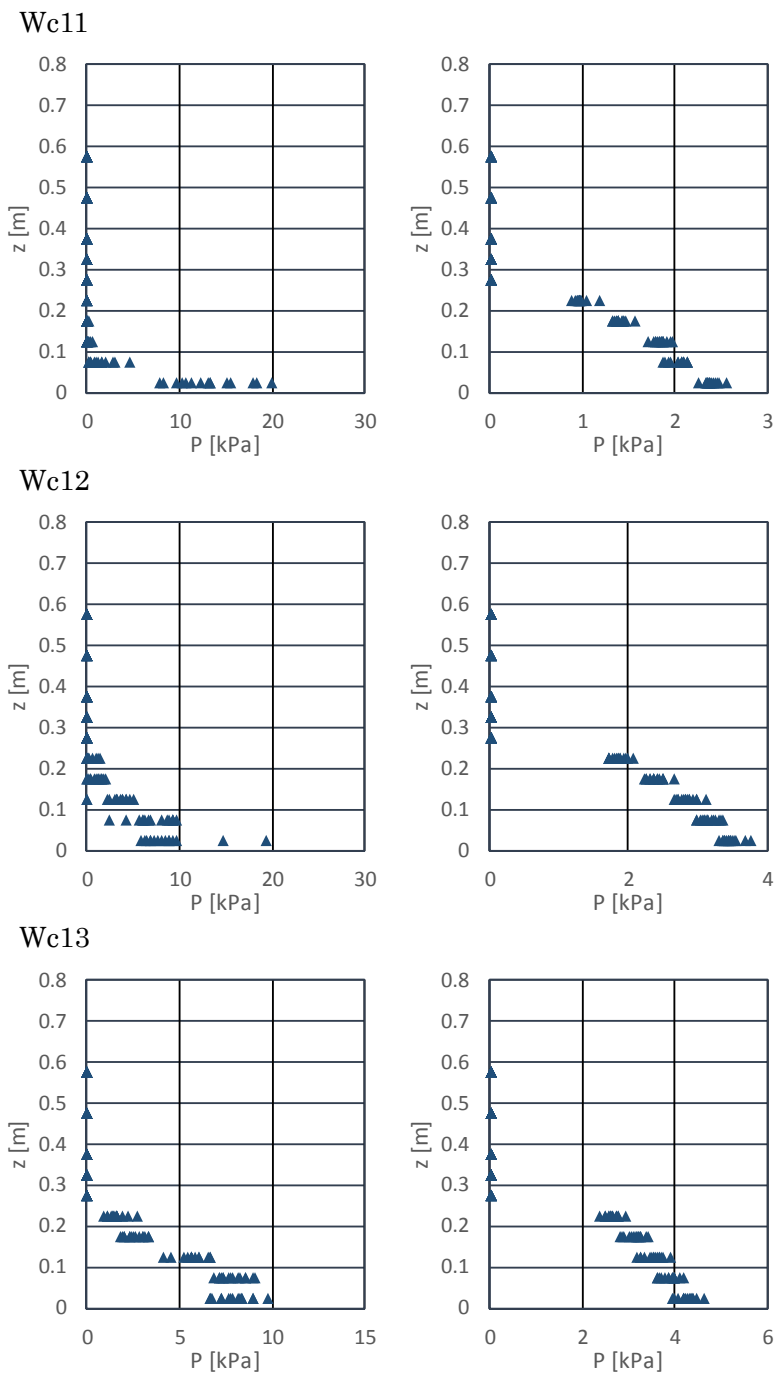


図- 6.3.6 圧力の鉛直分布(左:段波波圧, 右:持続波圧, 単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m)

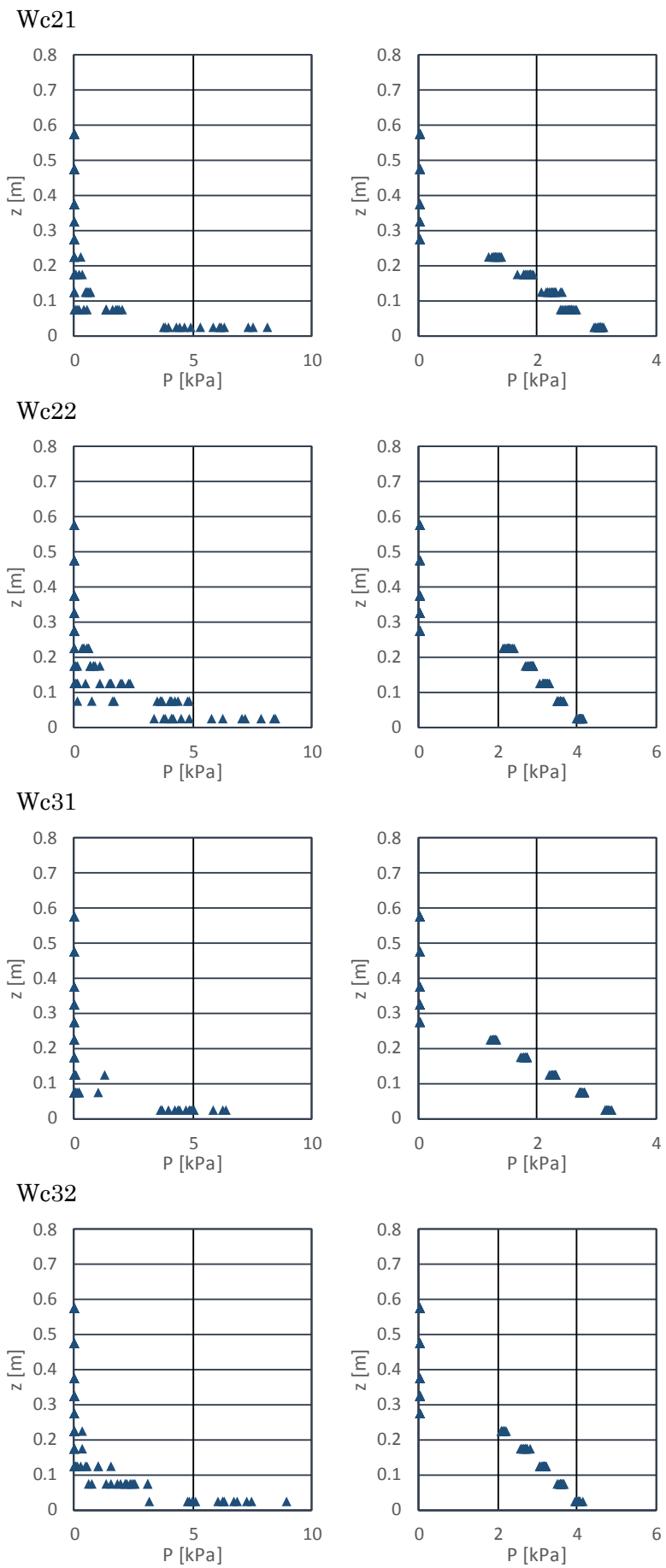


図- 6.3.6 圧力の鉛直分布(左:段波波圧,右:持続波圧,単純勾配,堤体 TypeC,設置位置 0.625m)

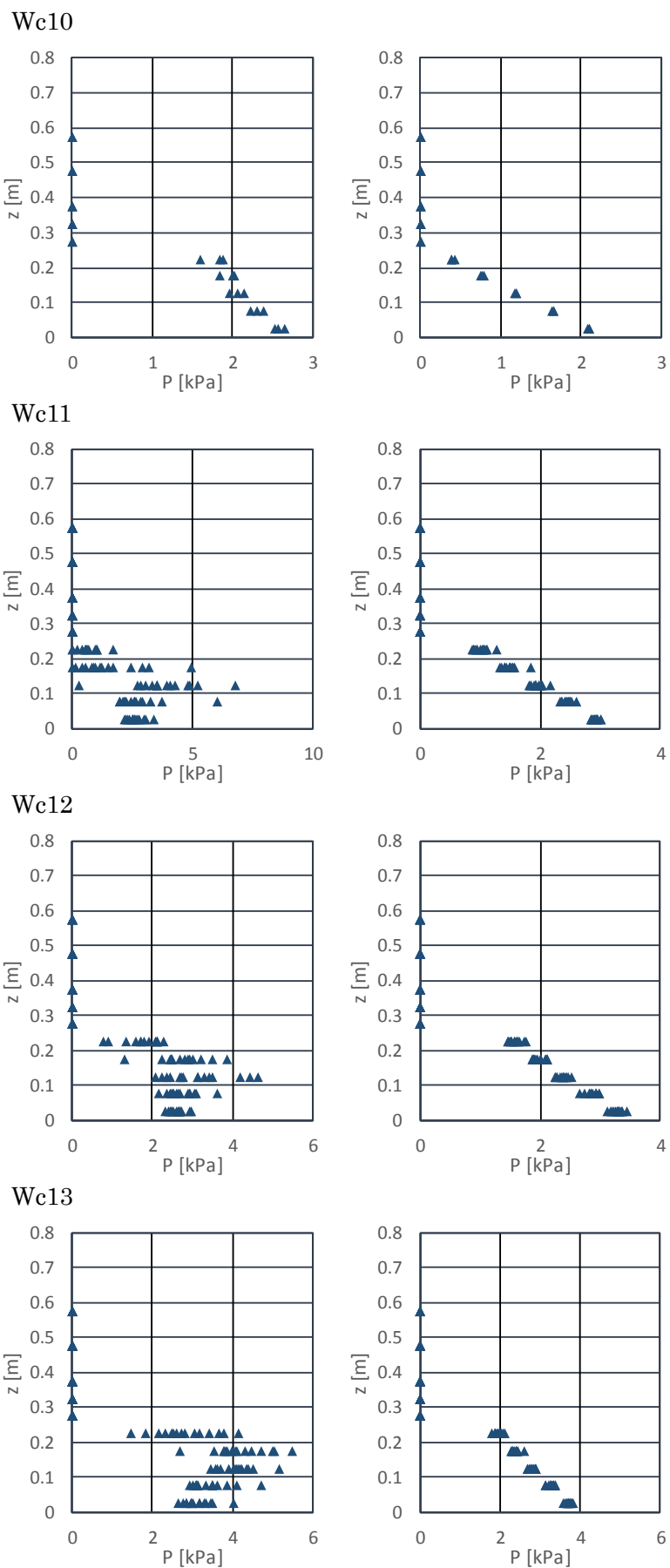


図- 6.3.7 圧力の鉛直分布 (左 : 段波波圧, 右 : 持続波圧, 直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0m)

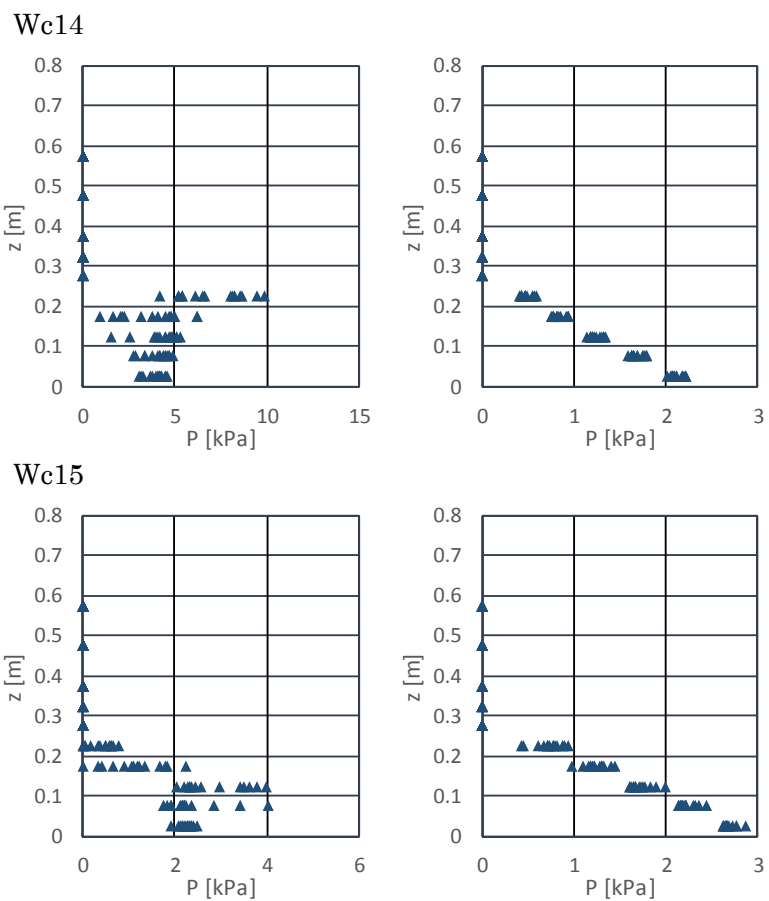
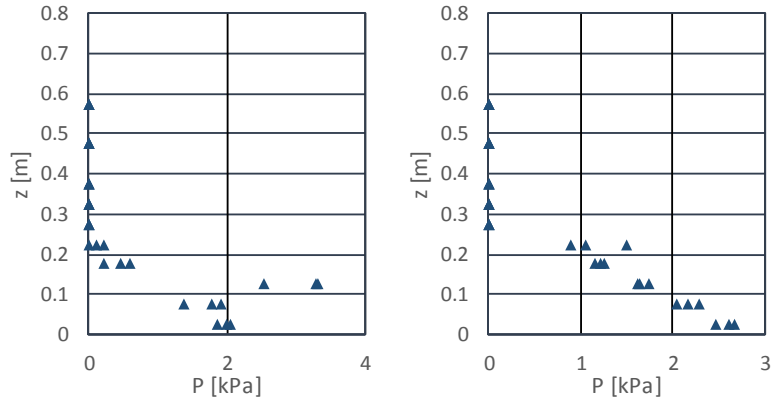
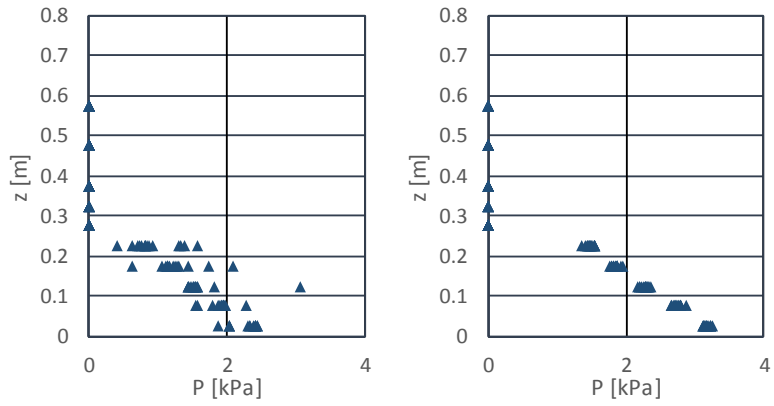


図- 6.3.7 圧力の鉛直分布 (左 : 段波波圧, 右 : 持続波圧, 直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0m)

Wc20



Wc21



Wc22

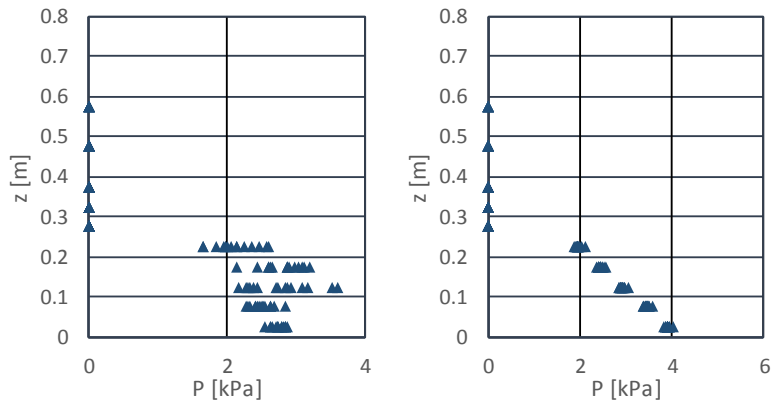
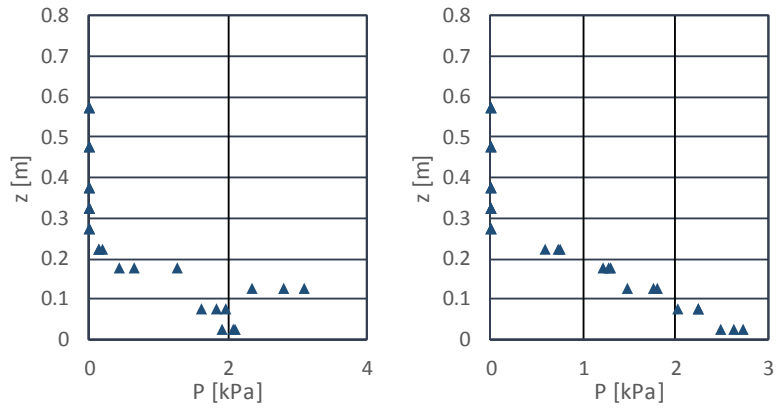
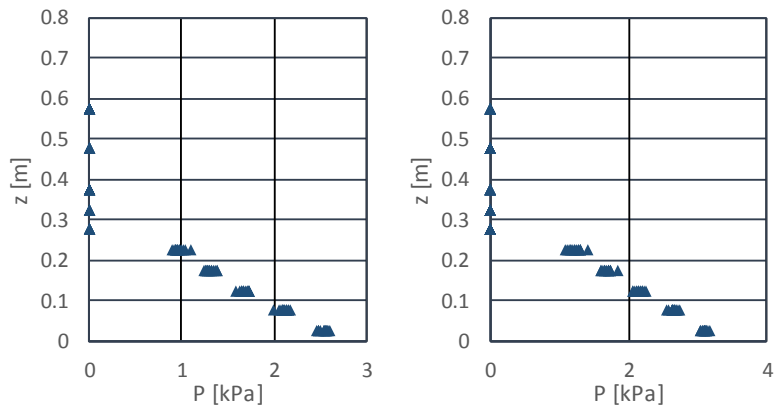


図- 6.3.7 圧力の鉛直分布 (左: 段波波圧, 右: 持続波圧, 直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0m)

Wc30



Wc31



Wc32

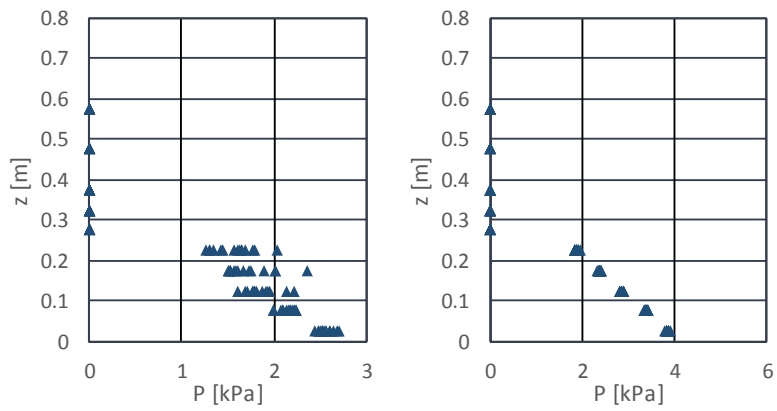


図- 6.3.7 圧力の鉛直分布 (左: 段波波圧, 右: 持続波圧, 直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0m)

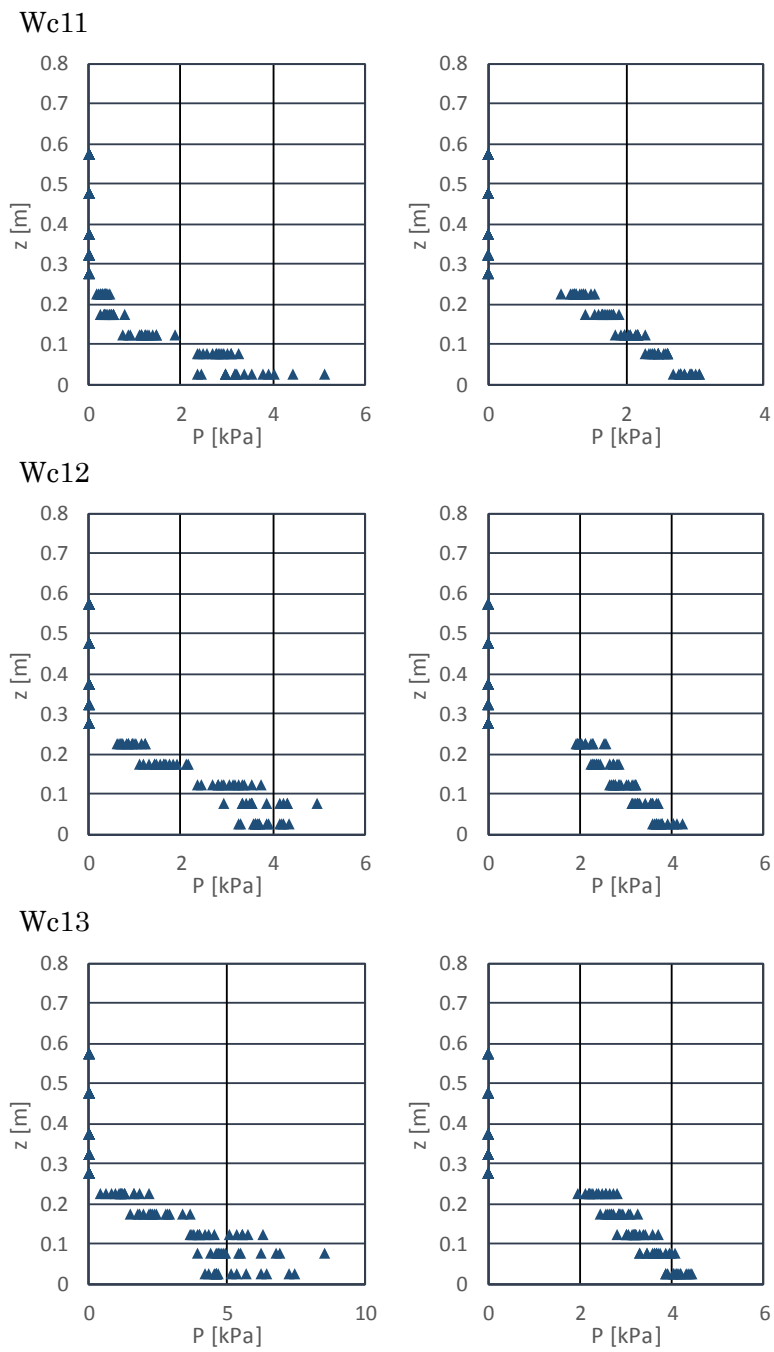


図- 6.3.8 圧力の鉛直分布(左:段波波圧,右:持続波圧,直立護岸,堤体 TypeC,設置位置 0.625m)

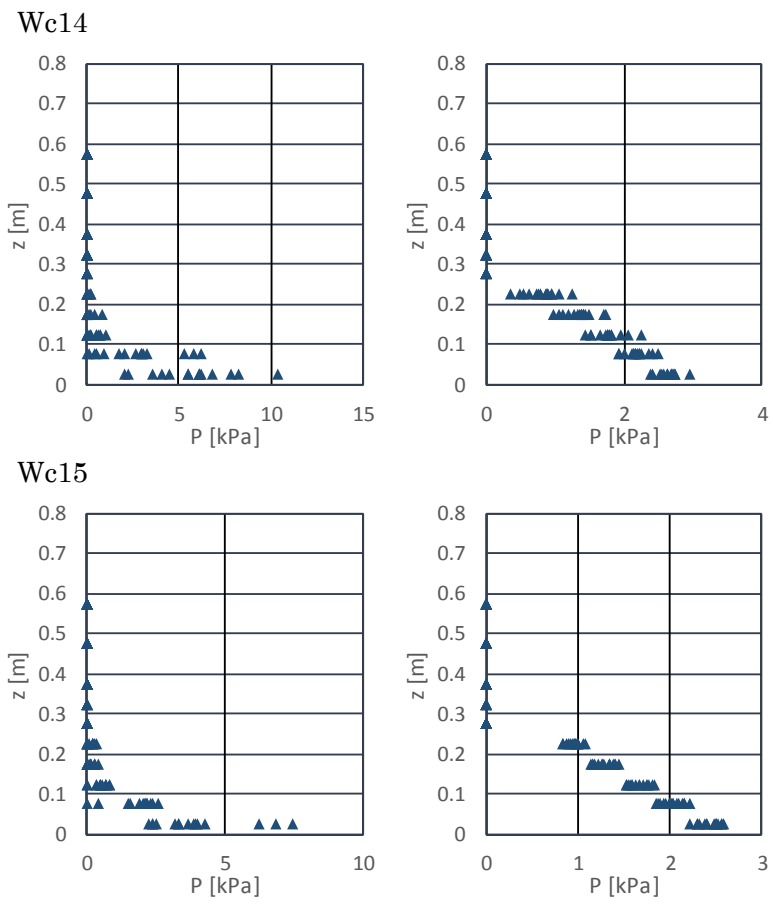


図- 6.3.8 圧力の鉛直分布(左:段波波圧, 右:持続波圧, 直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m)

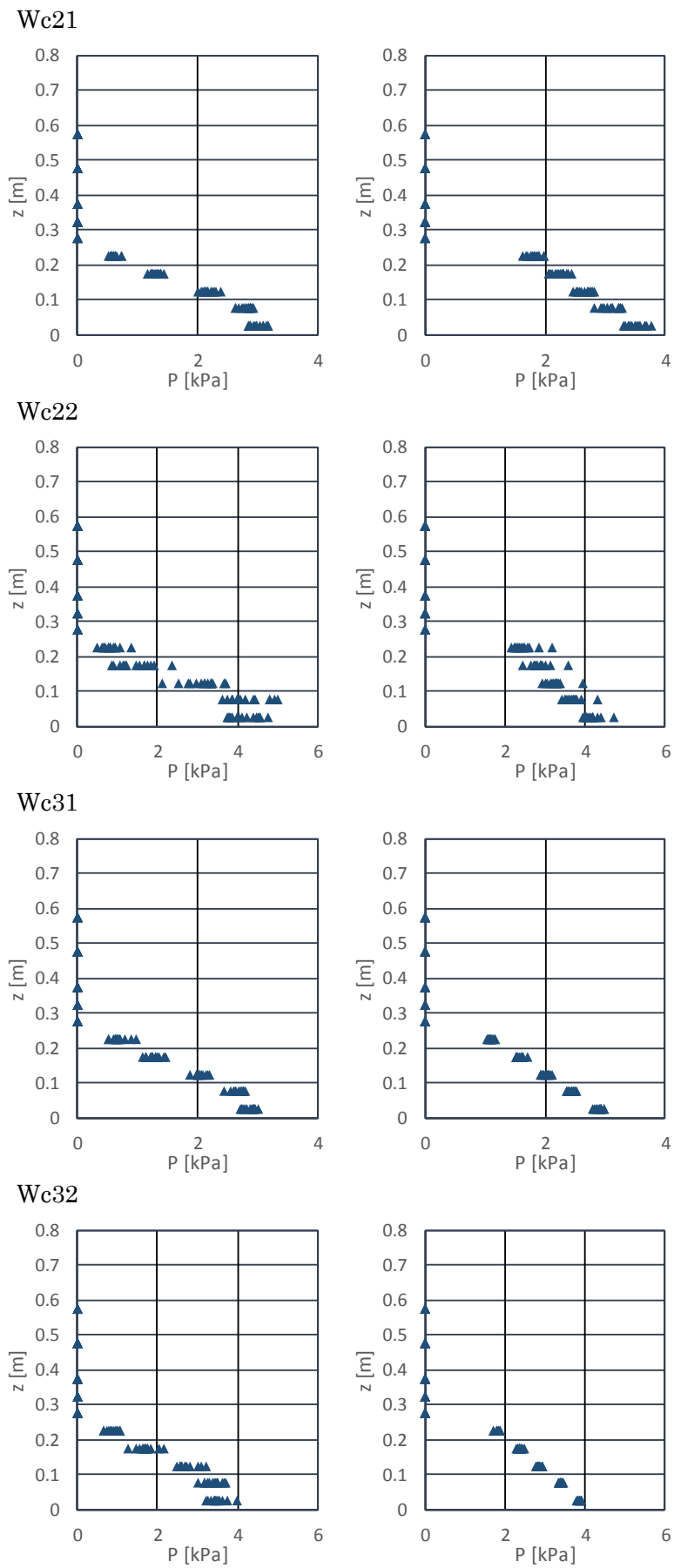


図- 6.3.8 圧力の鉛直分布(左:段波波圧, 右:持続波圧, 直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m)

6.4. ひずみの時系列と最大波力作用時のひずみ分布

図- 6.4.1～図- 6.4.4 に、堤体模型水平変位の時系列をまとめる。また、段波領域、持続波領域それぞれにおける変位最大時の段波ひずみおよび持続ひずみの鉛直分布を、図- 6.4.5～図- 6.4.8 に示す。

変位の時系列は、前述の波力の時系列と類似であるが、短周期の変動成分が波力の時系列に比較してほぼなくなっている。また、段波領域での急激な波力の立ち上りに対応した変位が、持続波圧領域に比較して小さくなっていることが分かる。これは、動的な応答の特性として、短周期の波力変動に構造物応答が反応していないためと考えられる。

ひずみの鉛直分布は、持続波領域では 15 回のばらつきが小さく、その分布形状は鉛直方向に 2 次関数のような形状で、底面付近のひずみが大きくなっている。これは片持ちばりに、分布荷重が作用している場合のひずみ分布形状と整合する。一方、段波領域では、波圧に比較して 15 回の繰り返し試験のばらつきが小さい。ばらつきの大きいケースは、単純勾配の設置位置 0m や、直立護岸の設置位置 0m, Wc14 のケースなど、砕波しながら堤体模型に波が衝突するケースであり、波圧の大きさが試験ケース毎にばらつくことが主な要因と考えられる。また、ひずみの分布形状について、底面で大きくなる持続波ひずみと類似の形状をしているものの、鉛直方向に若干不規則な変動を示していることから、砕波条件では大きな圧力が堤体模型の底面より上の部分に働くために、堤体変位の 2 次、3 次モードの影響が現れていることも要因として考えられる。

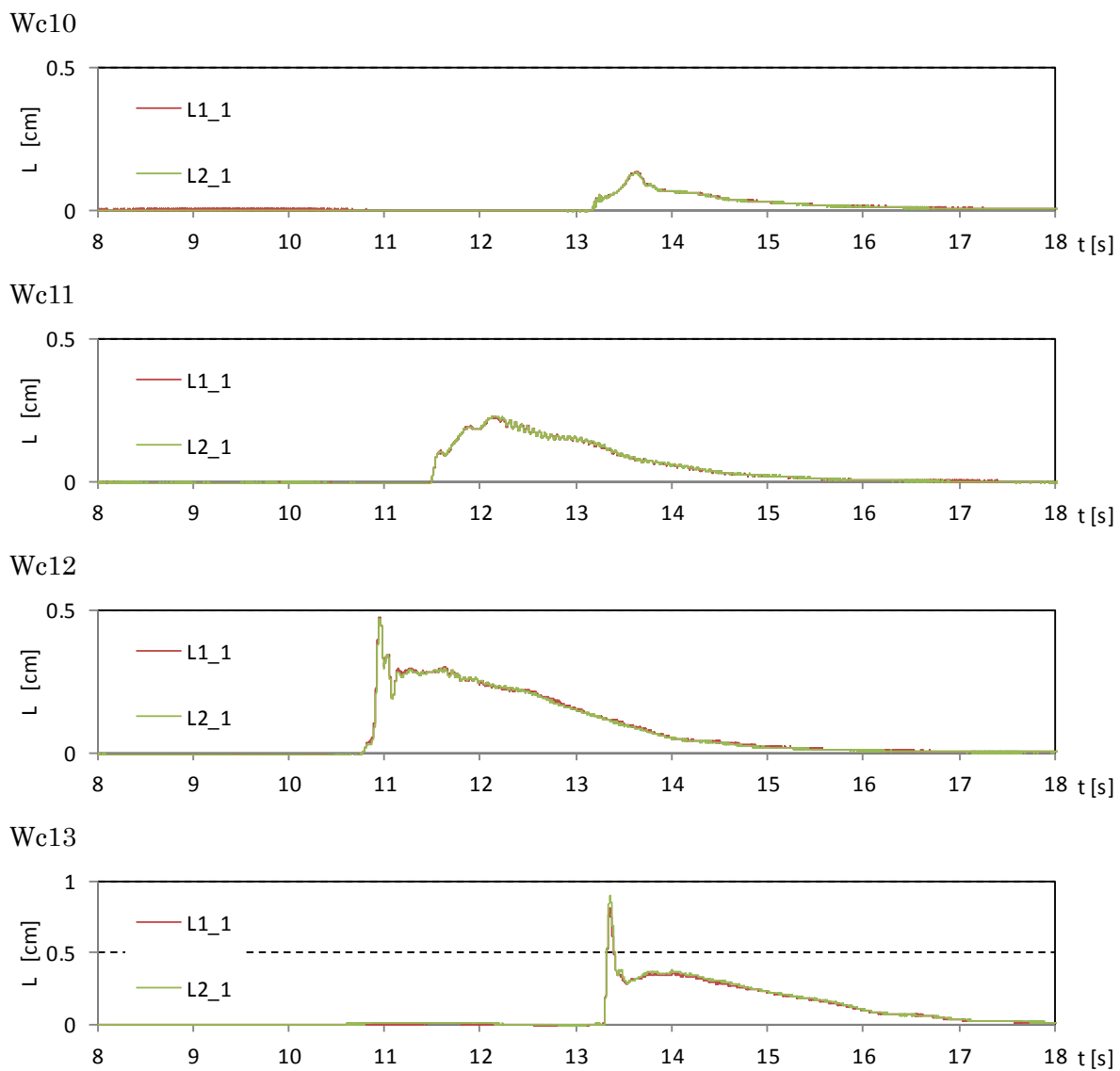


図- 6.4.1 防潮堤水平変位の時系列 (単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, 1回目)

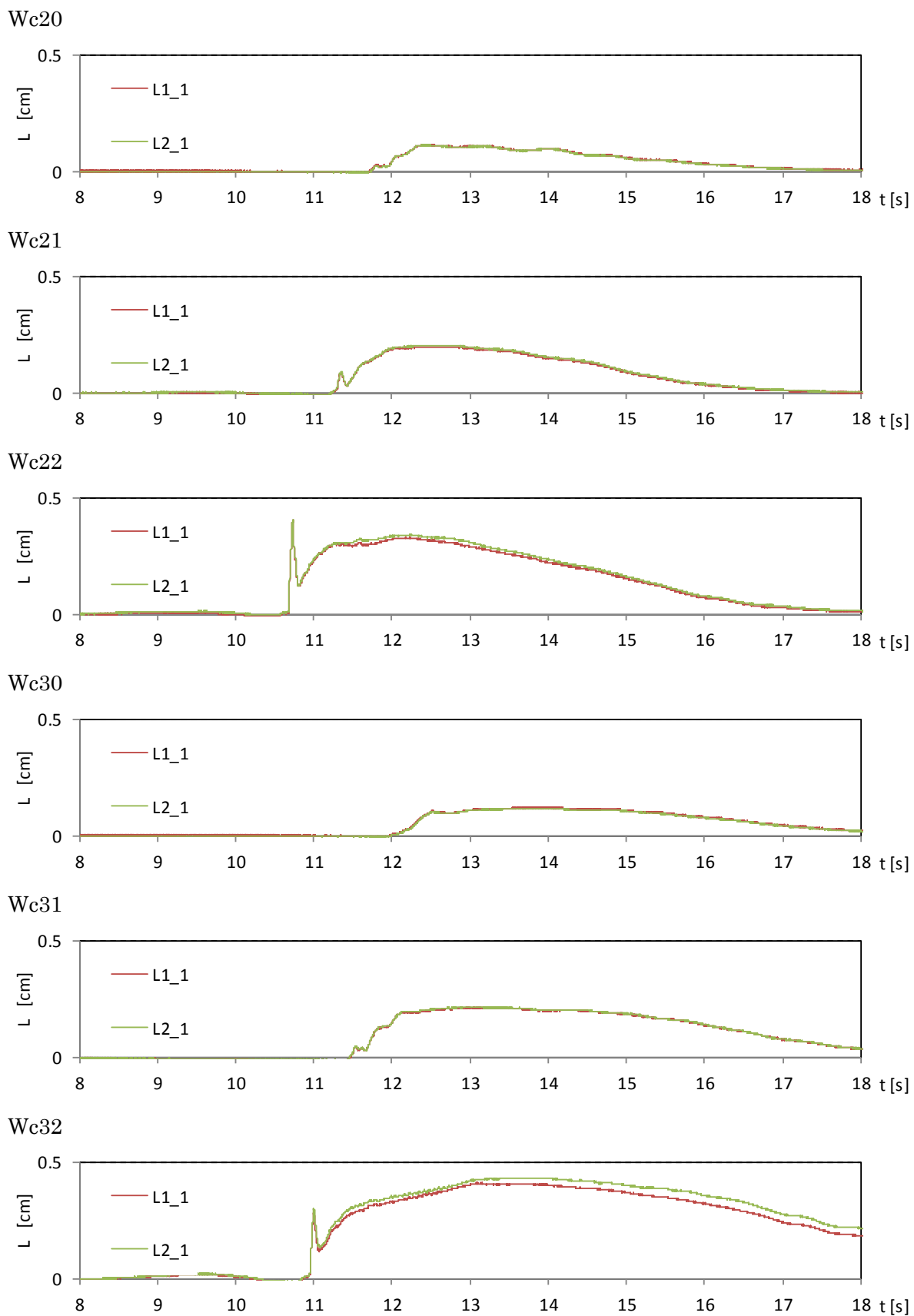


図- 6.4.1 防潮堤水平変位の時系列 (単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, 1 回目)

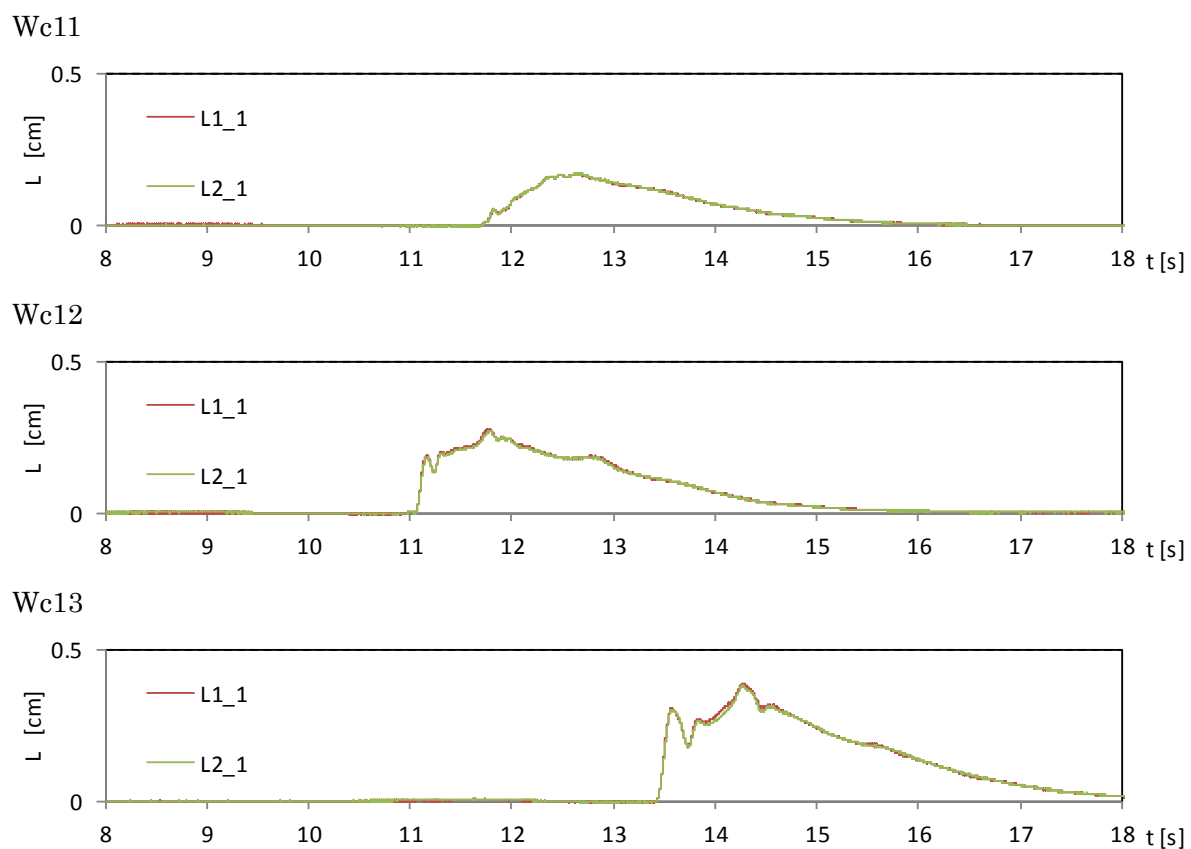


図- 6.4.2 防潮堤水平変位の時系列 (単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m, 1 回目)

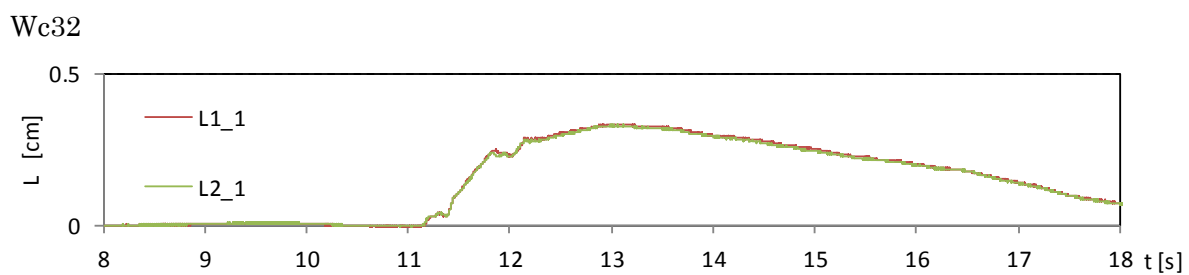
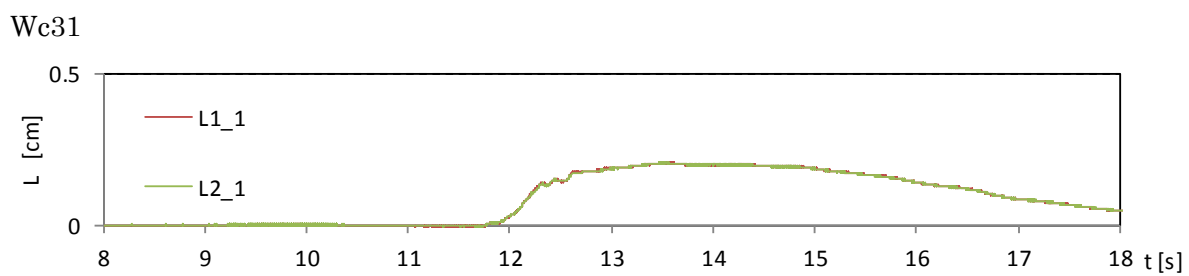
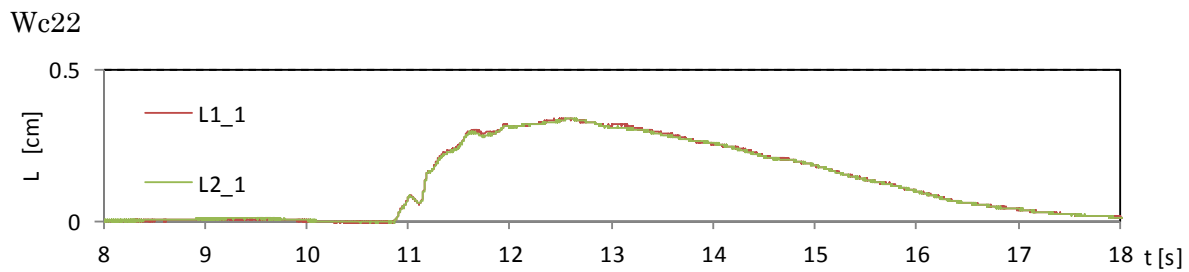
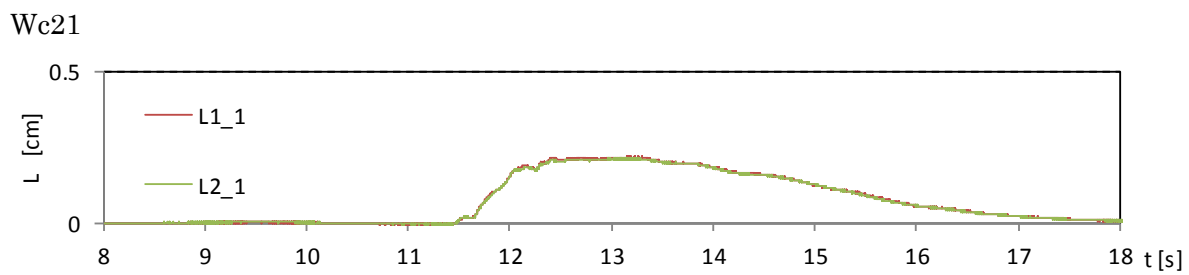


図- 6.4.2 防潮堤水平変位の時系列 (単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m, 1 回目)

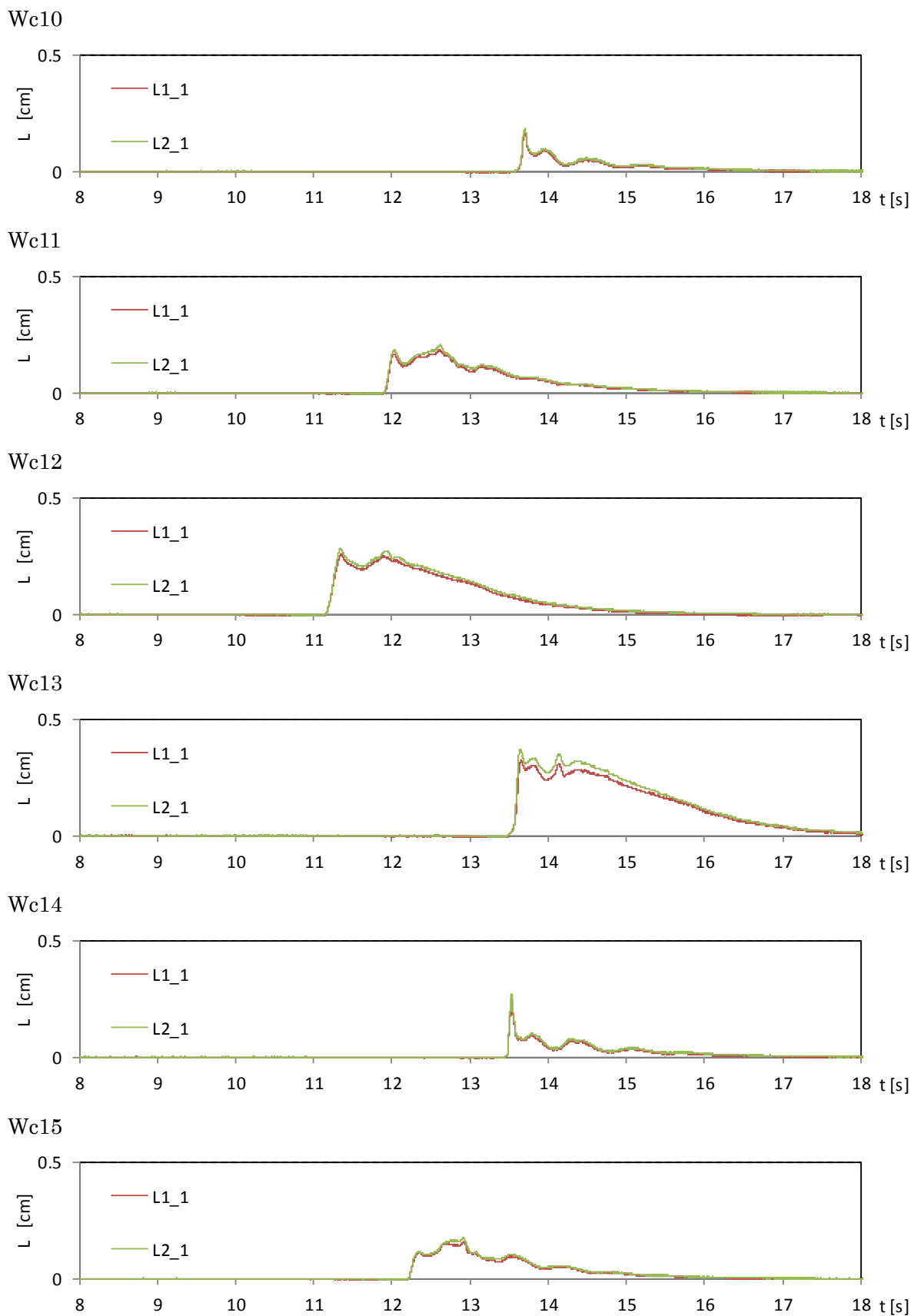


図- 6.4.3 防潮堤水平変位の時系列 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, 1回目)

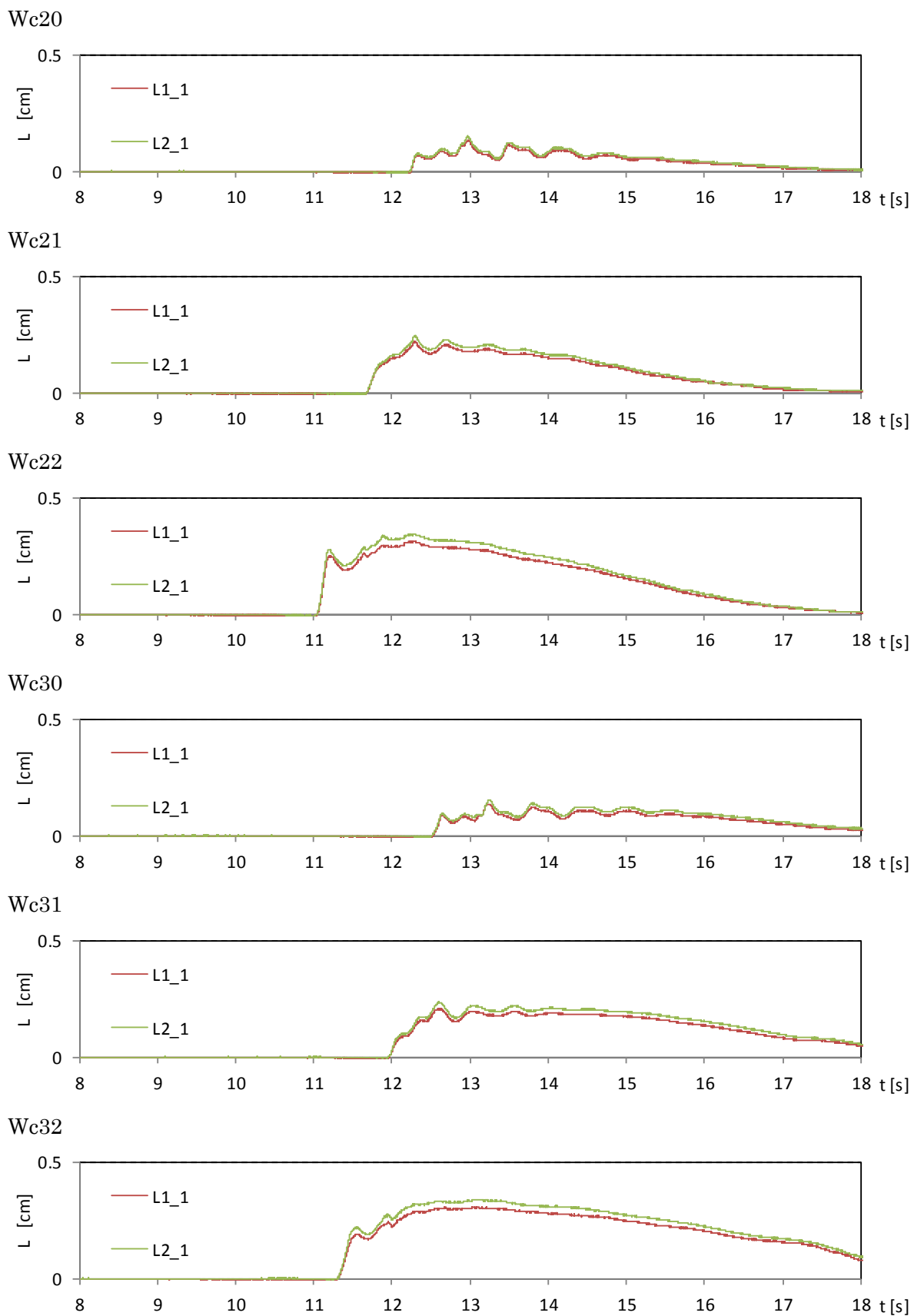


図- 6.4.3 防潮堤水平変位の時系列 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0m, 1回目)

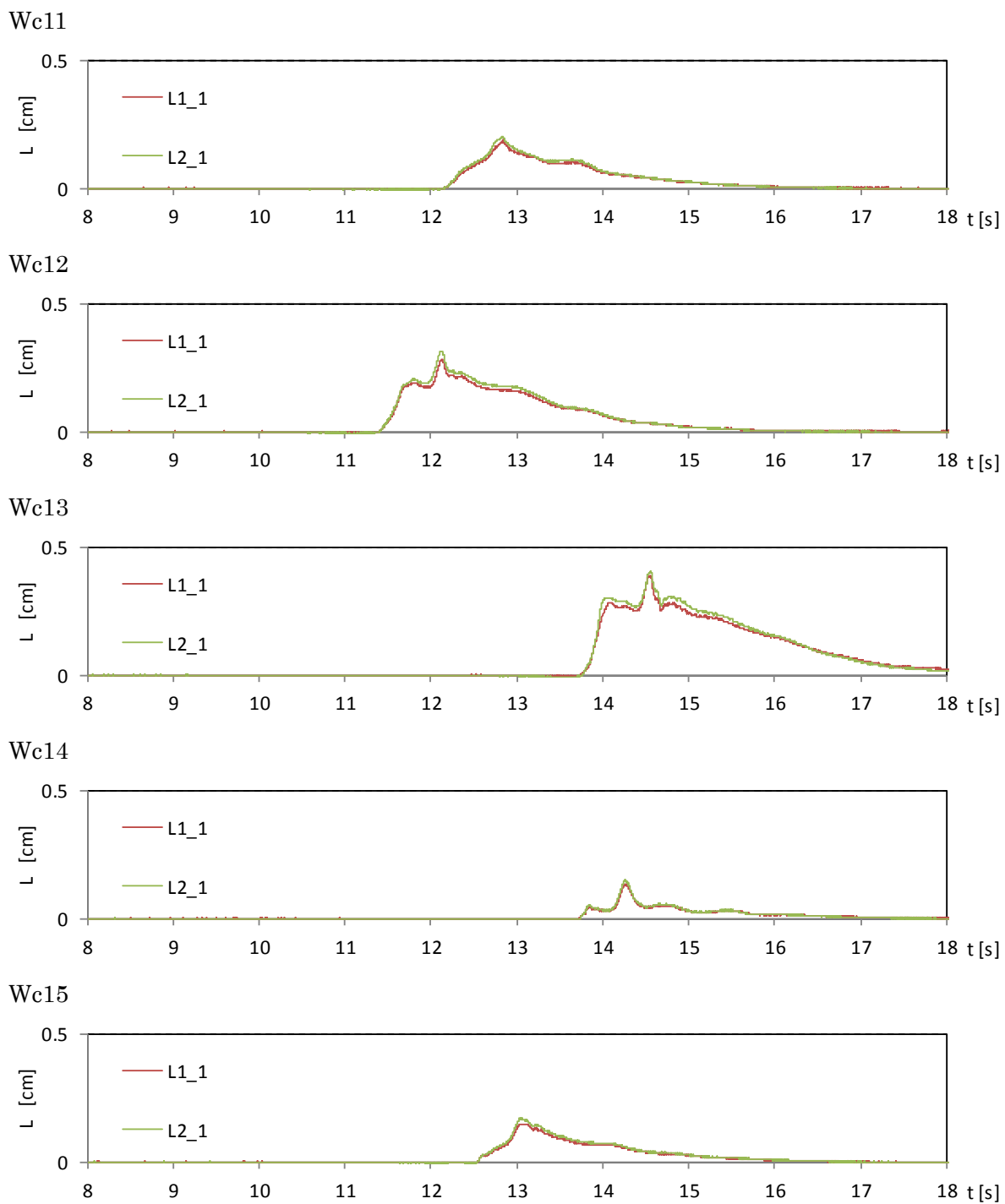


図- 6.4.4 防潮堤水平変位の時系列 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m, 1 回目)

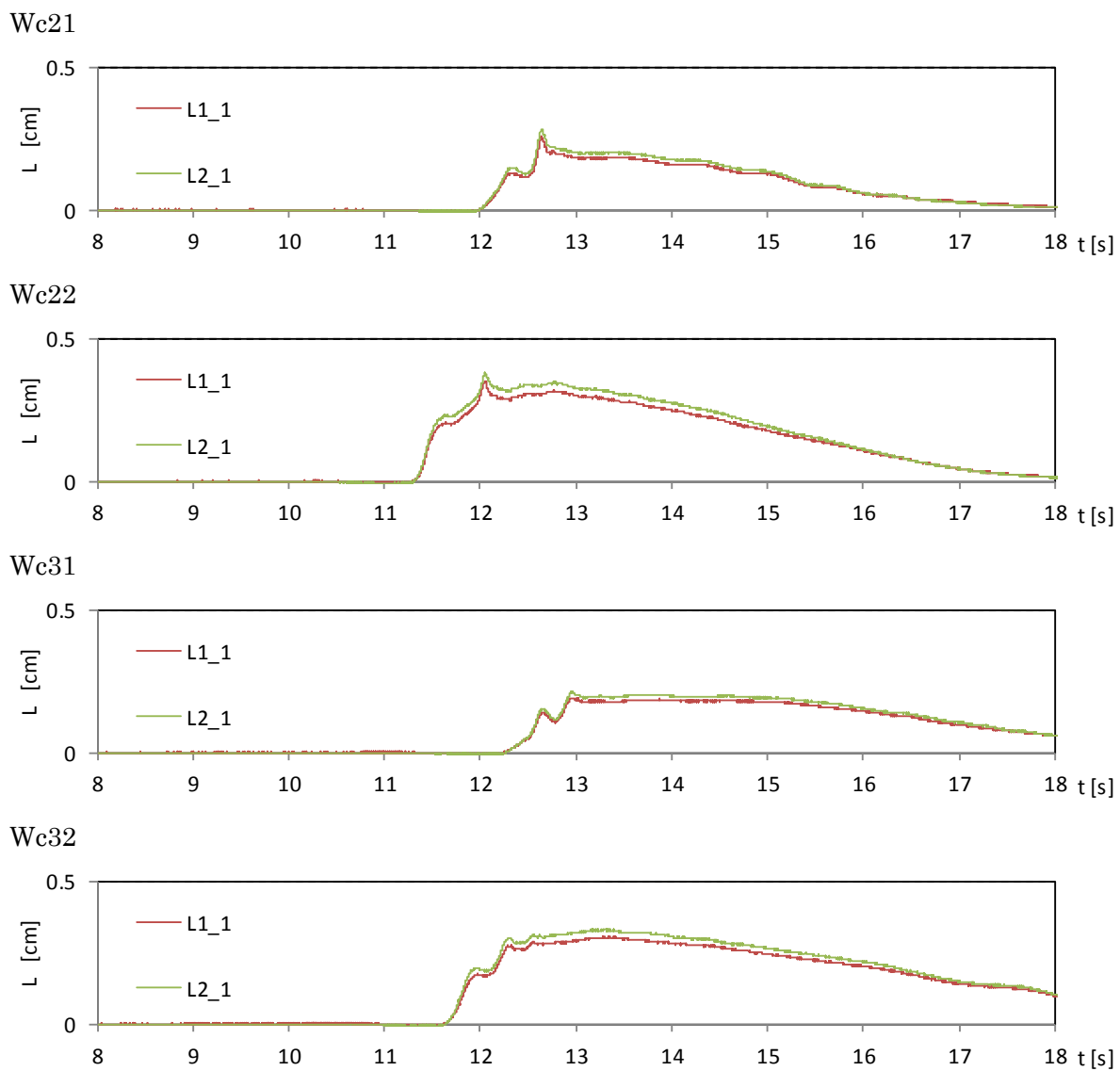


図- 6.4.4 防潮堤水平変位の時系列 (直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m, 1 回目)

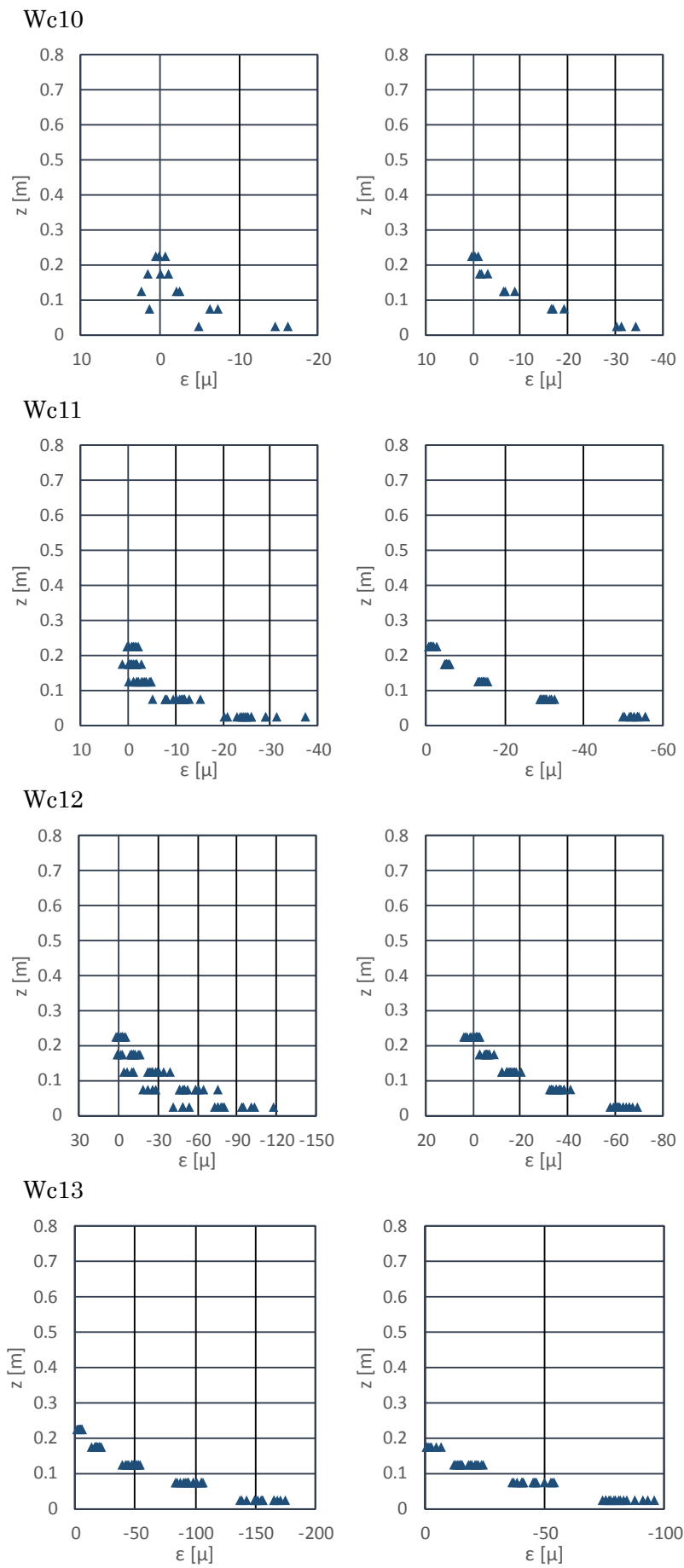


図- 6.4.5 ひずみ鉛直分布 (左 : 段波, 右 : 持続波, 単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0m)

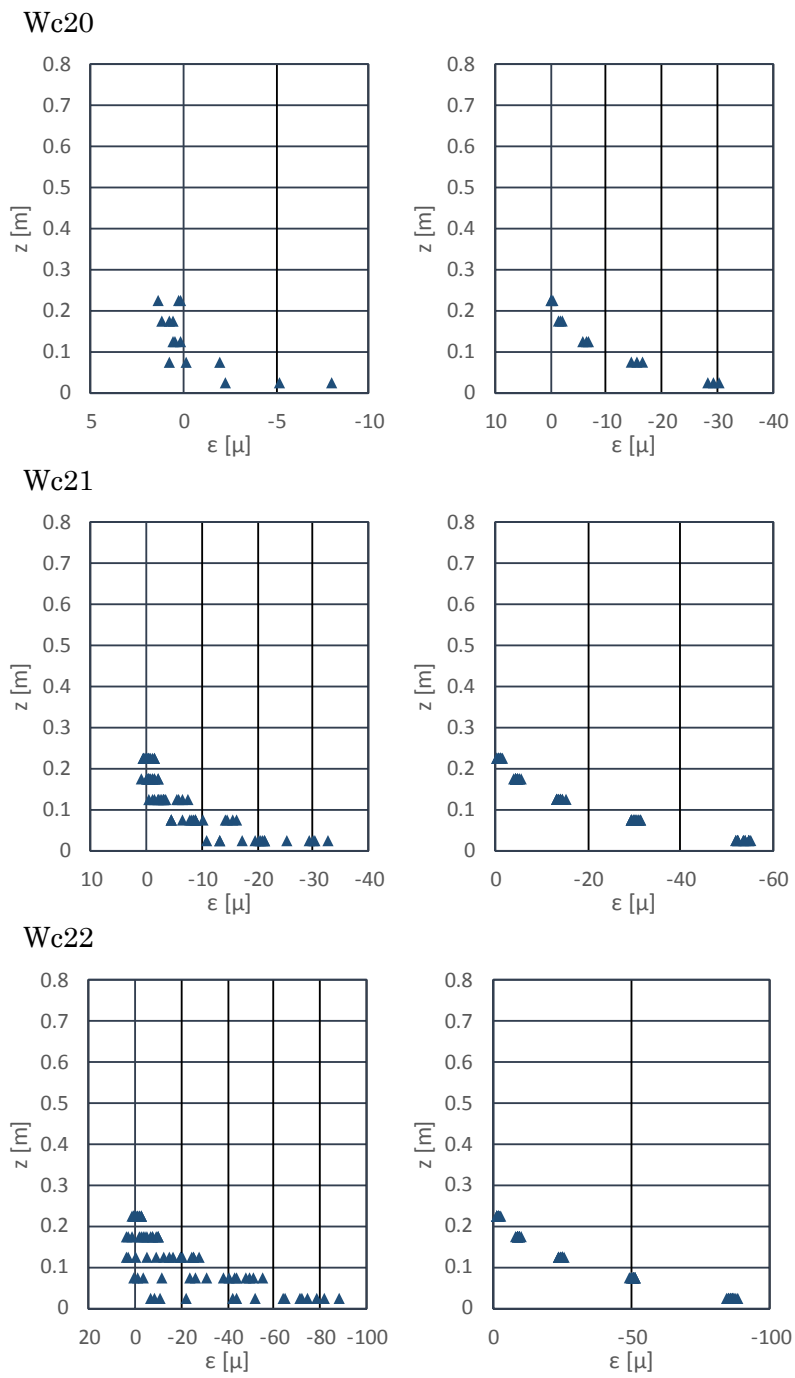


図- 6.4.5 ひずみ鉛直分布 (左 : 段波, 右 : 持続波, 単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0m)

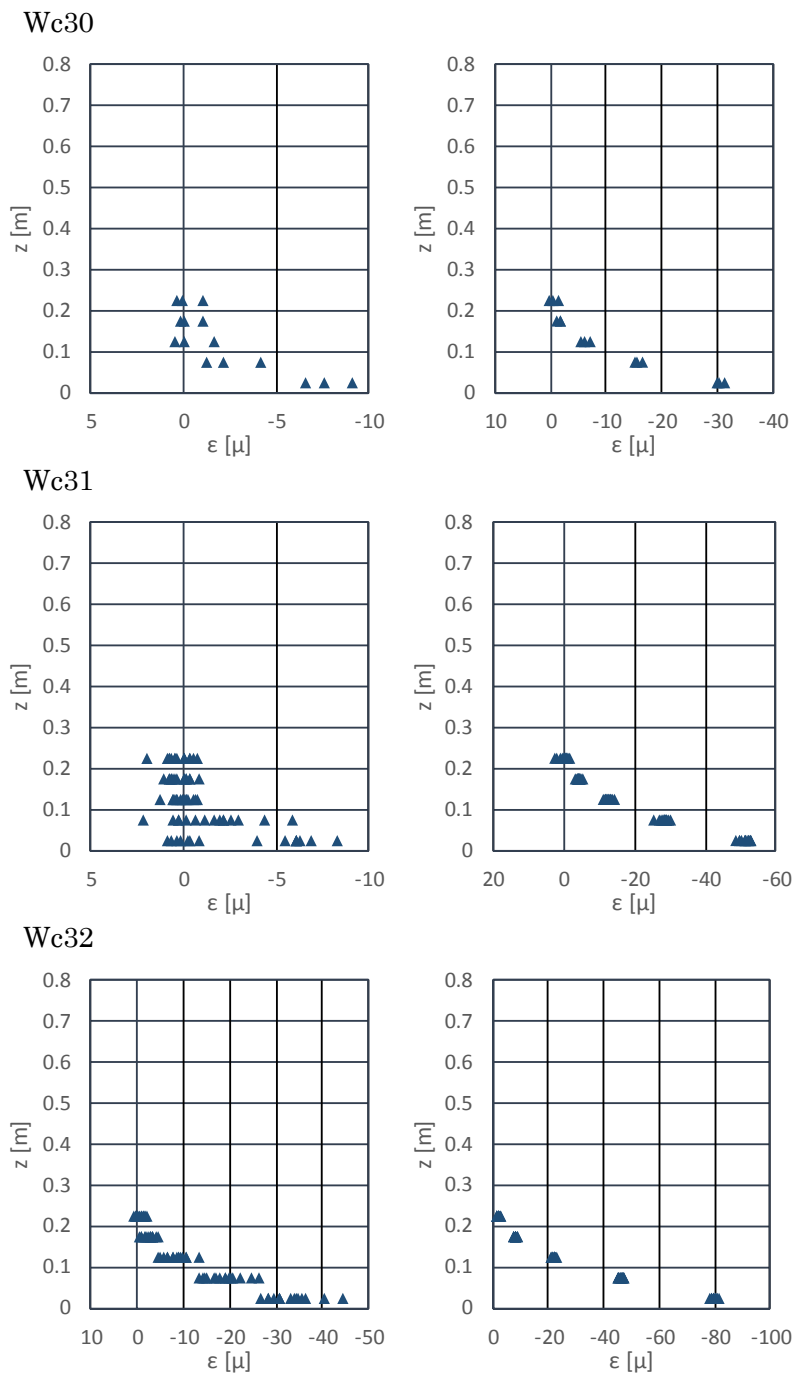


図- 6.4.5 ひずみ鉛直分布 (左 : 段波, 右 : 持続波, 単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0m)

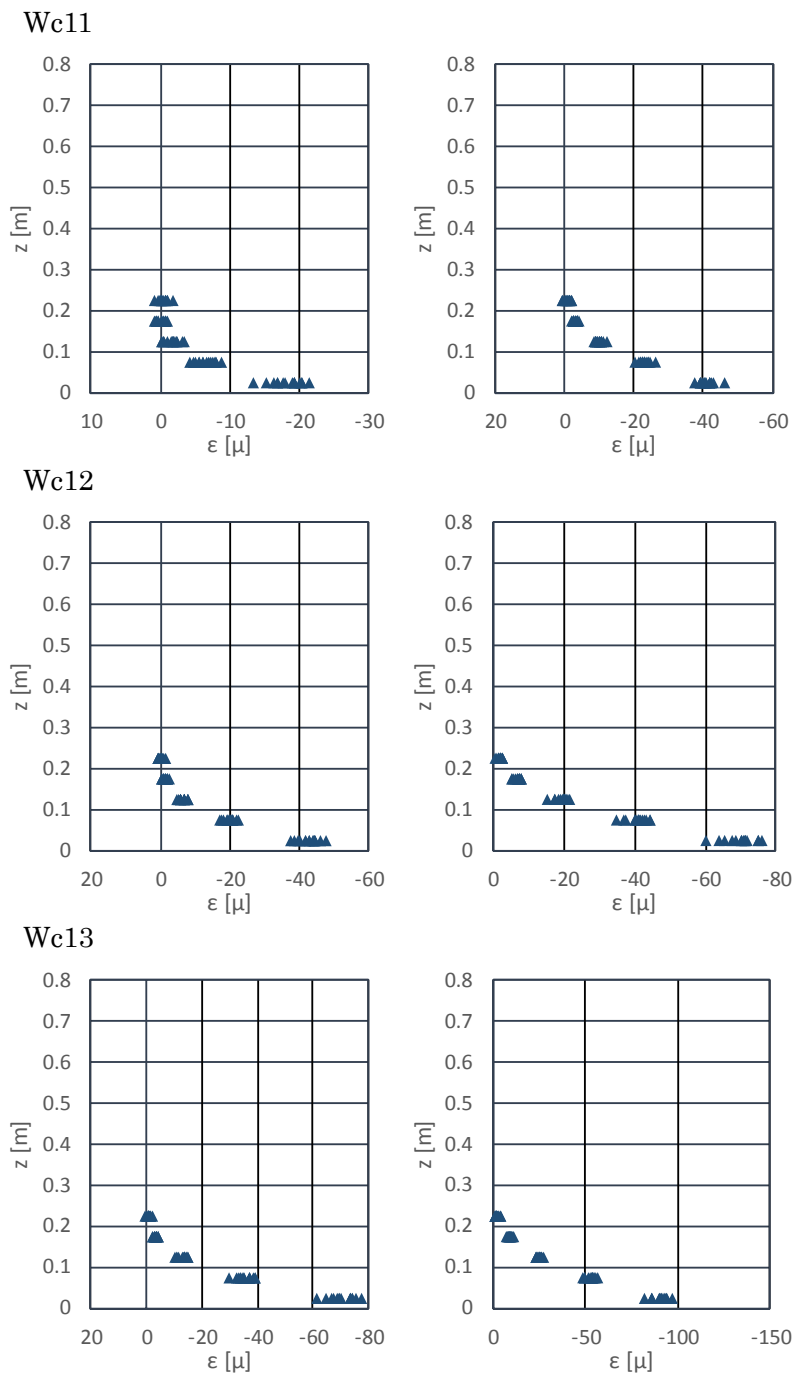


図-6.4.6 ひずみ鉛直分布 (左:段波, 右:持続波, 単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m)

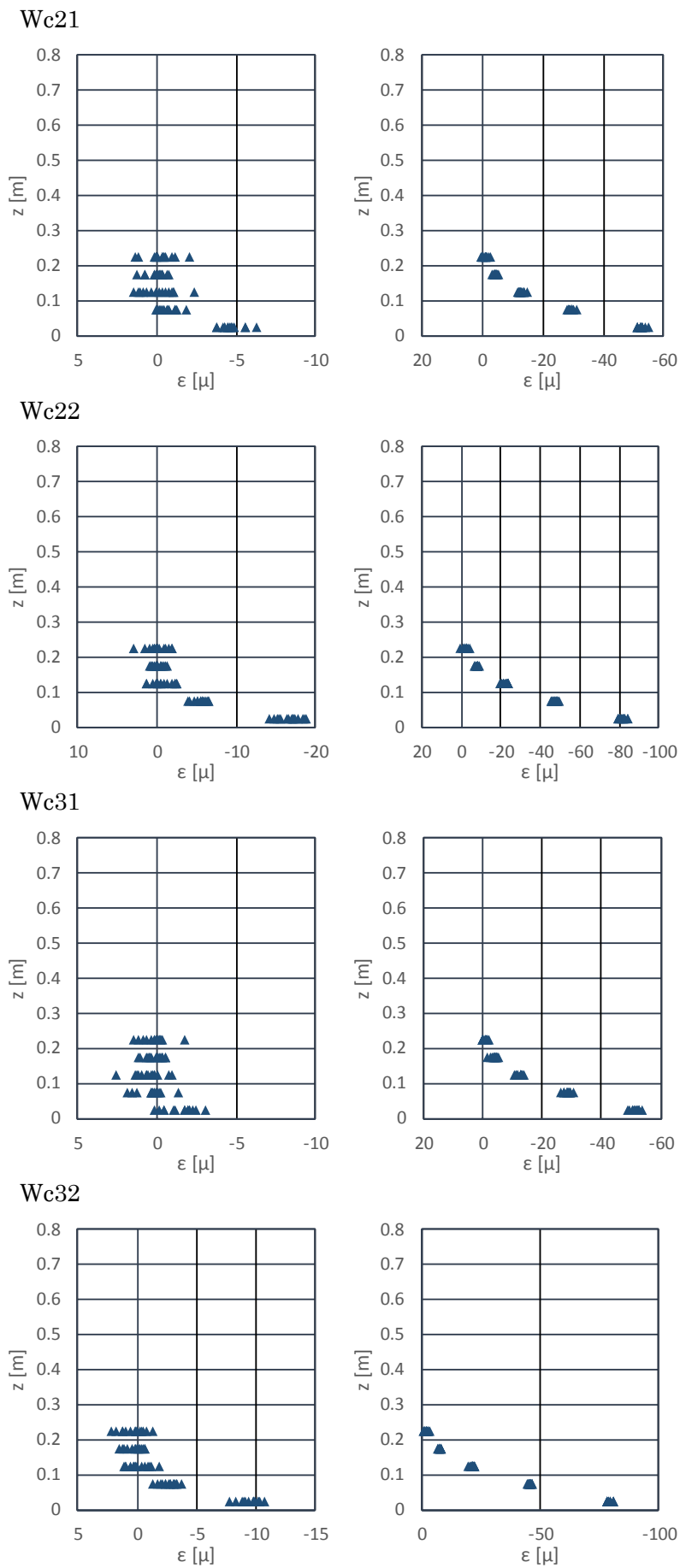


図- 6.4.6 ひずみ鉛直分布 (左 : 段波, 右 : 持続波, 単純勾配, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m)

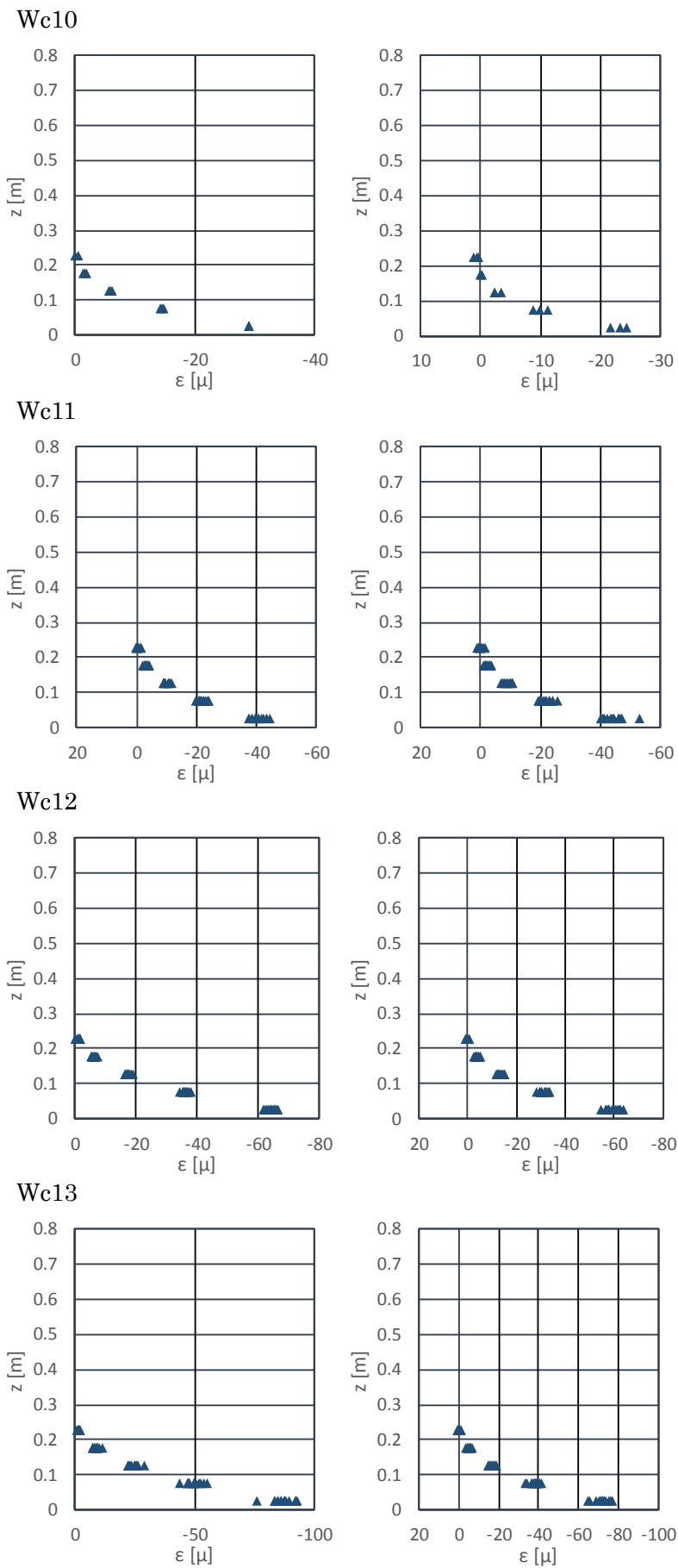
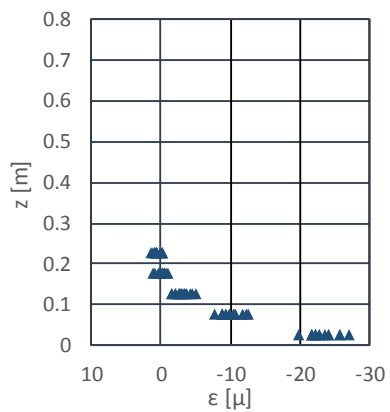
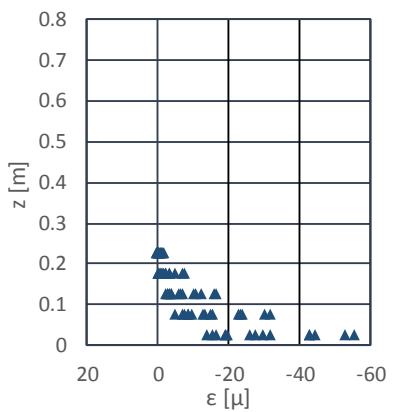


図- 6.4.7 ひずみ鉛直分布 (左 : 段波, 右 : 持続波, 直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0m)

Wc14



Wc15

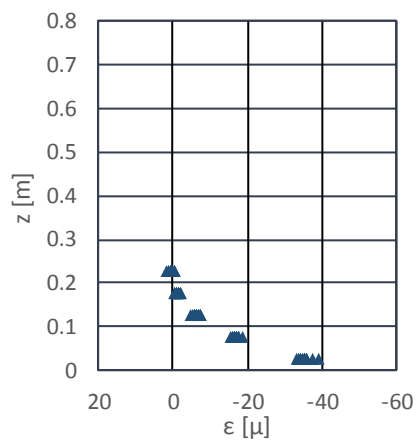
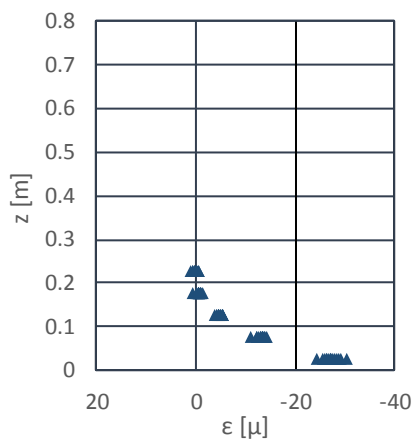


図- 6.4.7 ひずみ鉛直分布 (左 : 段波, 右 : 持続波, 直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0m)

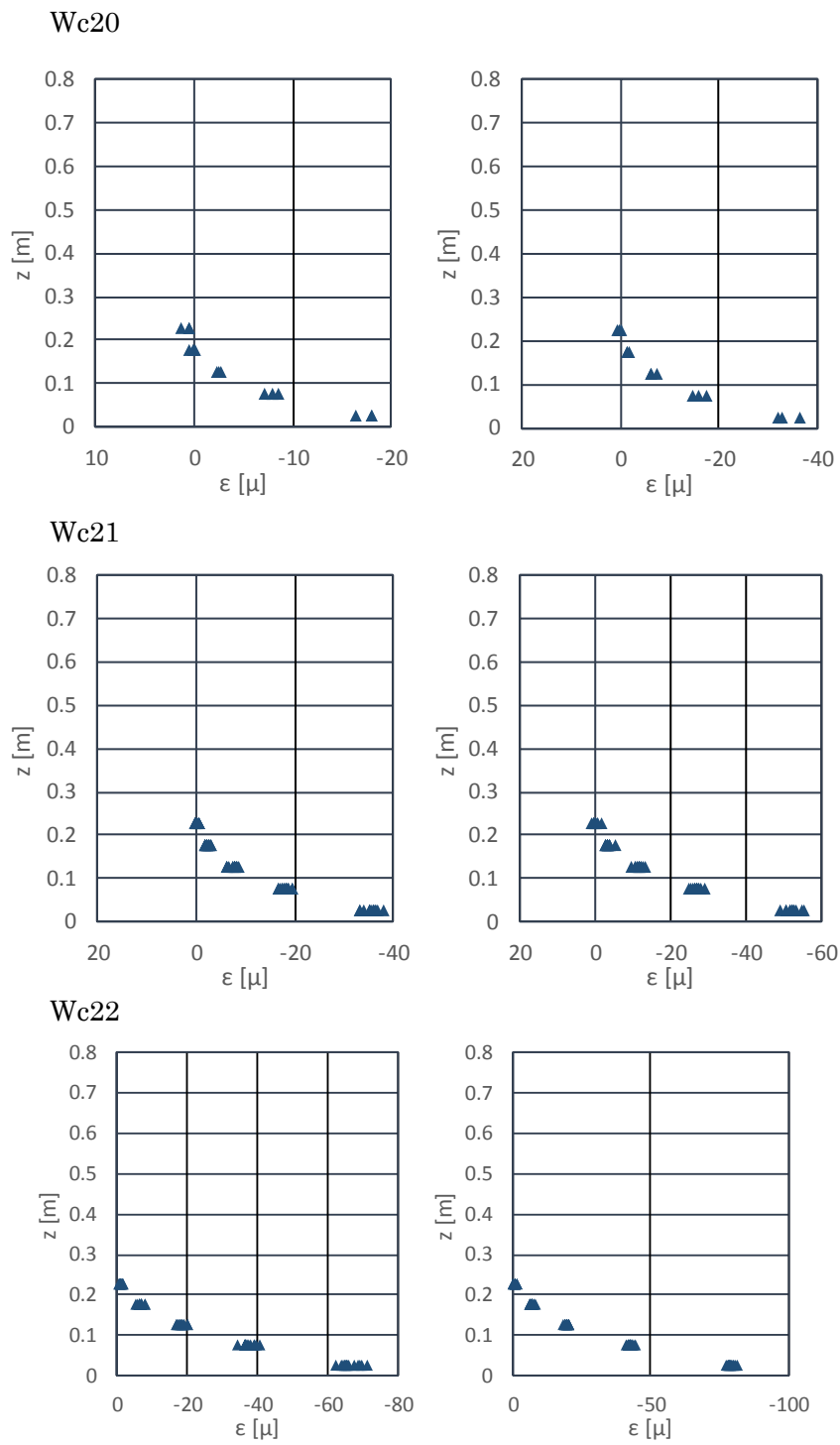
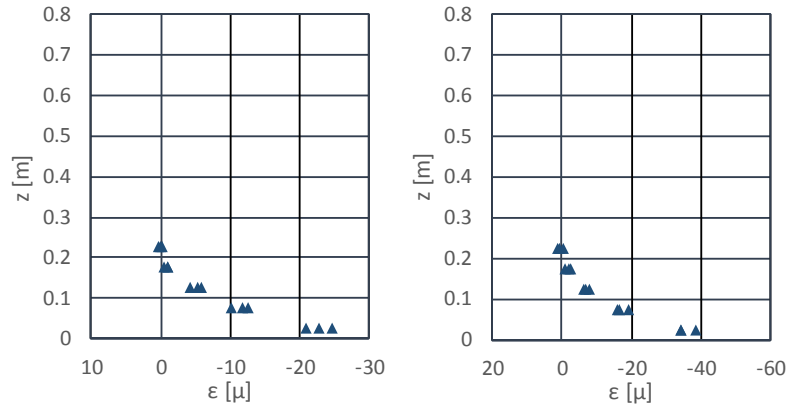
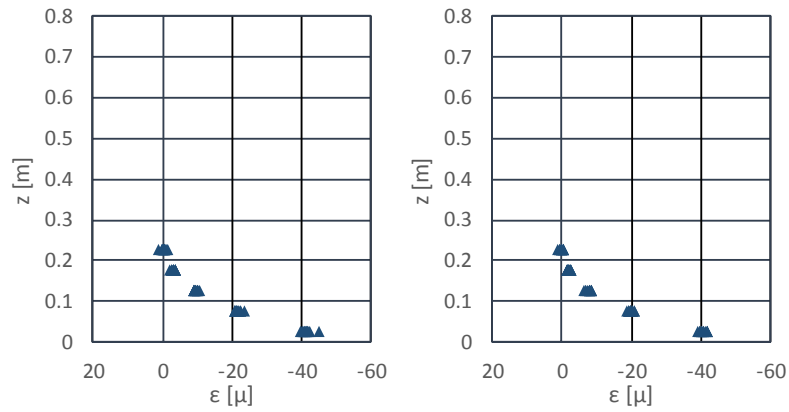


図- 6.4.7 ひずみ鉛直分布 (左 : 段波, 右 : 持続波, 直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0m)

Wc30



Wc31



Wc32

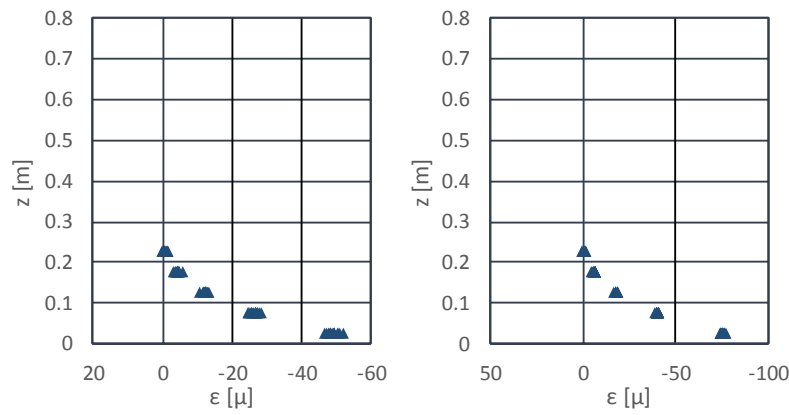


図- 6.4.7 ひずみ鉛直分布 (左 : 段波, 右 : 持続波, 直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0m)

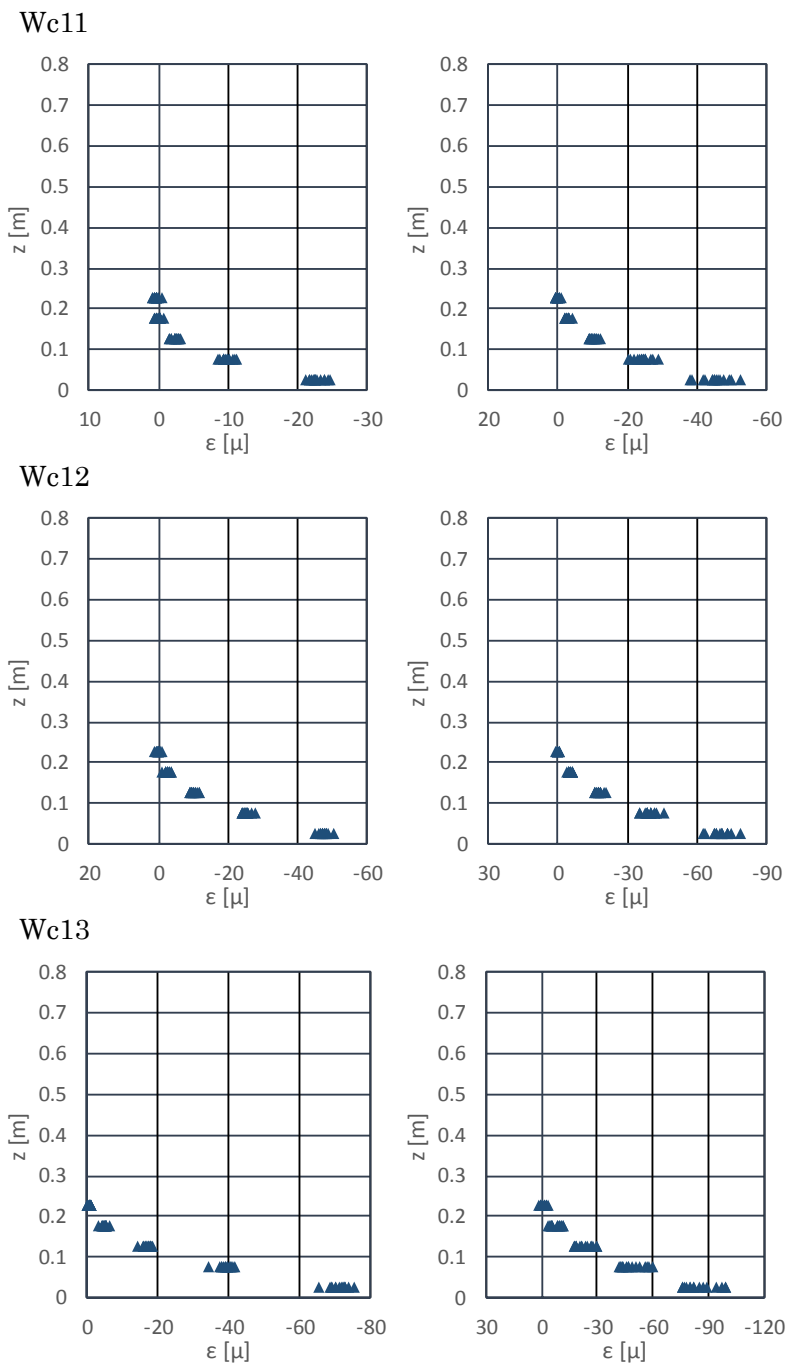
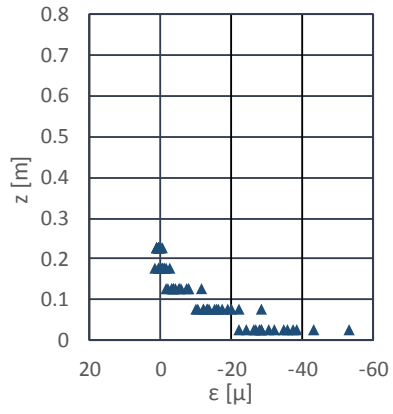
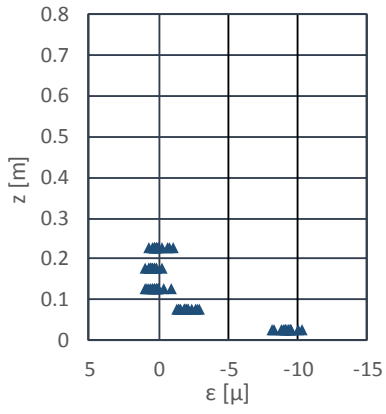


図-6.4.8 ひずみ鉛直分布 (左:段波, 右:持続波, 直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m)

Wc14



Wc15

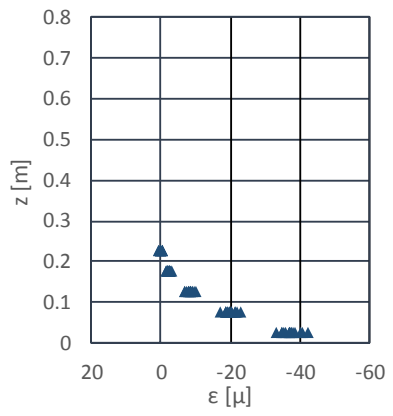
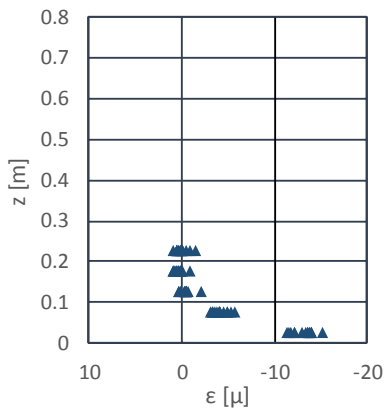


図-6.4.8 ひずみ鉛直分布 (左: 段波, 右: 持続波, 直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m)

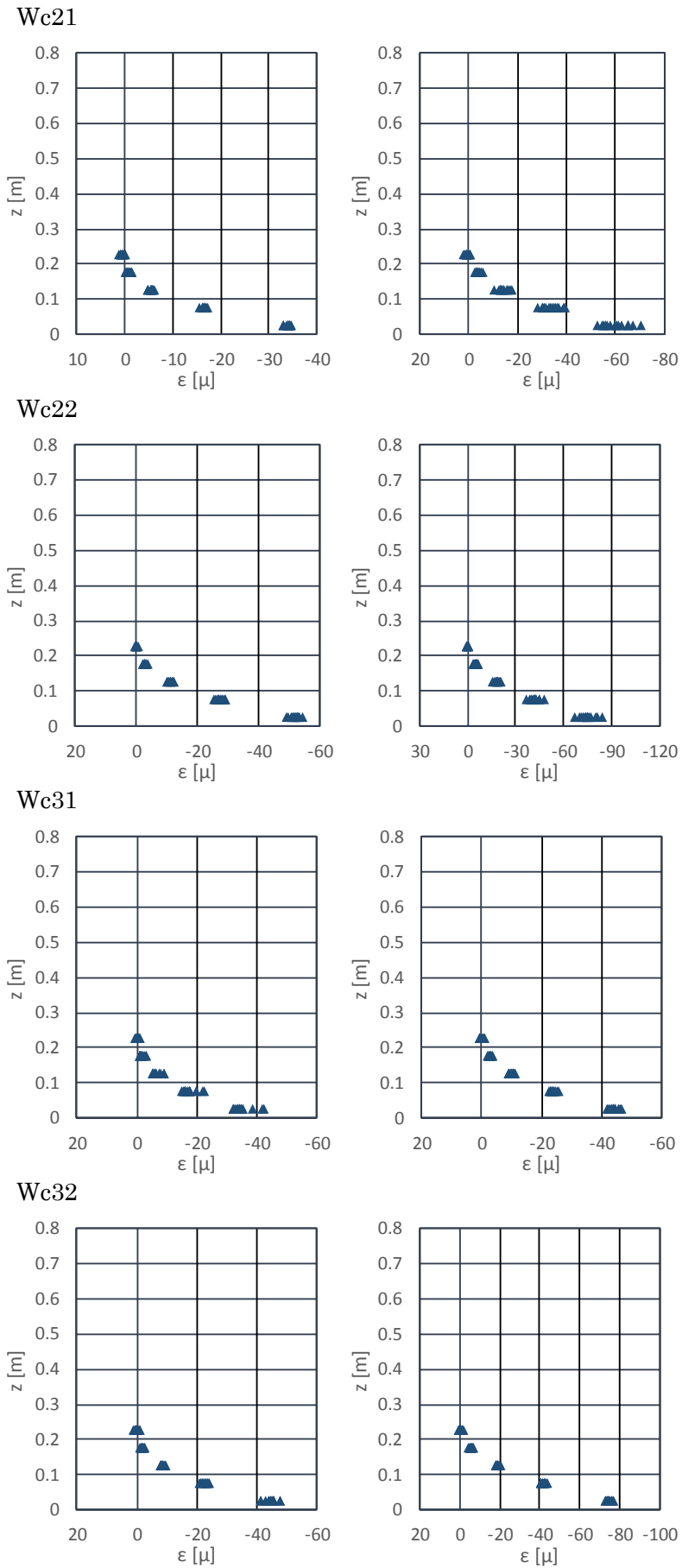


図-6.4.8 ひずみ鉛直分布 (左:段波, 右:持続波, 直立護岸, 堤体 TypeC, 設置位置 0.625m)

7. 試験結果の考察

7.1. 通過波

図-7.1.1～図-7.1.3に、単純勾配及び直立護岸における最大浸水深、最大浸水深の95%浸水深、比エネルギー最大時の浸水深 η と、同時刻の流速 V および浸水深と流速から求めたフルード数 Fr をそれぞれ示す。ここで比エネルギー E は、

$$E = \eta + \frac{v^2}{2g}$$

によって定義される。

同じ周期特性のケースでは、最大浸水深、比エネルギー最大時浸水深ともに、津波高に応じて浸水深と流速が増加している。ただし、比エネルギー最大時の浸水深については、津波高が大きくなってもP.09位置における浸水深が大きくなっておらず、また周期特性が長くなるほど浸水深が低下する傾向にある。

P.08とP.09を比較すると、浸水深はP.08からP.09にかけて低下していることが確認できる。流速およびフルード数は、最大浸水深を基準とした場合、単純勾配ではP.08とP.09が同程度となっており、一方で直立護岸では、P.08よりもP.09の方が大きくなるのが分かる。直立護岸の汀線位置では、護岸の反射により水位が上昇し、そのためフルード数は小さくなる。またこの時、汀線近傍に支配断面が生じていると考えられるため、フルード数は1に近い値となっている。

最大浸水深と95%最大浸水深を比較すると、単純勾配、直立護岸ともに、汀線からの距離による変動特性は両方で類似している。ただし、95%最大浸水深の方が浸水深が小さくなるため、最大値はより早い時間に生じており、そのため流速が大きくなり、フルード数も大きくなっている。

比エネルギー最大を基準とした場合、最大浸水深を基準にする場合に比べて、流速やフルード数のP.08とp.09の違いが大きくなる。比エネルギーの最大値は波形の先端部分で発生するが、フルード数は波形の先端で最大となりその後すぐに低減したのち、徐々に緩やかな低減となる。したがって、比エネルギーが最大となる時刻ではフルード数が短時間で低減しており、波形に対する、比エネルギー最大の発生位置の違いによるフルード数の違いが大きくなるものと考えられる。



図-7.1.1 防潮堤設置位置における最大浸水深と流速，フルード数



図- 7.1.2 防潮堤設置位置における最大浸水深の 95%浸水深と流速，フルード数



図- 7.1.3 防潮堤設置位置における比エネルギー最大時の浸水深と流速，フルード数

7.2. 段波波圧と持続波圧

7.2.1. 段波領域と持続波領域

以降では、津波波圧およびひずみの特性を、段波領域と持続波領域に分けて検討する。ここで段波領域と持続領域は、次のように区別するものとする。一般に、陸上に遡上した津波が鉛直壁に衝突すると、最初に衝撃的な波圧が働く。その後、壁面前面を水塊がせり上がるが、波圧はせり上がり高よりも低い底面近傍にしか働かない。そのため、水位のせり上がりと比較して、波力は大きくならない。その後水塊が落下し、徐々に静水圧分布に近い準定常的な波圧分布となる。

そこで、図-7.2.1に示すように、水位と波力の時系列において、水位のせり上がり上昇に対し、波力が反応していないことが明確な場合は、せり上がりピークよりも前を段波の領域とし、これよりも後を持続波の領域として、その波力（または、ひずみ）の最大値を求め、前者を段波波圧（段波ひずみ）、後者を持続波圧（持続ひずみ）とする。ただし、図-7.2.2に示すように、せり上がりのピークに対し、波力が明瞭に低減していない場合は、せり上がりピークは段波波圧と持続波圧の判別には不適切であると考えられるため、衝撃的な波力が発生した後に波力が低減した時刻の前後を段波領域と持続波領域として最大値を求めた。

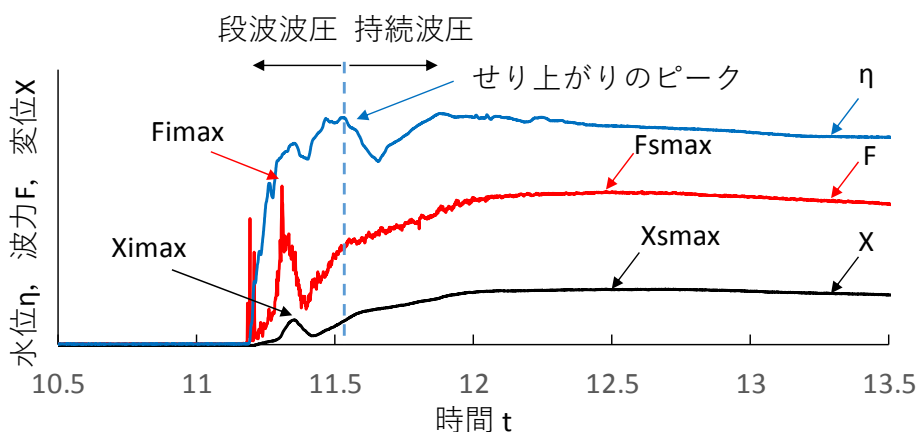


図-7.2.1 段波波圧と持続波圧の定義

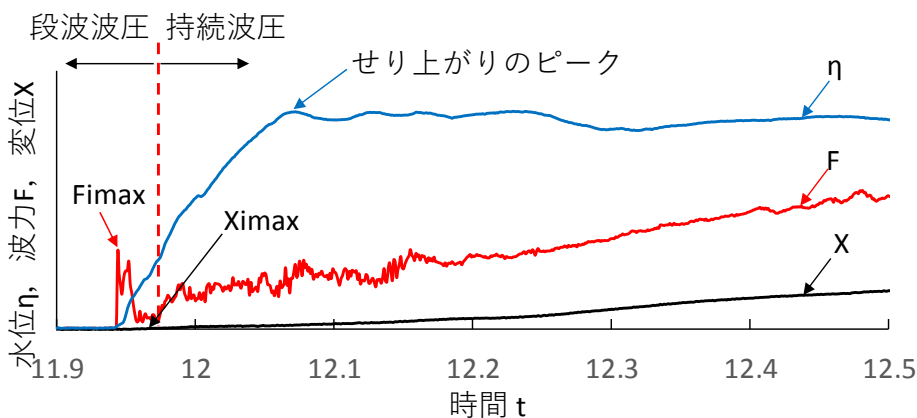
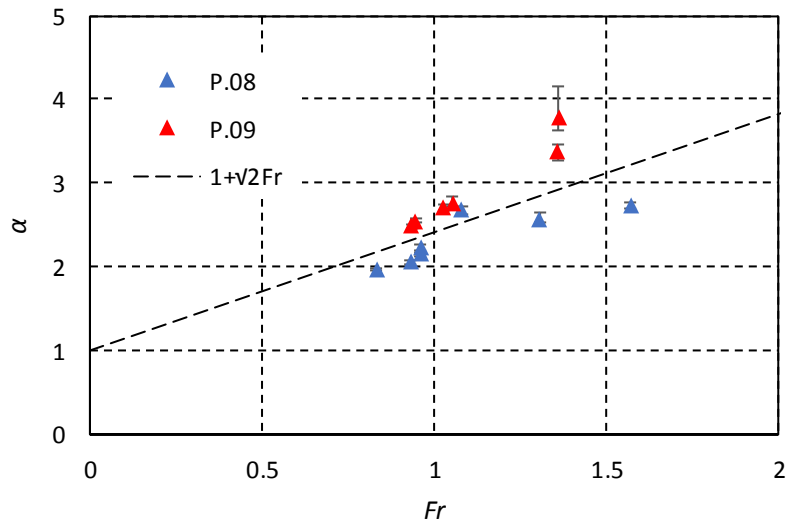


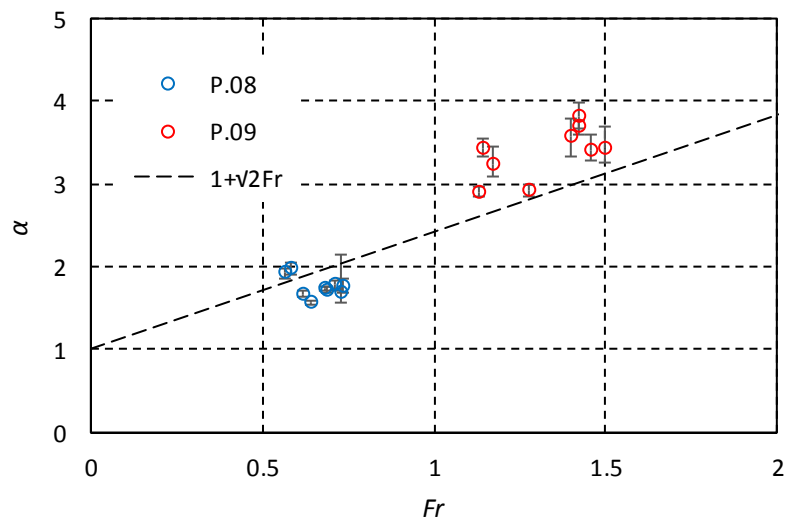
図-7.2.2 段波波圧と持続波圧の定義（不明瞭な場合）

7.2.2. フルード数と水深係数の関係 (TypeA)

堤体高さが十分大きく、越流しないケース (TypeA) について、フルード数と水深係数の関係を、図- 7.2.3～図- 7.2.5 に示す。通過波浸水深やフルード数の算定を、最大浸水深発生時、最大浸水深の 95%浸水深発生時、比エネルギー最大時のそれぞれによって算定した結果を示した。結果は、既往の試験結果と同様の傾向を示しており、水深係数はフルード数に対して右肩上がりの関係にあり、フルード数 1 以下では、水深係数 3 以下となる。

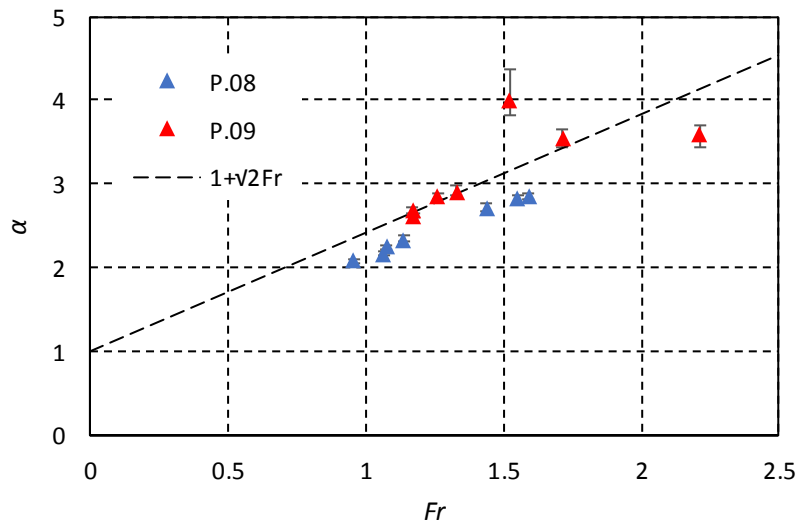


(a)単純勾配

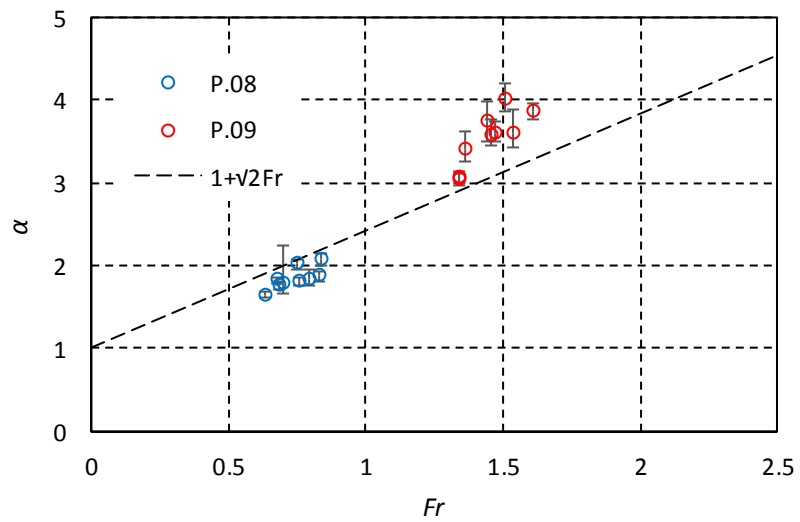


(b)直立護岸

図- 7.2.3 フルード数と水深係数の関係 (最大浸水深を基準, TypeA)

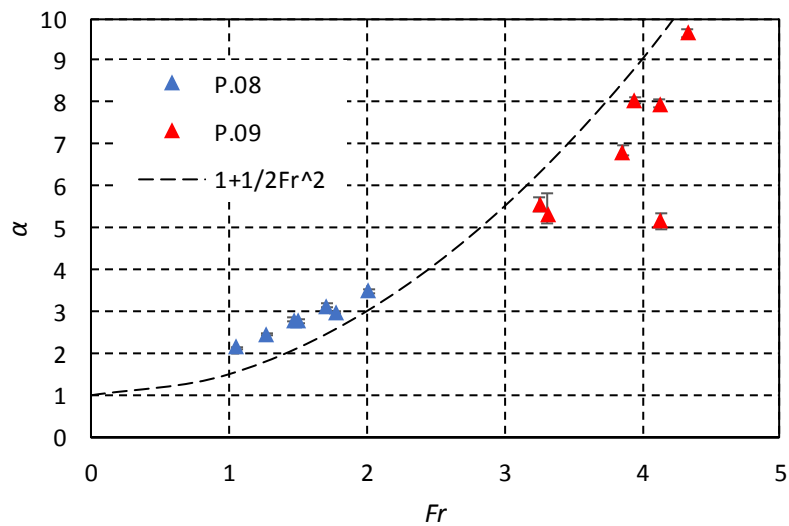


(a)単純勾配

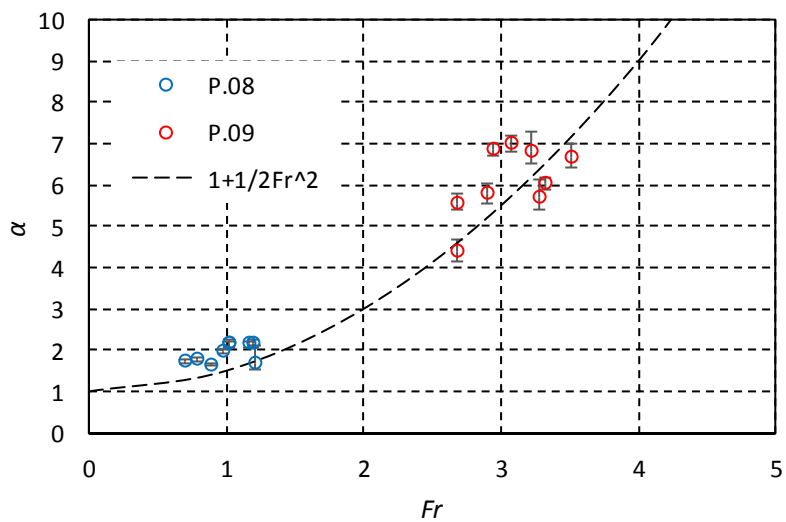


(b)直立護岸

図-7.2.4 フルード数と水深係数の関係 (95%最大浸水深を基準, TypeA)



(a)単純勾配



(b)直立護岸

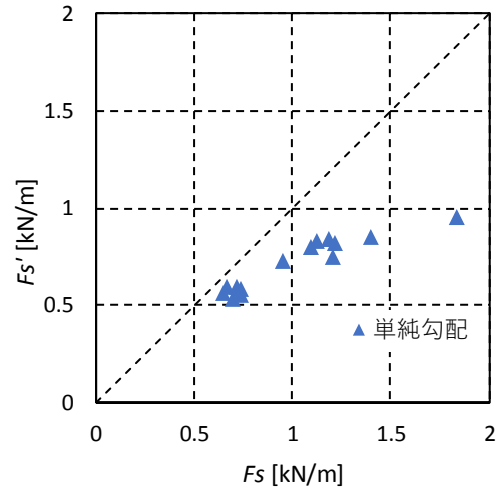
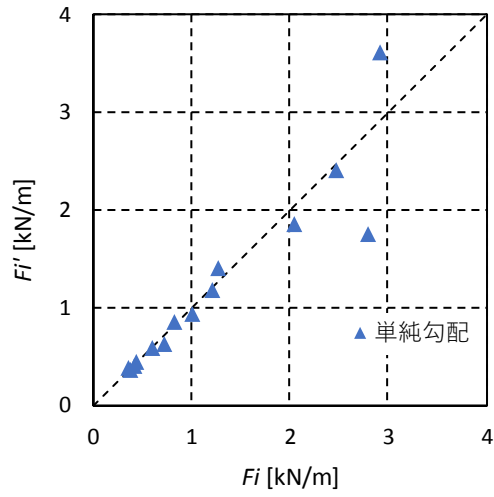
図-7.2.5 フルード数と水深係数の関係 (比エネルギー最大を基準, TypeA)

7.2.3. 越流による波力の低減効果 (TypeA vs. TypeB)

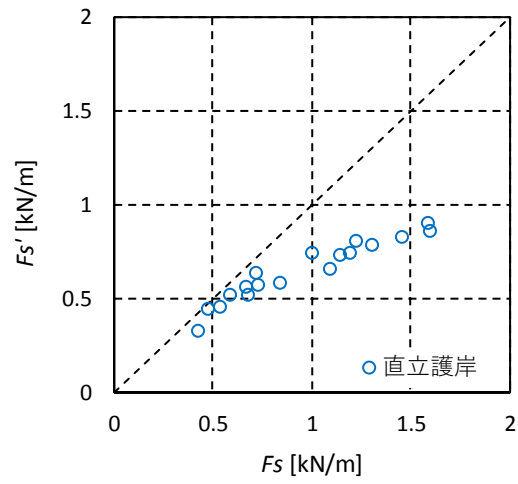
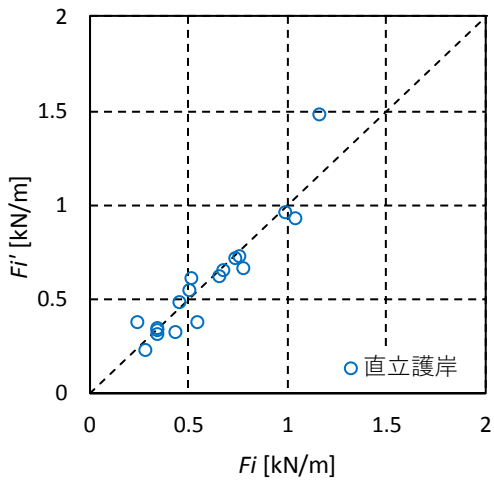
図・7.2.6に、段波波力 F_i と持続波力 F_s のそれぞれについて、越流による波力の低減効果を示す。 F は非越流時に堤体に働く波力 (TypeA), F' は越流時に働く波力 (TypeB) を示している。持続波力では、越流により明確に波力が低減しているのに対し、段波波力では、両方で波力はほぼ同じ値となっている。

持続波力の場合、堤体高さを超えて越流することにより、非越流の場合よりも圧力の作用範囲 (高さ) が狭くなることに加え、越流により反射波が低減して波圧自体も低減する。このため、越流により顕著に波力が低減すると考えられる。

段波波力の場合、4.2 (TypeA) に示した非越流時の圧力分布と、5.2 (TypeB) に示した越流時の圧力分布と比較すると、越流時には非越流時の圧力に対し 0.275m よりも上の部分の圧力がなくなるが、非越流の場合の 0.275m (越流時の堤体の高さ) よりも上の部分の圧力が、底面付近の圧力に比較して十分に小さいため、その影響がほとんどないことが分かる。また、持続波領域では圧力自体が低下するが、段波領域では射流の状態で津波が浸入しており越流の影響が上流側に伝わらないため、持続波とは異なり圧力分布自体も低減していないと考えられる。



(a)単純勾配



(b)直立護岸

図- 7.2.6 非越流時と越流時の波力の比較 (左：段波波力，右：持続波力，TypeA vs. TypeB)

7.2.4. 越流時の波力評価 (TypeB)

越流する場合の波力は、堤体が十分に高く非越流の場合の圧力分布に対し、堤体を越える部分の三角形の圧力分布がなくなるとともに、越流により圧力分布自体も低減する。ここでは、持続波力について津波越流時の波力を検討するために、図-7.2.7に示すパラメタを考える。なお、前述したように、段波波力発生時は越流による波力の低減効果がほとんどないため、ここでは対象としない。

静水圧分布を仮定し、越流時の堤体高さを h_d とし、非越流の場合の最大波力発生時の堤体前面の浸水深を η^* とする。水深係数 α は、 η^* と通過波の浸水深の比として定義される。また越流する場合にも堤体に働く波力は静水圧に準ずるとし、その静水圧を与える水深を $\eta^{*'}$ とし、これと通過波深水深との比を α' とする。また、越流時と非越流時で圧力分布が仮に等しい場合にも、堤体の高さが低いために堤体に働く波力は小さくなる。この η^* の静水圧分布に対して堤体高 h_d の部分のみの圧力を積分して得られる波力を F^* とし、 $\eta^{*'}$ の静水圧分布に対し堤体に働く圧力を積分した波力を F' とする。したがって、 F' が越流時の堤体に働く波力となる。また $\eta^{*'}$ は、非越流のために必要な最低堤体高を意味する。

上述の定義は、堤体に働く圧力が静水圧分布となっていることが前提となっているが、計測された圧力は静水圧形状に近い分布をしているものの、試験ケースによっては値がばらつき、また圧力の鉛直方向の勾配も ρg (ρ : 水の密度, g : 重力加速度) と厳密には一致しない。そこでここでは、水深係数 α を以下の式で定義する。

$$\alpha = \frac{\eta^*}{\eta} \quad \eta^* = \sqrt{\frac{2F}{\rho g}} \quad (7.2.1)$$

$$\alpha' = \frac{\eta^{*'}}{\eta} \quad \eta^{*'} = \frac{F'}{\rho g h_d} + \frac{1}{2} h_d \quad (7.2.2)$$

ここで、 F は非越流時の堤体に働く津波波力、 η は通過波の代表時刻における浸水深である。この定義によれば、水深 $\alpha \eta$ の静水圧を積分して得られた波力が、実際に作用する津波波力と同じとなる、等価な静水圧分布を与える α となるため、静水圧を仮定することにより波力の評価を正しく出来る。一方、 α による堤体前面の最大浸水深の評価は、圧力を基準としているため、実際の堤体前面水位よりも低い場合があることに注意が必要である。

上述のパラメタを用いて、越流時の波力評価を以下に定式化する。非越流時と越流時で、堤体の沖側での運動量の流出入が等しいと仮定すると、

$$\frac{1}{2} \rho g \eta^{*2} = \frac{1}{2} \rho g \eta^{*'^2} + \rho \frac{q^2}{\eta^{*'} - h_d} \quad (7.2.3)$$

の関係が成り立つ。また、堤体を越流する流量係数を C (一般的には、上流側断面の水位を対象とするが、ここでは、堤体前面における水位を対象とする) を用いて、

$$q = C(\eta^{*'} - h_d)^{3/2} \quad q^2 = C(\eta^{*'} - h_d)^3 \quad (7.2.4)$$

とする。これを式(7.2.3)に代入して整理すると、

$$\eta^{*2} = \eta^{*'^2} + \frac{2C^2}{g} (\eta^{*'} - h_d)^2 \quad (7.2.5)$$

が得られる。これを無次元化することにより、次式が得られる。

$$1 = \left(\frac{\eta^{*'}}{\eta^*}\right)^2 + \frac{2C^2}{g} \left(\frac{\eta^{*'}}{\eta^*} - \frac{h_d}{\eta^*}\right)^2 \quad \frac{\eta^{*'}}{\eta^*} = \frac{\frac{2C^2}{g} \frac{h_d}{\eta^*} + \sqrt{\frac{2C^2}{g} \left\{1 - \left(\frac{h_d}{\eta^*}\right)^2\right\} + 1}}{1 + \frac{2C^2}{g}} \quad (7.2.6)$$

$$\frac{\eta^{*'}}{\eta^*} = \frac{\frac{2C^2}{g} + \sqrt{\frac{2C^2}{g} \left\{\left(\frac{\eta^*}{h_d}\right)^2 - 1\right\} + \left(\frac{\eta^*}{h_d}\right)^2}}{\left(1 + \frac{2C^2}{g}\right) \frac{\eta^*}{h_d}} \quad (7.2.7)$$

また、堤体に働く波力は

$$F' = \frac{1}{2} \rho g \eta^{*'}{}^2 - \frac{1}{2} \rho g (\eta^{*'} - h_d)^2 \quad (7.2.8)$$

$$F^* = \frac{1}{2} \rho g h_d (2\eta^* - h_d) \quad (7.2.9)$$

であるから、これを式(7.2.5)に代入して整理すると、

$$\left(1 + \frac{2C^2}{g}\right) \left(\frac{2\eta^*}{h_d} - 1\right)^2 \left(\frac{F'}{F^*}\right)^2 + 2 \left(1 - \frac{2C^2}{g}\right) \left(\frac{2\eta^*}{h_d} - 1\right) \frac{F'}{F^*} + 1 + \frac{2C^2}{g} - 4 \left(\frac{\eta^*}{h_d}\right)^2 = 0 \quad (7.2.10)$$

が得られる。また、式(7.2.8)より

$$\eta^{*'} = \frac{F'}{\rho g h_d} + \frac{h_d}{2} \quad (7.2.11)$$

であるため、これを式(7.2.5)に代入して整理すると、

$$\left(\frac{F'}{\rho g \eta^* h_d} + \frac{h_d}{2\eta^*}\right)^2 + \frac{2C^2}{g} \left(\frac{F'}{\rho g \eta^* h_d} - \frac{h_d}{2\eta^*}\right)^2 = 1 \quad (7.2.12)$$

が得られる。

ここで、堤体位置において、限界水深が発生していると仮定すると、 $C = \sqrt{g} = 3.13$ となるため、これを、式(7.2.7)、式(7.2.10)、式(7.2.12)に代入すると、それぞれ以下の式となる (5.3 参照)。

$$\frac{\eta^{*'}}{\eta^*} = \frac{2 + \sqrt{3 \left(\frac{\eta^*}{h_d}\right)^2 - 2}}{3 \frac{\eta^*}{h_d}} \quad (7.2.13)$$

$$\frac{F'}{F^*} = \frac{1 \pm 2 \sqrt{3 \left(\frac{\eta^*}{h_d}\right)^2 - 2}}{3 \left(\frac{2\eta^*}{h_d} - 1\right)} \quad (7.2.14)$$

$$\frac{F'}{\rho g \eta^* h_d} = \frac{1 + \sqrt{12 \left(\frac{\eta^*}{h_d}\right)^2 - 8}}{6 \frac{\eta^*}{h_d}} \quad (7.2.15)$$

なお、式(7.2.15)は、 $\eta^*/h_d=2.45$ で最大値 0.612 となり、また $\eta^*/h_d \rightarrow \infty$ とすると、0.58 となる。

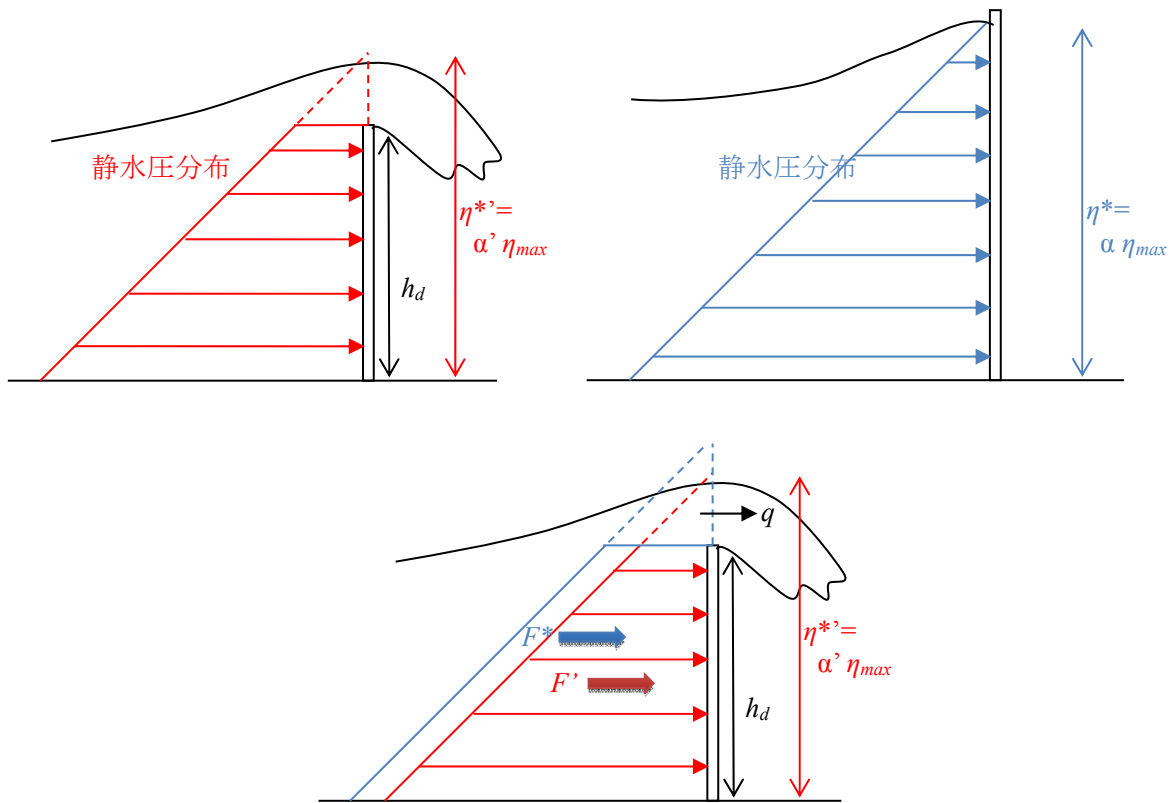
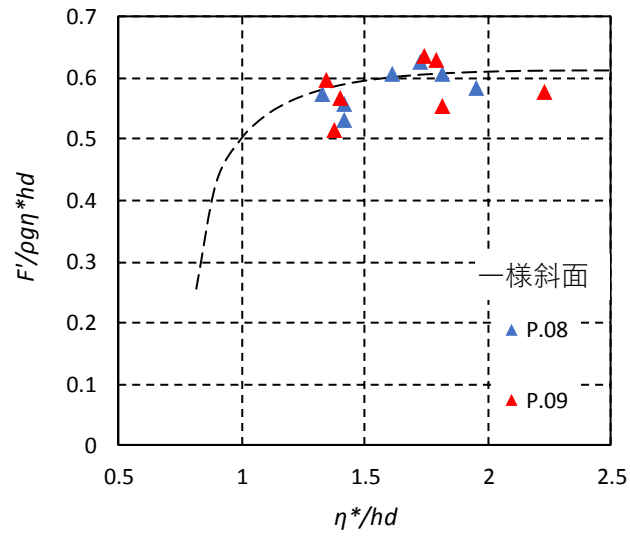
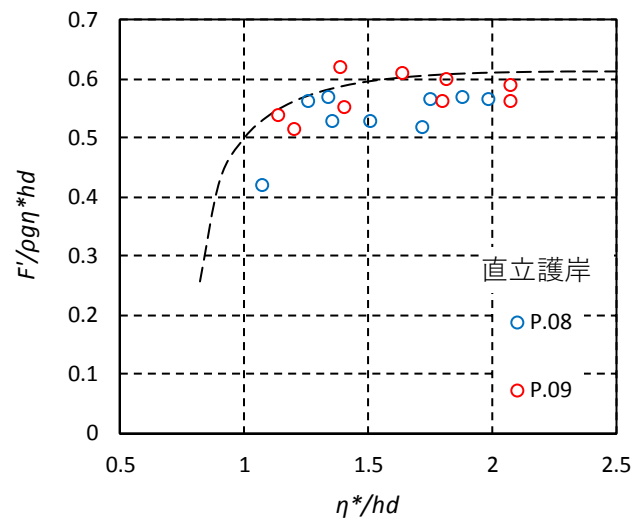


図- 7.2.7 越流時の津波波力の各パラメタの定義

図- 7.2.8 に、越流による波力の低減効果について示す。図中には、式(7.2.15)の値を破線で示した。図より、解析結果は実験結果の上限値とよく整合していることが分かる。実験結果が解析値より小さくなるのは、主に上述の仮定のうち、越流によらず沖側の運動量が等しいという仮定によると考えられる。すなわち、本来は堤体での反射により沖側に戻る運動量は、越流により小さくなるが、この影響を考慮していないため沖に向かう運動量を大きく評価し、そのため波力を大きく評価していると考えられる。



(a)単純勾配

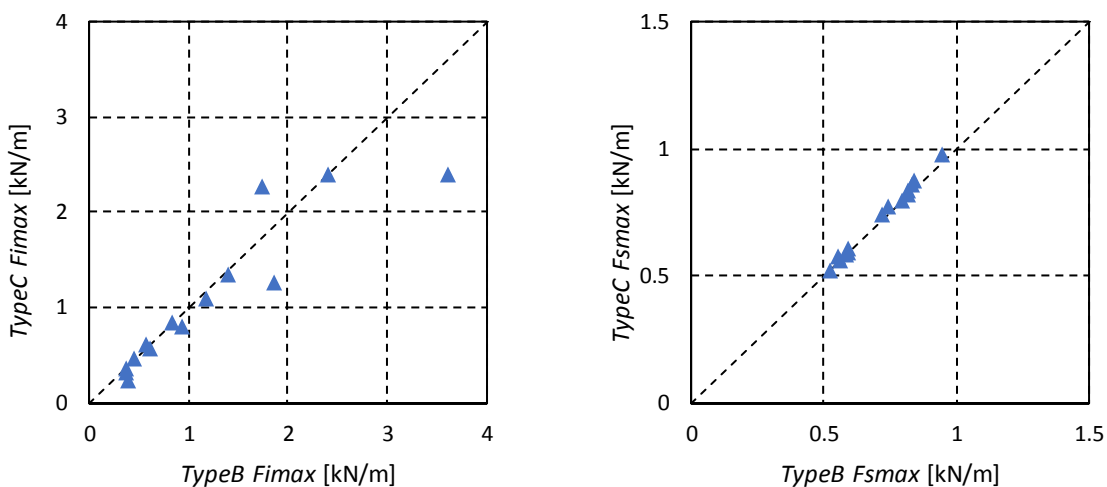


(b)直立護岸

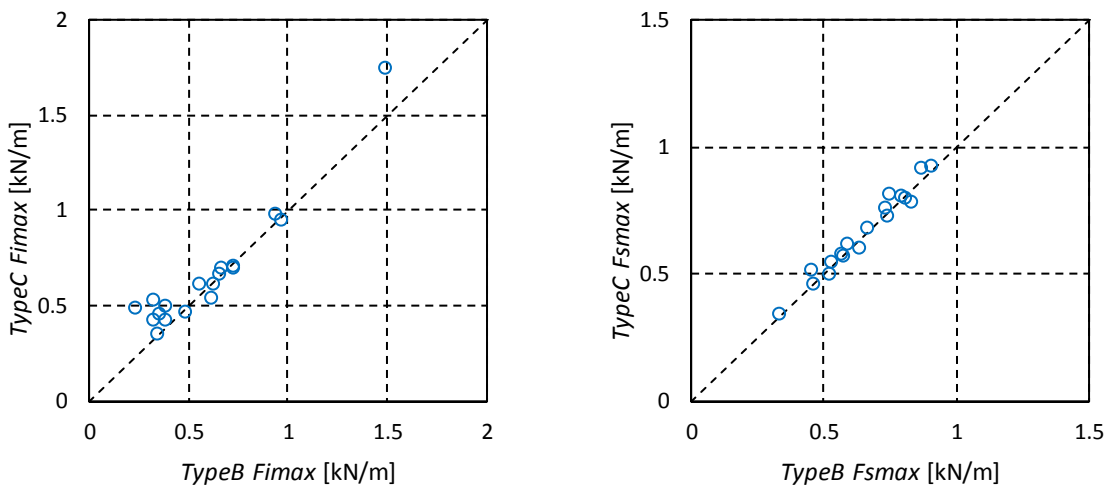
図- 7.2.8 越流水深と無次元波力の関係 (TypeB)

7.2.5. 固定模型 (TypeB) とひずみ模型 (TypeC) の波力の比較

図- 7.1.3 に、段波波力と持続波力の最大値について、堤体模型を固定した場合 (TypeB) とひずみを許容した場合 (TypeC) を比較した結果を示す。これによると、TypeB については計測の繰り返し回数が 3 回と少ないため、特に段波波力にばらつきは生じているものの、固定模型とひずみ模型に働く波力はほぼ等しく、同じ波力が生じていることが分かる。堤体のひずみを許容すると、波力発生時に堤体が変形し、この緩衝効果によって波力は低減すると考えられるが、試験結果からはこの低減効果が明瞭には表れていない。これは、堤体模型の変形量が小さく圧力に影響を及ぼしていないか、波力の時間変化に対して堤体模型の変形応答が追随していないためと考えられる。



(a) 単純勾配



(b) 直立護岸

図- 7.2.9 TypeB と TypeC の波力の比較 (左 : 段波波力, 右 : 持続波力)

7.2.6. 段波波圧と持続波圧の比較

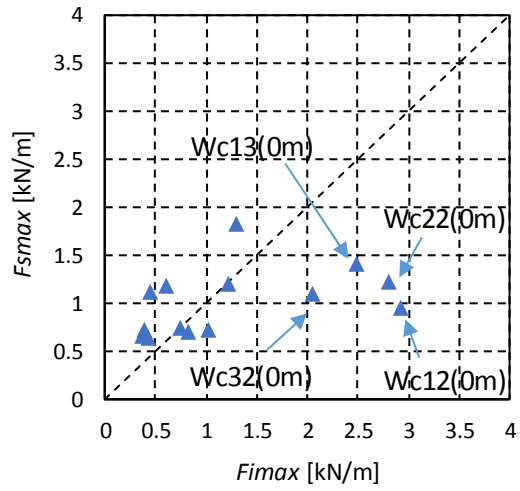
図- 7.2.10～図- 7.2.13 に、段波波圧と持続波圧について比較した結果を示す。図- 7.2.10、図- 7.2.11 は、波力の最大値 F_{imax} と F_{smax} について比較したものであり、図- 7.2.12 図- 7.2.13 は、モーメント M_{imax} 、 M_{smax} について比較したものである。それぞれ、非越流時 (TypeA) と、越流時の堤体模型固定 (TypeB)、越流時のひずみ許容 (TypeC) のケースについて示した。図中には、他のケースに比較して特異な値となっているものについて、試験ケース (括弧内の数字は、堤体の設置位置) を示した。TypeB と TypeC では、TypeB の繰り返し回数が 3 回であることからデータのばらつきが大きいことを考慮すると、両者はほぼ同じ結果となっている。前述したように、堤体のひずみを許容すると特に衝撃的な段波波圧では力が低減すると考えられるが、本試験では、流体力の最大値に影響を及ぼすようなひずみが生じていないと考えられる。

単純勾配の堤体位置が汀線の場合に、1 対 1 のラインの右側に多くの試験結果がプロットされている。これらのケースでは、砕波しながら堤体に津波が衝突するため、段波波力が卓越する傾向にあることが分かる。また直立護岸でも同様に、砕波しながら堤体に衝突する We14 の堤体位置が汀線のケースにおいて、段波波圧が卓越している。

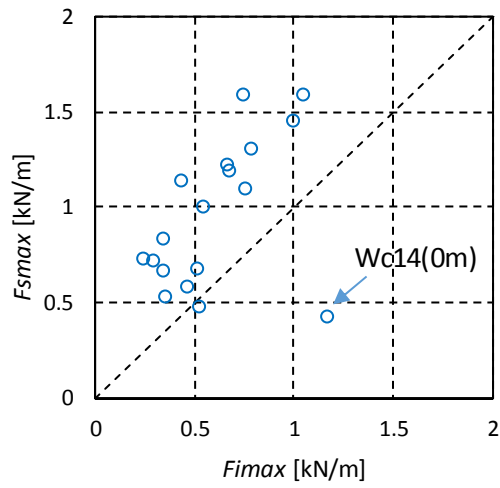
単純勾配と直立護岸を比較すると、単純勾配の方が、段波波圧が持続波圧よりもより大きくなる傾向にある。直立護岸では護岸位置で一旦津波の水平方向流速が低減し、汀線位置での水位上昇により陸域へ流入が生じて遡上しているのに対し、単純勾配では海域での水平流速が低減せずに陸域へ遡上し、水平流速が大きい状態で堤体に衝突するためと考えられる。

非越流と越流を比較すると、縦軸 F_{smax} 、 M_{smax} については、越流することにより明確に減少しているが、横軸 F_{imax} 、 M_{imax} については両者は同程度の値を示している。段波波圧については、その作用波圧が底面部分に集中しているため、堤体高が足らずに越流が生じていても圧力の低下が小さいことが分かる。これは、7.2.3 に示した結果と整合する。

波力とモーメントでは、モーメントで比較した方が波力で比較した場合よりも、図面上で左側、すなわち持続波に対して相対的に段波の値が小さくなる傾向にある。持続波圧は静水圧に近い水圧分布であるが、段波波圧は底面に水圧が集中するため、持続波圧よりも段波波圧の方が合力としての作用点が底面により近くなる。そのためモーメントで比較した場合には、段波の方が値が小さくなる傾向にある。

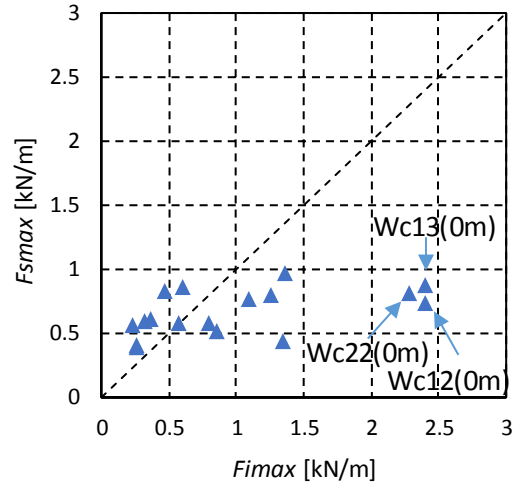
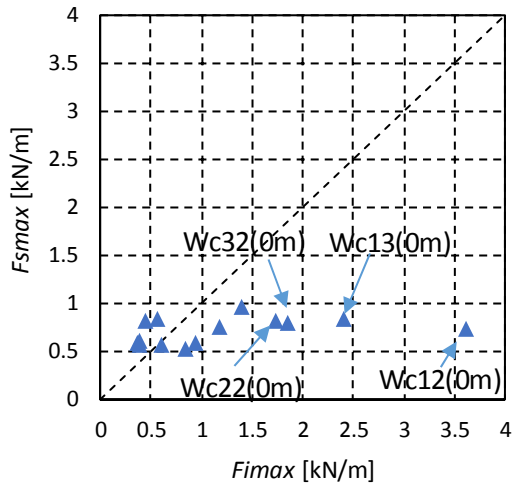


(a)単純勾配

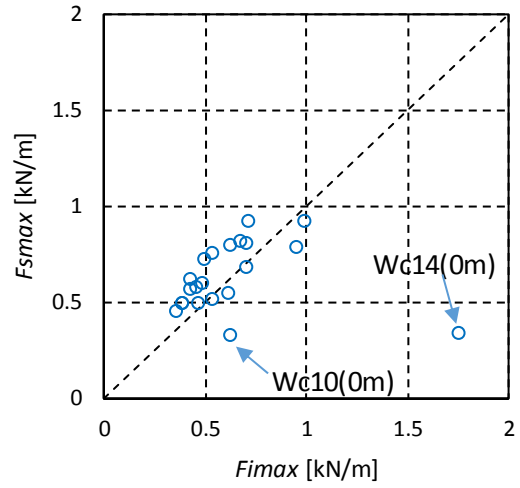
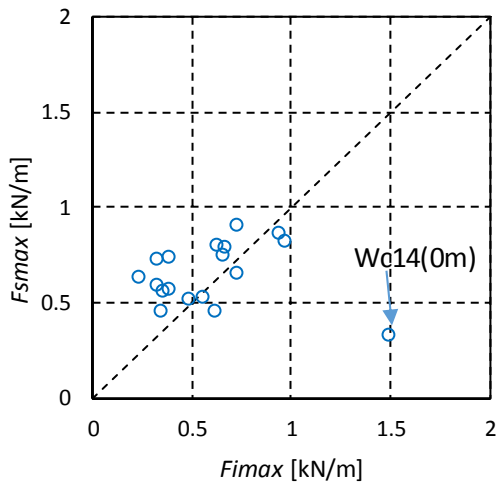


(b)直立護岸

図- 7.2.10 段波波力と持続波力の比較 (非越流時, TypeA)

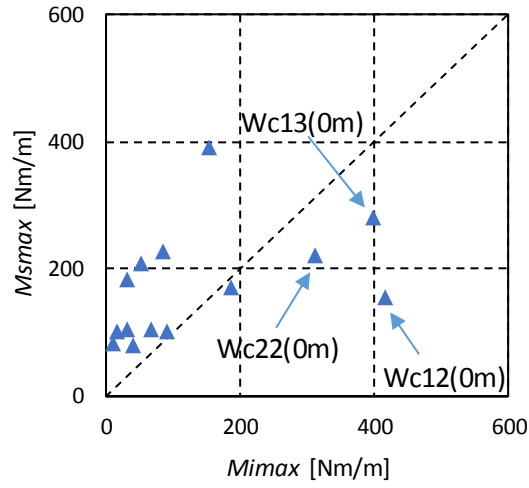


(a)単純勾配

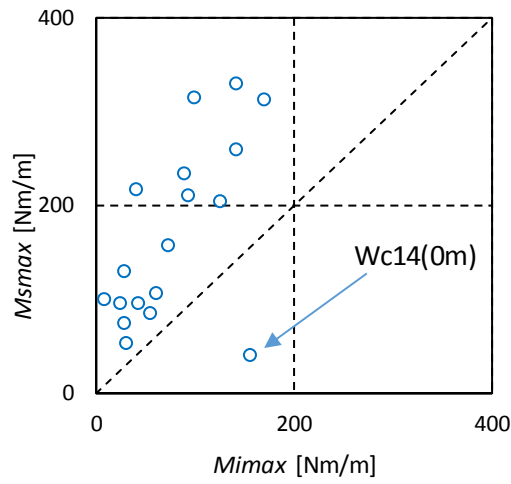


(b)直立護岸

図- 7.2.11 段波波力と持続波力の比較 (越流時, 左: TypeB, 右: TypeC)

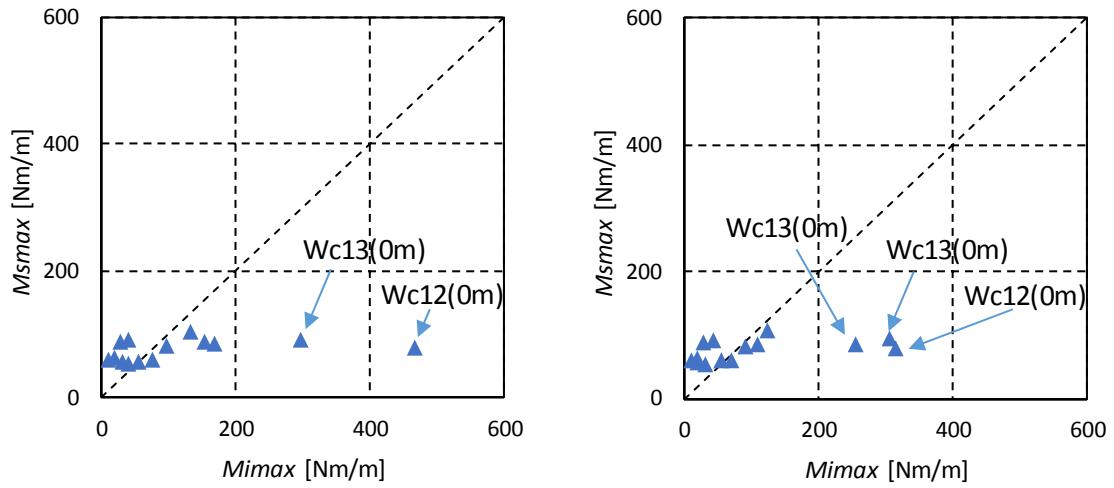


(a)単純勾配

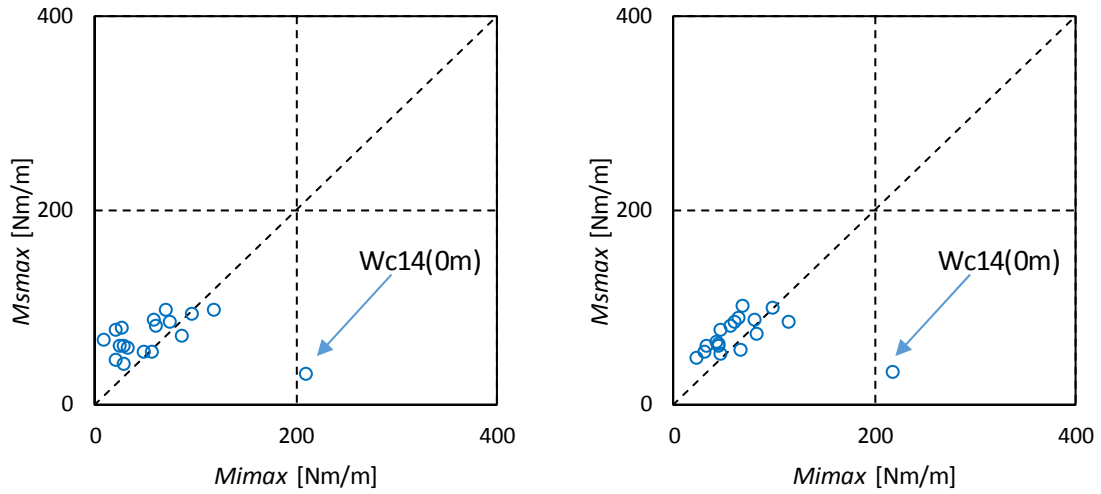


(b)直立護岸

図- 7.2.12 段波モーメントと持続波モーメントの比較 (非越流時, TypeA)



(a)単純勾配



(b)直立護岸

図- 7.2.13 段波モーメントと持続波モーメントの比較 (越流時, 左: TypeB, 右: TypeC)

7.3. ひずみ試験

7.3.1. 段波波圧と持続波圧による堤体変位及びひずみの比較

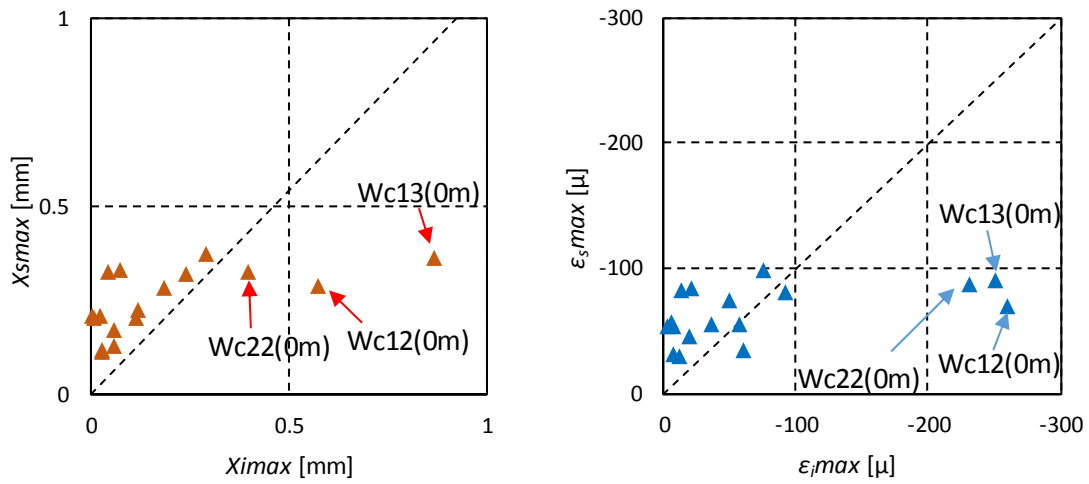
図-7.3.1に、段波領域と持続波領域における堤体変位の最大値 X_{imax} , X_{smax} とひずみの最大値 ϵ_{imax} , ϵ_{smax} の比較を示す。ここに示したひずみは、もっとも底面に近いひずみゲージ（底面より0.025m）の値である。変位とひずみは、ほぼ同様の結果となっており、両者が整合していることが確認できる。

前述の図-7.2.11に示した波力の結果と比較すると、全体に段波波圧に対するひずみが低減する傾向（図-7.2.11に比較して、図-7.3.1のプロットが図の左方向に移動）にあることが分かる。段波波圧の方が持続波圧よりも作用時間が短いため、動的な効果により段波領域の変位・ひずみが小さくなっていると考えられる。

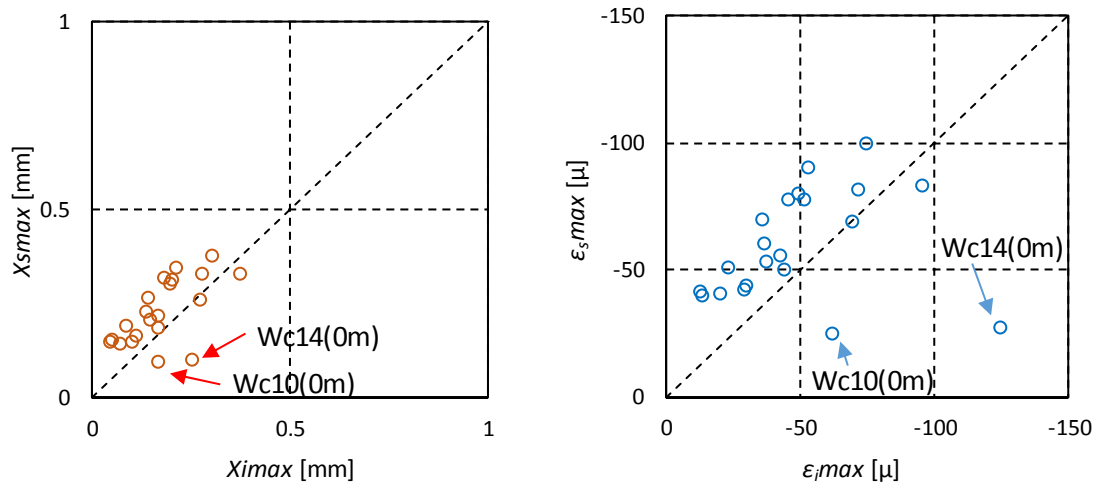
図-7.2.11に示した波力を図-7.3.1に示した堤体変位で除したもの、および図-7.2.13に示したモーメントを図-7.3.1に示したひずみで除したものを、図-7.3.2に示す。なお、後者については、ヤング係数、部材圧、断面2次モーメントを用いて無次元化している。これらは、動的な影響を考慮した見掛けの剛性を示すものであり、最大波力と最大変位の関係、および最大モーメントとひずみの関係が静的と仮定した場合の剛性を意味する。したがってこの値が大きいほど、波力に対してひずみ難い結果であることを示す。

これによると、全てのケースで持続波圧によるものよりも、段波波圧によるものの方が見掛けの剛性が大きくなっている。このことから、最大段波波圧の作用時間が最大持続波圧の作用時間よりも短いために、みかけの剛性が大きく、ひずみ難くなっていることが分かる。また持続波圧の場合、見掛けの剛性の変化が段波波圧の場合に比較して小さい（縦軸に対する変化が小さい）ことから、持続波領域では動的な影響が小さく、静的な波圧とひずみの関係に近い準定常状態であることが分かる。

波力と変位の関係より求めた持続波に対する見掛けの剛性（縦軸）は、変化量は小さいが縦軸2~4の間に分布している。一方、モーメントとひずみの関係より求めたものは、ばらつきが小さく、1.4~1.5程度で値がほぼ一定となる。持続波領域では、圧力分布が静水圧分布形状（ここでは越流しているため台形分布）であるため、波力が大きくなると底面から合力の作用点までの距離が大きくなる。したがって、変位は主にモーメントに比例するため、波力を変位で除した値は波力が大きいほど小さくなる。なお、右側の図で示した無次元化量は、静的な線形弾性体を考えた場合には1になるものであるが、ここで用いたモーメントは底面部に働くものであり、ひずみは一番下のひずみ計測点（底面より0.025m）であるため、モーメントとひずみの対象点が異なることから1より大きくなっている。



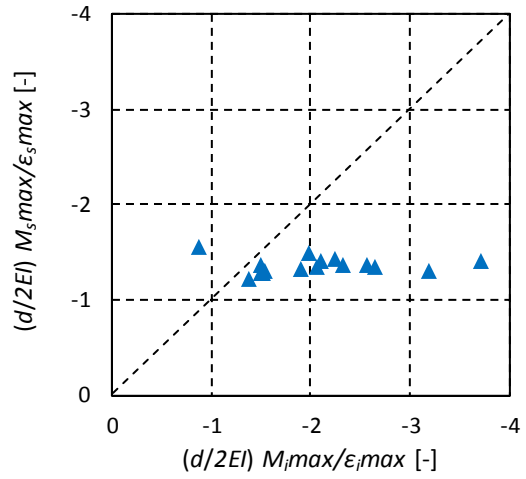
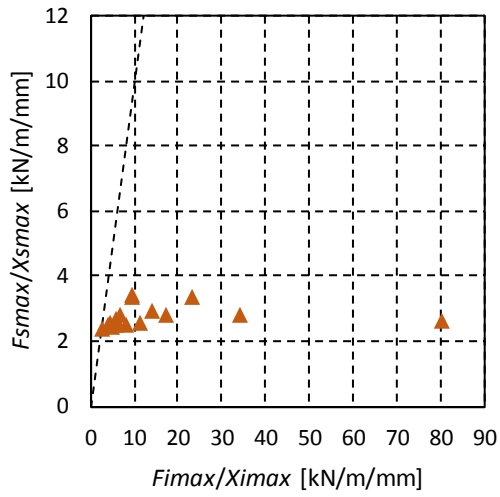
(a) 単純勾配



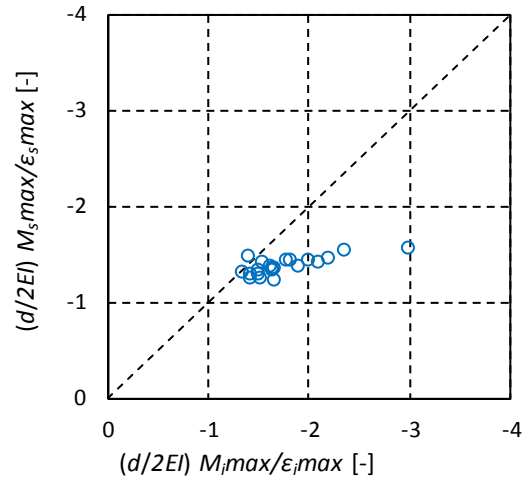
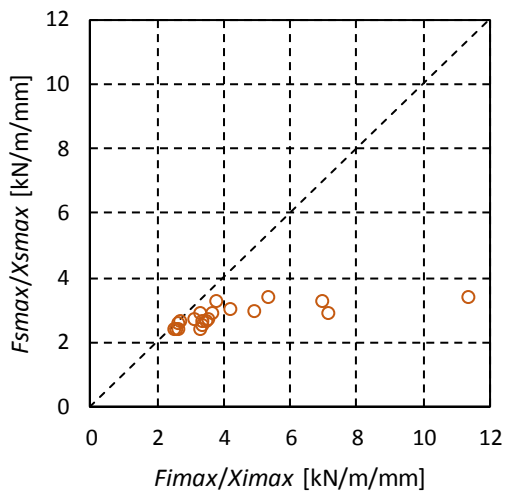
(b) 直立護岸

ひずみ計測位置：底面より 0.025m

図- 7.3.1 段波波圧と持続波波圧による堤体変位とひずみの比較 (左:変位, 右:ひずみ, TypeC)



(a) 単純勾配



(b) 直立護岸

図- 7.3.2 段波波圧と持続波波圧による変位時の見掛けの剛性比較 (TypeC)

7.3.2. 静的波力による動的ひずみの評価

試験において計測された動的ひずみと、その時に作用している波力に対する静的ひずみを比較すると、動的な影響により前者の方が小さくなると考えられる。ここでは、計測された動的ひずみから、これと同じ静的なひずみが生じる静水圧による定常的な静的波力を算定する。

図・7.3.3(b)に示すように、ひずみ試験 (TypeC) のケースでは、持続波圧作用時は越流状態となっている。ここで、堤体模型に働く波圧として静水圧勾配の圧力分布を仮定し、ひずみゲージ設置位置よりも上の堤体に働く波圧の合力を F' とする。ひずみゲージ設置位置に働く圧力を p 、ひずみゲージ設置位置より上の堤体の高さを h' とすると、ひずみゲージ位置に働くモーメント M は、

$$M = (p - \rho gh')h' \times \frac{1}{2}h' + \frac{1}{2}\rho gh'^2 \times \frac{1}{3}h' = \frac{1}{2}ph'^2 - \frac{1}{3}\rho gh'^3 \quad (7.3.1)$$

と表される。また、

$$F' = (p - \rho gh' + p) \times \frac{1}{2}h' = \frac{1}{2}ph' - \frac{1}{3}\rho gh'^3 \quad (7.3.2)$$

であるから、

$$p = \frac{F'}{h'} + \frac{1}{2}\rho gh' \quad (7.3.3)$$

となるため、これを式(7.3.1)に代入して、

$$M = \frac{1}{2} \left(\frac{F'}{h'} + \frac{1}{2}\rho gh' \right) h'^2 - \frac{1}{3}\rho gh'^3 = \frac{1}{2}F'h' - \frac{1}{12}\rho gh'^3 \quad (7.3.4)$$

が得られる。また、堤体の高さを h_d とすると、堤体模型全体に働く波力 F^* は、次式により表される。

$$F^* = \frac{1}{2} \{ p - \rho gh' + p + \rho g(h_d - h') \} h_d = ph_d - \rho gh'h_d + \frac{1}{2}\rho gh_d^2 \quad (7.3.5)$$

これに、式(7.3.3)を代入すると、堤体模型全体に働く波力を表す式として、次式が得られる。

$$F^* = \left(\frac{F'}{h'} + \frac{1}{2}\rho gh' \right) h_d - \rho gh'h_d + \frac{1}{2}\rho gh_d^2 = \frac{h_d}{h'} F' + \frac{1}{2}\rho g(h_d - h')h_d \quad (7.3.6)$$

一方、均一長方形断面のひずみ ε とモーメント M の静的関係は、次式で表される。

$$E\varepsilon = \frac{M d}{I} \quad (7.3.7)$$

ここで、 E はヤング係数、 I は断面 2 次モーメント、 d は堤体模型の厚さである。これを、式(7.3.4)に代入することにより、

$$2EI\varepsilon = \left(\frac{1}{2}F'h' - \frac{1}{12}\rho gh'^3 \right) d \quad (7.3.8)$$

$$F' = \frac{1}{6}\rho gh'^2 + \frac{4EI\varepsilon}{dh'} \quad (7.3.9)$$

が得られ、これを式(7.3.6)に代入すると、

$$\begin{aligned} F^* &= \frac{h_d}{h'} \left(\frac{1}{6}\rho gh'^2 + \frac{4EI\varepsilon}{dh'} \right) + \frac{1}{2}\rho g(h_d - h')h_d \\ &= \left\{ \frac{4EI\varepsilon}{dh'^2} + \frac{1}{6}\rho g(3h_d - 2h') \right\} h_d \end{aligned} \quad (7.3.10)$$

となる。これは、堤体に生じた動的ひずみと同等の静的ひずみに対応した静水圧分布の波力（以降では、ひずみ相当波力とする）を意味する。

一方、段波波圧作用時は越流しておらず、またその波圧分布は静水圧とは異なる。圧力分布は、底面付近に集中するが、その作用高さは試験ケースによって異なっており、一意に決定すること

ができない。圧力の分布形をモデル化出来ないため、ここでは図- 7.3.3(a)に示すように、計測されたひずみと同等のひずみが生じる静水圧状態を、ひずみ相当波力として評価する。

相当する静水圧により堤体模型全体に働く波力を F^* 、ひずみゲージ設置位置よりも上の堤体に働く波圧の合力を F' 、その作用高を h'' とする。

$$F' = \frac{1}{2} \rho g h''^2 \quad M = \frac{1}{3} F' h'' \quad (7.3.11)$$

であるため、式(7.3.7)を用いて、

$$2EI\varepsilon = \frac{1}{3} dh'' F' \quad h'' = \frac{6EI\varepsilon}{dF'} \quad (7.3.12)$$

$$F' = \frac{1}{2} \rho g \left(\frac{6EI\varepsilon}{dF'} \right)^2$$

$$F' = \sqrt[3]{\frac{18\rho g (EI\varepsilon)^2}{d^2}} \quad (7.3.13)$$

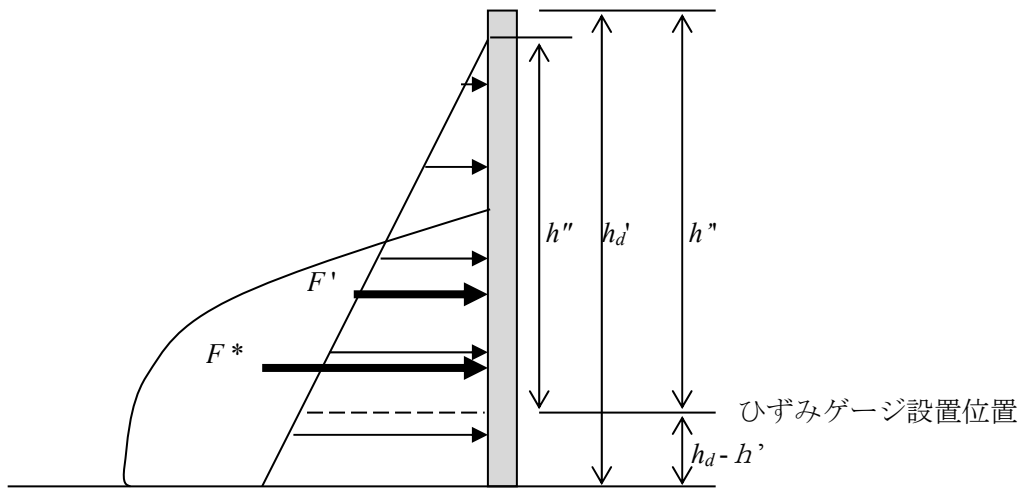
であり、幾何学的に F^* は次式となる。

$$F^* = F' \left(\frac{h'' + h_d - h'}{h''} \right)^2 = F' \left(1 + \frac{h_d - h'}{h''} \right)^2 \quad (7.3.14)$$

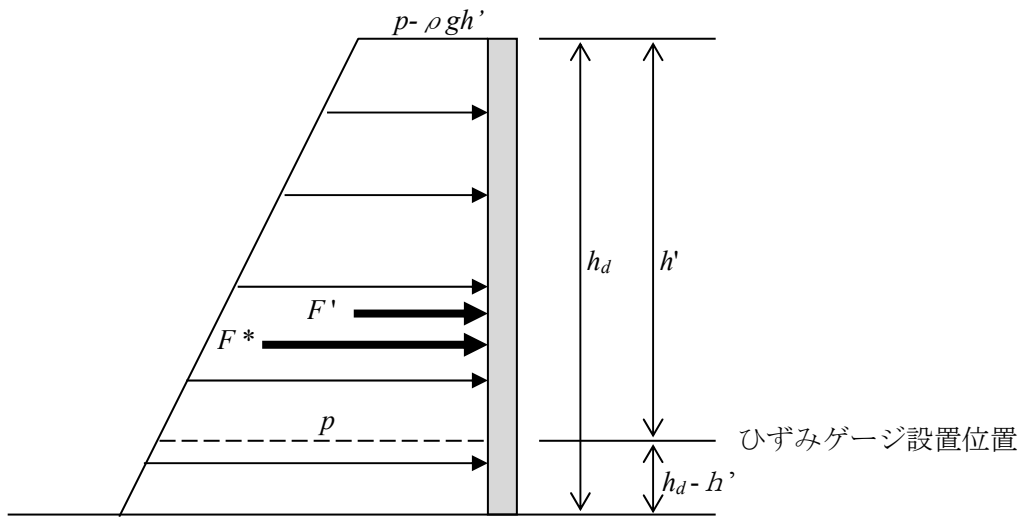
式(7.3.12)を代入すると、ひずみ相当波力の算定式として、次式が得られる。

$$F^* = F' \left\{ 1 + \frac{dF'}{6EI\varepsilon} (h_d - h') \right\}^2 = \left\{ F'^2 + \frac{dF'^3}{6EI\varepsilon} (h_d - h') \right\}^2 \quad (7.3.15)$$

$$= \left\{ F'^2 + 3\rho g \frac{EI\varepsilon}{d} (h_d - h') \right\}^2 \quad (7.3.16)$$



(a) 段波波圧作用時



(b) 持続波圧作用時

図-7.3.3 ひずみ相当波力の算定モデル

上式を用いてひずみ相当波力を算定した結果と、TypeC の計測波力の比較を図- 7.3.4 に示す。持続波力については、ひずみ相当波力と実際の波力がほぼ等しく、前述したように準定常的な波力-ひずみ関係となっていることが推察される。ただし、ひずみ相当波力は実際の波力よりも多少小さくなっている。これは、ヤング係数や断面 2 次モーメントの評価精度に加え、ひずみ相当波力の作用点を実際よりも底面から遠くに仮定していることが要因として考えられる。越流時の堤頂付近の圧力は、流速が大きくなるために堤体下方に作用する静水圧分布に対して小さくなっていると考えられるため、水圧を積分した波力の作用点は、静水圧分布（台形分布）を仮定したひずみ相当波力の作用点よりも下側にあると考えられる。底面からひずみ相当波力の作用点までの距離が実際よりも大きくなるために、波力が小さく評価されていると考えられる。

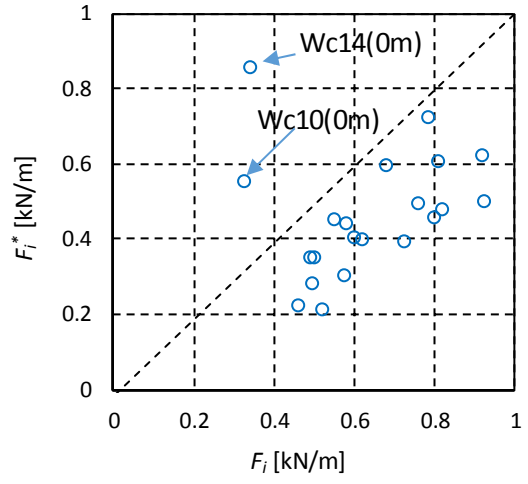
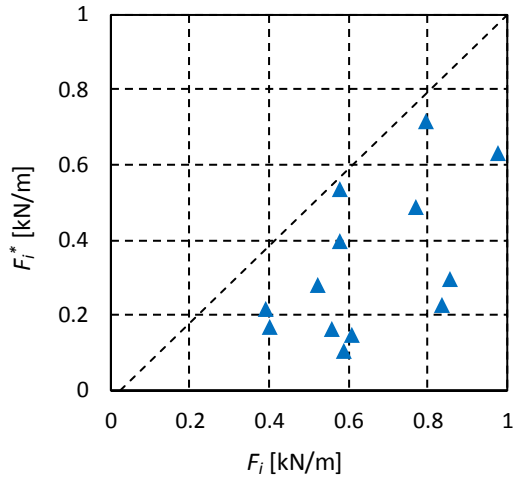
段波波力の場合は、ひずみ相当波力が実際の波力よりも小さくなっている。これは、動的な効果により、実際に生じている最大ひずみ（動的）が、最大波力によって生じる静的ひずみよりも小さいことが主な要因と考えられるが、これに加え持続波力の場合と同様に、ひずみ相当波力では静水圧分布を仮定しているために波力の作用点が実際よりも高い位置となっていることが影響していると考えられる。

次に、越流によるひずみへの影響を検討するため、図- 7.2.8 と同様のグラフを、ひずみ相当波力を用いて作成したものを、図- 7.3.5～図- 7.3.7 に示す。図中には、図- 7.2.8 と同じ評価式を破線で示した。図- 7.3.5、図- 7.3.6 はいずれも段波波圧によるものだが、図- 7.3.5 では η^* として、最大段波波力と同等の波力となる静水圧分布の水深を適用しており、図- 7.3.6 では、最大持続波力と同等の波力となる静水圧分布、すなわち図- 7.3.7 と同じ η^* を適用している。また、図中の評価式は持続波圧を対象に導出したものであるが、ここでは参考として段波波圧に対しても示している。

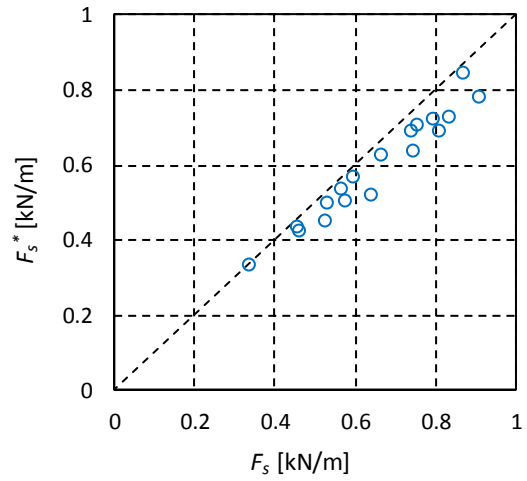
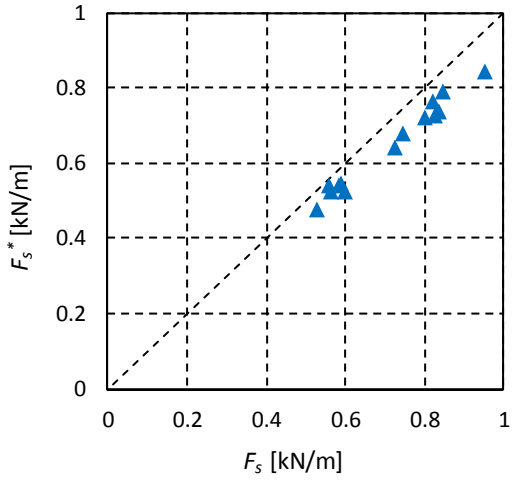
ひずみから求めた相当波力は、概ね理論値よりも小さい結果となった。これは、上述したように動的な影響によりひずみが小さくなったことと、作用点が実際よりも高い位置に仮定されていることが主な要因と考えられる。ただし、図- 7.3.5、図- 7.3.6 に示した段波波圧についての結果では、一部理論値よりも大きな結果となっている。これらのケースはいずれも砕波しながら堤体に衝突しているケースであり、このような場合には動的ひずみが静的ひずみよりも大きくなる場合があり、注意が必要である。

図- 7.3.6 は、持続波圧を基準に動的な影響を考慮した越流時の段波波圧を評価したものであるが、砕波しながら堤体に衝突するケースを除き、評価式はいずれのケースも安全側の評価をしている。また同様に、評価式は図- 7.3.7 においても持続波圧を安全側に評価している。このことから、非越流の条件における持続波力に基づき、提案した評価式による越流の影響を考慮した静水圧分布を静的外力とすれば、段波領域、持続領域ともに安全側の評価が可能であると言える。

試験ではアルミ板を用いた堤体模型を適用しているが、実際はコンクリート製の堤体が適用されることが一般的と考えられる。この場合、堤体単位長さ（高さ方向）の重量は模型よりも大きくなるため、慣性力の影響が試験よりも大きく、動的な影響によるひずみの低減はより顕著になると考えられる。

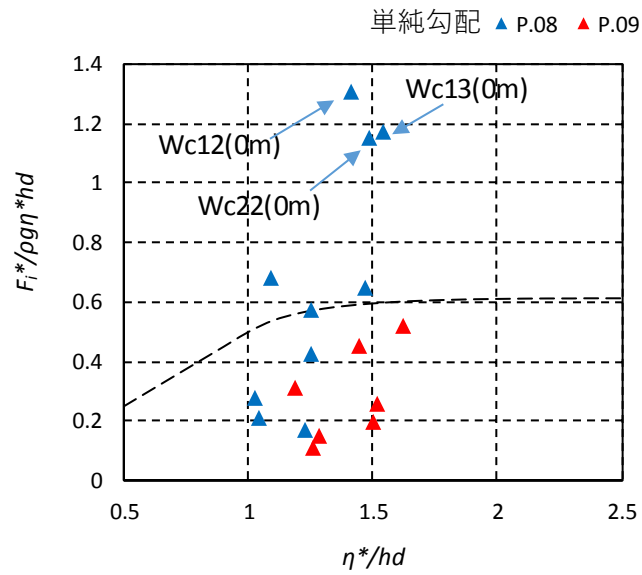


(a) 段波波力

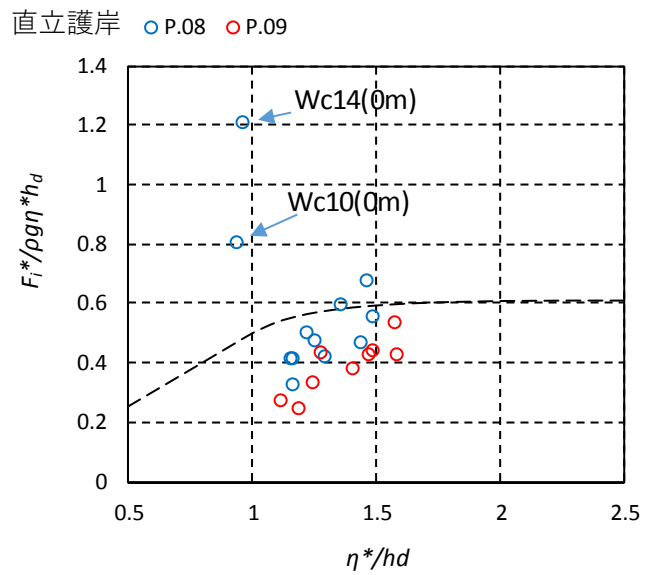


(b) 持続波力

図-7.3.4 作用波力とひずみ相当波力の比較 (左: 単純勾配, 右: 直立護岸)

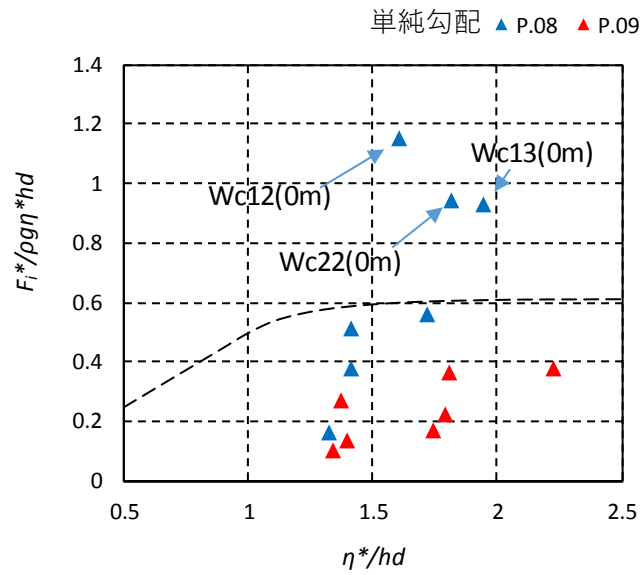


(a)単純勾配

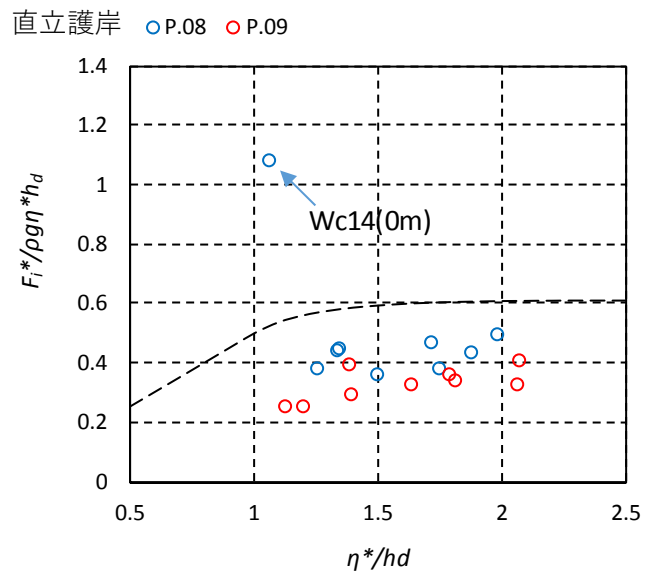


(b)直立護岸

図- 7.3.5 越流を考慮したひずみ相当波力の評価（段波波圧， η^* は段波波力相当の静水圧水深）

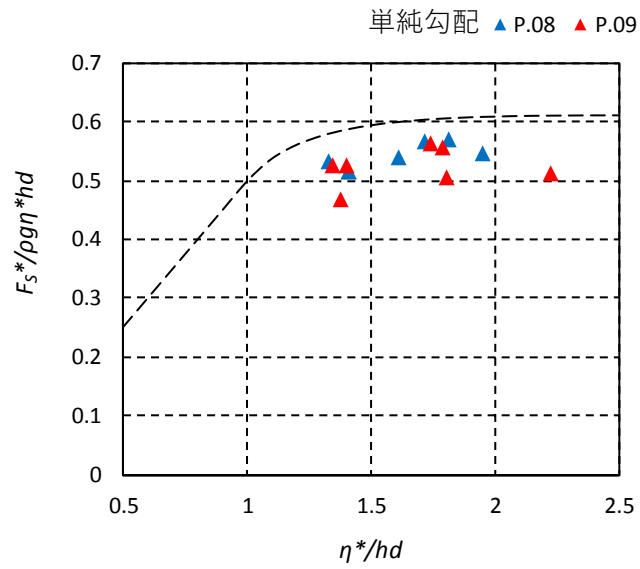


(a)単純勾配

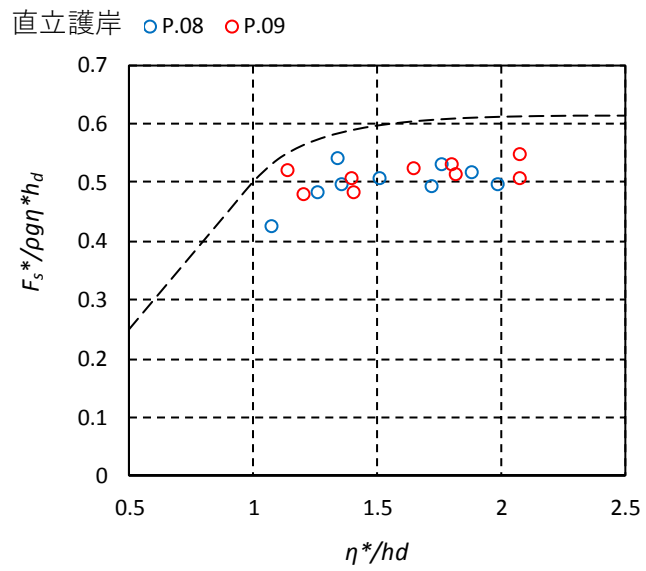


(b)直立護岸

図- 7.3.6 越流を考慮したひずみ相当波力の評価 (段波波圧, η^* は持続波力相当の静水圧水深)



(a)単純勾配



(b)直立護岸

図- 7.3.7 越流を考慮したひずみ相当波力の評価 (持続波圧)

8. 数値シミュレーション

8.1. シミュレーション手法と解析条件

水理試験を対象に，数値シミュレーション解析を実施し，解析手法の適用性を確認した．ここでは，水面変動を伴う流れ場を解析可能な手法の1つである，VOF法 (Volume of Fluid Method) を用いた解析ツールを用いて水理試験の再現解析を実施した．解析コードとして一般に市販されている STAR-CD (CD-adapco 社) およびオープンソースである OpenFOAM を適用した．これらは，連続の式及び Navier-Stokes 方程式を基礎式とし，界面捕捉法に VOF 法を用いている数値流体解析コードである．

解析条件の一覧を表- 8.1.1 に，解析に用いた空気・水の物性値を表- 8.1.2 に示す．境界条件，乱流モデルは STAR-CD と OpenFOAM で共通とした．ただし，解析時間間隔については STAR-CD では 0.001 s の固定としたが，OpenFOAM ではクーラン数が 0.5 を超えないよう解析時間間隔を自動調整する設定とし，解析時間間隔の最大値を 0.001s に設定した．堤体周辺の解析格子を，図- 8.1.1 に示す．

解析では，2次元水理試験で設定した WG3 の計測地点を造波境界として試験水槽をモデル化した．造波境界では，水理試験で計測された WG3 の水位 η_{03} および流速 V_{03} の時系列を入力することで造波を行った．

表- 8.1.1 解析条件

	STAR-CD	OpenFOAM
基礎方程式	気液二相流についての Navier-Stokes 方程式および連続式	
気液界面の補足手法	VOF 法	
解析格子間隔	2.5cm	1.25~2.5cm
解析時間間隔	0.001s	自動調整 (最大クーラン数 0.5)
境界条件	底面部：Non-slip 条件 壁面部：Slip 条件 上端：開境界条件 沖合造波位置 (WG3)： 造波境界条件 下流端：貯留水槽	底面部：Non-slip 条件 壁面部：Non-slip 条件 上端：開境界条件 沖合造波位置 (WG3)： 造波境界条件 下流端：開境界条件
造波方法	沖合造波位置 (WG3) に水理試験で計測された 水位および流速の時系列データを入力	
乱流モデル	k- ϵ モデル	

表- 8.1.2 空気及び水の物性値

物性	空気	水
密度 ρ	1.205kg/m ³	1000 kg/m ³
動粘性係数 ν	1.5×10 ⁻⁵ m ² /s	1.0×10 ⁻⁶ m ² /s

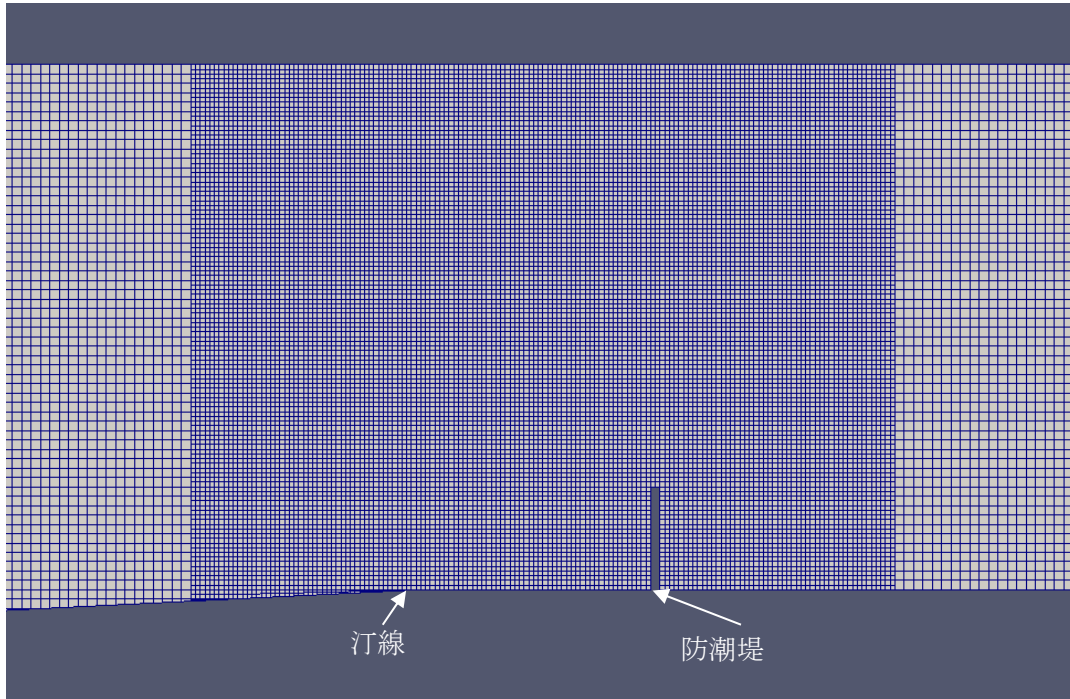


図- 8.1.1 堤体周辺の解析格子（単純勾配，OpenFOAM）

8.2. 解析ケース

表-8.2.1, 表-8.2.2 に解析ケース一覧を示す. 2次元水理試験に適用した波全てを対象とした. 海底地形を単純勾配と直立護岸の2種類, 堤体の設置位置を2種類, 堤体高さを越流と非越流の2種類とし, 通過波検定試験では16ケース, 波力/波圧試験では64ケースを対象に, STAR-CD および OpenFOAM のそれぞれで解析を実施した.

解析結果は, 水理試験の計測位置での水位, 流速, 波力を時系列で出力し, 水理試験との比較を行った.

表-8.2.1 シミュレーション解析ケース (通過波検定試験)

No.	ケース名	地形	波形
1	S-Wc11-0-0	単純勾配 S	Wc11
2	S-Wc12-0-0		Wc12
3	S-Wc13-0-0		Wc13
4	S-Wc21-0-0		Wc21
5	S-Wc22-0-0		Wc22
6	S-Wc31-0-0		Wc31
7	S-Wc32-0-0		Wc32
8	F-Wc11-0-0	鉛直護岸 F	Wc11
9	F-Wc12-0-0		Wc12
10	F-Wc13-0-0		Wc13
11	F-Wc14-0-0		Wc14
12	F-Wc15-0-0		Wc15
13	F-Wc21-0-0		Wc21
14	F-Wc22-0-0		Wc22
15	F-Wc31-0-0		Wc31
16	F-Wc32-0-0		Wc32

表- 8.2.2 シミュレーション解析ケース (波力/波圧試験, 単純勾配) (1/2)

No.	ケース名	地形	波形	堤体高(m)	堤体位置(m)
1	S-Wc11-A-1	単純勾配 S	Wc11	0.8	0
2	S-Wc12-A-1		Wc12		0
3	S-Wc13-A-1		Wc13		0
4	S-Wc21-A-1		Wc21		0
5	S-Wc22-A-1		Wc22		0
6	S-Wc31-A-1		Wc31		0
7	S-Wc32-A-1		Wc32		0
8	S-Wc11-A-2		Wc11		0.625
9	S-Wc12-A-2		Wc12		0.625
10	S-Wc13-A-2		Wc13		0.625
11	S-Wc21-A-2		Wc21		0.625
12	S-Wc22-A-2		Wc22		0.625
13	S-Wc31-A-2		Wc31		0.625
14	S-Wc32-A-2		Wc32		0.625
15	S-Wc11-B-1		Wc11	0.275	0
16	S-Wc12-B-1		Wc12		0
17	S-Wc13-B-1		Wc13		0
18	S-Wc21-B-1		Wc21		0
19	S-Wc22-B-1		Wc22		0
20	S-Wc31-B-1		Wc31		0
21	S-Wc32-B-1		Wc32		0
22	S-Wc11-B-2		Wc11		0.625
23	S-Wc12-B-2		Wc12		0.625
24	S-Wc13-B-2		Wc13		0.625
25	S-Wc21-B-2		Wc21		0.625
26	S-Wc22-B-2		Wc22		0.625
27	S-Wc31-B-2		Wc31		0.625
28	S-Wc32-B-2		Wc32		0.625

表- 8.2.2 シミュレーション解析ケース (波力/波圧試験, 直立護岸) (2/2)

No.	ケース名	地形	波形	堤体高(m)	堤体位置(m)	
29	F-Wc11-A-1	直立護岸 F	Wc11	0.8	0	
30	F-Wc12-A-1		Wc12		0	
31	F-Wc13-A-1		Wc13		0	
32	F-Wc14-A-1		Wc14		0	
33	F-Wc15-A-1		Wc15		0	
34	F-Wc21-A-1		Wc21		0	
35	F-Wc22-A-1		Wc22		0	
36	F-Wc31-A-1		Wc31		0	
37	F-Wc32-A-1		Wc32		0	
38	F-Wc11-A-2		Wc11		0.625	
39	F-Wc12-A-2		Wc12		0.625	
40	F-Wc13-A-2		Wc13		0.625	
41	F-Wc14-A-2		Wc14		0.625	
42	F-Wc15-A-2		Wc15		0.625	
43	F-Wc21-A-2		Wc21		0.625	
44	F-Wc22-A-2		Wc22		0.625	
45	F-Wc31-A-2		Wc31	0.625		
46	F-Wc32-A-2		Wc32	0.625		
47	F-Wc11-B-1		Wc11	0.275	0	
48	F-Wc12-B-1		Wc12		0	
49	F-Wc13-B-1		Wc13		0	
50	F-Wc14-B-1		Wc14		0	
51	F-Wc15-B-1		Wc15		0	
52	F-Wc21-B-1		Wc21		0	
53	F-Wc22-B-1		Wc22		0	
54	F-Wc31-B-1		Wc31		0	
55	F-Wc32-B-1		Wc32		0	
56	F-Wc11-B-2		Wc11		0.625	
57	F-Wc12-B-2		Wc12		0.625	
58	F-Wc13-B-2		Wc13		0.625	
59	F-Wc14-B-2		Wc14		0.625	
60	F-Wc15-B-2		Wc15		0.625	
61	F-Wc21-B-2	Wc21	0.625			
62	F-Wc22-B-2	Wc22	0.625			
63	F-Wc31-B-2	Wc31	0.625			
64	F-Wc32-B-2	Wc32	0.625			

8.3. 解析結果

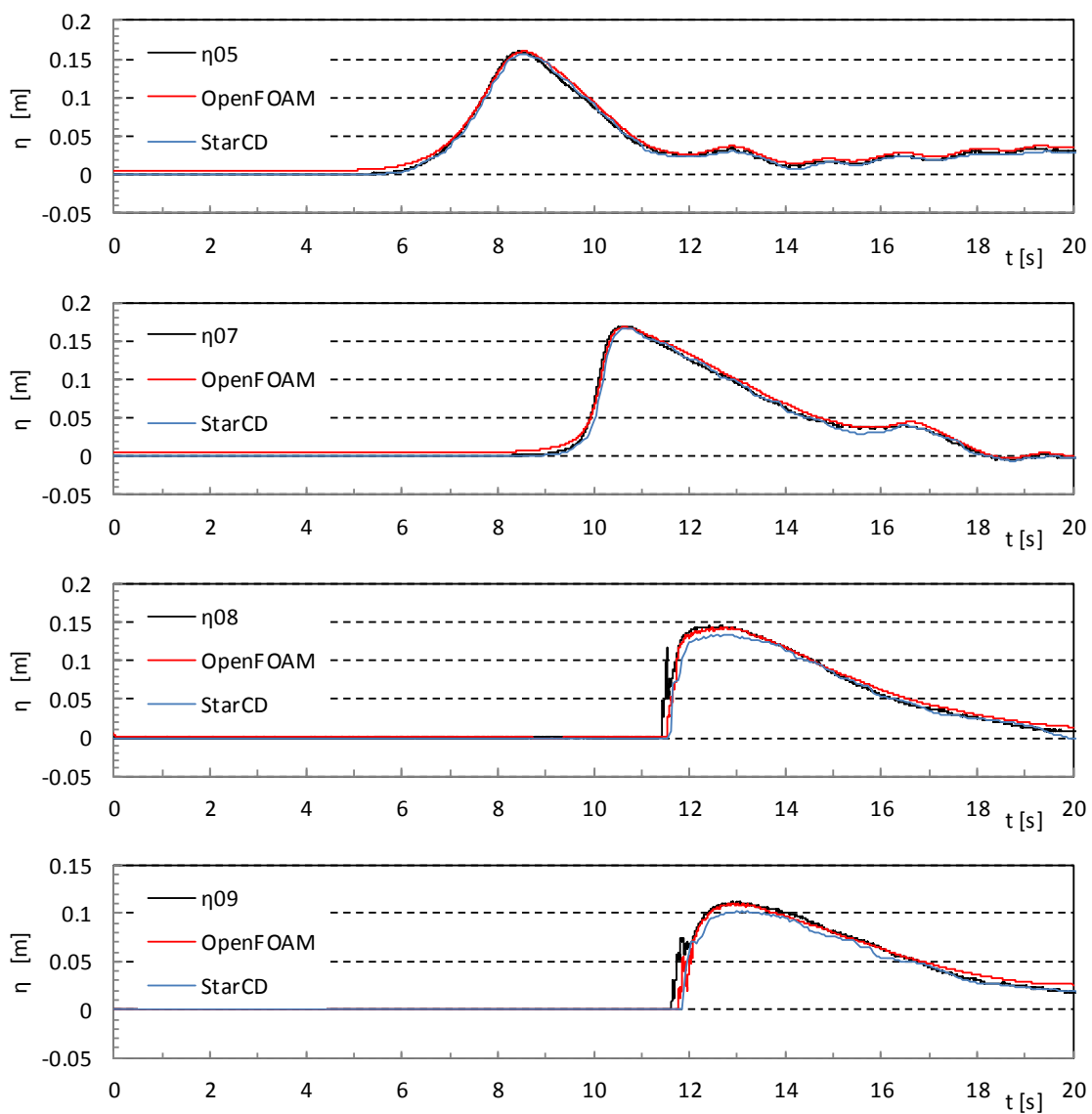
8.3.1. 通過波検定試験の水位再現結果

通過波検定試験に対する水位の解析結果と試験結果の比較を、単純勾配について図- 8.3.1、直立護岸について図- 8.3.2 に示す。

沖合の水位については全ケースで解析結果と試験結果は良く一致しているが、単純勾配や直立護岸の一部のケースで、試験結果に表れている砕波による短時間での水位の上昇が、数値解析の結果に表れていない。巻き波状態の砕波は、水理試験、数値解析ともに水位の定義が難しく、数値解析においては、計算格子中に水の占める割合が 50%以下となった場合に水面と判断して水位を算定しているため、水理試験において水位計で計測した値との相違が生じているのが主な要因と考えられる。ただし、数値解析において砕波を再現するには詳細な格子が必要であり、特に小規模な砕波については、数値解析で厳密には再現出来ていないと考えられる。

単純勾配では、陸域側で数値解析結果の波高が小さく、到達時間が遅くなる傾向にある。上述の砕波の再現性において、数値解析ではエネルギー減衰が過大に評価され波高が小さくなり、そのため波速が小さくなって到達時間が遅れていると考えられる。

直立護岸の陸上部 (P.09) の水位時系列では、特に STAR-CD の結果で、水理試験の結果に対し到達時間が若干遅れている。直立護岸では、汀線において護岸の直角部分を越える際に、流れの向きが局所的に大きく変わるため、これを精度良く再現するには詳細な計算格子が必要となる。特に津波が浸入する波形の先端部分では水位が非常に小さいため、護岸を越流する際の再現精度が低下して到達時間のずれが生じていると考えられる。ただし、その後の水位の変化は良好に再現できている。最大波力を評価する上では、越流水深がある程度大きくなった時点での再現性が重要であり、その場合には上述の局所的な流況の再現性の影響は小さいと考えられる。



図・8.3.1 各測点における通過波の水位時系列の比較（単純勾配, Wc11）

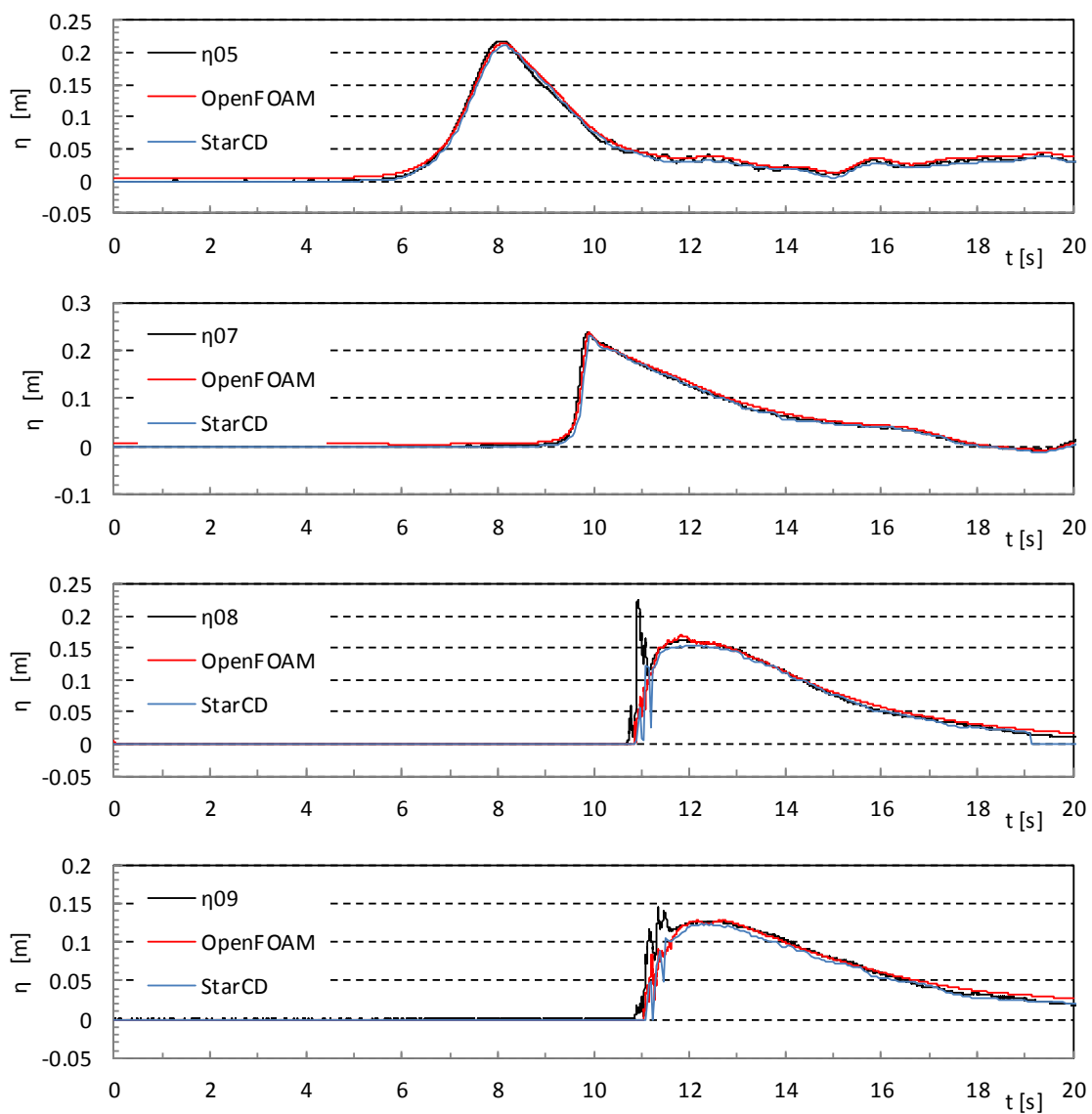


図- 8.3.1 各測点における通過波の水位時系列の比較 (単純勾配, Wc12)

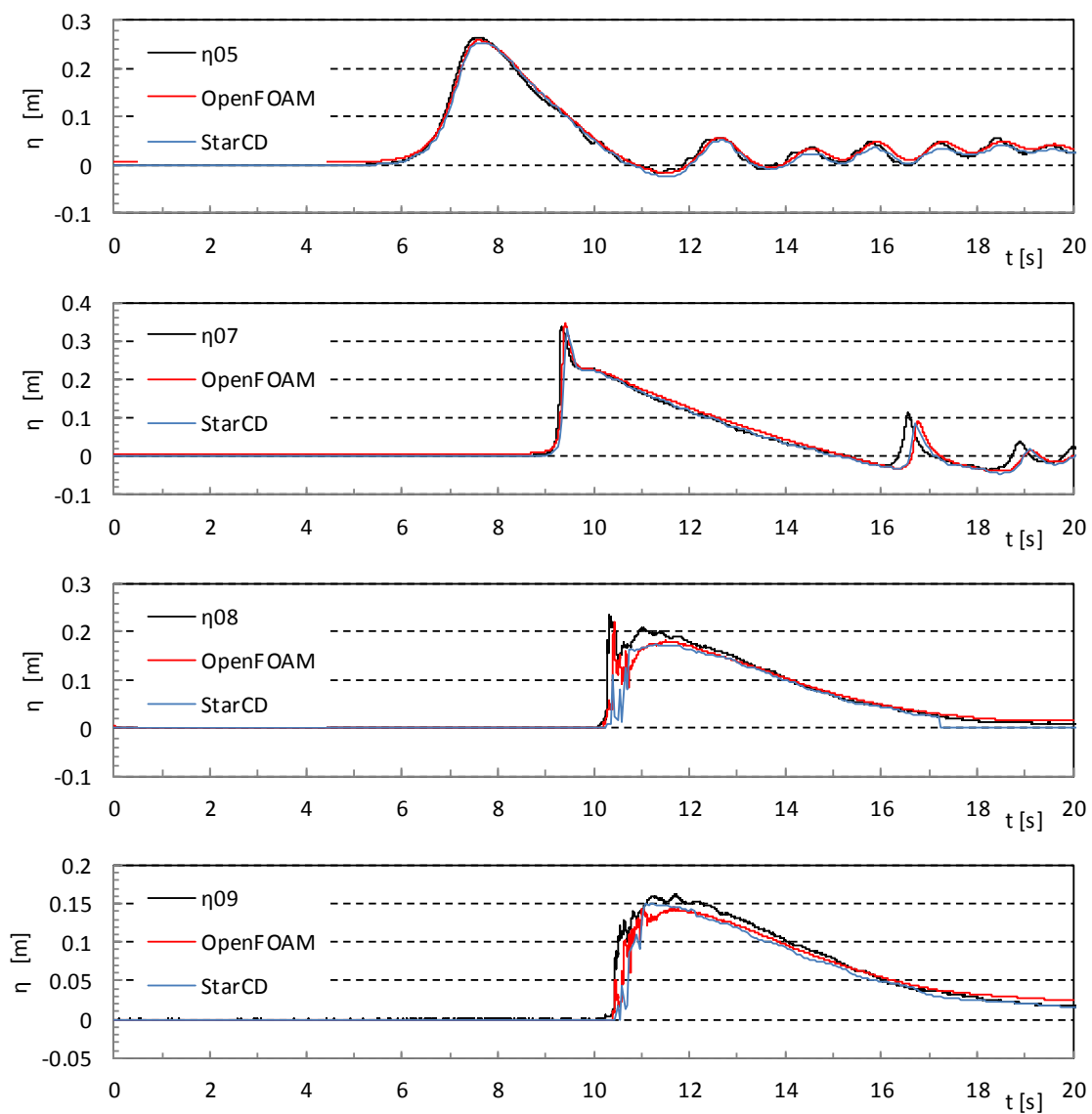


図- 8.3.1 各測点における通過波の水位時系列の比較 (単純勾配, Wc13)

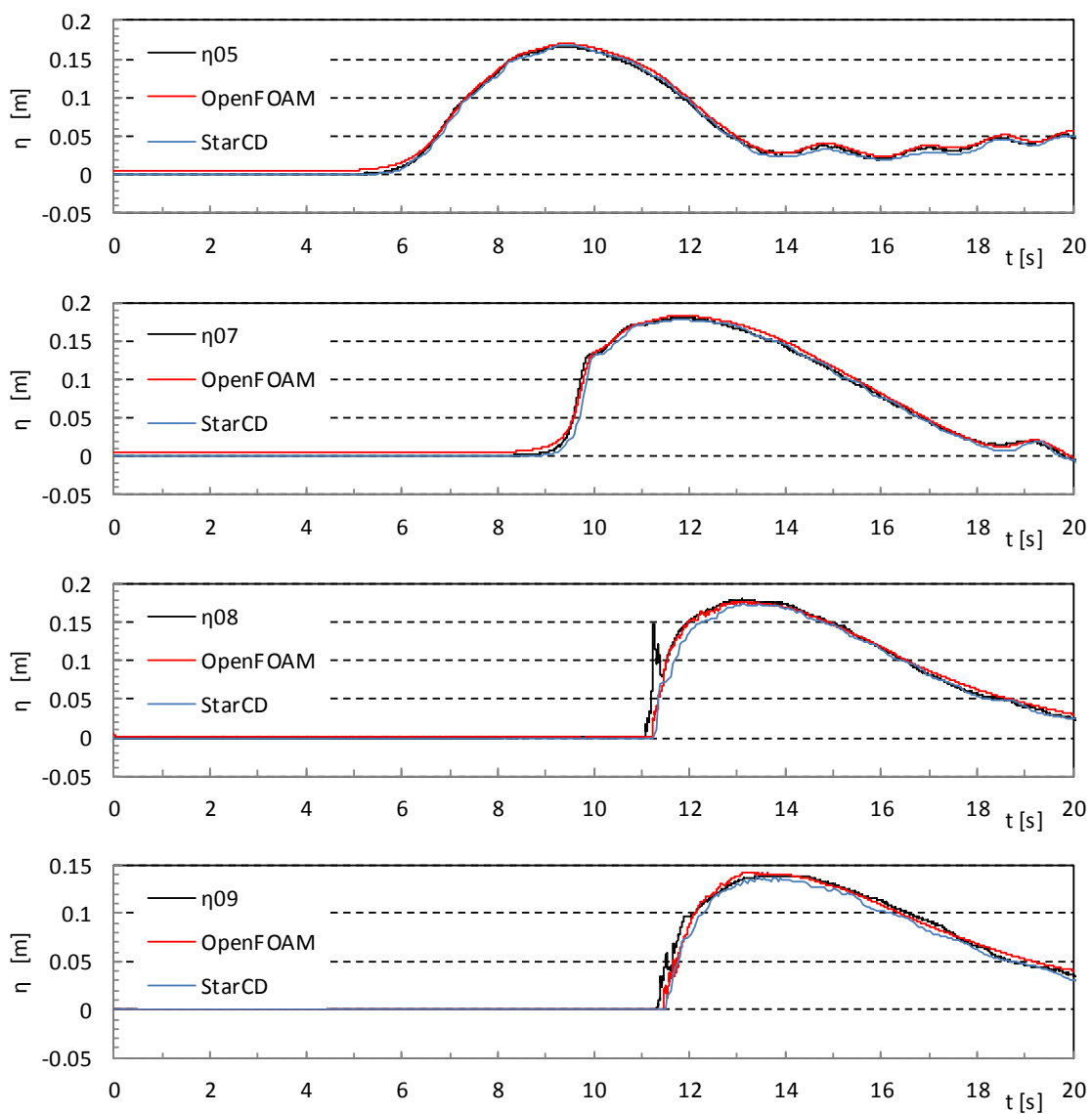


図- 8.3.1 各測点における通過波の水位時系列の比較（単純勾配，Wc21）

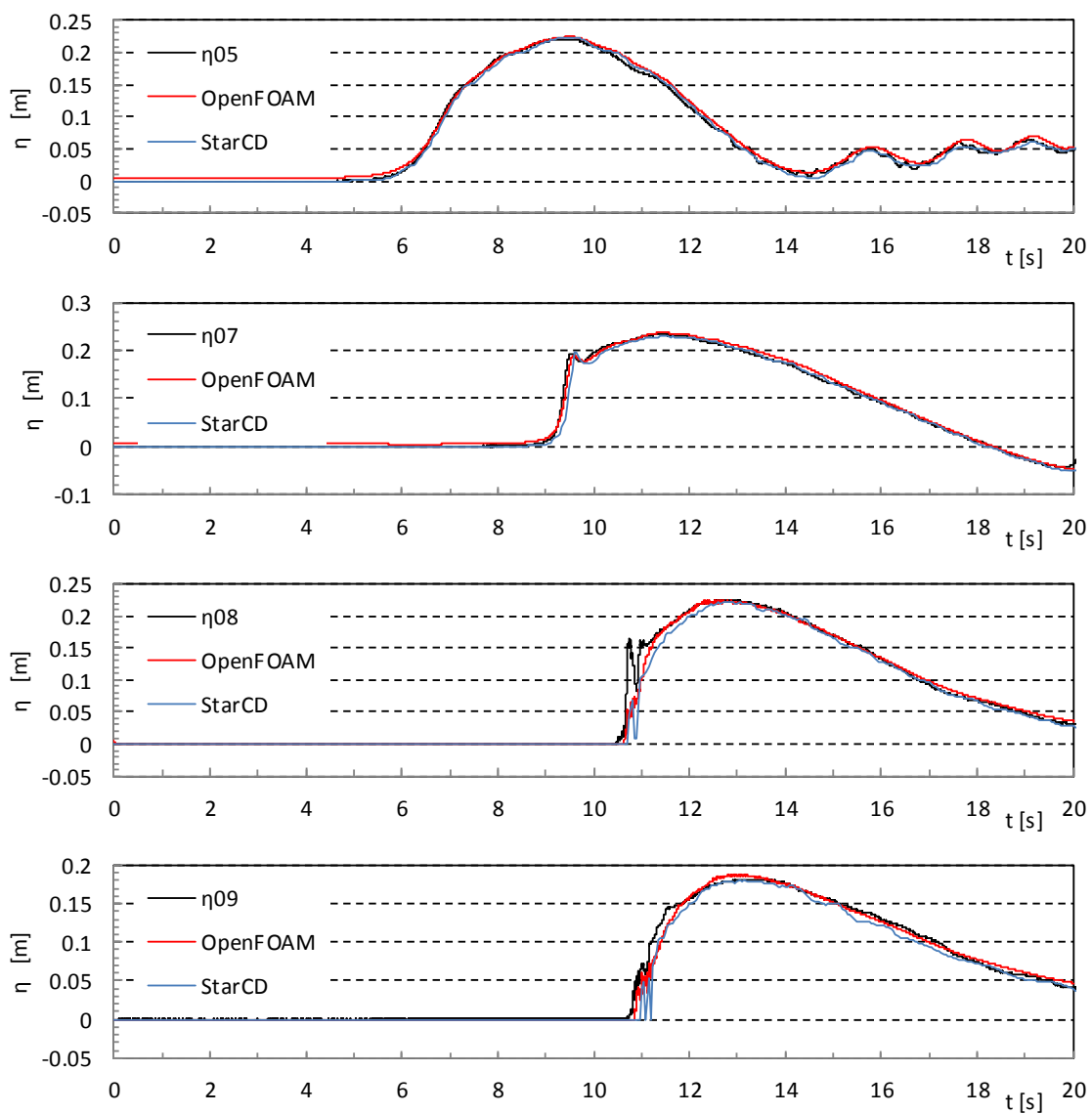


図- 8.3.1 各測点における通過波の水位時系列の比較 (単純勾配, Wc22)

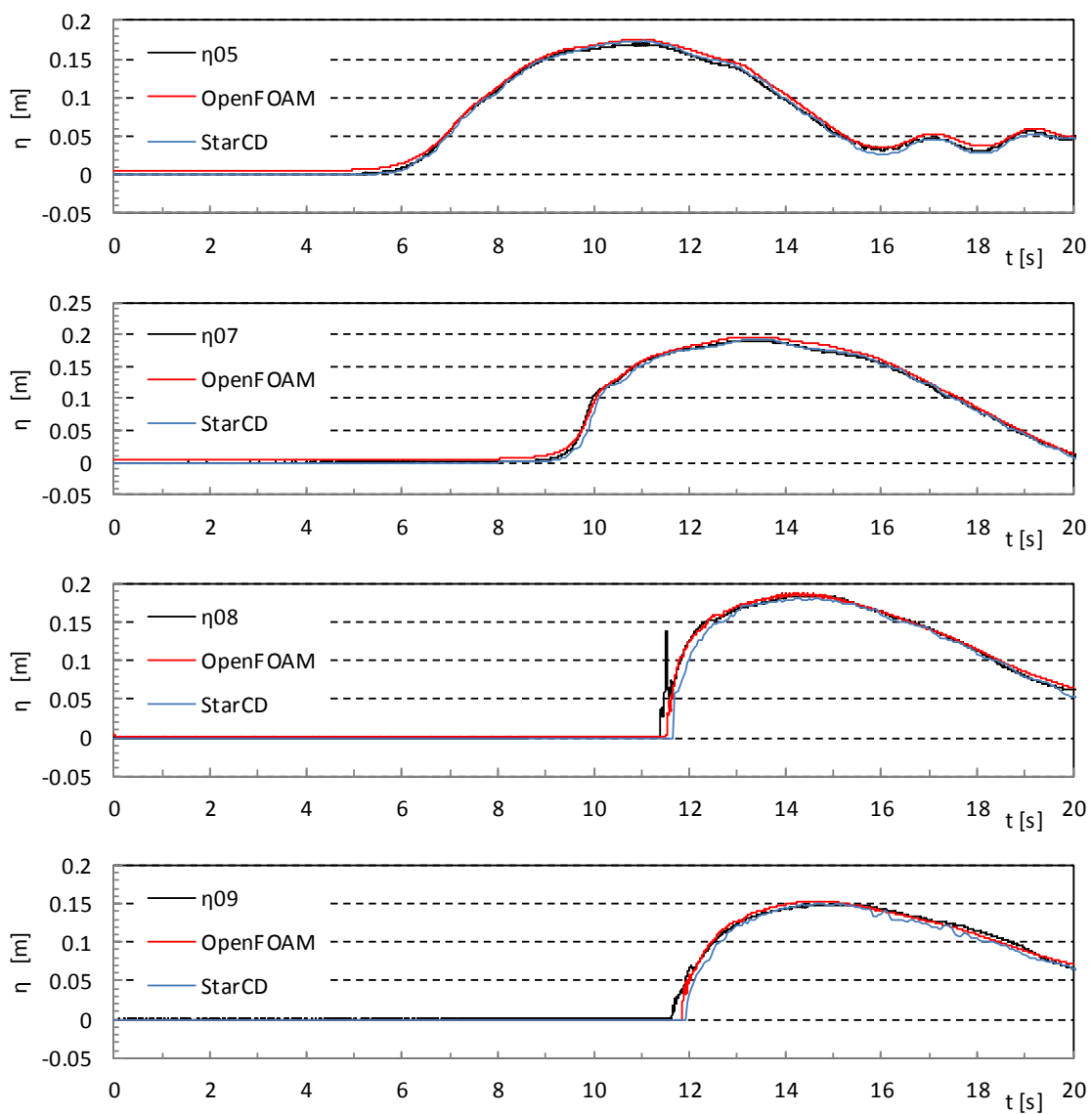


図- 8.3.1 各測点における通過波の水位時系列の比較 (単純勾配, Wc31)

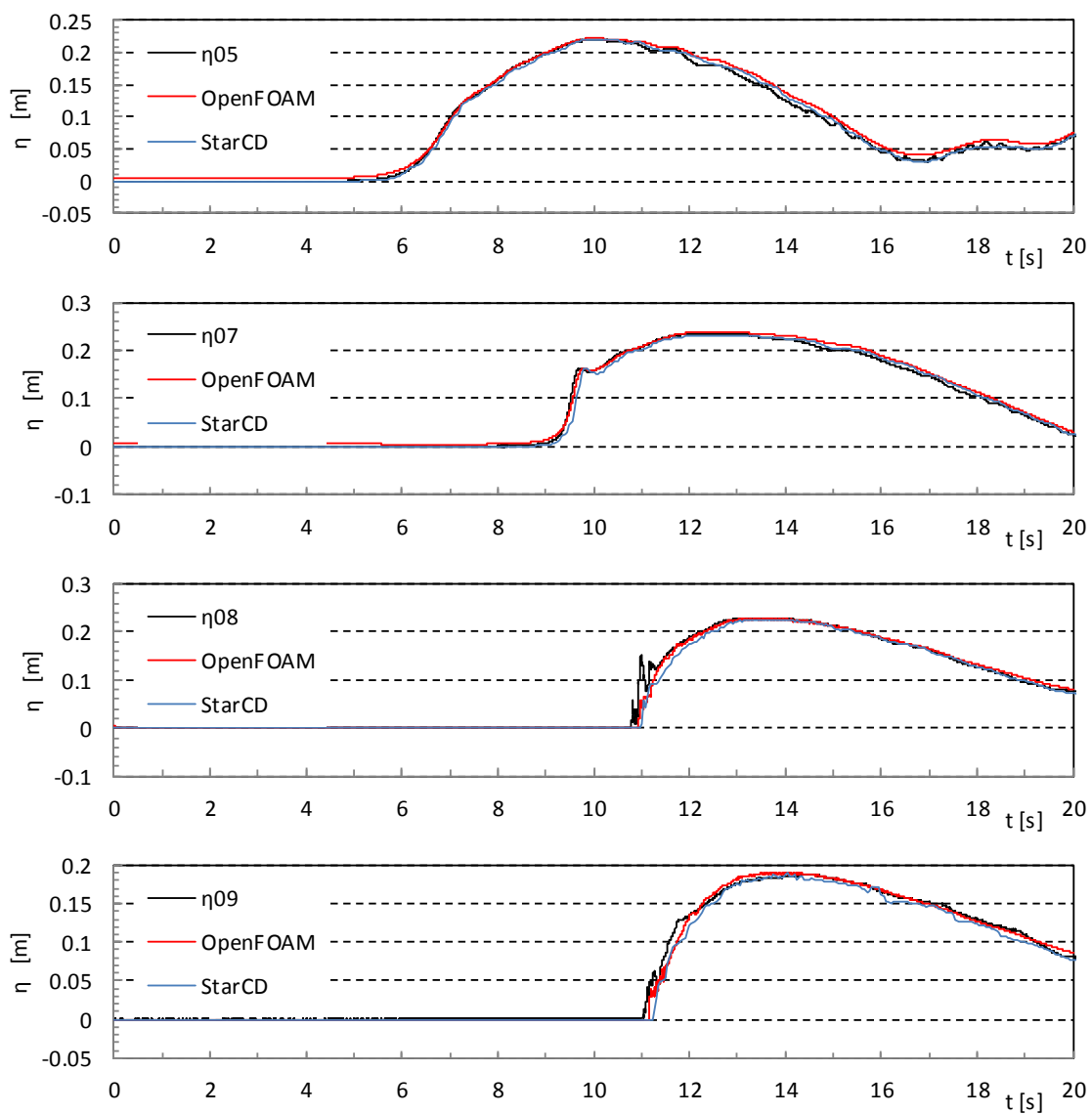


図- 8.3.1 各測点における通過波の水位時系列の比較 (単純勾配, Wc32)

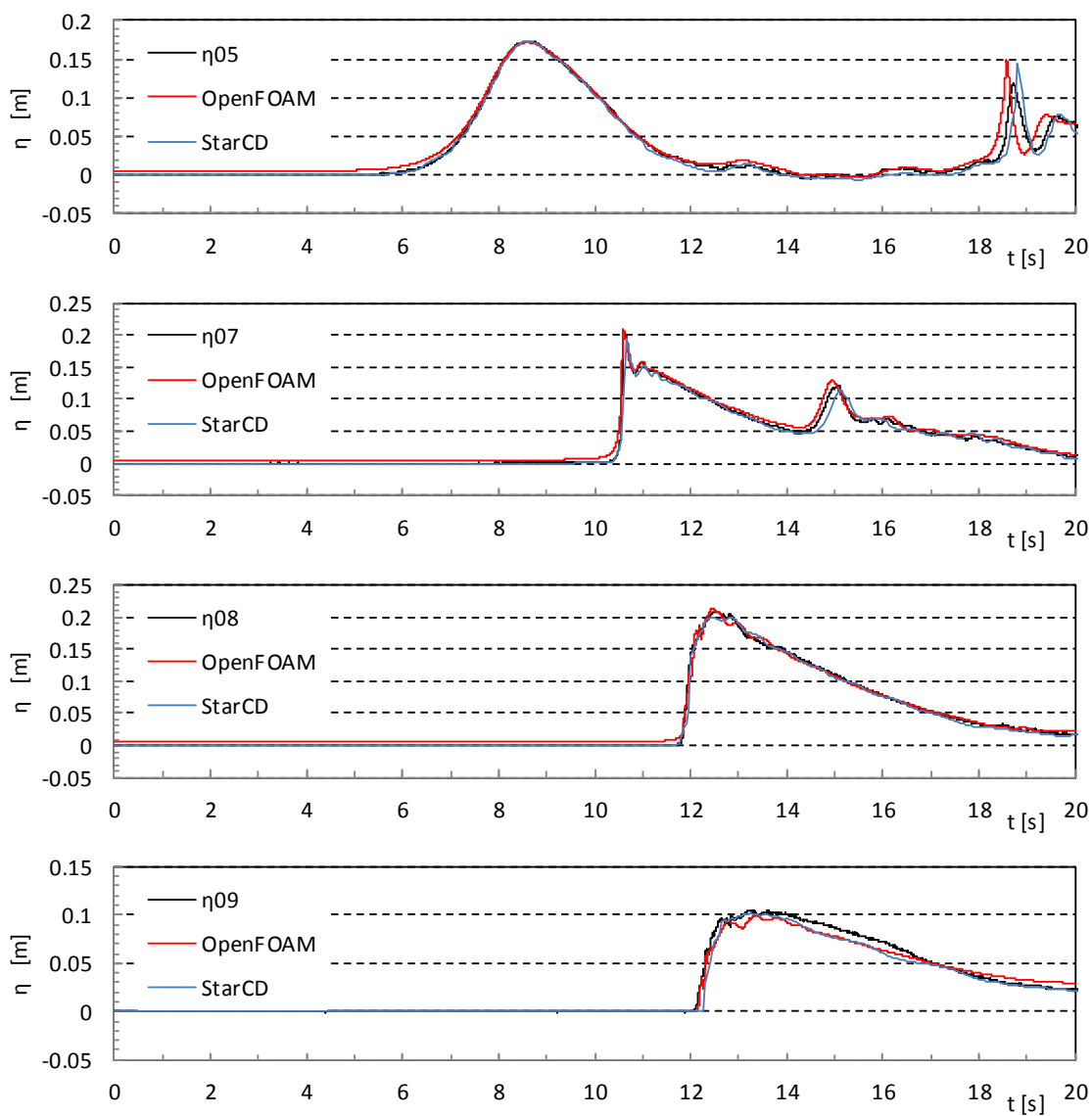


図- 8.3.2 各測点における通過波の水位時系列の比較 (直立護岸, Wc11)

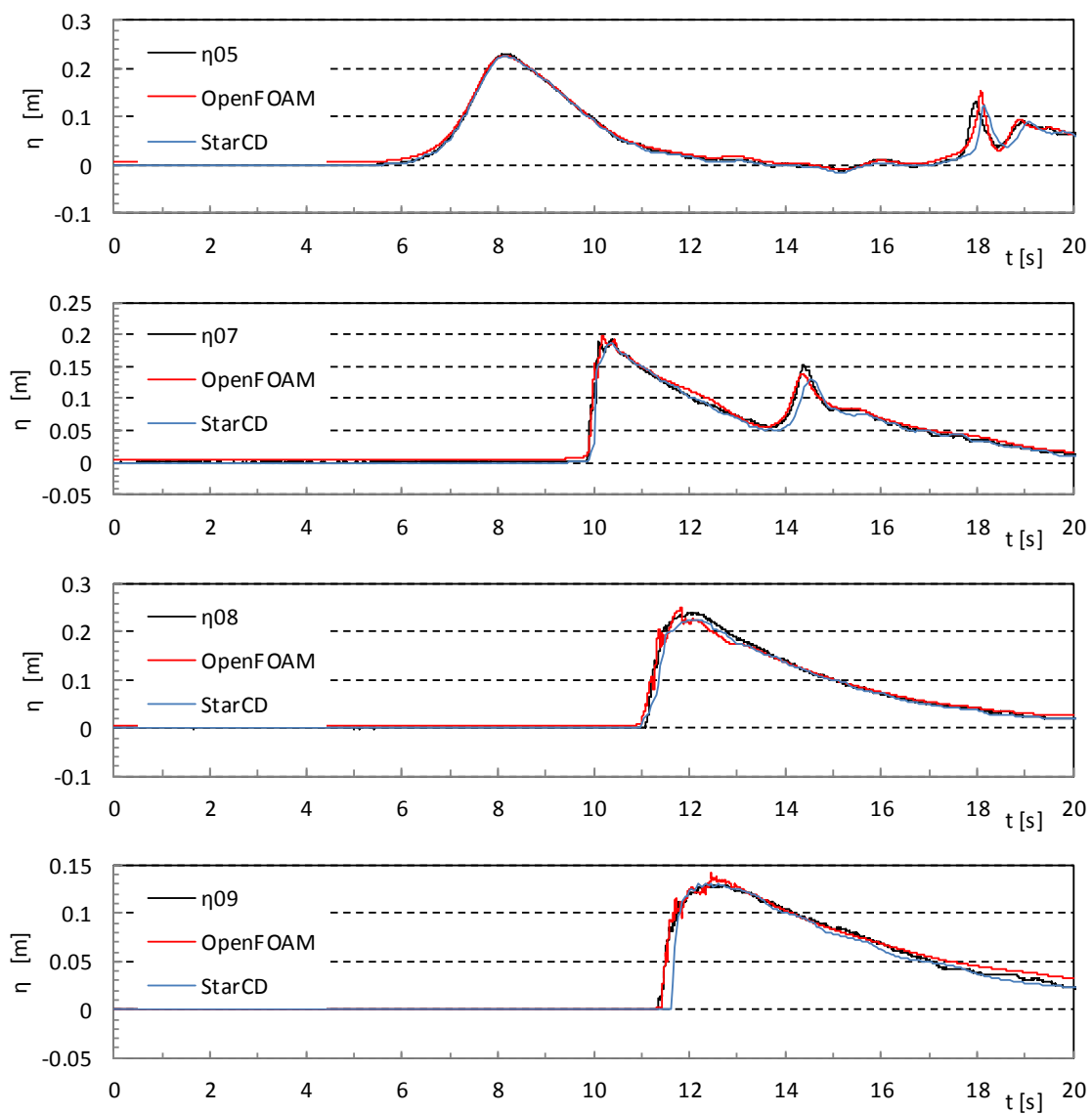


図- 8.3.2 各測点における通過波の水位時系列の比較 (直立護岸, Wc12)

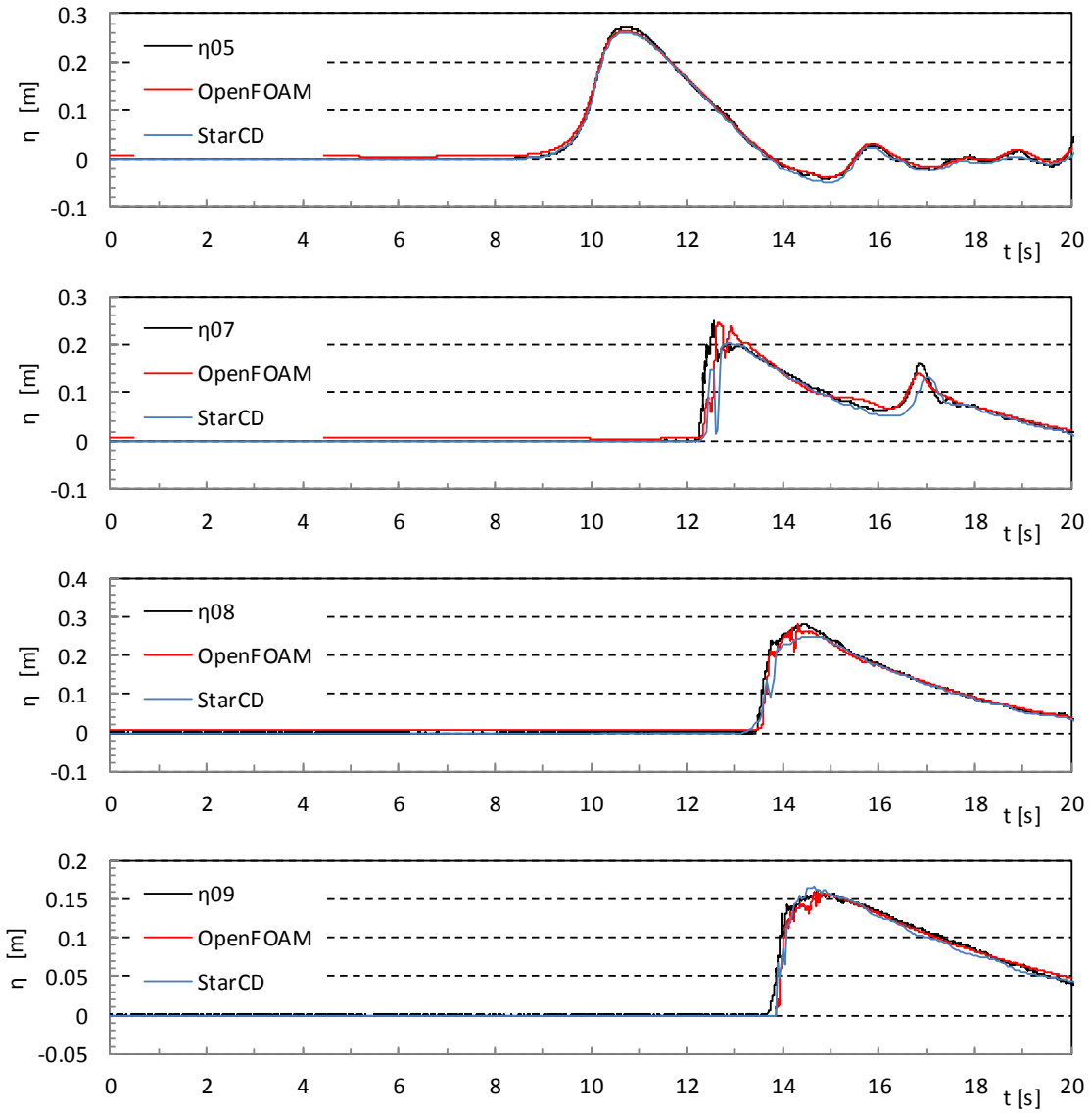


図- 8.3.2 各測点における通過波の水位時系列の比較 (直立護岸, Wc13)

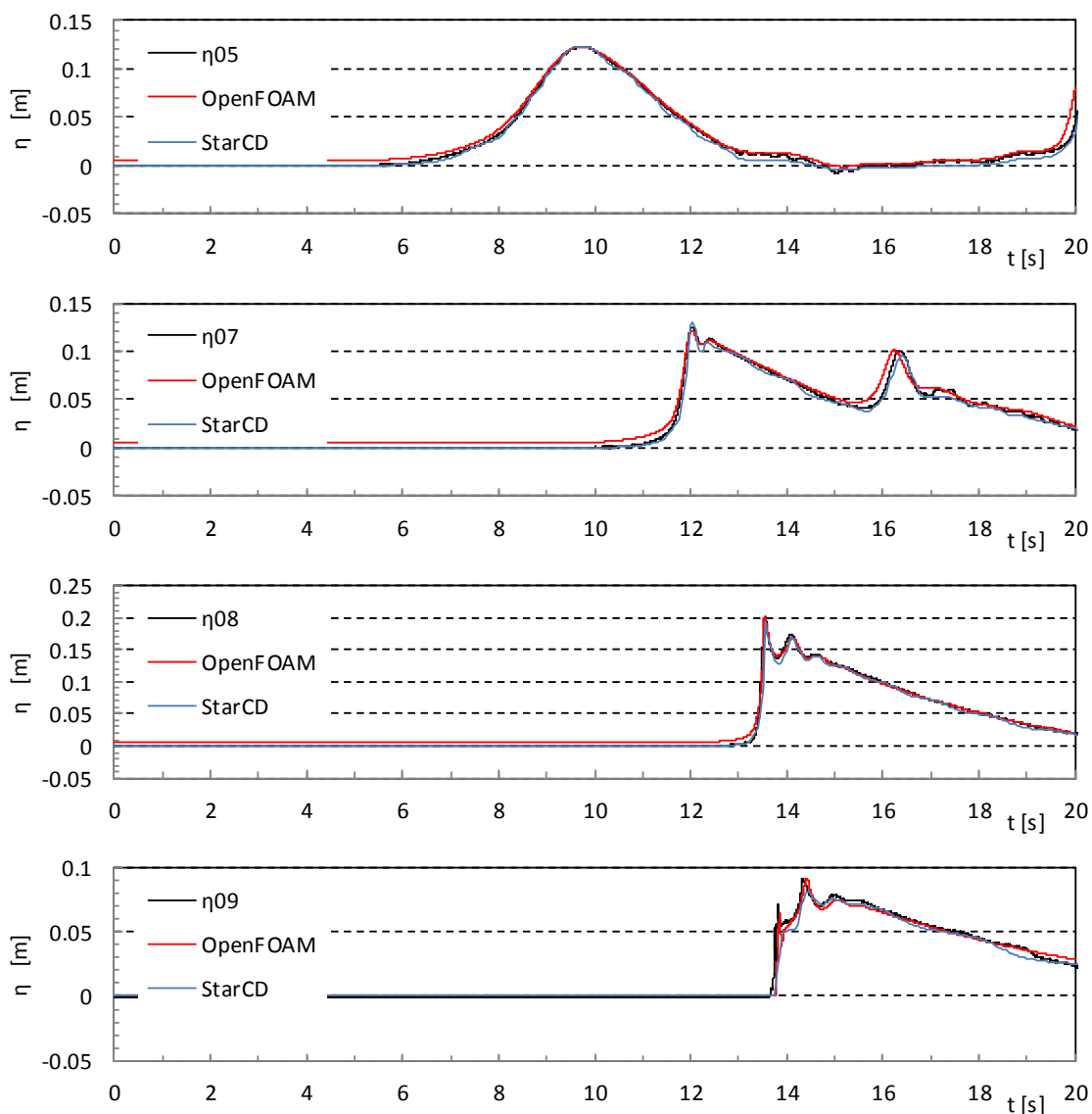


図- 8.3.2 各測点における通過波の水位時系列の比較 (直立護岸, Wc14)

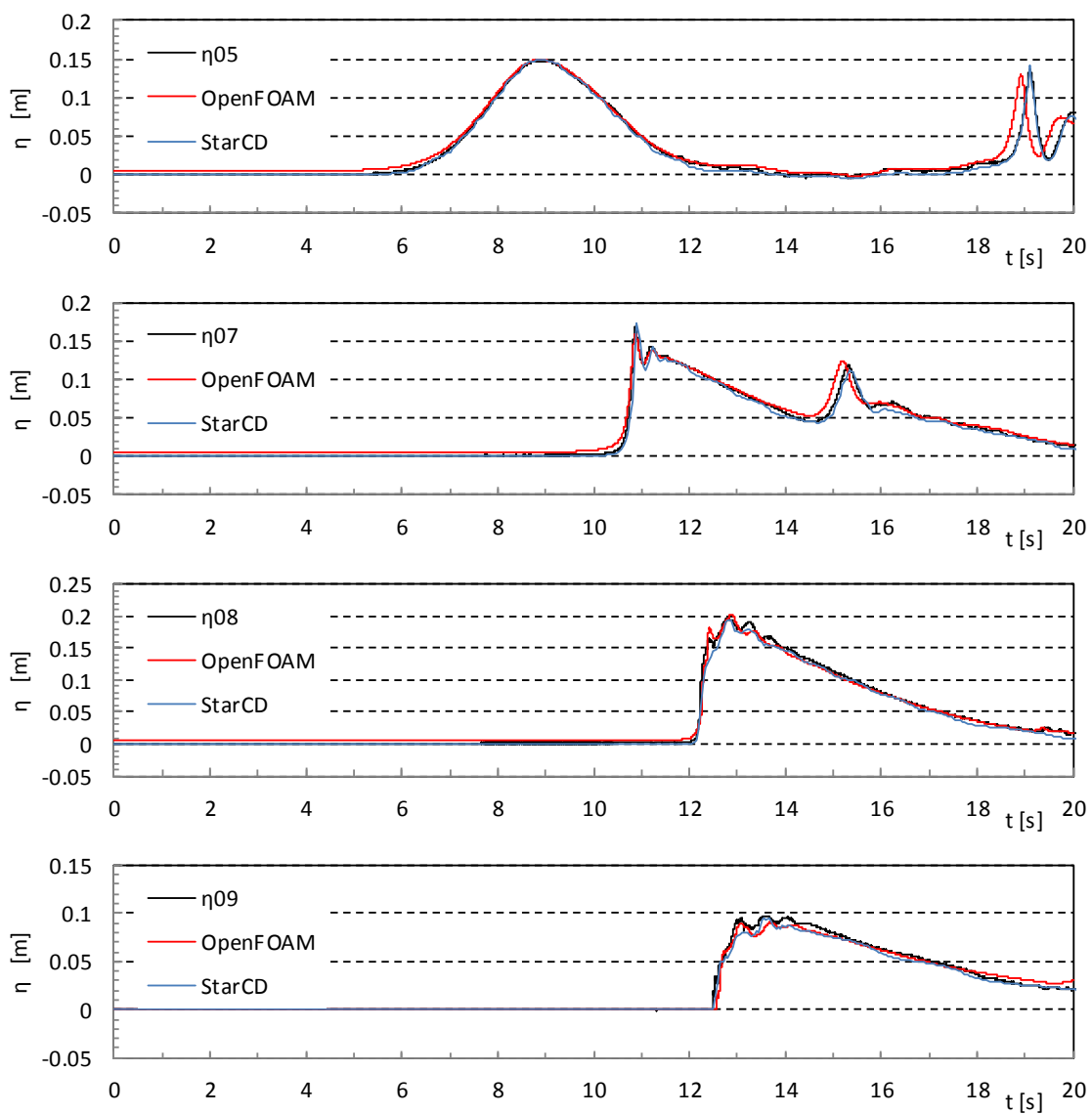


図- 8.3.2 各測点における通過波の水位時系列の比較 (直立護岸, Wc15)

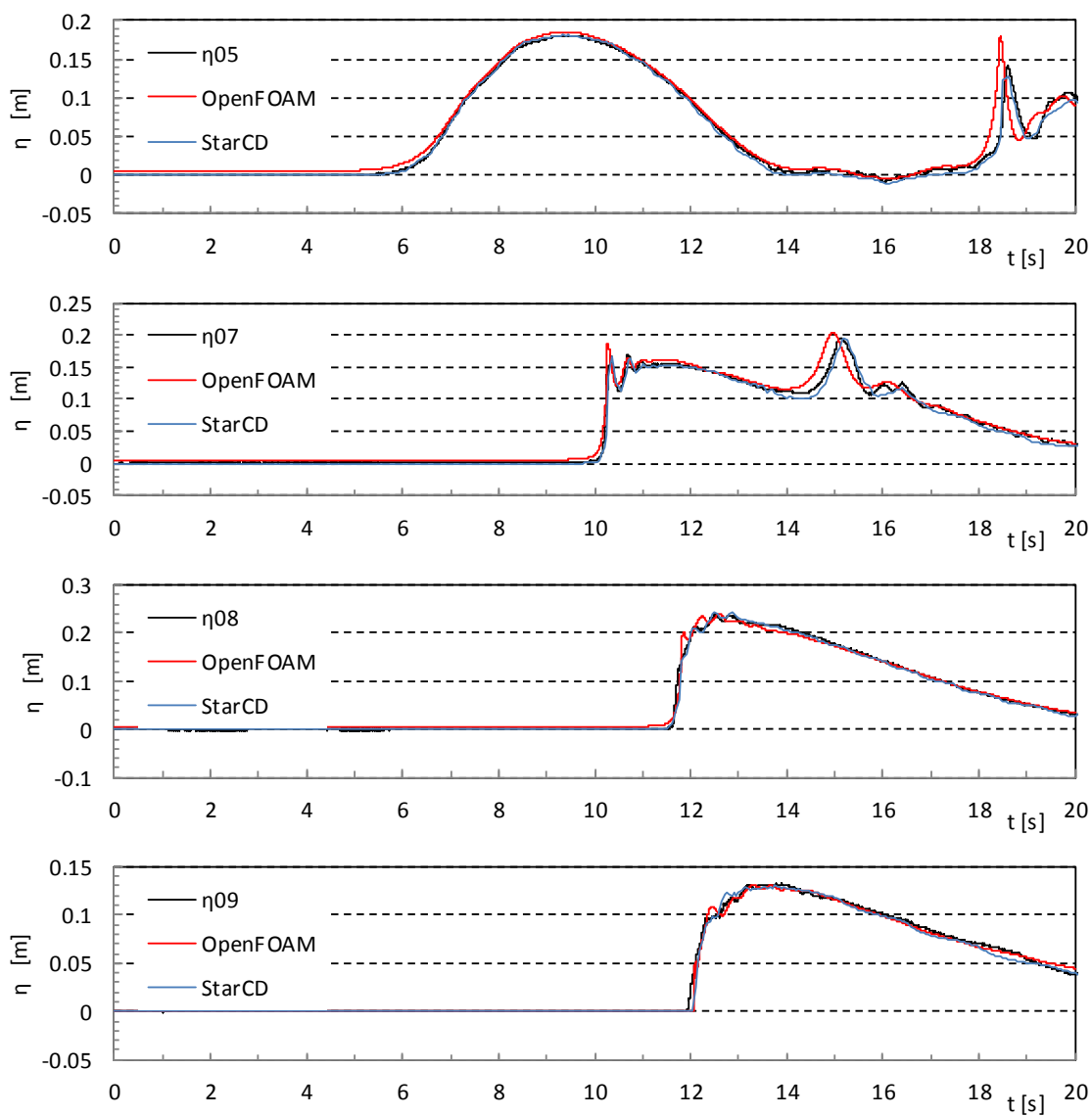


図- 8.3.2 各測点における通過波の水位時系列の比較 (直立護岸, Wc21)

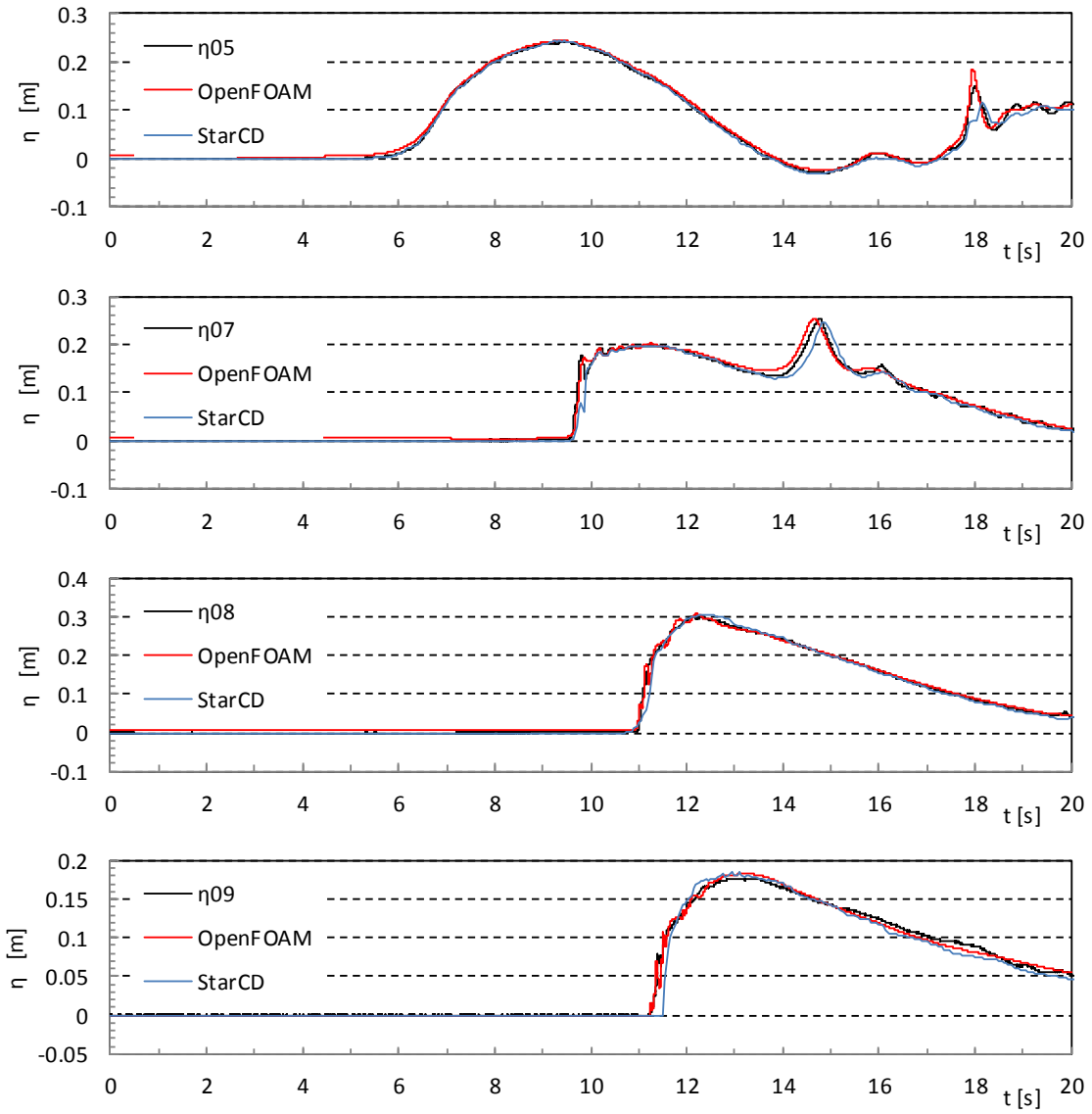


図- 8.3.2 各測点における通過波の水位時系列の比較 (直立護岸, Wc22)

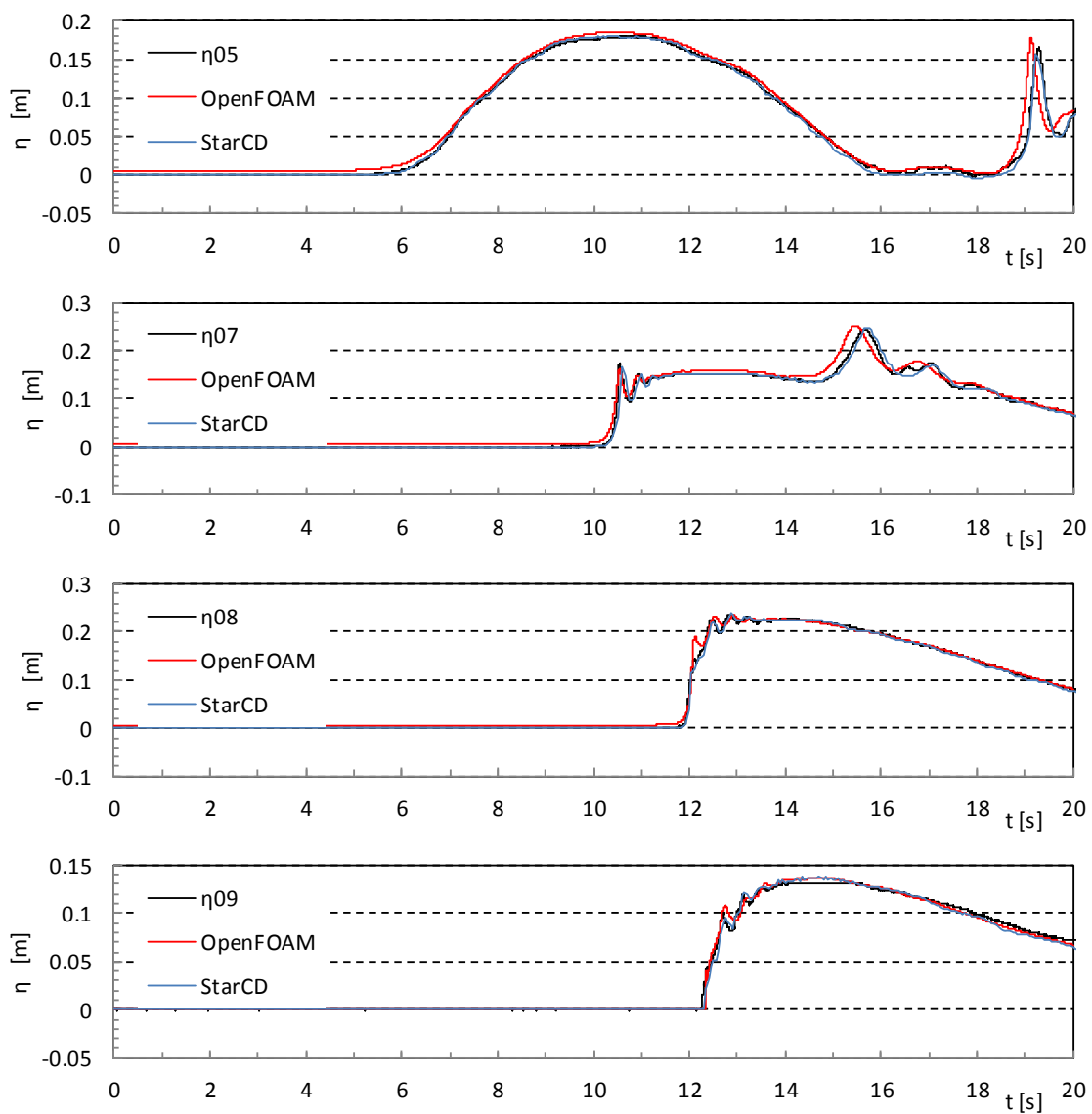


図- 8.3.2 各測点における通過波の水位時系列の比較 (直立護岸, Wc31)

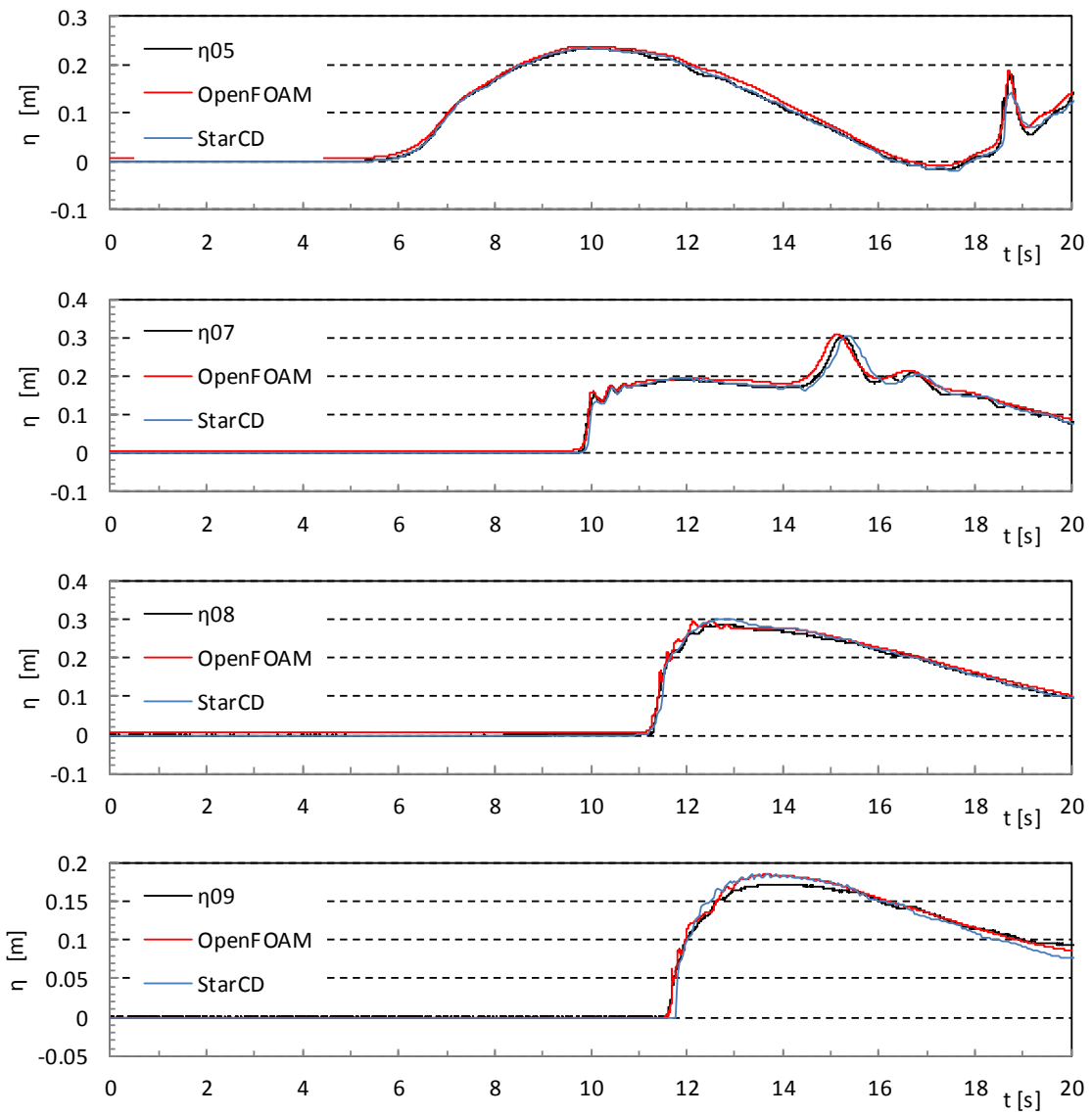


図- 8.3.2 各測点における通過波の水位時系列の比較 (直立護岸, Wc32)

8.3.2. 通過波検定試験の流速再現結果

通過波検定試験に対する流速の解析結果と試験結果の比較を、単純勾配について図- 8.3.3、直立護岸について図- 8.3.4 に示す。前述の水位の比較と同様に、シミュレーション結果は水理試験の結果を良い精度で再現している。

流速の立ち上がりについては、OpenFOAM では、陸上部でも水理試験と数値解析の結果は一致している。ただし、上述したように水位については数値解析に時間遅れが生じていることから、これは、水理試験における流速の計測において、ドライな状態から瞬間的に大きな流速が発生するため、流速計の反応速度に若干の遅れが生じているためと考えられる。同様の理由で、流速の解析結果においては、陸上部の波形先端部で水理試験の結果よりも大きな流速が生じている。水理試験では、ある程度の水隄が流速計を通過しないと流速を正しく計測できないため、波形先端部の薄い水脈の大きな流速が正しく計測されていないと考えられる。一方、STAR-CD では、流速の立ち上がりが試験結果よりも若干遅れている。これは水位時系列と同じ傾向を示しており、水位が非常に小さい波形の先端部分の解析の再現精度が低下して到達時間のずれが生じていると考えられる。

直立護岸の数値解析の結果では、汀線位置 (V08) において流速を小さく評価する傾向にある。直立護岸の汀線位置では、流速を底面近傍で取得しているため、護岸角部での局所的な流向変動の影響を受ける。したがって、流速算出のポスト処理の仕方や流速算出点がわずかに異なるだけで流速の値が異なる。堤体を対象にした最大波力の評価においてはその影響は小さいが、水深係数とフルード数の関係を対象とした場合、フルード数を小さく評価すると考えられるため、注意が必要である。

一部のケースで、津波の先端到達時に、数値解析において大きな乱れが生じている。数値解析において底面部の計算格子が水で満たされる（ある程度水位が上昇している）状態では安定した流速が算定出来るが、計算格子が水で満たされていない場合の流速の算定が不安定になっていることが分かる。ただし、この時の浸水深は非常に小さいため、波力/波圧の最大値の解析精度への影響は小さいと考えられる。

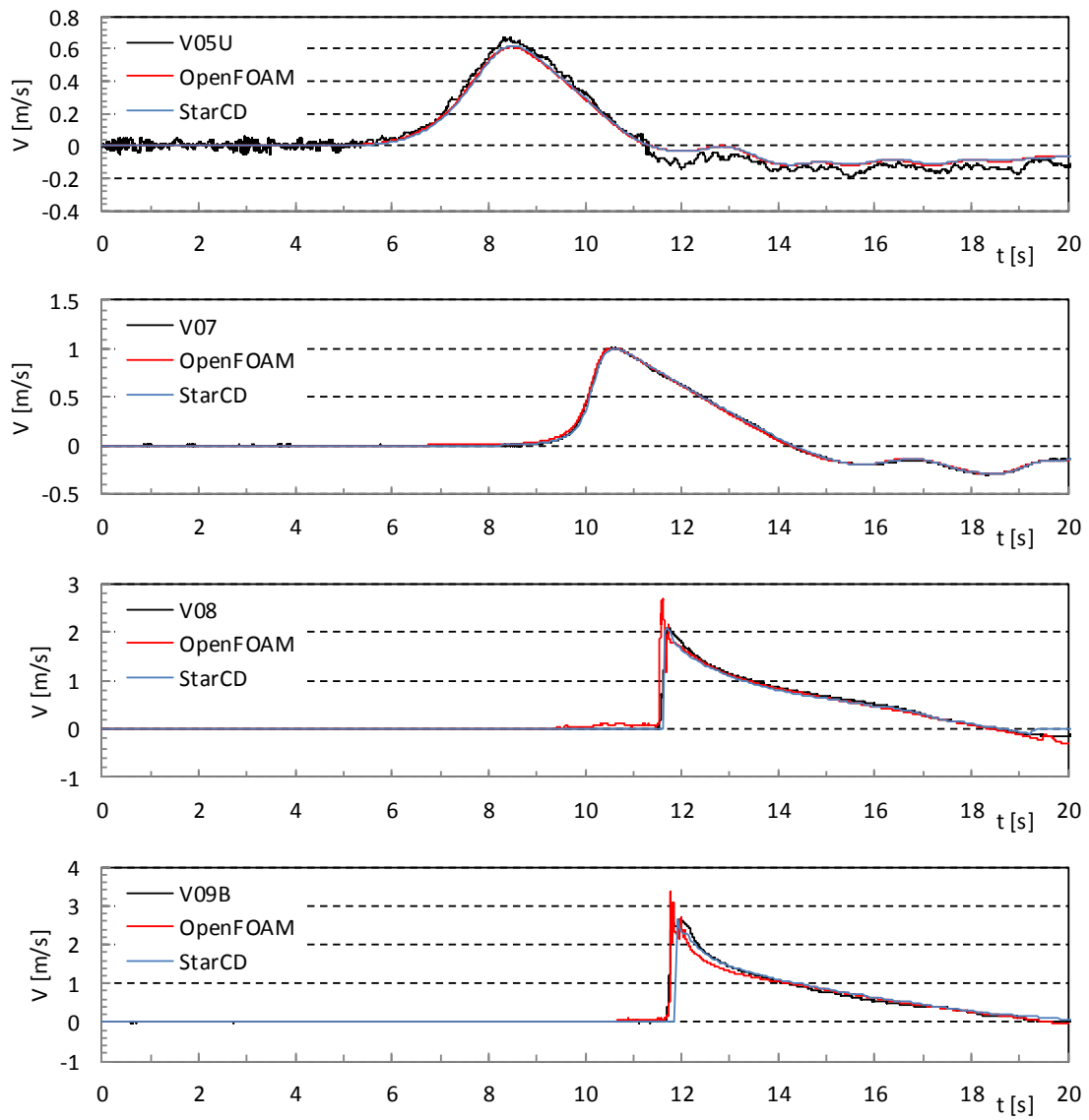


図- 8.3.3 各測点における通過波の流速時系列の比較 (単純勾配, Wc11)

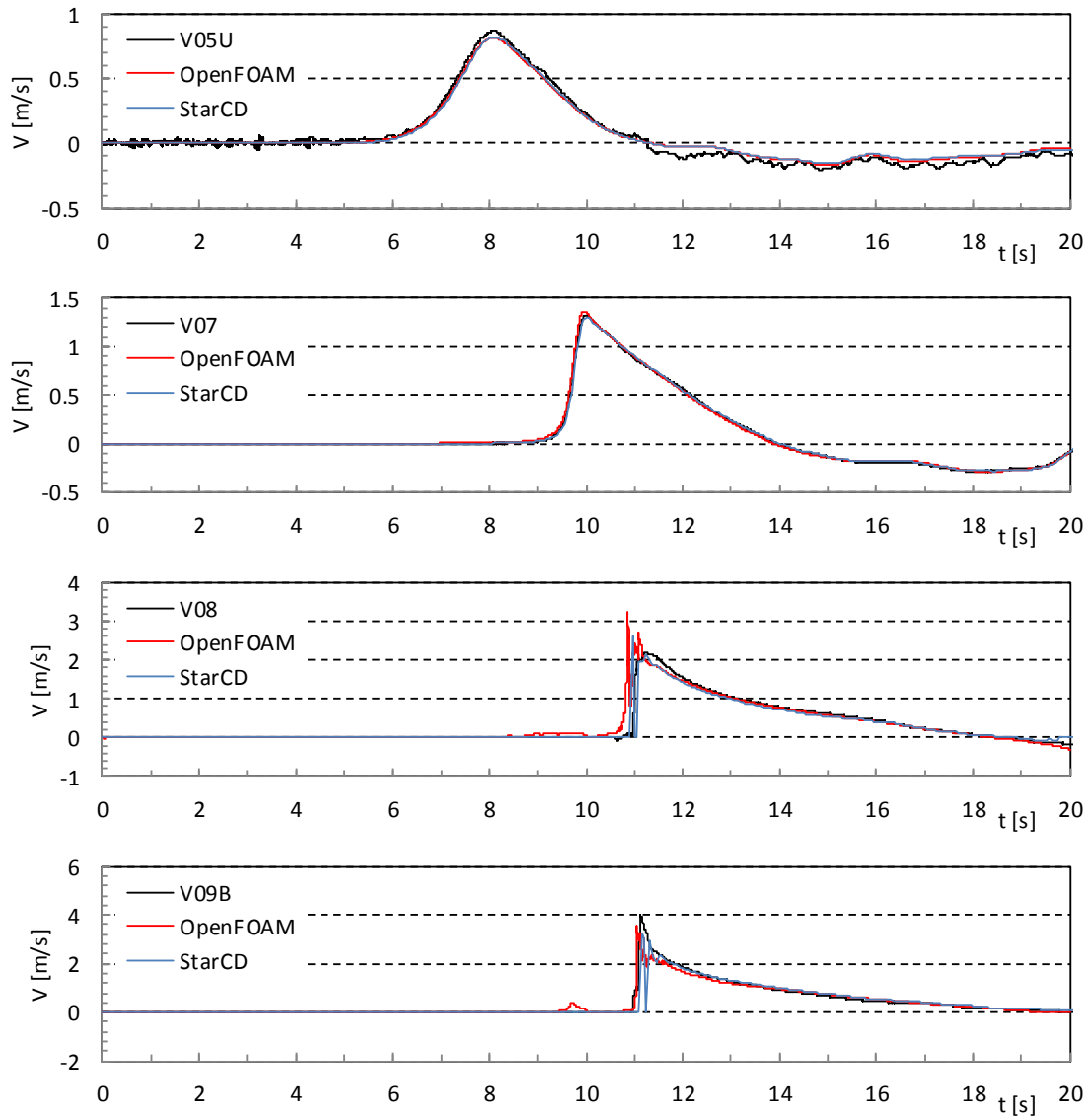


図- 8.3.3 各測点における通過波の流速時系列の比較 (単純勾配, Wc12)

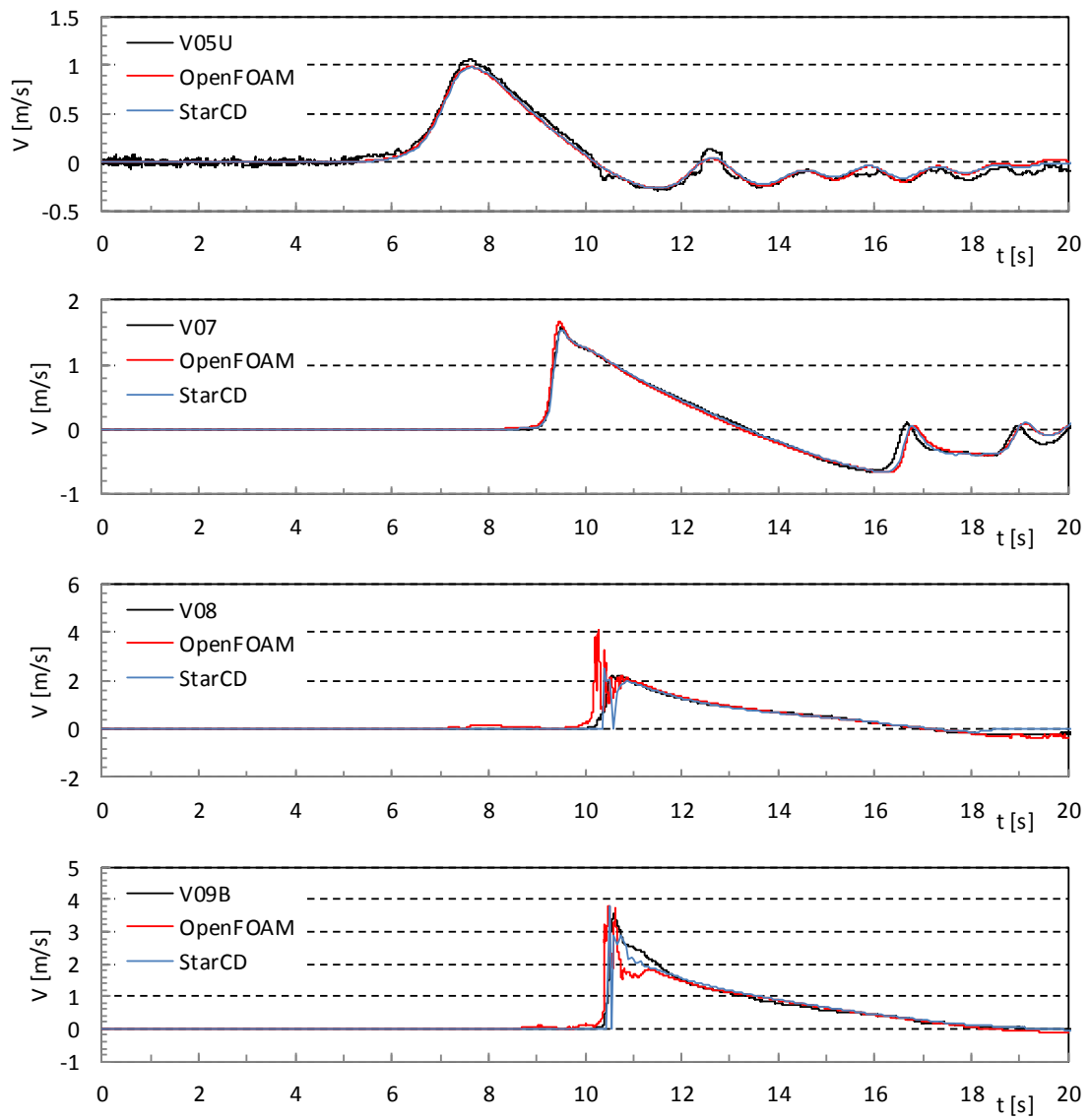


図- 8.3.3 各測点における通過波の流速時系列の比較 (単純勾配, Wc13)

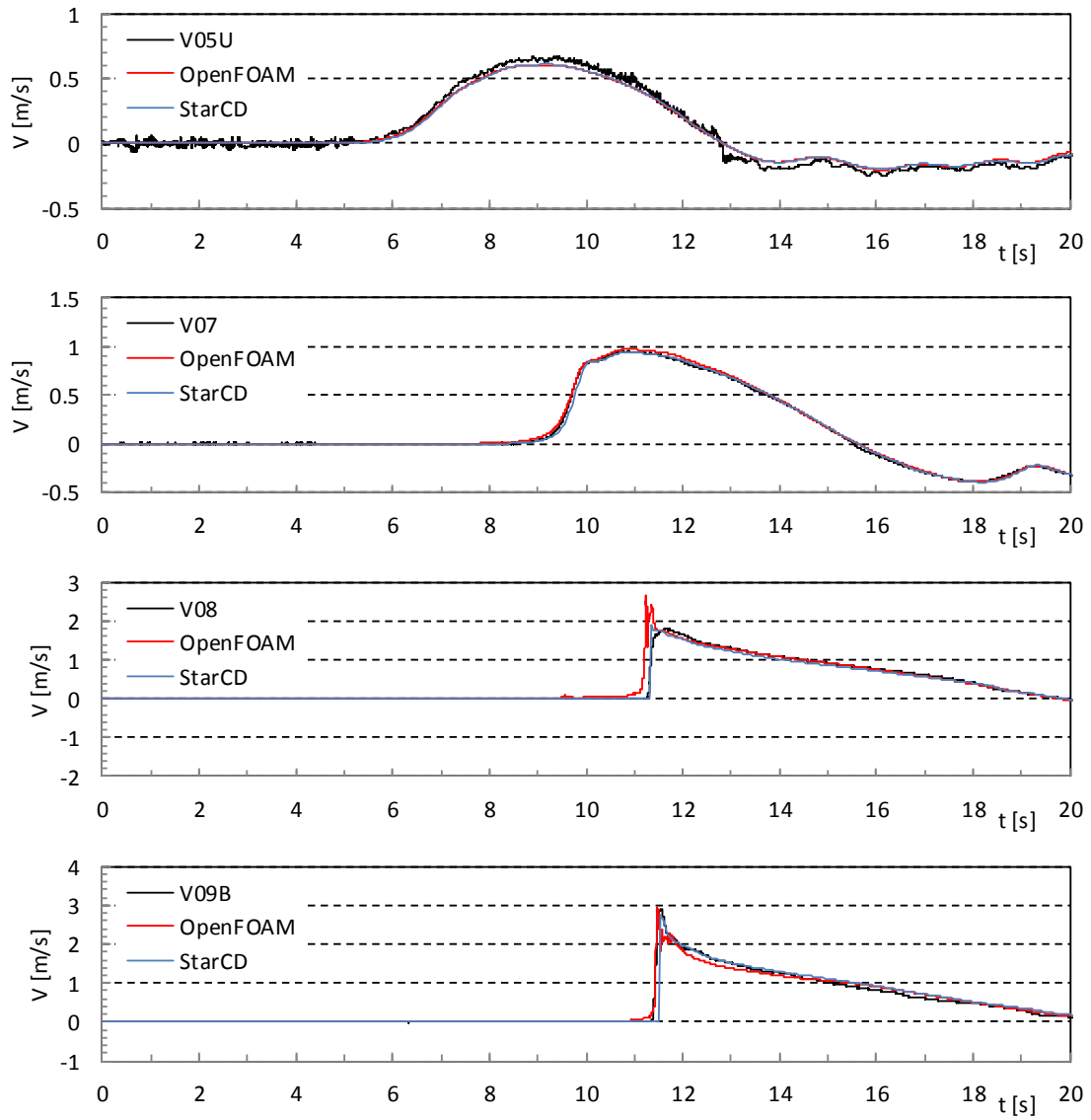


図- 8.3.3 各測点における通過波の流速時系列の比較 (単純勾配, $Wc21$)

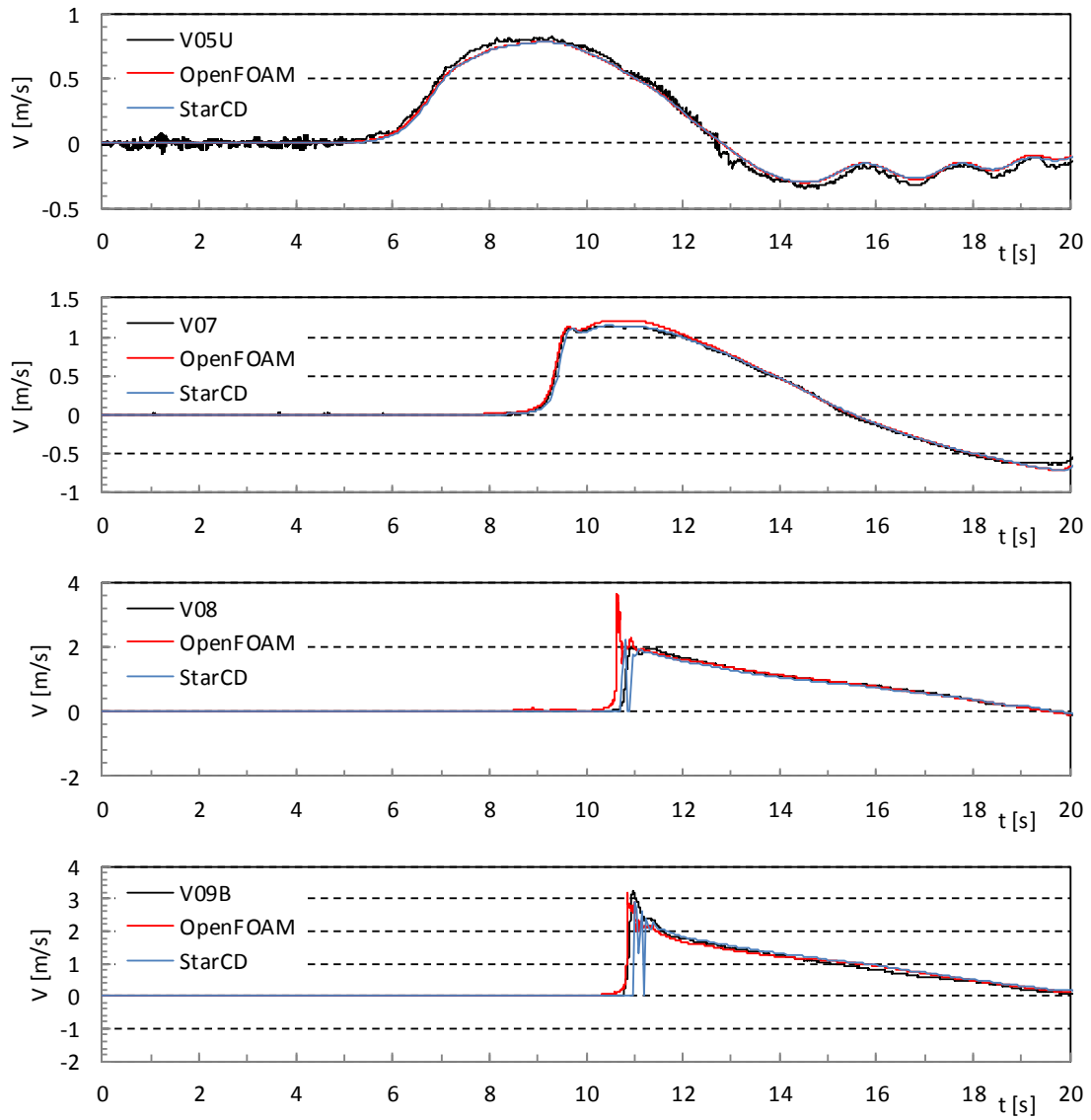


図- 8.3.3 各測点における通過波の流速時系列の比較 (単純勾配, Wc22)

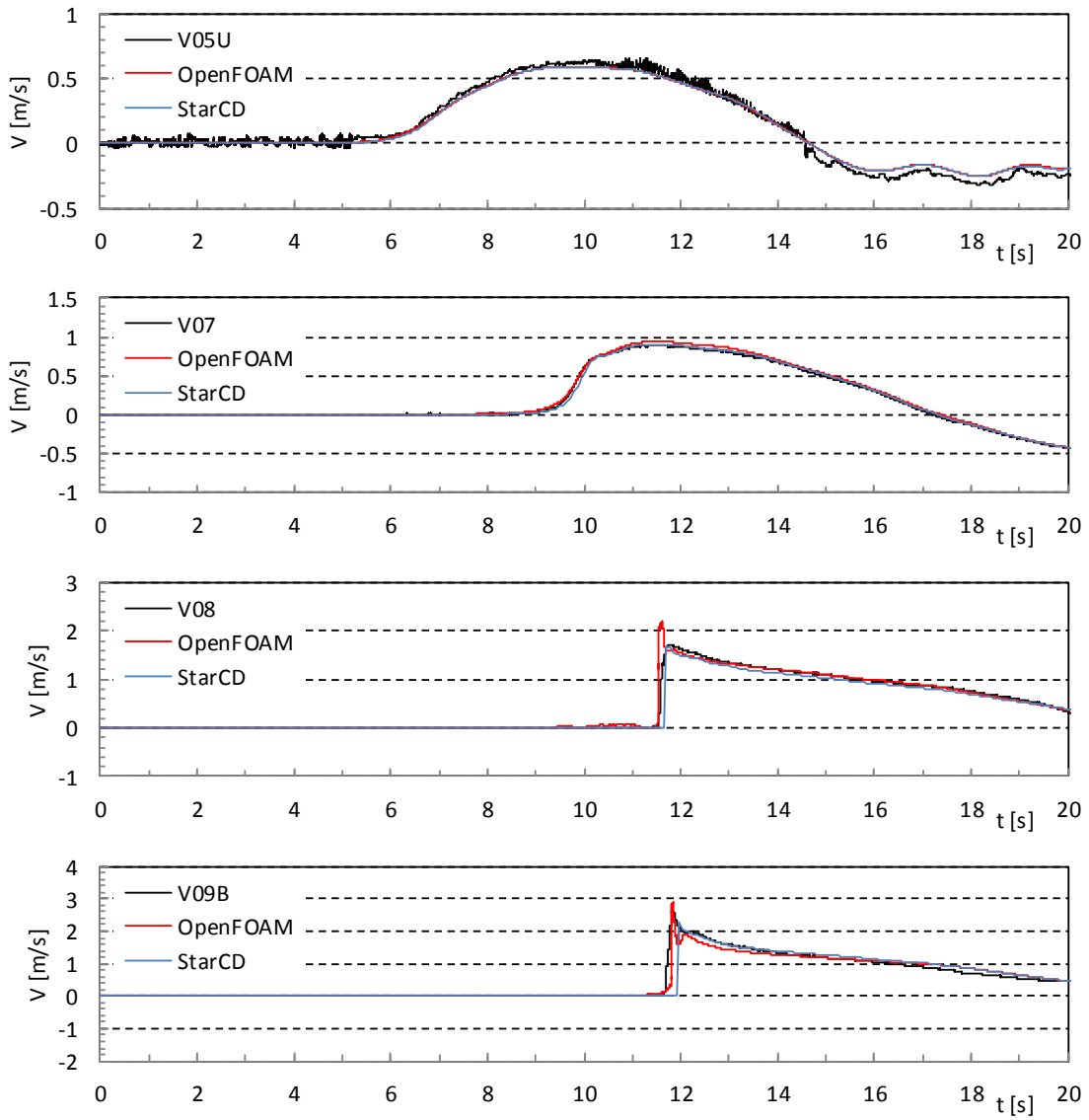


図- 8.3.3 各測点における通過波の流速時系列の比較 (単純勾配, Wc31)

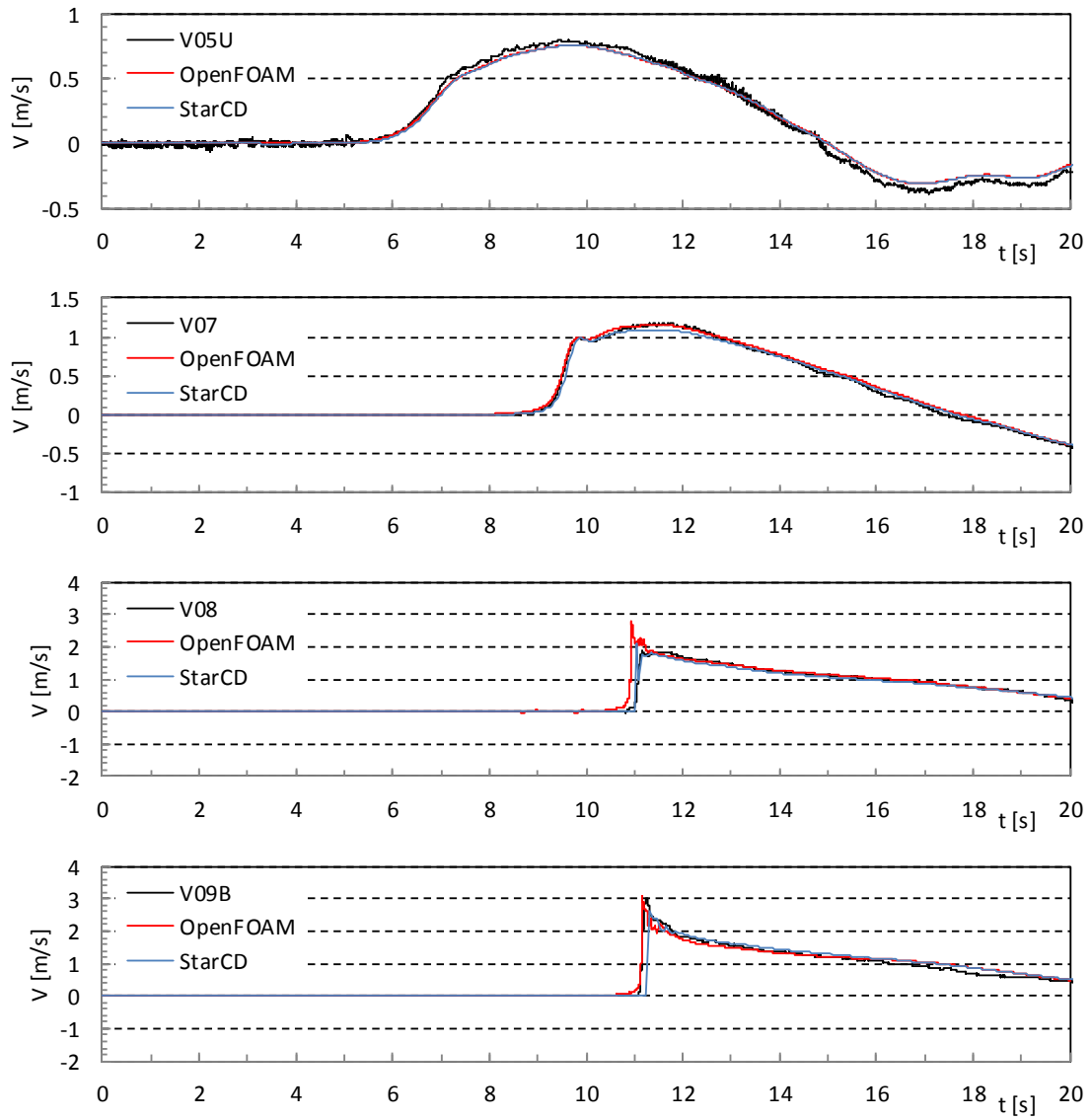


図- 8.3.3 各測点における通過波の流速時系列の比較 (単純勾配, Wc32)

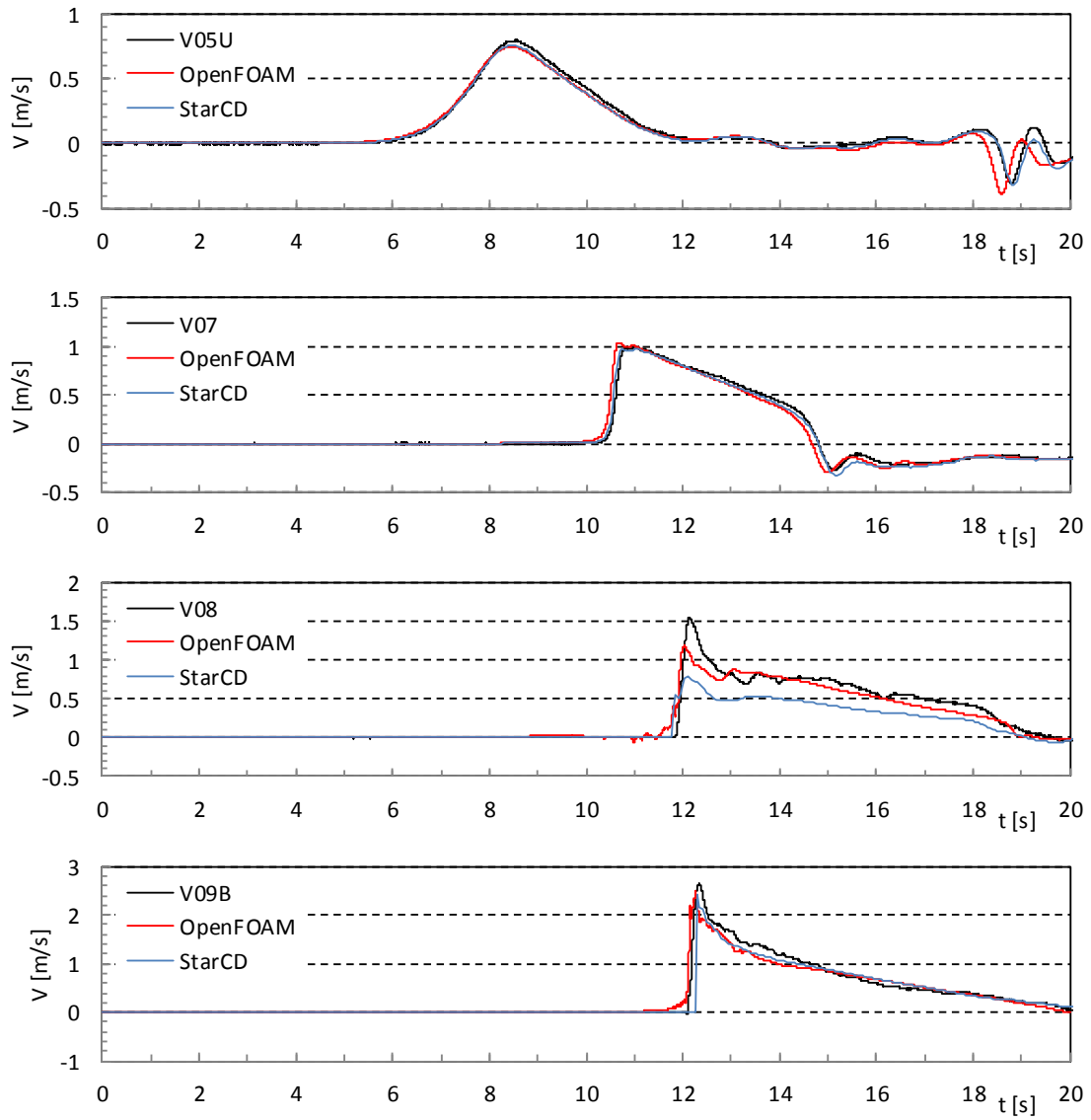


図- 8.3.4 各測点における通過波の流速時系列の比較 (直立護岸, Wc11)

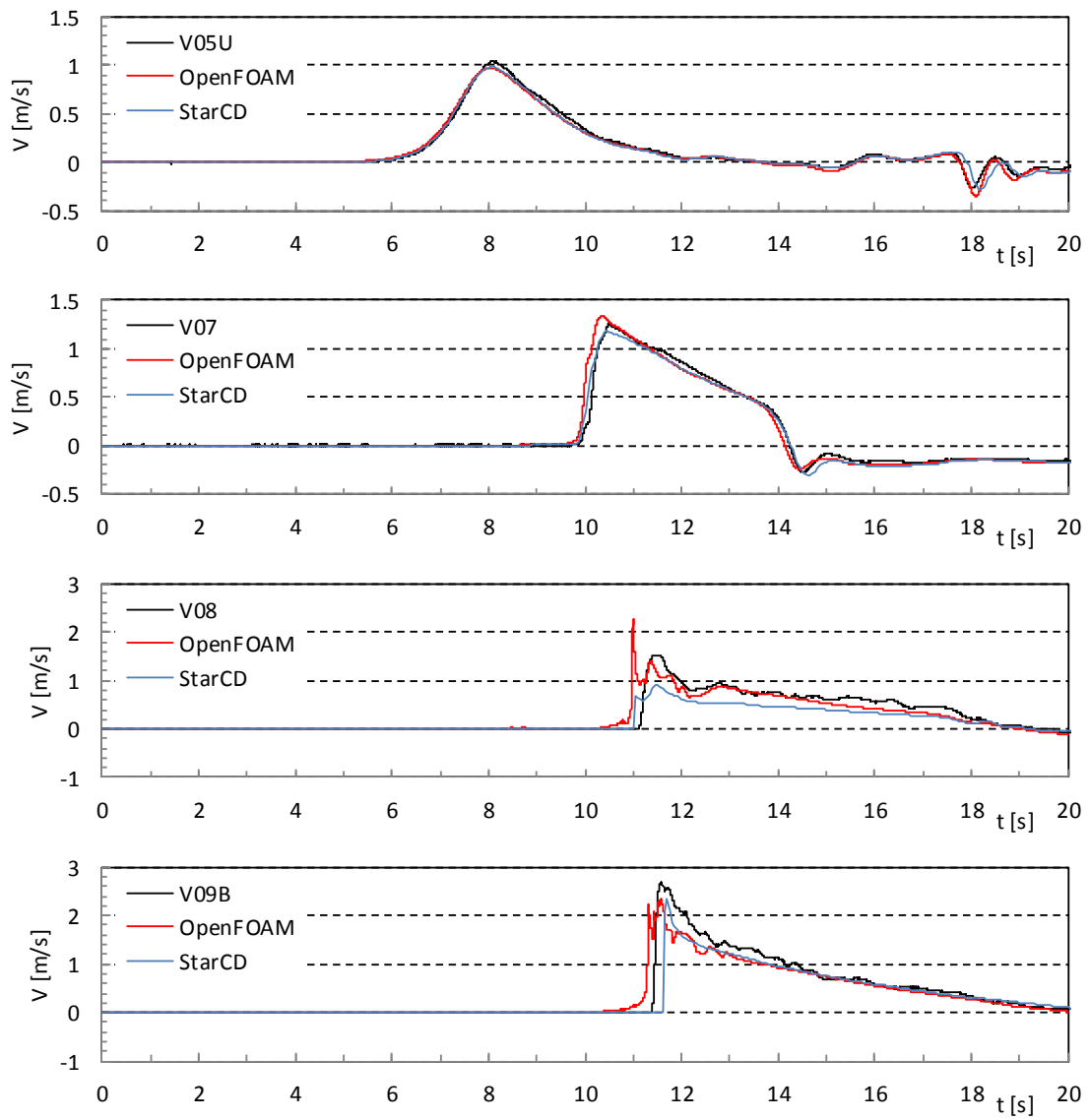


図- 8.3.4 各測点における通過波の流速時系列の比較 (直立護岸, Wc12)

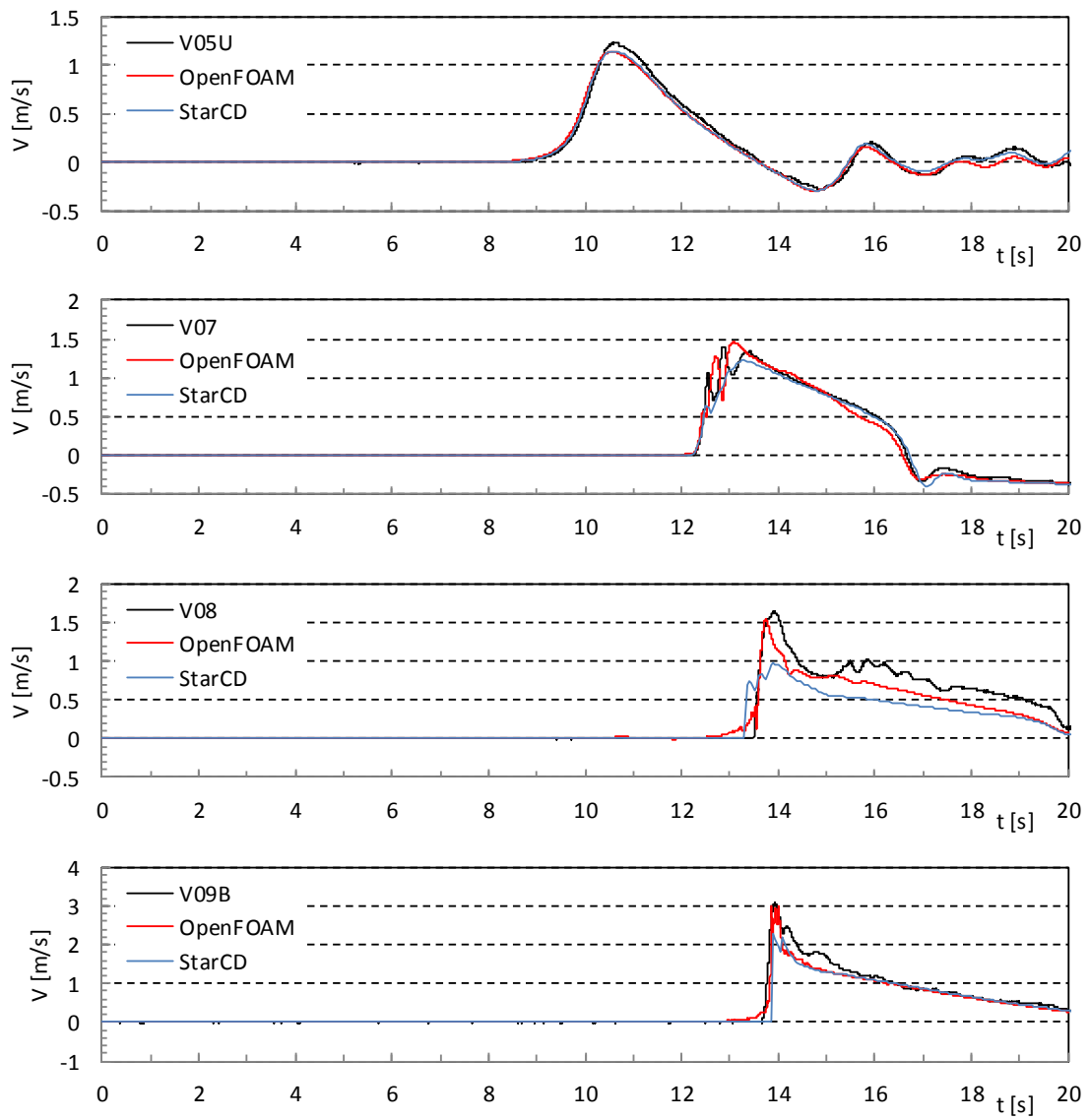


図- 8.3.4 各測点における通過波の流速時系列の比較 (直立護岸, Wc13)

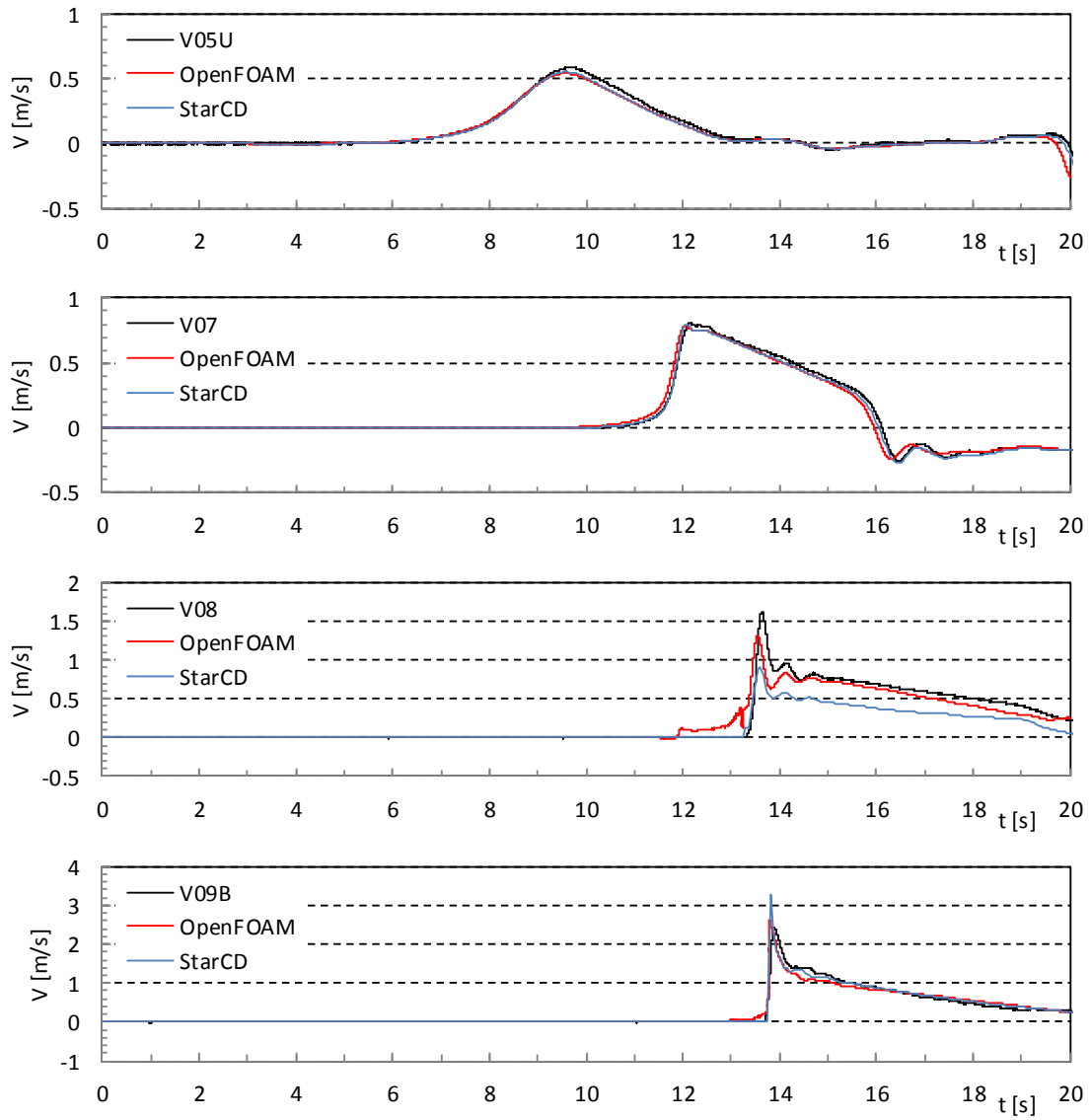


図- 8.3.4 各測点における通過波の流速時系列の比較 (直立護岸, Wc14)

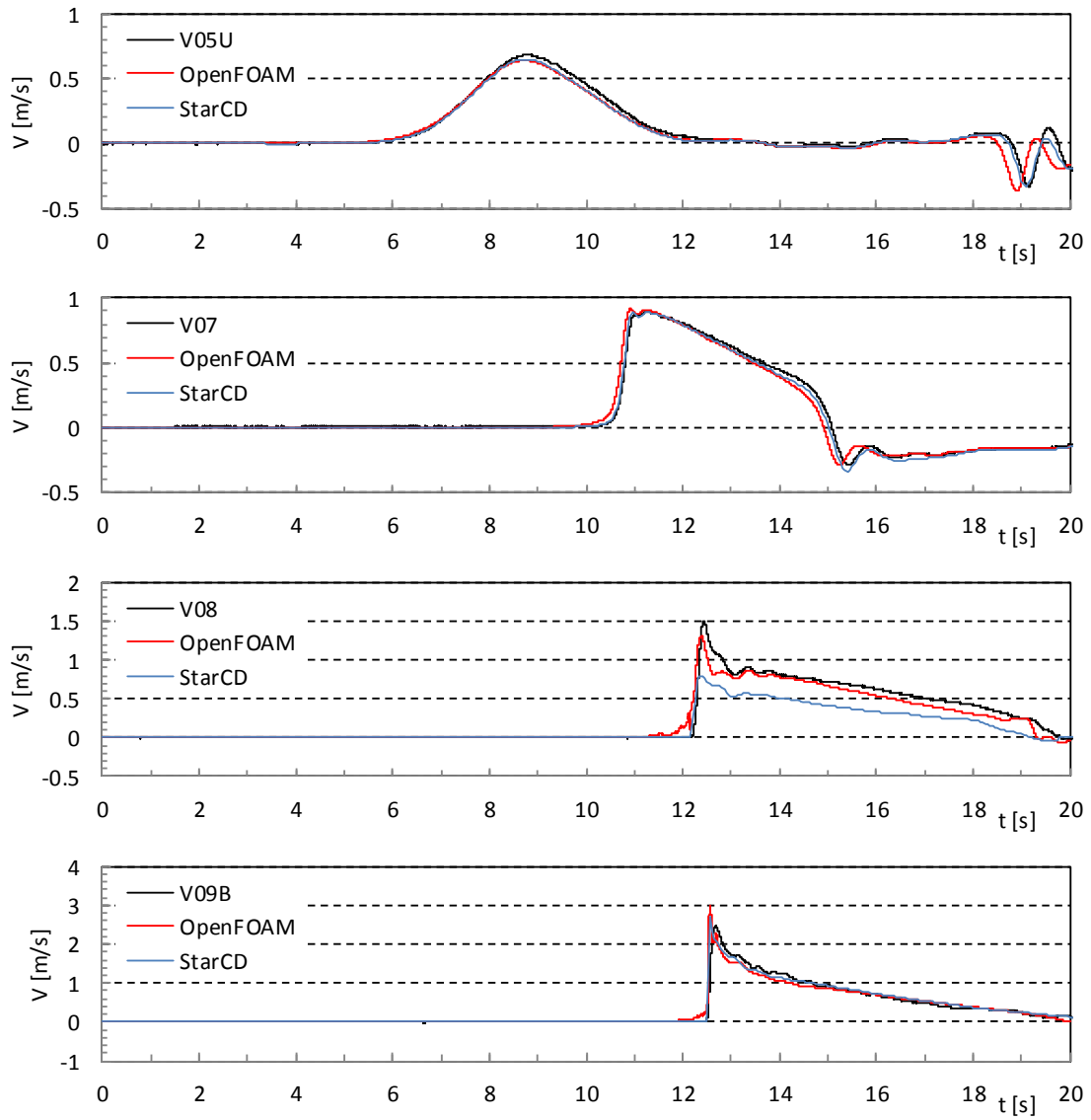


図- 8.3.4 各測点における通過波の流速時系列の比較 (直立護岸, Wc15)

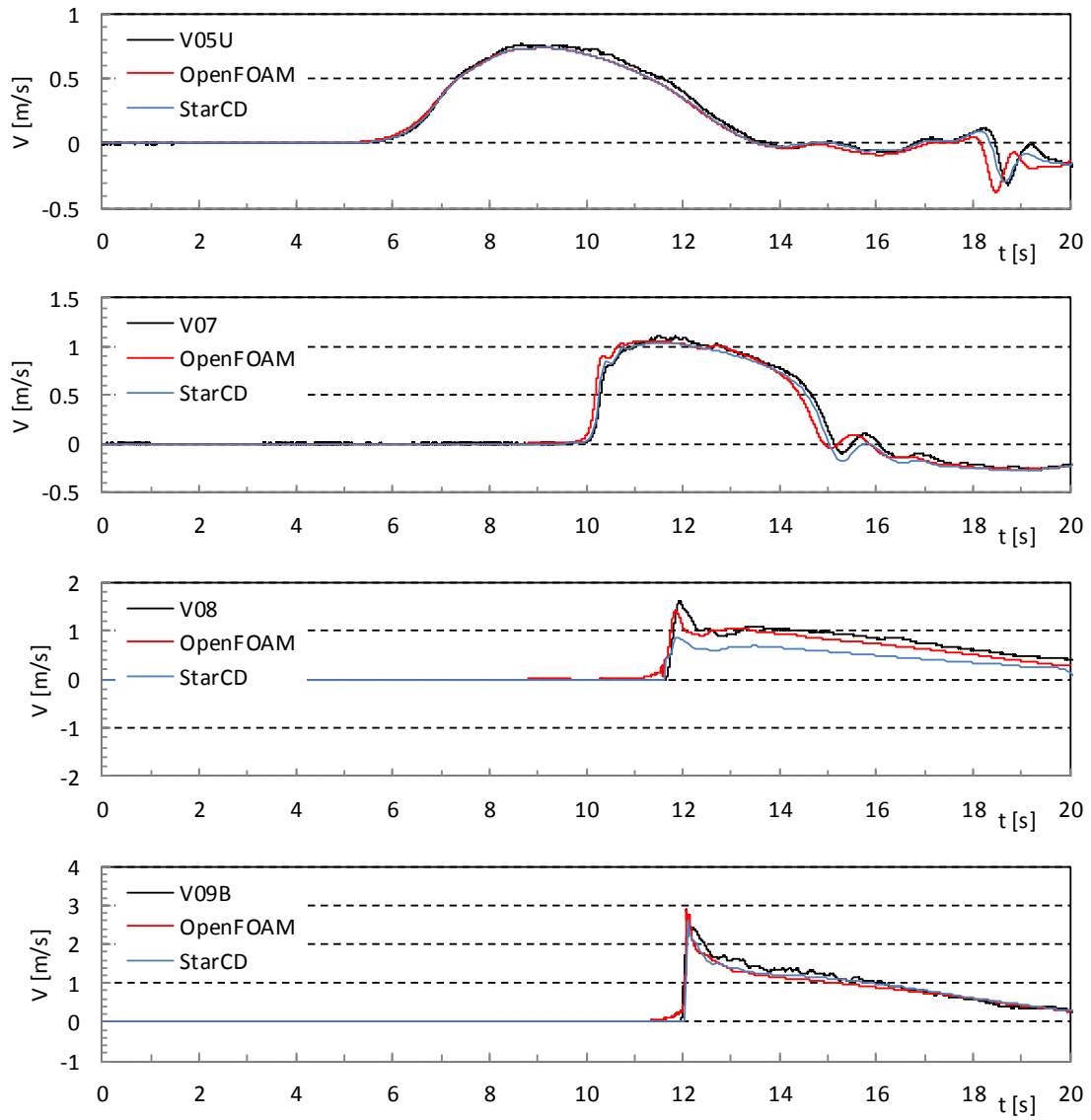


図- 8.3.4 各測点における通過波の流速時系列の比較 (直立護岸, Wc21)

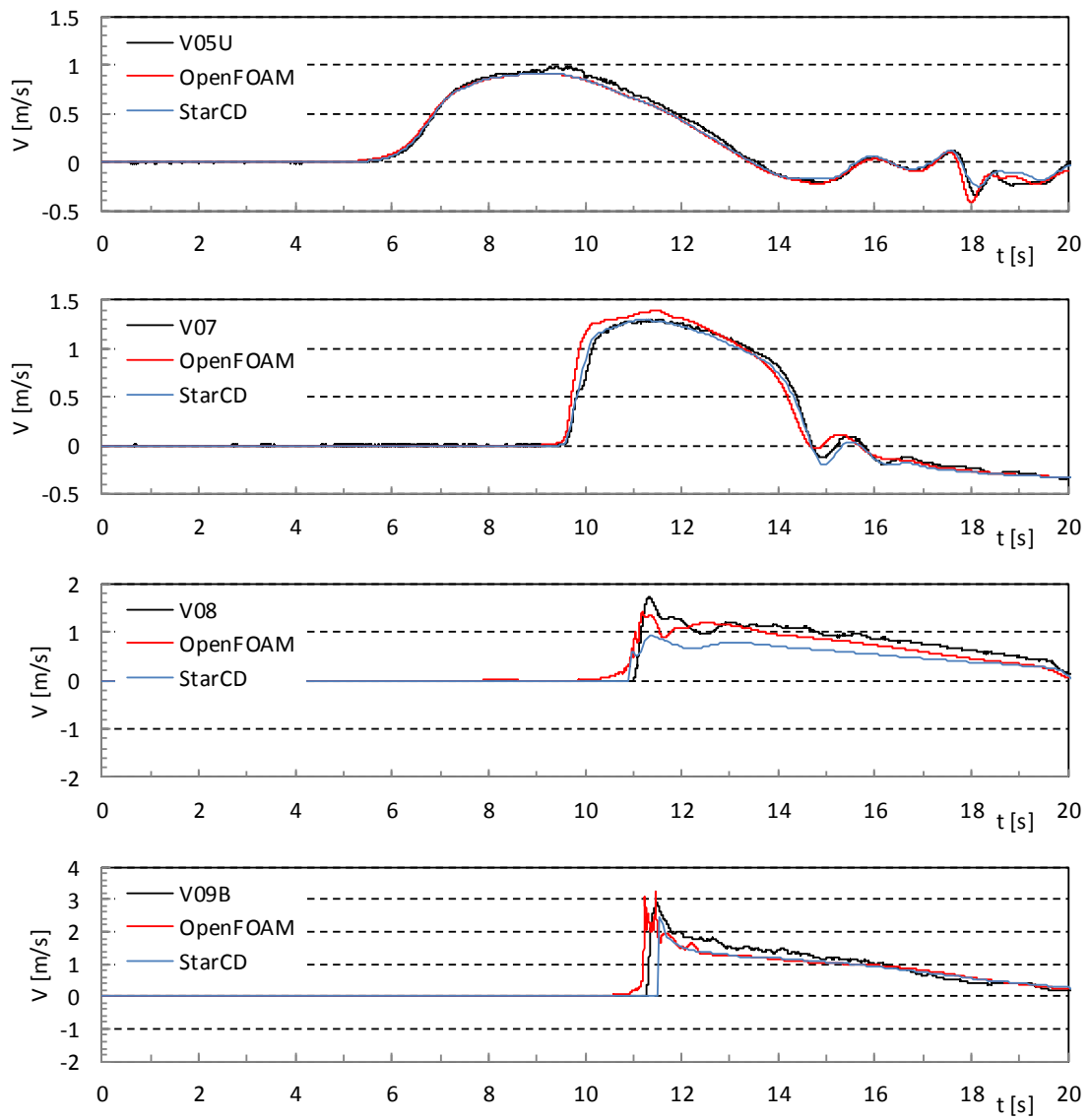


図- 8.3.4 各測点における通過波の流速時系列の比較 (直立護岸, Wc22)

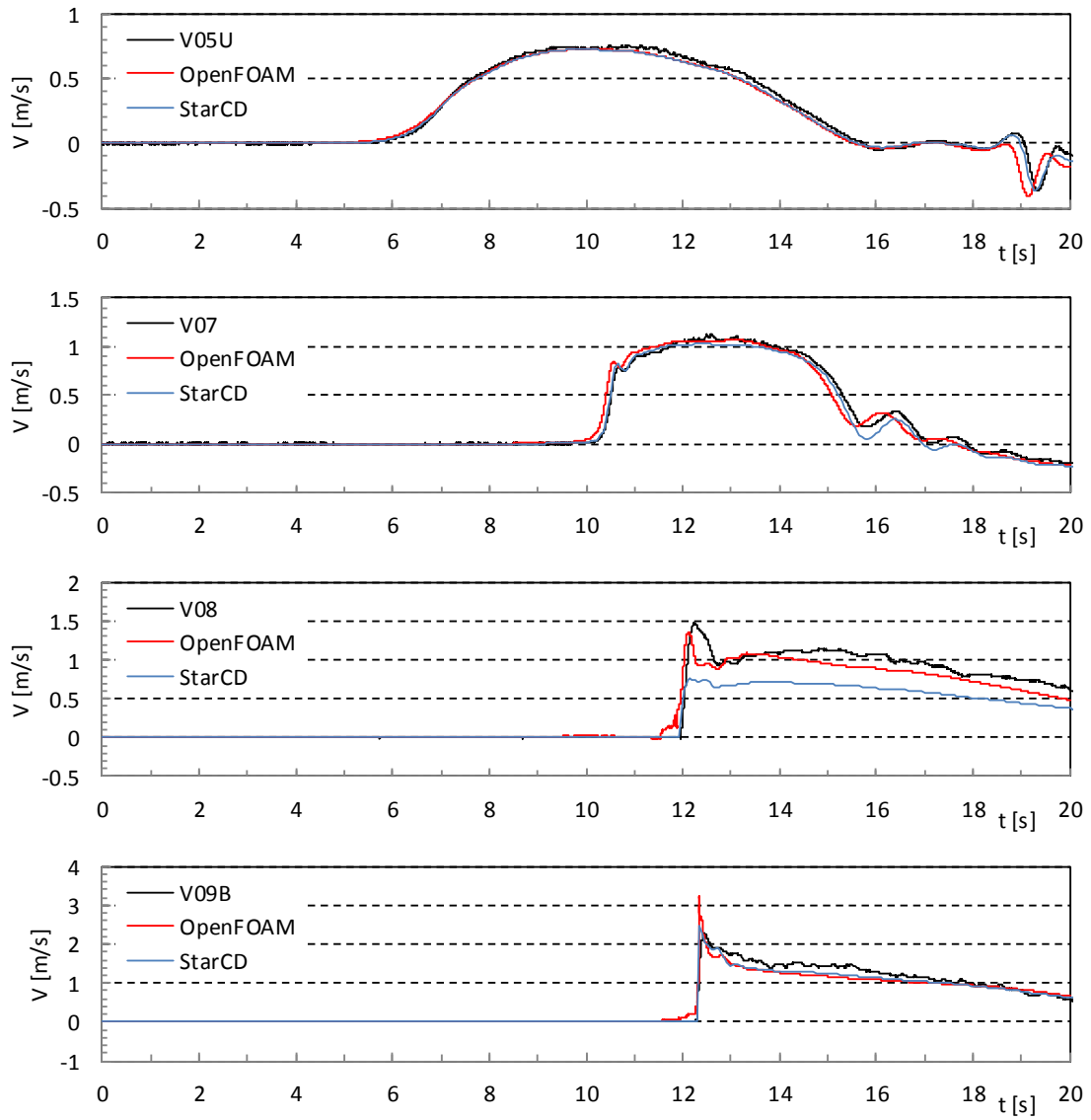


図- 8.3.4 各測点における通過波の流速時系列の比較 (直立護岸, Wc31)

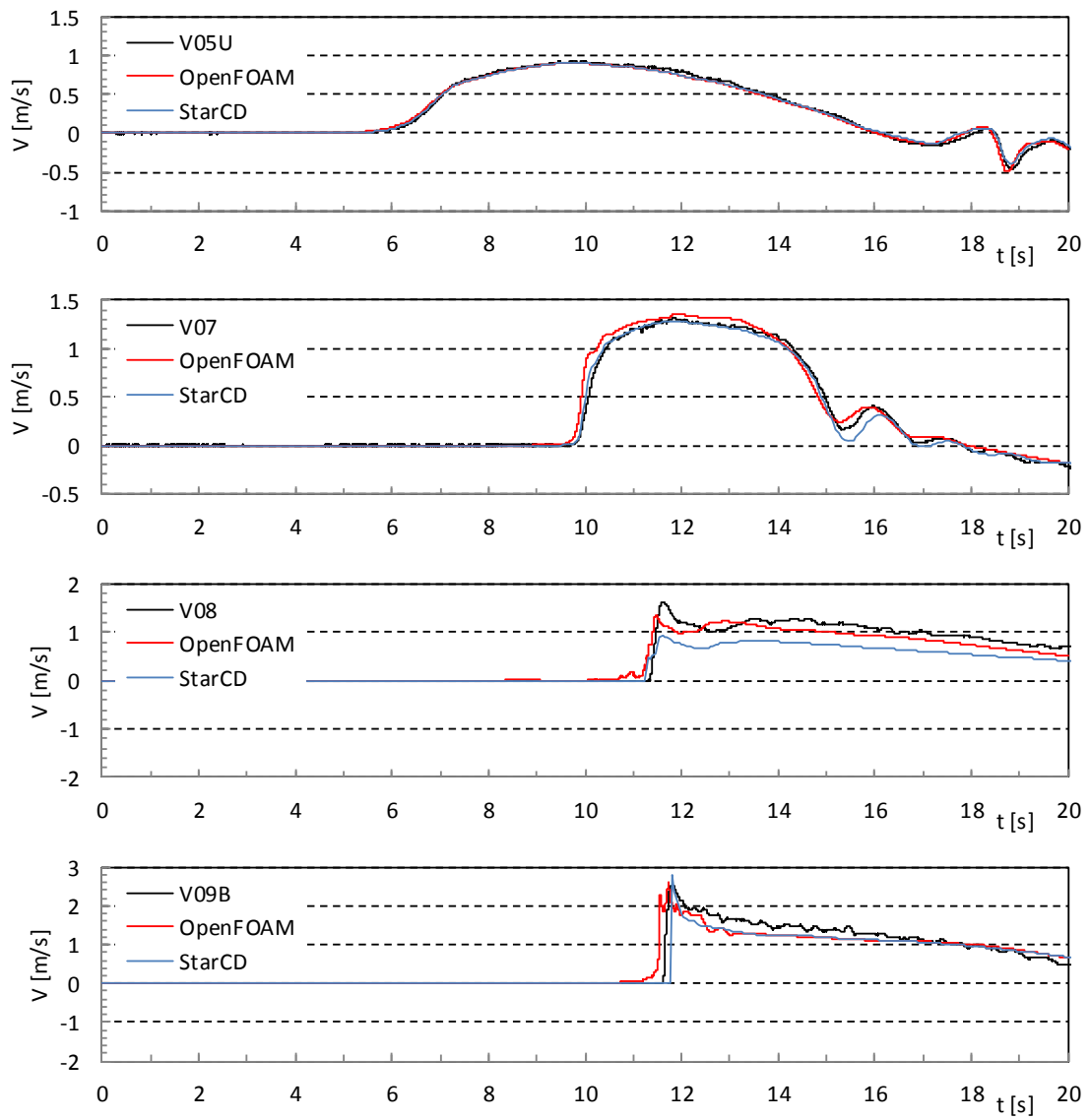


図- 8.3.4 各測点における通過波の流速時系列の比較 (直立護岸, Wc32)

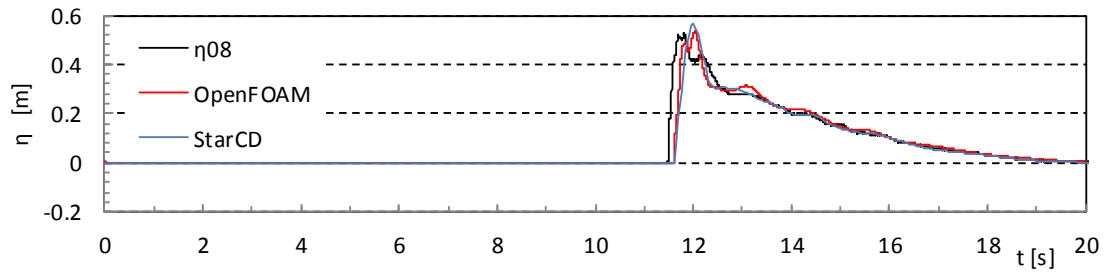
8.3.3. 波力/波圧試験の水位再現結果

波力/波圧試験における堤体前面水位の解析結果と試験結果の比較を，非越流（TypeA）のケースについて図- 8.3.5～図- 8.3.8 に，越流（TypeB）のケースについて図- 8.3.9～図- 8.3.12 に示す。

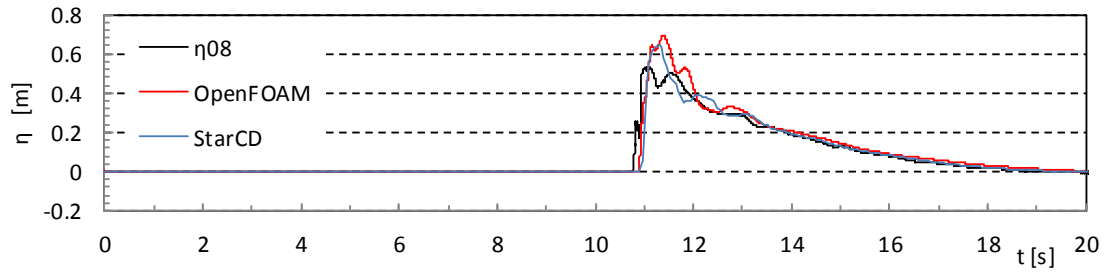
津波到達時の，短時間での急激な水位上昇について，試験結果と解析結果に相違が生じているが，それを除くと数値解析は試験結果を精度良く再現していると言える。通過波の再現解析における砕波の再現と同様に，津波到達時は水塊が上方に大きく打ち上げられるため，水理試験，数値解析ともに水位の定義が難しく，そのため両者に違いが生じていると考えられる。ただし，この打ち上げられた水塊によって堤体に作用する水圧は小さいため，波圧の再現精度への影響は小さいと考えられる。

また解析結果は，通過波検定試験と同様に，水理試験の結果に対し立ち上がりが遅れる傾向にある。砕波によるエネルギー減衰の評価と，汀線における護岸の直角部分を越流する際の再現精度が主な要因と考えられるが，後述する波力の最大値については水理試験を精度良く再現できおり，数値解析による波力評価への影響は小さいと言える。

Wc11



Wc12



Wc13

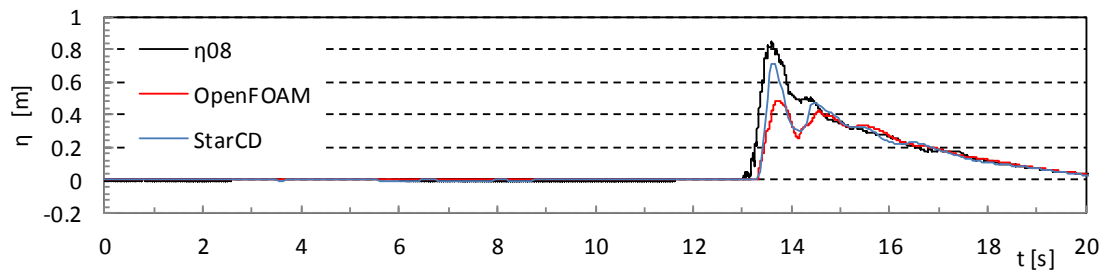
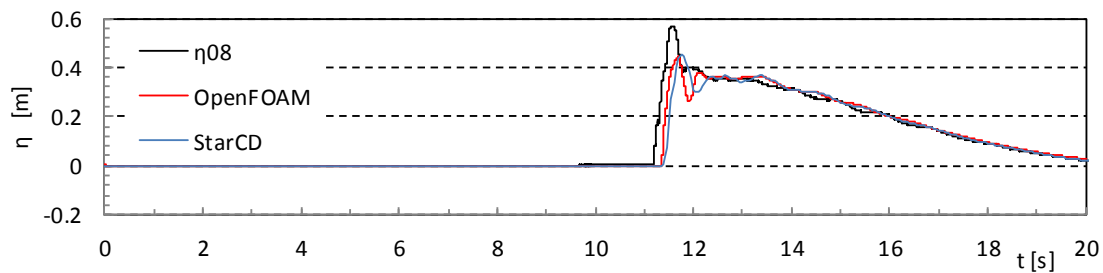
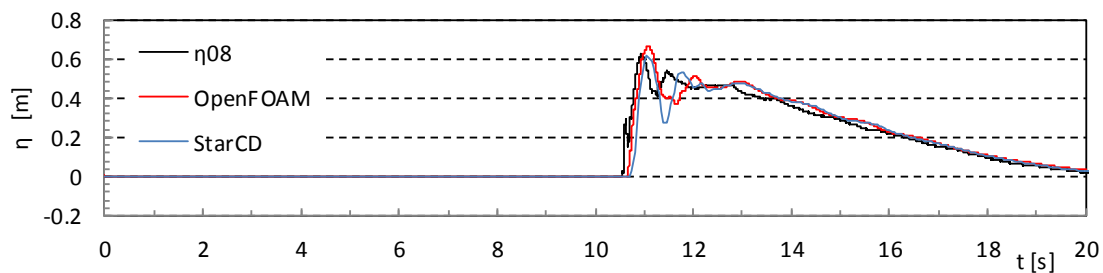


図- 8.3.5 堤体前面水位の時系列比較 (単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0m)

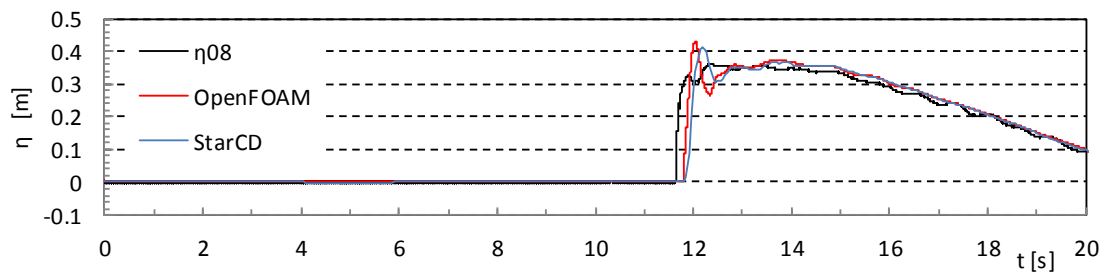
Wc21



Wc22



Wc31



Wc32

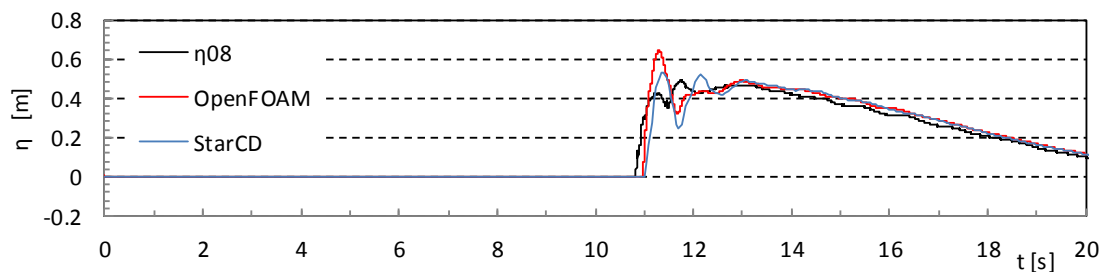
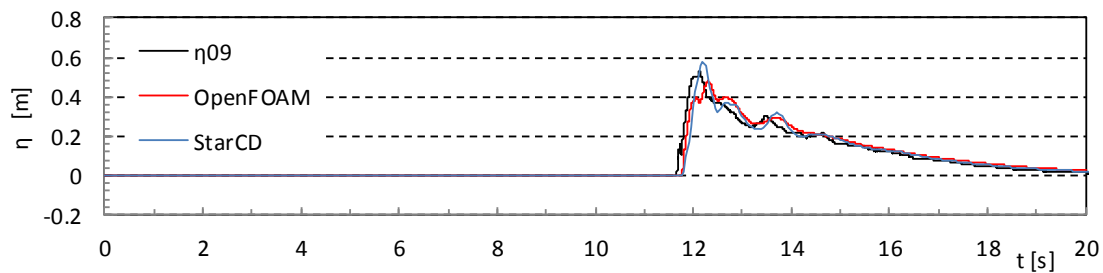
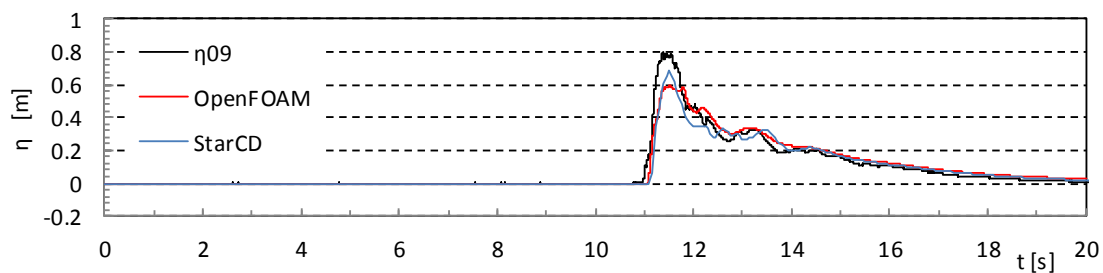


図- 8.3.5 堤体前面水位の時系列比較 (単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0m)

Wc11



Wc12



Wc13

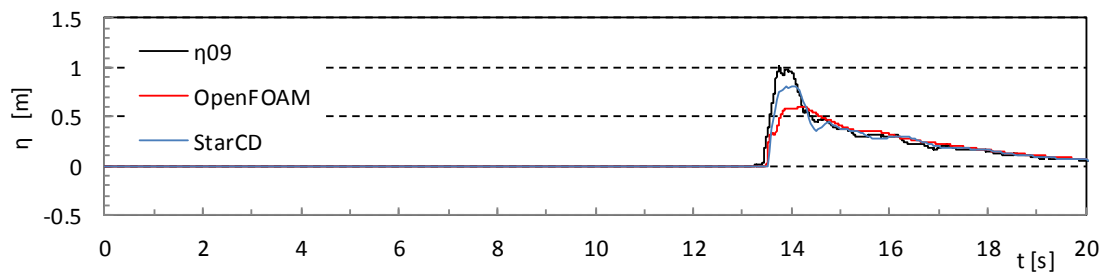


図- 8.3.6 堤体前面水位の時系列比較 (単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m)

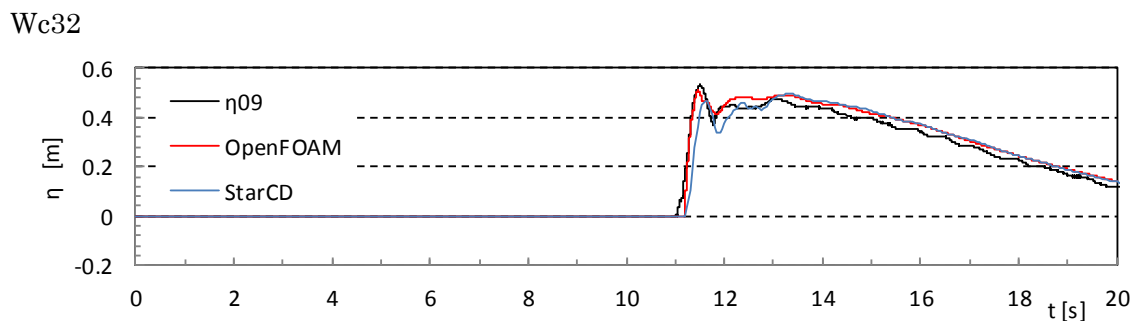
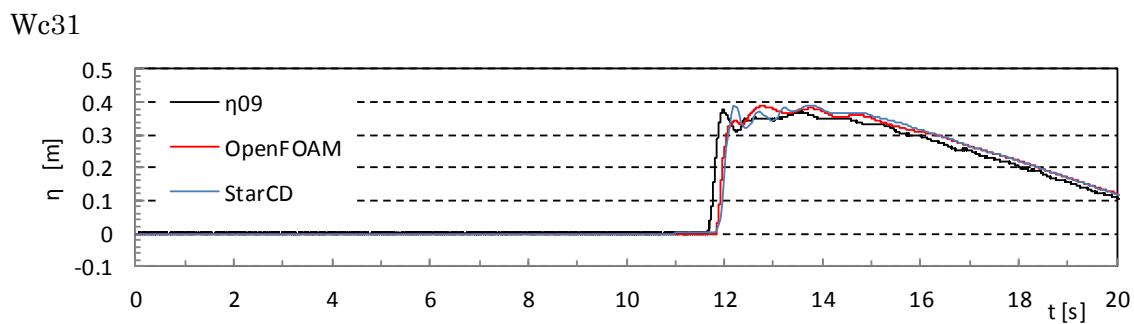
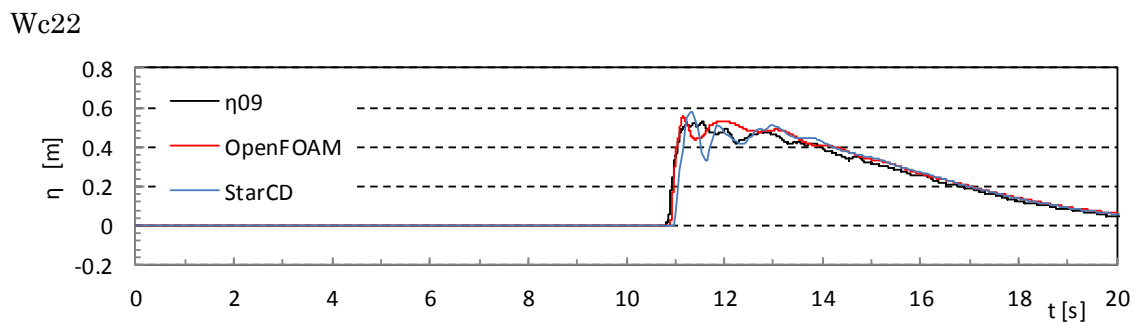
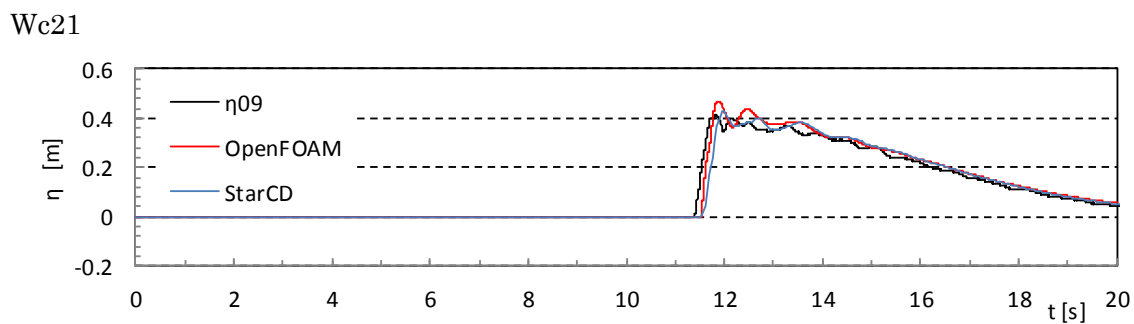
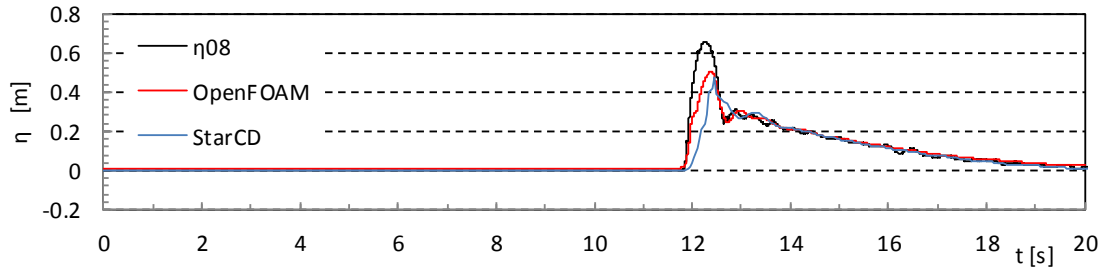
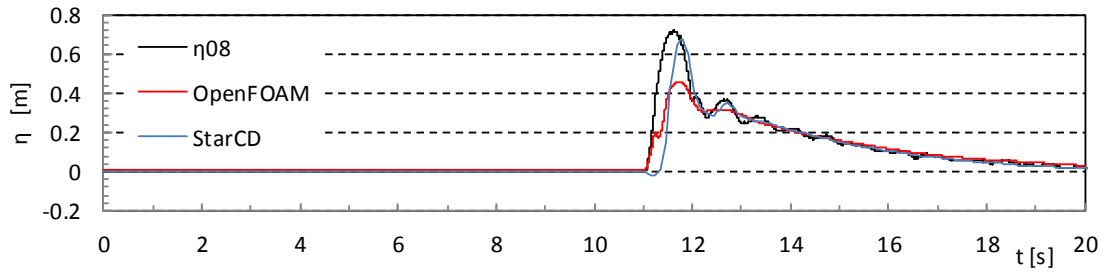


図- 8.3.6 堤体前面水位の時系列比較 (単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m)

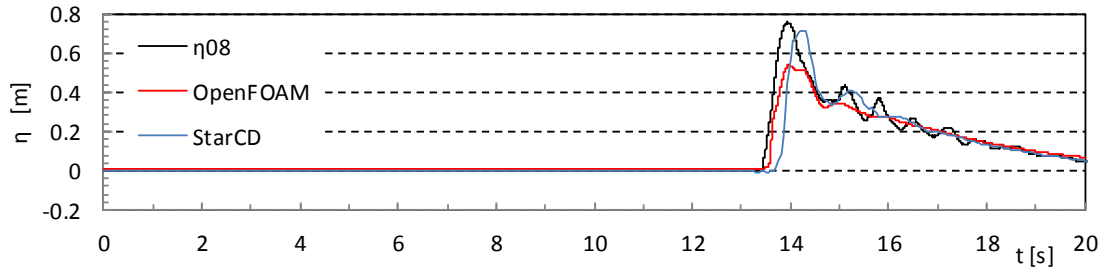
Wc11



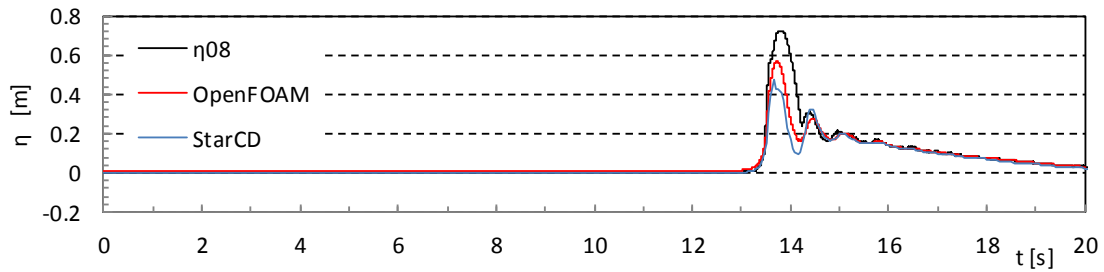
Wc12



Wc13



Wc14



Wc15

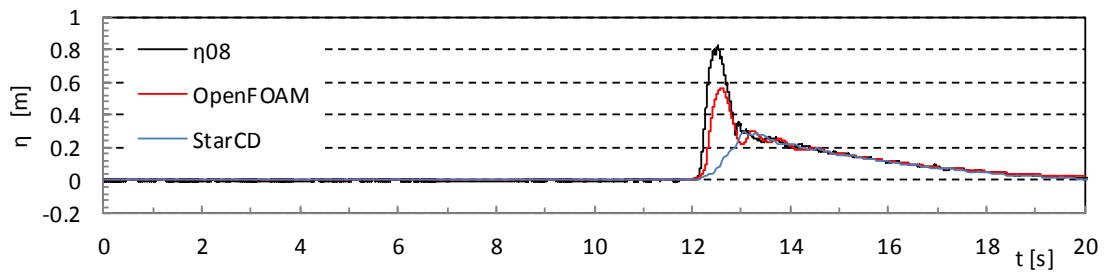
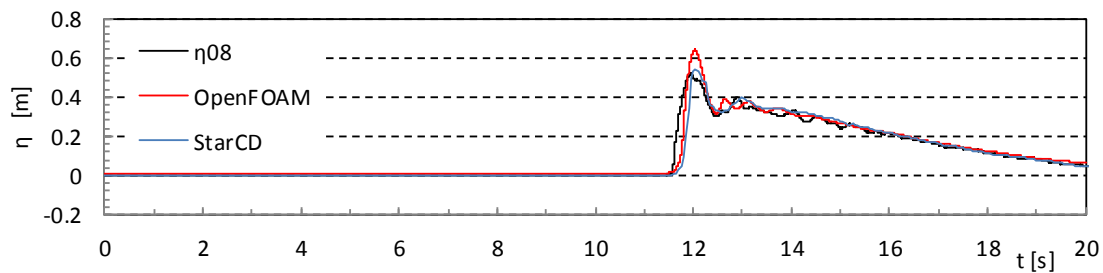
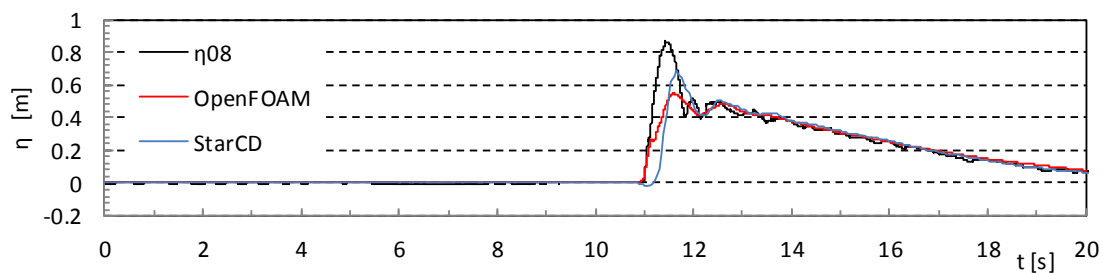


図- 8.3.7 堤体前面水位の時系列比較 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0m)

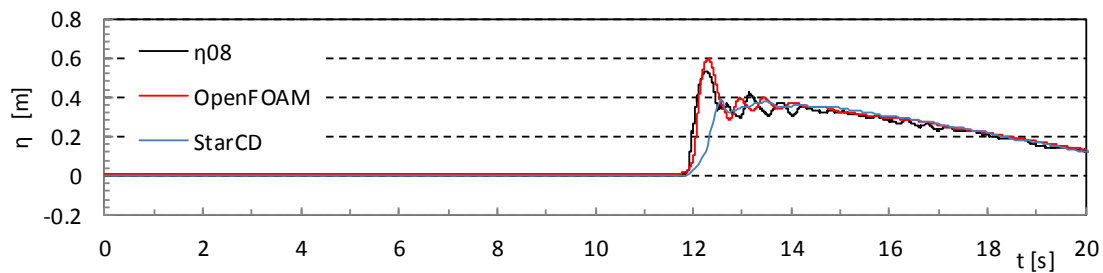
Wc21



Wc22



Wc31



Wc32

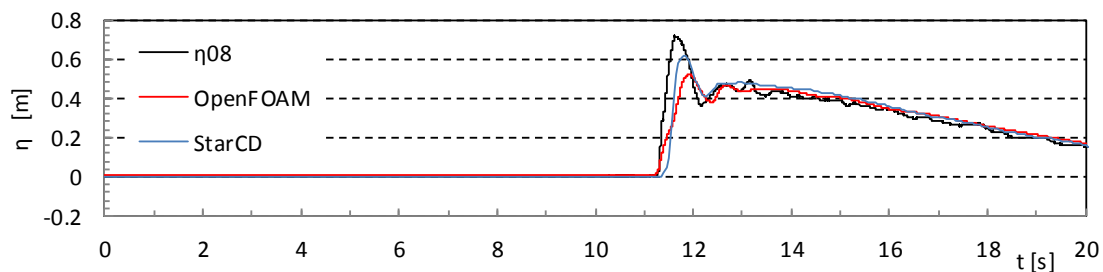
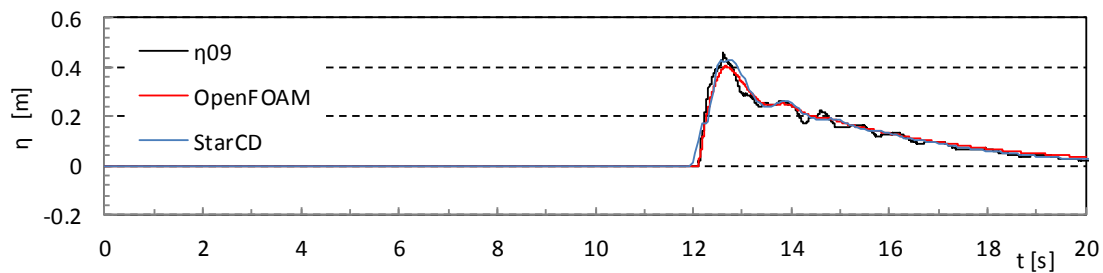
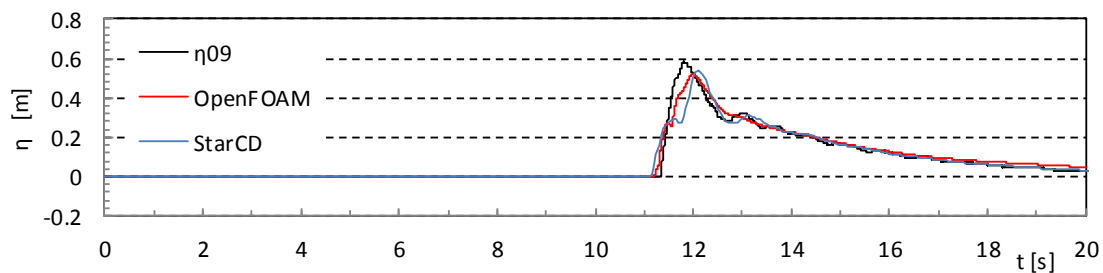


図- 8.3.7 堤体前面水位の時系列比較 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0m)

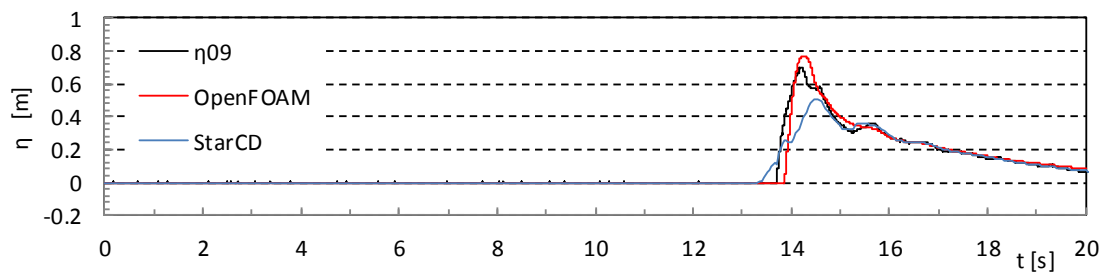
Wc11



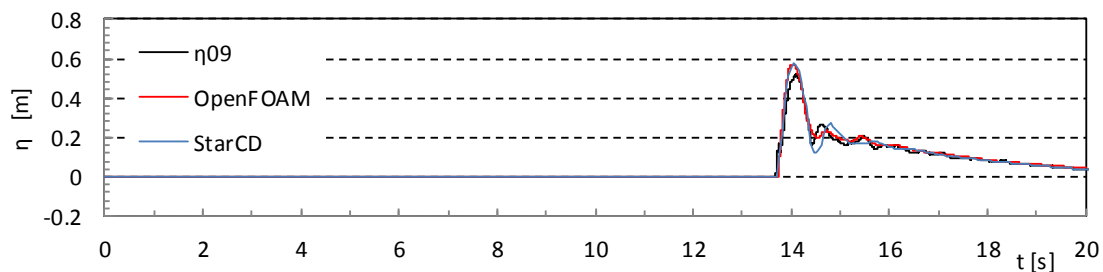
Wc12



Wc13



Wc14



Wc15

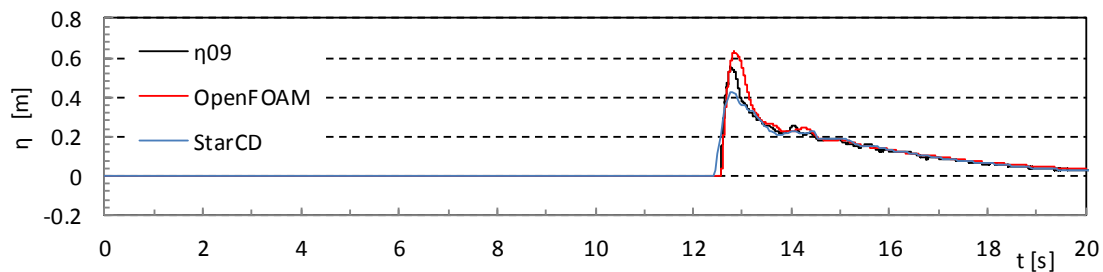
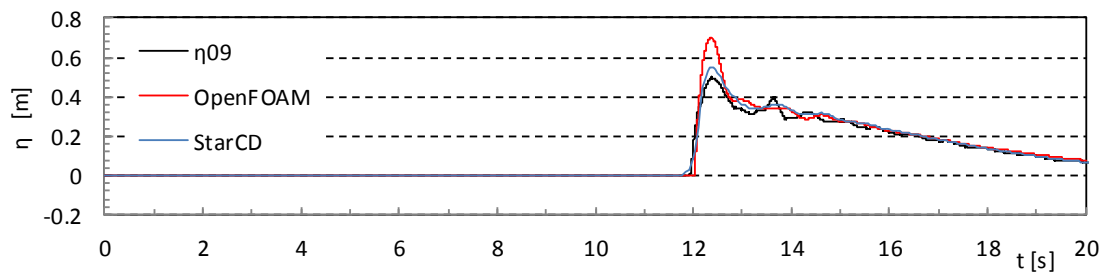
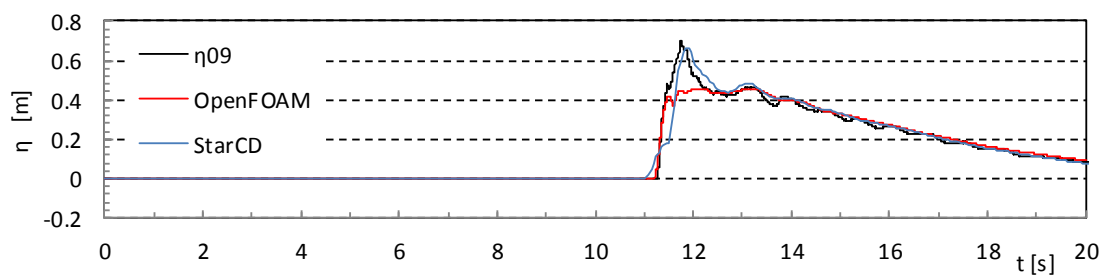


図- 8.3.8 堤体前面水位の時系列比較 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m)

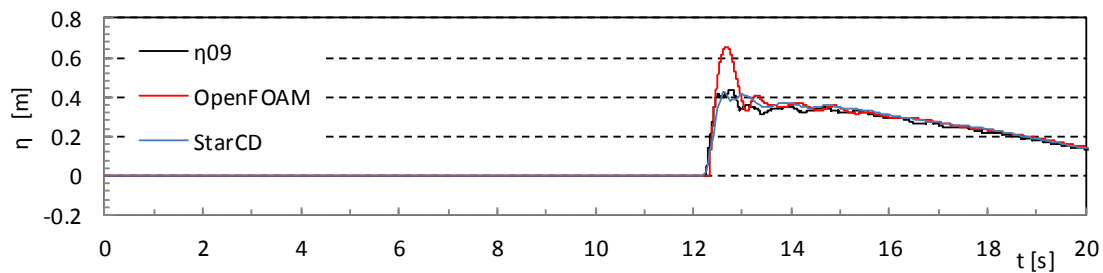
Wc21



Wc22



Wc31



Wc32

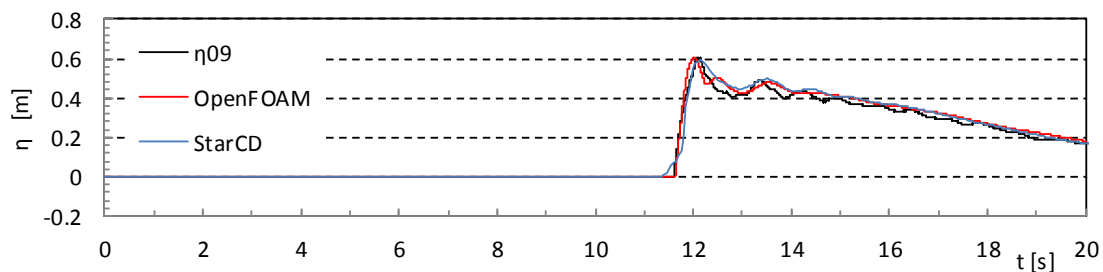
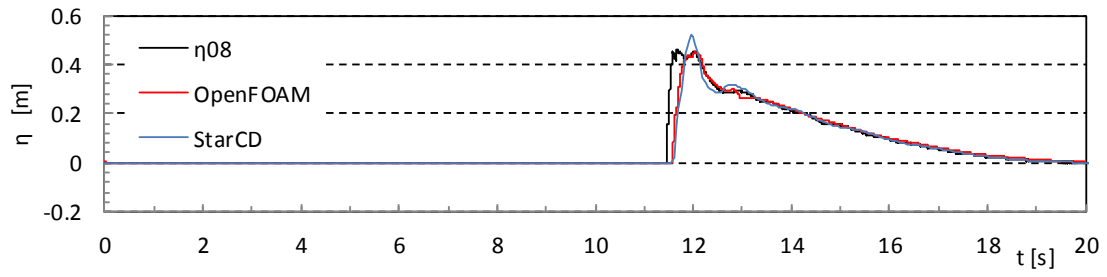
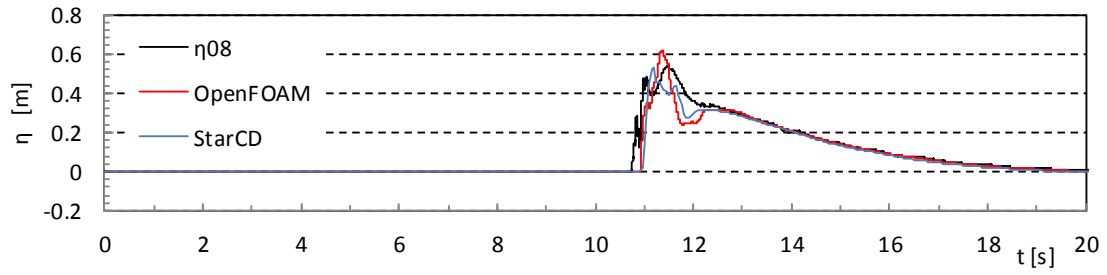


図- 8.3.8 堤体前面水位の時系列比較 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m)

Wc11



Wc12



Wc13

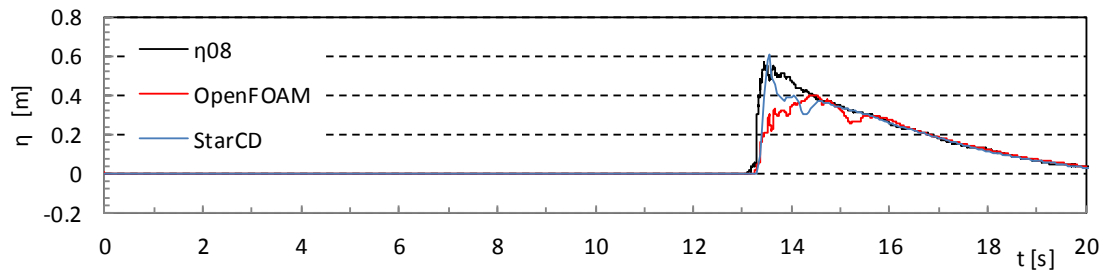
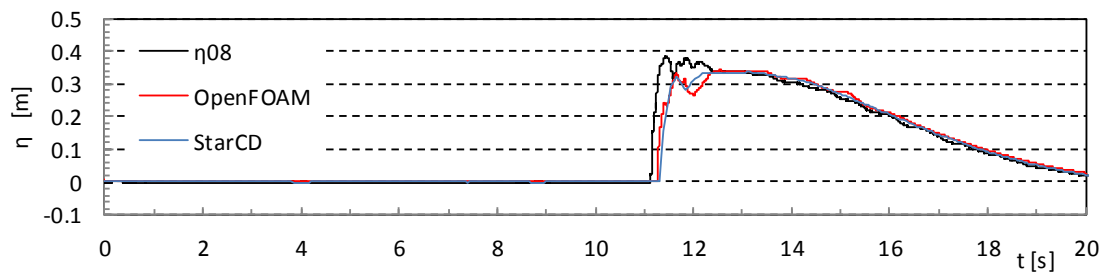
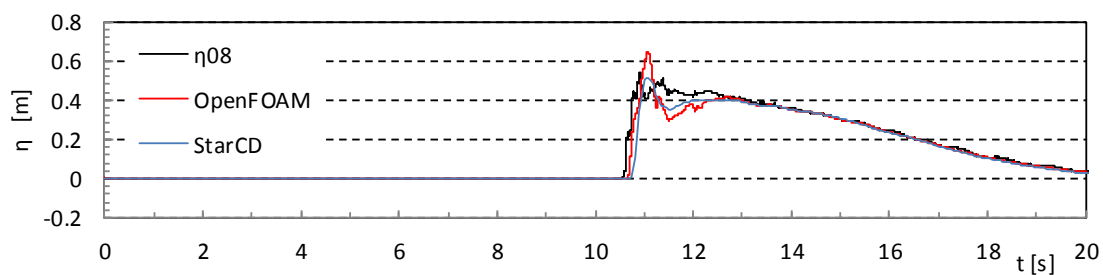


図- 8.3.9 堤体前面水位の時系列比較（単純勾配，堤体 TypeB，設置位置 0m）

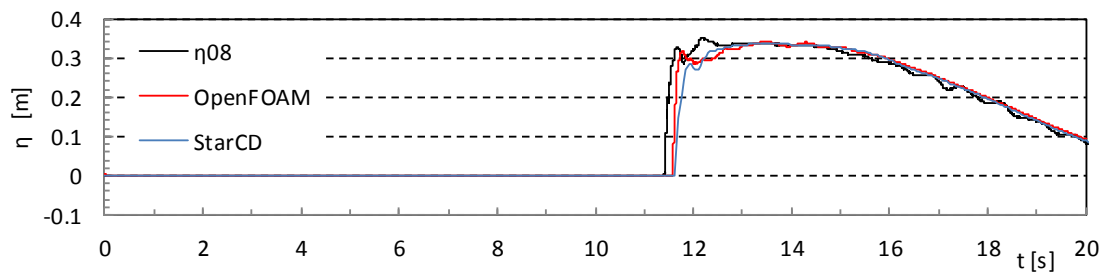
Wc21



Wc22



Wc31



Wc32

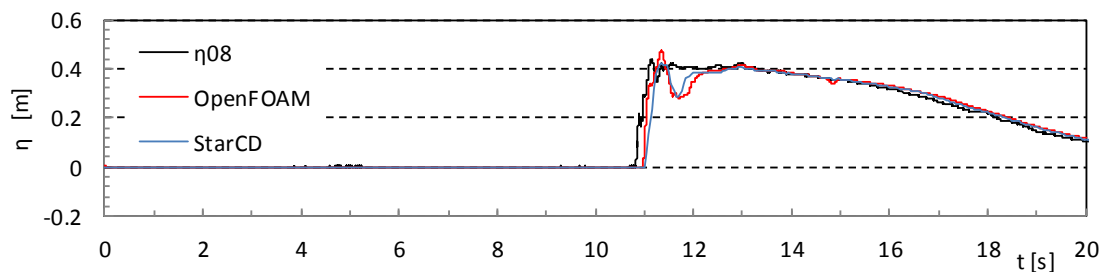
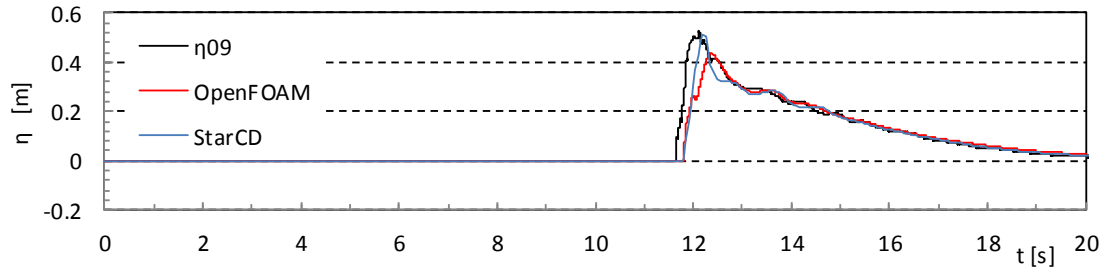
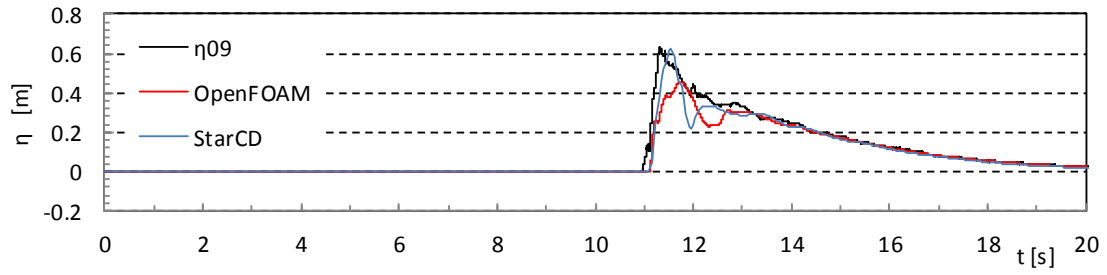


図- 8.3.9 堤体前面水位の時系列比較 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0m)

Wc11



Wc12



Wc13

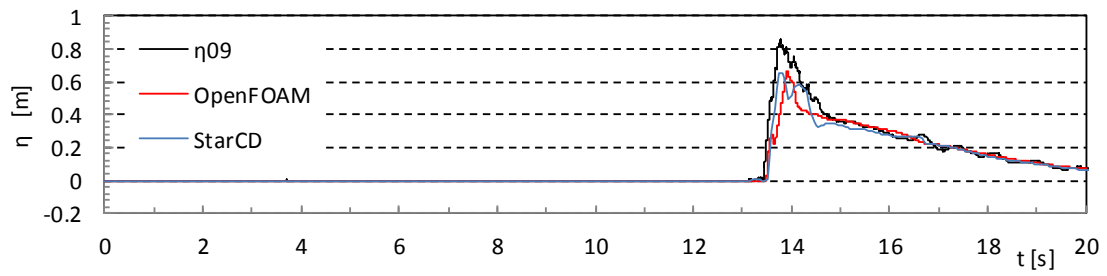
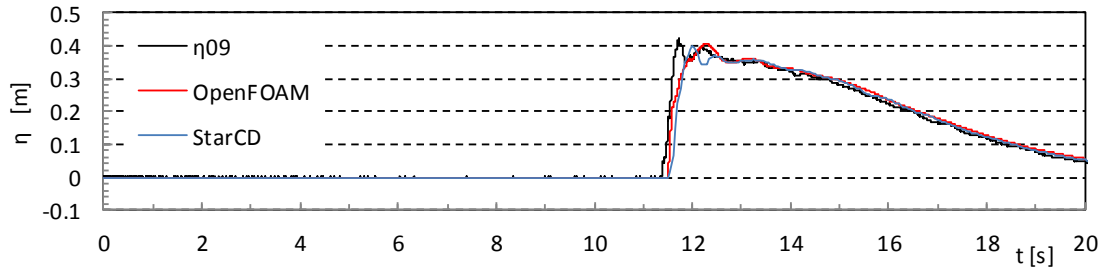
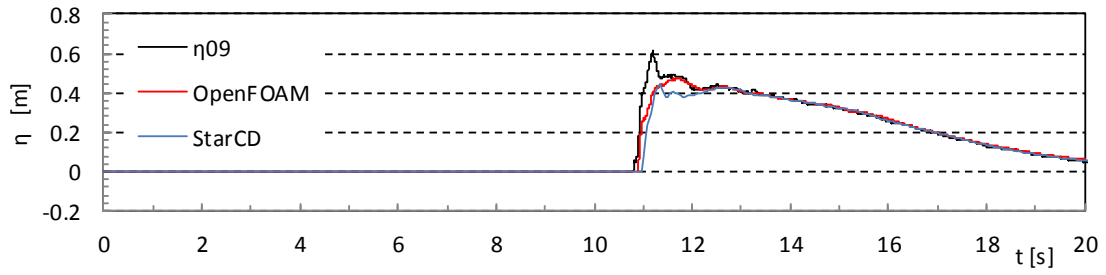


図- 8.3.10 堤体前面水位の時系列比較 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m)

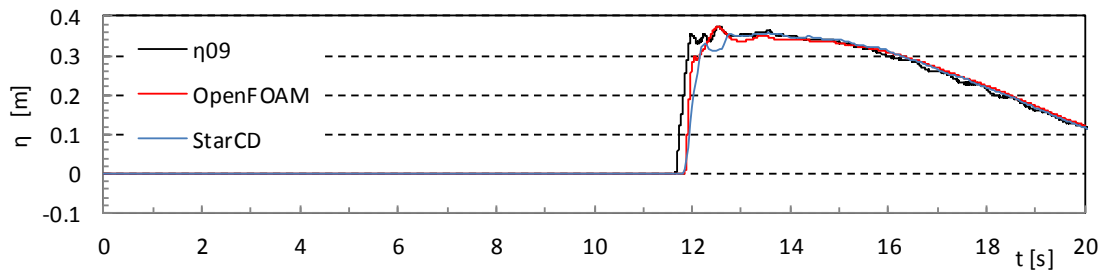
Wc21



Wc22



Wc31



Wc32

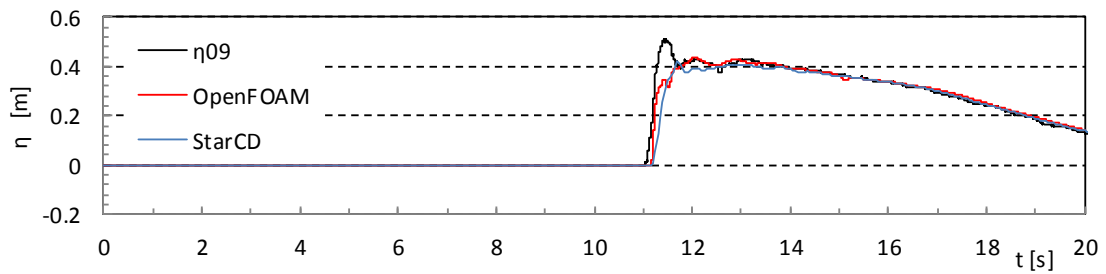
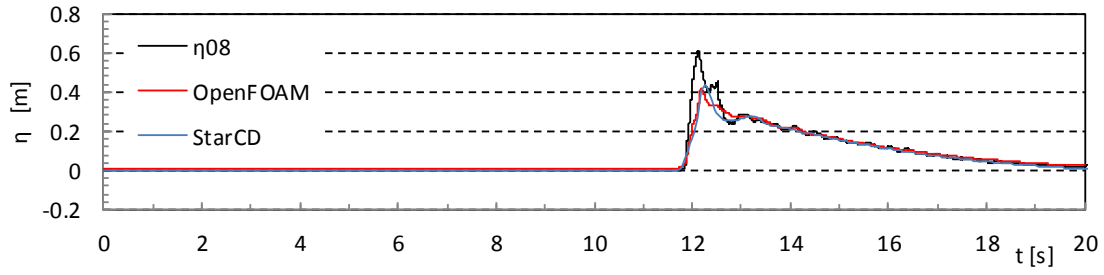
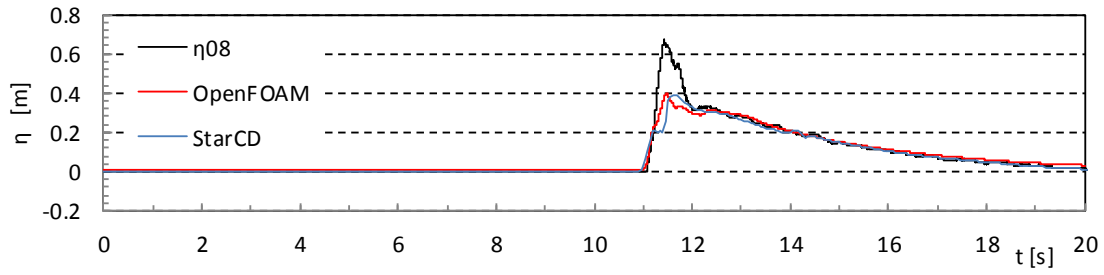


図- 8.3.10 堤体前面水位の時系列比較 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m)

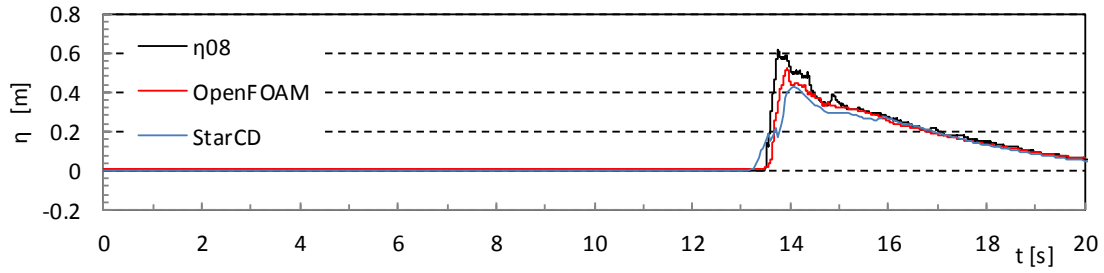
Wc11



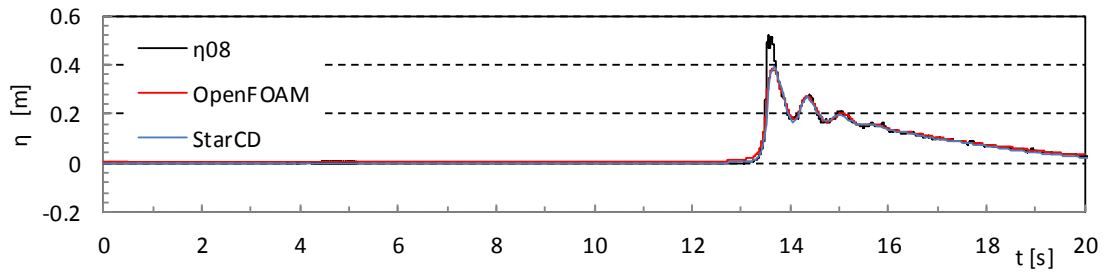
Wc12



Wc13



Wc14



Wc15

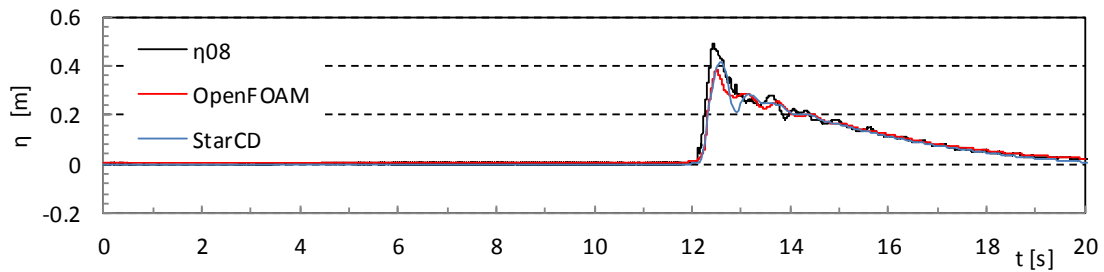
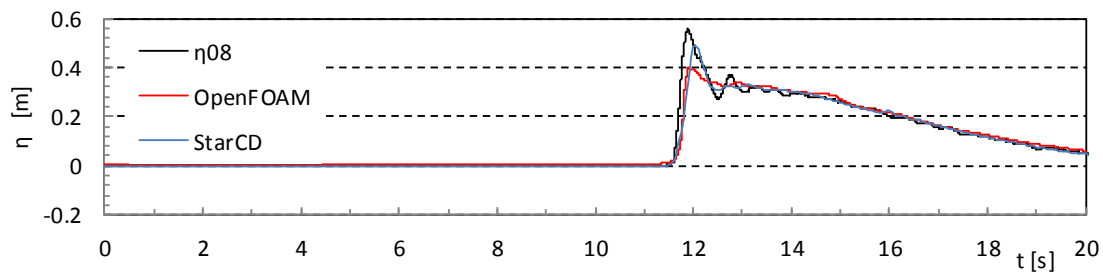
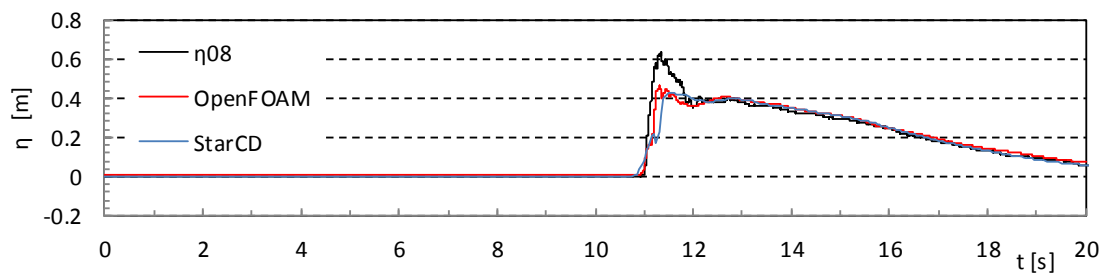


図- 8.3.11 堤体前面水位の時系列比較 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0m)

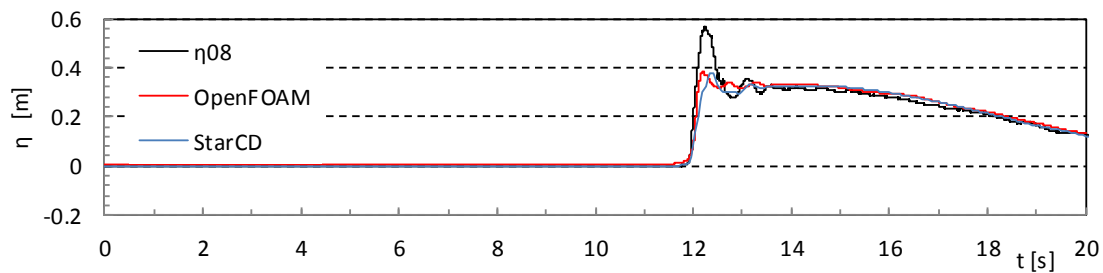
Wc21



Wc22



Wc31



Wc32

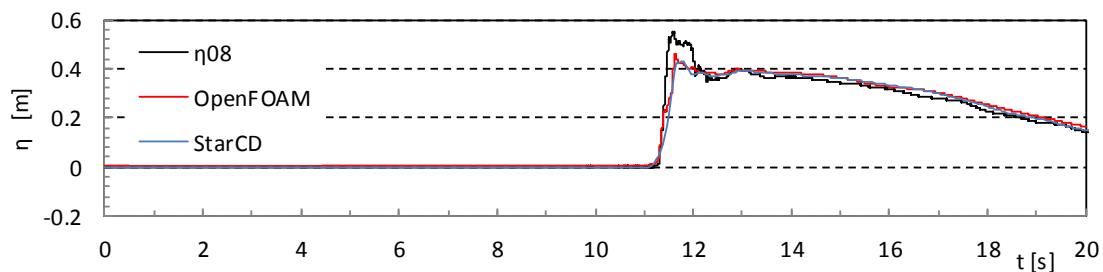
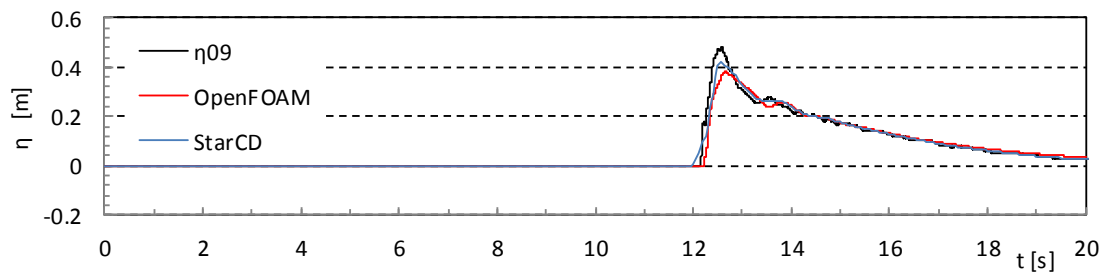
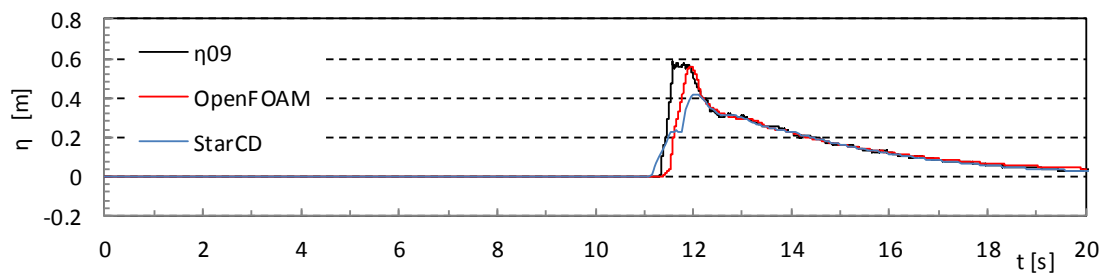


図- 8.3.11 堤体前面水位の時系列比較 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0m)

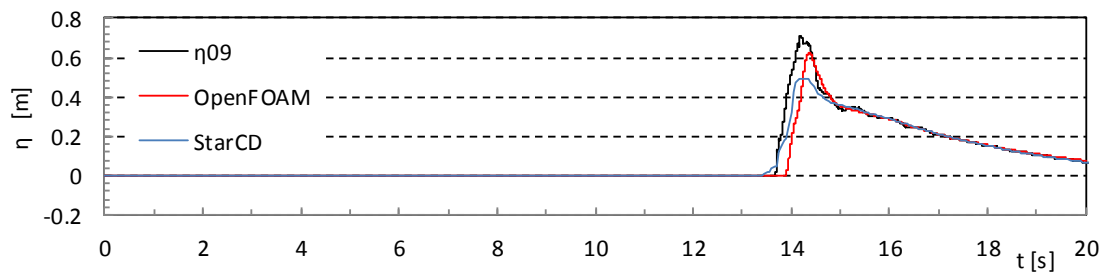
Wc11



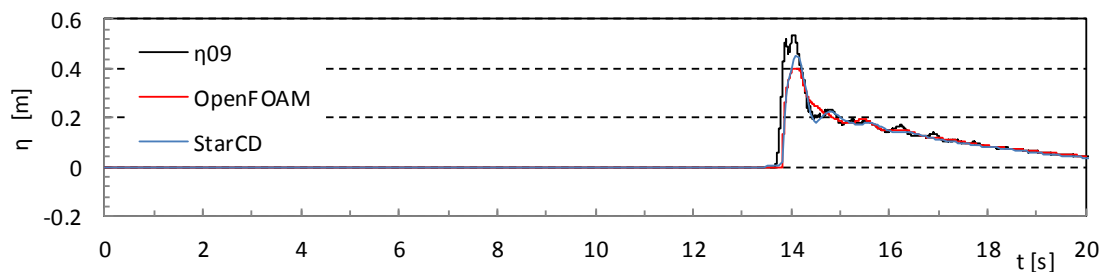
Wc12



Wc13



Wc14



Wc15

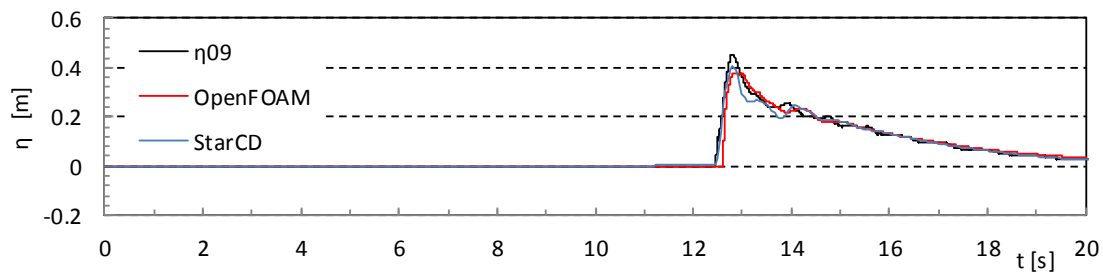
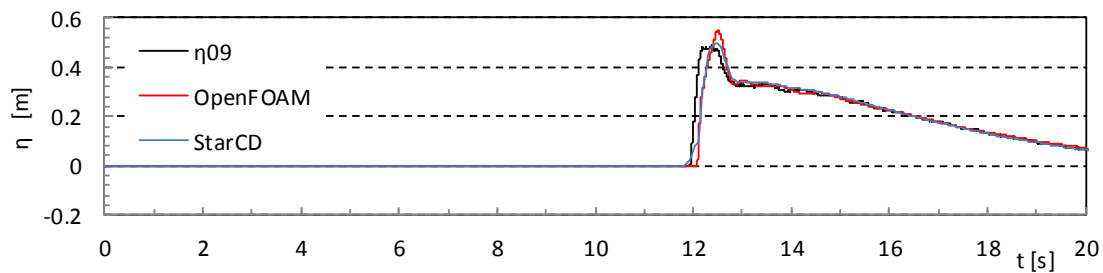
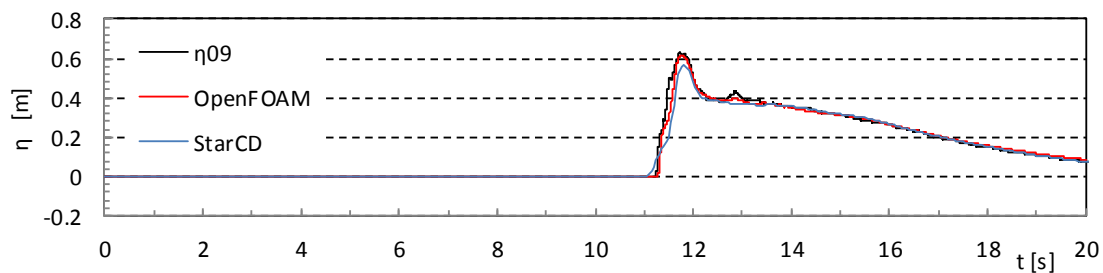


図- 8.3.12 堤体前面水位の時系列比較 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m)

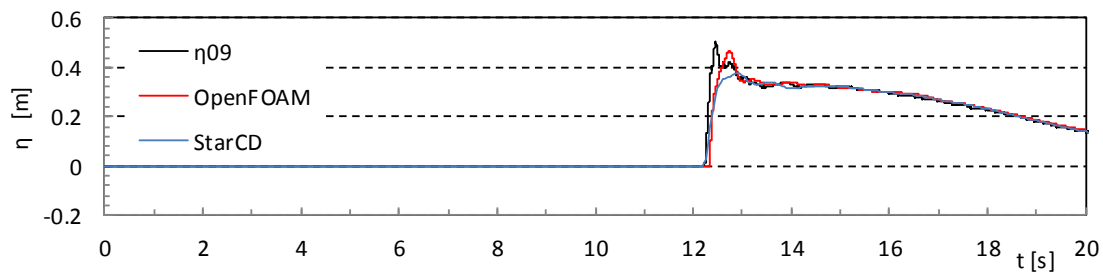
Wc21



Wc22



Wc31



Wc32

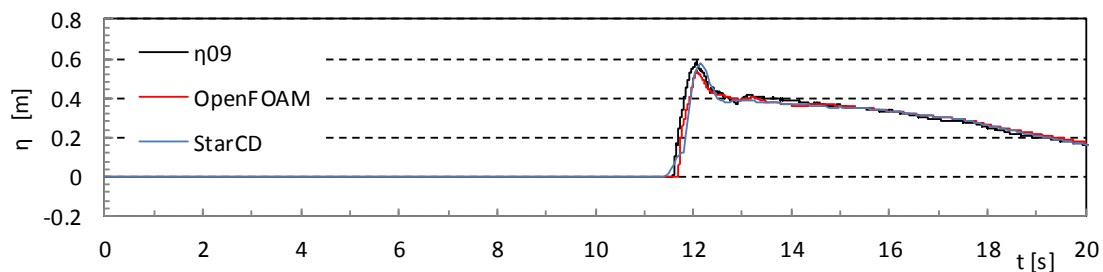


図- 8.3.12 堤体前面水位の時系列比較 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m)

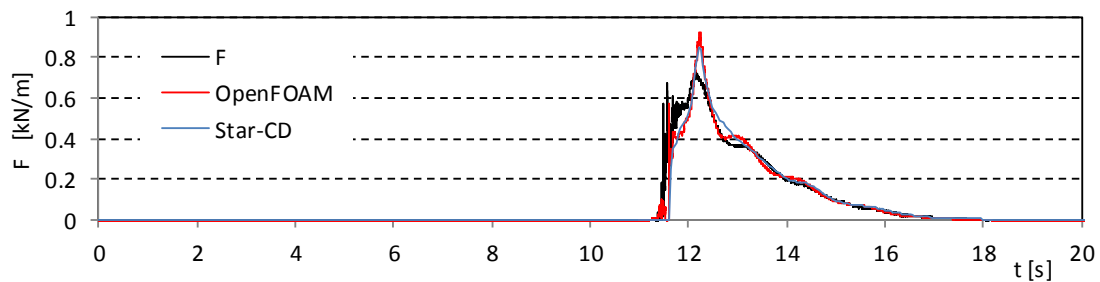
8.3.4. 波力/波圧試験の波力再現結果

波力/波圧試験に対する解析と水理試験の波力時系列結果の比較を、非越流 (TypeA) のケースについて図- 8.3.13～図- 8.3.16 に、越流 (TypeB) のケースについて図- 8.3.17～図- 8.3.20 に示す。ここで解析結果の波力は、数値解析において水理試験の圧力計測位置と同じ位置での圧力を時系列で算出し、水理試験と同じ手法で波圧を積分することにより求めている。通過波の水位・流速の結果と同様に、波力の立ち上がりに若干の遅れがあるものの、STAR-CD, OpenFOAM ともに試験結果を精度良く再現していることが分かる。ただし、段波波力については、一部のケースで十分に再現できていない。これらのケースは、砕波しながら堤体に水塊が衝突しているケースであり、巻き波状態で砕波しながら堤体に衝突する際には、数値解析の再現精度に課題があることが分かる。これらの再現精度を向上するには、解析格子をより詳細にした解析が有効と考えられる。

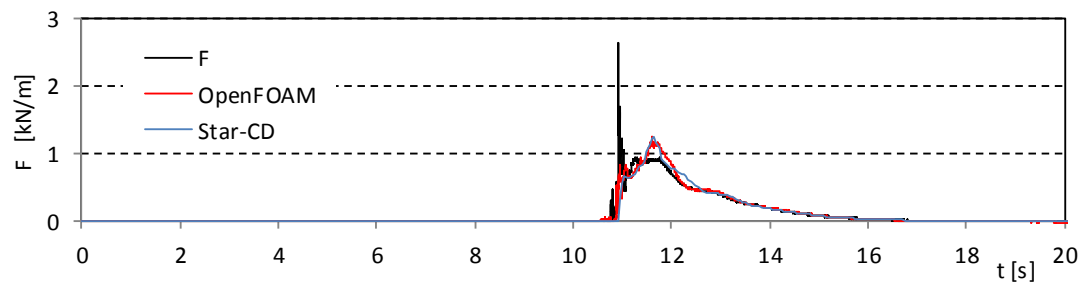
非越流と越流のケースを比較すると、同じ入射波ケースに対しては同程度の精度で波力を再現していることが分かる。このことから、堤体の越流現象については数値解析により精度良く再現できていると考えられる。

図- 8.3.21～図- 8.3.28 に、解析結果の圧力鉛直分布を示す。持続波圧については、圧力は直線分布となっており、その傾きは静水圧と同等かそれよりも鉛直方向に対して小さく、水理試験と同じ結果になっている。また、段波波圧についても、圧力が底面付近に集中しており、水理試験と同じ結果となっている。ただし、砕波しながら堤体に水塊が衝突するケース（例えば、単純勾配, 0m, Wc22）では、水理試験結果において水底よりも少し上の位置に大きな水圧が生じているのに対し、解析結果においても同様に水底よりも上で水圧が大きくなっているが、その大きさが水理試験結果よりも小さい。このことから、砕波現象自体は数値解析により再現出来ているが、その定量的な再現精度に課題があり、これは前述したように、解析格子の影響を大きく受けると考えられる。

Wc11



Wc12



Wc13

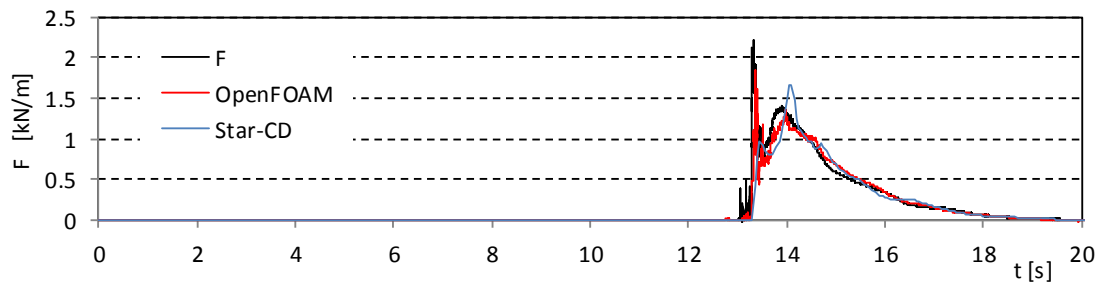
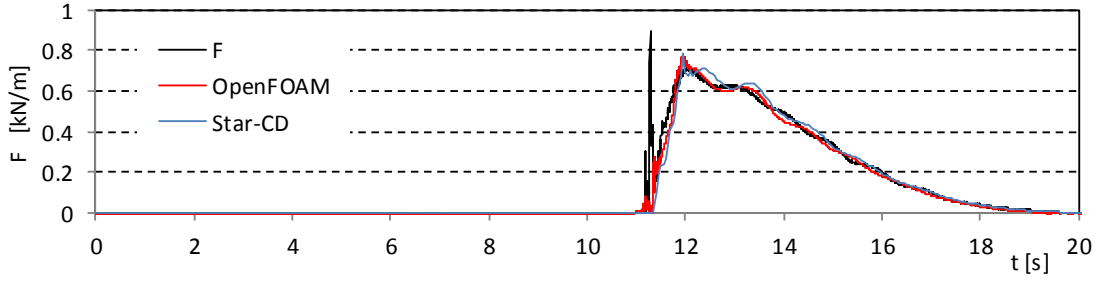
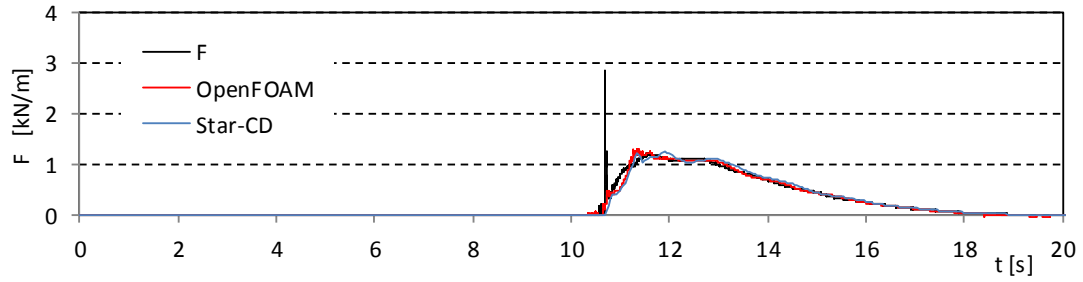


図- 8.3.13 波力時系列の比較 (単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0m)

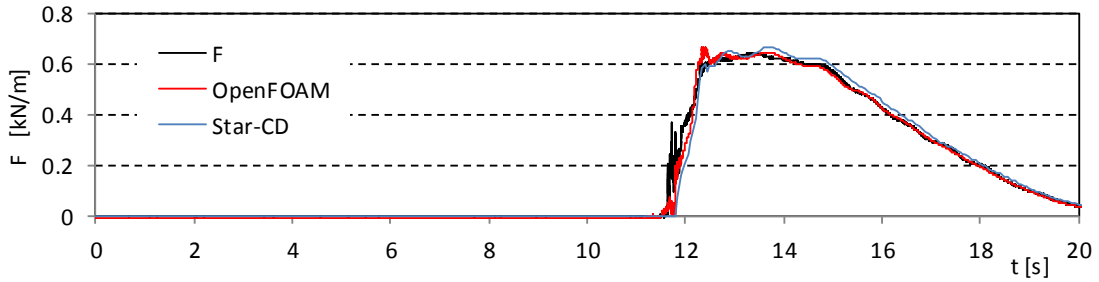
Wc21



Wc22



Wc31



Wc32

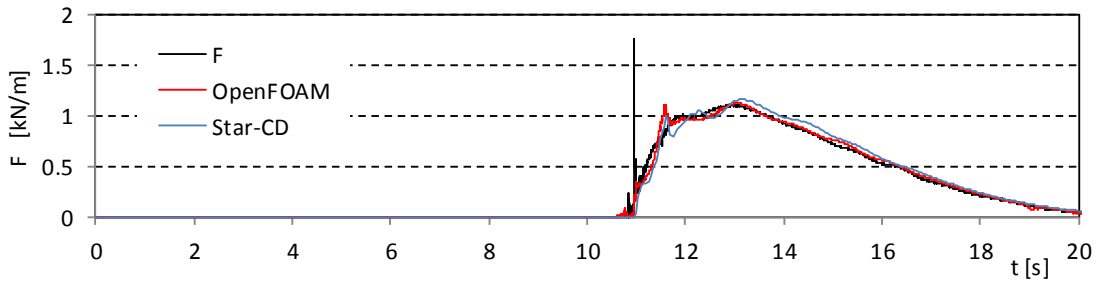
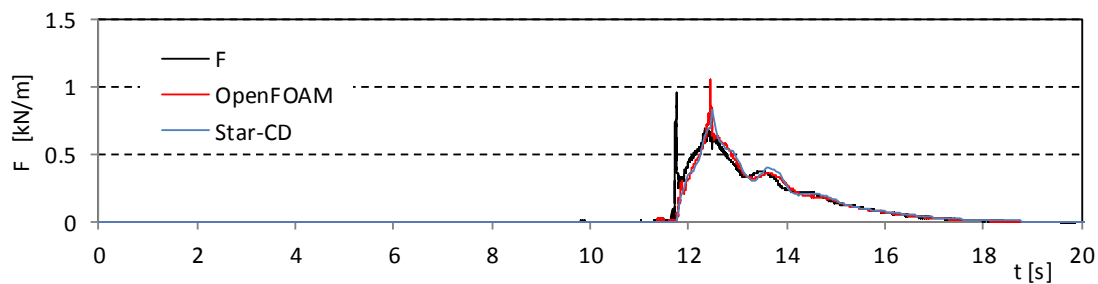
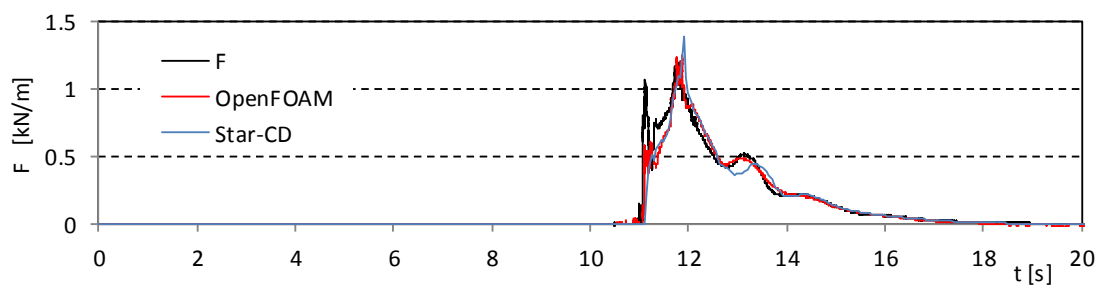


図- 8.3.13 波力時系列の比較 (単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0m)

Wc11



Wc12



Wc13

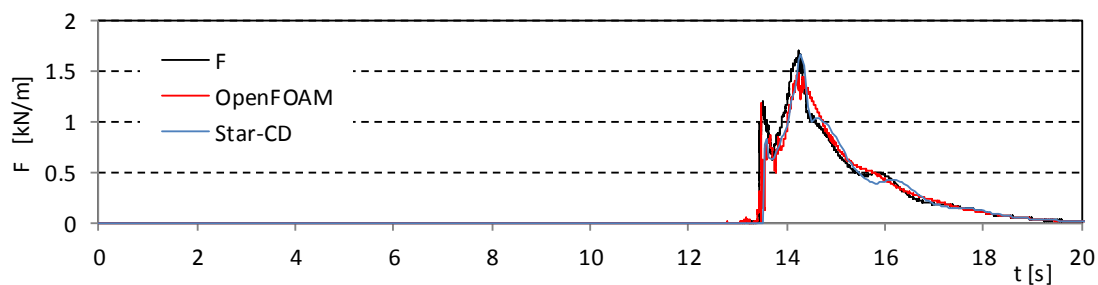
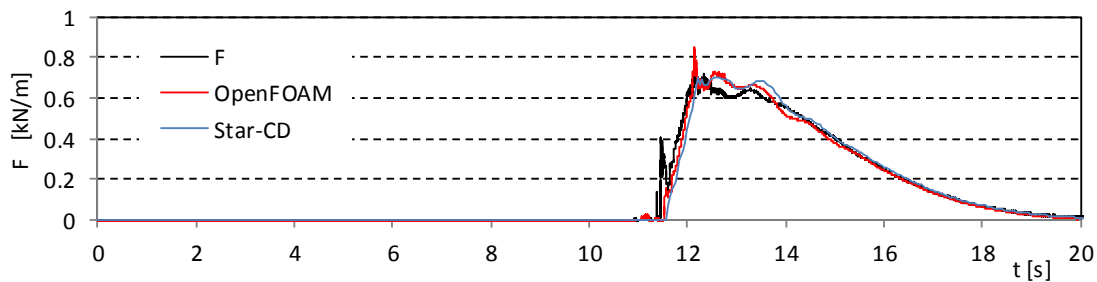
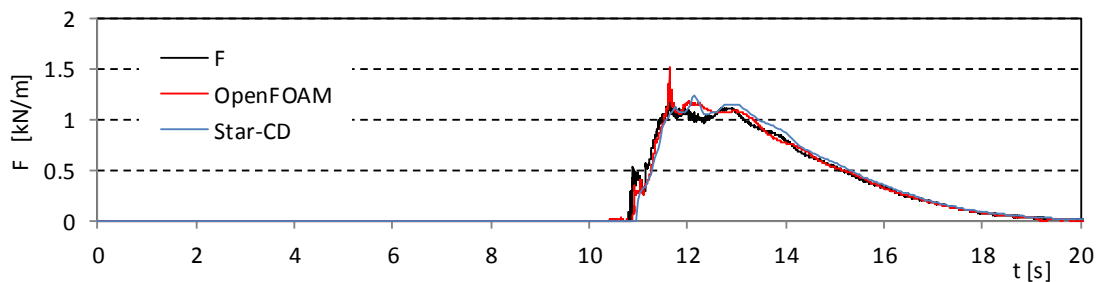


図- 8.3.14 波力時系列の比較 (単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m)

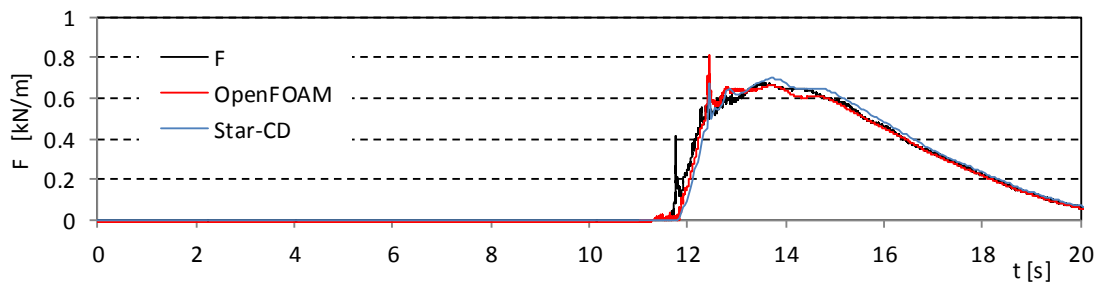
Wc21



Wc22



Wc31



Wc32

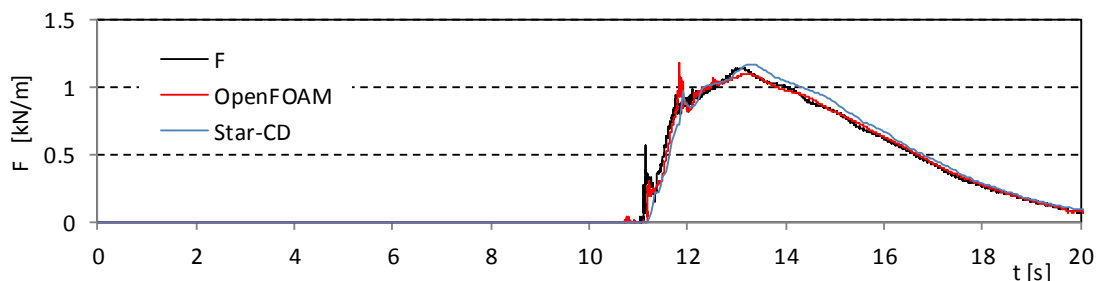
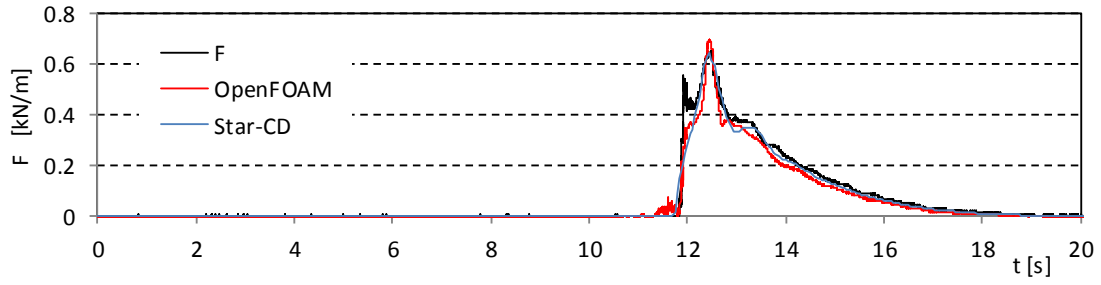
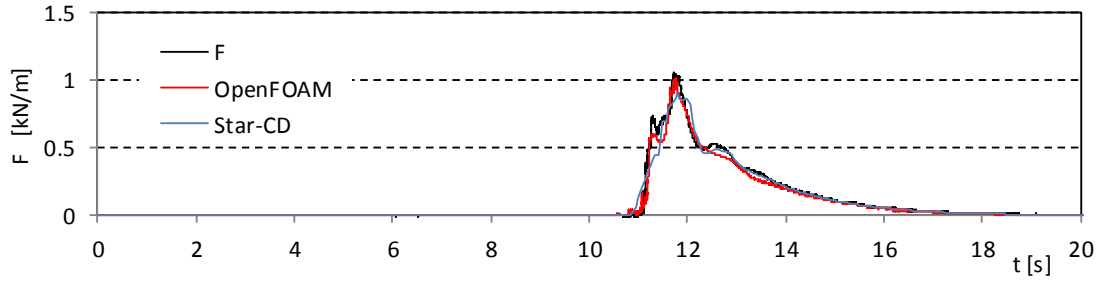


図- 8.3.14 波力時系列の比較 (単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m)

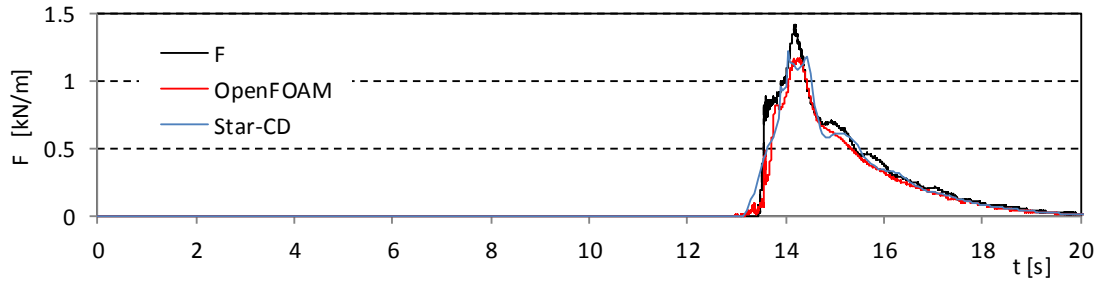
Wc11



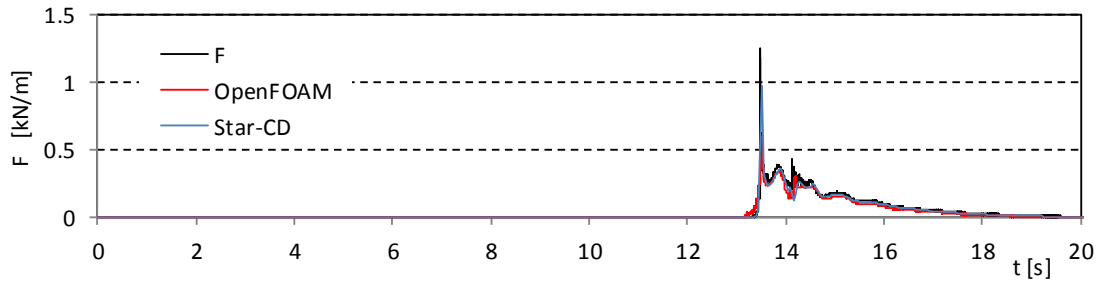
Wc12



Wc13



Wc14



Wc15

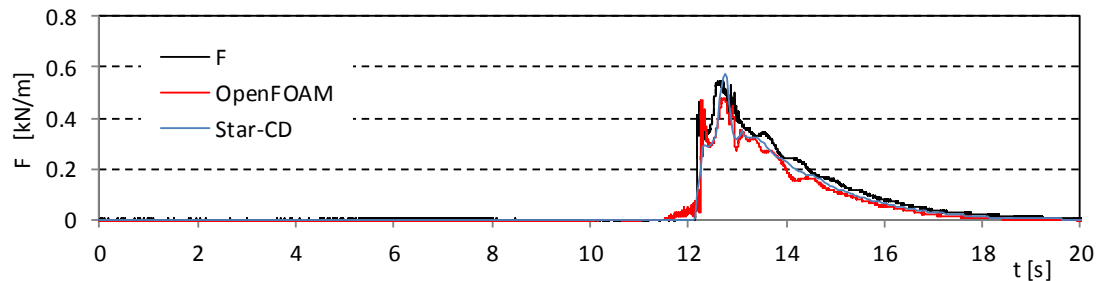
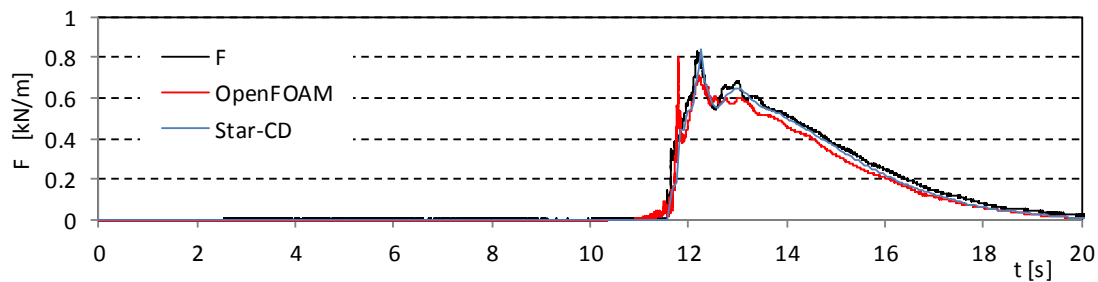
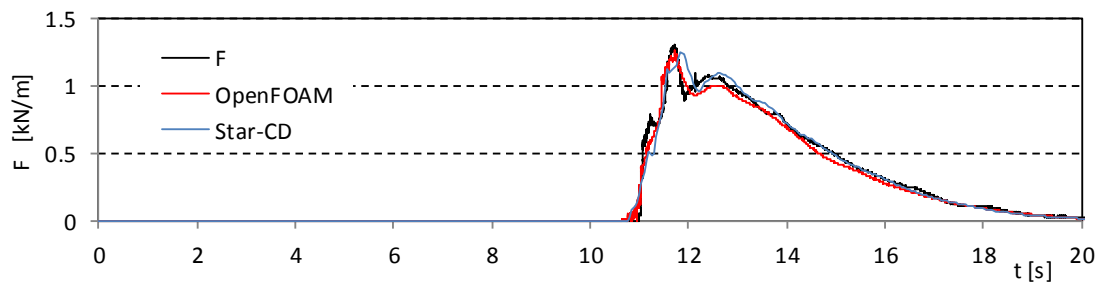


図- 8.3.15 波力時系列の比較 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0m)

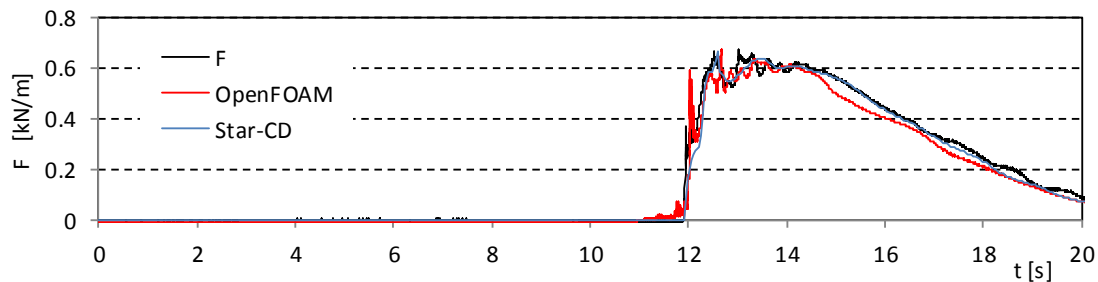
Wc21



Wc22



Wc31



Wc32

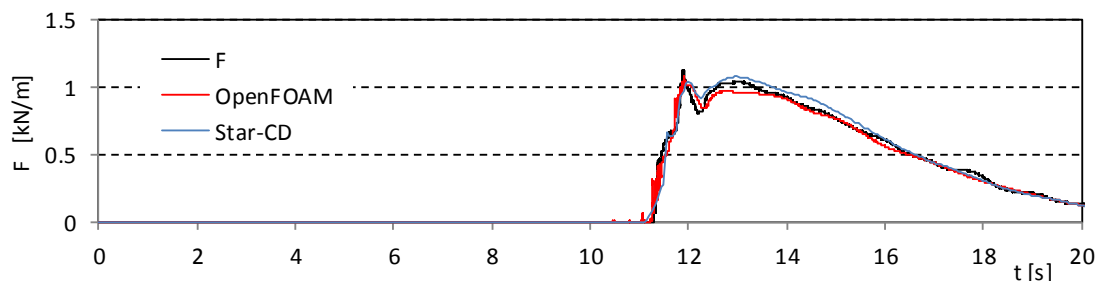
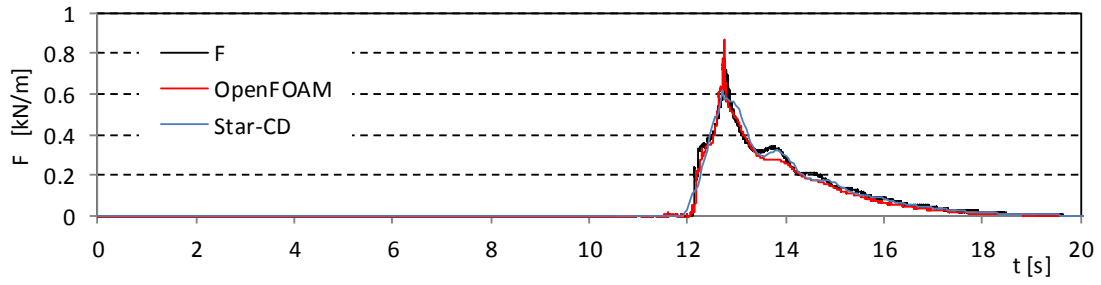
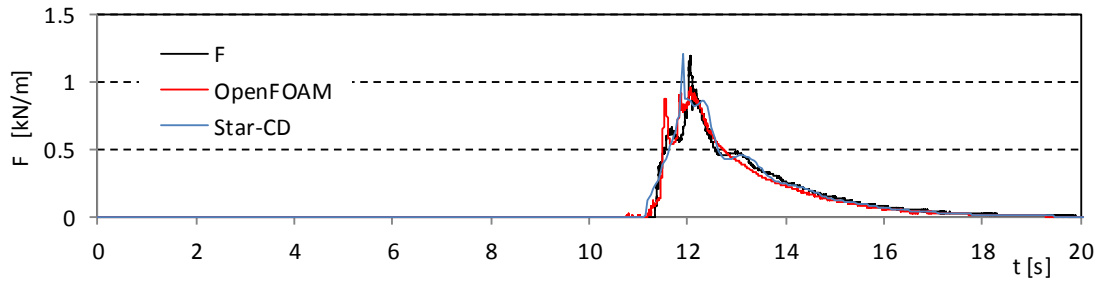


図- 8.3.15 波力時系列の比較 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0m)

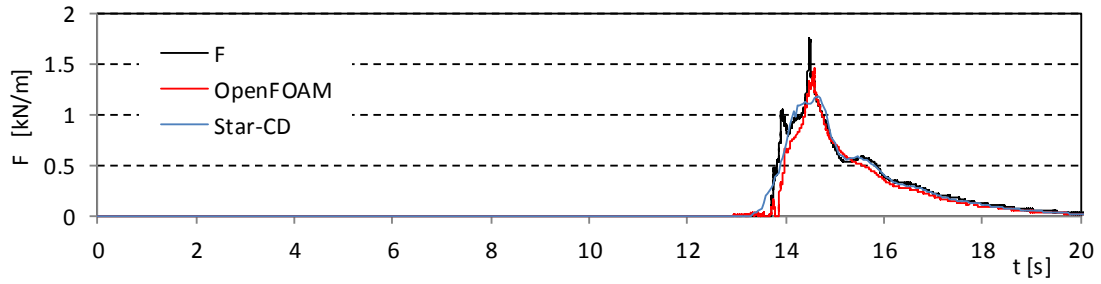
Wc11



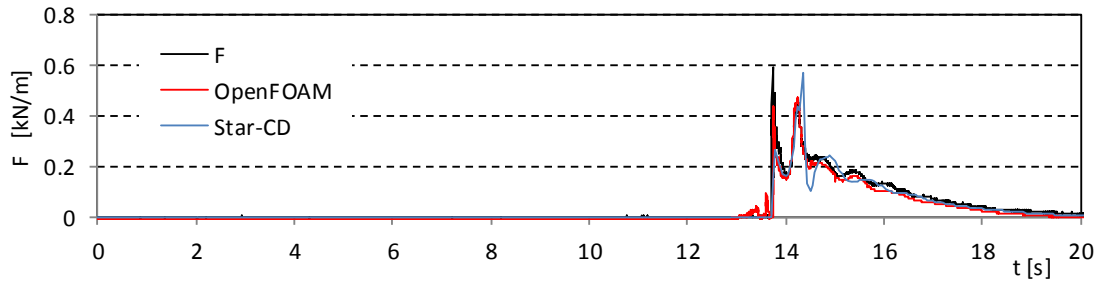
Wc12



Wc13



Wc14



Wc15

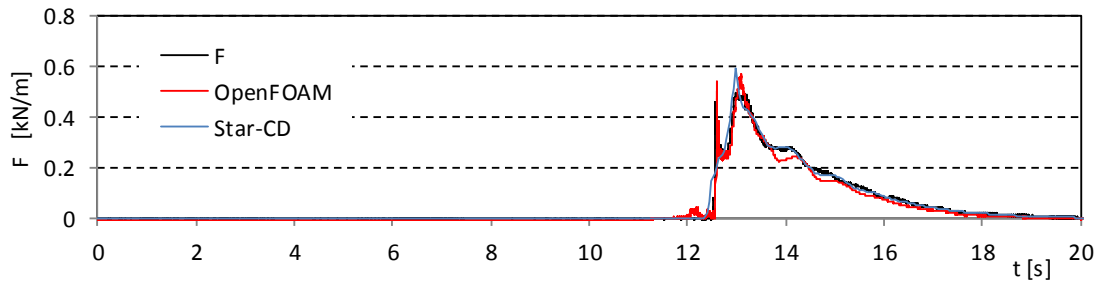
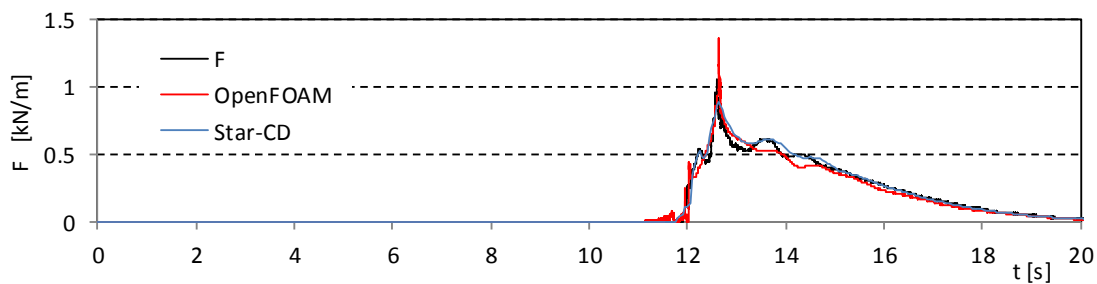
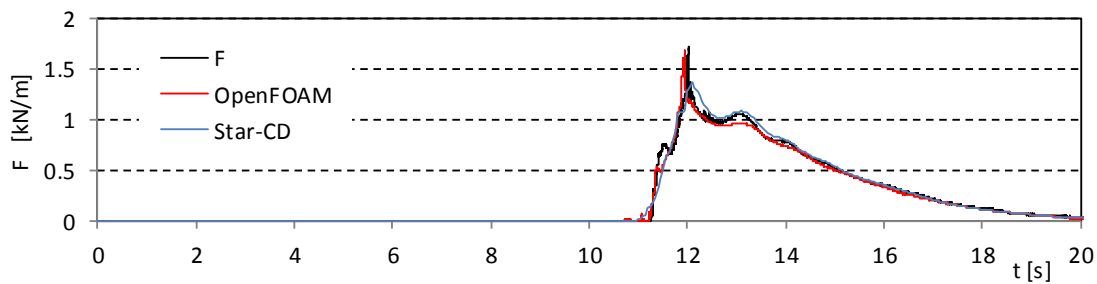


図- 8.3.16 波力時系列の比較 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m)

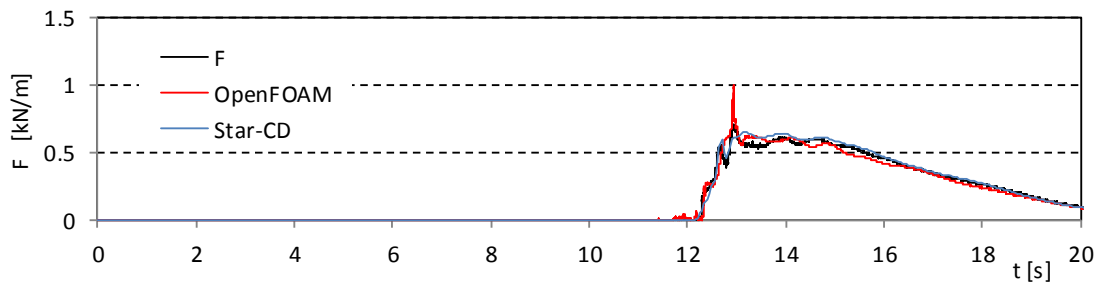
Wc21



Wc22



Wc31



Wc32

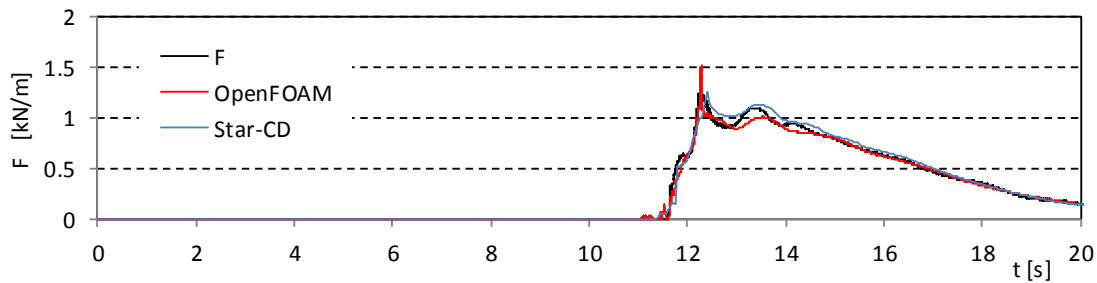
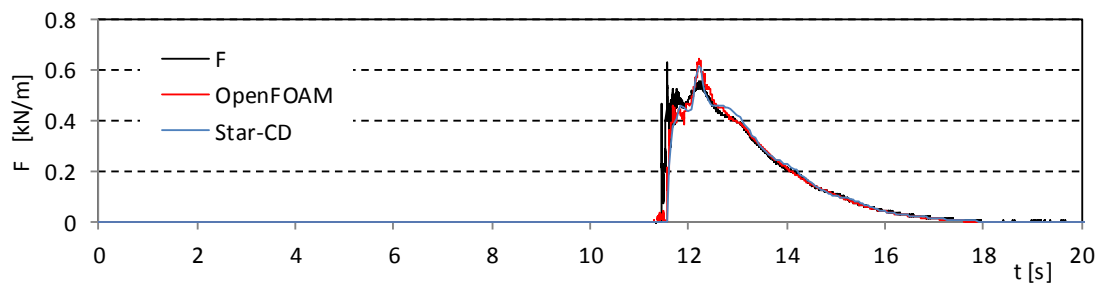
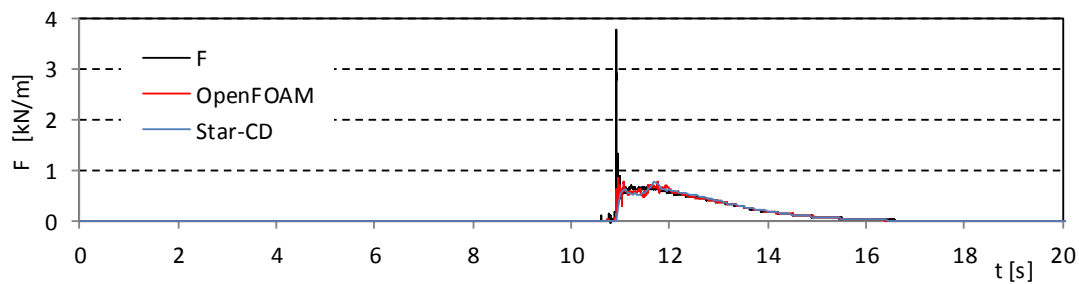


図- 8.3.16 波力時系列の比較 (直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m)

Wc11



Wc12



Wc13

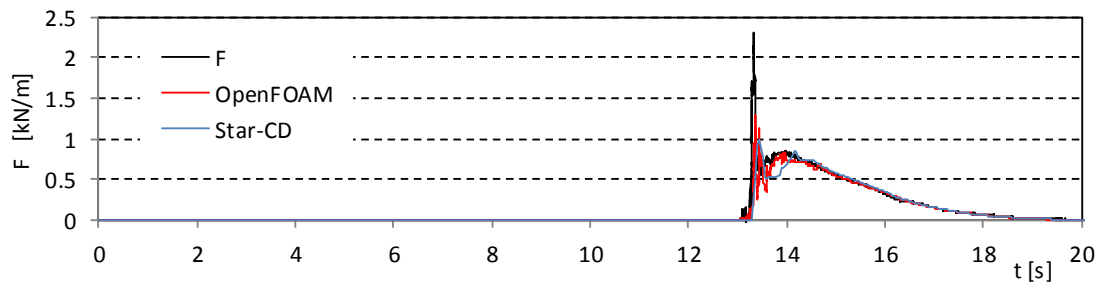
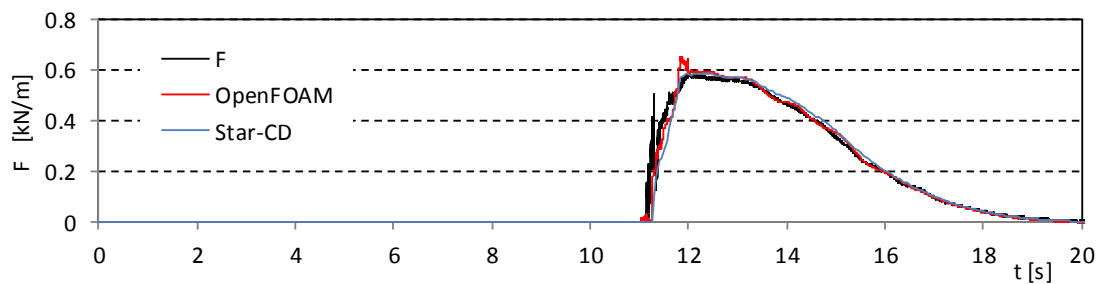
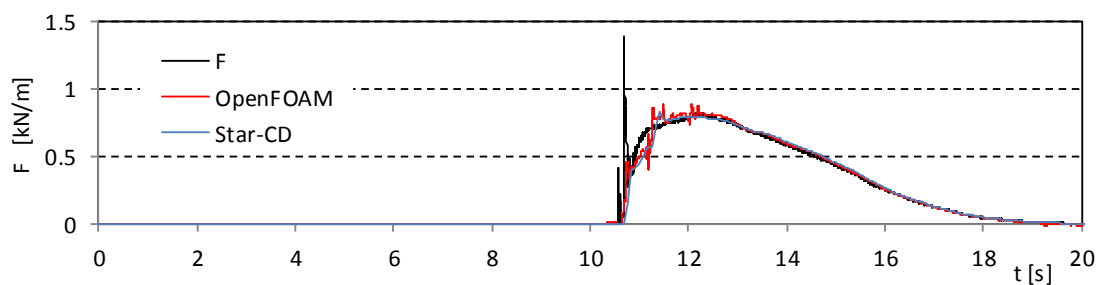


図- 8.3.17 波力時系列の比較 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0m)

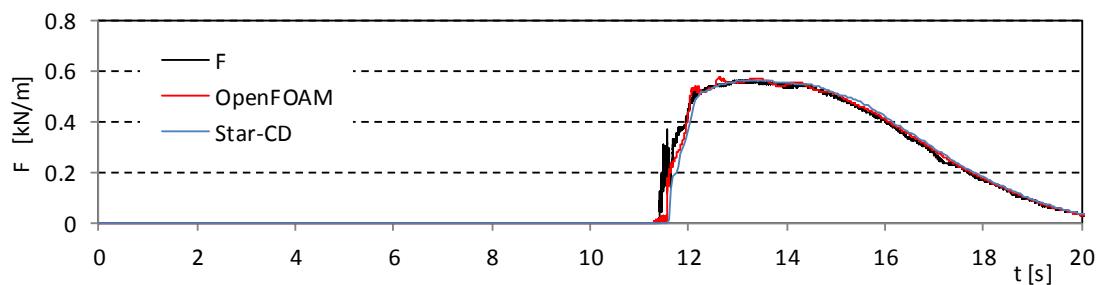
Wc21



Wc22



Wc31



Wc32

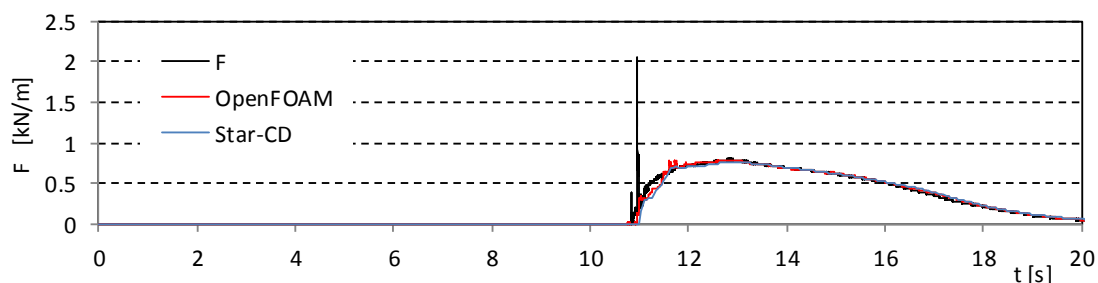
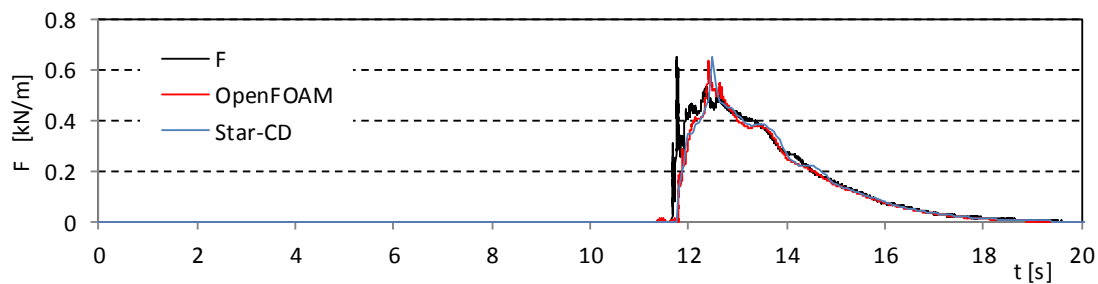
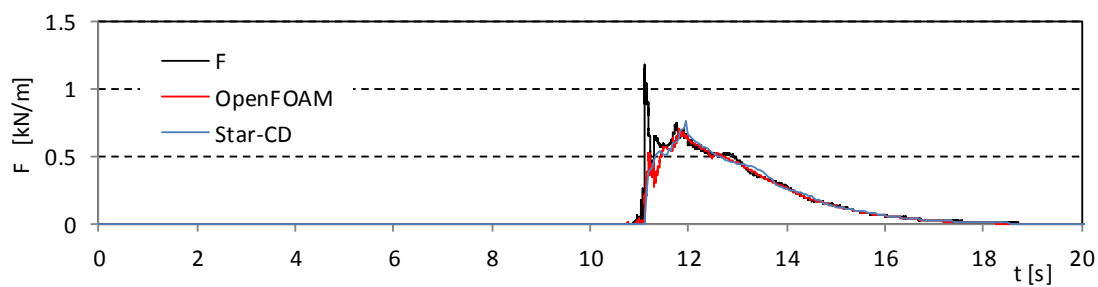


図- 8.3.17 波力時系列の比較 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0m)

Wc11



Wc12



Wc13

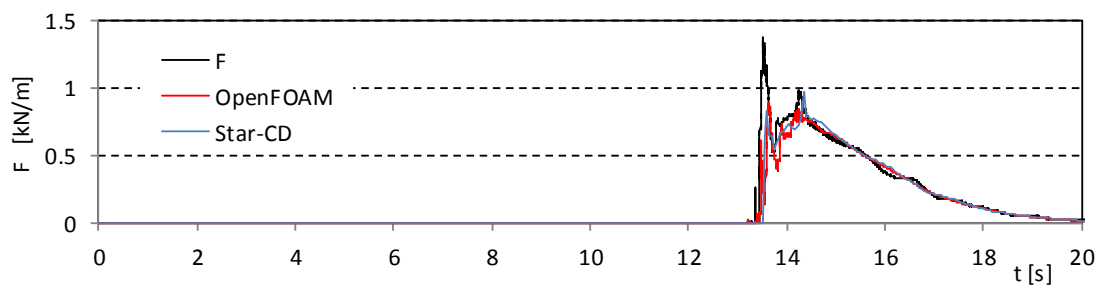
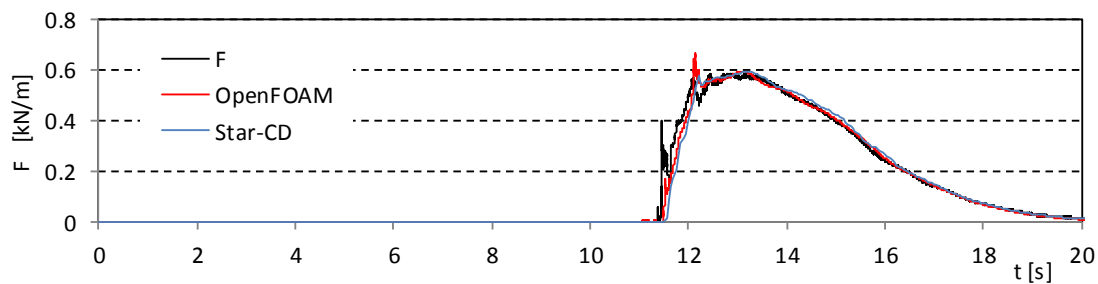
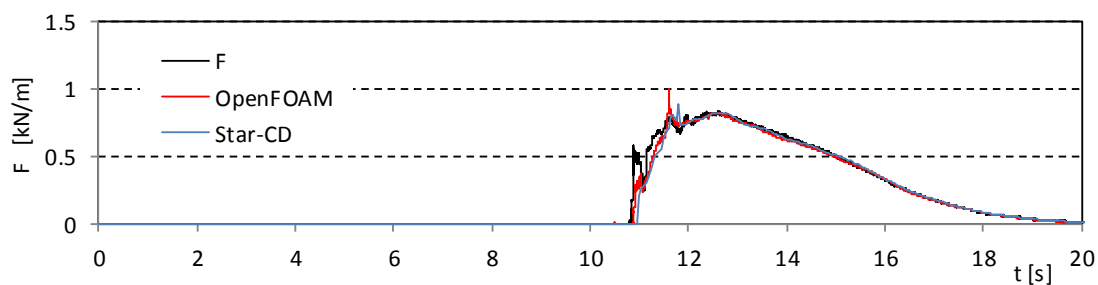


図- 8.3.18 波力時系列の比較 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m)

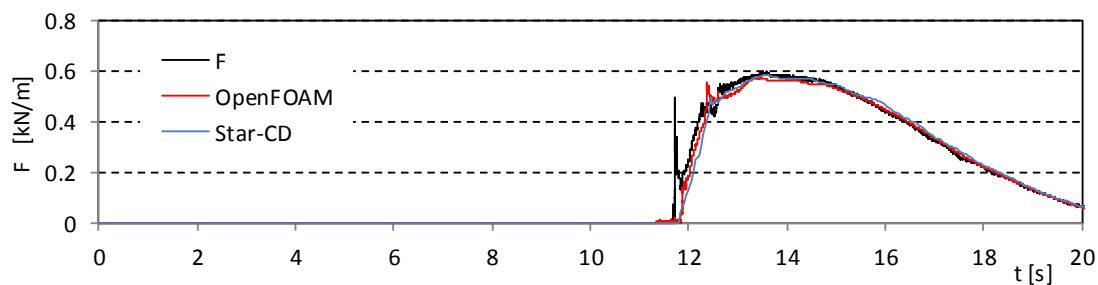
Wc21



Wc22



Wc31



Wc32

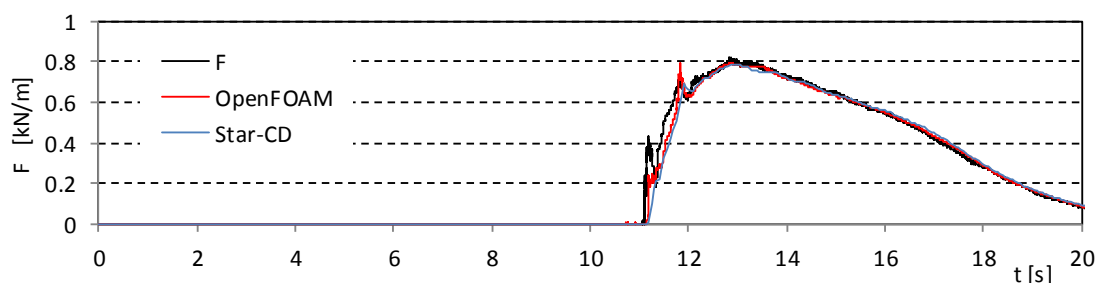


図- 8.3.18 波力時系列の比較 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m)

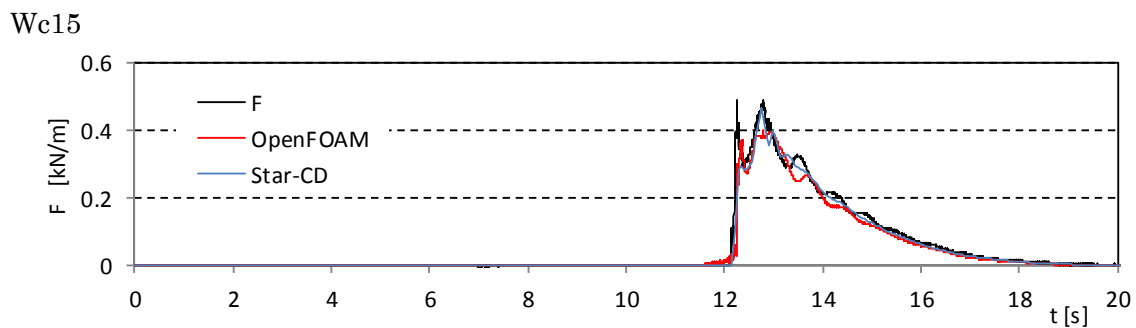
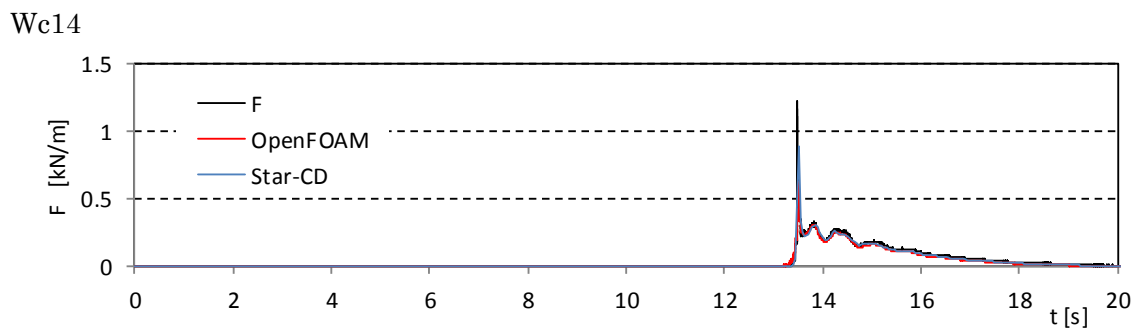
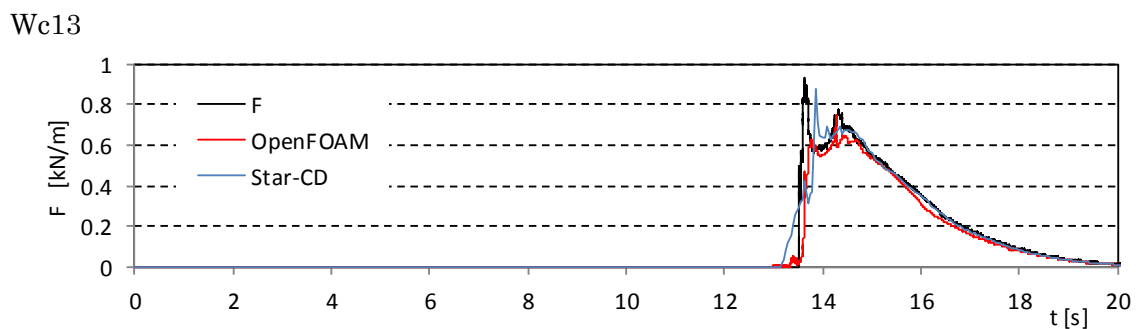
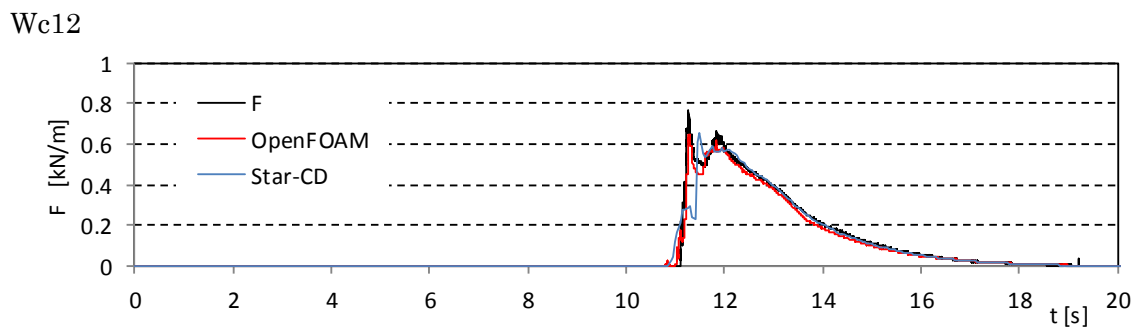
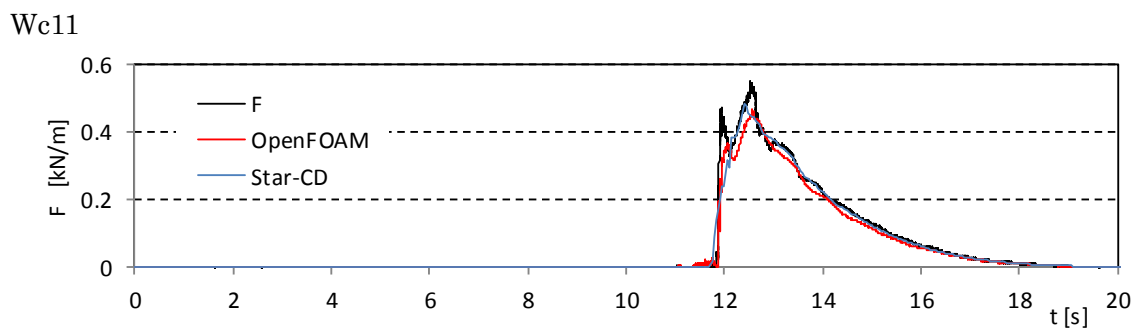


図- 8.3.19 波力時系列の比較 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0m)

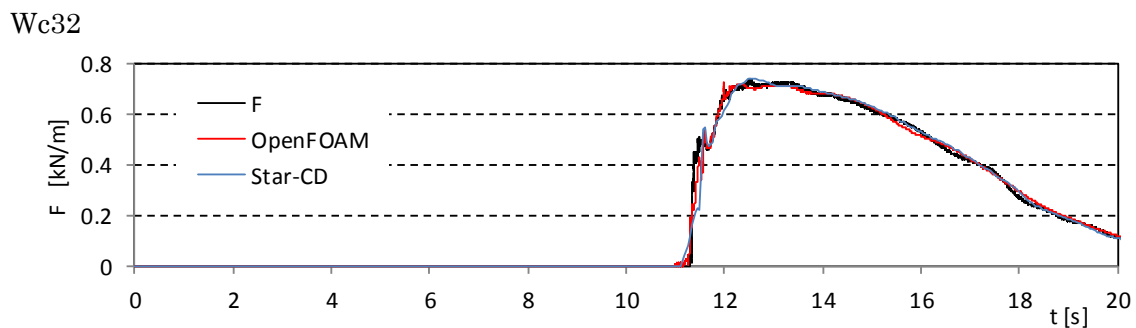
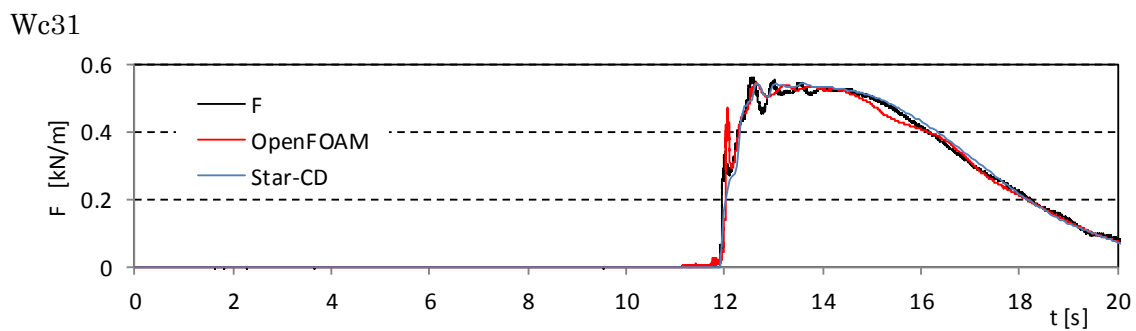
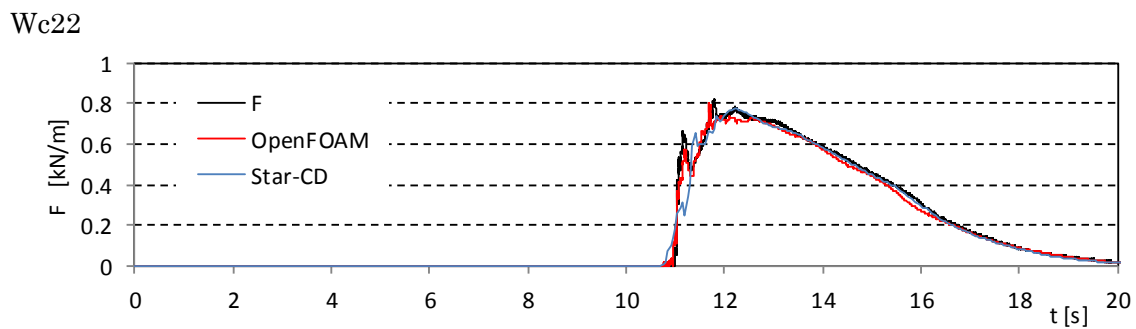
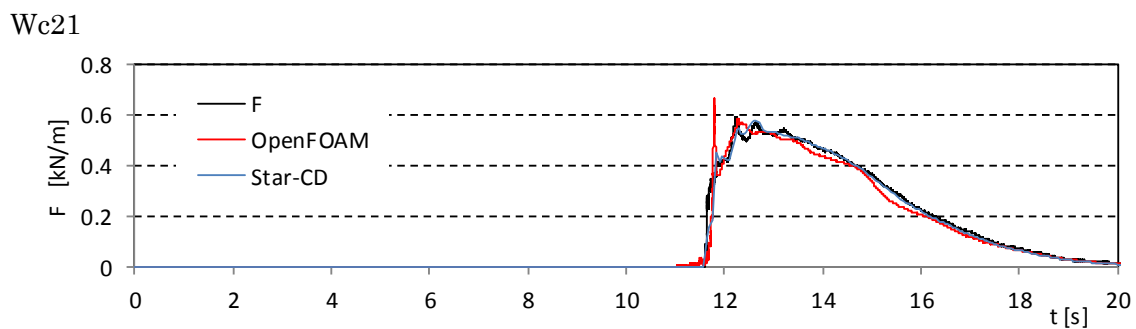
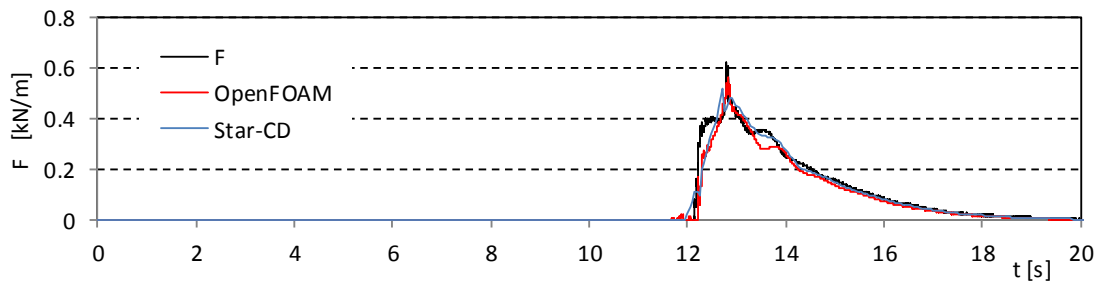
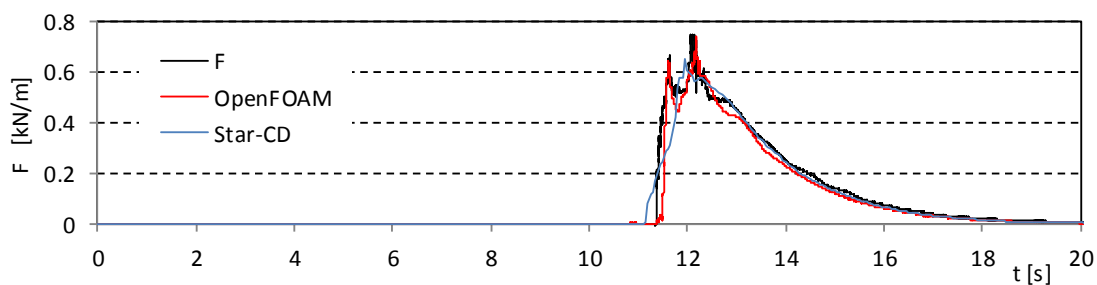


図- 8.3.19 波力時系列の比較 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0m)

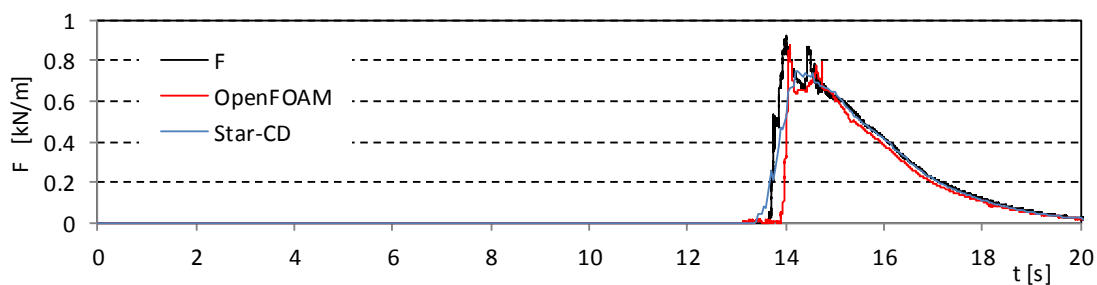
Wc11



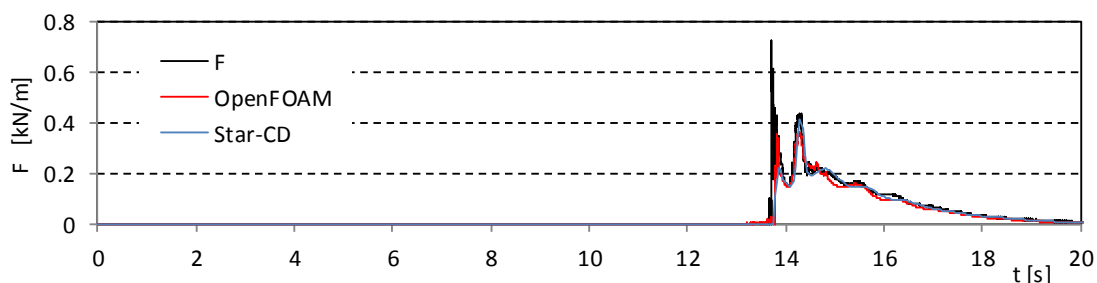
Wc12



Wc13



Wc14



Wc15

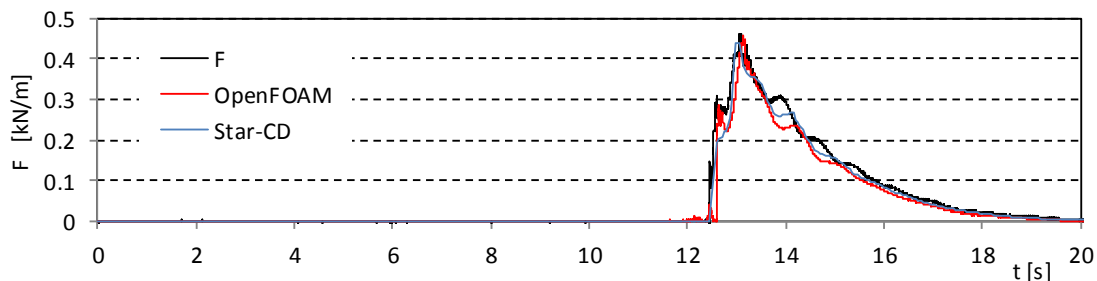
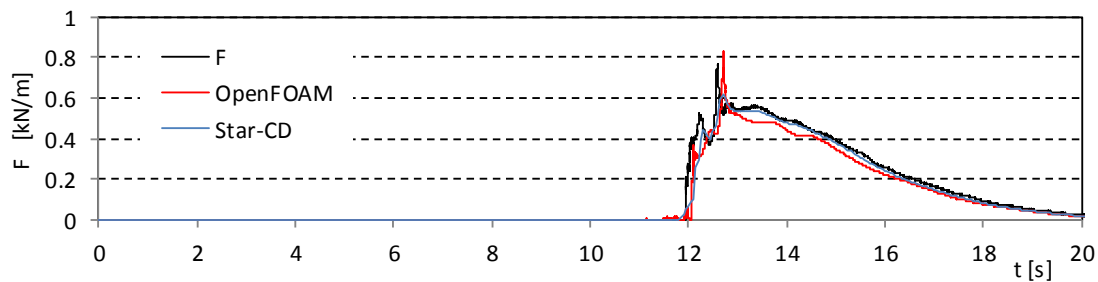
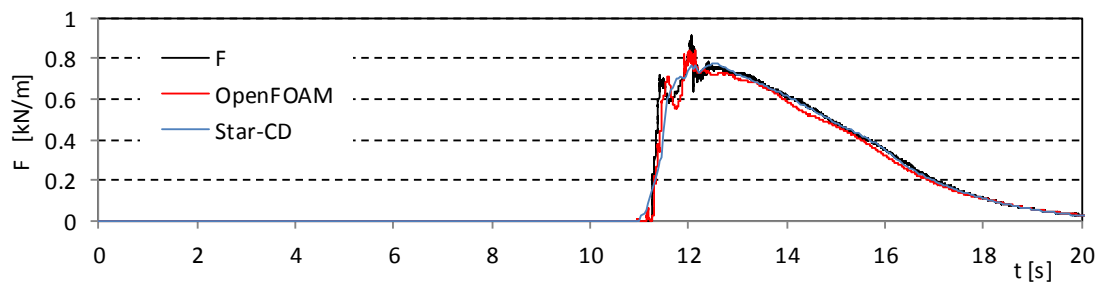


図- 8.3.20 波力時系列の比較 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m)

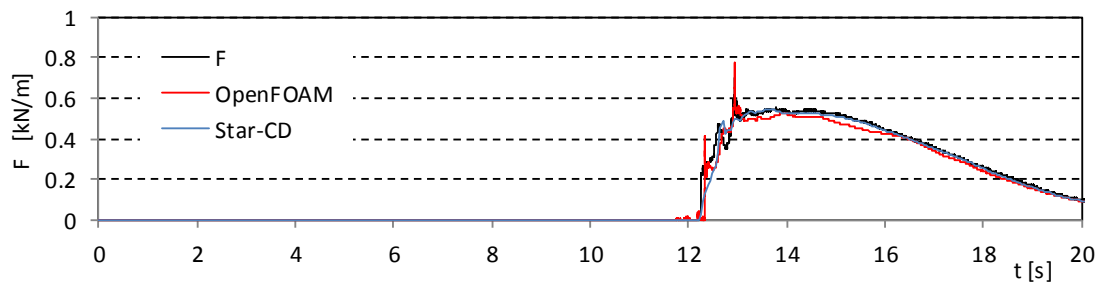
Wc21



Wc22



Wc31



Wc32

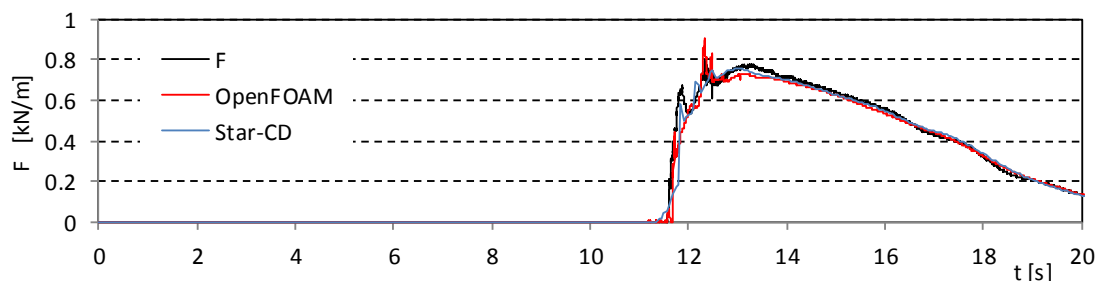
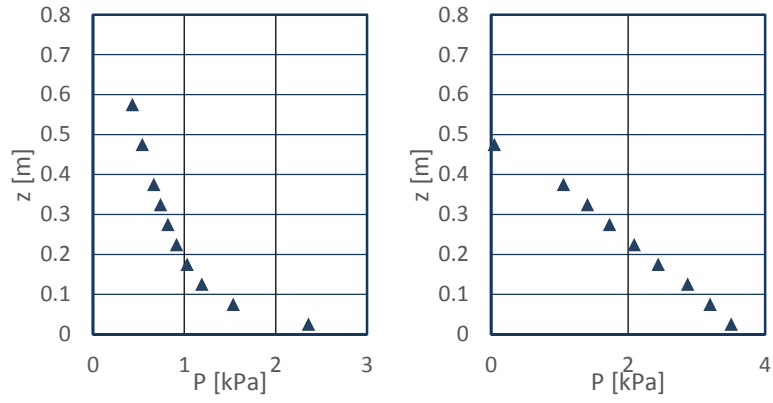
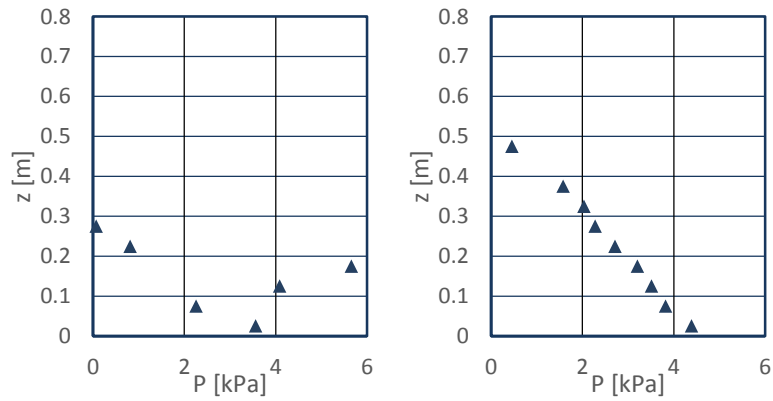


図- 8.3.20 波力時系列の比較 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m)

Wc11



Wc12



Wc13

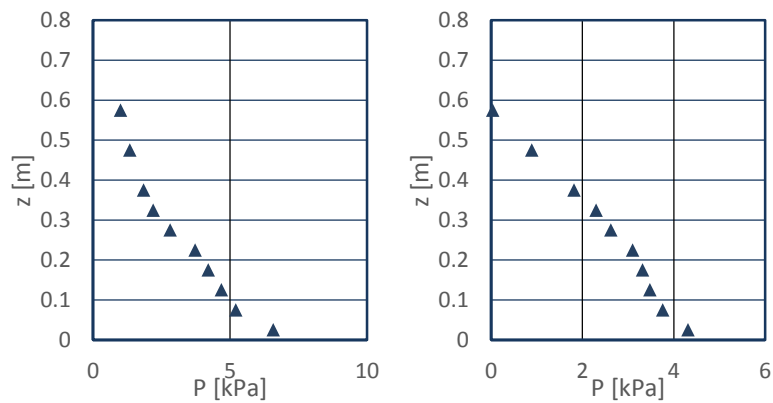
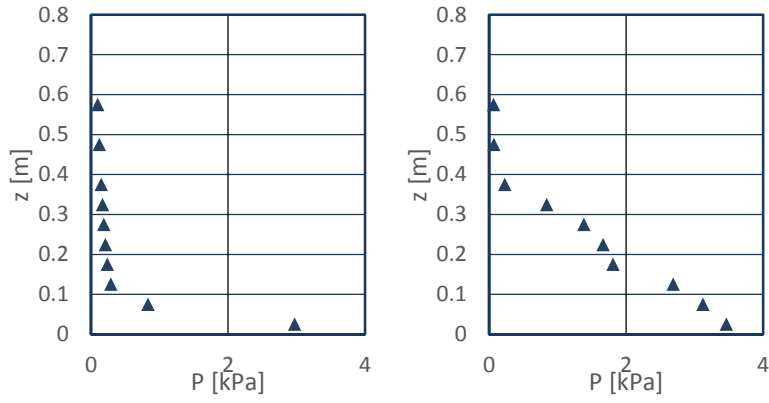
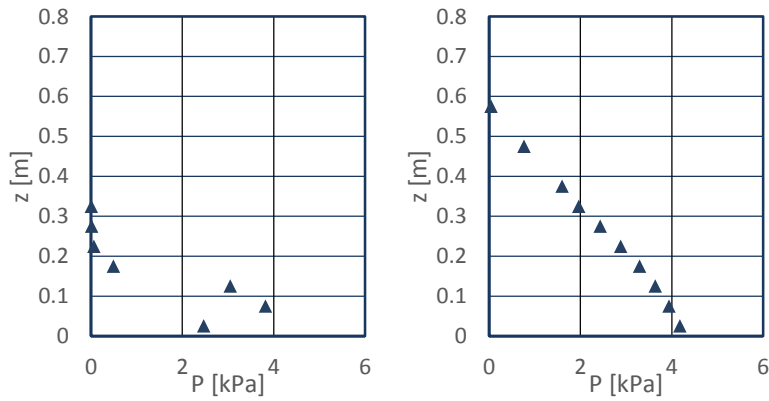


図- 8.3.21 数値解析 (OpenFOAM) による圧力の鉛直分布
(左 : 段波波圧, 右 : 持続波圧, 単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0m)

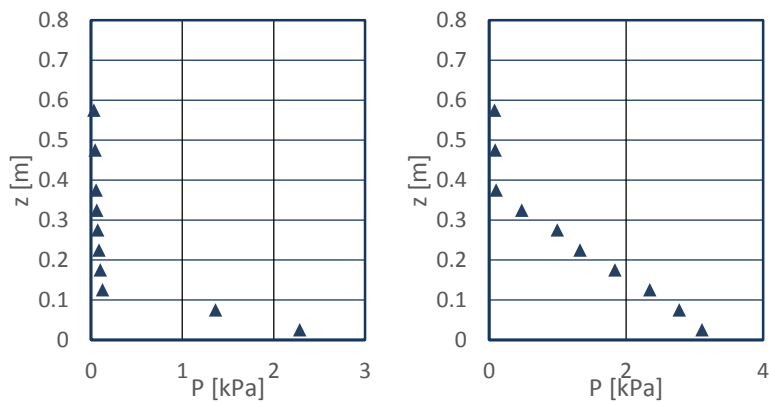
Wc21



Wc22



Wc31



Wc32

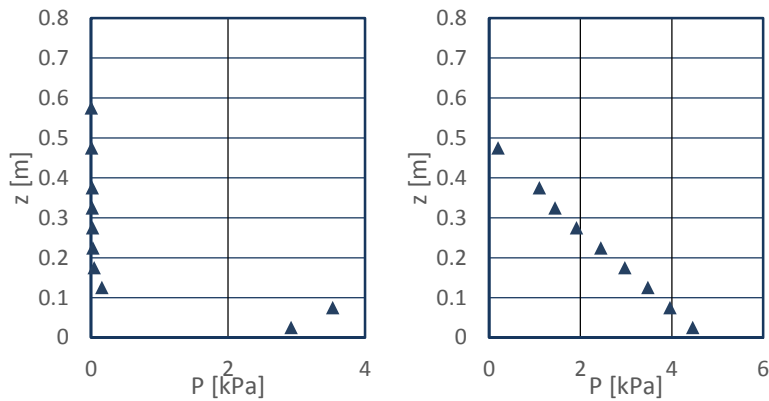
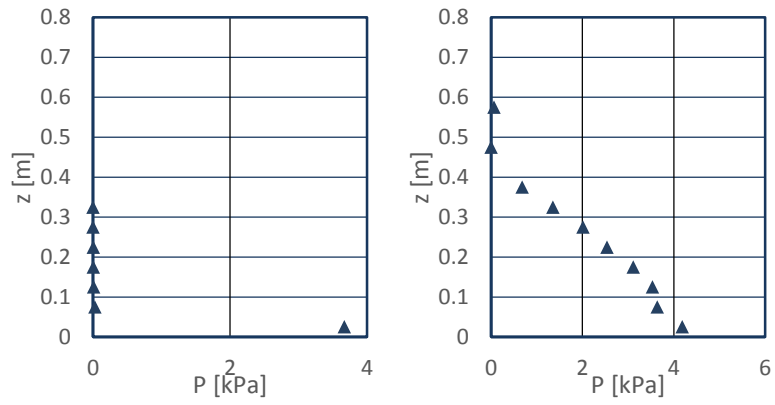
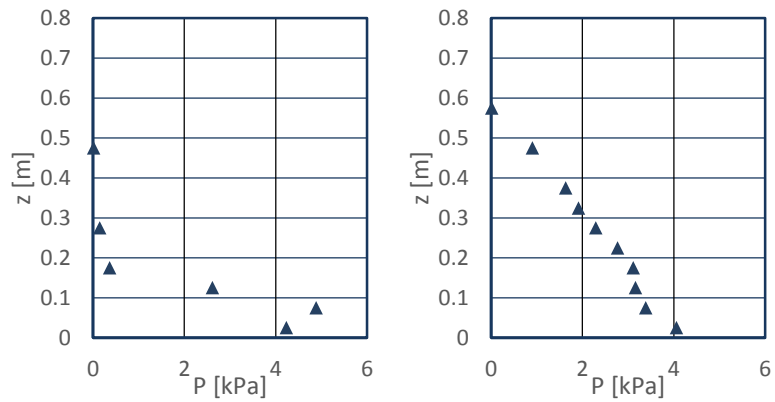


図- 8.3.21 数値解析 (OpenFOAM) による圧力の鉛直分布
(左: 段波波圧, 右: 持続波圧, 単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0m)

Wc11



Wc12



Wc13

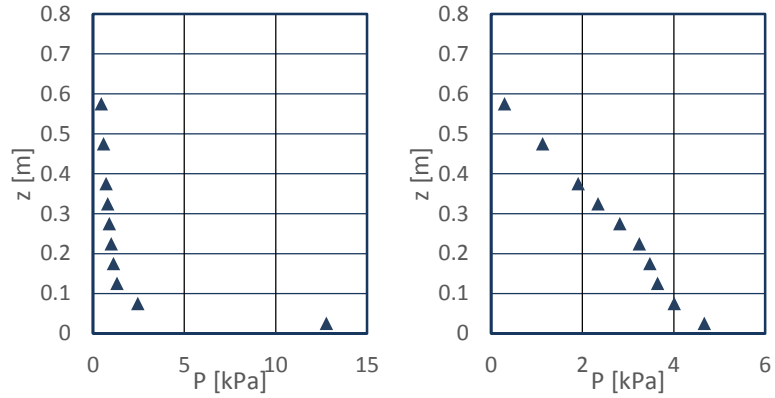
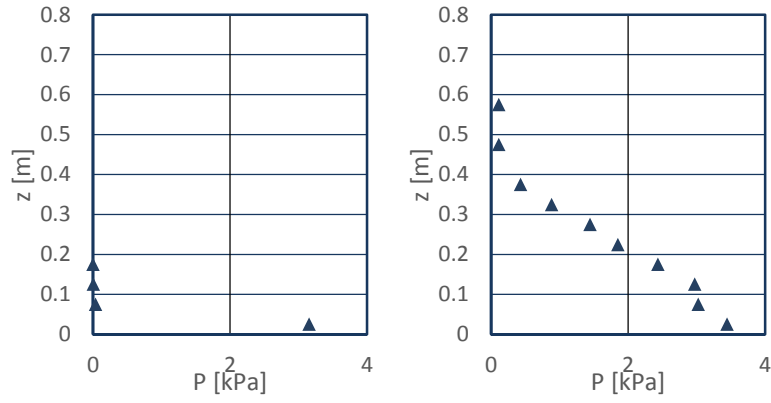
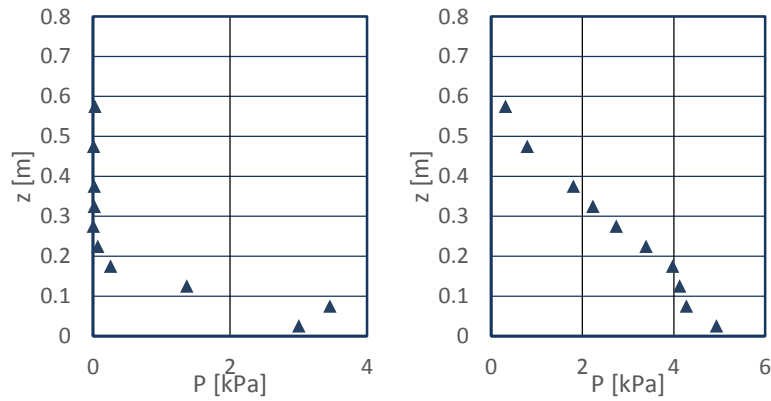


図- 8.3.22 数値解析 (OpenFOAM) による圧力の鉛直分布
(左 : 段波波圧, 右 : 持続波圧, 単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m)

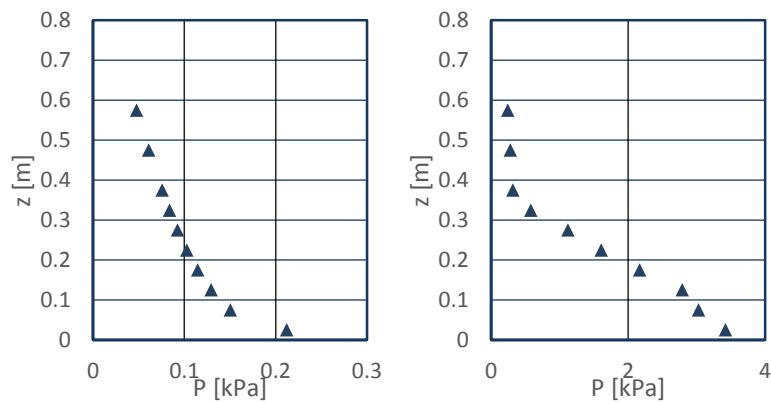
Wc21



Wc22



Wc31



Wc32

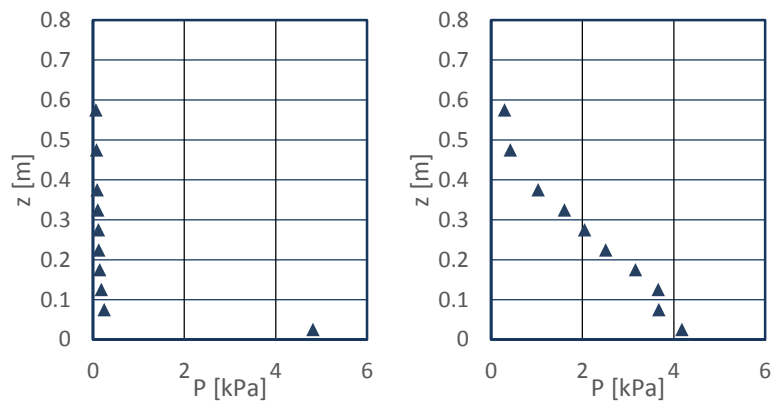
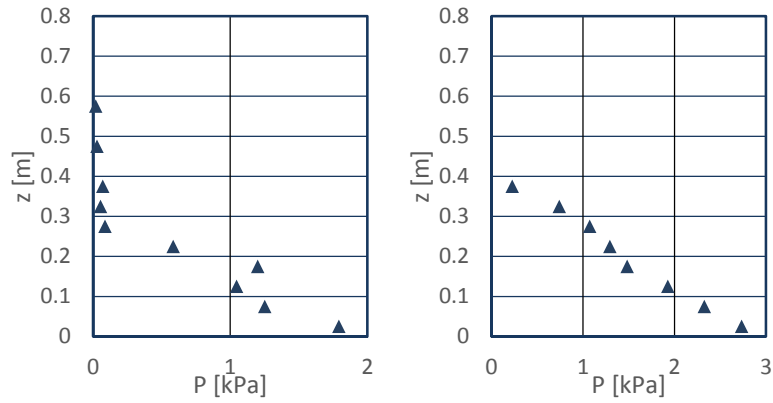
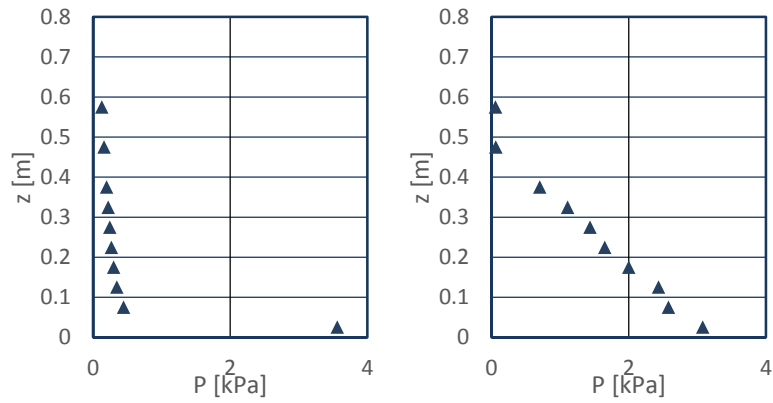


図- 8.3.22 数値解析 (OpenFOAM) による圧力の鉛直分布
 (左 : 段波波圧, 右 : 持続波圧, 単純勾配, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m)

Wc11



Wc12



Wc13

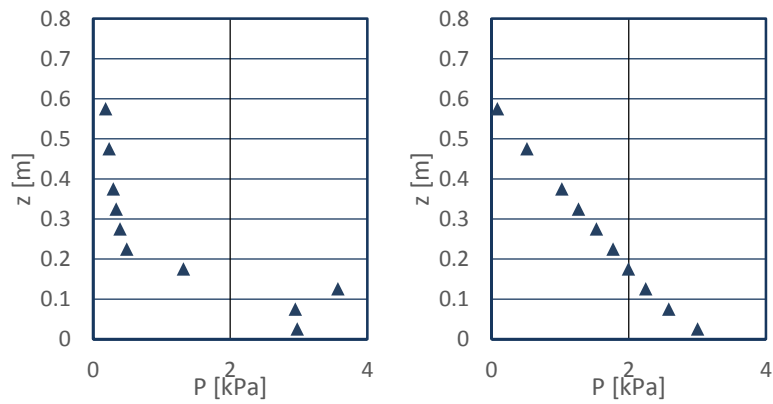
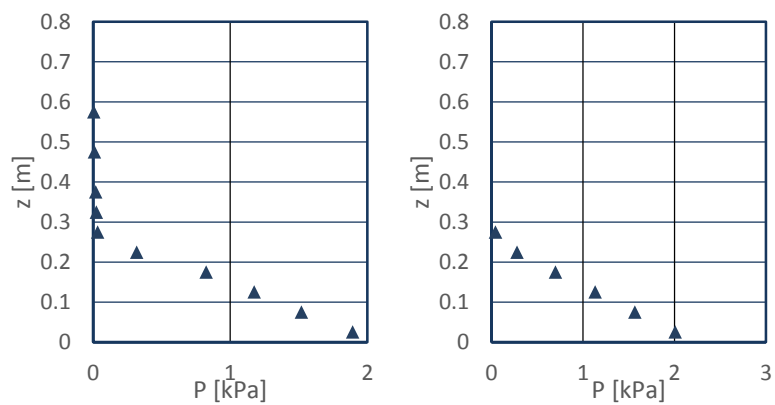


図- 8.3.23 数値解析 (OpenFOAM) による圧力の鉛直分布
(左 : 段波波圧, 右 : 持続波圧, 直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0m)

Wc14



Wc15

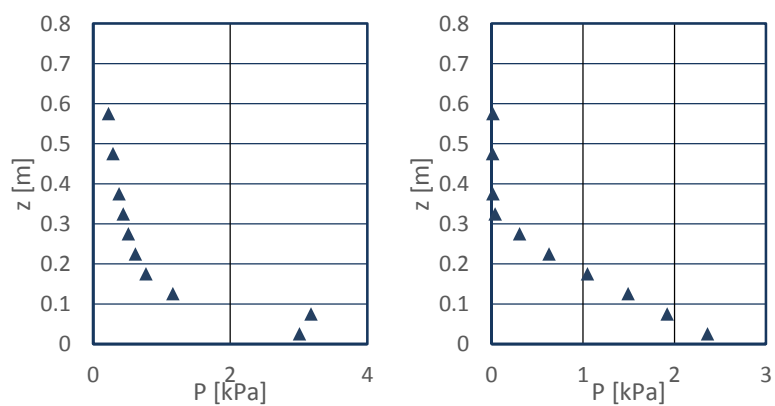
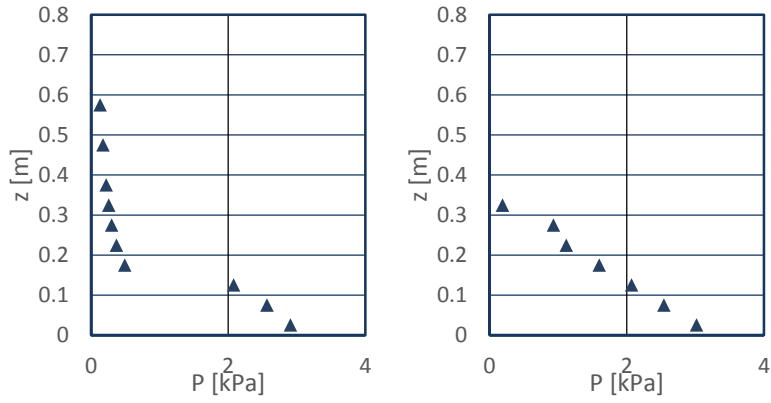
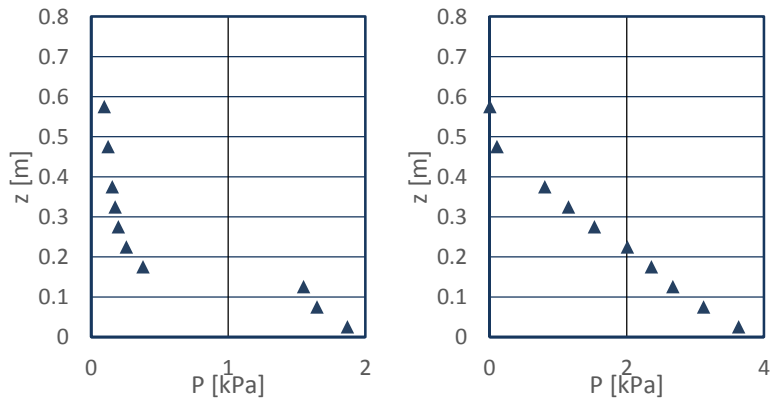


図- 8.3.23 数値解析 (OpenFOAM) による圧力の鉛直分布
(左 : 段波波圧, 右 : 持続波圧, 直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0m)

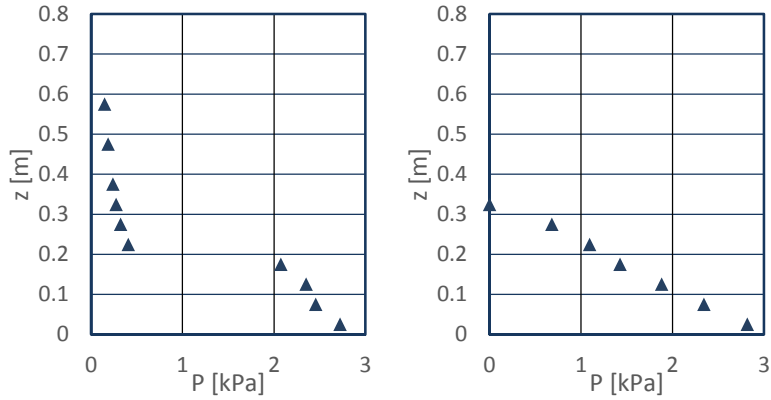
Wc21



Wc22



Wc31



Wc32

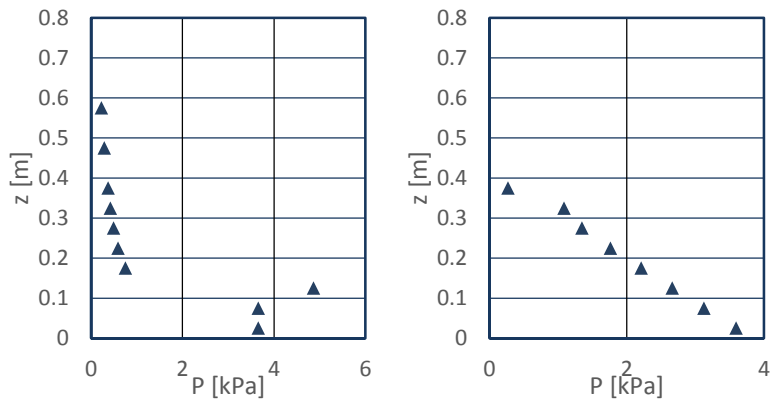
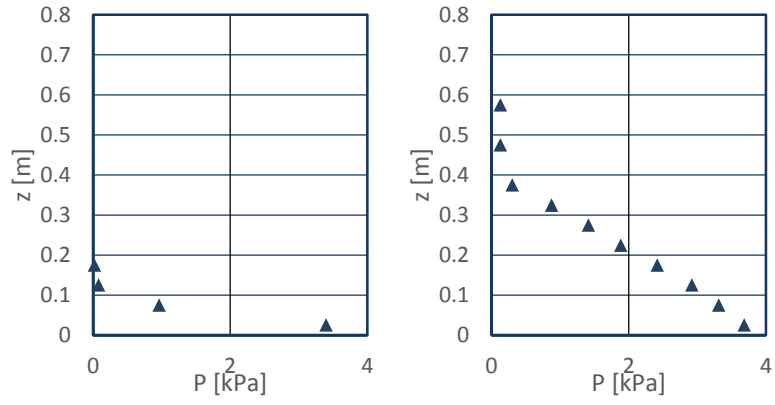
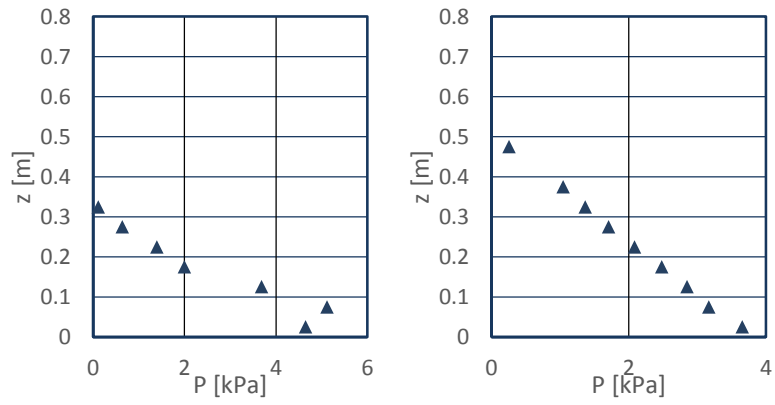


図- 8.3.23 数値解析 (OpenFOAM) による圧力の鉛直分布
(左 : 段波波圧, 右 : 持続波圧, 直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0m)

Wc11



Wc12



Wc13

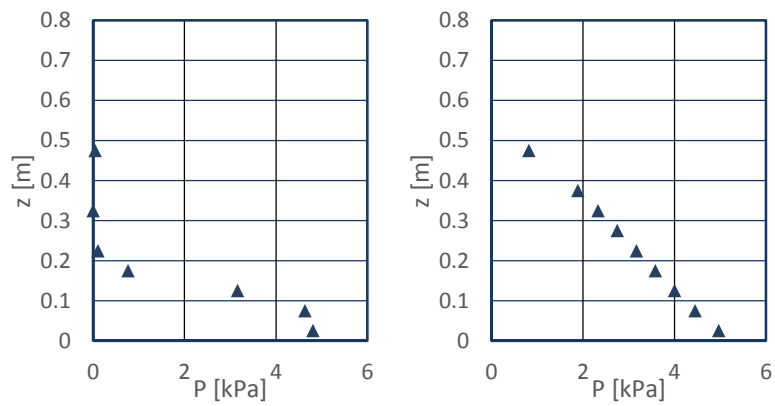
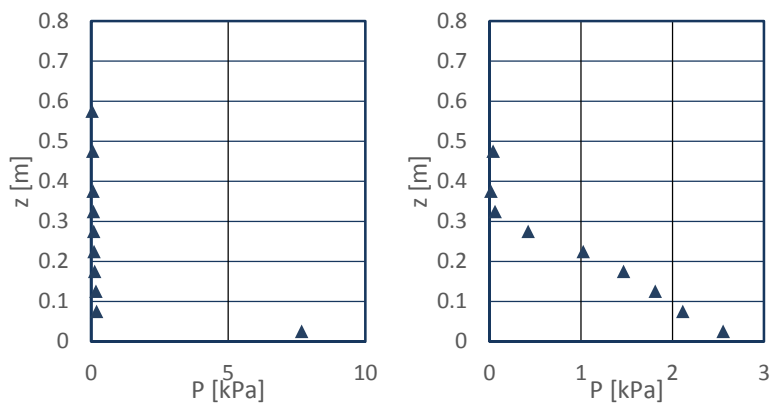


図- 8.3.24 数値解析 (OpenFOAM) による圧力の鉛直分布
(左 : 段波波圧, 右 : 持続波圧, 直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m)

Wc14



Wc15

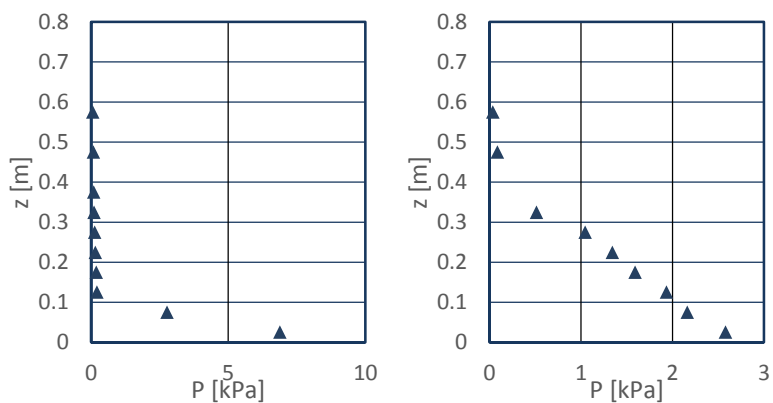
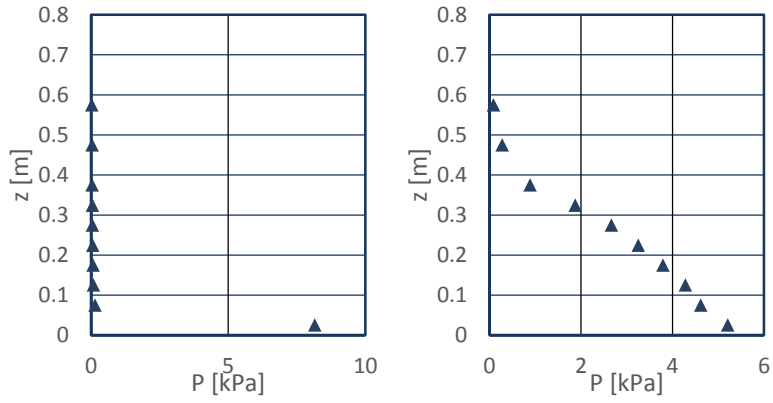
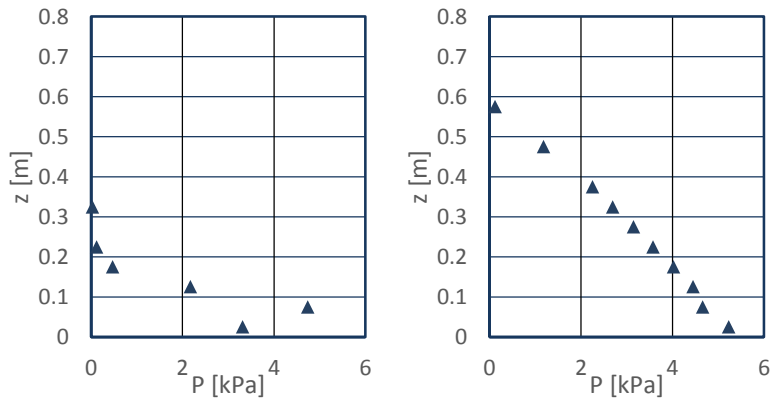


図- 8.3.24 数値解析 (OpenFOAM) による圧力の鉛直分布
(左: 段波波圧, 右: 持続波圧, 直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m)

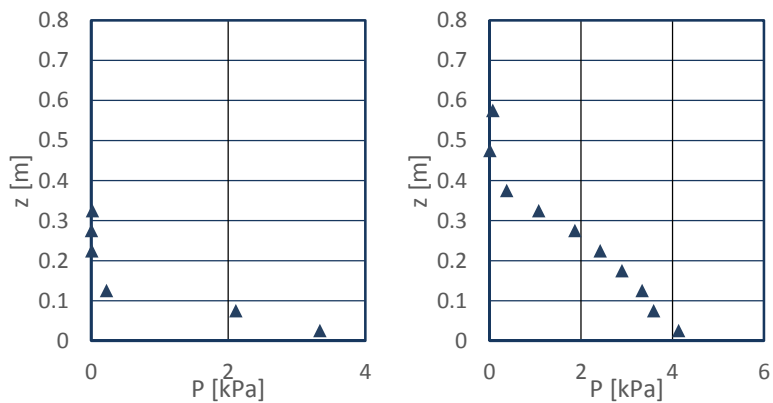
Wc21



Wc22



Wc31



Wc32

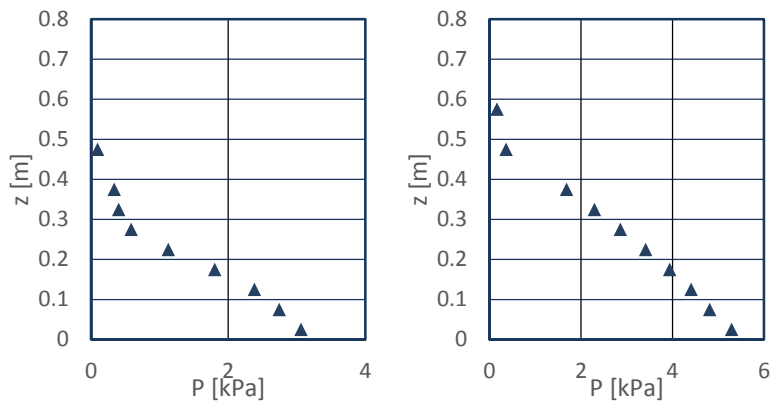
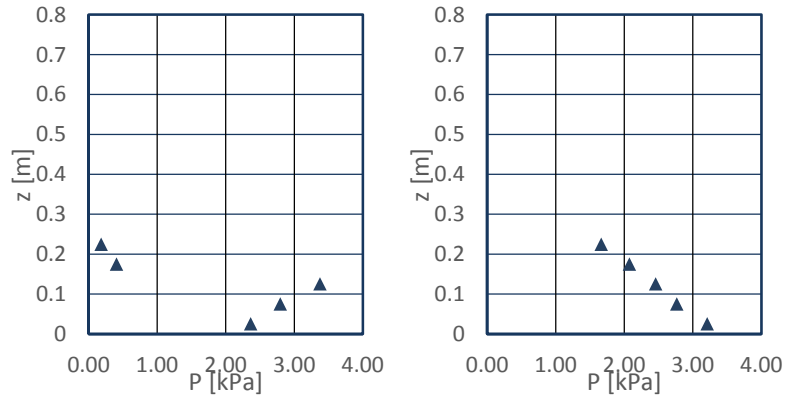
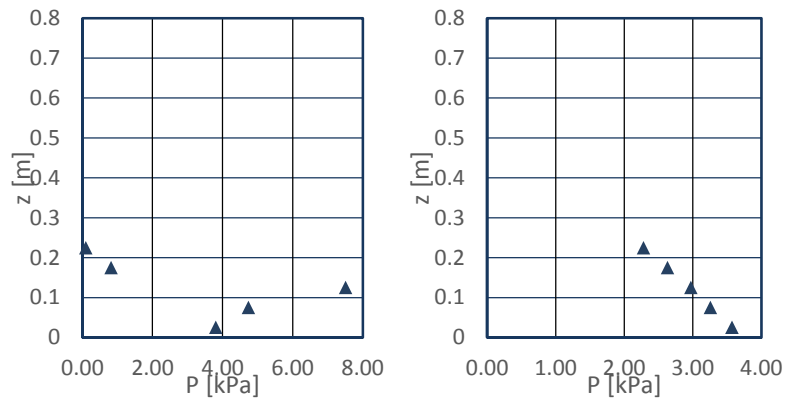


図-8.3.24 数値解析 (OpenFOAM) による圧力の鉛直分布
(左: 段波波圧, 右: 持続波圧, 直立護岸, 堤体 TypeA, 設置位置 0.625m)

Wc11



Wc12



Wc13

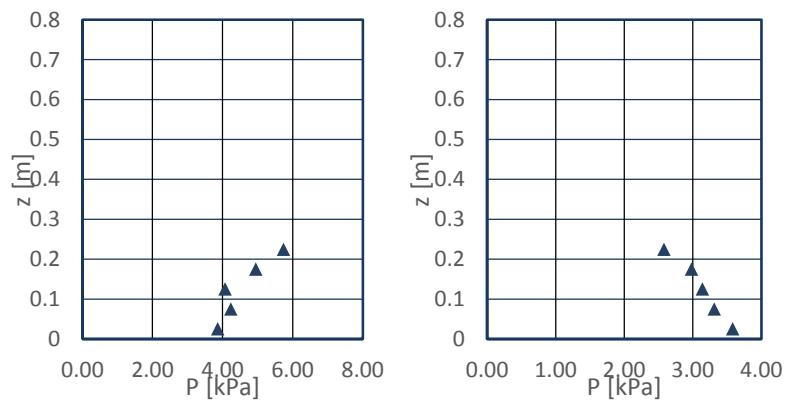
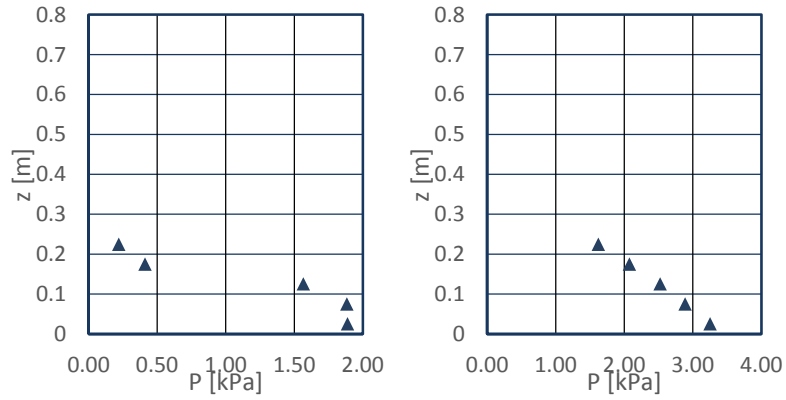
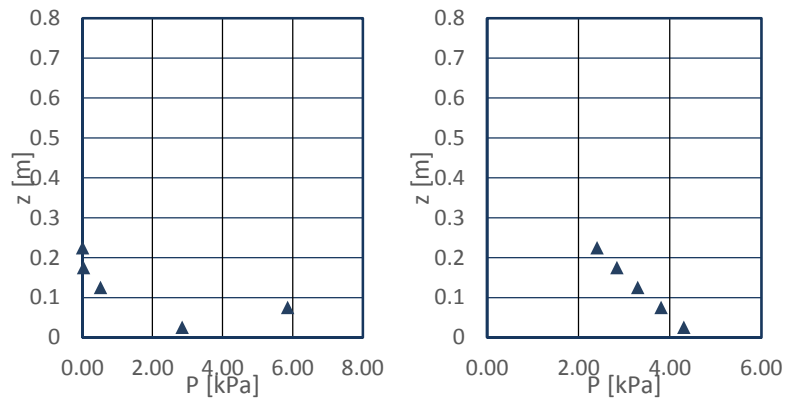


図- 8.3.25 数値解析 (OpenFOAM) による圧力の鉛直分布
(左: 段波波圧, 右: 持続波圧, 単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0m)

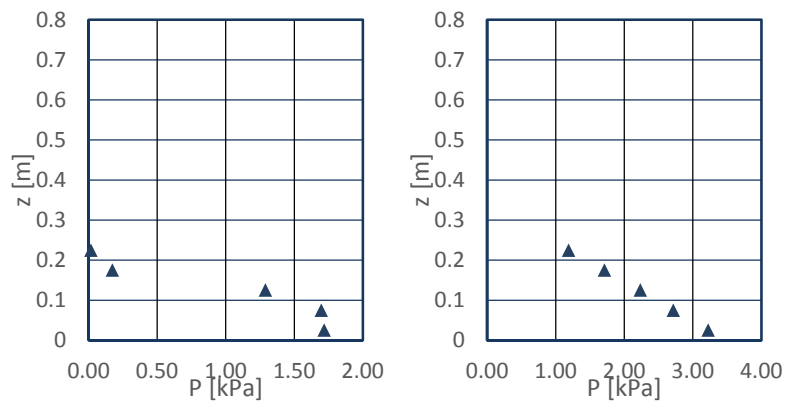
Wc21



Wc22



Wc31



Wc32

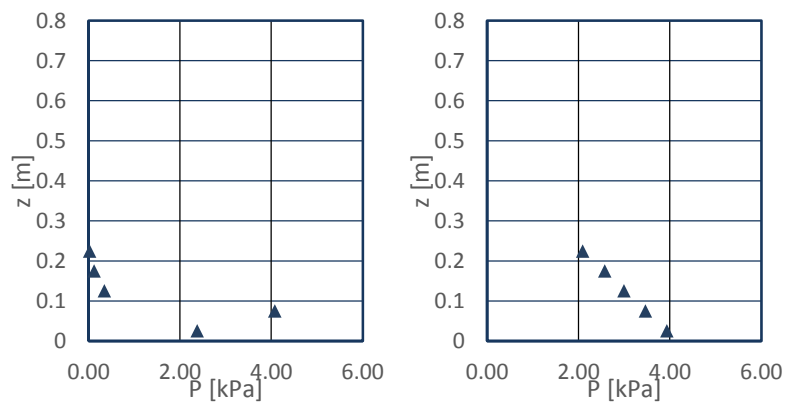
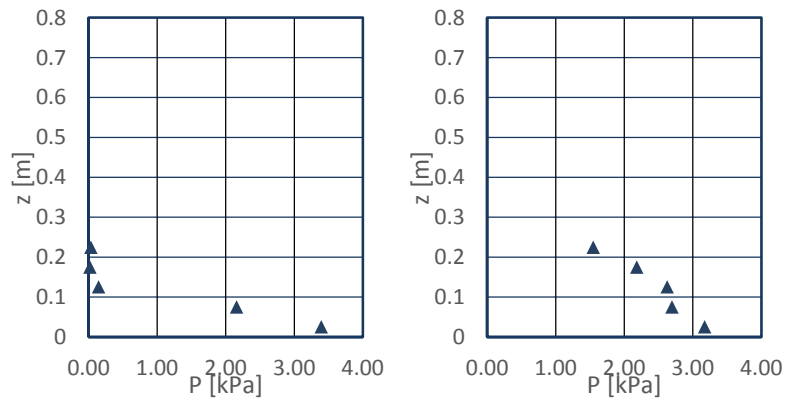
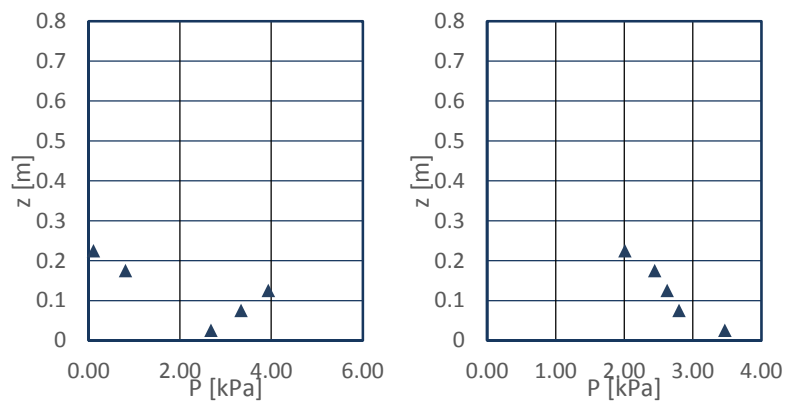


図- 8.3.25 数値解析 (OpenFOAM) による圧力の鉛直分布
(左: 段波波圧, 右: 持続波圧, 単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0m)

Wc11



Wc12



Wc13

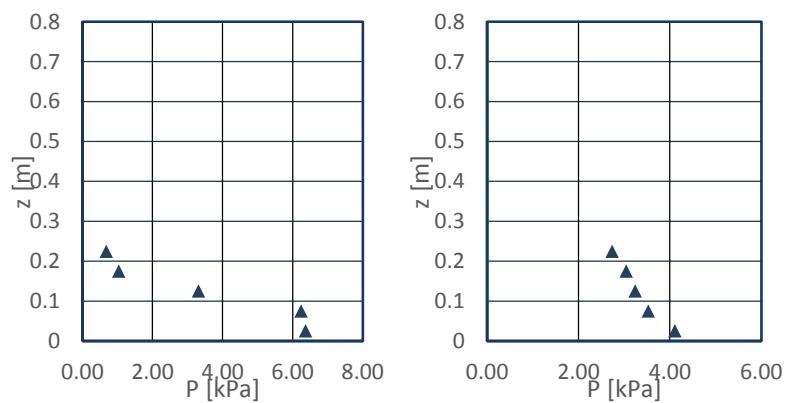
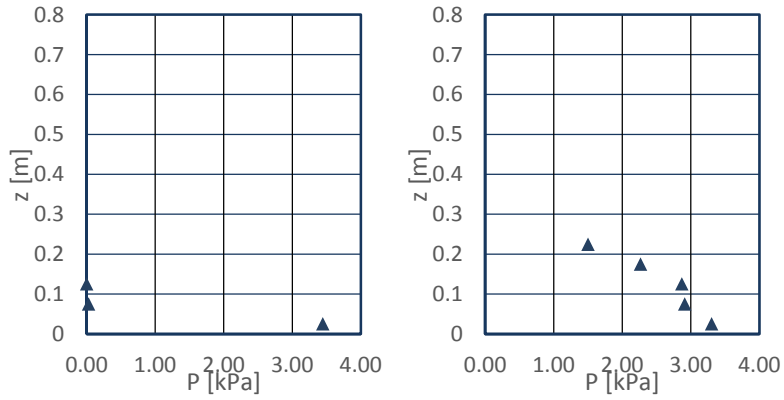
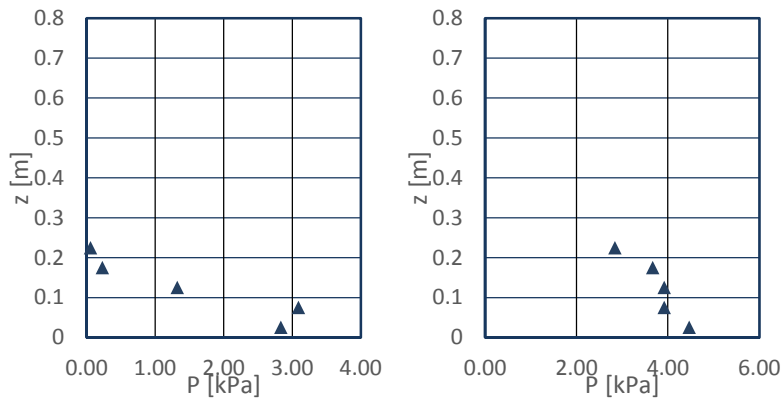


図- 8.3.26 数値解析 (OpenFOAM) による圧力の鉛直分布
(左 : 段波波圧, 右 : 持続波圧, 単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m)

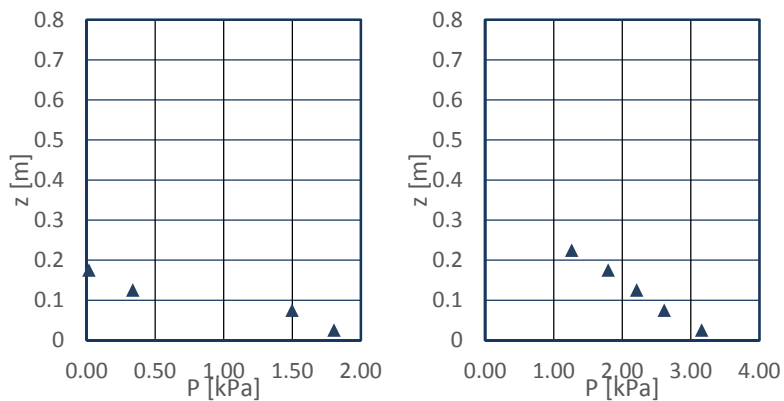
Wc21



Wc22



Wc31



Wc32

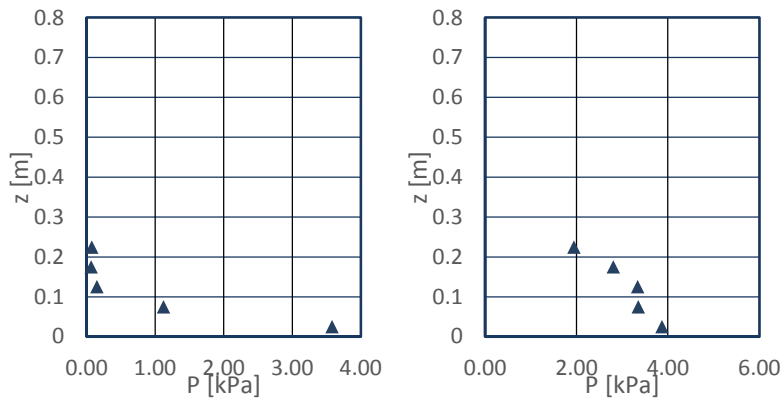
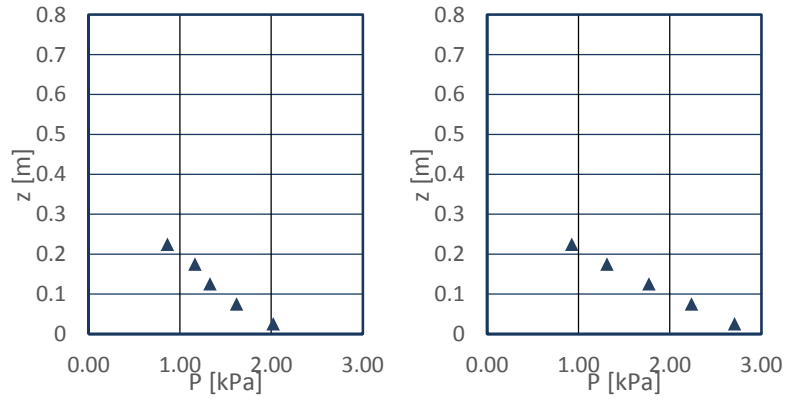
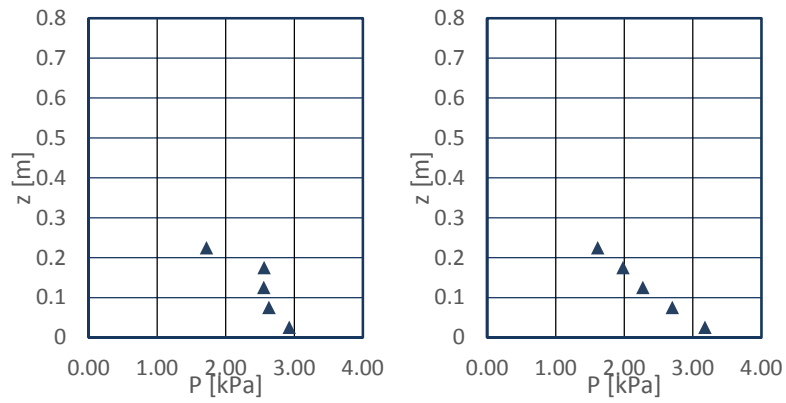


図-8.3.26 数値解析 (OpenFOAM) による圧力の鉛直分布
(左: 段波波圧, 右: 持続波圧, 単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m)

Wc11



Wc12



Wc13

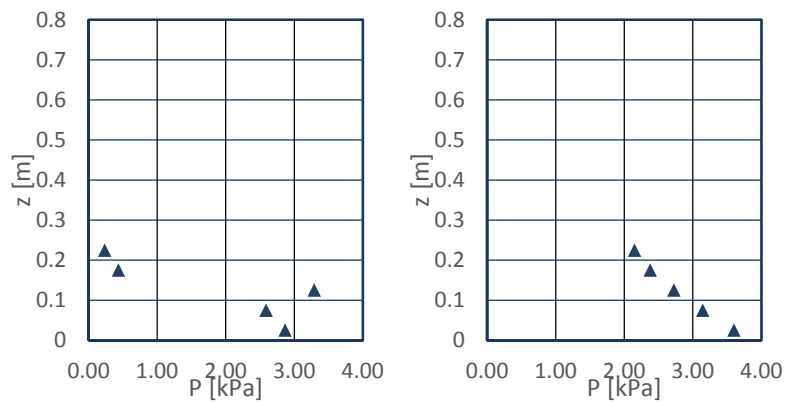
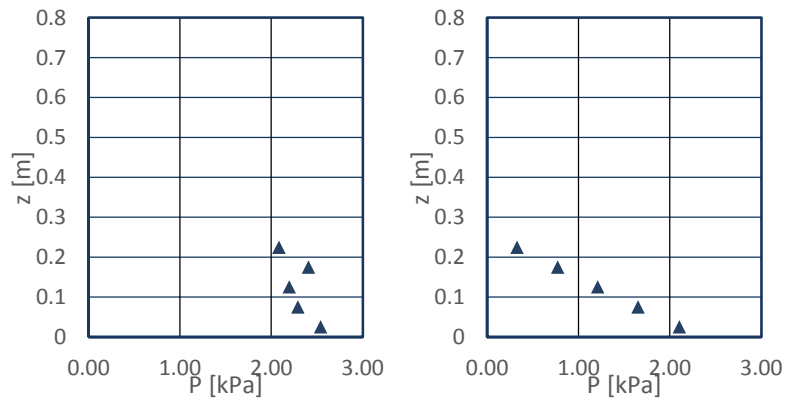


図- 8.3.27 数値解析 (OpenFOAM) による圧力の鉛直分布
(左: 段波波圧, 右: 持続波圧, 直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0m)

Wc14



Wc15

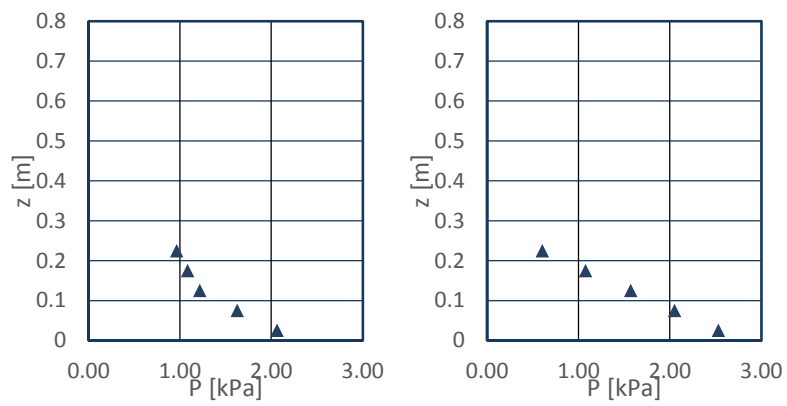
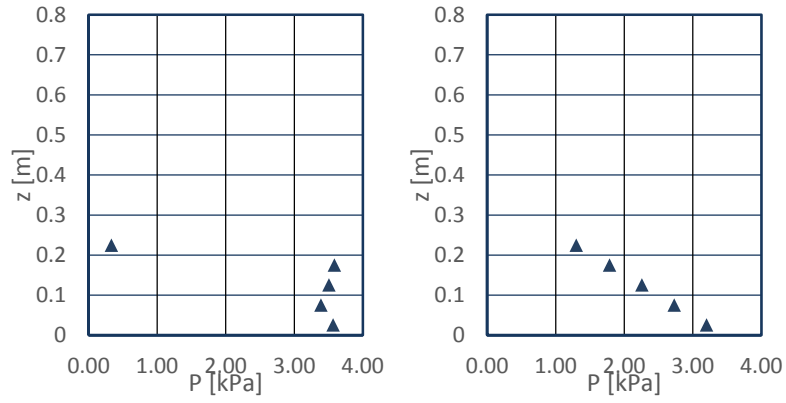
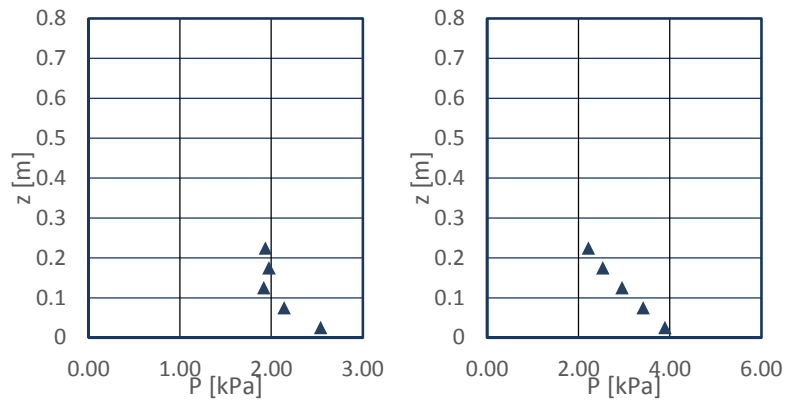


図- 8.3.27 数値解析 (OpenFOAM) による圧力の鉛直分布
(左 : 段波波圧, 右 : 持続波圧, 直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0m)

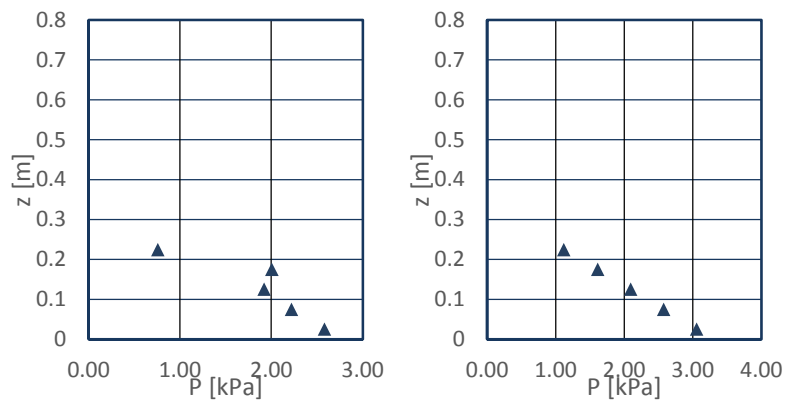
Wc21



Wc22



Wc31



Wc32

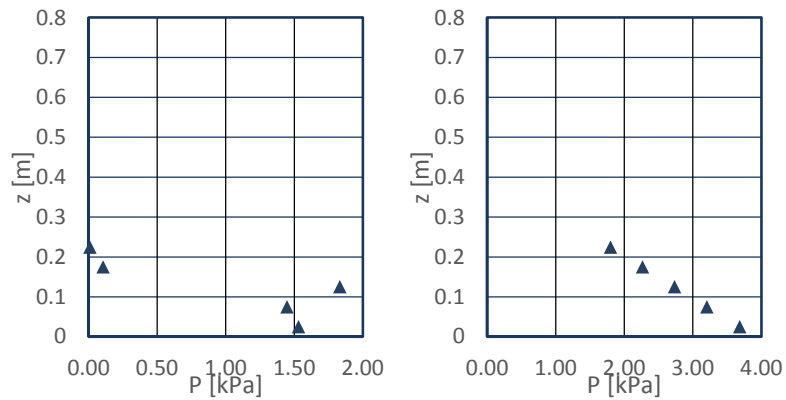
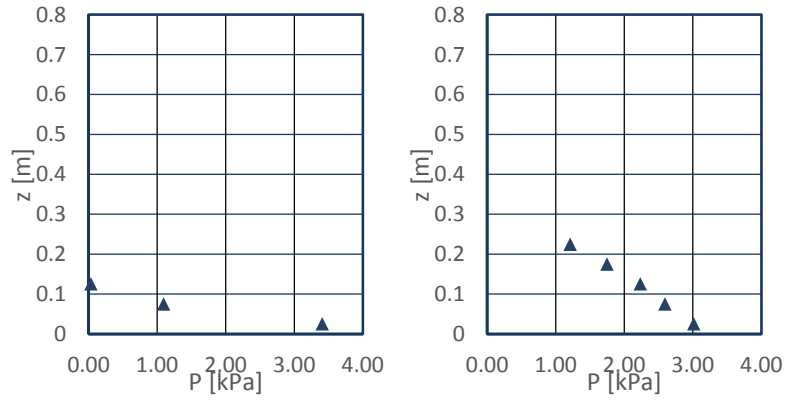
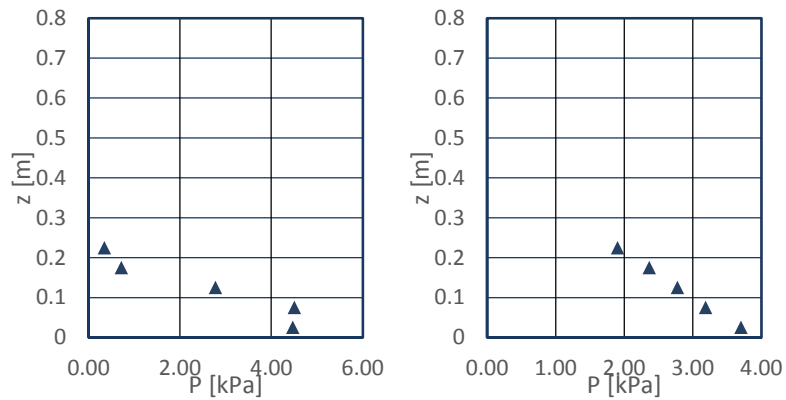


図-8.3.27 数値解析 (OpenFOAM) による圧力の鉛直分布
(左: 段波波圧, 右: 持続波圧, 直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0m)

Wc11



Wc12



Wc13

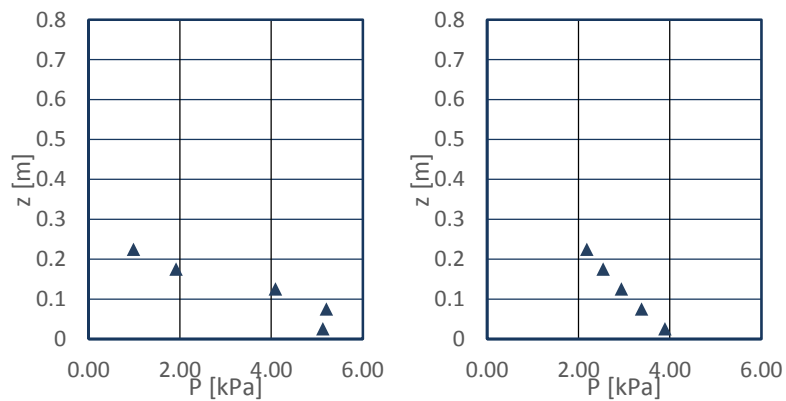
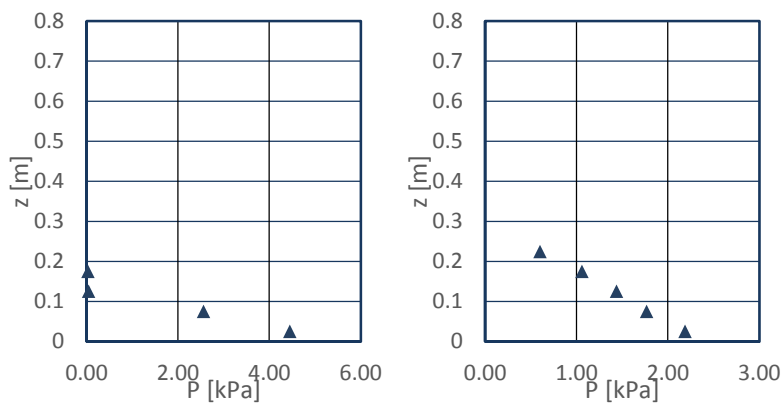


図- 8.3.28 数値解析 (OpenFOAM) による圧力の鉛直分布
(左 : 段波波圧, 右 : 持続波圧, 直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m)

Wc14



Wc15

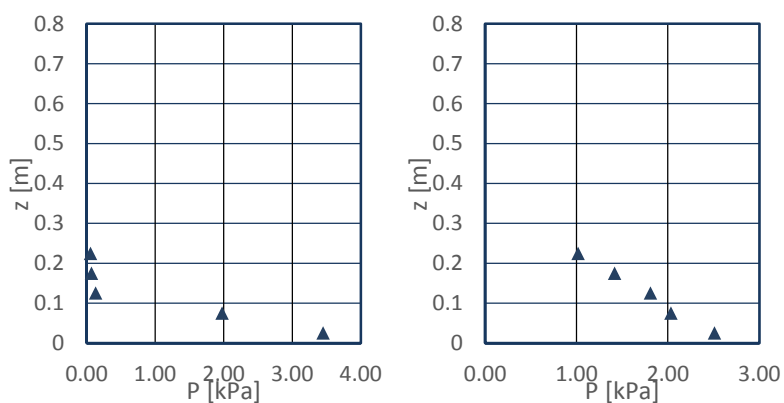
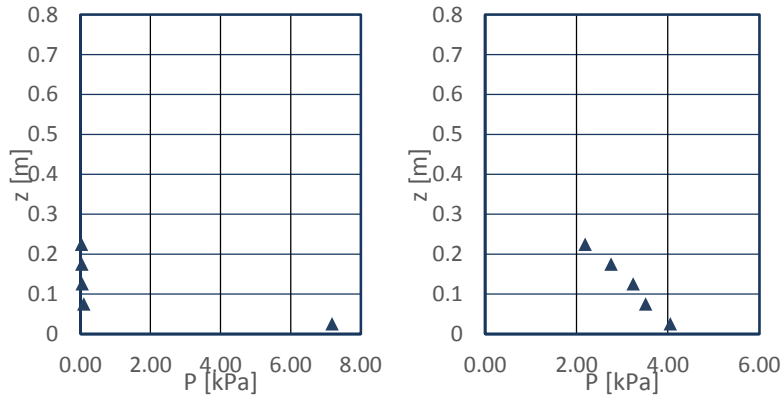
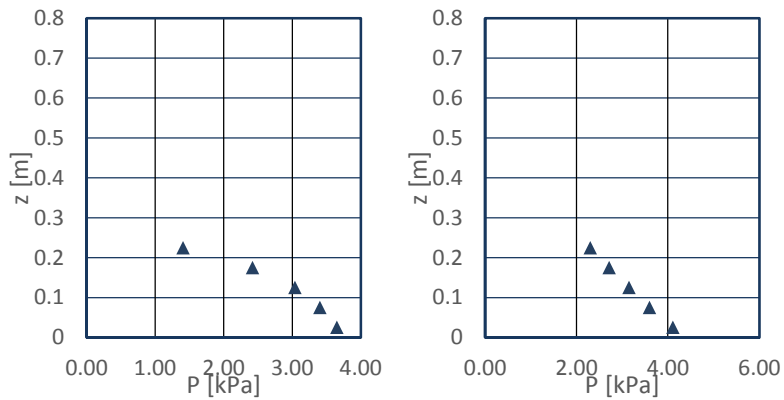


図- 8.3.28 数値解析 (OpenFOAM) による圧力の鉛直分布
(左 : 段波波圧, 右 : 持続波圧, 直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m)

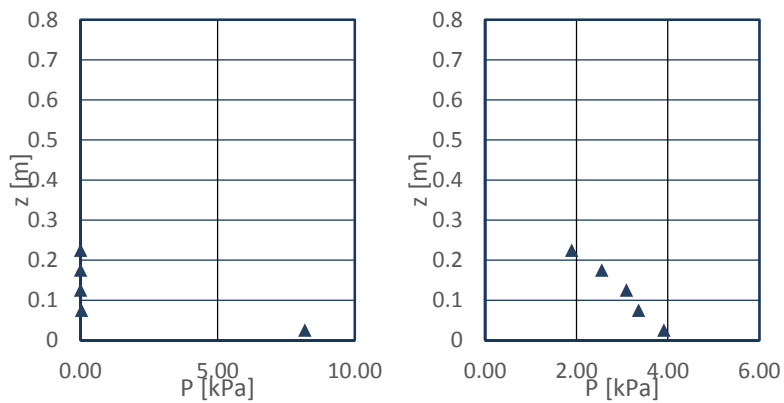
Wc21



Wc22



Wc31



Wc32

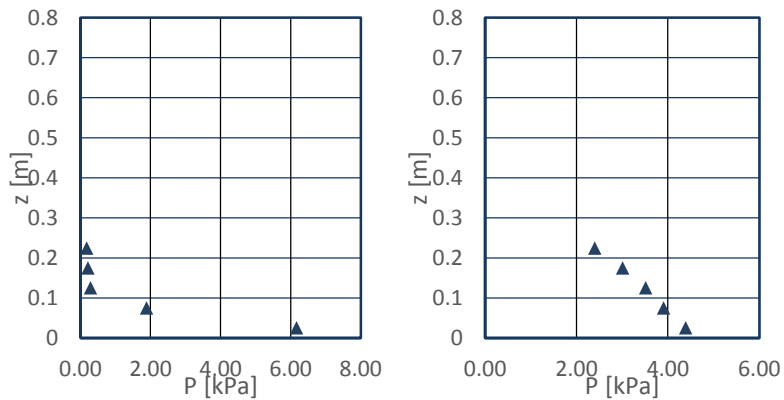


図- 8.3.28 数値解析 (OpenFOAM) による圧力の鉛直分布
(左 : 段波波圧, 右 : 持続波圧, 直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m)

8.3.5. 波力/波圧試験の越流量再現結果

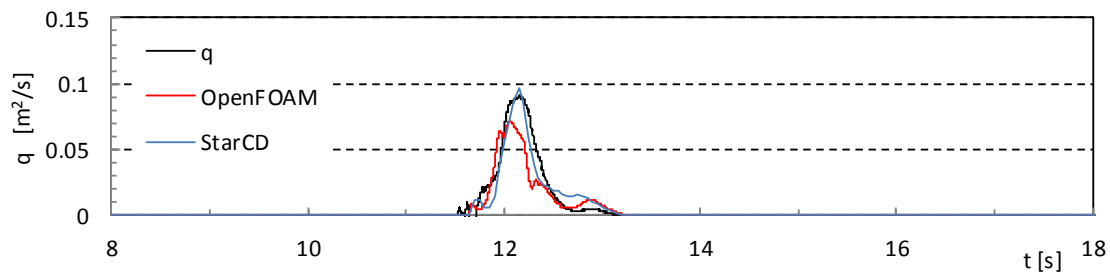
図- 8.3.29～図- 8.3.32 に、堤体高 0.275m (TypeB) の場合の津波の越流量の数値解析による再現結果を示す。

水理試験の結果で前述したように、水理試験では堤体前面水位と堤体上の流速の積として流量を算出している。そのため段波領域では、水塊の打ち上がりによる大きな越流水深によって、流量が過大に評価されている。数値解析では、堤体上を通過する流量を求めているため、この段波領域での大きな流量は算定されていない。

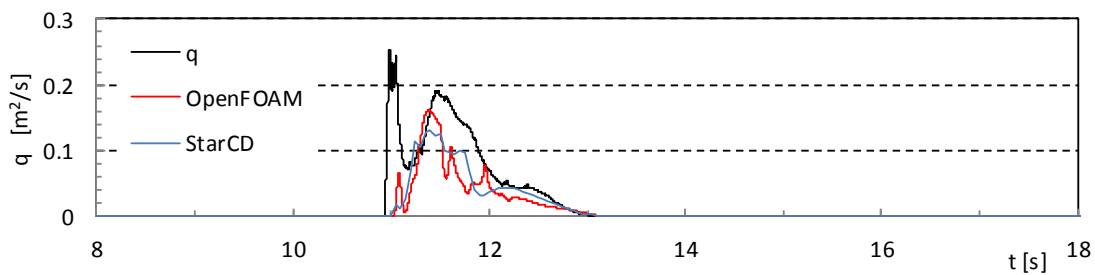
一方、持続波領域においても、数値解析の結果は水理試験結果よりも小さい傾向にある。水理試験における堤体前面水位は、堤体上の越流水深ではなく、堤体前面からわずかに前方 (1cm 程度) に設置した水位計により計測している。堤体を越流する際の水位はこれよりも小さいため、水理試験の結果は流量を過大に評価する傾向にあり、これが主な要因と考えられる。

STAR-CD と OpenFOAM を比較すると、STAR-CD は比較的精度良く試験結果を再現しているが、OpenFOAM の結果は流量を小さく評価していることが分かる。越流時の波力や堤体からの反射を含む持続波領域の水位は精度良く再現できているため、越流量の算出方法に課題があると考えられる。解析ツールの制約から、STAR-CD では、堤体の背面に流入した水の総量を時系列で求め、これを時間で微分することにより流量を求めている。一方 OpenFOAM では、水理試験と算出方法をなるべく整合させるため、堤体上の線流量を鉛直方向 1mm 毎に算出し、これを積分することにより流量を算出している。堤体上の流況を水理試験で計測できていないため詳細は確認出来ないが、堤体の直上では流向が局所的に変化していると考えられ、OpenFOAM ではこれを厳密に再現出来ていないために流量の算出精度が低下している可能性が考えられる。越流量については、数値解析における最適な算出方法について、さらなる検討が必要である。

Wc11



Wc12



Wc13

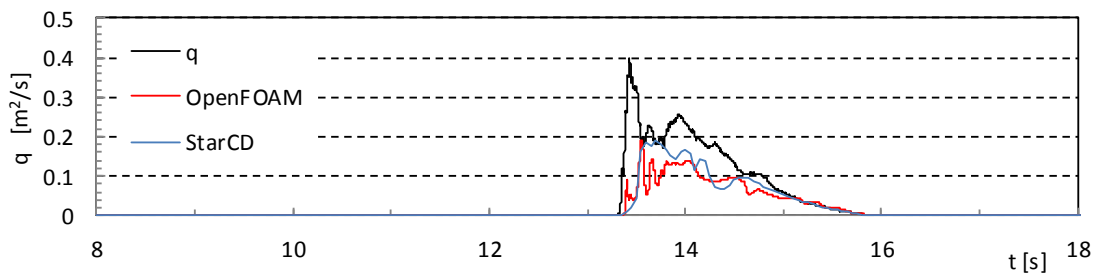
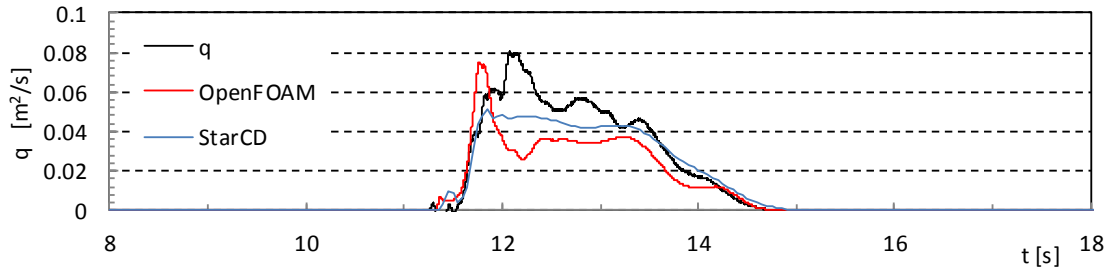
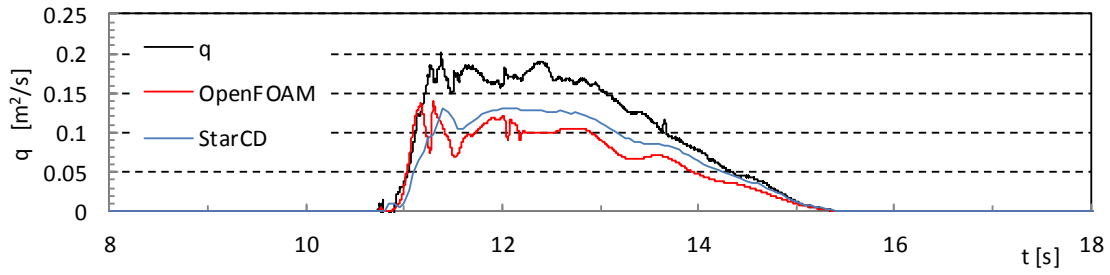


図- 8.3.29 越流量時系列の比較 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0m)

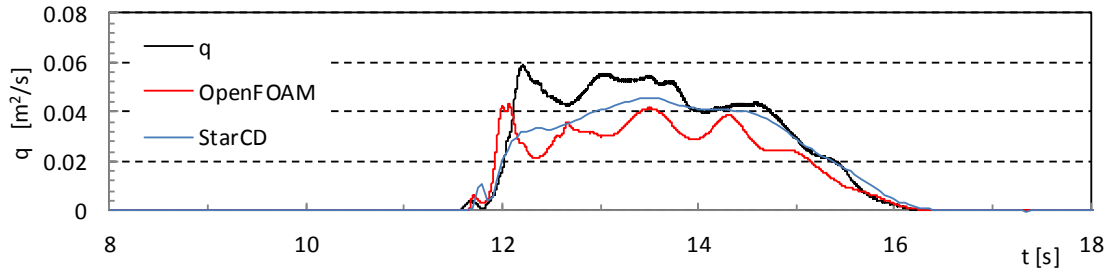
Wc21



Wc22



Wc31



Wc32

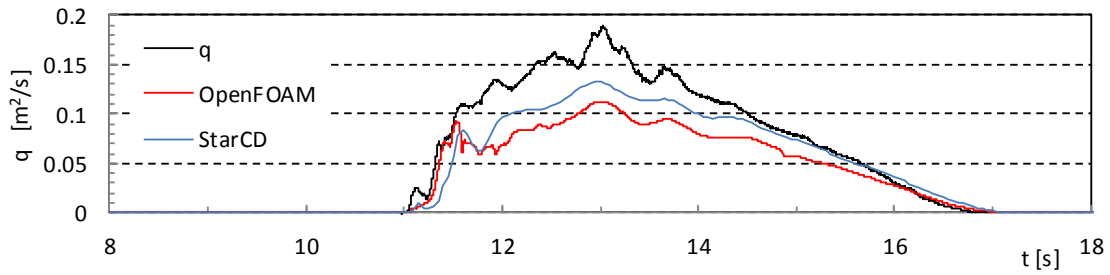
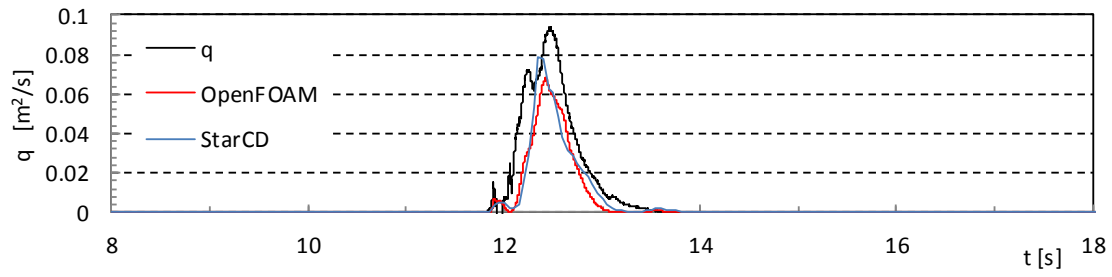
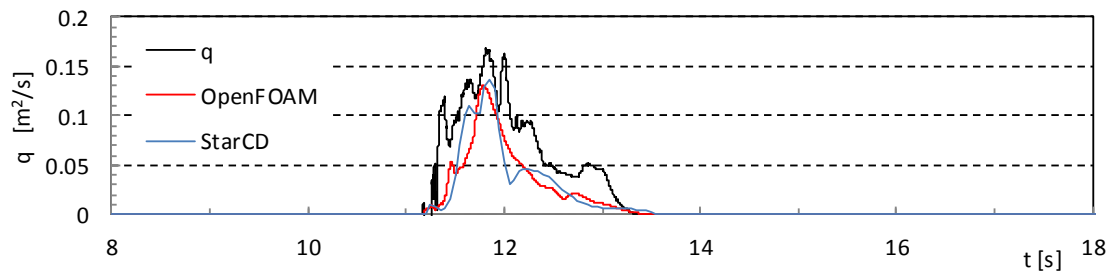


図- 8.3.29 越流量時系列の比較 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0m)

Wc11



Wc12



Wc13

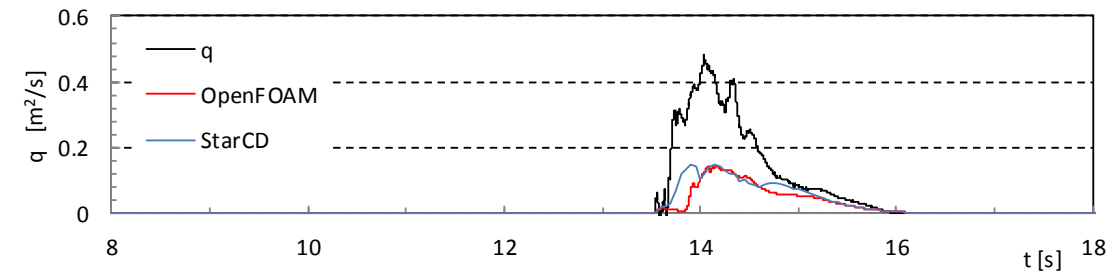
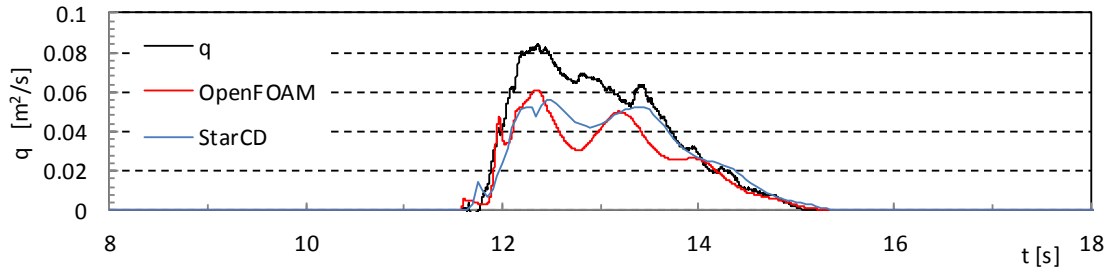
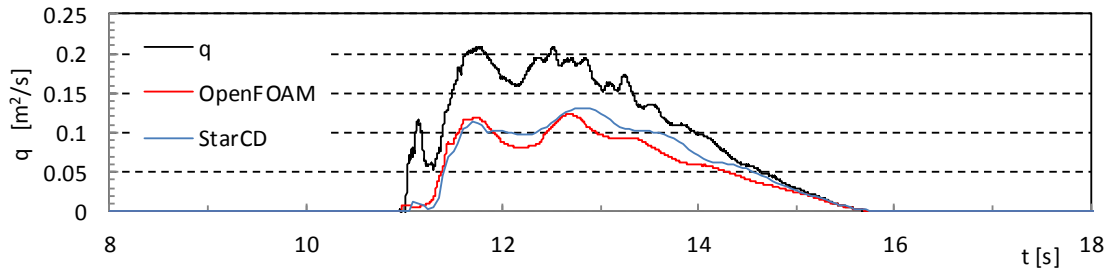


図- 8.3.30 越流量時系列の比較 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m)

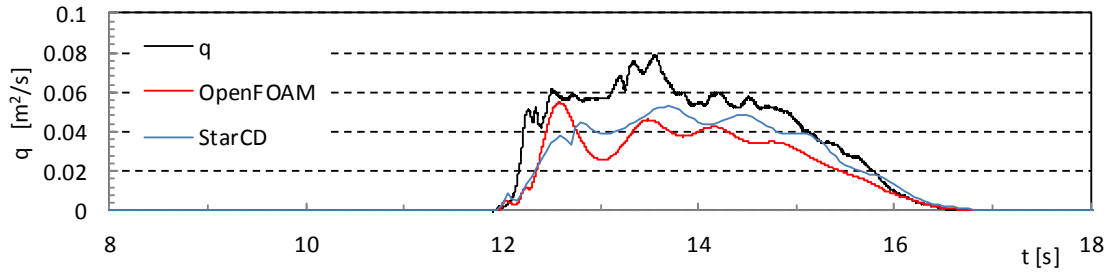
Wc21



Wc22



Wc31



Wc32

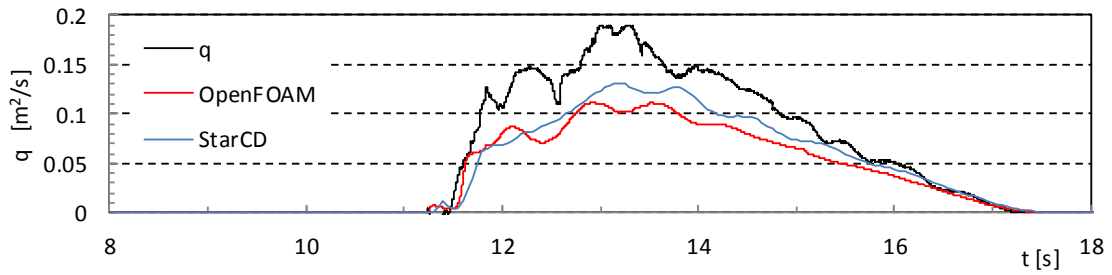
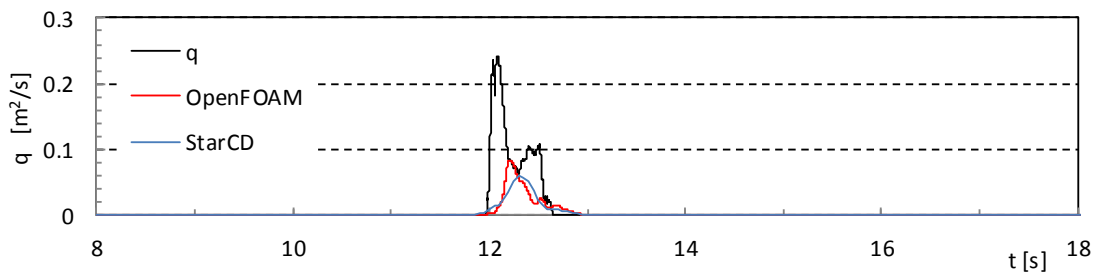
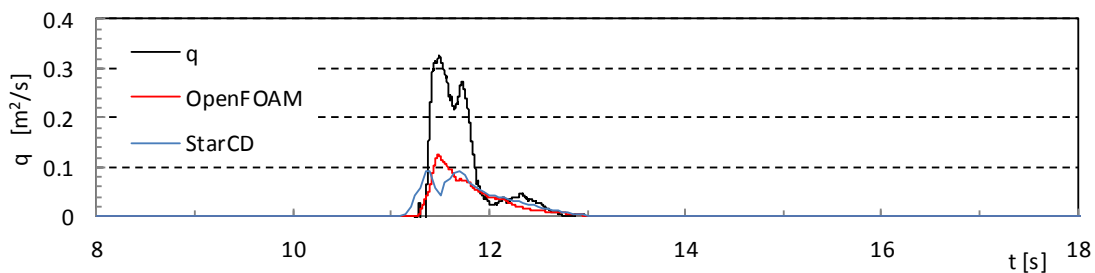


図- 8.3.30 越流量時系列の比較 (単純勾配, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m)

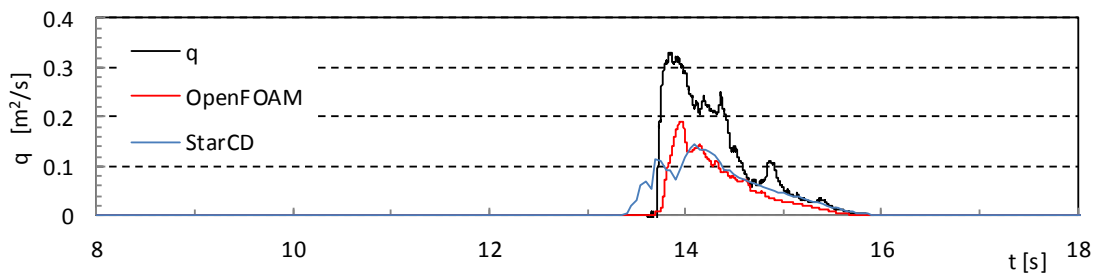
Wc11



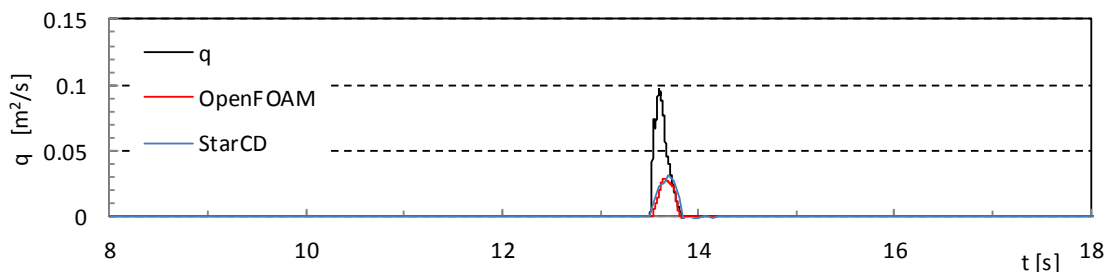
Wc12



Wc13



Wc14



Wc15

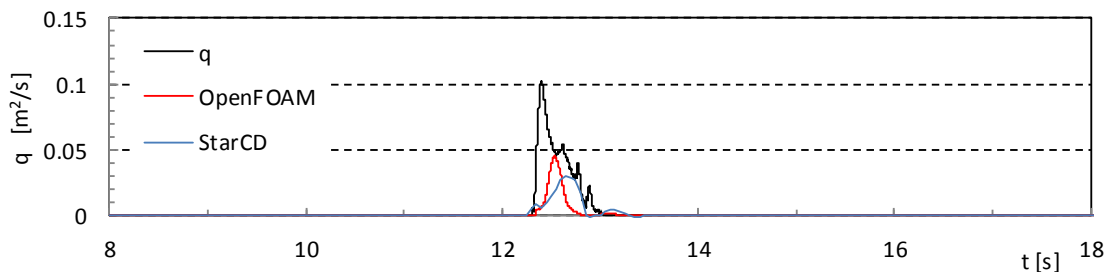
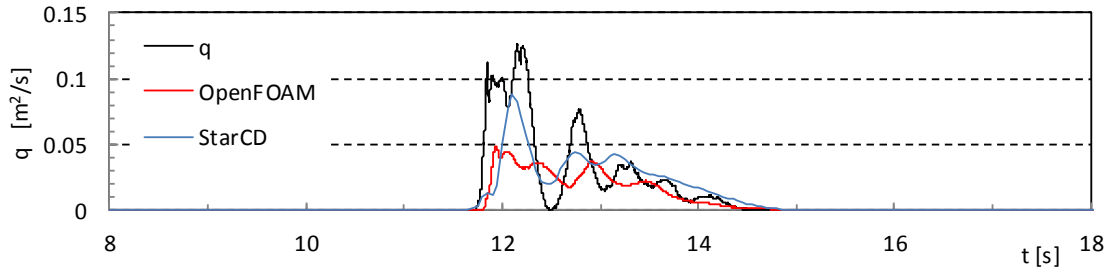
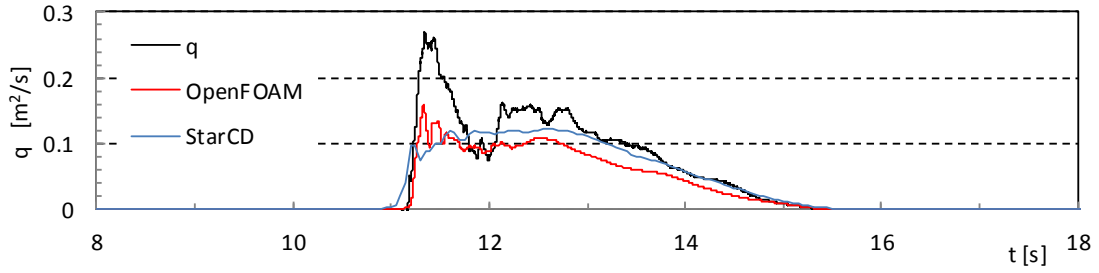


図- 8.3.31 越流量時系列の比較（直立護岸，堤体 TypeB，設置位置 0m）

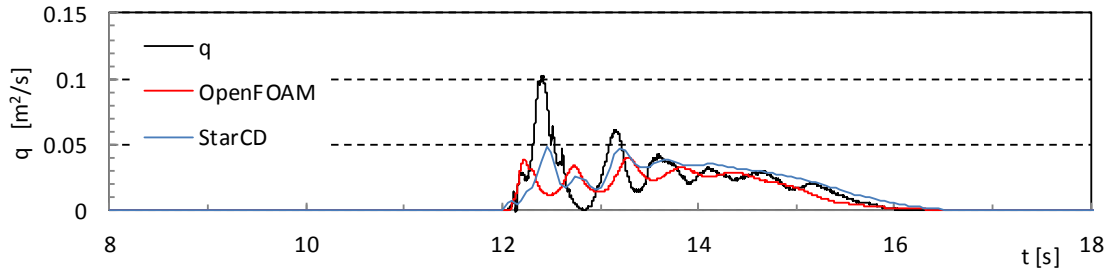
Wc21



Wc22



Wc31



Wc32

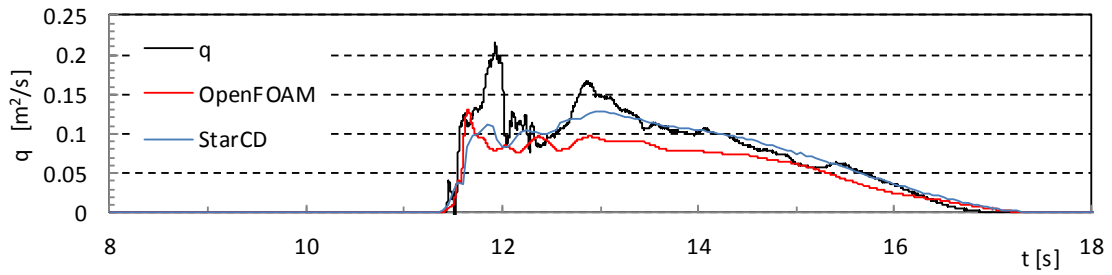
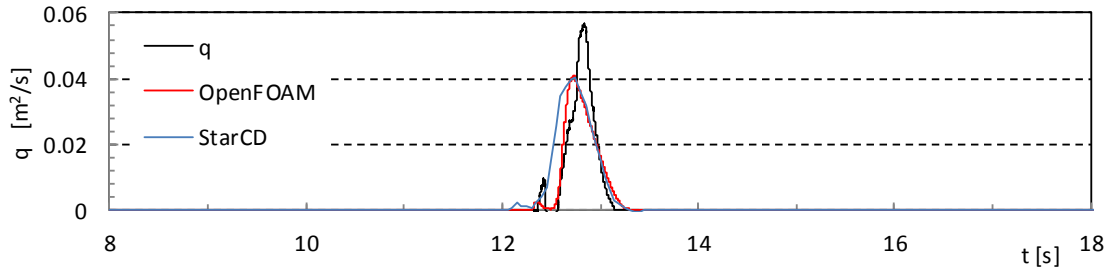
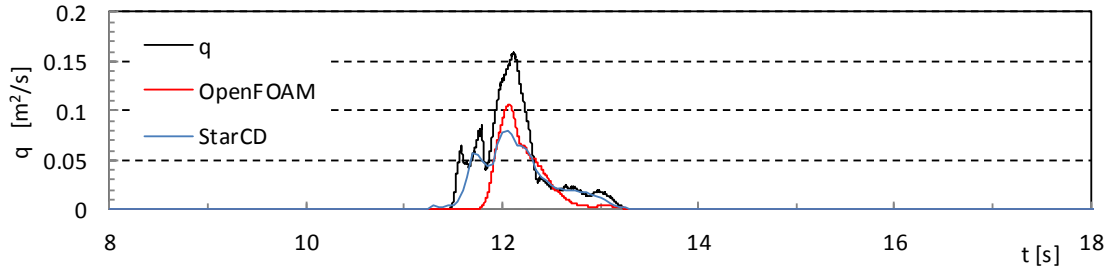


図- 8.3.31 越流量時系列の比較 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0m)

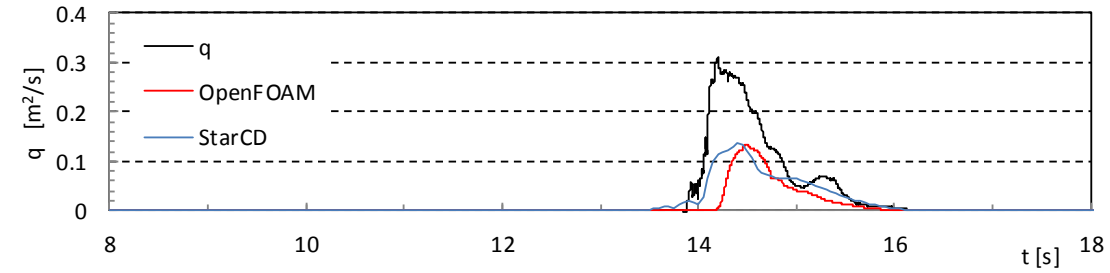
Wc11



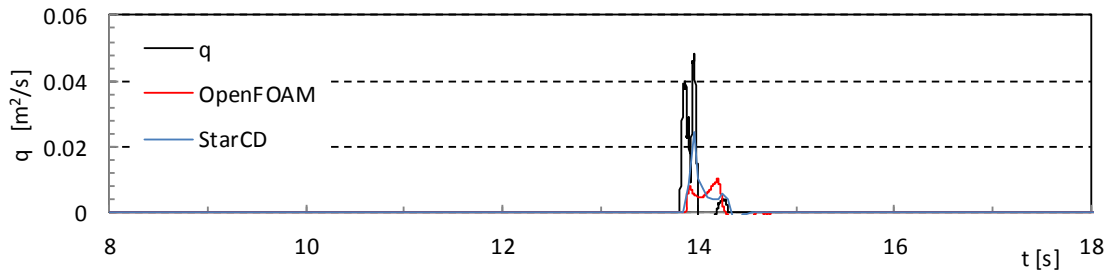
Wc12



Wc13



Wc14



Wc15

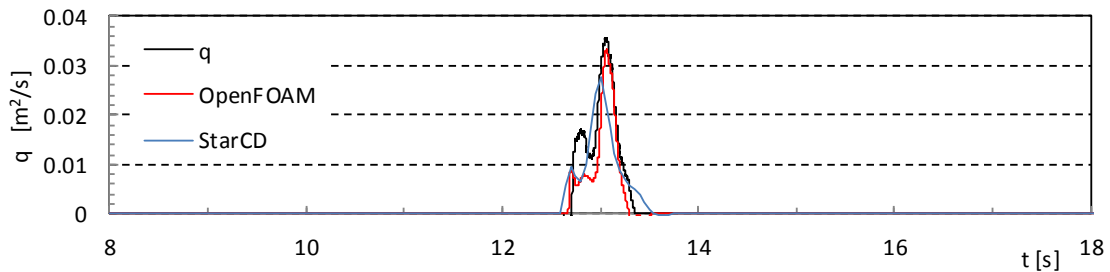
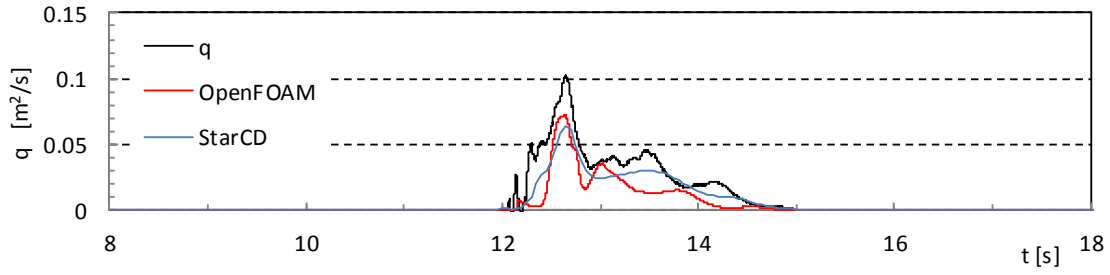
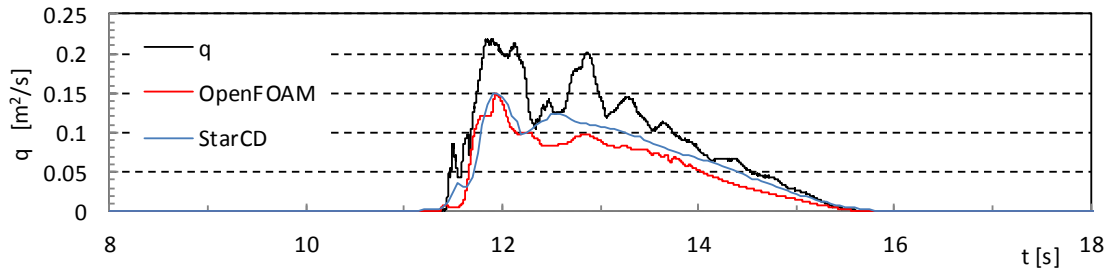


図- 8.3.32 越流量時系列の比較（直立護岸，堤体 TypeB，設置位置 0.625m）

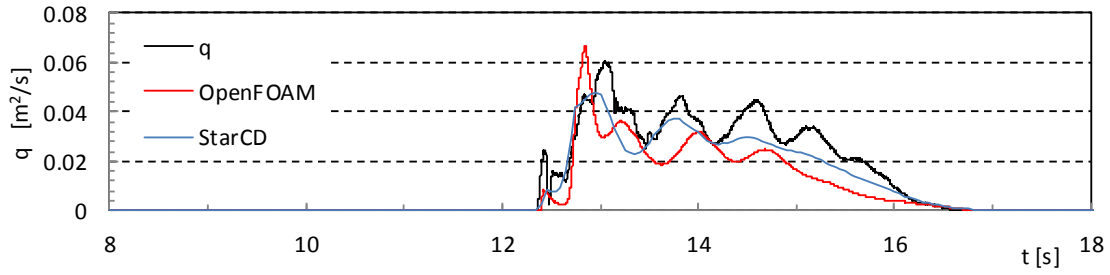
Wc21



Wc22



Wc31



Wc32

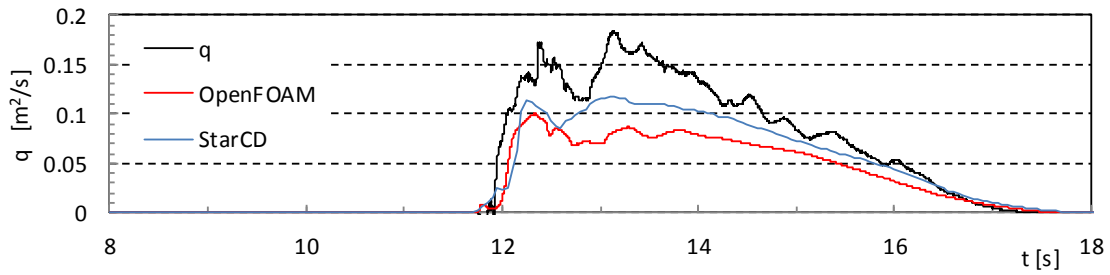


図- 8.3.32 越流量時系列の比較 (直立護岸, 堤体 TypeB, 設置位置 0.625m)

8.4. 構造解析と解析条件

8.4.1. 解析モデル

津波波力が堤体に作用した際に発生する堤体模型のひずみを構造解析により解析する。解析は、前述の流体カシミュレーションによって得られた波圧の時系列を、外力として構造解析に入力する 1-way 解析とした。構造解析には構造物耐震解析プログラム TDAPⅢver.3 を用いた。TDAPⅢは、(株)アーク情報システムと大成建設(株)が共同開発した時間領域での 3次元構造物動的応答解析プログラムである。本解析では直接積分法を用いた。

解析では、水理試験で用いた堤体模型を、一定の厚みのアルミ板の 2次元梁としてモデル化した。具体的には、鉛直下端を回転ばねで固定し、5mm 間隔の接点間を 2次元梁で接続して、水平方向から作用する波圧によりひずみが生じるものとした (図- 8.4.1)。波圧の入力は 0.001s 毎とし、25 秒間の数値解析で得られた圧力時刻暦を与えた。なお入力する波圧については、数値解析の結果の出力を鉛直方向に 10mm 間隔とし、これを 2要素 3接点間に等分布荷重として与えた。

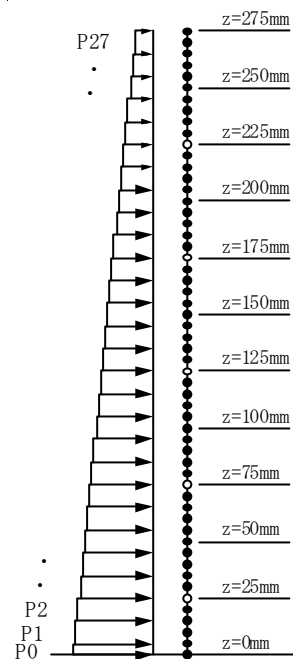


図- 8.4.1 解析モデルおよび波圧の入力

8.4.2. 材料特性

解析に用いた材料特性を表- 8.4.1 に示す。固有振動数および減衰率を確認するため実施した、堤体模型の自由振動試験（6.1 参照）によると、気中の固有振動数は 74.8Hz であった。これは、材料特性から求めた片持ち梁の固有振動数 90Hz よりも小さい。前述したように、堤体模型の下端は地形架台に固定しているが、完全に回転を許さない固定にはなっていないことが主な要因と考えられる。解析においてはこれを再現するため、下端部に固有周期が一致するように回転ばねを設定した。

また、波力が作用している間は堤体前面に水があるため、付加質量の影響により振動が低減すると考えられる。自由振動試験の結果から、減衰率と固有振動数を算出したものを、表- 8.4.2 に示す。これによると、前面水位 0.1m 以下では減衰率、固有振動数ともに、気中の場合とあまり変わらないが、0.2m になると減衰率が大きく、また固有振動数も小さくなることが分かる。これは、付加質量の影響が水位によって変わるためであるが、これを正確に数値解析に反映するには、流体解析と構造解析を連成して解く必要がある。ここでは簡易的に、代表水深として全面に 20cm の水が溜まっている場合の自由振動の計測結果から減衰率を設定することとした。

表- 8.4.1 材料特性

物性値	使用した値
ヤング率	7.06×10^{10} N/m ²
ポアソン比	0.34
質量密度	2.68 kg/m ³
固有振動数	74.8Hz
減衰率	5.61%

表- 8.4.2 自由振動試験の結果

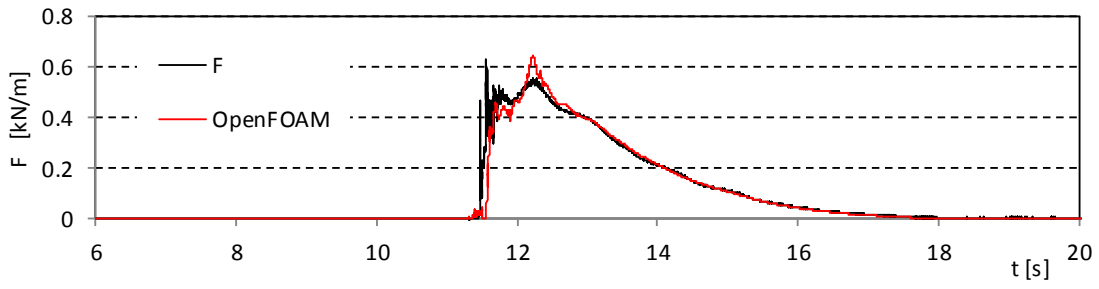
前面水位	対数減衰率	固有振動数
0.0m	3.88%	74.83Hz
0.1m	4.02%	74.35Hz
0.2m	5.61%	57.47Hz

8.4.3. 解析結果

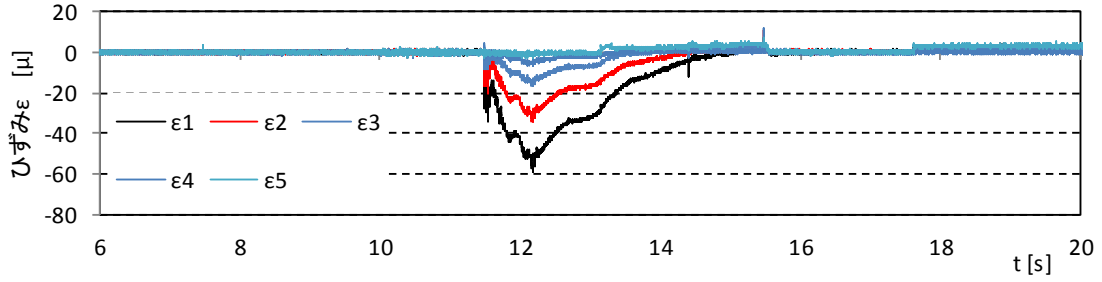
図- 8.4.2～図- 8.4.5 に構造解析の入力に用いた数値解析による波力およびひずみの計測結果と構造解析結果の比較を示す。

構造解析の入力には流体解析（OpenFOAM）の結果を用いているため、流体解析の再現精度がひずみの解析精度に影響を及ぼす。流体解析の解析精度を考慮すると、ひずみの解析結果は若干大きめではあるものの、試験結果を良く再現していると言える。解析結果が若干大きめなのは、ヤング係数や堤体模型の厚さについて、解析に入力した値との差異があることや、付加質量の影響を減衰率として取り込んでいるため、付加質量による固有周期の変化が再現出来ていないことが理由として考えられる。またその減衰率についても、前面水位 20cm の時の自由振動の値を代表値として入力しているが、本来は前面水位の変化とともに減衰率が変わり、前面水位が高い場合には減衰率はこれよりも大きくなると考えられ、最大ひずみ発生時の減衰率が小さく評価されていることも要因の1つと考えられる。より精度高くひずみを解析するためには、解析における付加質量のモデル化手法について検討する必要がある。

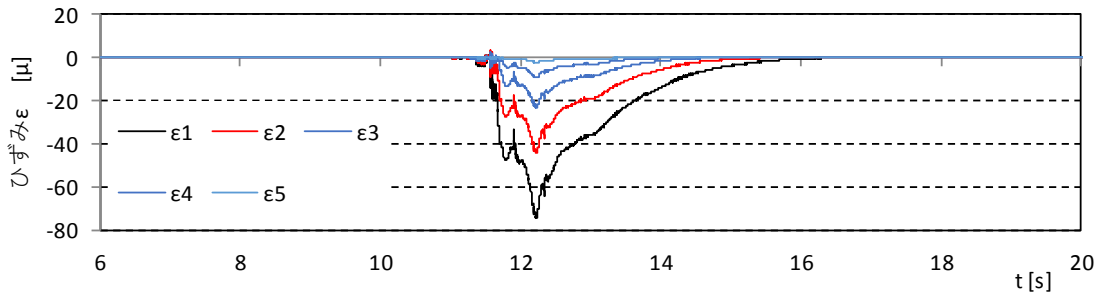
持続波領域では、比較的ひずみを精度良く再現できているものの、段波領域では、ひずみを過小評価している。流体解析において段波波力が過小評価されていることが主な要因ではあるが、一方で、段波波圧作用時の波圧は水底付近に集中していることから、有効な前面水位が低いと考えられ、構造解析において減衰率を過大に評価していることも要因として考えられる。



(a) 数値解析による波力再現結果

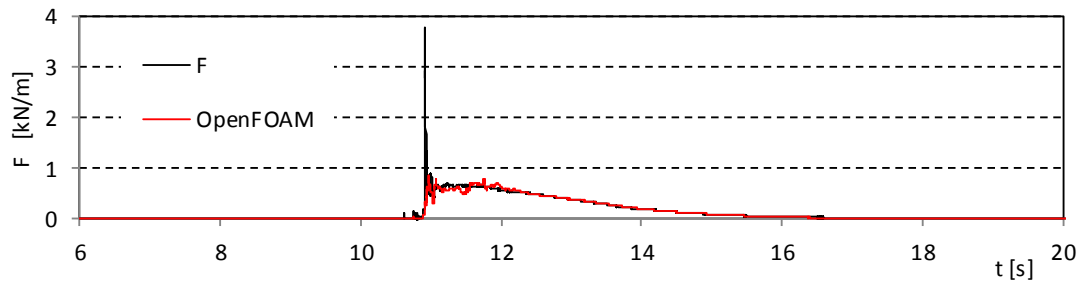


(b) 水理試験によるひずみ計測結果

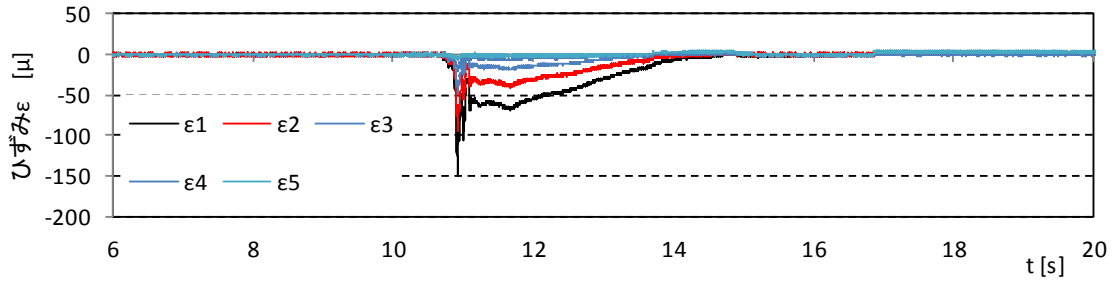


(c) 構造解析によるひずみ解析結果

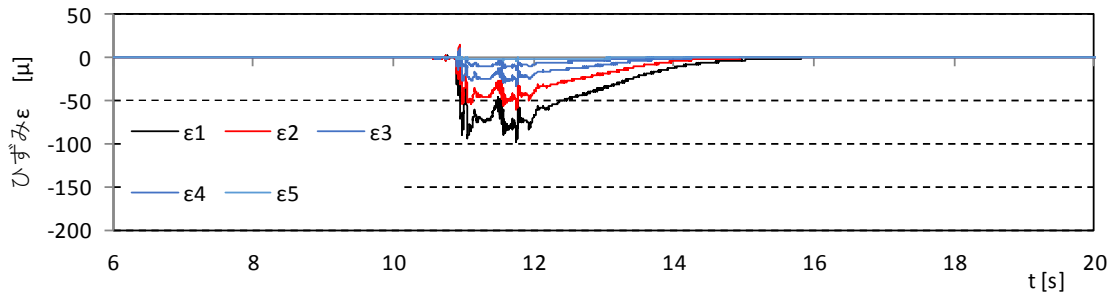
図- 8.4.2 波力およびひずみ時系列比較図 (単純勾配, 堤体 TypeC, 堤体位置 0m, Wc11)



(a) 数値解析による波力再現結果

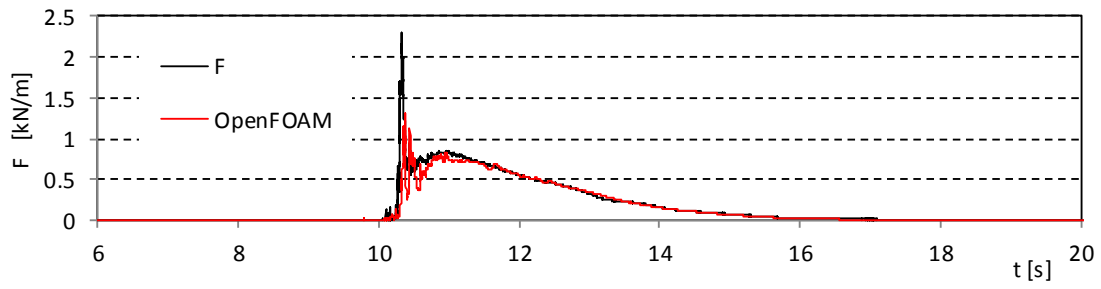


(b) 水理試験によるひずみ計測結果

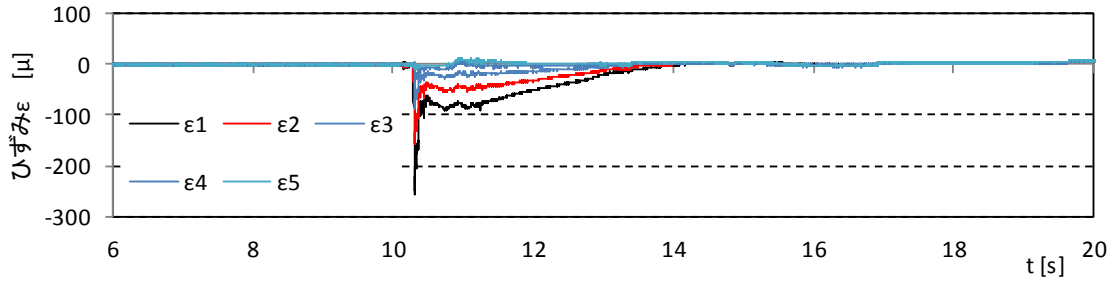


(c) 構造解析によるひずみ解析結果

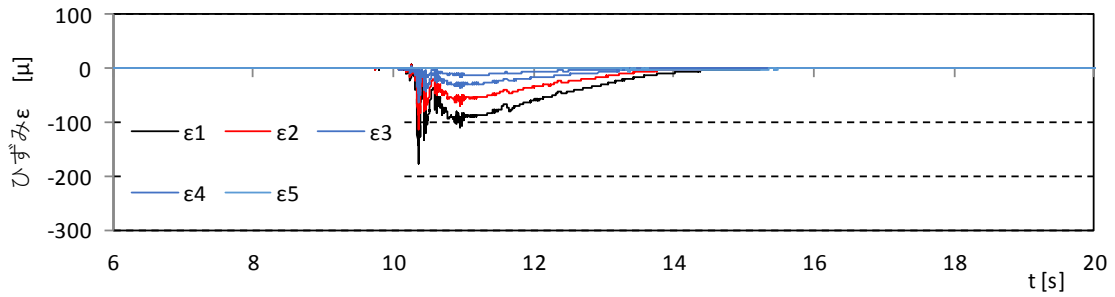
図- 8.4.2 波力およびひずみ時系列比較図 (単純勾配, 堤体 TypeC, 堤体位置 0m, Wc12)



(a) 数値解析による波力再現結果

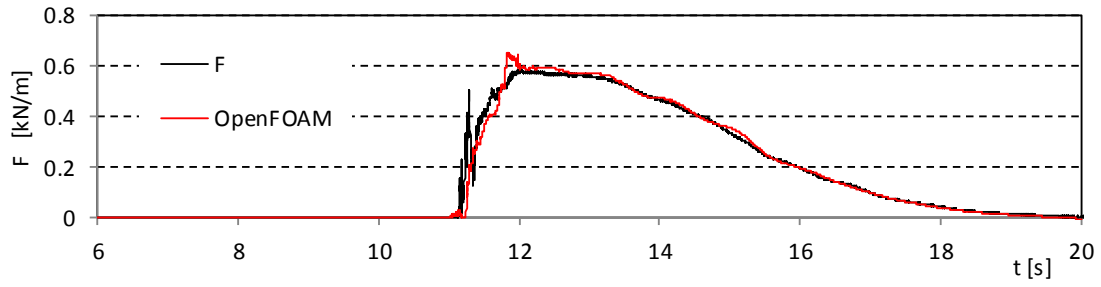


(b) 水理試験によるひずみ計測結果

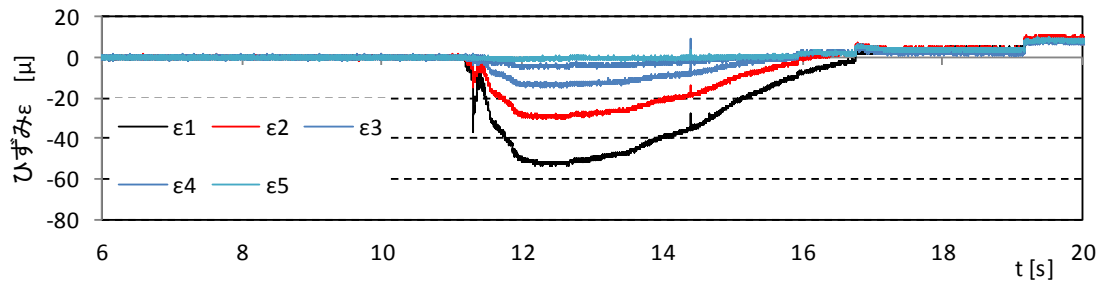


(c) 構造解析によるひずみ解析結果

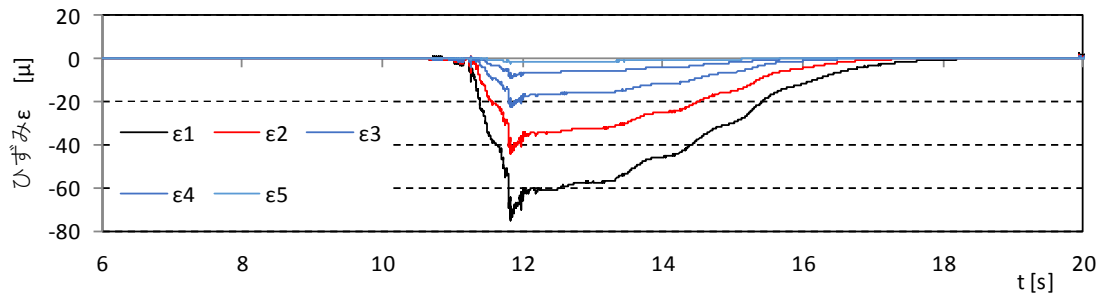
図- 8.4.2 波力およびひずみ時系列比較図 (単純勾配, 堤体 TypeC, 堤体位置 0m, Wc13)



(a) 数値解析による波力再現結果

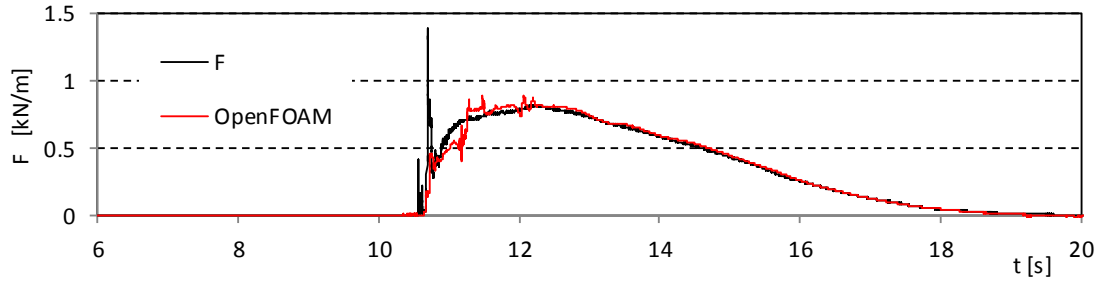


(b) 水理試験によるひずみ計測結果

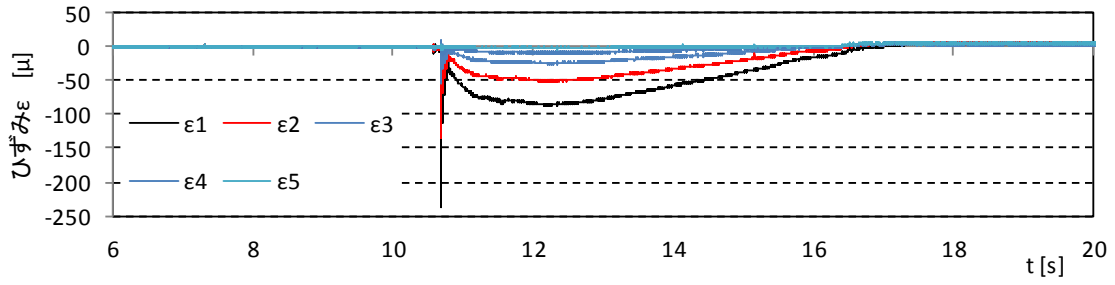


(d) 構造解析によるひずみ解析結果

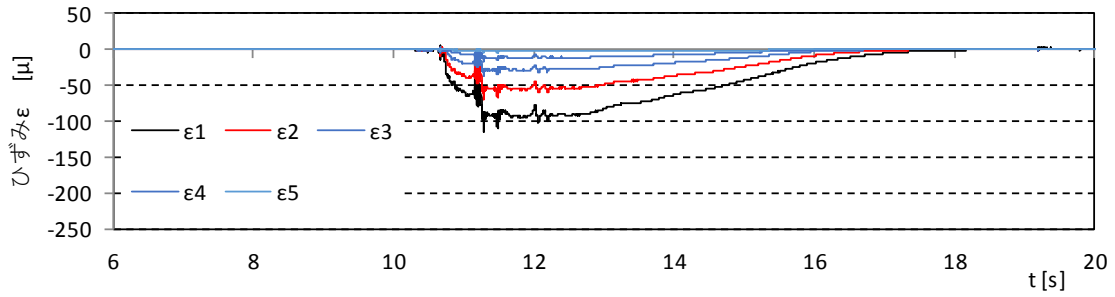
図- 8.4.2 波力およびひずみ時系列比較図 (単純勾配, 堤体 TypeC, 堤体位置 0m, Wc21)



(a) 数値解析による波力再現結果

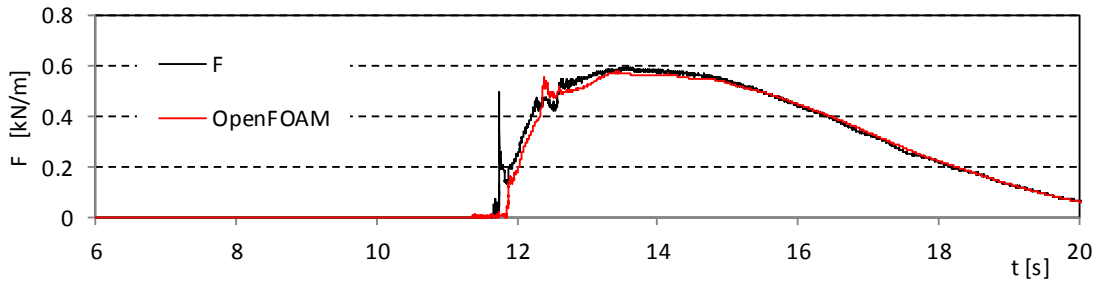


(b) 水理試験によるひずみ計測結果

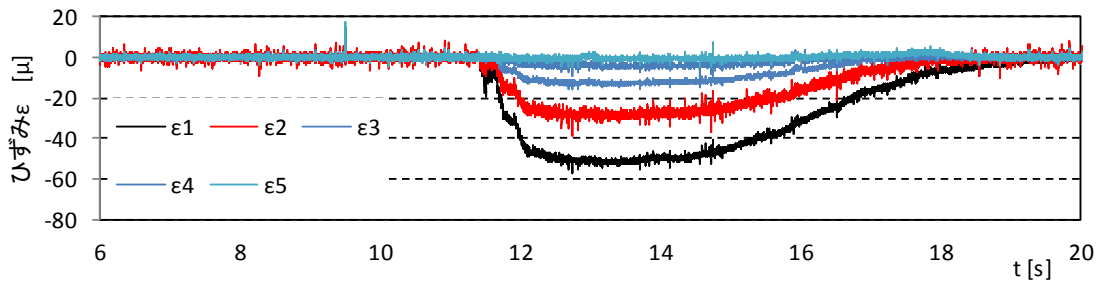


(c) 構造解析によるひずみ解析結果

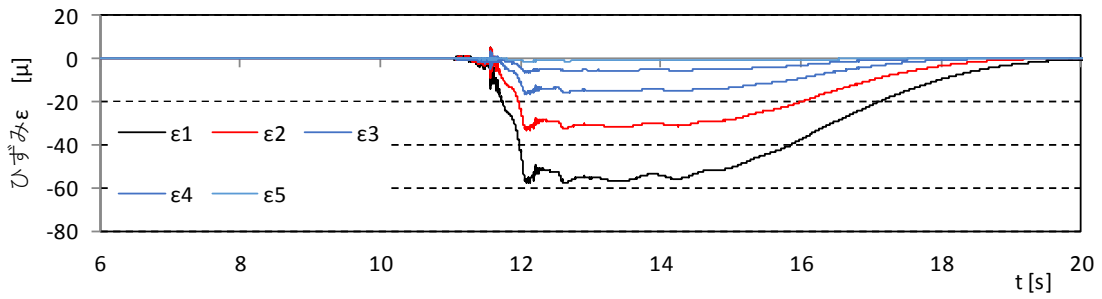
図- 8.4.2 波力およびひずみ時系列比較図 (単純勾配, 堤体 TypeC, 堤体位置 0m, Wc22)



(a) 数値解析による波力再現結果

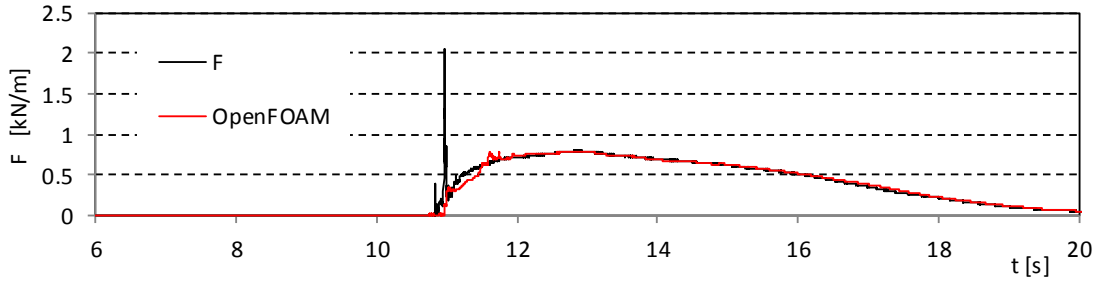


(b) 水理試験によるひずみ計測結果

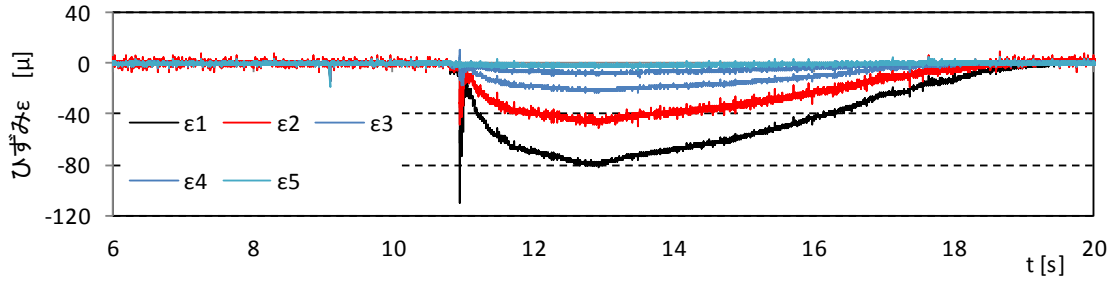


(c) 構造解析によるひずみ解析結果

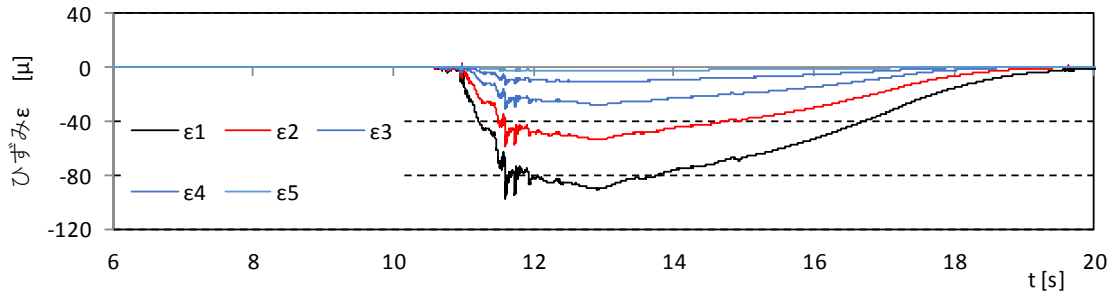
図-8.4.2 波力およびひずみ時系列比較図 (単純勾配, 堤体 TypeC, 堤体位置 0m, Wc31)



(a) 数値解析による波力再現結果

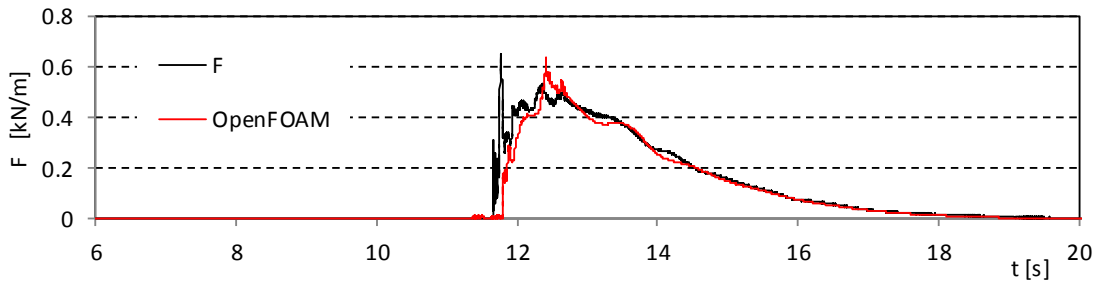


(b) 水理試験によるひずみ計測結果

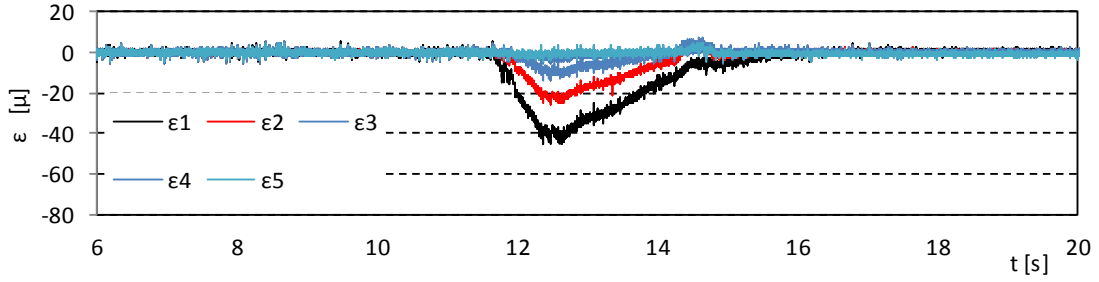


(c) 構造解析によるひずみ解析結果

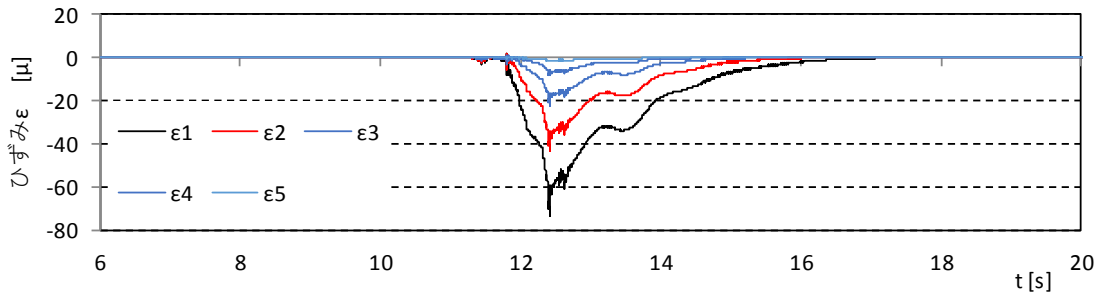
図- 8.4.2 波力およびひずみ時系列比較図 (単純勾配, 堤体 TypeC, 堤体位置 0m, Wc32)



(a) 数値解析による波力再現結果

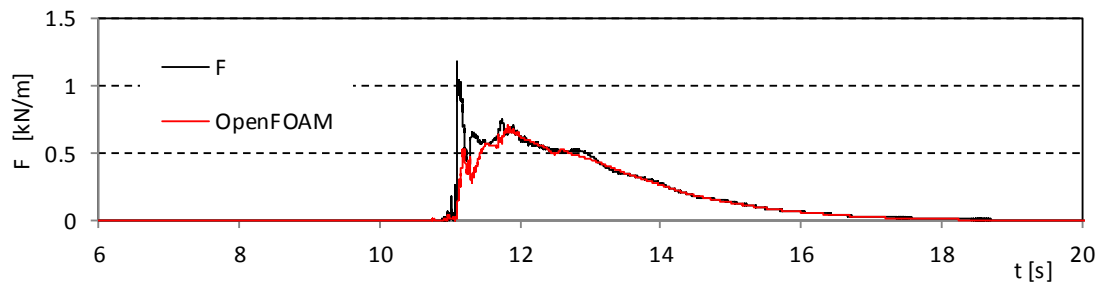


(b) 水理試験によるひずみ計測結果

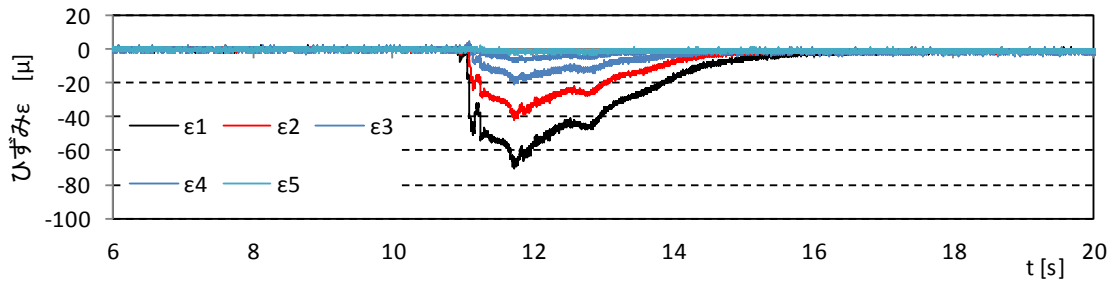


(c) 構造解析によるひずみ解析結果

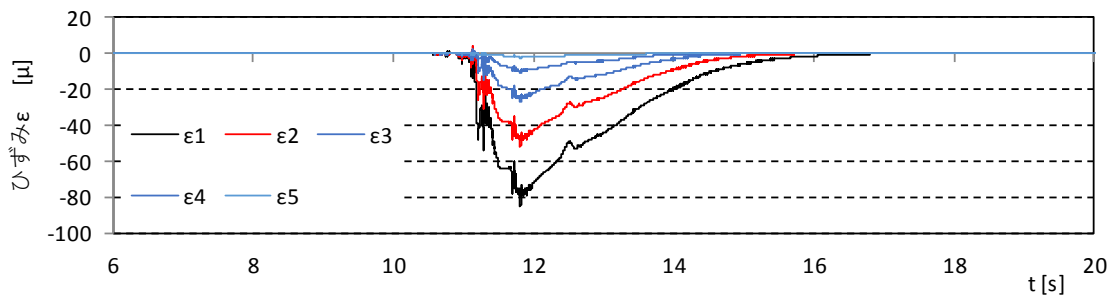
図- 8.4.3 波力およびひずみ時系列比較図 (単純勾配, 堤体 TypeC, 堤体位置 0.625m, Wc11)



(a)水理試験による波力計測結果

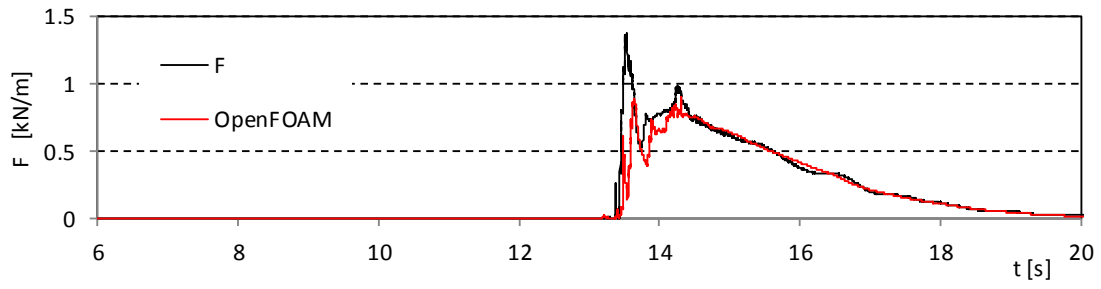


(b)水理試験によるひずみ計測結果

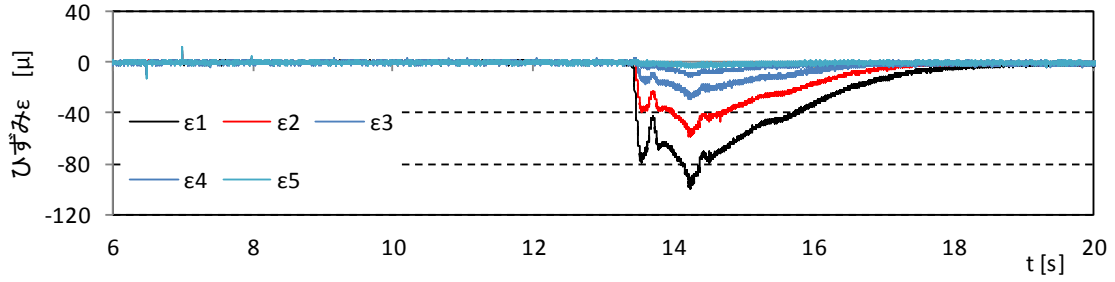


(c)構造解析によるひずみ解析結果

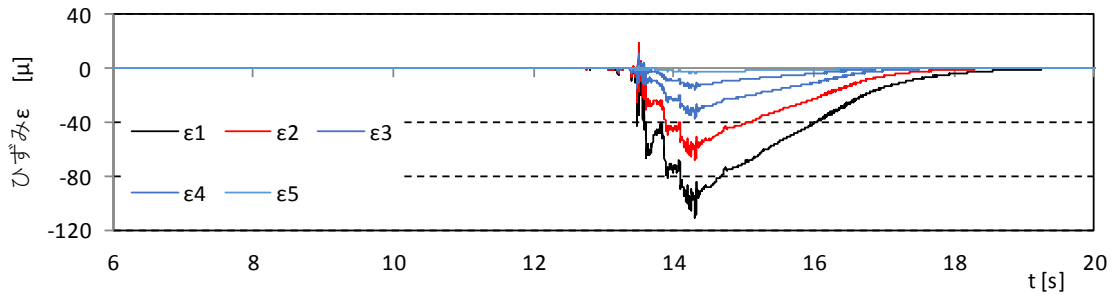
図- 8.4.3 波力およびひずみ時系列比較図 (単純勾配, 堤体 TypeC, 堤体位置 0.625m, Wc12)



(a) 数値解析による波力再現結果

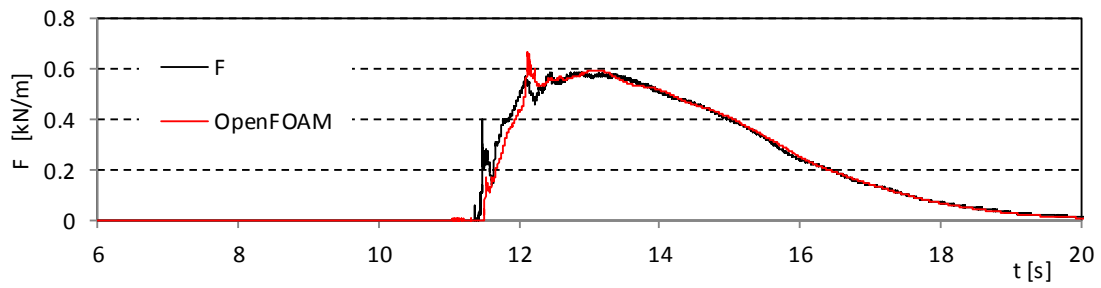


(b) 水理試験によるひずみ計測結果

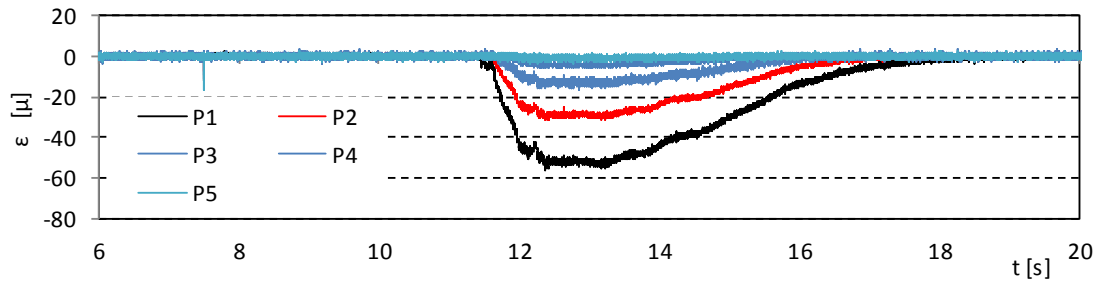


(c) 構造解析によるひずみ解析結果

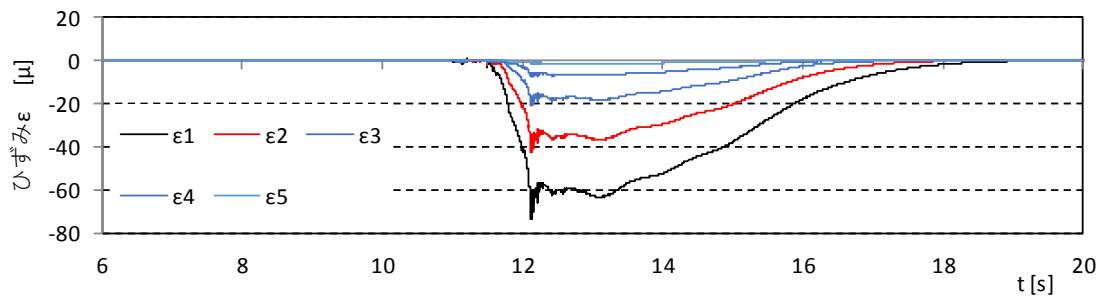
図- 8.4.3 波力およびひずみ時系列比較図 (単純勾配, 堤体 TypeC, 堤体位置 0.625m, Wc13)



(a) 数値解析による波力再現結果

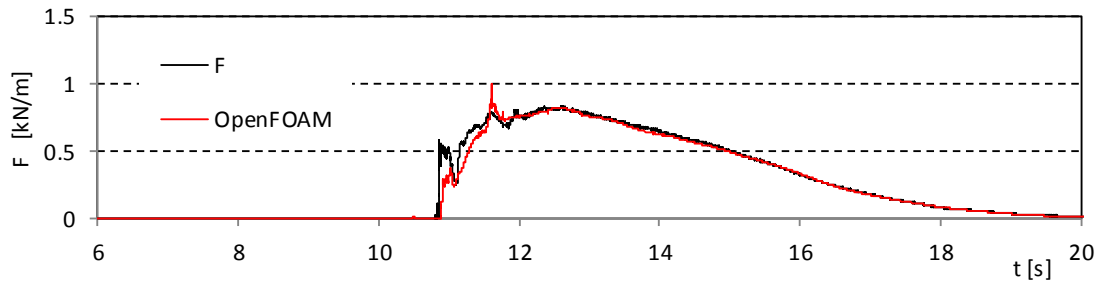


(b) 水理試験によるひずみ計測結果

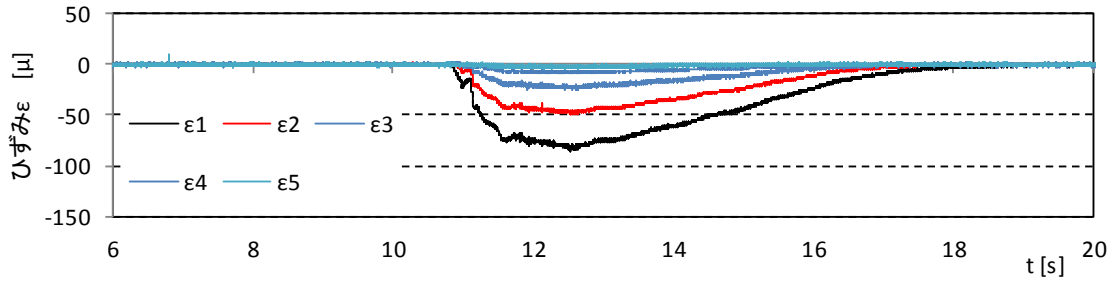


(c) 構造解析によるひずみ解析結果

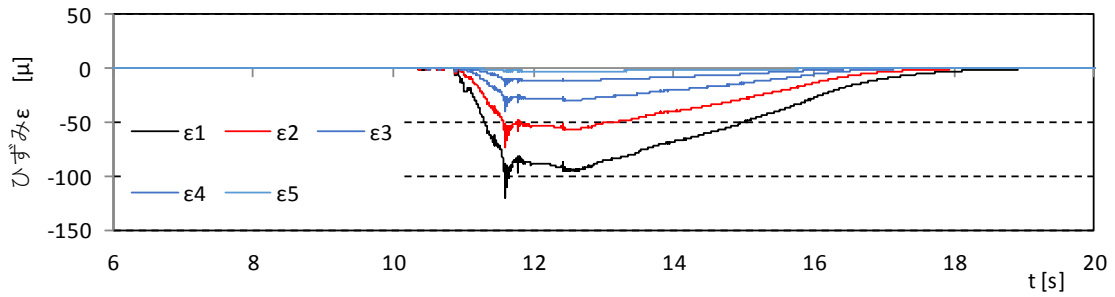
図- 8.4.3 波力およびひずみ時系列比較図 (単純勾配, 堤体 TypeC, 堤体位置 0.625m, Wc21)



(a) 数値解析による波力再現結果

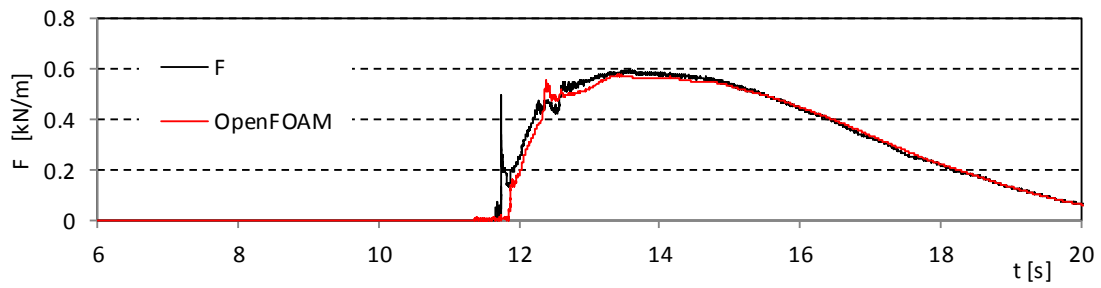


(b) 水理試験によるひずみ計測結果

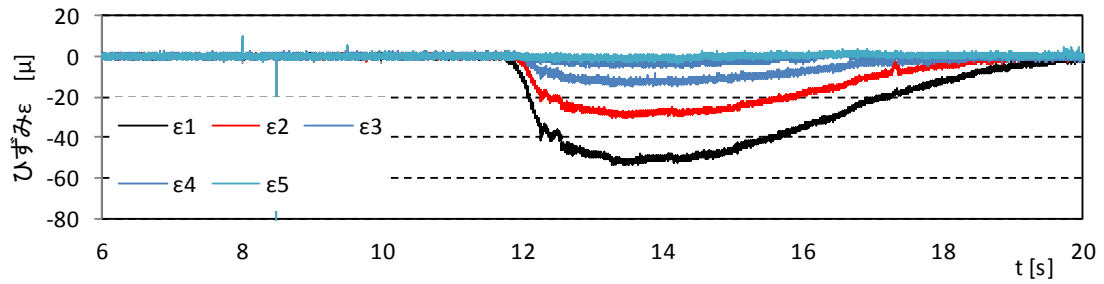


(c) 構造解析によるひずみ解析結果

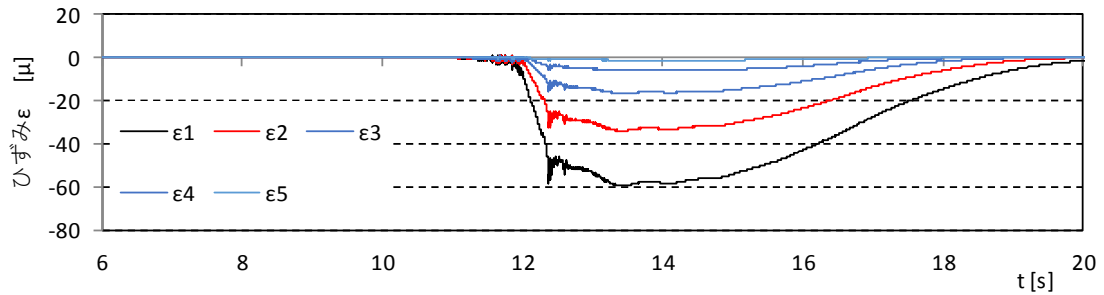
図- 8.4.3 波力およびひずみ時系列比較図 (単純勾配, 堤体 TypeC, 堤体位置 0.625m, Wc22)



(a) 数値解析による波力再現結果

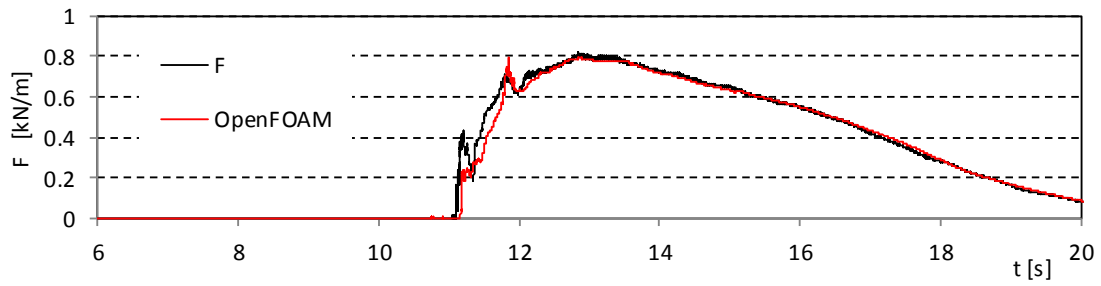


(b) 水理試験によるひずみ計測結果

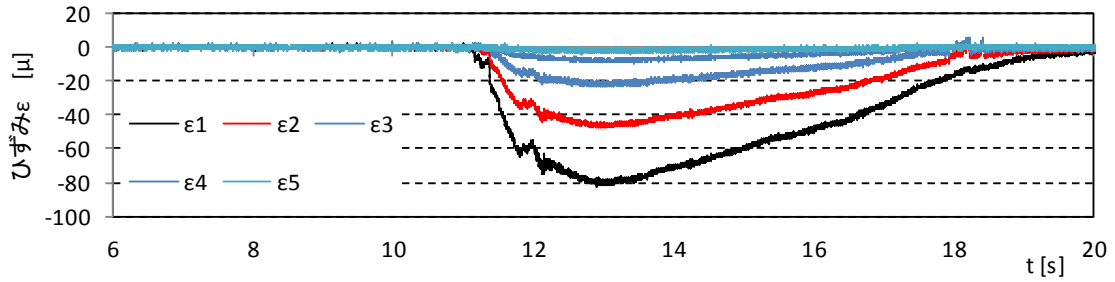


(c) 構造解析によるひずみ解析結果

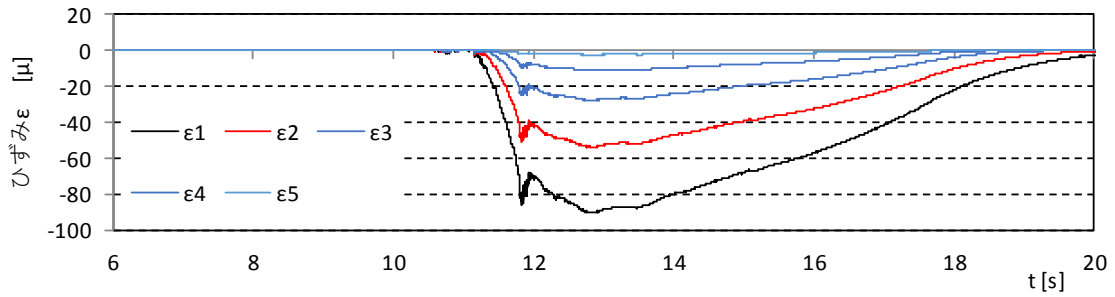
図- 8.4.3 波力およびひずみ時系列比較図 (単純勾配, 堤体 TypeC, 堤体位置 0.625m, Wc31)



(a) 数値解析による波力再現結果

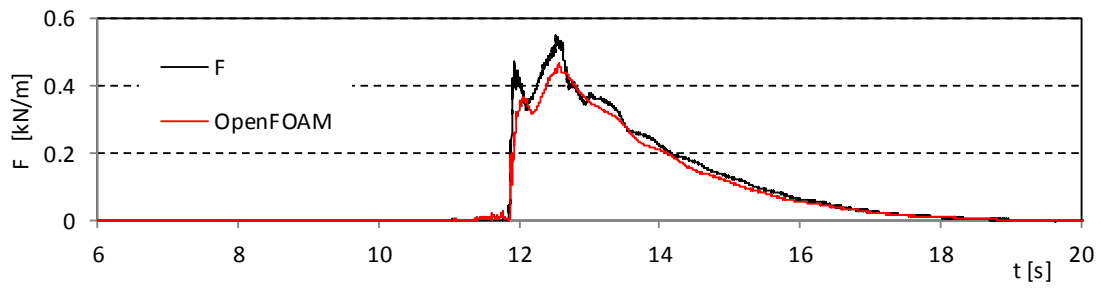


(b) 水理試験によるひずみ計測結果

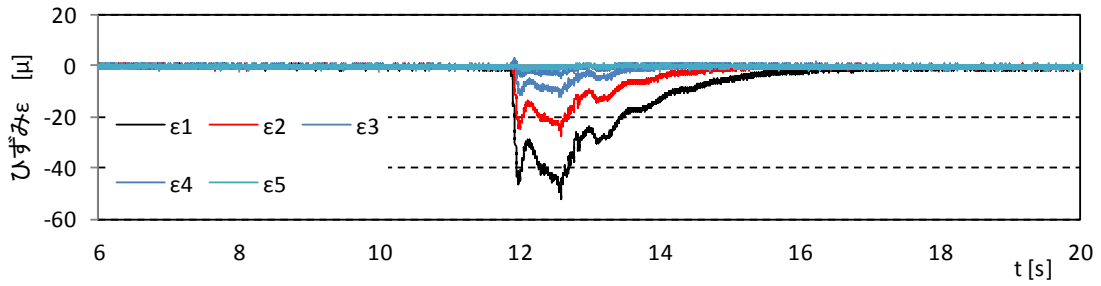


(c) 構造解析によるひずみ解析結果

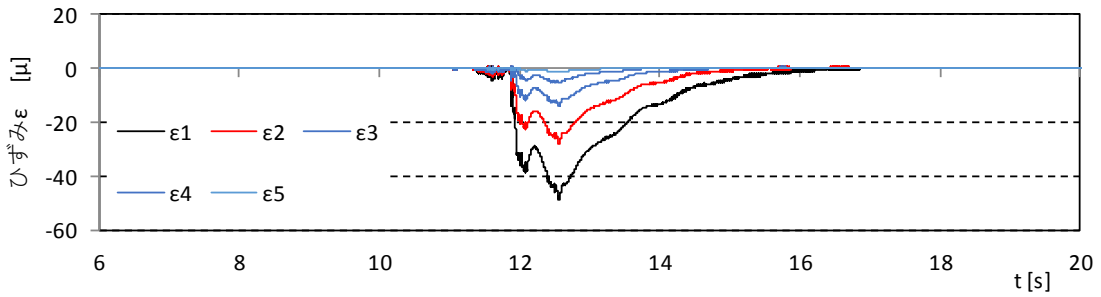
図- 8.4.3 波力およびひずみ時系列比較図 (単純勾配, 堤体 TypeC, 堤体位置 0.625m, Wc32)



(a) 数値解析による波力再現結果

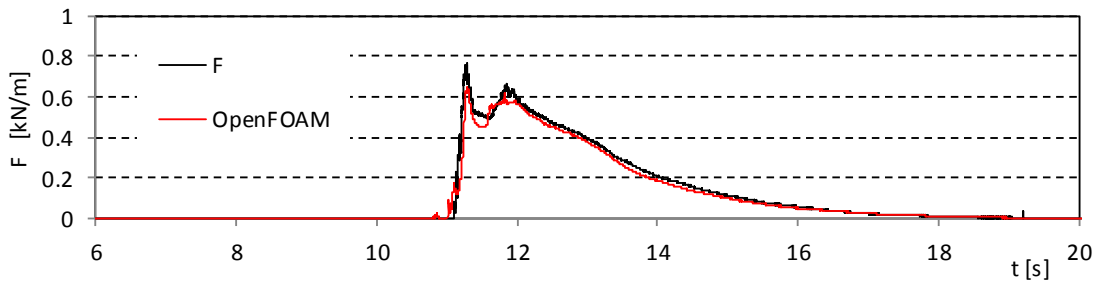


(b) 水理試験によるひずみ計測結果

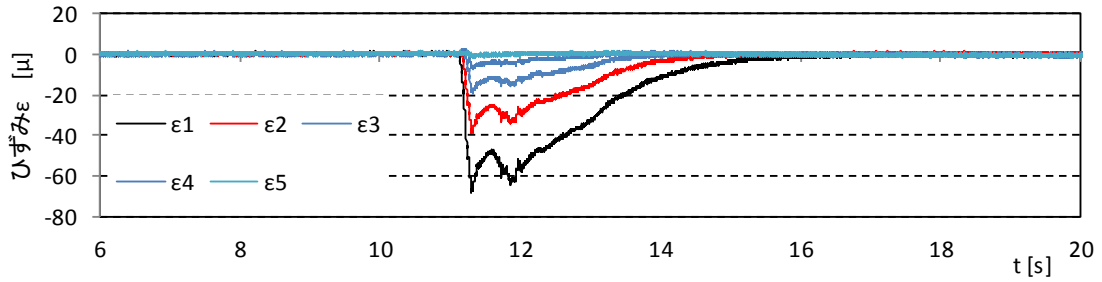


(c) 構造解析によるひずみ解析結果

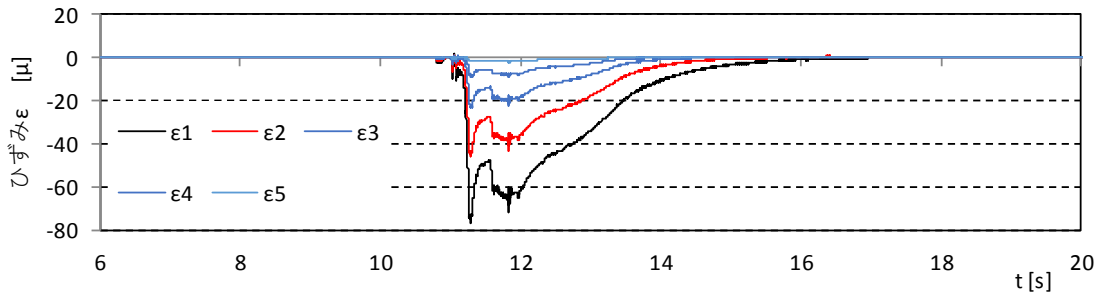
図- 8.4.4 波力およびひずみ時系列比較図 (直立護岸, 堤体 TypeC, 堤体位置 0m, Wc11)



(a) 数値解析による波力再現結果

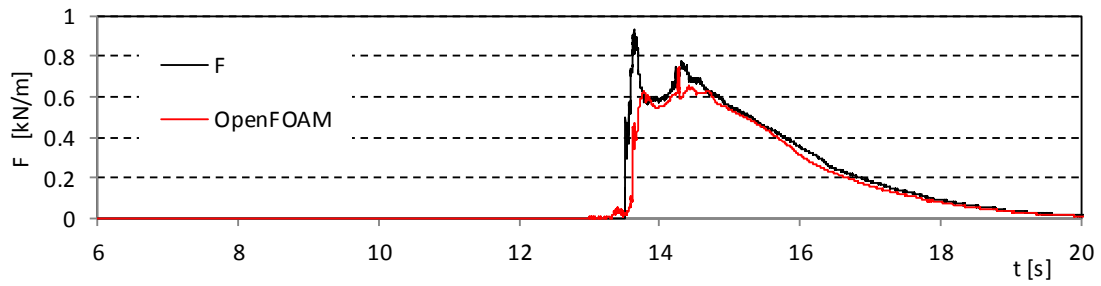


(b) 水理試験によるひずみ計測結果

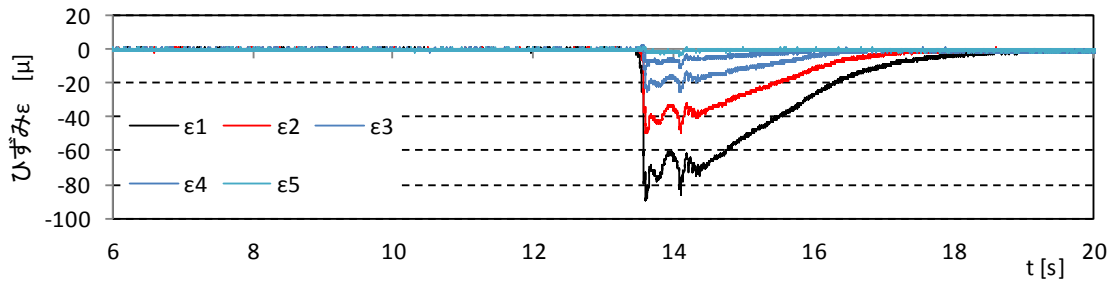


(c) 構造解析によるひずみ解析結果

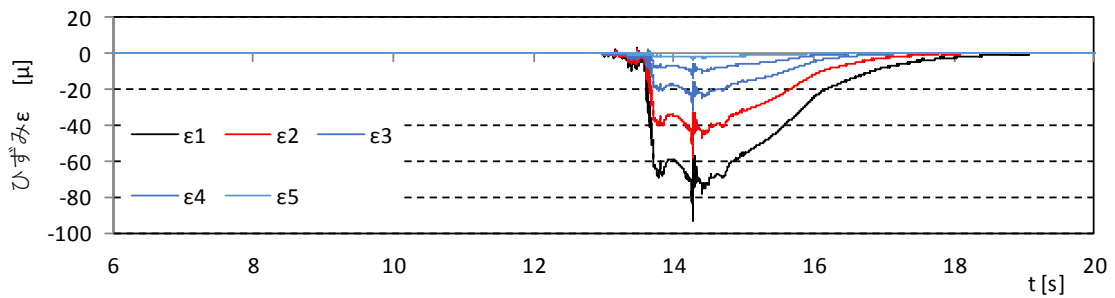
図- 8.4.4 波力およびひずみ時系列比較図 (直立護岸, 堤体 TypeC, 堤体位置 0m, Wc12)



(a) 数値解析による波力再現結果

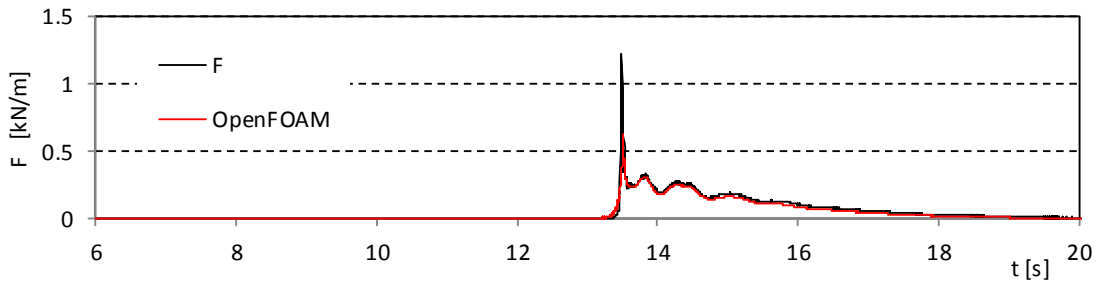


(b) 水理試験によるひずみ計測結果

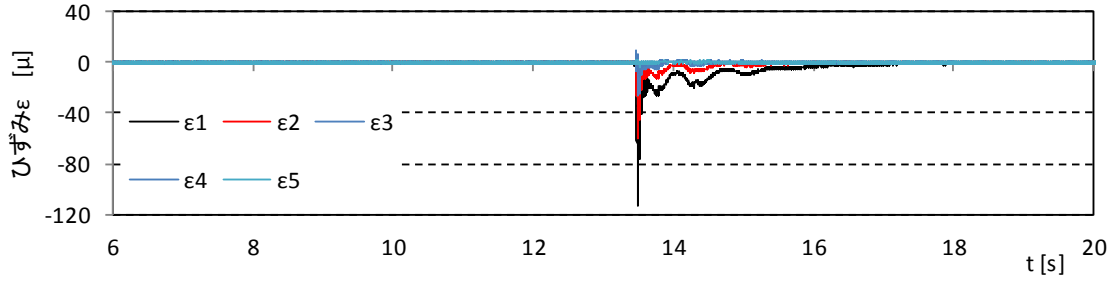


(c) 構造解析によるひずみ解析結果

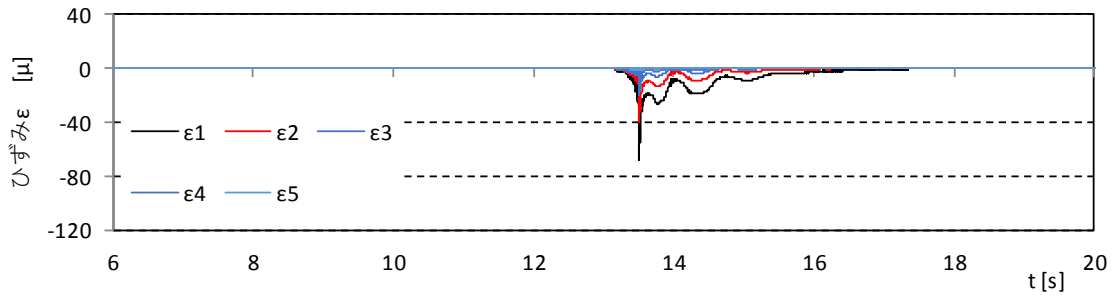
図- 8.4.4 波力およびひずみ時系列比較図 (直立護岸, 堤体 TypeC, 堤体位置 0m, Wc13)



(a) 数値解析による波力再現結果

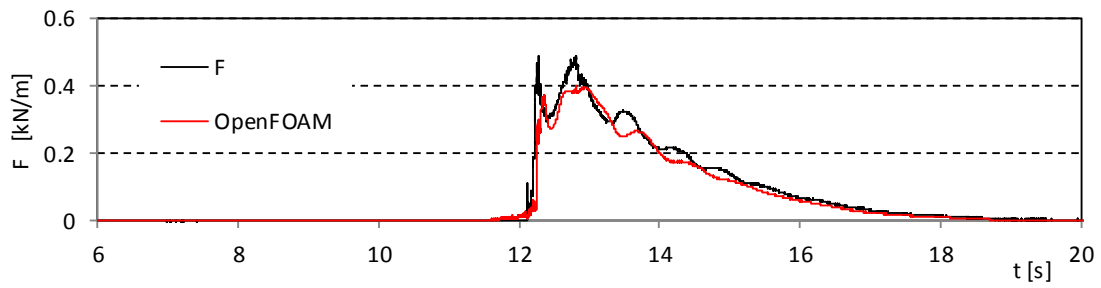


(b) 水理試験によるひずみ計測結果

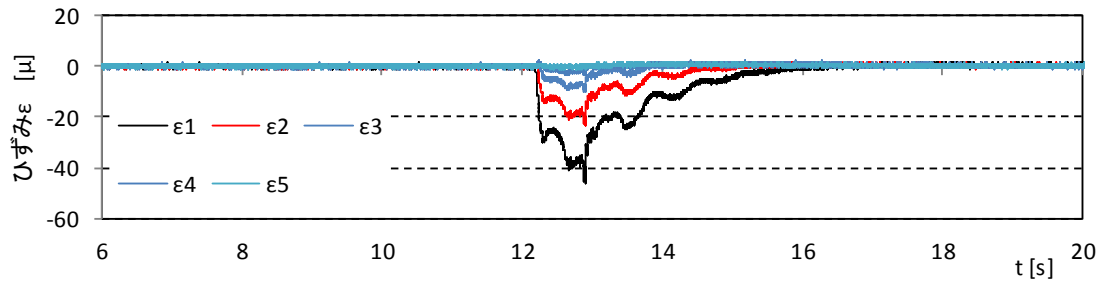


(c) 構造解析によるひずみ解析結果

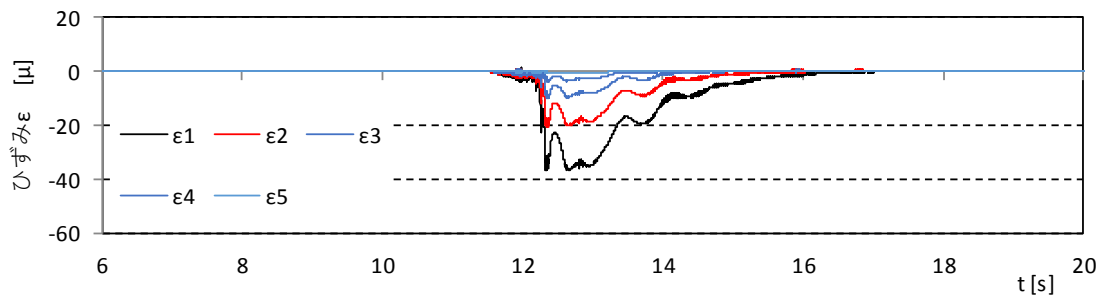
図- 8.4.4 波力およびひずみ時系列比較図 (直立護岸, 堤体 TypeC, 堤体位置 0m, Wc14)



(a) 数値解析による波力再現結果

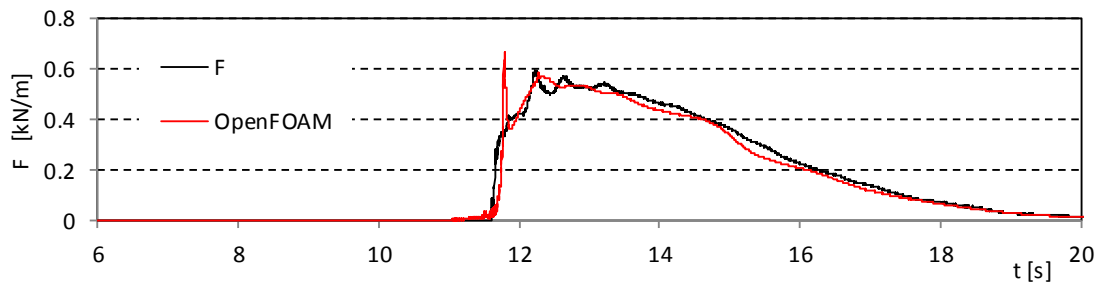


(b) 水理試験によるひずみ計測結果

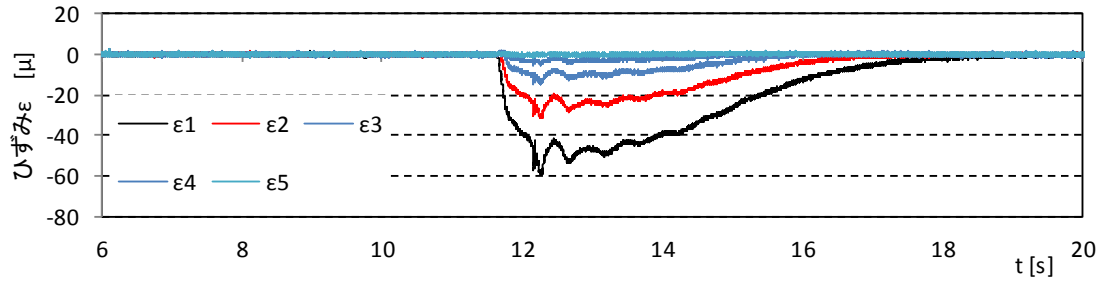


(c) 構造解析によるひずみ解析結果

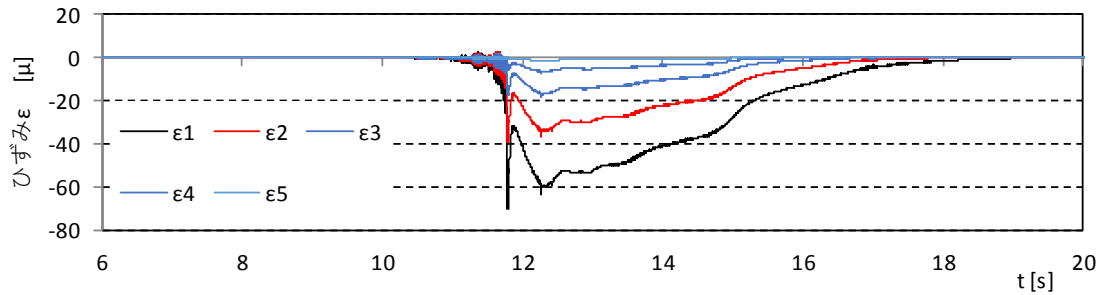
図- 8.4.4 波力およびひずみ時系列比較図 (直立護岸, 堤体 TypeC, 堤体位置 0m, Wc15)



(a) 数値解析による波力再現結果

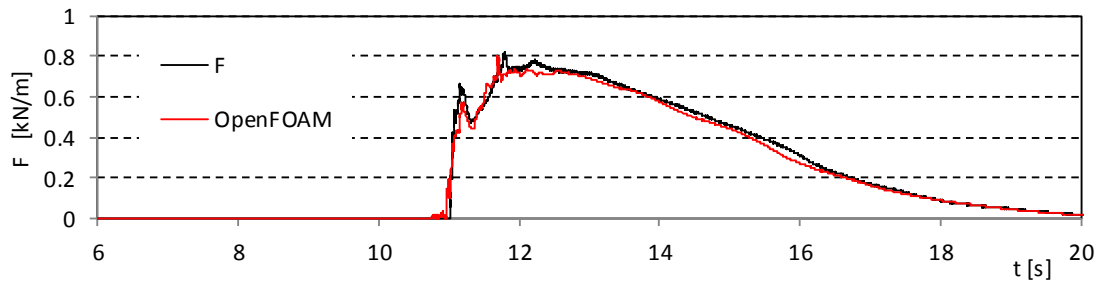


(b) 水理試験によるひずみ計測結果

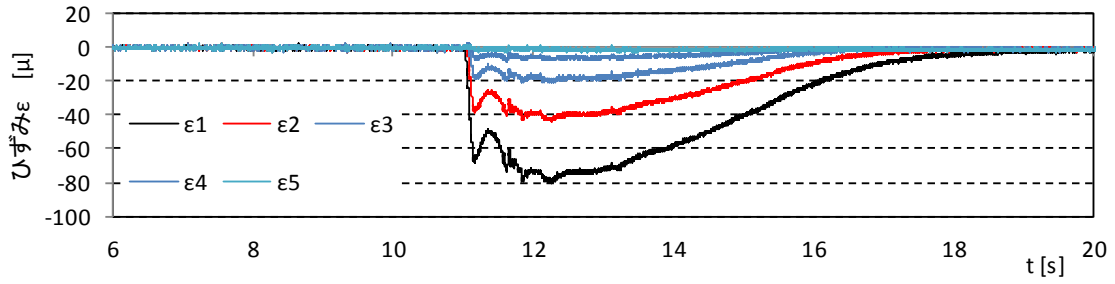


(c) 構造解析によるひずみ解析結果

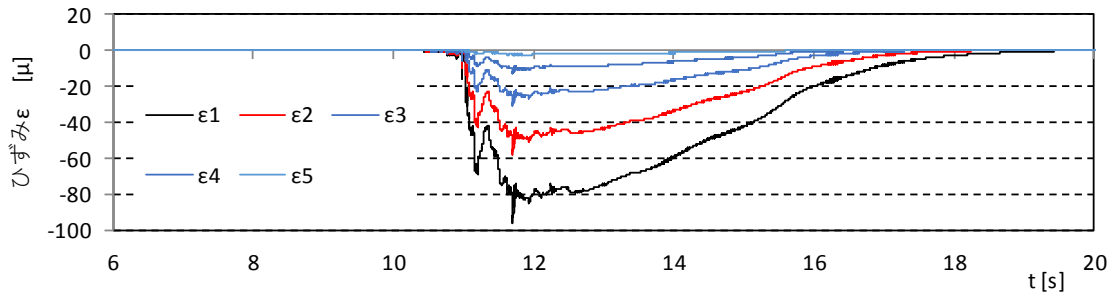
図- 8.4.4 波力およびひずみ時系列比較図 (直立護岸, 堤体 TypeC, 堤体位置 0m, Wc21)



(a) 数値解析による波力再現結果

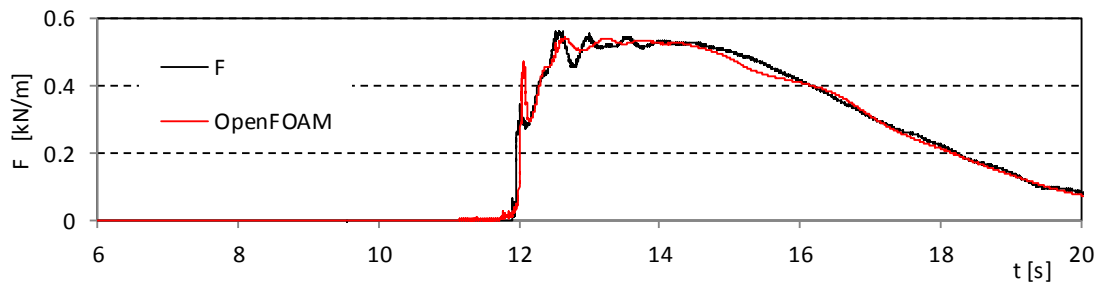


(b) 水理試験によるひずみ計測結果

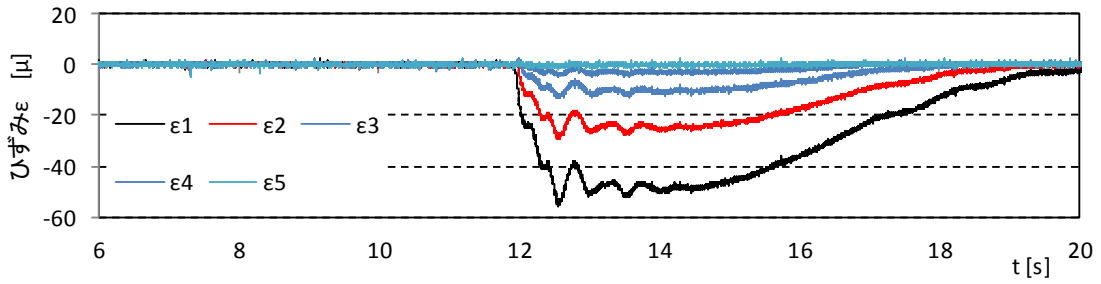


(c) 構造解析によるひずみ解析結果

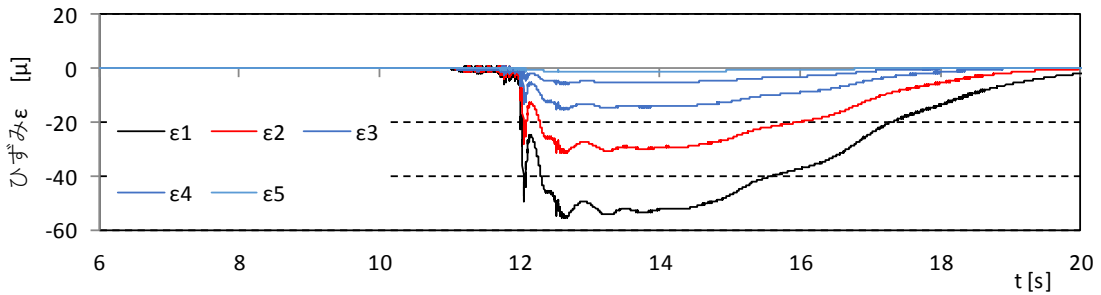
図- 8.4.4 波力およびひずみ時系列比較図 (直立護岸, 堤体 TypeC, 堤体位置 0m, Wc22)



(a) 数値解析による波力再現結果

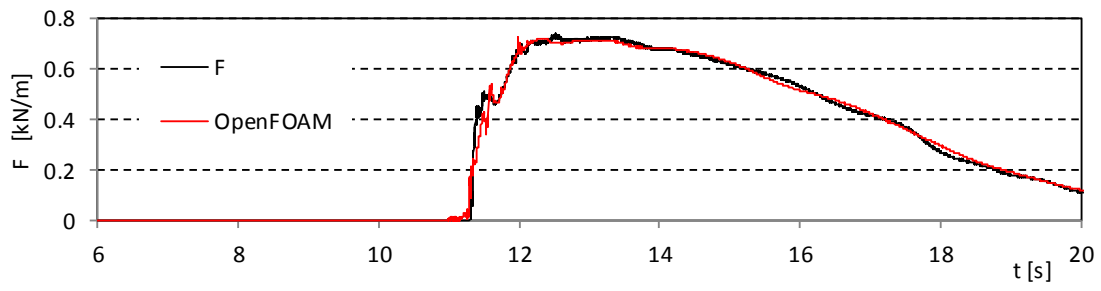


(b) 水理試験によるひずみ計測結果

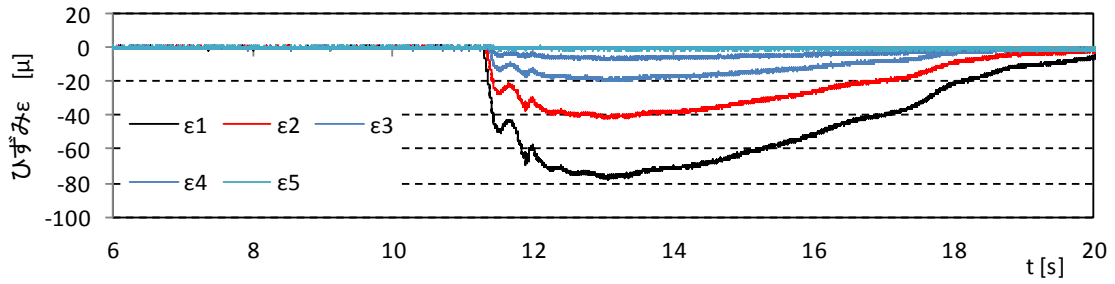


(c) 構造解析によるひずみ解析結果

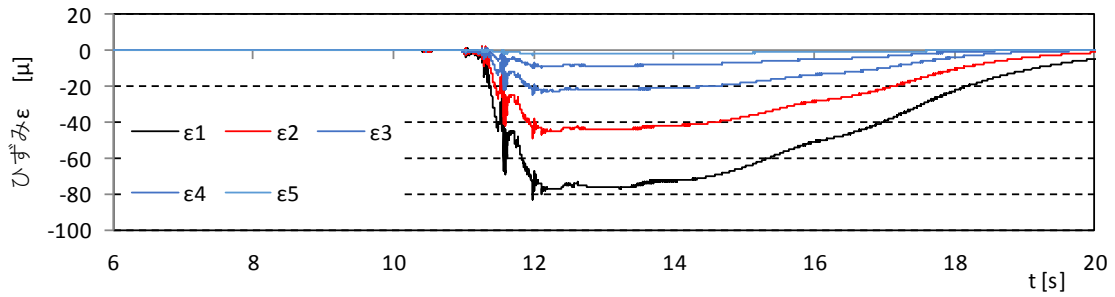
図- 8.4.4 波力およびひずみ時系列比較図 (直立護岸, 堤体 TypeC, 堤体位置 0m, Wc31)



(a) 数値解析による波力再現結果

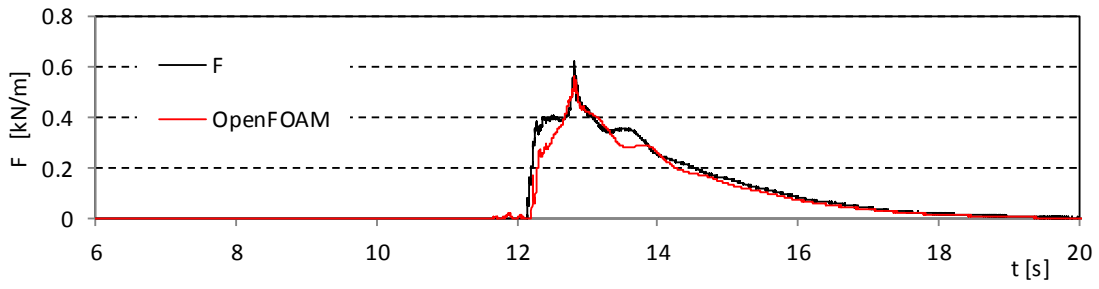


(b) 水理試験によるひずみ計測結果

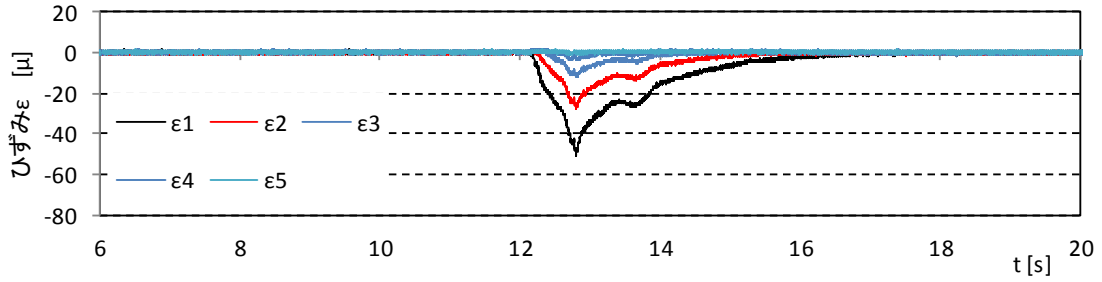


(c) 構造解析によるひずみ解析結果

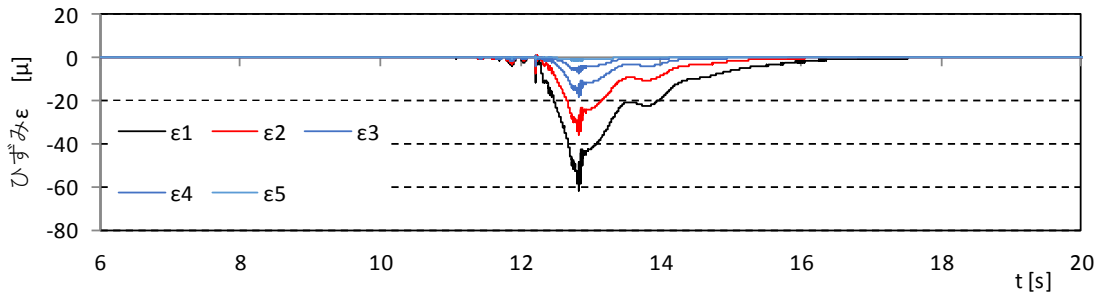
図- 8.4.4 波力およびひずみ時系列比較図 (直立護岸, 堤体 TypeC, 堤体位置 0m, Wc32)



(a) 数値解析による波力再現結果

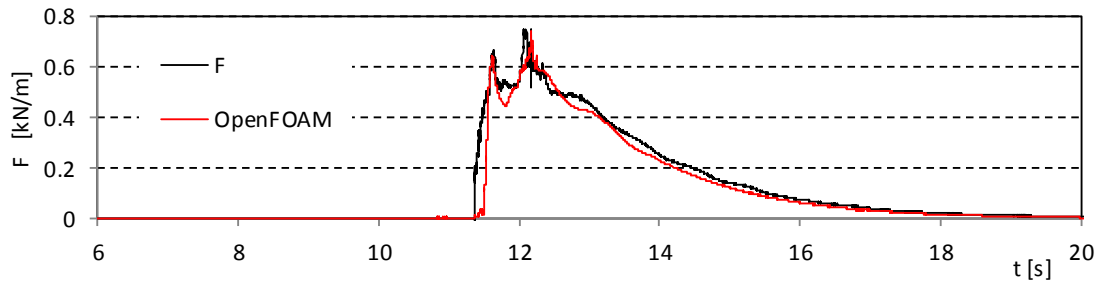


(b) 水理試験によるひずみ計測結果

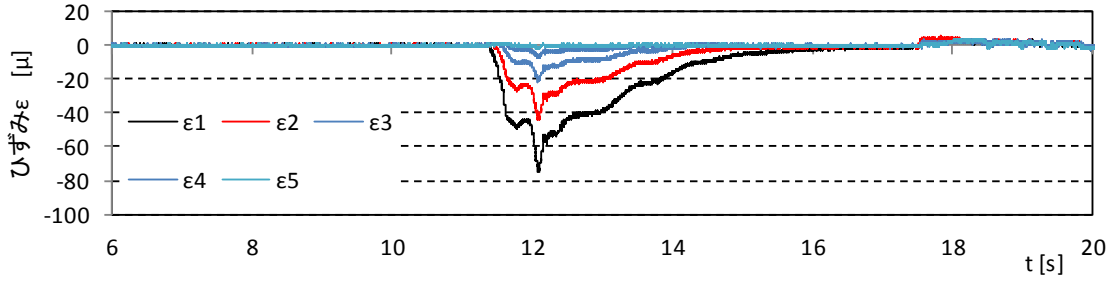


(d) 構造解析によるひずみ解析結果

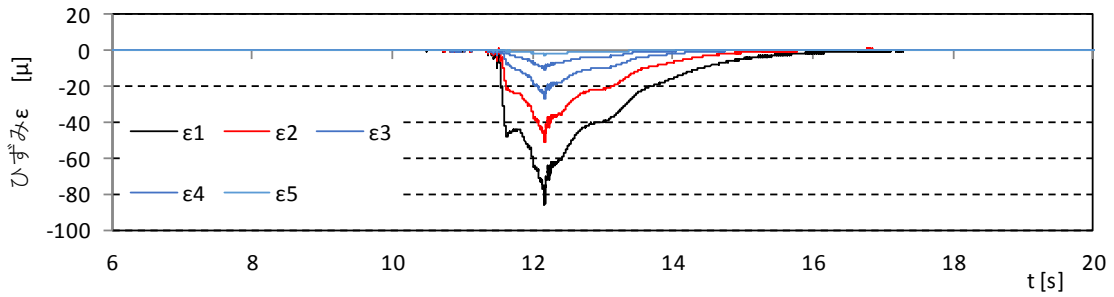
図- 8.4.5 波力およびひずみ時系列比較図 (直立護岸, 堤体 TypeC, 堤体位置 0.625m, Wc11)



(a) 数値解析による波力再現結果

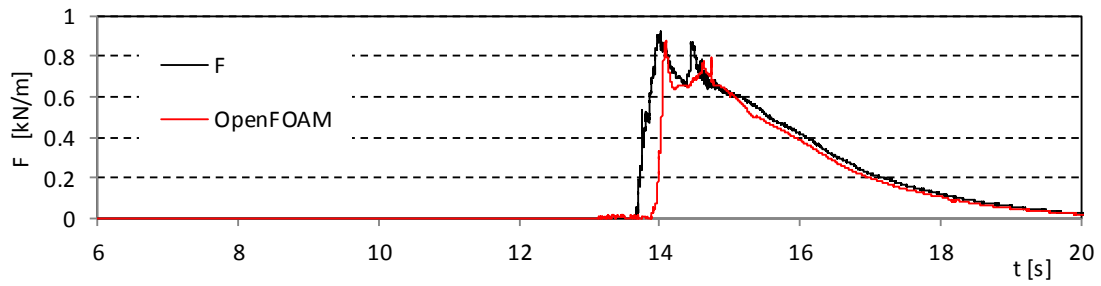


(b) 水理試験によるひずみ計測結果

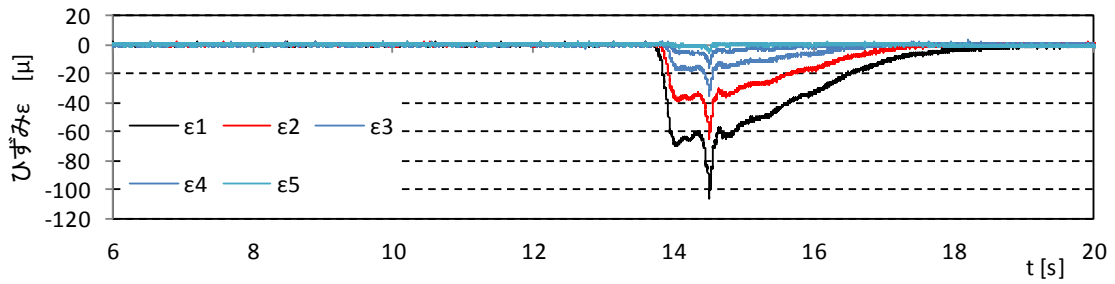


(c) 構造解析によるひずみ解析結果

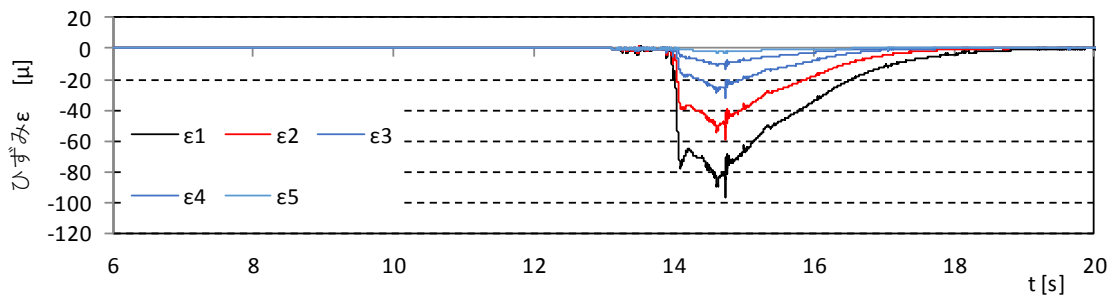
図- 8.4.5 波力およびひずみ時系列比較図 (直立護岸, 堤体 TypeC, 堤体位置 0.625m, Wc12)



(a) 数値解析による波力再現結果

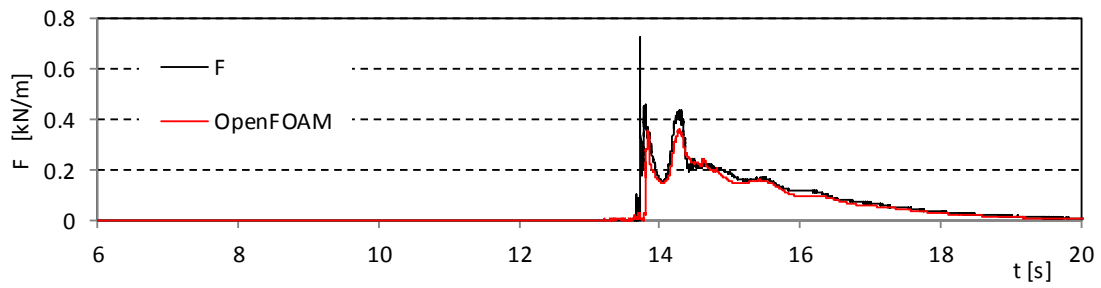


(b) 水理試験によるひずみ計測結果

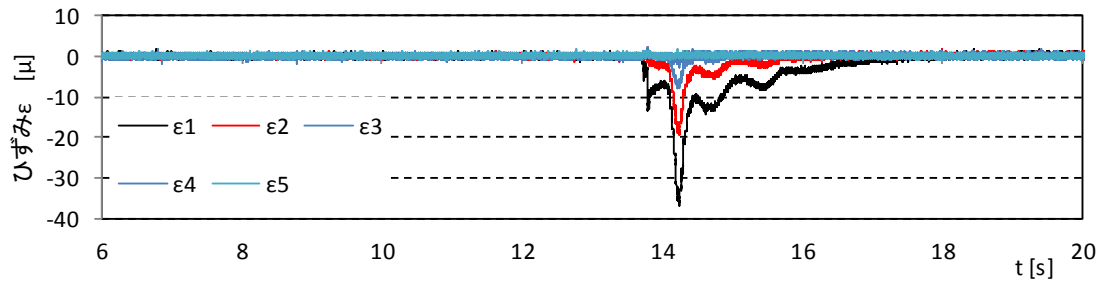


(c) 構造解析によるひずみ解析結果

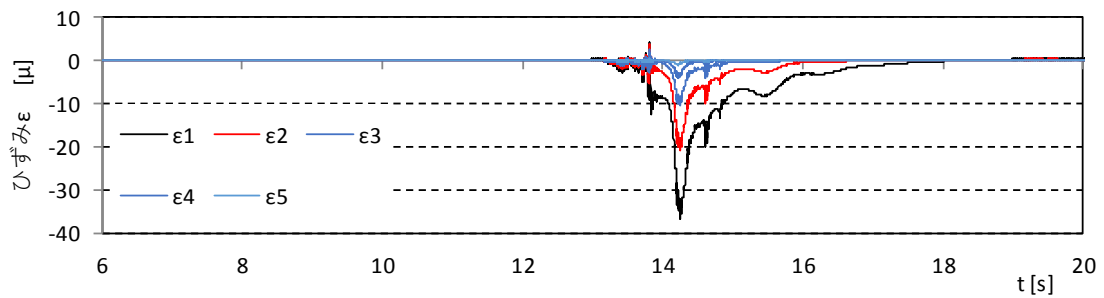
図- 8.4.5 波力およびひずみ時系列比較図 (直立護岸, 堤体 TypeC, 堤体位置 0.625m, Wc13)



(a) 数値解析による波力再現結果

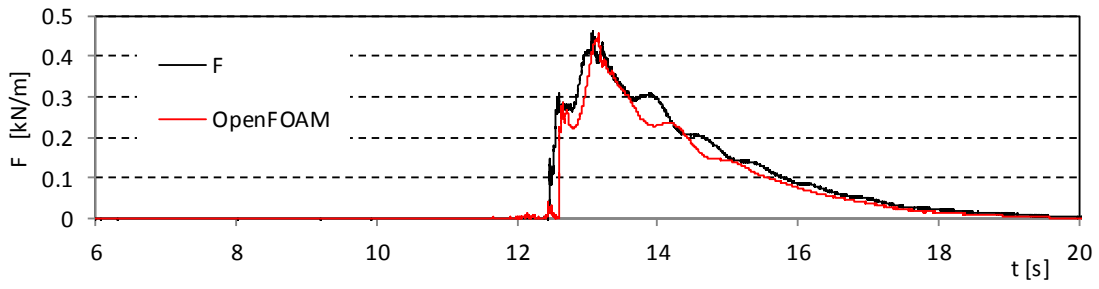


(b) 水理試験によるひずみ計測結果

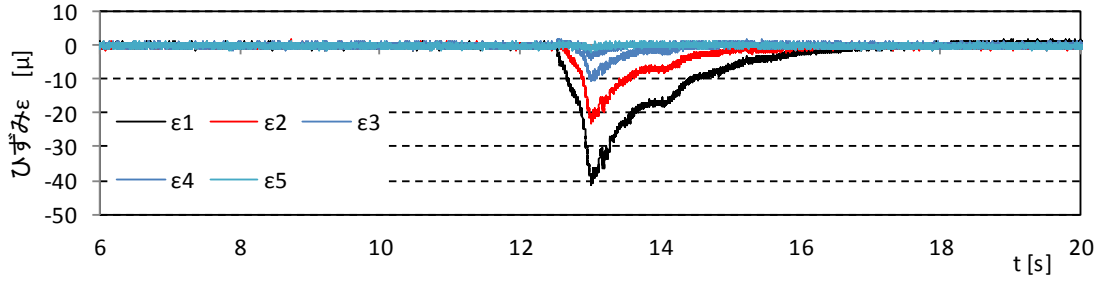


(c) 構造解析によるひずみ解析結果

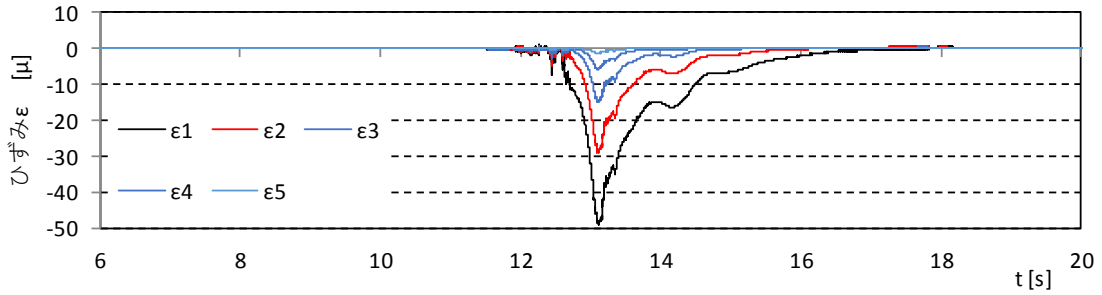
図- 8.4.5 波力およびひずみ時系列比較図 (直立護岸, 堤体 TypeC, 堤体位置 0.625m, Wc14)



(a) 数値解析による波力再現結果

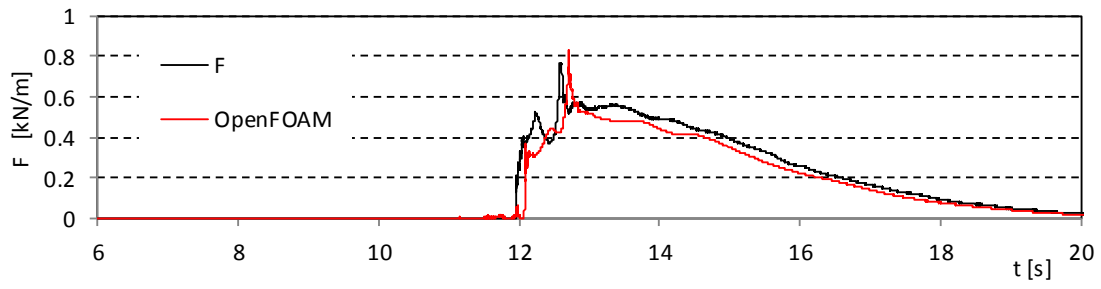


(b) 水理試験によるひずみ計測結果

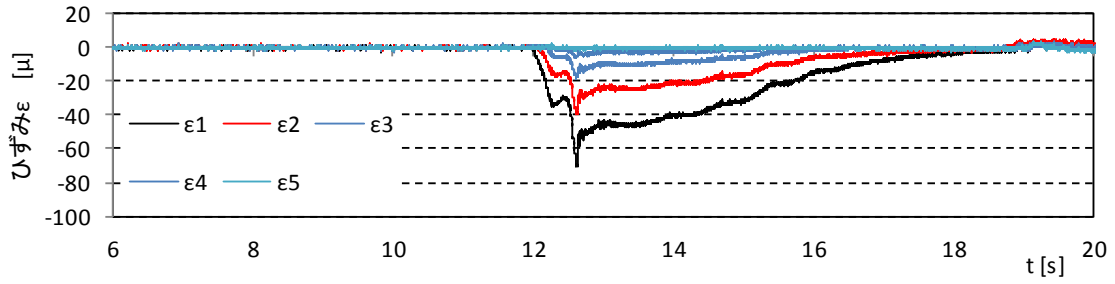


(c) 構造解析によるひずみ解析結果

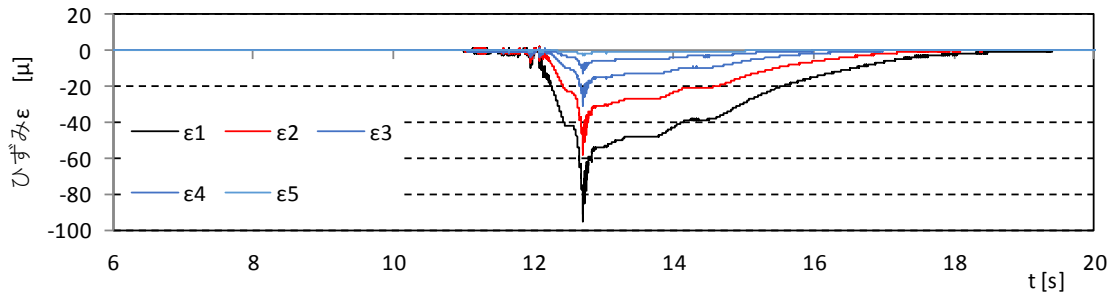
図- 8.4.5 波力およびひずみ時系列比較図 (直立護岸, 堤体 TypeC, 堤体位置 0.625m, Wc15)



(a) 数値解析による波力再現結果

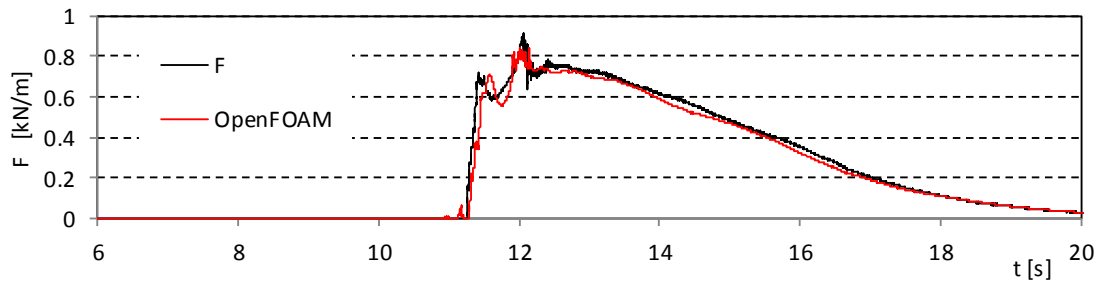


(b) 水理試験によるひずみ計測結果

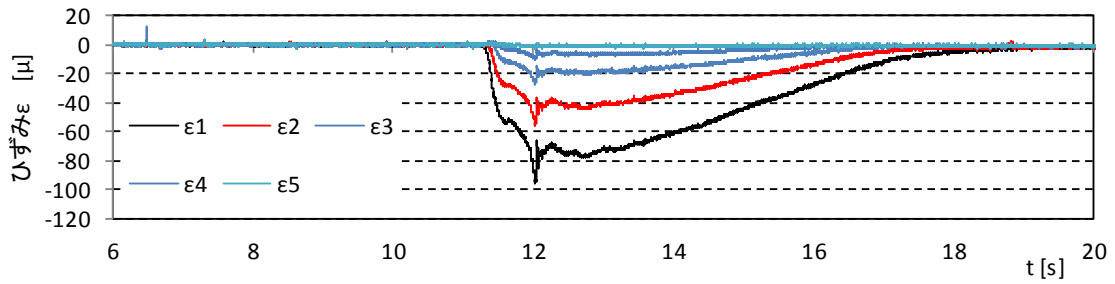


(c) 構造解析によるひずみ解析結果

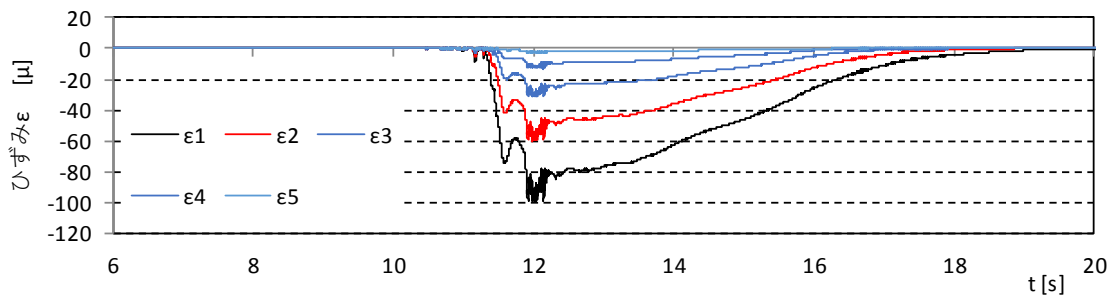
図- 8.4.5 波力およびひずみ時系列比較図 (直立護岸, 堤体 TypeC, 堤体位置 0.625m, Wc21)



(a) 数値解析による波力再現結果

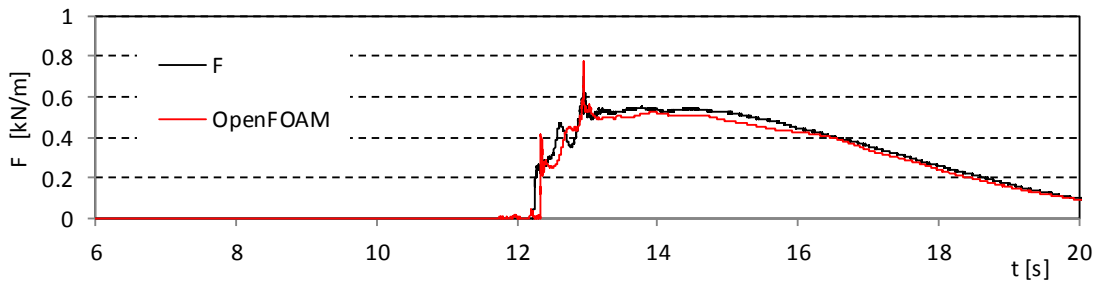


(b) 水理試験によるひずみ計測結果

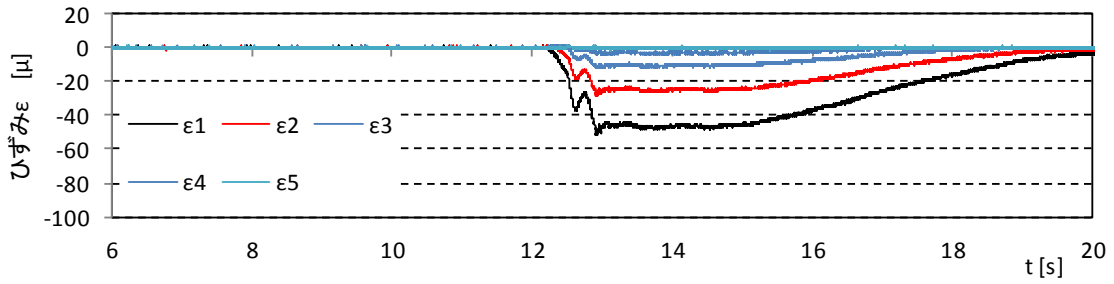


(c) 構造解析によるひずみ解析結果

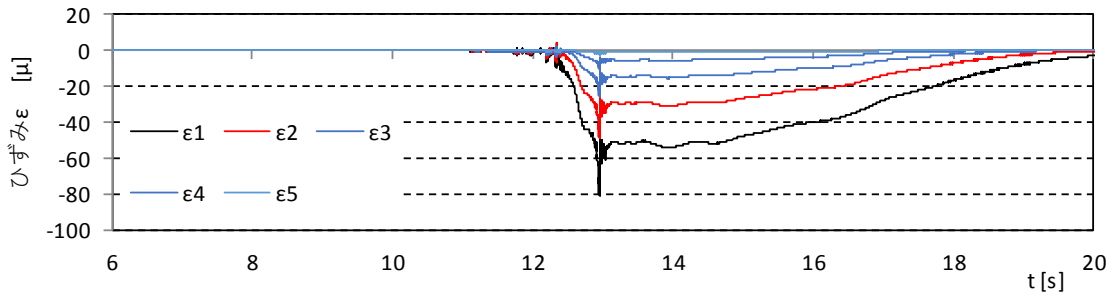
図- 8.4.5 波力およびひずみ時系列比較図 (直立護岸, 堤体 TypeC, 堤体位置 0.625m, Wc22)



(a) 数値解析による波力再現結果

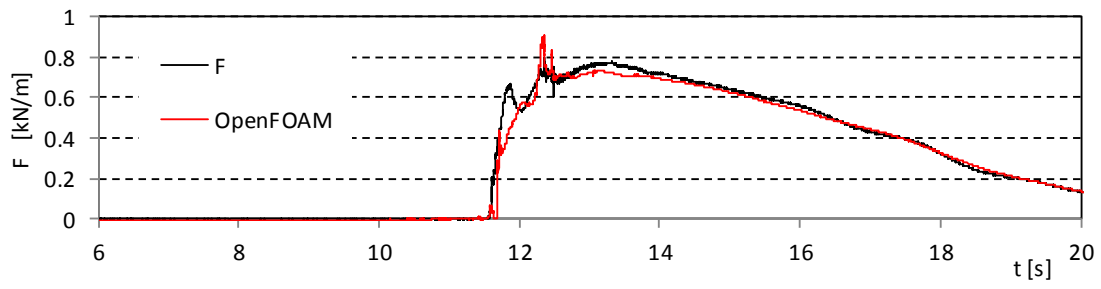


(b) 水理試験によるひずみ計測結果

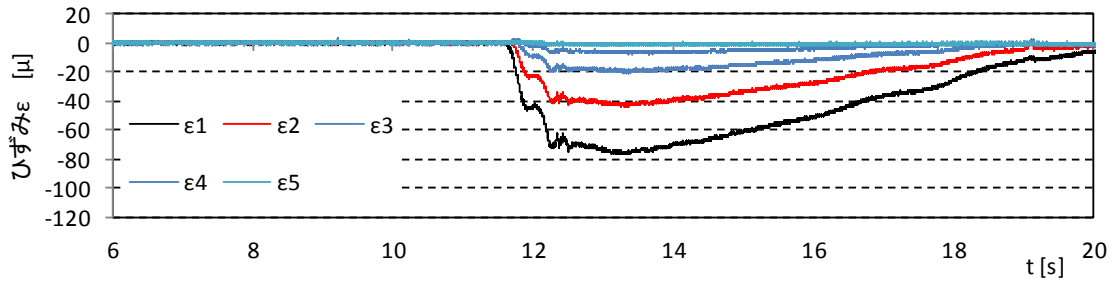


(c) 構造解析によるひずみ解析結果

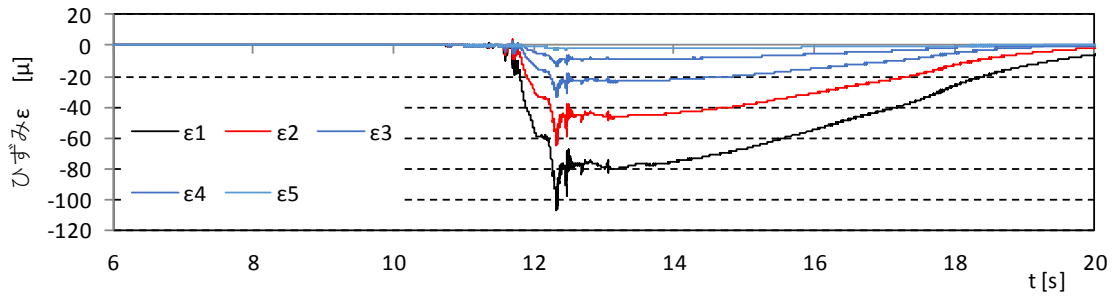
図- 8.4.5 波力およびひずみ時系列比較図 (直立護岸, 堤体 TypeC, 堤体位置 0.625m, Wc31)



(a) 数値解析による波力再現結果



(b) 水理試験によるひずみ計測結果



(c) 構造解析によるひずみ解析結果

図- 8.4.5 波力およびひずみ時系列比較図 (直立護岸, 堤体 TypeC, 堤体位置 0.625m, Wc32)

9. 既往データによる波圧特性評価の妥当性検討

9.1. 既往データ

これまでは、本事業の中で実施した水理試験及びシミュレーション解析の結果について示した。以降では、これに既実施の以下の類似事業で取得した結果を加え、前述した波圧特性の評価結果について、広範囲のデータを用いた検討を実施する。なお、試験条件等の詳細については、個々の報告書を参照されたい。

類似事業

- ・「平成27年度原子力施設等防災対策等委託費（耐津波設計・フラジリティ評価手法の整備に係る防潮堤水理試験（その1）事業」（以降、「H27事業」という。）
- ・「平成28年度原子力施設等防災対策等委託費（耐津波設計・フラジリティ評価手法の整備に係る防潮堤水理試験（障害物影響）事業」（以降、「H28事業」という。）

9.2. フルード数と水深係数の関係

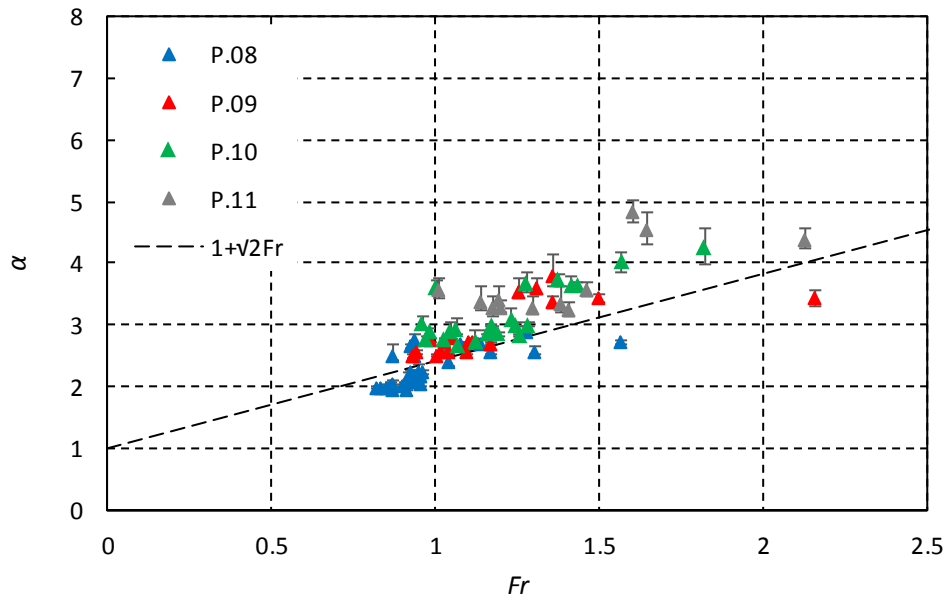
持続波圧のフルード数と水深係数の関係について、本年度事業で実施した水理試験のデータに、H27 事業、H28 事業の水理試験のデータを加えたものを図-9.2.1～図-9.2.3 に示す。なお、堤体位置 P.08～P.11 については、H28 事業データについては、堤体位置 0, 0.625, 1.25 m をそれぞれ P.08, P.09, P.10 とし、H27 事業データについては、堤体位置 0, 1.25, 2.5 m をそれぞれ P.08, P.10, P.11 として示している。7.2.1 に示したものと同様に、通過波の代表時刻について最大浸水深基準、95%最大浸水深基準、最大比エネルギー基準としたものについてそれぞれ示す。図中の点は 15 回の繰り返し試験の平均を示しており、縦線はそのうちの最大値と最小値を示す。また図中には比較として、水深係数の評価式の例として $\alpha=1+\sqrt{2Fr}$ の直線を示した。

特に直立護岸の、P.10 や P.11 においてフルード数が大きい場合に、水深係数が大きい傾向にあり、ばらつきも大きい。津波が陸上を遡上すると、陸側ほど流速が大きくフルード数が大きくなり、また水深に比較して流速が大きいことから堤体での打ち上げも大きくなって打ち上げられた水塊の落下によって生じる波圧が卓越する。この波圧はばらつきが大きくなる傾向にあるため、上述の特徴が表れていると考えられる。P.08 や P.09 では、準定常的な重複波領域での持続波圧が大きく、水塊落下による波圧が卓越しないため、水深係数のばらつきが小さく、評価式に近い値となっていると考えられる。

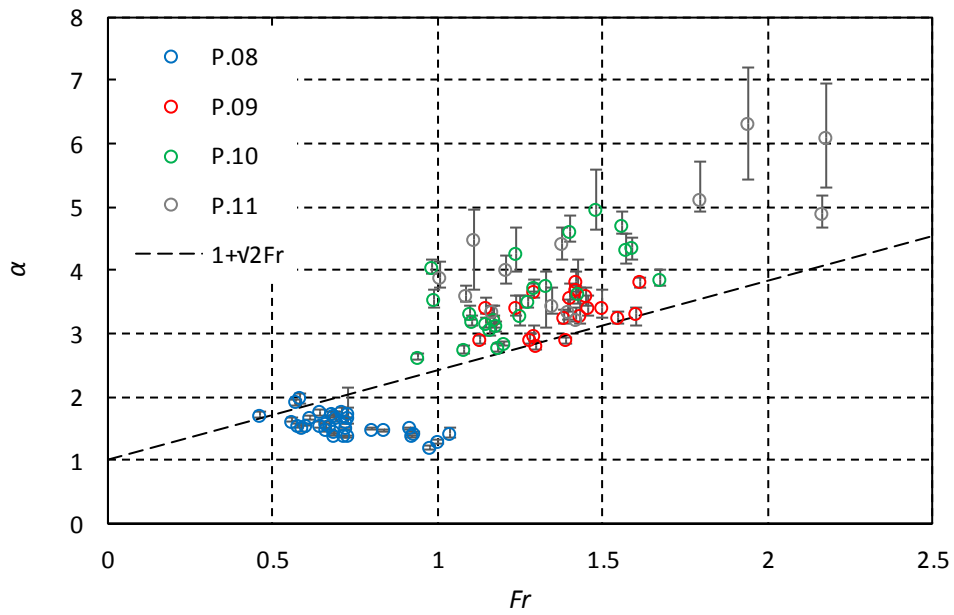
最大浸水深基準と 95%最大浸水深基準を比較すると、単純勾配においては 95%最大浸水深基準とすることによって、フルード数と水深係数の関係が評価式の直線上に一致ようになる。これは、最大浸水深の発生時刻が最大波力の発生時刻よりも遅れており、95%最大浸水深の発生時刻と最大波力の発生時刻が近いためと考えられる。一方直立護岸では、95%最大浸水深の方が評価式に近い値になっているものの、ばらつきは単純勾配の結果よりも大きい。

比エネルギー最大基準については、フルード数が大きい場合にばらつきが大きいものの、エネルギー保存式から導かれた評価式 $\alpha=1/2Fr^2+1$ と良い一致を示す。

直立護岸の P.08 に着目すると、最大浸水深基準、95%最大浸水深基準の場合には、水深係数がフルード数に関係なくほぼ一定値を示しているのに対し、比エネルギー最大を基準にした場合は、フルード数による水深係数の変化が明瞭に現れている。直立護岸の堤体が汀線位置のケースでは、波圧は堤体前面のせり上がり高によって決まる。このせり上がり高は、波の持つ比エネルギーによって決まると考えられ、また通過波における汀線を通る流れも、これと同じ比エネルギーを持つことから、最大比エネルギーと水深係数の関連性が強く表れるものと考えられる。

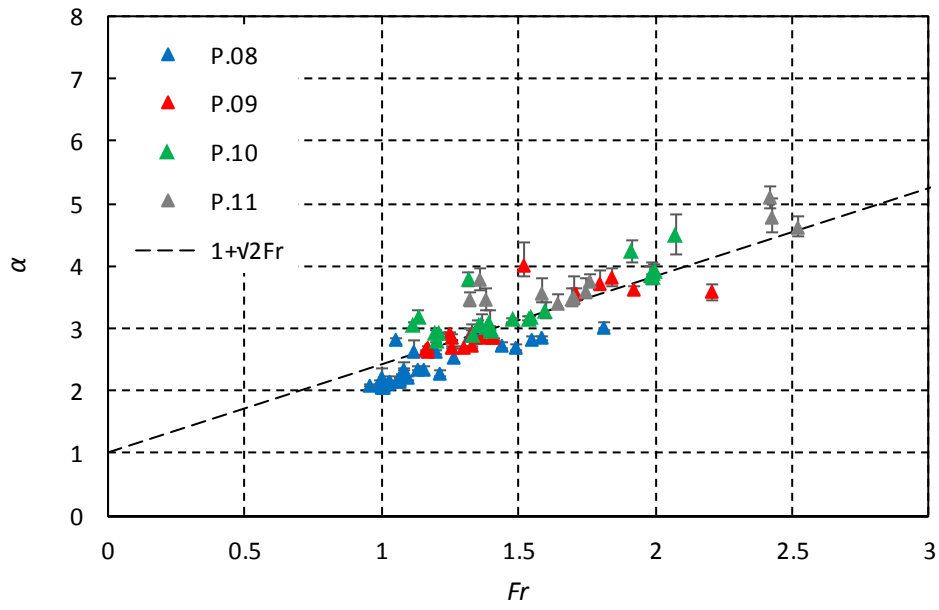


(a)単純勾配

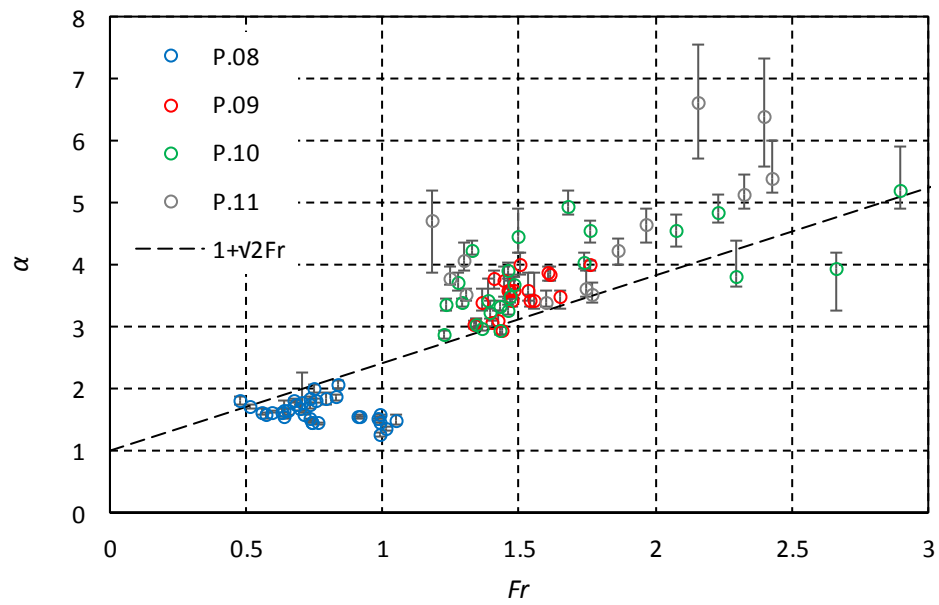


(b)直立護岸

図- 9.2.1 フルード数と水深係数の関係 (最大浸水深を基準)

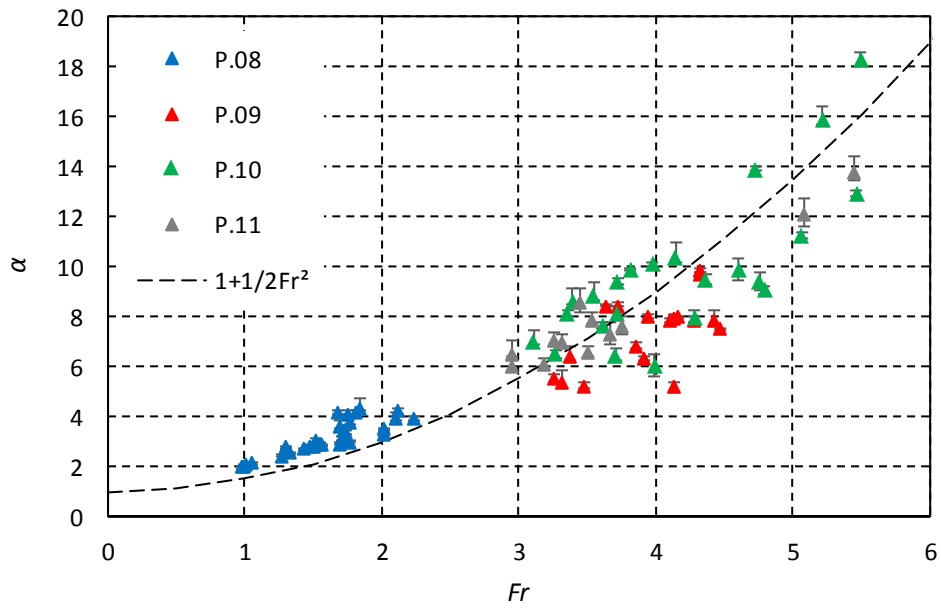


(a)単純勾配

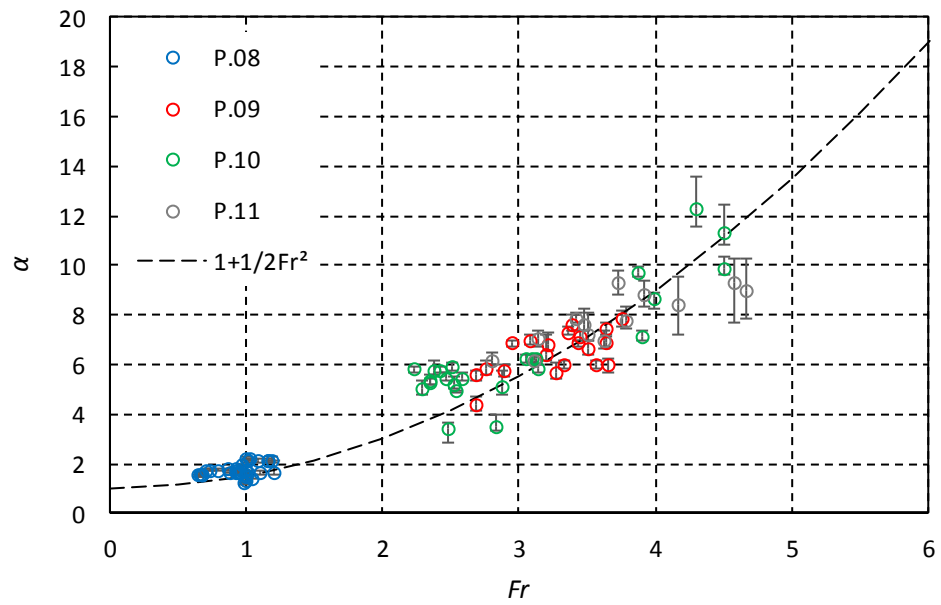


(b)直立護岸

図-9.2.2 フルード数と水深係数の関係 (95%最大浸水深を基準)



(a)単純勾配



(b)直立護岸

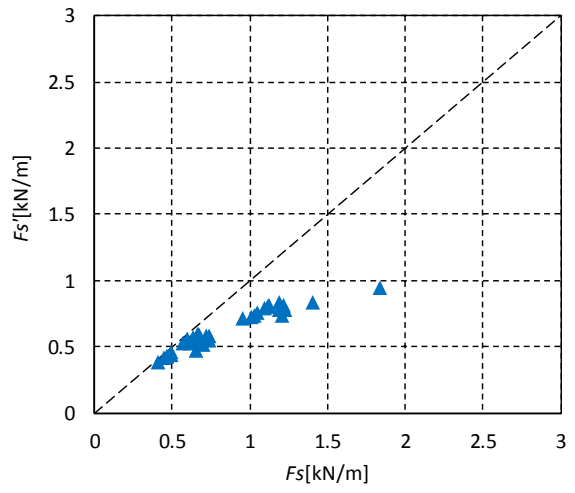
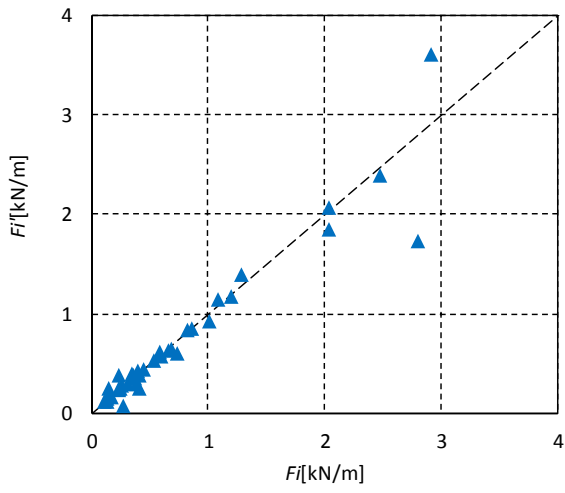
図-9.2.3 フルード数と水深係数の関係 (比エネルギー最大を基準)

9.3. 越流による波力の低減効果

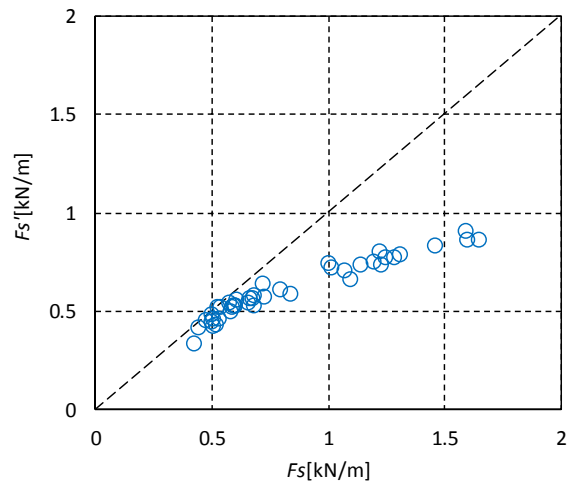
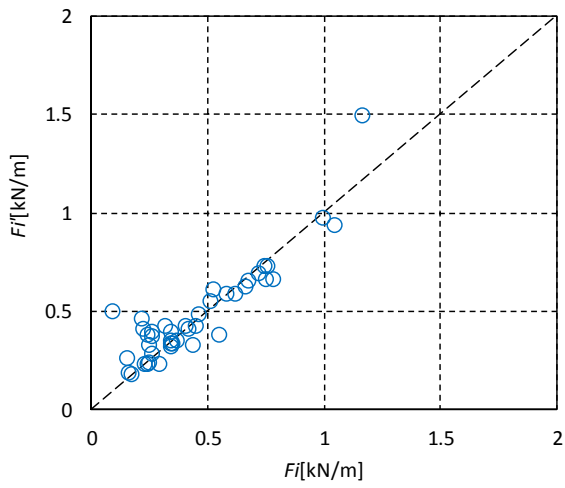
非越流時と越流時の波力の比較について、本年度事業で実施した水理試験のデータに、H28 事業の水理試験のデータを加えたものを図-9.3.1 に示す。なお、図中の F_i は非越流時の段波波力、 F_i' は越流時の段波波力、 F_s は非越流時の持続波力、 F_s' は越流時の持続波力を意味する。

堤体が十分に高く非越流の場合に堤体に働く持続波力 F_s と、越流時に堤体に働く持続波力 F_s' を比較すると、越流により波力が低減しており、波力が大きいほどその低減効果は大きくなっている。試験条件として堤体高が一定のため、波力が大きければ越流水深が大きく、越流量も大きいことになるため、波力の増加とともに越流による波力の低減率も大きくなっていると考えられる。また、全ての試験ケースがほぼ同じ曲線上にあることから、同じ波力に対して同程度の減衰率が生じていることが分かる。波力が同じであれば越流の規模も同等であると想定され、越流による波力の低減効果に対する波形の影響は小さいことが示唆される。

一方で、段波波圧については、越流による波圧の低減効果が確認できない。段波波圧作用時には、堤体前面水位は堤体を超えているが、前述したように波圧が底面付近に集中するため、越流による波力の低減効果が小さいことが分かる。



(a)単純勾配



(b)直立護岸

図- 9.3.1 非越流時と越流時の波力の比較 (左：段波波力，右：持続波力)

9.4. 段波波力と持続波力の比較

段波波力 F_{imax} と持続波力 F_{imax} の関係を図-9.4.1, 図-9.4.2 に示す. 非越流のケースについては, 本年度事業で実施した水理試験のデータに, H27 事業, H28 事業の水理試験のデータを加えたものを, 越流のケースについては, H28 事業の水理試験のデータを加えたものを示した.

段波波力と持続波力のどちらが大きいかは, 波形によって異なるが, 非越流の場合, 多くのケースで持続波力の方が大きいことが分かる. 一方, 越流と非越流のケースを比較すると, 越流することにより持続波力は低減するが, 段波波力はあまり低減しない. そのため, 越流する場合には非越流の場合に比べて, 図中のプロットが全体に図の下側に寄っている. このため, 越流することにより段波波圧が相対的に大きくなることが分かる.

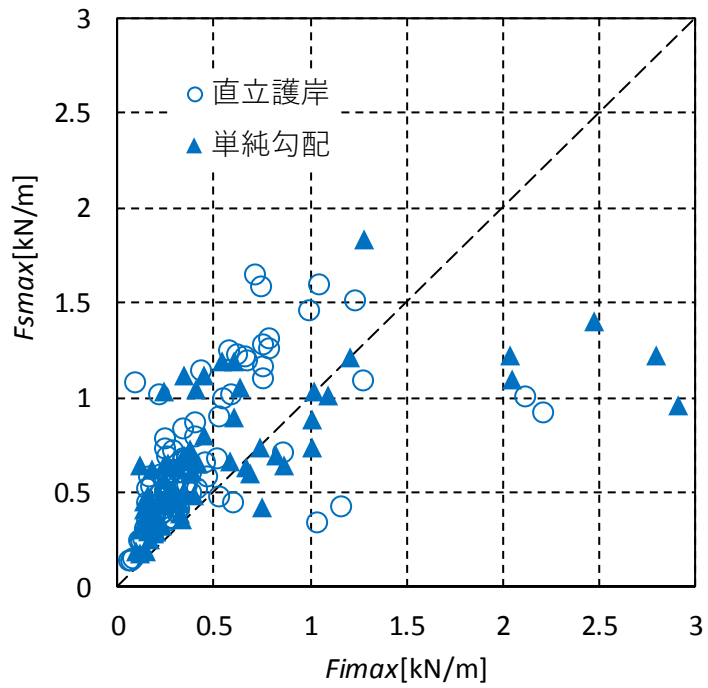


図-9.4.1 段波波力と持続波力の比較（非越流時）

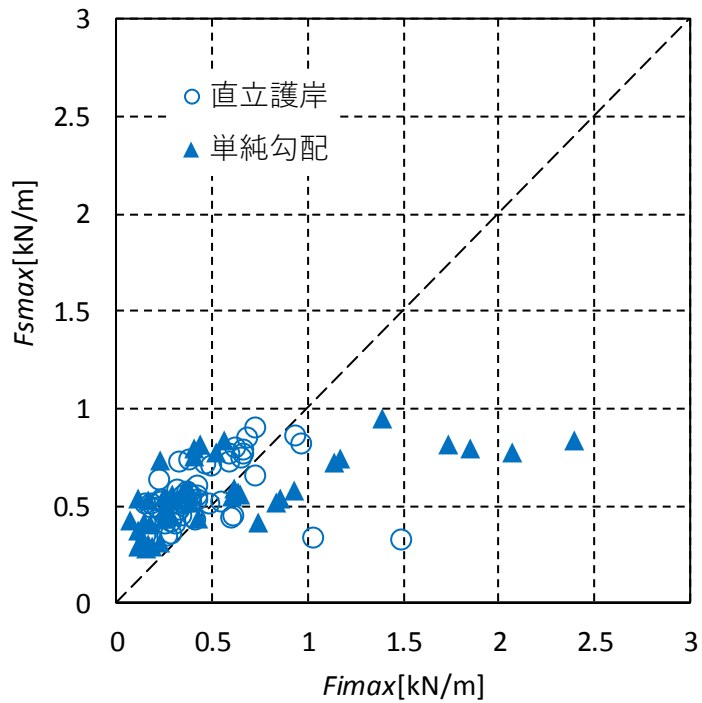


図-9.4.2 段波波力と持続波力の比較（越流時）

9.5. 越流時の波力評価

越流水深と波力の関係について、本年度事業で実施した水理試験のデータに、H28事業の水理試験のデータを加えたものを図-9.5.1に示す。同図では、越流時の波力は堤体が十分に高い場合の前面せり上がり高 η^* と堤体高さ h_d で無次元化しており、また越流水深は、前面せり上がり高 η^* と堤体高さ h_d の比で代表している。図より、堤体高さに対し堤体前面のせり上がり高が大きくなる、すなわち越流水深が大きくなると、波力が大きくなるが、 η^*/h_d が1.5程度より大きくなると、無次元波力が一定値に収束していることが分かる。これは、前面せり上がり高 η^* に対し、非越流の場合は2乗に比例して波力が大きくなるのに対し、越流の程度が大きくなると、1乗に比例するようになることを意味している。

また図中には、ここで提案した越流時の波力評価式を示したが、評価式は試験結果の上限値とよく整合していることが分かる。試験結果は、評価値とほぼ同じか若干小さな値となっており、本評価式によって越流時の波力を安全側に評価できることが分かる。

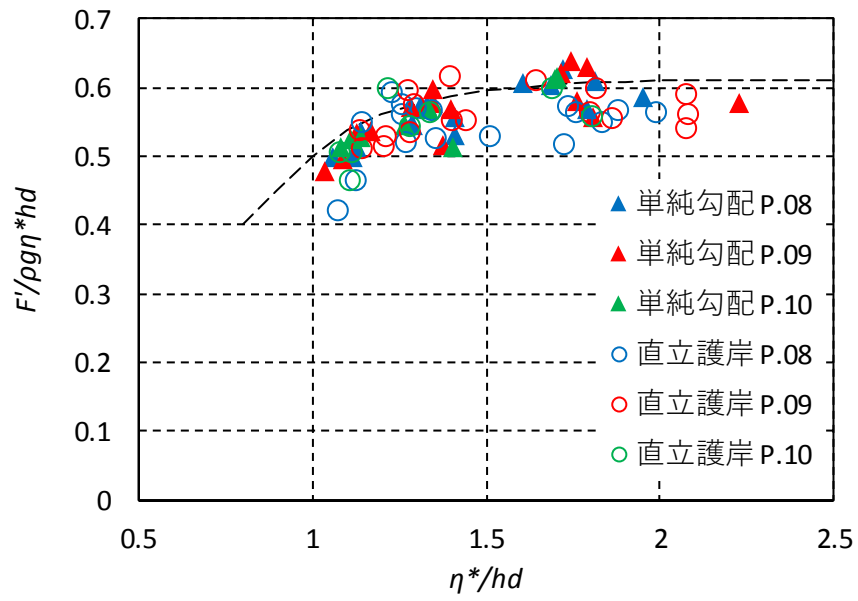


図- 9.5.1 越流水深と無次元波力の関係

10. 漂流物衝突試験

10.1. 試験方法

漂流物衝突試験で用いた漂流物模型の外形および諸元を，図- 10.1.1，写真- 10.1-1，表- 10.1.1 に示す．漂流物模型は木製とし，想定縮尺を 1/40 とした．また，試験ケースは表- 10.1.2 に示す 60 ケースとした．

試験は，造波前に漂流物模型を汀線から表- 10.1.2 に示した距離に浮かべ，津波を作用させて漂流状況を側面から撮影して実施した．撮影は，通常の動画撮影に加え，堤体模型近傍で高速度カメラにより撮影した．なお試験開始時の浮遊状態は，試験水槽に対し漂流物模型が縦向きになるように浮かべたが，自由浮体の状態で浮遊させているため，沖から進行してくる津波が浮体模型に到達するまでに，浮体は多少回転しており，完全な縦向きの状態で漂流してはいない．試験は，同じ条件で 3 回繰り返した．

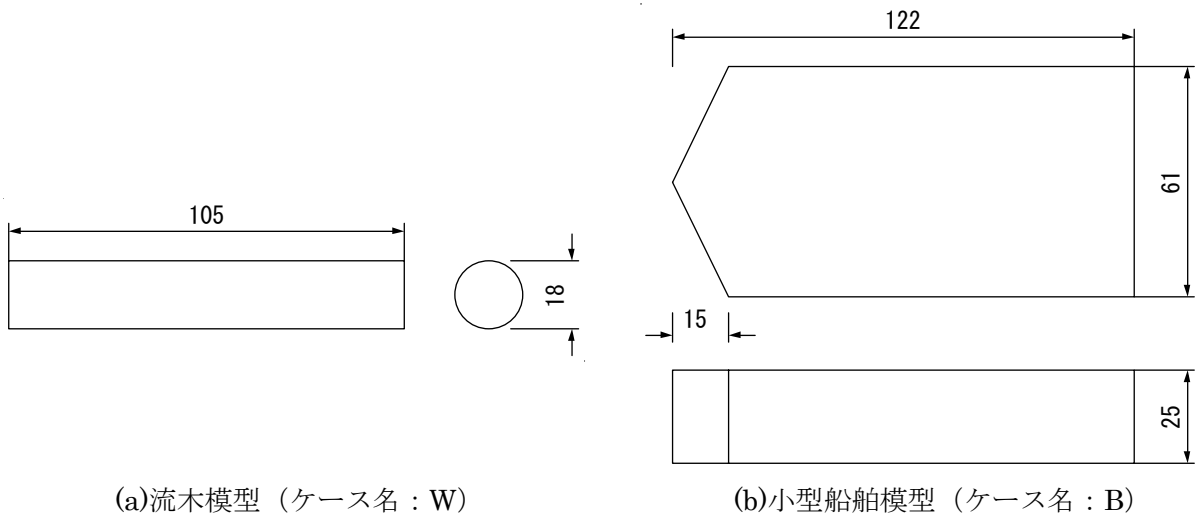


図- 10.1.1 試験模型



(a)流木模型 (ケース名 : W)



(b)小型船舶模型 (ケース名 : B)

写真- 10.1-1 試験模型

表- 10.1.1 試験模型諸元

	流木模型	小型船舶模型
比重 [g/cm ³]	0.75	0.46
体積 [cm ³]	26.72	174.6
重量 [gf]	20.0	81

表- 10.1.2 試験ケース

海底地形	堤体位置	入力津波	漂流物模型	漂流物位置	繰り返し
単純勾配 直立護岸	汀線	Wc11, Wc12, Wc13 Wc31, Wc32	流木模型 小型船舶模型	汀線より 1, 2, 4 m	3回

10.2. 試験結果

撮影した動画により漂流状況を解析した結果を以下に示す。

動画を観察することにより、漂流状態を図-10.2.1に示す3種類に分類した。また、堤体模型への衝突の有無、および高速度カメラの動画解析により漂流物の移動速度を算定した。これらの結果を、表-10.2.1に示す。漂流特性の分類において、0.5や1.5といった表記がいくつかあるが、これらは漂流特性タイプの判別が難しく、各タイプの間のような状態で漂流していることを意味する。また漂流物の移動速度は、漂流物模型が確認できる場合は漂流物の軌跡より算出し、可能な限り堤体模型に衝突する直前の移動速度を対象としたが、津波が堤体模型に衝突することにより水面が激しく乱れ、漂流物が確認できなくなる場合は、漂流物模型が確認できる範囲で堤体模型になるべく近い位置で移動速度を算出している。また、漂流特性タイプ2のように、巻き波に巻き込まれているような状態で漂流物模型が常に確認できない場合は、波自体の移動速度を対象に移動速度を算出している。

試験結果から、設置距離が汀線から離れるほど、漂流特性タイプは2→1→0に変化する傾向が読み取れる。また、漂流特性0の場合には、接近速度が小さくなることが分かる。このことから、漂流物の初期位置が汀線からある程度離れると、漂流物は津波の先端分には追従せずに、波速よりも小さい速度で護岸に接近することが分かる。

動画から、漂流物が堤体に衝突していることが明確に分かるのは、漂流特性タイプ1または2の場合であり、またタイプ1または2の場合であっても必ず衝突する訳ではない。本試験は鉛直2次元試験のため、漂流物の衝突よりも先に反射波による堤体前面での水位上昇が顕著に生じると、その逆向きの水面勾配もしくは沖に向かう流速のために、漂流物が堤体に衝突する前に停止もしくは沖側に漂流している。ただし、実際の漂流現象では、津波の入射および漂流物の接近方向はともに護岸に対し直角とは限らない。この場合は、本試験の限りではなく、護岸への衝突が発生し易くなると考えられる。

0：先端部分に乗らずに波よりも遅れる 1：波の先端部分に乗って波速で進行する 2：碎波に巻き込まれるように進行する



図- 10.2.1 漂流特性の分類



(a) 先端部分に乗らずに波よりも遅れる



(b) 波の先端部分に乗って波速で進行する



(c) 碎波に巻き込まれるように進行する

写真- 10.2-1 漂流特性の分類

表- 10.2.1 各実験ケースの漂流特性と漂流物の移動速度（流木）

地形	波	設置距離 [m]	ケース名	漂流特性の分類			防潮堤への 衝突の有無			接近速度[m/s]			備考
				1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目	
単純 勾配	Wc11	1	S-Wc11-A-40-W	2	2	2	×	×	×	2.4	2.5	2.4	
		2	S-Wc11-A-80-W	0	0	0	×	×	×	1.3	1.3	1.3	
		4	S-Wc11-A-160-W	0	0	0	×	×	×	2.0*	2.0*	2.2*	波
	Wc12	1	S-Wc12-A-40-W	1.5	1.5	1.5	○	○	○	2.5	2.7*	2.3	波
		2	S-Wc12-A-80-W	2	2	2	×	×	×	2.4	2.3	1.4	
		4	S-Wc12-A-160-W	0	0	0	×	×	×	2.7*	2.5*	2.6*	波
	Wc13	1	S-Wc13-A-40-W	2	2	2	○	○	○	3.0	2.4	2.8	
		2	S-Wc13-A-80-W	2	2	2	×	×	×	3.2*	3.6*	1.9	波
		4	S-Wc13-A-160-W	0.5	0.5	0.5	×	×	×	3.5*	3.6*	3.4*	波
	Wc31	1	S-Wc31-A-40-W	1.5	1.5	2	×	×	×	2.0	1.0	2.2	
		2	S-Wc31-A-80-W	0	0	0	×	×	×	1.0	1.1	1.0	
		4	S-Wc31-A-160-W	0	0	0	×	×	×	1.5*	1.5*	1.4*	波
Wc32	1	S-Wc32-A-40-W	2	2	2	×	○	○	1.9	1.9	2.0		
	2	S-Wc32-A-80-W	1	1.5	1	×	×	×	2.2	1.5	2.0		
	4	S-Wc32-A-160-W	0	0	0	×	×	×	2.4*	2.4*	2.5*	波	
直立 護岸	Wc11	1	F-Wc11-A-40-W	2	2	2	○	×	×	1.2	1.1	1.4*	波
		2	F-Wc11-A-80-W	1.5	2	2	×	×	×	2.2*	2.0*	0.9	波
		4	F-Wc11-A-160-W	0	0	0	×	×	×	2.0*	2.0*	2.0*	波
	Wc12	1	F-Wc12-A-40-W	2	2	2	×	×	×	2.9*	2.8*	2.6*	波
		2	F-Wc12-A-80-W	2	2	2	×	×	×	2.9*	3.0*	1.1	波
		4	F-Wc12-A-160-W	2	2	2	×	×	×	2.8*	3.1*	3.1*	波
	Wc13	1	F-Wc13-A-40-W	2	2	2	×	×	×	3.0*	2.3	2.9*	波
		2	F-Wc13-A-80-W	2	2	2	×	○	×	3.0*	2.9*	2.9*	波
		4	F-Wc13-A-160-W	2	2	2	×	×	×	3.1*	3.2*	3.0*	波
	Wc31	1	F-Wc31-A-40-W	1	1	1.5	○	○	×	1.7	1.6	0.8	
		2	F-Wc31-A-80-W	1.5	2	2	×	×	×	2.2*	0.7	2.3*	波
		4	F-Wc31-A-160-W	0	0	0	×	×	×	2.2*	2.2*	2.4*	波
Wc32	1	F-Wc32-A-40-W	1	1	1	○	×	×	2.0*	2.0*	1.9*	波	
	2	F-Wc32-A-80-W	1	1	1	×	○	○	1.3	1.9*	1.8*	波	
	4	F-Wc32-A-160-W	1.5	1.5	1.5	×	×	×	1.9*	1.8*	1.8*	波	

(○：防潮壁模型への衝突あり，×防潮壁模型への衝突なし)

(*のケースは漂流物ではなく波の端部の判定)

表- 10.2.1 各実験ケースの漂流特性と漂流物の移動速度（流木）（小型船舶）

地形	波	設置距離 [m]	ケース名	漂流特性の分類			防潮堤への 衝突の有無			接近速度[m/s]			備考
				1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目	
単純 勾配	Wc11	1	S-Wc11-A-40-B	1.5	1.5	1.5	×	×	×	2.1	2.1	2.0	
		2	S-Wc11-A-80-B	0	0	0	×	×	×	1.3	1.3	1.2	
		4	S-Wc11-A-160-B	0	0	0	×	×	×	2.2*	2.0*	2.1*	波
	Wc12	1	S-Wc12-A-40-B	1.5	2	2	○	×	○	2.5	2.8*	2.4	波
		2	S-Wc12-A-80-B	2	2	2	×	×	×	2.3	2.3	2.7	
		4	S-Wc12-A-160-B	0	0	0	×	×	×	2.6*	2.5*	2.7*	波
	Wc13	1	S-Wc13-A-40-B	2	2	2	○	○	○	2.9	3.0	1.8	
		2	S-Wc13-A-80-B	2	2	2	×	×	×	3.3*	3.7*	1.8	波
		4	S-Wc13-A-160-B	0.5	0.5	0.5	×	×	×	3.4*	3.4*	3.3*	波
	Wc31	1	S-Wc31-A-40-B	2	2	2	×	×	×	2.3	2.2	1.3	
		2	S-Wc31-A-80-B	0	0	0	×	×	×	1.0	1.0	1.0	
		4	S-Wc31-A-160-B	0	0	0	×	×	×	1.4*	1.5*	1.4*	波
Wc32	1	S-Wc32-A-40-B	2	2	2	×	×	×	2.1	2.2	2.2		
	2	S-Wc32-A-80-B	1	1	1	×	×	×	2.2	1.4	1.3		
	4	S-Wc32-A-160-B	0	0	0	×	×	×	2.5*	2.6*	2.4*	波	
直立 護岸	Wc11	1	F-Wc11-A-40-B	2	2	2	○	○	○	1.3*	1.9*	1.7	波
		2	F-Wc11-A-80-B	1.5	1.5	1.5	×	×	×	1.1	0.8	2.2*	波
		4	F-Wc11-A-160-B	0	0	0	×	×	×	2.3*	1.9*	2.1*	波
	Wc12	1	F-Wc12-A-40-B	2	2	2	×	○	○	2.7*	2.8*	2.6*	波
		2	F-Wc12-A-80-B	2	2	1.5	×	×	○	1.2	2.9*	1.8	波
		4	F-Wc12-A-160-B	2	2	2	×	×	×	2.6*	2.9*	2.9*	波
	Wc13	1	F-Wc13-A-40-B	2	2	2	×	○	×	2.9*	3.0*	3.2*	波
		2	F-Wc13-A-80-B	2	2	1.5	×	○	×	3.2*	3.3*	2.2	波
		4	F-Wc13-A-160-B	2	2	2	×	×	×	3.1*	3.1*	3.0*	波
	Wc31	1	F-Wc31-A-40-B	1.5	1.5	1	×	○	○	1.4	1.4	1.6	
		2	F-Wc31-A-80-B	1.5	1.5	1.5	×	×	×	1.1	0.9	0.9	
		4	F-Wc31-A-160-B	0	0	0	×	×	×	2.3*	2.2*	2.3*	波
Wc32	1	F-Wc32-A-40-B	1	1	1	○	×	○	1.5	1.4	1.4		
	2	F-Wc32-A-80-B	1	1	1	○	×	×	1.8	1.5	2.0*	波	
	4	F-Wc32-A-160-B	1.5	1.5	1.5	×	×	×	1.8*	1.9*	1.8*	波	

(○ : 防潮壁模型への衝突あり, × 防潮壁模型への衝突なし)

(*のケースは漂流物ではなく波の端部の判定)

11. まとめ

試験により得られた結果を以下にまとめる。

(1)越流時における段波波圧と持続波圧の特性

- ・ 段波波圧と持続波圧のどちらが大きいかは、波形によって異なる。
- ・ 単純勾配地形の方が、水平流速が大きい状態で遡上するため、相対的に段波波圧が大きくなる傾向にある。
- ・ 持続波圧は越流することにより波圧・波力が低下する。これは、ここで提案した式によって安全側の評価が可能である。
- ・ 段波波圧は、波圧が底面付近に集中するため、越流した場合も波圧・波力の減衰は小さい。
- ・ 構造物がひずむ場合も、その変位が小さいために波圧の変化はほとんどない。

(2)越流時における津波波圧による構造応答特性

- ・ 持続波領域では、準定常状態であるため、静的な構造応答と同等のひずみが生じる。
- ・ 段波領域で生じるひずみは、動的な影響により、同じ波圧に対する静的ひずみよりも小さい。
- ・ 本試験で適用した波形の範囲では、段波領域で生じるひずみが、持続波領域で生じるひずみよりも概略小さい。
- ・ ただし、砕波しながら堤体に津波が衝突する場合は、非常に大きな段波波圧が生じ、その作用点の底面からの距離も大きくなるため、持続波領域よりも大きなひずみが生じる場合がある。
- ・ 採用したひずみ相当波力は、越流時の波力提案式によって安全側に評価可能である。これを用いることによって、前述の砕波しながら堤体に津波が衝突する場合を除き、防潮堤の構造健全性について静的な評価が可能である。

(3)シミュレーション解析の適用性

- ・ VOF 法による数値流体解析により、水理試験の再現解析を実施した。
- ・ 数値シミュレーションの結果は、水理試験の結果を精度良く再現している。
- ・ ただし、砕波現象をより精度良く再現するには、より詳細な格子で解析する必要がある。
- ・ 解析格子間隔が不足し砕波を精度良く再現出来ない場合、特に斜面においてエネルギー減衰を過大に評価し、そのため到達時間に遅れが生じ、また波力が小さくなる。ただし、本業務で実施した範囲では、その影響は小さい。
- ・ 同様に、直立護岸の角部や堤体上の越流部など、流向が局所的に変化する部分でも、精度を向上するには詳細な格子が必要となる。
- ・ 流体解析の結果を構造解析に入力する、構造応答の 1-way 解析により、堤体ひずみの動的応答を精度良く再現可能であることを確認した。この時、堤体前面に水が存在することにより、減衰率が気中の場合よりも大きくなるため、これを考慮する必要がある。
- ・ 減衰率や固有振動数は、堤体前面の水深によって変化するため、応答解析の精度を向上するためには、水深によるこれらの変化をモデル化して取り込む必要がある。

(4)漂流物の挙動

- ・漂流物の漂流特性を、3つのタイプに分類した。その結果、漂流物の初期位置が汀線から離れるほどタイプ0に、汀線に近付くほどタイプ2となる傾向にあることが分かった。
- ・漂流物は、タイプ1もしくはタイプ2の場合に堤体に衝突するが、その場合に必ず衝突するのではなく、多くのケースで衝突が確認できなかった。これは、鉛直2次元水理試験であることの影響が大きいと考えられ、斜めに津波や漂流物が接近する場合には現象が異なると考えられる。

リサイクル適性 (A)

この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。