

令和元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（漂流物影響）
（令和元年度分）

大成建設株式会社

令和元年 12 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. 事業概要	1-1
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. 類似事業の結果と本試験での確認項目	2-1
2.1.3. 試験水槽と地形模型	2-6
2.1.4. 防潮堤模型	2-8
2.1.5. 漂流物模型	2-11
2.1.5. 計測項目及び計測方法	2-13
2.2. 試験手順	2-14
2.2.1. 波検定	2-14
2.2.2. 気中衝突試験	2-14
2.2.3. 水中衝突試験	2-14
2.3. 試験ケース	2-17
3. 波検定結果	3-1
3.1. 水位時系列	3-1
3.2. 波速と水面勾配	3-7
4. 気中衝突試験結果	4-1
4.1. 計測結果	4-1
4.2. 衝突高さ, 衝突速度とひずみエネルギー	4-83
5. 水中衝突試験結果	5-1
5.1. 水位と波圧の時系列	5-1
5.2. ひずみの時系列	5-6
5.3. ひずみエネルギー	5-59
5.4. 衝突高さ	5-73
5.5. 衝突速度	5-80
6. 漂流物衝突力の評価	6-1
6.1. 衝突頻度	6-1
6.2. 初期位置が砕波点より沖側の場合の漂流特性	6-4
6.3. 衝突エネルギーの評価	6-6
6.4. 衝突力の算定	6-11
6.5. 衝突力の評価	6-14
7. 既往の評価式との比較	7-1
7.1. 既往の研究	7-1
7.2. 既往の評価式との比較	7-7
7.3. 漂流物衝突力評価に係る体系的な考え方の整理	7-12
8. 漂流物衝突シミュレーション (VOF 法)	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	8-4
8.3. 水位時系列	8-6
8.4. 流速時系列	8-20
8.5. 波圧時系列	8-34
8.6. 圧力の鉛直分布	8-62
8.7. 漂流物の移動軌跡と衝突の有無	8-70
8.8. 漂流物の衝突状況	8-83
9. 漂流物衝突シミュレーション (SPH 法)	9-1

9.1.	シミュレーション手法と解析条件.....	9-1
9.2.	解析ケース	9-5
9.3.	解析結果.....	9-6
9.3.1.	水位の時系列波形.....	9-6
9.3.2.	流速の時系列波形.....	9-10
9.3.3.	波圧の時系列波形.....	9-12
9.3.4.	圧力の鉛直分布.....	9-31
9.3.5.	漂流物の移動軌跡.....	9-36
9.3.6.	漂流物の衝突状況.....	9-38
10.	黒津波が作用荷重に与える影響の検討.....	10-1
10.1.	既往文献調査.....	10-1
10.1.1.	黒津波の発生条件.....	10-3
10.1.2.	黒津波の作用荷重.....	10-16
10.2.	水理試験手法の検討.....	10-23
10.2.1.	黒津波の発生条件.....	10-23
10.2.2.	黒津波の作用荷重.....	10-26
10.2.3.	解析モデルの確認.....	10-29
11.	まとめ	11-1

1. 事業概要

本事業は、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、水理試験及びシミュレーション解析を実施し、漂流物衝突力等に関するデータを取得するものである。また、類似事業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、漂流物衝突力評価の体系的な考え方を整理する。また、ヘドロ等を含有する津波（以下、「黒津波」と呼ぶ。）による影響を把握するため、過去の文献等で得られた知見を整理・分析する。

漂流物衝突力評価手法については、水理試験の結果、類似事業及び過去の文献で得られた知見を整理・分析することで検討した。防潮堤に漂流物模型を衝突させる水理試験を実施し、防潮堤に生じる衝突力に関する試験データを取得した。また、防潮堤に生じる衝突力及び漂流物移動軌跡等を適切に評価可能な解析モデルを用いて、本事業で実施する水理試験を対象としたシミュレーション解析を実施し、その適用範囲を確認した。水理試験で計測されたデータ、類似事業及び過去の文献で得られた知見を基に、漂流物衝突力に関する複数の既往式について、各々の適用範囲を検討した。

黒津波が防潮堤の作用荷重に与える影響については、過去の文献等で得られた知見を整理・分析すると共に、黒津波が発生する地理的条件及び津波の特性についても整理・分析した。また、黒津波が防潮堤の作用荷重に与える影響を把握するにあたり、必要となる水理試験手法、試験条件等について検討し、具体的な計画案を提案した。

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陸上部での流速を $v=5.0$ m/s 程度、陸上部での浸水深を $\eta=4$ m 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

2.1.2. 類似事業の結果と本試験での確認項目

(1) 漂流物衝突条件等と適用可能な既往式の対応

図-2.1 は、類似事業で得られた衝突力と既往式の比較の結果である。なお詳細については、該当する報告書を参照されたい。図-2.1 の衝突力の評価結果では、全体を通じて池野の評価式が比較的試験結果を再現しているが、その他の評価式においてもパラメタの設定方法については十分に検討されておらず、また衝突ひずみエネルギーを衝突力に変換する試験結果の評価方法についても、さらなる議論が必要である。特に、試験では水中で衝突しているため、衝突角度の影響を受けており、また実際の衝突直前の衝突速度が明らかとなっていない。既往の評価式との比較を行う上では、これらについて明確にする必要がある。

(2) 漂流物衝突条件等と衝突確率の関係

図-2.2 は、類似事業で得られた衝突頻度（衝突確率）の結果である。図-2.2 によれば、衝突確率は、主に津波高によって決まること、漂流物重量が重いほど確率が高くなること、堤体位置の影響は小さいこと、初期位置が汀線から離れるに従って線形的に確率が低下することが明らかとなった。一方、津波高によって影響している津波の諸量（波形勾配や波速など）、漂流物の形状の影響、詳細な初期位置と衝突確率の関係や確率 0 となる距離については、類似事業での実験ケースでは検討することが出来ない。

(3) 水理試験とシミュレーション解析の再現性の程度

表・2.1 は類似事業で実施された数値シミュレーションによって得られた衝突判定結果である。これを図・2.2 と比較すると、堤体位置が 0.625m のシミュレーションでは、いずれのケースも衝突していない。また、図・2.2 で確認出来る漂流物の種類や初期位置と衝突確率の関係についても、その特徴が表れていないことが分かる。要因の1つとして、ここでは衝突判定を堤体に働く圧力に明確な反応があるかどうかで行っている。しかしシミュレーションでは、解析の時間ステップの影響により、正確な衝突力を再現するには課題がある。衝突判定の手法について検討する必要がある。加えて、堤体位置が 0.625m のケースにおいて衝突していない要因、あるいは判定手法の影響について検討する必要がある。

以上の結果を受け、本試験では、類似事業の成果において未確認である、以下の項目を主に検討出来るように試験条件を設定した。漂流物の衝突特性を確認する上で重要になると考えられる項目と、各項目に対する類似事業における試験条件と本試験での試験条件の設定について表・2.2 にまとめる。

①波形変化と船長の関係による漂流開始特性および衝突頻度の特性

衝突頻度には、漂流開始時の特性が大きく影響していると考えられる。これには、波形前面の水面勾配などの形状と漂流物形状の関係が大きく影響しているものと推察される。そこで、各地点での水面形を詳細に計測するとともに、漂流物の初期位置を細かく変更し、漂流開始時の特性について詳細に検討する。また、これによる衝突頻度の変化についても確認する。

②気中衝突と水中衝突の衝突特性の比較

衝突力には、堤体の剛性が影響する。相似則を満足する堤体模型の適用は困難なことから、試験に適用した堤体模型の剛性について検討する必要があるが、水中衝突試験でこれを確認するには水圧等の影響が現象を複雑にするため、気中衝突試験を実施して、衝突による堤体のひずみ特性を確認する。

③漂流物の剛性の影響

実機の剛性を反映した漂流物模型の適用は困難なことから、ここでは大きさや重量は同一で剛性の明確に異なる漂流物模型を適用し、相対的な衝突特性の違いを確認する。

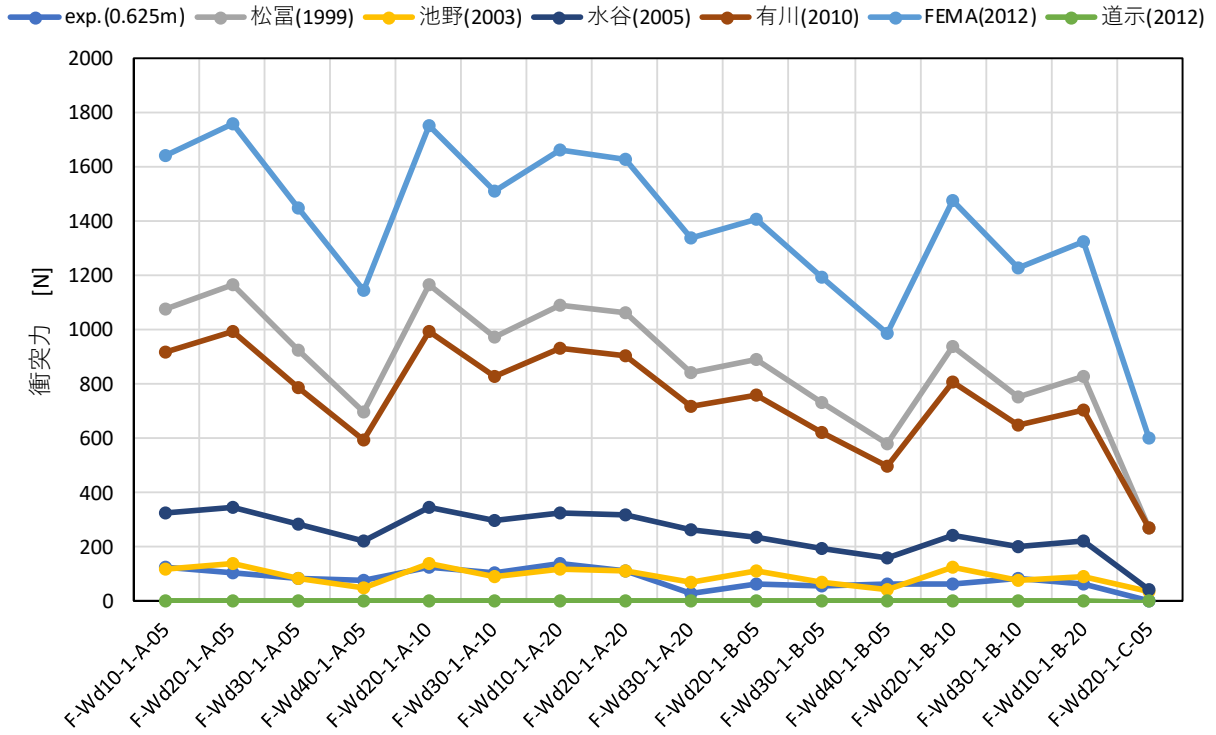


図- 2.1 水理試験結果(堤体位置 0.625m)と既往評価式による衝突力の比較 (類似事業の結果)

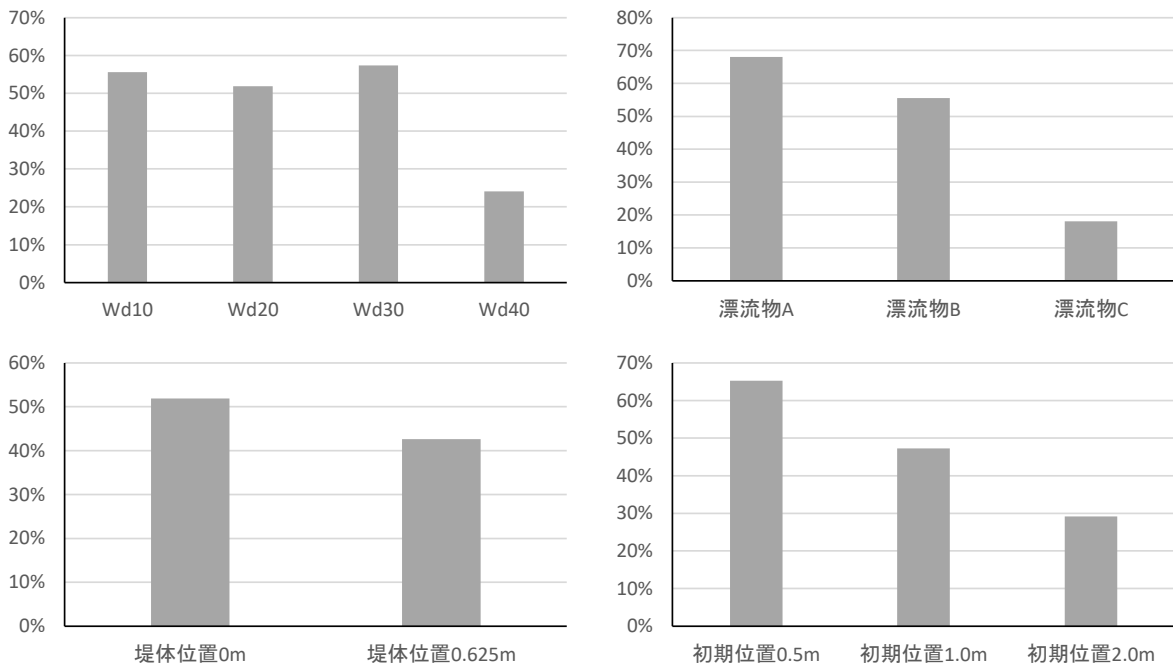


図- 2.2 衝突頻度の比較 (類似事業の結果)

表-2.1 数値シミュレーションにおける衝突判定結果（類似事業の結果）

直立護岸			単純勾配		
	漂流物の有無による 最大圧力差[kPa]	衝突判定		漂流物の有無による 最大圧力差[kPa]	衝突判定
F-Wd10-0-A-05	1.6	△	S-Wd10-0-A-05	14.2	○
F-Wd20-0-A-05	34.8	○	S-Wd20-0-A-05	3.2	△
F-Wd30-0-A-05	1.7	△	S-Wd30-0-A-05	0.6	×
F-Wd40-0-A-05	0.2	×	S-Wd40-0-A-05	1.4	×
F-Wd20-0-A-10	6.2	△	S-Wd20-0-A-10	1.5	×
F-Wd20-0-A-20	0.8	×	S-Wd20-0-A-20	0.9	×
F-Wd20-0-B-05	3.5	△	S-Wd20-0-B-05	0.9	×
F-Wd20-0-C-05	-	-	S-Wd20-0-C-05	-	-
F-Wd40-0-B-05	0.2	×	S-Wd40-0-B-05	15.7	○
F-Wd10-1-A-05	2.3	×	S-Wd10-1-A-05	1.2	×
F-Wd20-1-A-05	1.2	×	S-Wd20-1-A-05	1.1	×
F-Wd30-1-A-05	1.2	×	S-Wd30-1-A-05	0.4	×
F-Wd40-1-A-05	0.5	×	S-Wd40-1-A-05	0.6	×
F-Wd20-1-A-10	0.8	×	S-Wd20-1-A-10	2.0	×
F-Wd20-1-A-20	0.6	×	S-Wd20-1-A-20	1.2	×
F-Wd20-1-B-05	0.8	×	S-Wd20-1-B-05	1.1	×
F-Wd20-1-C-05	-	-	S-Wd20-1-C-05	-	-
F-Wd40-1-B-05	0.8	×	S-Wd40-1-B-05	0.4	×

表- 2.2 漂流物衝突試験の試験ケース

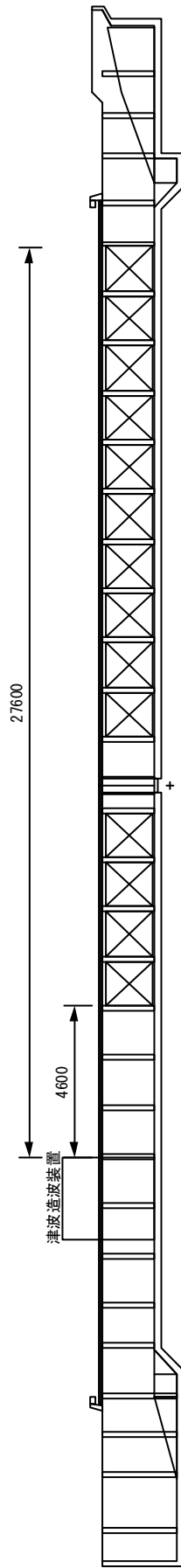
衝突条件となる項目	類似事業での試験条件	本試験での条件設定
漂流物の初期位置	0.5, 1.0, 2.0 m の 3 種類	初期位置と衝突頻度の関係を明らかとするため、初期位置をより細かく設定する。
防潮堤位置	汀線から 0, 0.625 m の 2 種類	防潮堤位置の影響特性は類似事業で得られていることから、1 種類とする。
防潮堤の剛性	1 種類	気中試験を実施し、気中衝突と水中衝突を比較する。なお、気中での剛性の影響は別途とする。
漂流物の剛性	1 種類	実機の剛性を反映するのは困難であるが、剛性の違いによる衝突力の違いについて確認する。
漂流物の形状	船舶模型 2 種類 + 流木模型 1 種類	衝突頻度に対し、船長が影響すると考えられるため、船長の違いを考慮出来る条件とする。
漂流物の重量	3 種類 (形状毎の喫水による)	上記の形状違いの模型について重量を等しくし、重量の影響を検討する。
津波波形	4 種類	津波高の影響と波形の影響を検討出来るように設定する。
海底地形	1 種類	地形の影響は波形に反映されているため、本試験でも 1 種類とする。

2.1.3. 試験水槽と地形模型

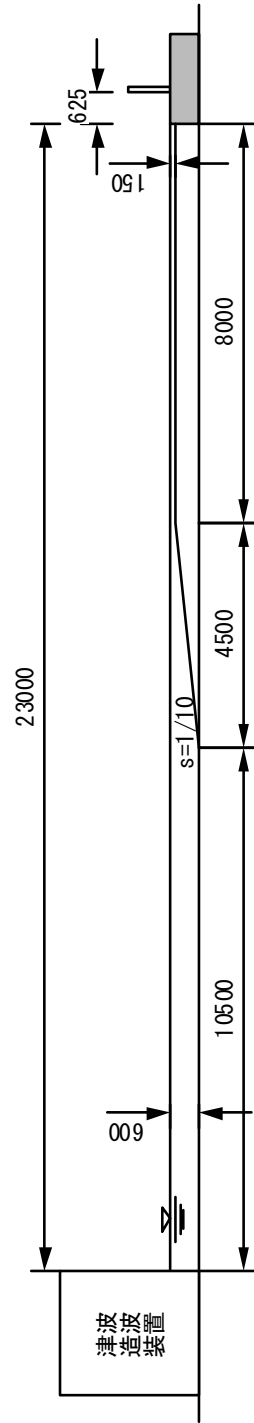
水理試験は、幅 80cm、長さ 47m、片面ガラス張りの二次元長水槽を用いて実施した（図- 2.3(a)参照）。水槽の端部には、津波造波装置が設置されており、これにより津波を造波した。

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、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。

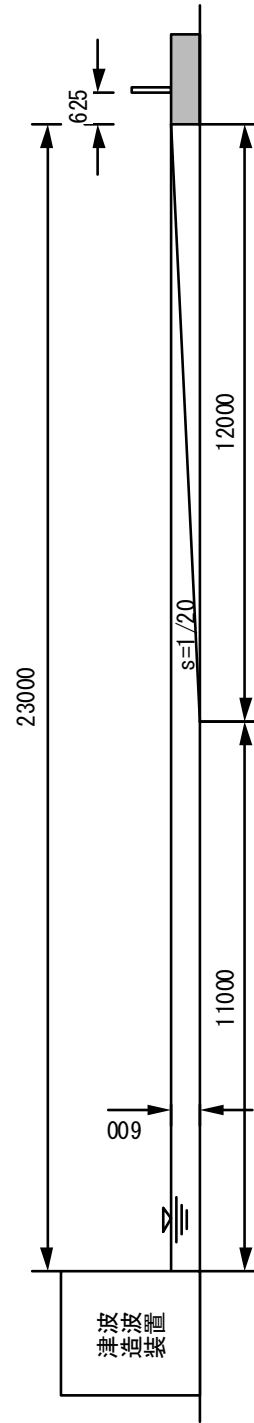
海底地形として、図- 2.3(b)に示す直立護岸タイプを対象に試験を実施した。造波装置前面の水深は 60cm とし、護岸前面水深 15cm、長さ 8m の水平海底地形を 1/10 勾配で水槽底面に擦り付けた。陸上地形は汀線において水面と同一の高さとした。地形模型の表面は、塩ビ製とした。なお、後述する数値解析では、海底地形の影響を確認するため、図- 2.3(c)に示す単純勾配地形を解析ケースに加えた。



(a) 試験水槽



(b) 地形模型 (直立護岸)



(b) 地形模型 (単純勾配, 数値解析のみ)

図-2.3 試験水槽と試験模型

2.1.4. 防潮堤模型

陸上部に設置した防潮堤模型の設置位置は、類似事業における試験では0mと0.625mの2種類としたが、衝突ひずみエネルギーは、ばらつきが大きいものの0mよりも0.625mの方が大きく、堤体前面での接近速度も0.625mの方が大きい傾向にあった。そこで本試験では、堤体位置は0.625mのみとした(図-2.3参照)。

本試験では、浮遊状態から漂流する漂流物を対象とするため、堤体のどこに衝突するかは不確定であり、ロードセルによる衝突力の計測は困難である。そこで、漂流物の衝突力を堤体模型に設置したひずみゲージにより計測した。ただし、堤体全体(幅0.8m)の剛性に対して働く衝突力は小さく、堤体全体のひずみを計測した場合にはひずみが明確に生じないと考えられる。また、堤体のひずみが幅方向にも分布するため、横断方向を含めた堤体全体の広範囲のひずみを計測する必要がある。そこで本試験では、以下のような堤体模型により衝突力を計測した。

防潮堤模型のイメージを図-2.4に示す。防潮堤模型は、堤体への漂流物の衝突位置付近に、幅4cmの4本の帯状の壁体をわずかな隙間(0.1mm程度)を開けて並べ、それ以外は固定した壁体として製作した。なお、この隙間にはテープ等を設置していないため、津波作用時には少量の水が漏れ、水圧への影響は多少考えられるものの、衝突力計測への影響はほとんどないと考えられる。帯状の壁体それぞれにひずみゲージを設置して、漂流物がこれらのうちのいずれか1本に衝突するように漂流物の初期位置を決めて実験を実施した。この方法によると、衝突力は幅4cmの壁体模型に作用するため、比較的大きなひずみが生じ、ひずみの幅方向の分布の影響も小さくなる。なお、類似事業で実施した試験では、衝突によって生じた振動が下部の架台部分を通じて隣接する帯状の壁体に伝播していた。本試験ではこれを防ぐため、架台を含めて各帯状の壁体を独立した構造とし、この間にゴム板を挟んで固定することによって、衝突により生じた振動の伝播を低減した(図-2.5参照)。

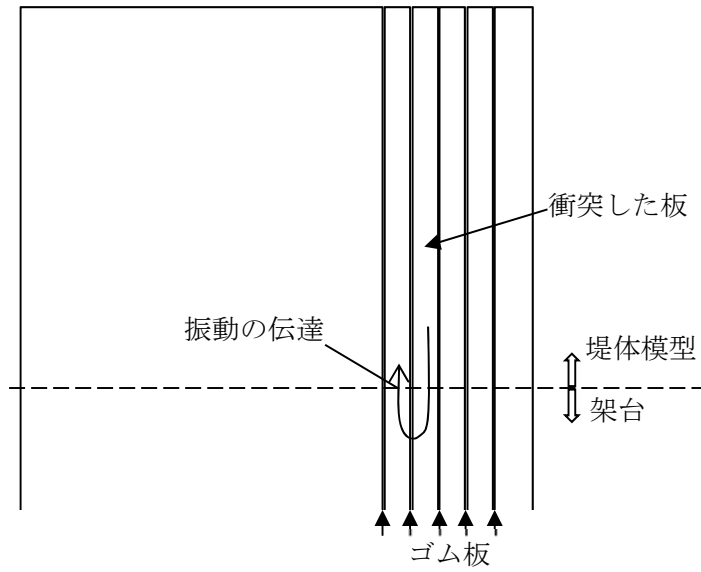
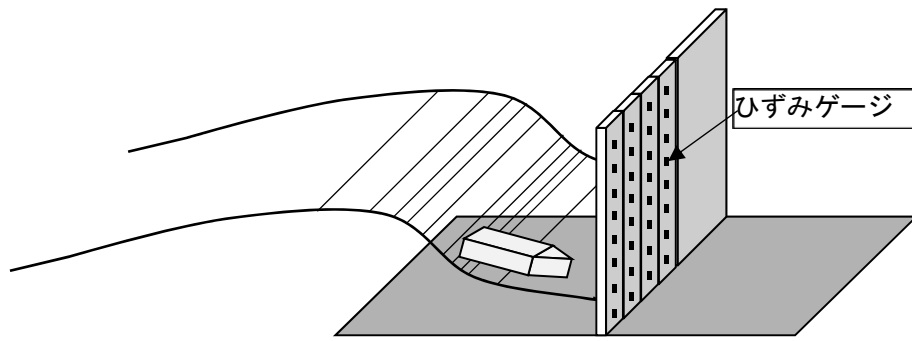


図-2.4 防潮堤模型のイメージ図

平面图

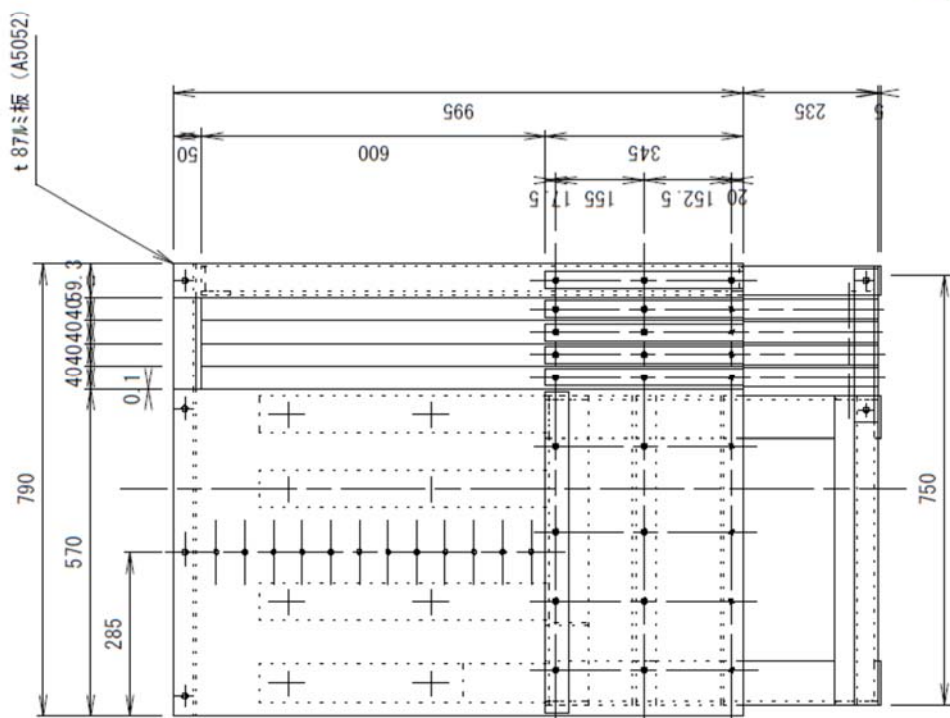
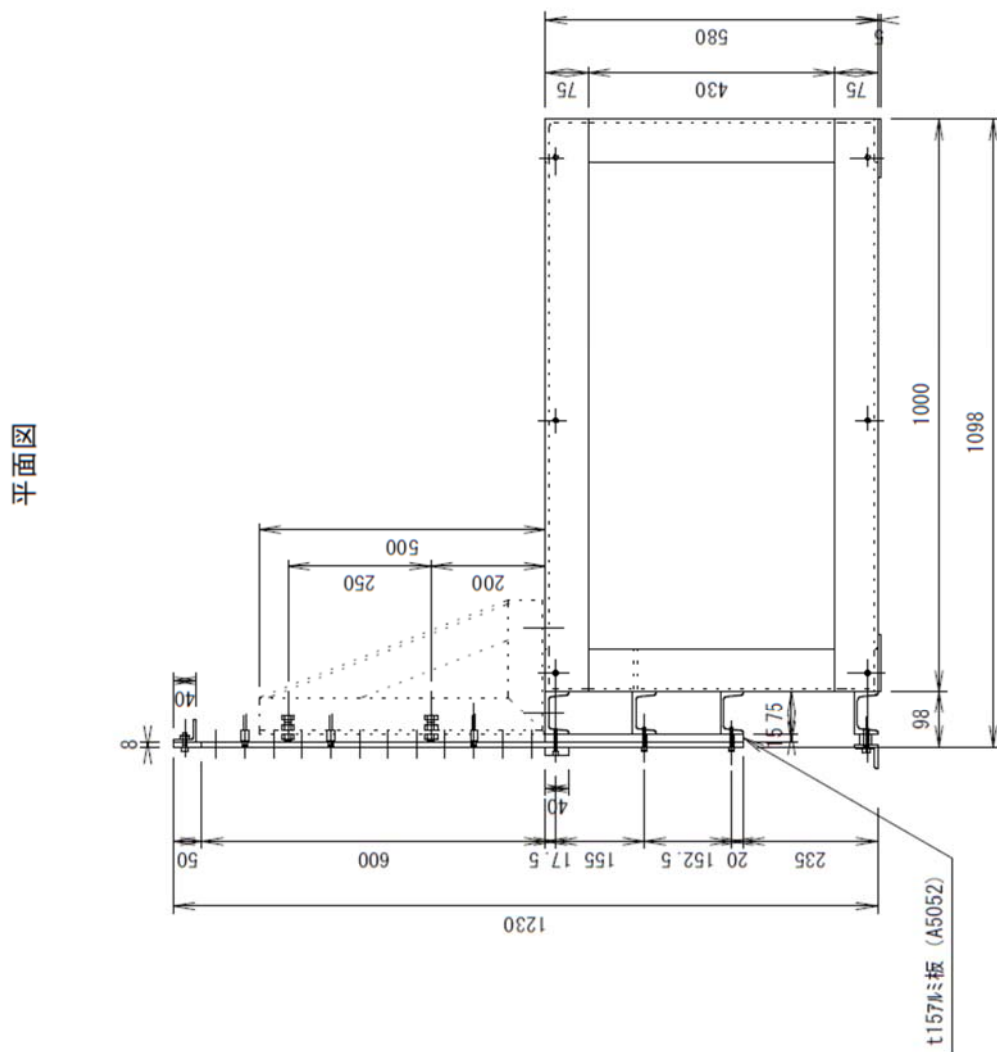


图-2.5 防潮堤模型

2.1.5. 漂流物模型

漂流物は小型船舶を対象に、図- 2.8 に示す 4 種類を製作した。類似事業の試験結果を参考に TypeA の模型を基本とし、剛性の違いによる影響を確認するため、形状や重量が等しく、表面にウレタン素材を貼った模型 TypeB と、漂流開始時に波形のピークに連行されるかどうかに影響すると考えられる漂流物の長さを変更した模型 TypeC、および形状は相似で大きさを変更した模型 TypeD の 4 種類とした。

類似事業の結果から、巻波状になった波に漂流物が巻き込まれると撮影画像から位置を特定できないことが想定される。そこで、漂流物模型はアクリル製とし、内部に LED を組み込むことにより、画像による移動軌跡の取得を容易にした (図- 2.6 参照)。また、実験毎の漂流開始時の初期位置を固定するため、電磁石により微小な力で漂流物の初期位置を保持し、津波が入射するタイミングで電流を遮断し、漂流物が自由に移動できる状態とした (図- 2.7 参照)。



図- 2.6 漂流物模型の製作イメージ図

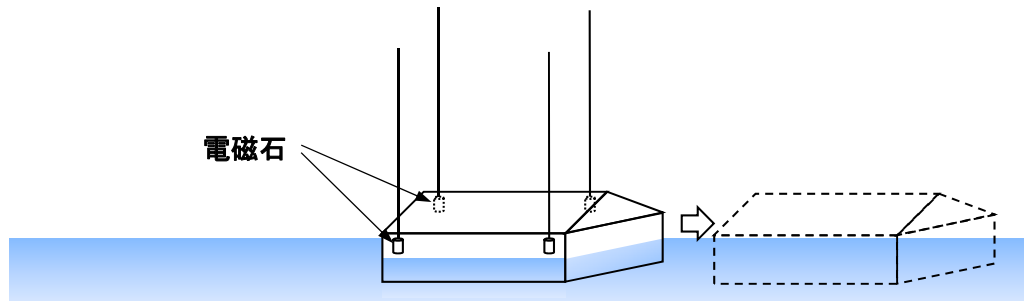
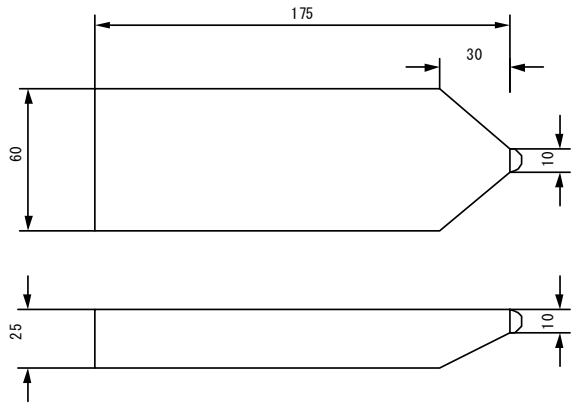
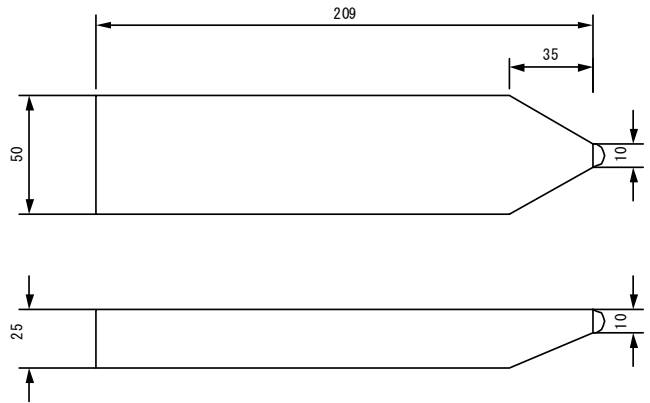


図- 2.7 漂流物初期位置の保持方法

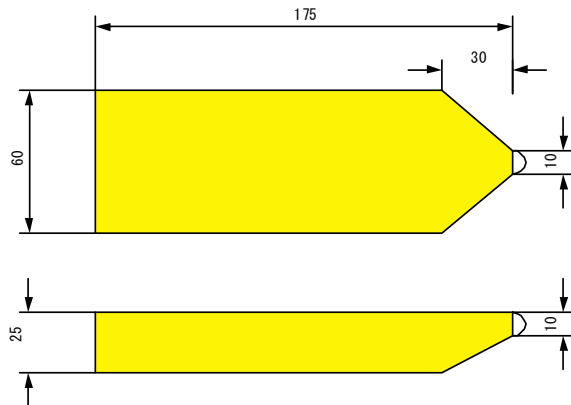


TypeA : アクリル製 (149g)



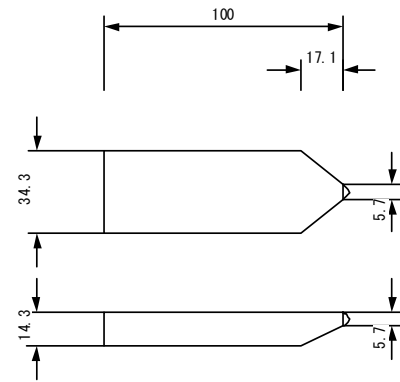
TypeC : アクリル製 (152g)

TypeA と重量・高さが同じで幅・長さ比が異なるもの



TypeB : ゴム製 (153g)

TypeA と形状・重量が同じで剛性が異なるもの



TypeD : アクリル製 (29g)

TypeA と相似形で大きさの異なるもの

図- 2.8 漂流物模型

2.1.6. 計測項目及び計測方法

計測項目は、動画撮影と画像解析による漂流物移動速度、堤体模型に生じるひずみ、および水位、流速とした。水位、流速の計測位置を図-2.9に示す。各計測値のサンプリング間隔は、ひずみのみ 10 kHz、その他は 1 kHz とし、全てのデータを同期して計測した。

(1) 水位

衝突試験時の水位は、沖の入射波の計測として計測点 A、堤体前面水位として計測点 C、D の 3 点において容量式水位計により計測した。また、本試験に先行して実施した波検定時には、入射波の波速と水面勾配を計測するため、計測点 B1~B15 の 15 点で水位を計測して、時間波形の比較から通過速度を求めて波速を算定し、時間変化の傾きから水面勾配を算出した。波速および水面勾配の算定方法を図-2.10に示す。なお陸上部における水位計測では、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

流速の計測は、波検定時に、沖の入射波として計測点 A において上層下層の 2 点（1/3 初期水深）で電磁流速計により計測した。また堤体への水塊の接近流速として、計測点 C においてプロペラ流速計（底面から 2cm の高さ）を用いて計測した。また波速と流速を比較するため、計測点 B2-B3、B6-B7、B13-B14 間において、プロペラ流速計（初期水面から 2cm の高さ）により流速を計測した。

(3) ひずみ・圧力

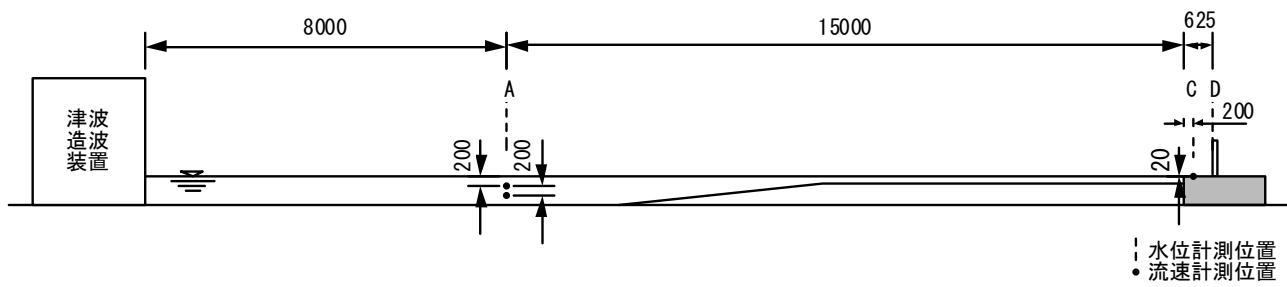
ひずみは防潮壁模型の裏側にひずみゲージ（共和電業、KFG-5-120-C1-23）を貼り付けて計測した。ひずみゲージの設置高さは鉛直方向 5cm 間隔とした。圧力の計測点は、側壁より 29cm の位置とし、高さ方向に 5cm または 10cm 間隔で小型の水圧計（エス・エス・ケイ、P208-02）を設置して計測した。ひずみと圧力の計測位置を、図-2.11に示す。

(4) 動画

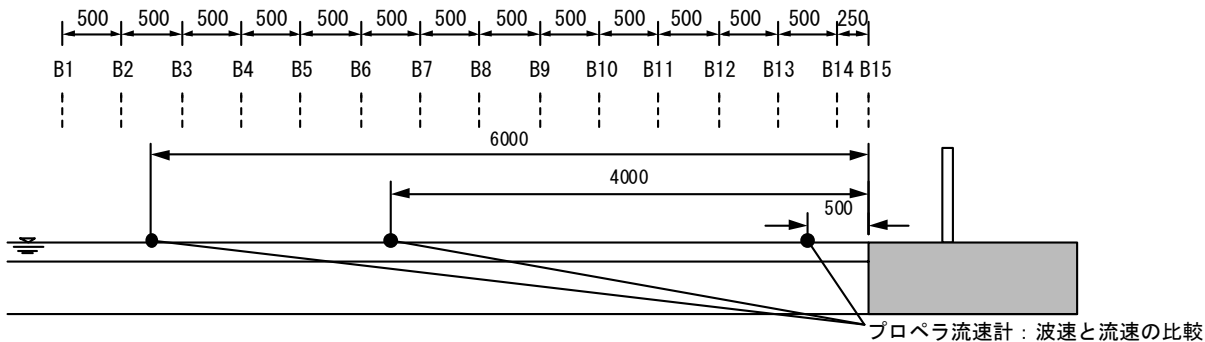
漂流状況は、以下の 2 通りの手法で水路側面から撮影した。

- ・通常カメラによる試験全体の動画撮影
- ・高速カメラによる堤体模型近傍の動画撮影。

堤体模型に衝突する漂流物の状況は、高速カメラにより撮影し、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、ひずみや水位と比較できるようにした。



(a) 衝突試験時



(b) 波検定時

図- 2.9 水位・流速の計測位置

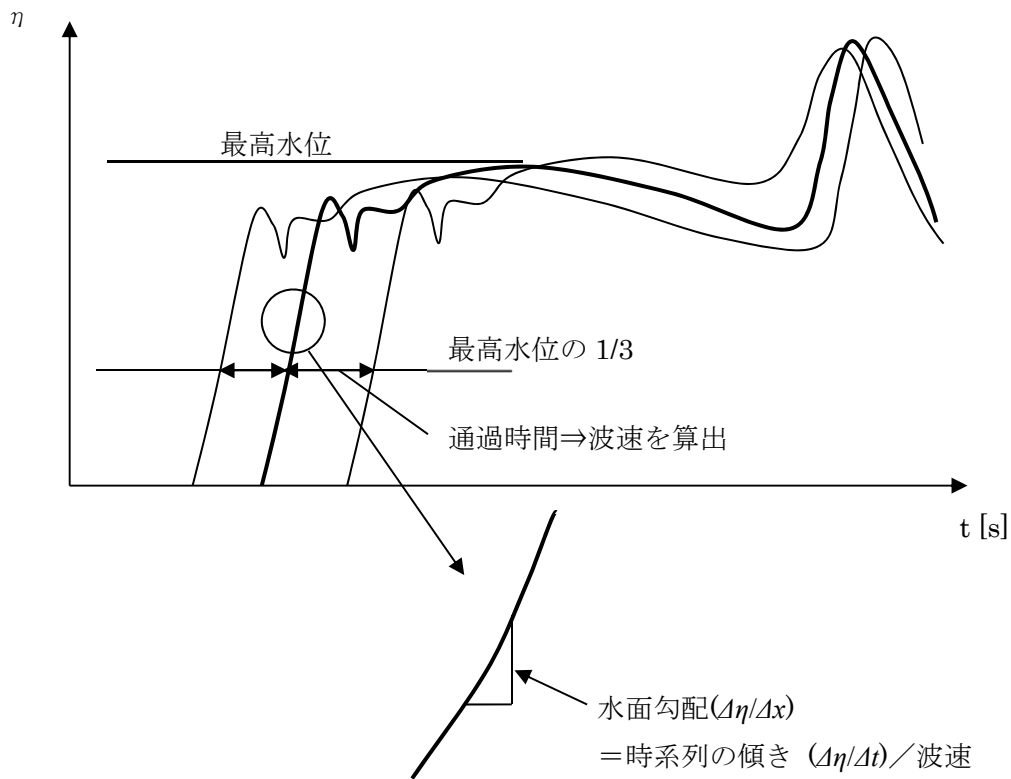


図- 2.10 波速・水面勾配の算定方法

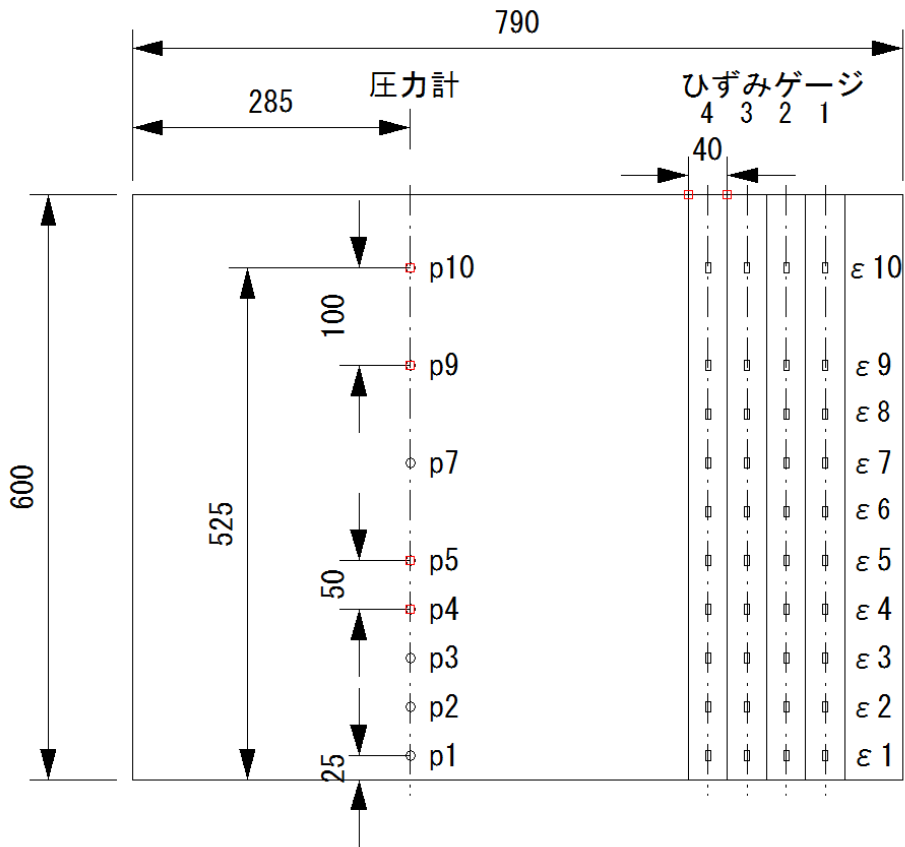


図- 2.11 防潮堤模型の圧力・ひずみ計測位置

2.2. 試験手順

2.2.1. 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である。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。対象とした波ケースの目標波形を、図-2.13に示す。目標波形は、計測点Aにおける波形の計測結果が目的波形に一致するようにした。造波波形を決定した後、同じ波形を3回繰り返して造波し、波高と流速を計測するとともに、再現性について確認した。

2.2.2. 気中衝突試験

水中での衝突試験では、衝突直前の衝突速度を計測することが困難である。漂流物模型の形状や剛性の違いによる衝突特性への影響について検討するため、衝突速度の明らかな気中試験（図-2.12）により、衝突速度と衝突ひずみエネルギーの関係を明らかとした。衝突高さは、漂流物衝突試験において想定される衝突位置を包括できるように、数点設定した。

2.2.3. 水中衝突試験

津波の造波準備が完了後、漂流物保持装置の電源を入れて、漂流物を電磁石により固定して静置し、（図-2.14）、波が近接してきた段階で電源を切り、漂流物が漂流可能な状態とし、津波により漂流物を堤体模型に衝突させ、堤体模型に生じるひずみを計測した。また漂流状態は、水槽側壁のガラス面より高速ビデオカメラにより撮影した。この時、撮影画像と各計測値とは、同期させて計測した。漂流物の初期位置は、波形によって特徴的な漂流特性が確認出来るように、0～6.0mの範囲で、適宜変更した。各計測項目を計測するとともに、撮影した動画から衝突時の漂流物の衝突速度を取得した。なお、試験毎のばらつきを確認するため、同じ試験を15回繰り返した。計測結果から、衝突によって生じるひずみエネルギーと衝突率を算定した。

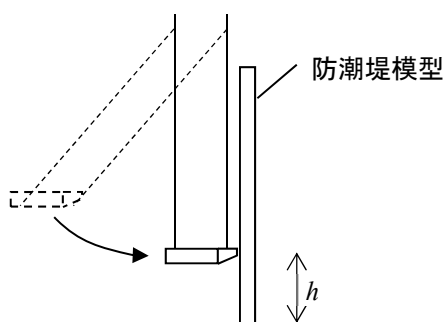


図- 2.12 気中衝突試験

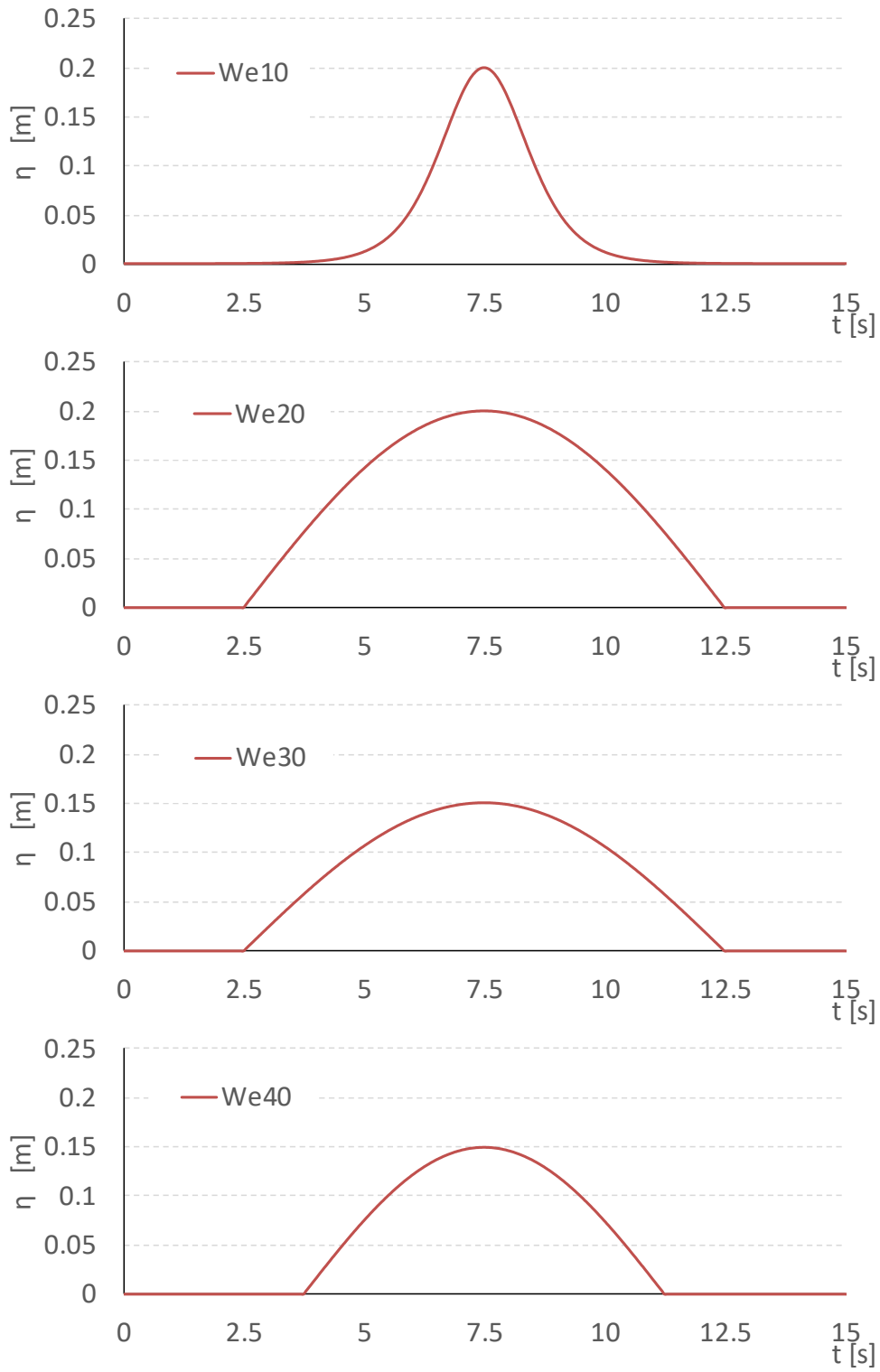


図- 2.13 目標入射波形 (計測点 A)

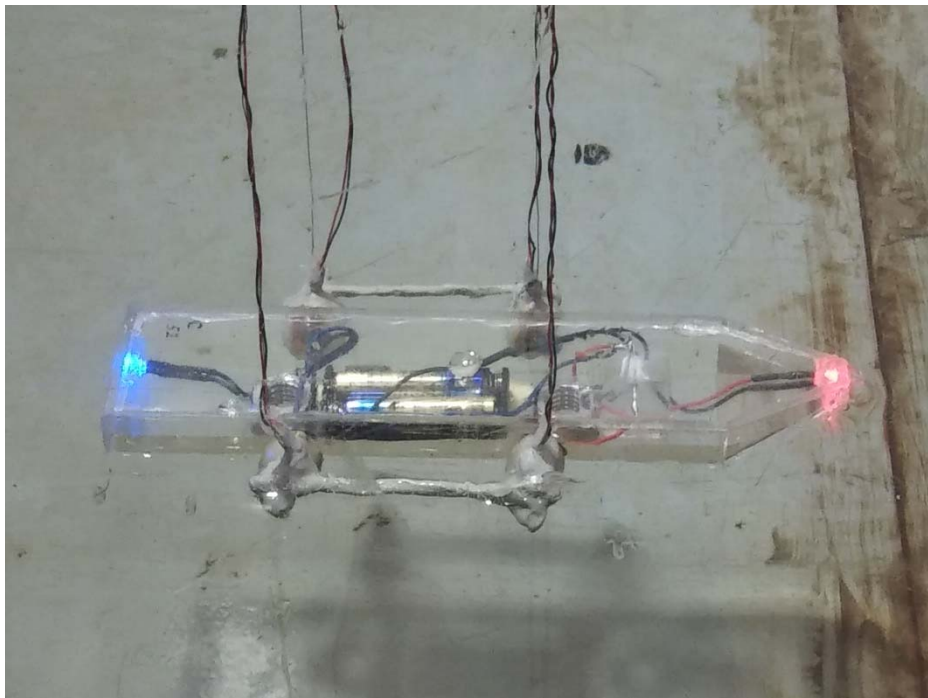
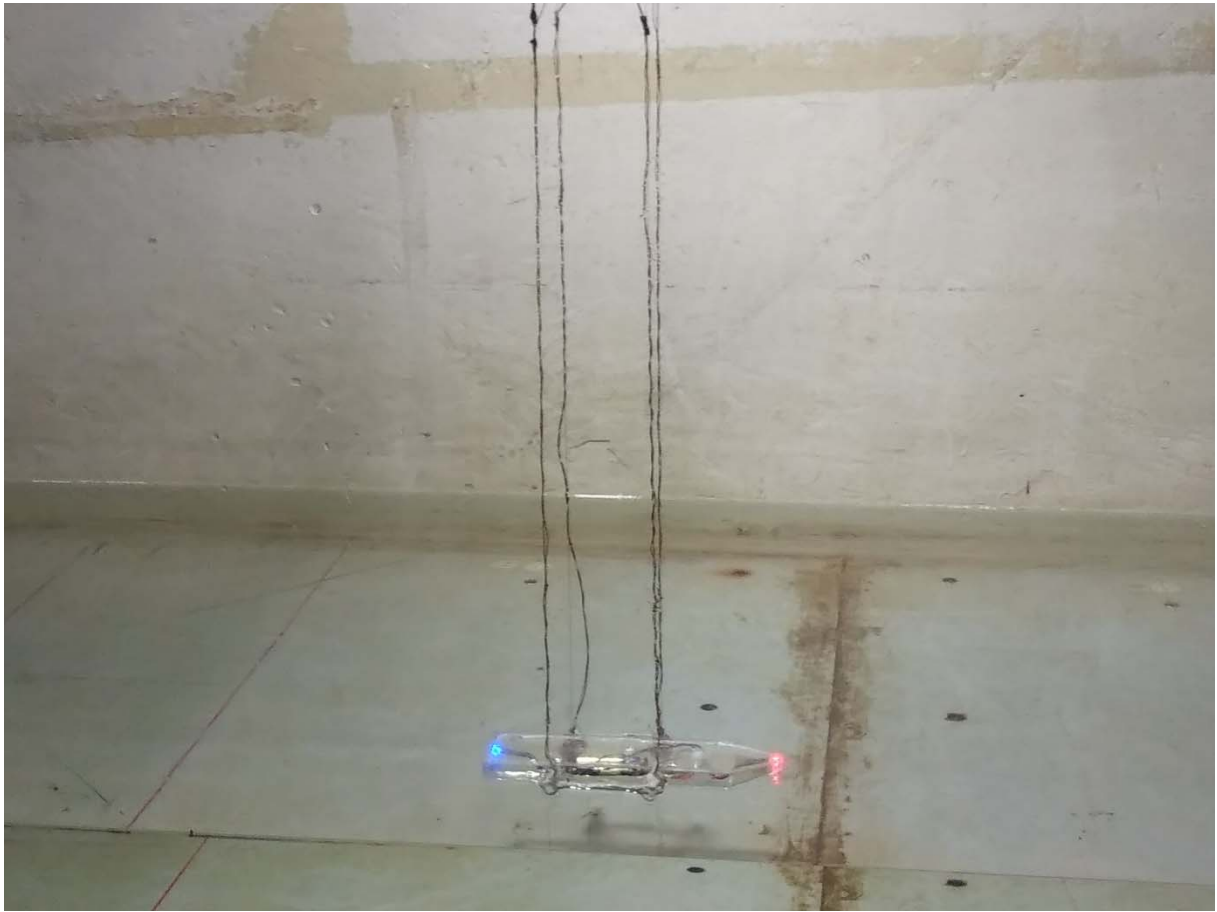


図- 2.14 漂流物の初期位置保持状況

2.3. 試験ケース

波形 4 ケース，漂流物タイプ 4 ケース，漂流物初期位置 0.1m～5.0m を組み合わせて試験ケースを設定した．試験ケースを表- 2.3 に示す．類似事業の衝突試験においては，初期位置を 0.5, 1.0, 2.0m の 3 種類のみを設定していたが，衝突頻度と初期位置の関係を明らかにするため，本試験では初期位置を細かく設定した．徐々に初期位置を汀線から離しながら試験を実施し，衝突回数が 15 回の試行に対して 2 回以下になる距離を目安として，初期位置の試験ケースの範囲を設定した．

表- 2.3 漂流物衝突試験の試験ケース

No	ケース名	波形	堤体位置	漂流物	漂流物位置	繰り返し	
1	F-We10-A-01	We10	0.625 m	A	0.1m	15回	
2	F-We10-A-05				0.5m		
3	F-We10-A-10				1.0m		
4	F-We10-A-20				2.0m		
5	F-We10-A-25				2.5m		
6	F-We10-A-30				3.0m		
7	F-We10-A-35				3.5m		
8	F-We20-A-01	We20			0.1m		
9	F-We20-A-05				0.5m		
10	F-We20-A-10				1.0m		
11	F-We20-A-20				2.0m		
12	F-We20-A-30				3.0m		
13	F-We20-A-35				3.5m		
14	F-We30-A-01	We30			0.1m		
15	F-We30-A-05				0.5m		
16	F-We30-A-10				1.0m		
17	F-We30-A-15				1.5m		
18	F-We30-A-20				2.0m		
19	F-We40-A-01	We40		0.1m			
20	F-We40-A-05			0.5m			
21	F-We40-A-10			1.0m			
22	F-We40-A-20			2.0m			
23	F-We40-A-25			2.5m			
24	F-We10-B-05	We10		B	0.5m		
25	F-We20-B-05	We20			0.5m		
26	F-We30-B-05	We30			0.5m		
27	F-We40-B-05	We40			0.5m		
28	F-We20-C-01	We20		C	0.1m		
29	F-We20-C-05				0.5m		
30	F-We20-C-10				1.0m		
31	F-We20-C-20				2.0m		
32	F-We20-C-30				3.0m		
33	F-We20-C-40				4.0m		
34	F-We20-C-45				4.5m		
35	F-We20-C-50				5.0m		
36	F-We40-C-01				We40		0.1m
37	F-We40-C-05						0.5m
38	F-We40-C-10	1.0m					
39	F-We40-C-20	2.0m					
40	F-We40-C-30	3.0m					
41	F-We40-C-35	3.5m					
42	F-We40-C-40	4.0m					
43	F-We20-D-05	We20		D	0.5m		
44	F-We20-D-10				1.0m		
45	F-We20-D-15				1.5m		
46	F-We20-D-20				2.0m		
47	F-We40-D-05	We20			0.5m		
48	F-We40-D-10				1.0m		
49	F-We40-D-20				2.0m		
50	F-We40-D-25				2.5m		

合計 750 ケース

3. 波検定結果

3.1. 水位時系列

図-3.1に、計測点Aにおける沖波の水位・流速の計測時系列を示す。We10, We20は、津波高を0.20mでほぼ同じとして周期特性を変えた波形であり、We30, We40は、津波高を0.15mとし、We30はWe20と同じ周期特性、We40はこれよりも周期特性を短くしたものである。

なお、ここに示した結果は、3回の繰り返しでほぼ同じ結果が再現出来ていることを確認して、その平均を示したものである。線形を仮定すると、津波の最大流速は津波高0.2mに対して流速0.8m/s、津波高0.15mに対して0.6m/sとなる。試験結果は概略この値になるものの、若干これよりも小さい。これは非線形性の影響によるものと考えられる。水位変化と流速の変化を比較すると、津波到達後4s程度の間は、両者は比例する動きを示しているが、その後水位変動に比較して流速が低減し負の値となっている。これは、汀線からの反射波成分が到達したためと考えられる。

図-3.2に、計測点B1～B15の水位および流速の計測時系列を示す。計測点B1では波形の前傾化が生じており、その後波形の先端部が分散性により分裂し、さらに汀線に近づくと、波形により異なるがB5～B9の間で碎波して、津波高が若干低下している状況が確認出来る。流速は、B2-B3間、B6-B7間ともに水位波形と類似の時間変化を示しており、その値は両地点でほぼ同じ値である。一方B13-B14間では、反射波の影響により最大流速は小さくなり、その時系列変化も水位変化とは異なっている。

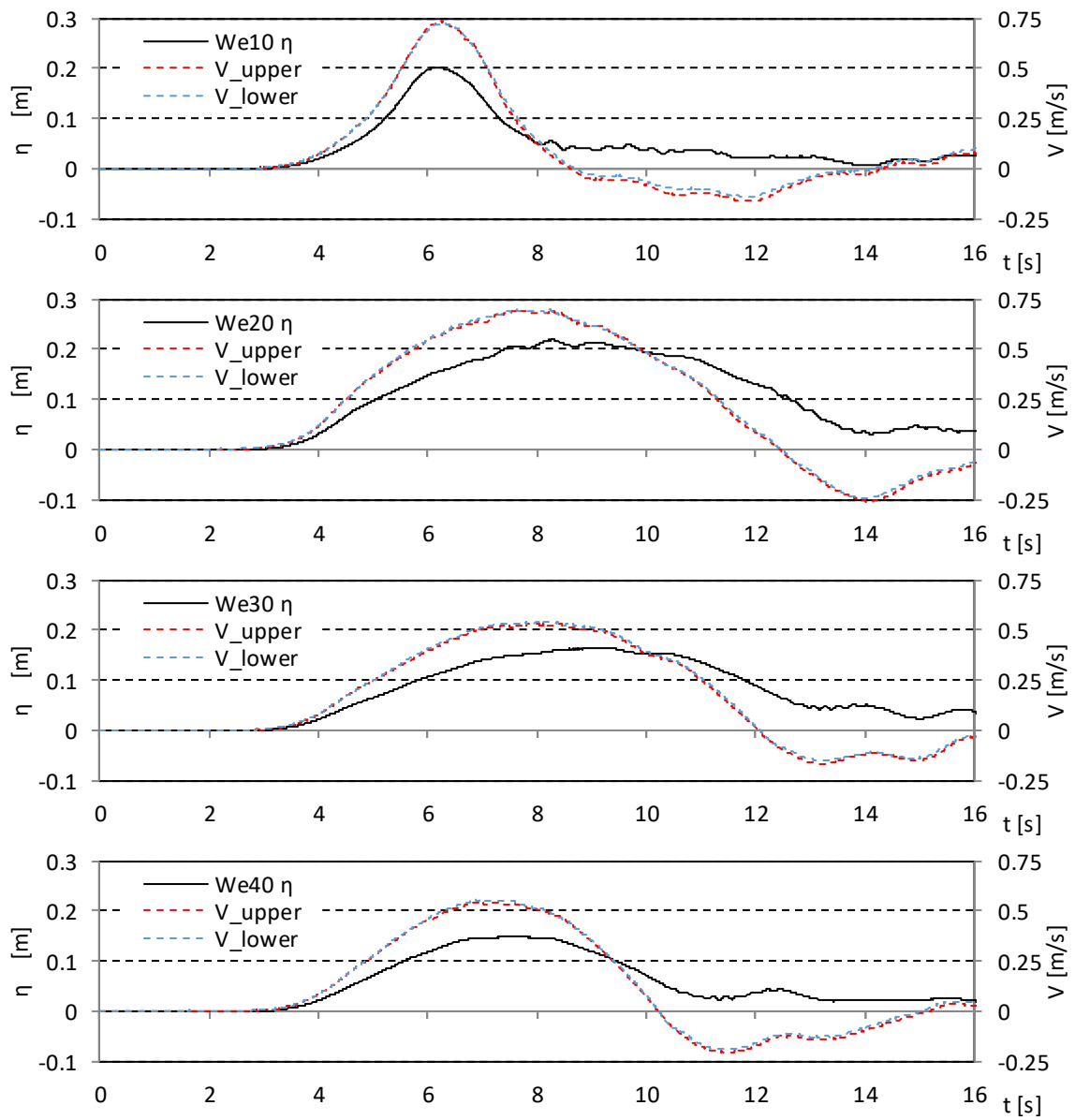


図- 3.1 入射津波の計測結果 (計測点 A)

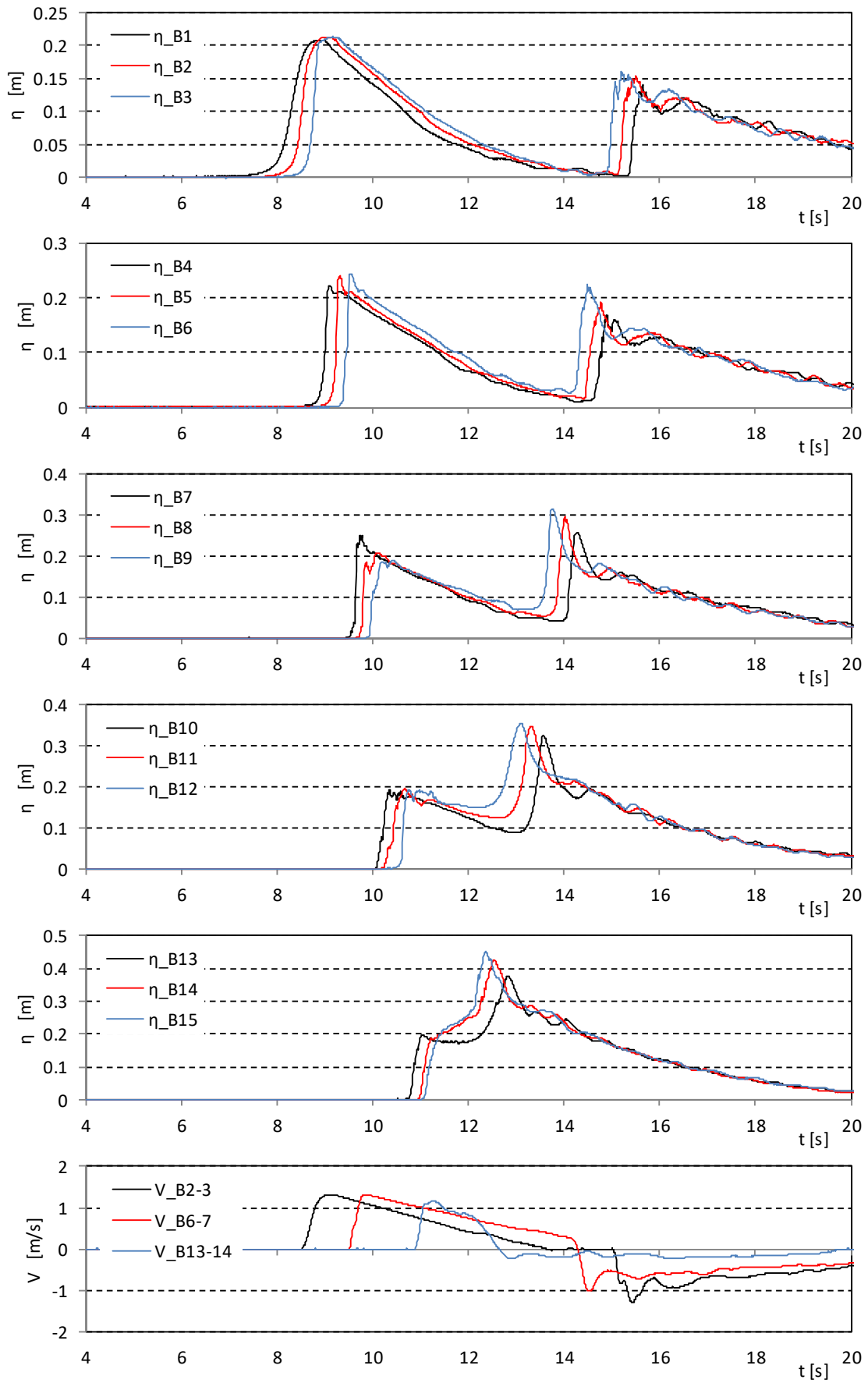


図-3.2 入射波の水位・流速時系列 (We10)

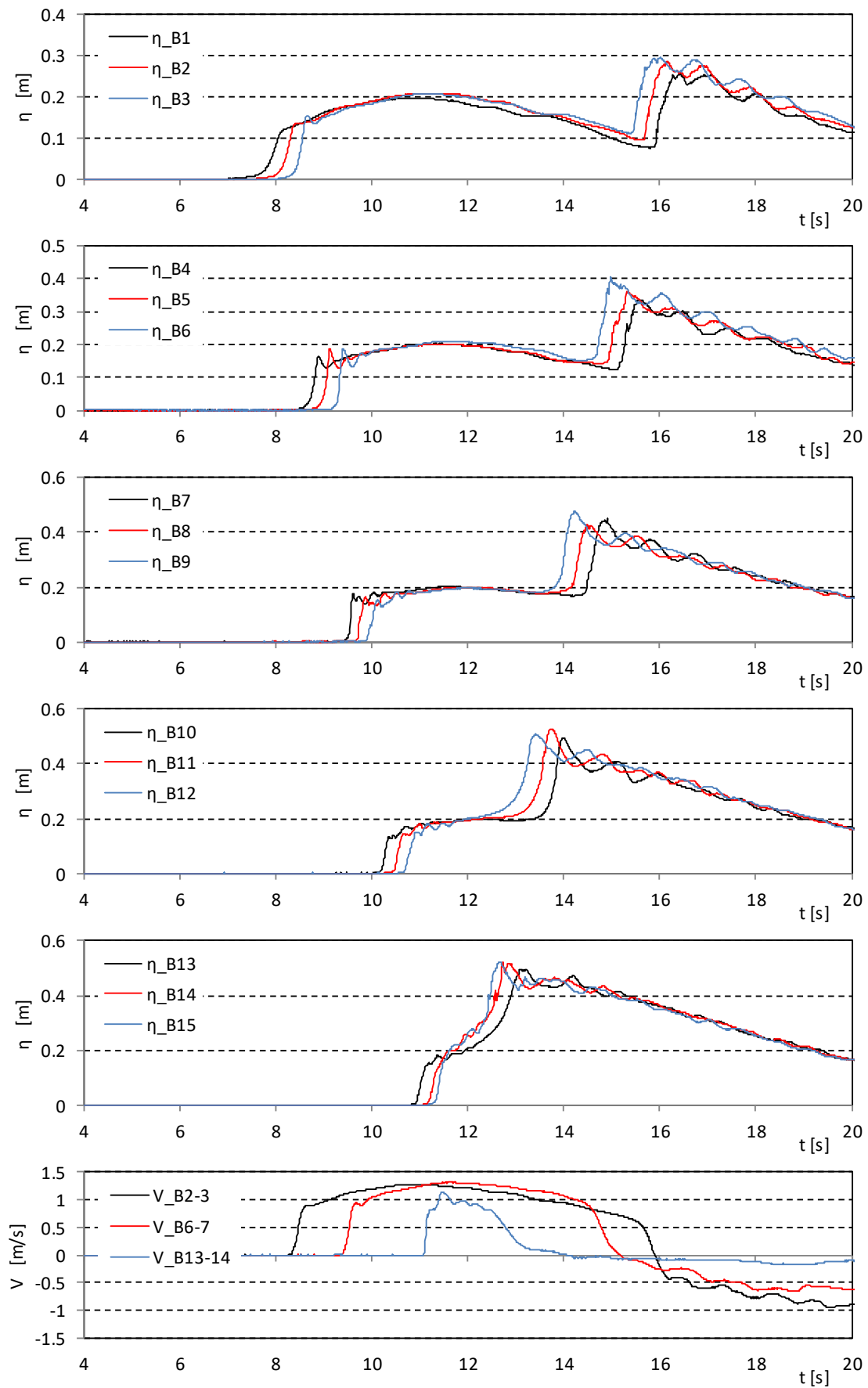


図- 3.2 入射波の水位・流速時系列 (We20)

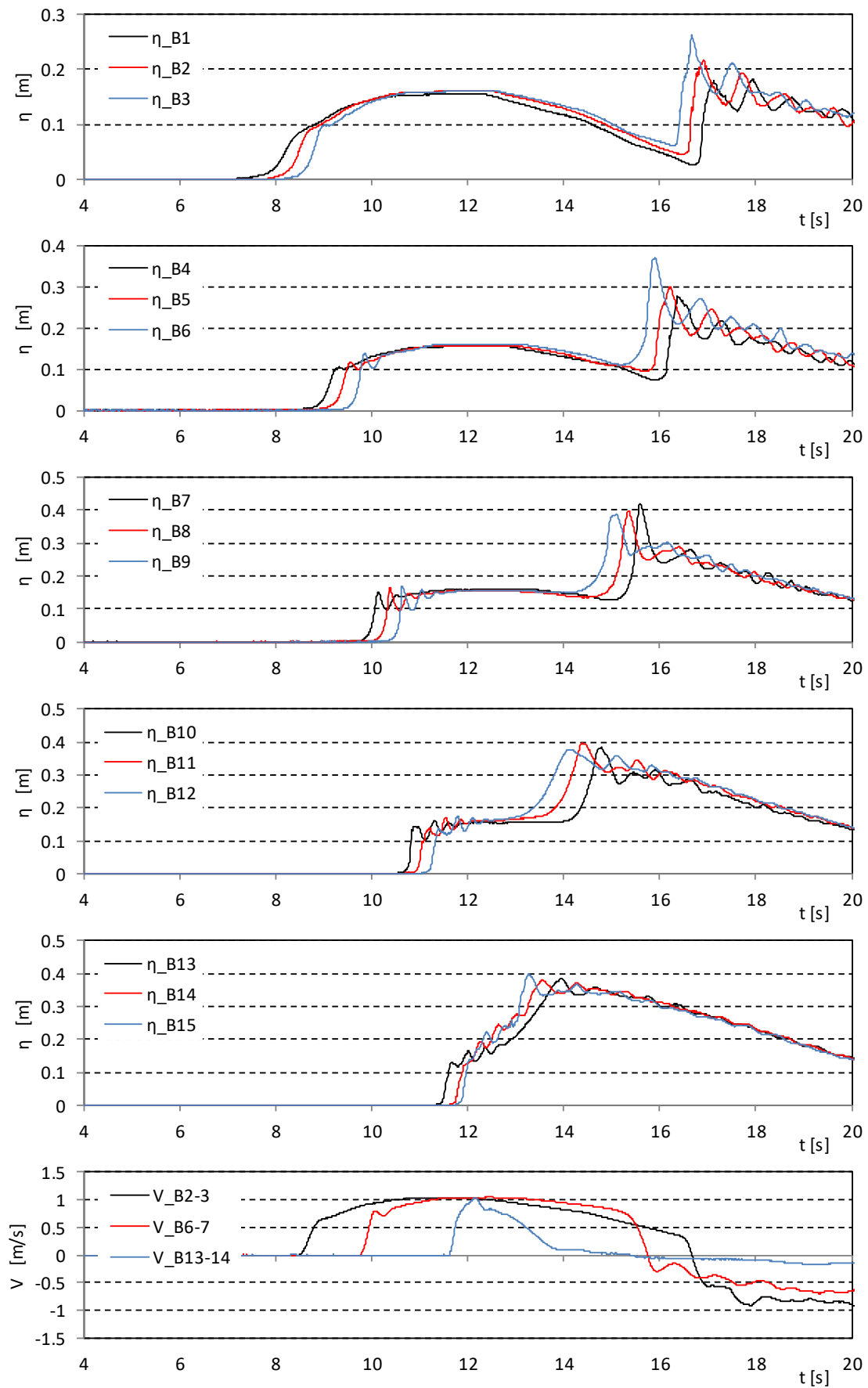


図- 3.2 入射波の水位・流速時系列 (We30)

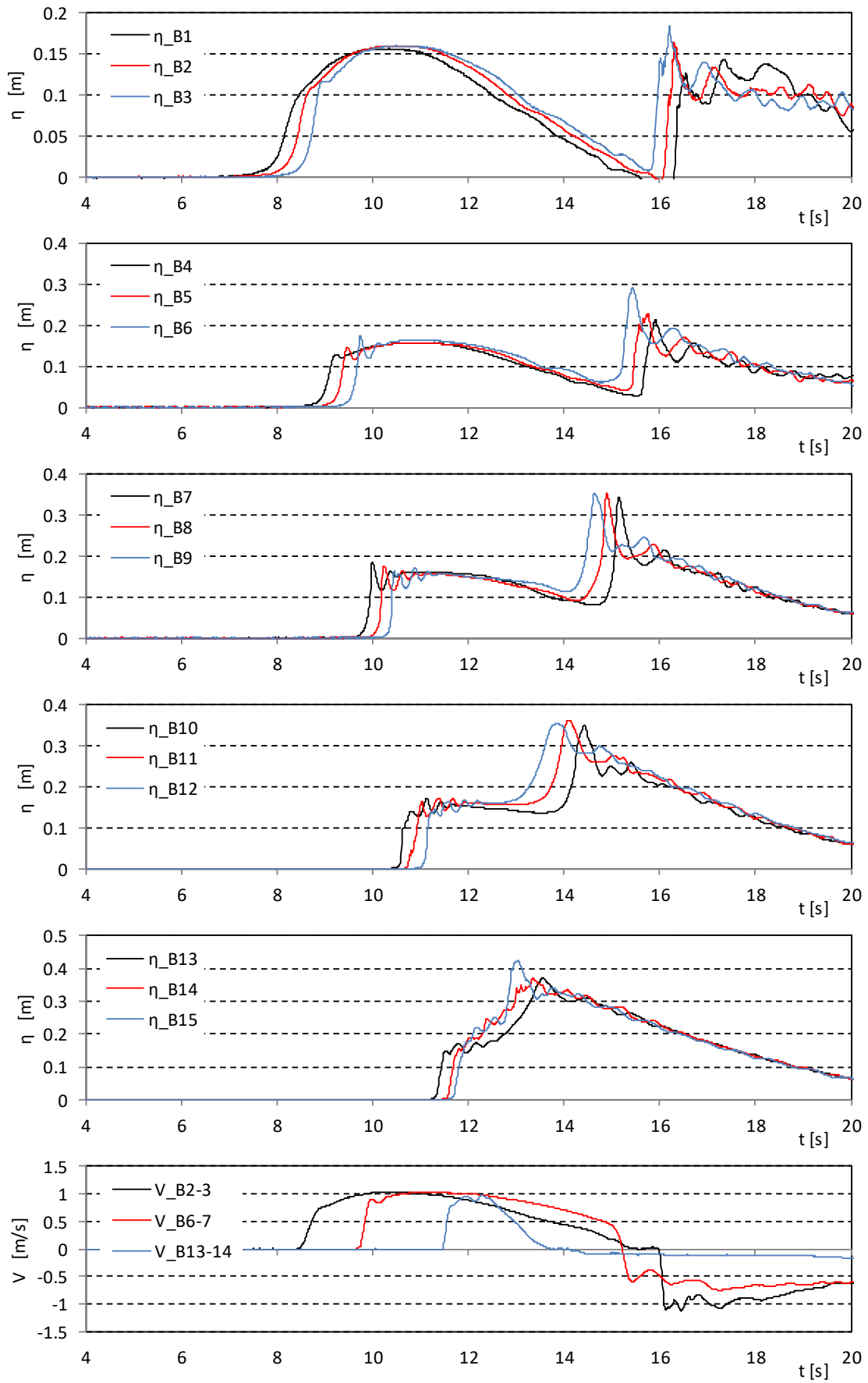


図- 3.2 入射波の水位・流速時系列 (We40)

3.2. 波速と水面勾配

ここではまず、図-3.2の結果を用いて、波形の移動速度から波速を求める。図-3.2の結果を詳細に確認すると、計測点 B1~B3 にかけては、波形のピーク部分の移動速度が、波形の立ち上がり部分よりも大きくなっている。これは、波形の前傾化による影響と考えられる。一方、計測点 B4~B6 にかけては、波形の分裂により、ピーク部分の移動速度が立ち上がり部分よりも小さくなっている。以上のように、波形のピーク部分は波の変形により移動速度が変動する。漂流物模型の動き出しには、ピーク部分よりも波形の立ち上がり部分の方が影響が大きいと考えられるため、ここでは、波形立ち上がり部分を対象に移動速度を波速として算出する。具体的には、各計測点で水位が津波高の 1/3 高さ (We10, We20 では 0.07 m, We30, We40 では 0.05m) に到達した時間を抽出し、各計測点間の時間差で距離 (0.5 m) を除した値を波速とした。結果を図-3.3 に示す。図中には、比較として流速計により計測した水面付近の水平流速 (図-3.2 参照) の最大値を示した。また“砕波点”として示した位置は、動画の観察から、波面が崩れ始める瞬間の位置を求めたものである。

線形理論で長波の波速 c は、

$$c = \sqrt{gh}$$

と表される。これによると波速は、水深 0.15m の場合 1.2 m/s となるが、いずれのケースも算出した波速はこれよりも大きくなっている。一方、水位上昇を考慮し、次式で波速を算定した場合、津波高を η と考えると、We10, We20 の波速は 1.9 m/s, We30, We40 の波速は 1.7m/s となる。

$$c = \sqrt{g(h + \eta)}$$

砕波点より沖側の波速は、ほぼこの値に一致していることが分かる。一方砕波時は、波形が崩れることにより、見掛けの波速が一時的に大きくなっていると考えられる。また砕波点より汀線側では、砕波点から徐々に波速が低下し、汀線近傍では沖側よりも若干大きな値で概略一定となっている。

表-3.1 は、汀線近傍の 4 点の計測点 (汀線から 0.125~1.5 m) の波速の平均を求めたものである。これに対し、段波の理論によると、波速は次式で表されると考えられる。

$$c = \sqrt{gh} \sqrt{\frac{1}{2} \frac{h + \eta}{h} \left(\frac{h + \eta}{h} + 1 \right)}$$

これによると、We10, We20 の波速は 2.4 m/s, We30, We40 の波速は 2.1 m/s となるが、砕波後の波速はこれに近い値となっている。

流速の計測結果は、計測点によって大きくは変わらず、We10, We20 および We30, We40 でほぼ同じ値となっている。線形理論では、津波の流速は

$$V = \eta \sqrt{g/h}$$

で表される。これによると流速の最大値はそれぞれ 1.6 m/s, 1.2 m/s となるが、計測された流速はこれよりも小さく、非線形性の影響が表れていると考えられる。また、ここに示した流速は、初期水面よりも少し上で計測したものであるが、水中で計測した図-3.2 の流速の最大値とほぼ同じ値であり、最大流速については鉛直方向にほぼ一樣となっていることが分かる。

波速と流速を比較すると、流速の方が小さい。したがって漂流物を考える場合、流れによって運ばれるよりも、波によって運ばれる方が接近速度は大きいことになる。そのため、漂流物が波に連行されるか、流れに連行されるかにより衝突力が大きく変わることが推察される。

図-3.4は、各計測点における最大の水面勾配を算出した結果である。ここで水面勾配は、各計測点の水位時系列から $\partial \eta / \partial t$ の最大値を求め、これを同地点の波速で除することにより求めた。なお、砕波の瞬間は、水面勾配は局所的には ∞ あるいはマイナスになると考えられる。したがって、計測のサンプリング周波数をより大きくすれば、水面勾配の最大値はこれに近づくと考えられ、図-3.4で水面勾配が最大となる位置での水面勾配は、定量的には有意な値でないと考えられる。図-3.4では、水面勾配が徐々に大きくなり、砕波点で最大となる空間的な変化が表れている。砕波後の水面勾配については、砕波後の水面が乱れているため、泡の混入した概略の水面の勾配を示していることになる。

各ケースを比較すると、We10, We20, We40, We30の順に、水面勾配がより沖側で大きくなっている。

表-3.1 汀線近傍での波速

unit:m/s

波	汀線からの距離 [m]				平均
	1.5	1	0.5	0.125	
We10	2.27	2.50	2.50	2.27	2.39
We20	2.17	2.08	1.85	2.27	2.10
We30	1.92	1.85	1.92	2.08	1.95
We40	1.79	2.00	2.00	2.27	2.01

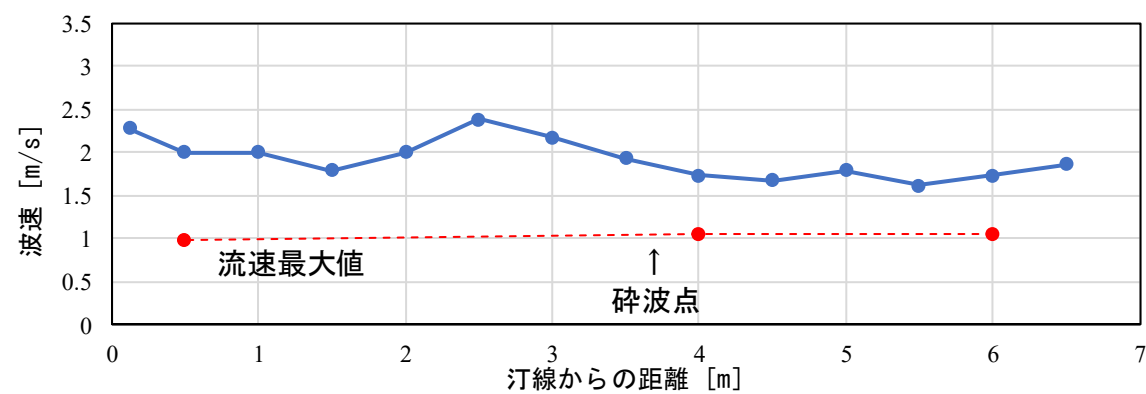
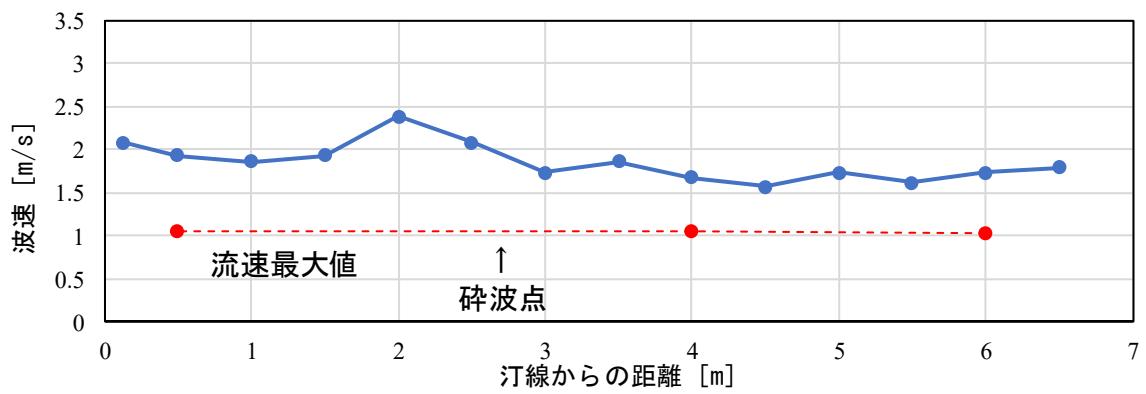
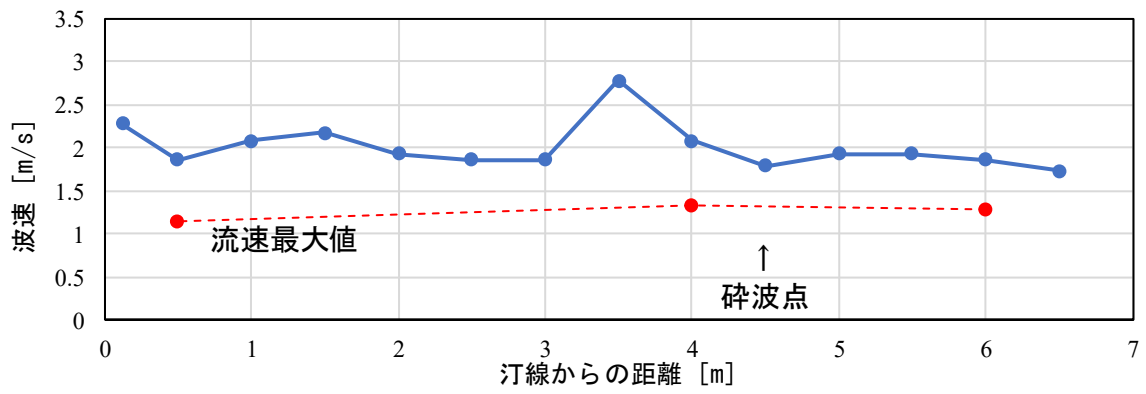
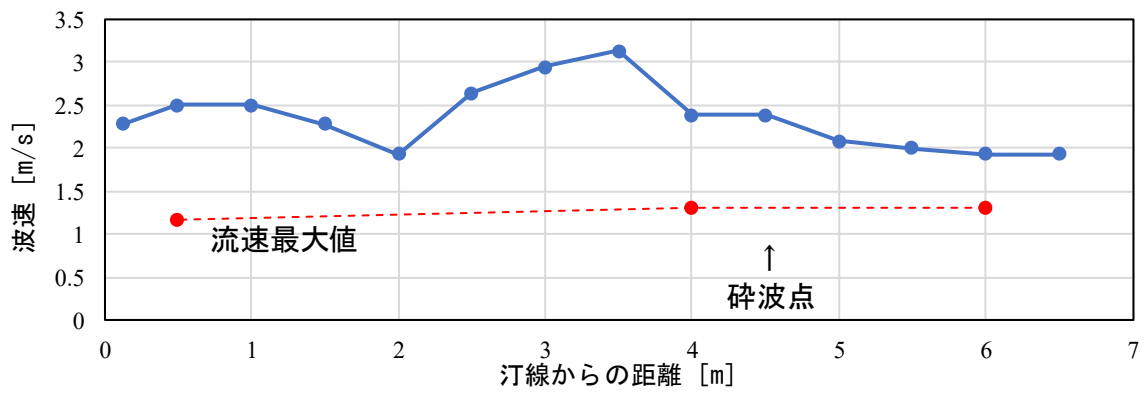
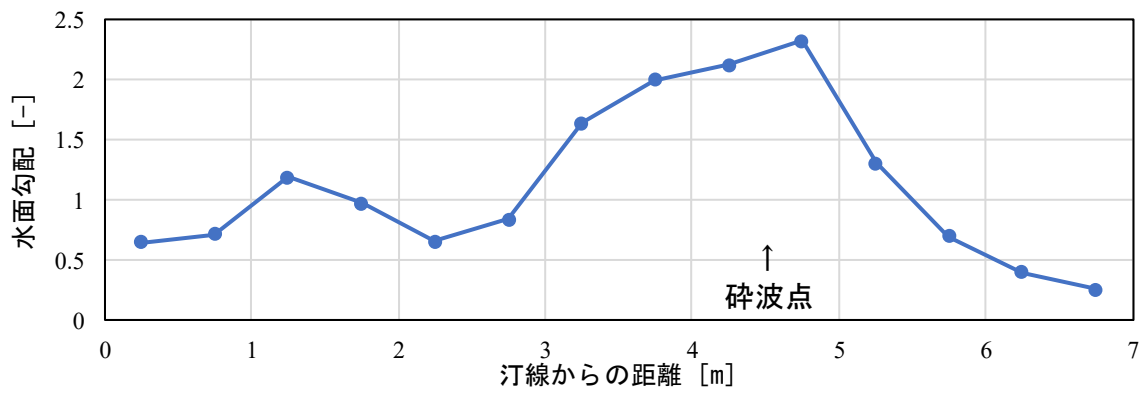
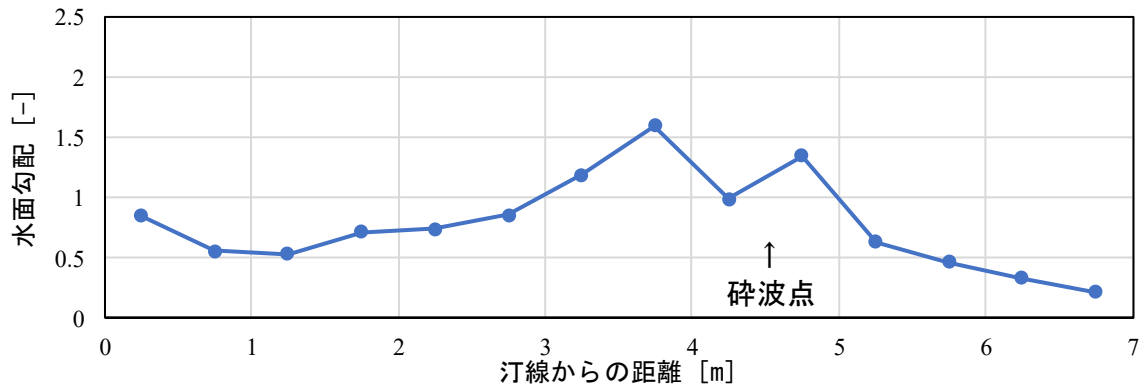


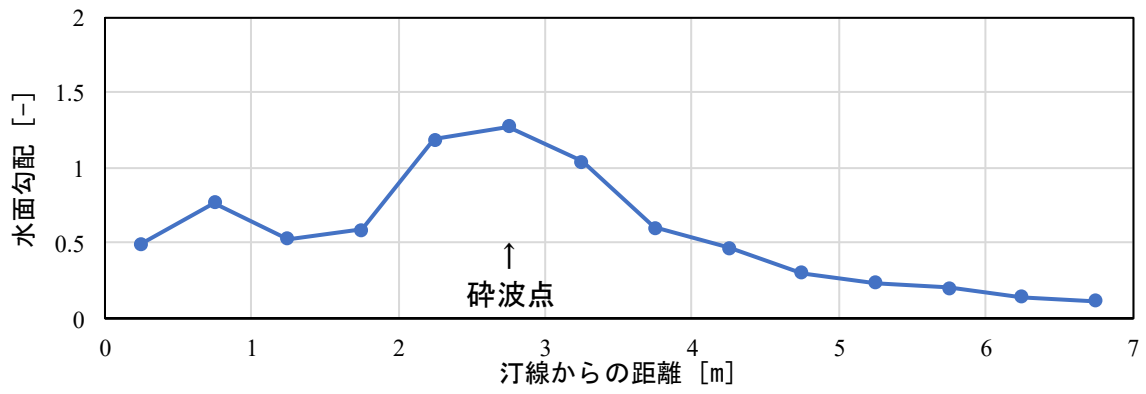
図- 3.3 波速の算出結果



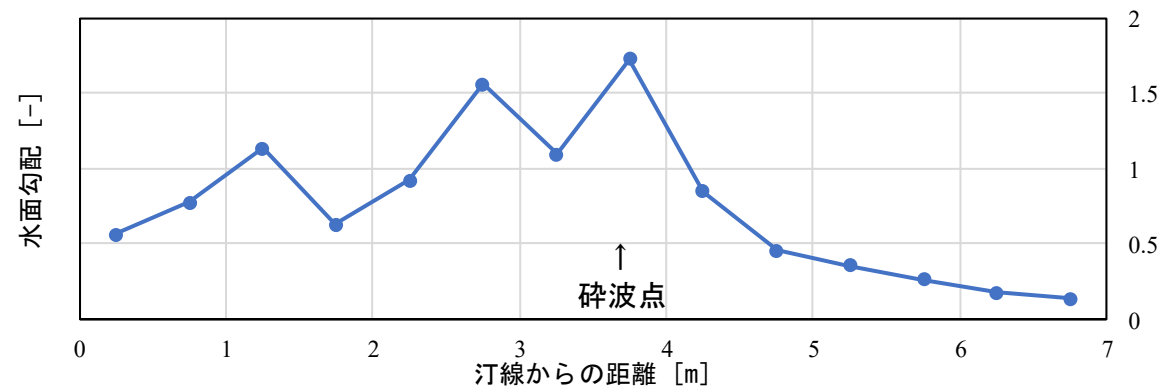
(a) We10



(b) We20



(c) We30



(d) We40

図-3.4 水面勾配の算出結果

4. 気中衝突試験結果

4.1. 計測結果

図・4.2～図・4.81 に気中衝突試験のひずみ時系列，ひずみエネルギー時系列，ひずみの鉛直分布の計測結果を示す．ここでは，堤体模型に生じた曲げひずみエネルギー（以降，単にひずみエネルギーとする場合，曲げひずみエネルギーを表す）によって，衝突力を評価する．梁のひずみエネルギー E は以下の式によって求められる．

$$E = \int \frac{M^2}{2E_y I} dz = \int \frac{2\varepsilon^2 E_y I}{d^2} dz$$

ここで， M ：曲げモーメント， E_y ：ヤング率， I ：断面二次モーメント， d ：堤体厚である．

試験は同じ条件で3回実施したが，ここには1回目の結果を示した．図・4.1 に示すように，漂流物が衝突すると，その衝突高さに設置されたひずみゲージに正（図で右に凸）の極大値が発生し，その上下のひずみゲージは負の値となる．この時，堤体は全体に岸側（右側）にたわみ始めており，堤体全体が岸方向に運動している状態となる．その後，堤体の振動モードに対応した自由振動で振動することになる．例えば図・4.4 は，漂流物を高さ 0.0075m の位置に衝突させたものであるが，ひずみの時系列では，0.0054s において， $\varepsilon 2$ （高さ 0.0075m）に極大値が発生している．これは漂流物が衝突した瞬間であり，ひずみの鉛直分布（ $t=0.0054s$ ）を見ると 0.0075m の高さに正のひずみが，その上下に負のひずみが発生している．一方，この時ひずみエネルギー時系列では，極大値とはならずひずみエネルギーは増加途中にある．気中衝突試験では，漂流物の衝突以外に外から入ってくるエネルギーはないことから，この時，衝突により堤体に生じるエネルギーは，ひずみエネルギー以外のエネルギー，例えば運動エネルギーやせん断ひずみエネルギーとして堤体に生じていると考えられる．

図・4.4 の場合，ひずみエネルギーの時系列では，0.0081s において最大値となっており，ひずみエネルギーはこの後，固有周期で自由振動しながら徐々に減少している．この最大値が衝突により堤体に与えられたエネルギーと考えられる．ただし，堤体の自由振動は複数のモードで生じているため，最大値発生時に運動エネルギーが完全にゼロとはなっていないこと，衝突直後からいくらかエネルギーは減衰していることが考えられ，この最大値は堤体に与えられた全エネルギーよりは若干小さいことが推察される．

片持ち単純梁として求めた堤体模型の固有周期は，1次モードから4次モードまでそれぞれ，0.0528, 0.0084, 0.0030, 0.0015 s である．ひずみエネルギーの振動はこの 1/2 周期となることから，それぞれ 0.0264, 0.0042, 0.0015, 0.0008 s となる．ひずみエネルギーの時系列によれば，主に2次モードで振動しているが，衝突位置が低いほど3次モードの成分が大きくなり，また，より高次モードの成分も生じている．この傾向は，漂流物の質量がもっとも小さい TypeD の漂流物で顕著である．

下段のひずみの鉛直分布には，漂流物が衝突した瞬間から，最大ひずみエネルギーが生じるまでの間の，ひずみ分布の変化を示した．各ケースを比較すると，衝突した瞬間は，衝突位置に正の，その上下に負のひずみが発生している．一方，最大ひずみエネルギーが発生した時間のひず

み鉛直分布は、上述したひずみエネルギーの時系列に表れている 2 次モードあるいは 3 次モードの形状となっていることが分かる。

ひずみの時系列によれば、衝突高さ 0.075~0.015m は、衝突時のひずみピークが明瞭であるが、衝突高さ 0.0175~0.0225m では、ひずみピークが 2 山になっている。ここでは、衝突の瞬間は 2 つ目のピークを選択している。衝突位置が高いと、堤体模型が曲がりやすくなるため、堤体の衝突位置の後方への移動距離が大きくなり、漂流物との接触時間が長くなってひずみのピークが 2 山になっていると推察される。この時、堤体の窪みの長さ（衝突位置の上下でひずみが負となる間の距離）も長くなるため、振動モードとしては 3 次モードが生じ難く 2 次モードが支配的となる。

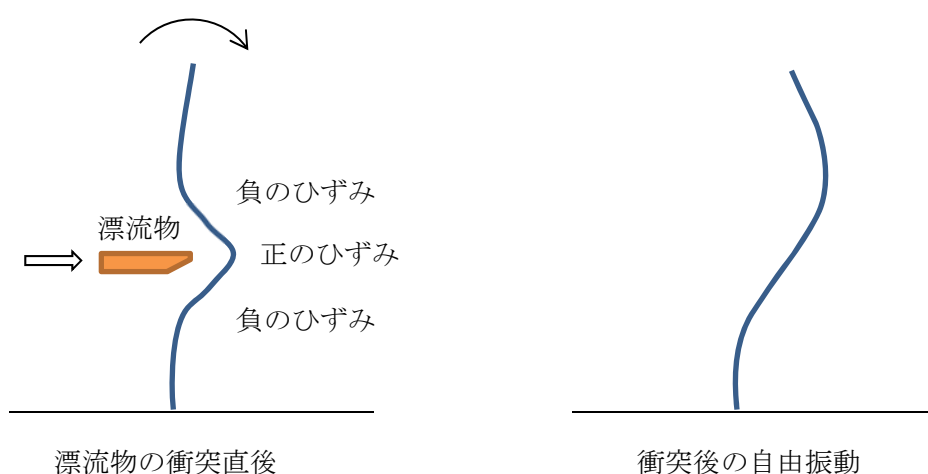


図- 4.1 ひずみの発生状況

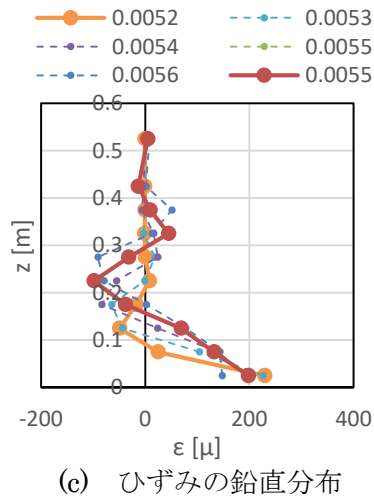
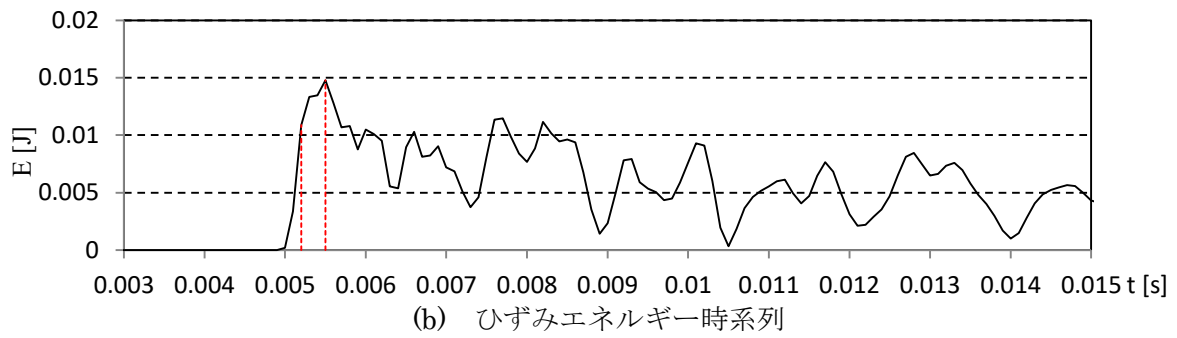
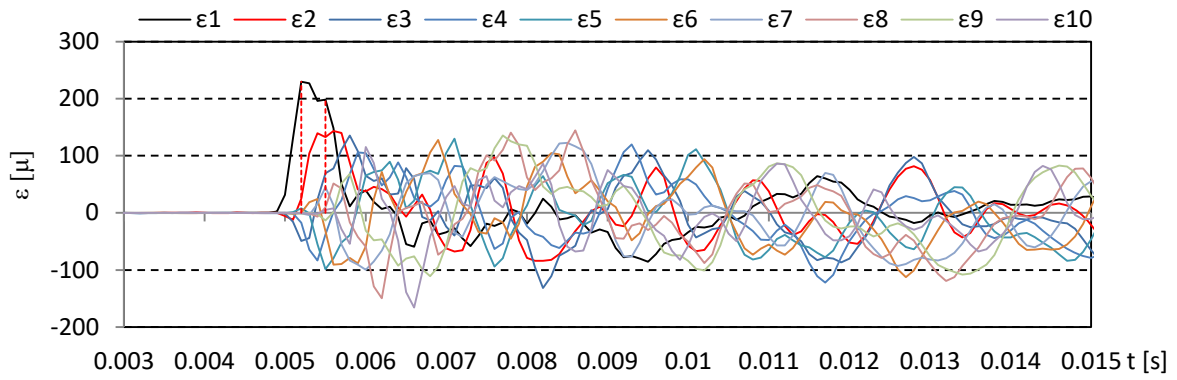


図- 4.2 気中衝突試験結果 (TypeA, 衝突高さ 2.5cm, 衝突速度 2.0m/s)

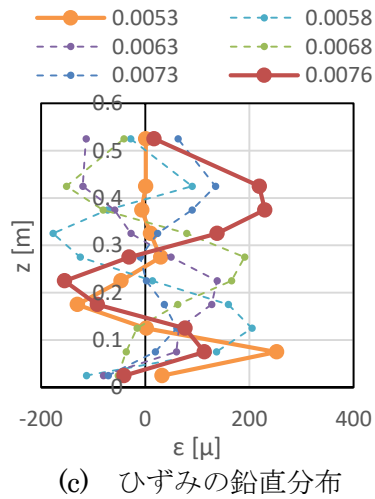
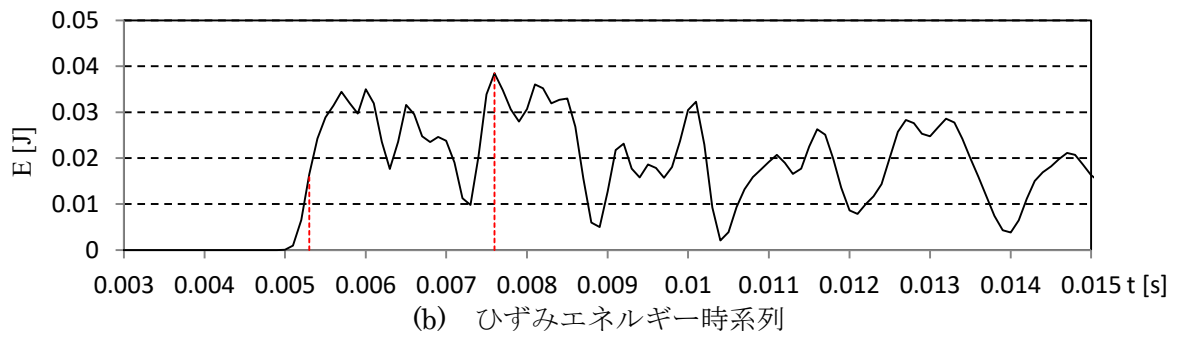
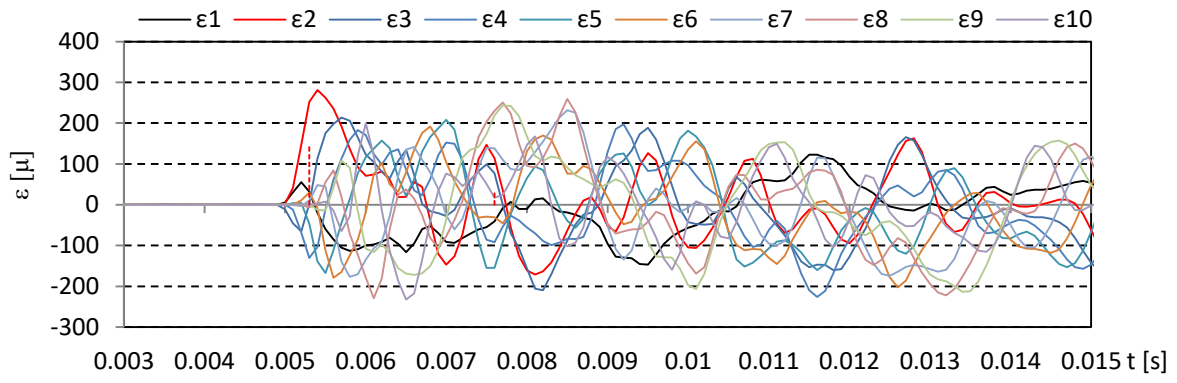
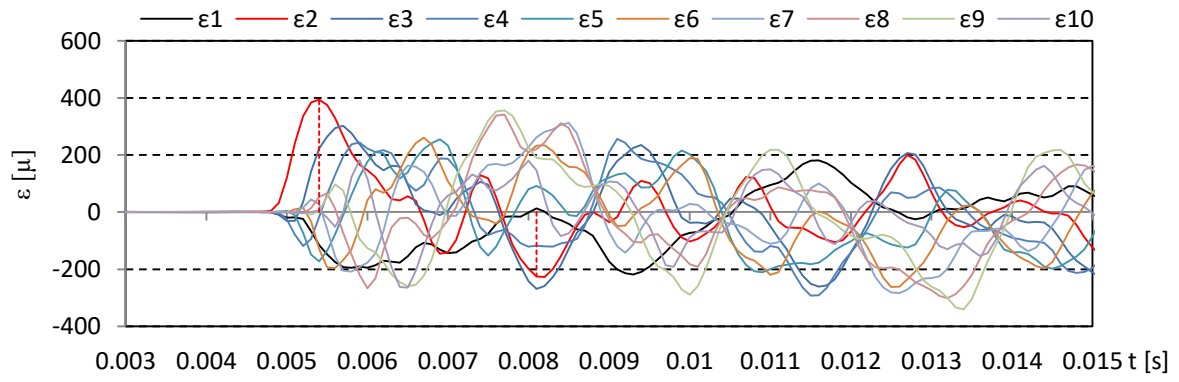
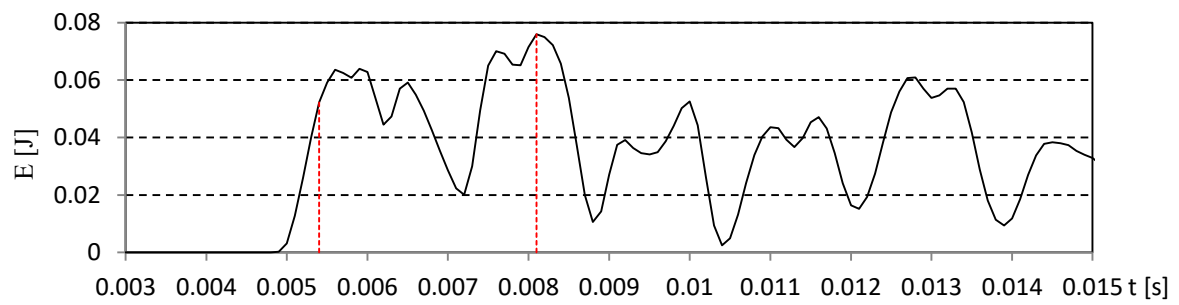


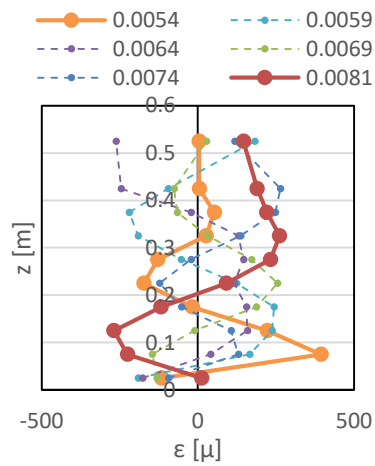
図- 4.3 気中衝突試験結果 (TypeA, 衝突高さ 5.0cm, 衝突速度 2.0m/s)



(a) ひずみ時系列

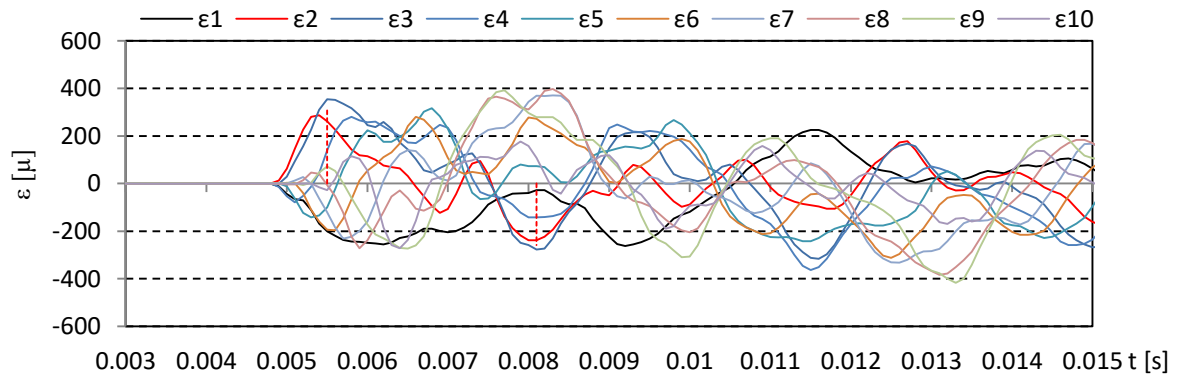


(b) ひずみエネルギー時系列

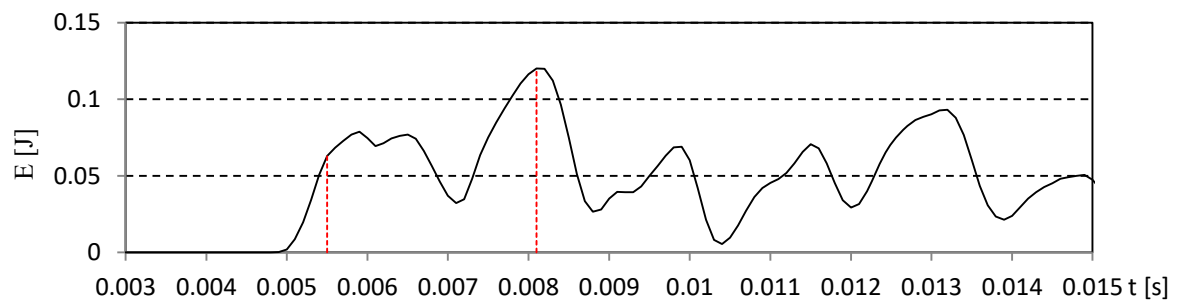


(c) ひずみの鉛直分布

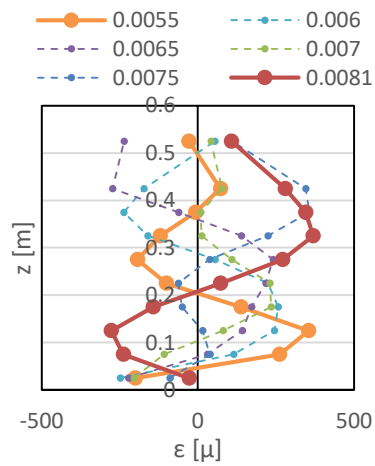
図-4.4 気中衝突試験結果 (TypeA, 衝突高さ 7.5cm, 衝突速度 2.0m/s)



(a) ひずみ時系列



(b) ひずみエネルギー時系列



(c) ひずみの鉛直分布

図-4.5 気中衝突試験結果 (TypeA, 衝突高さ 10.0cm, 衝突速度 2.0m/s)

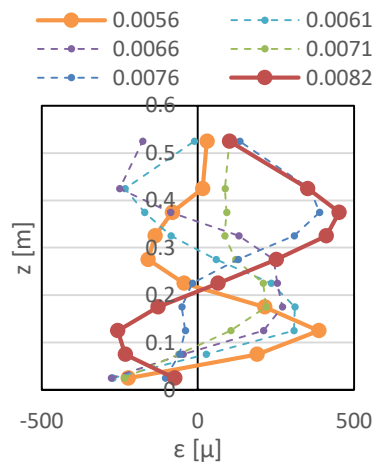
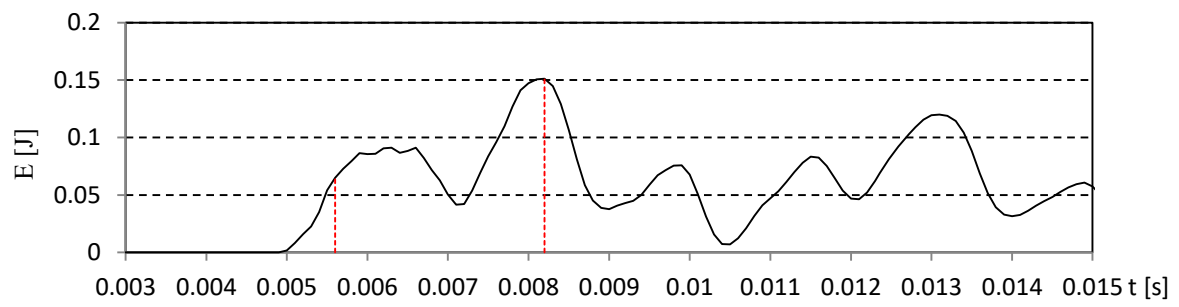
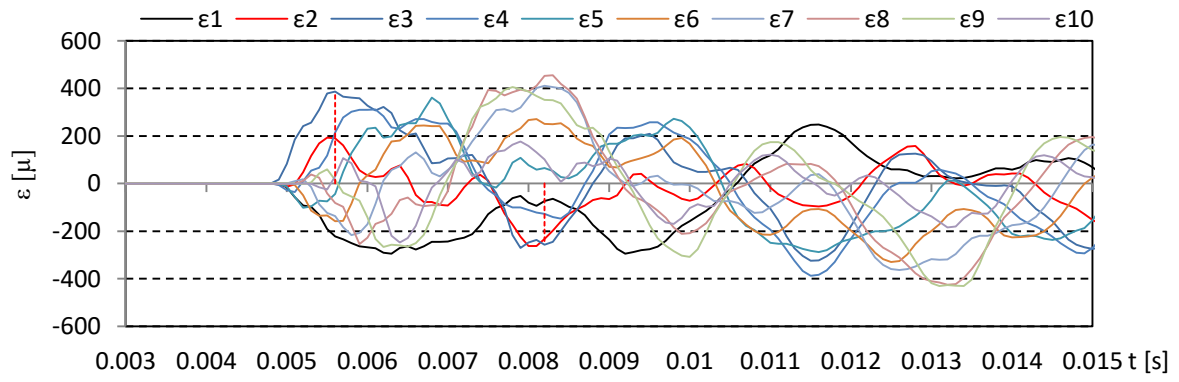
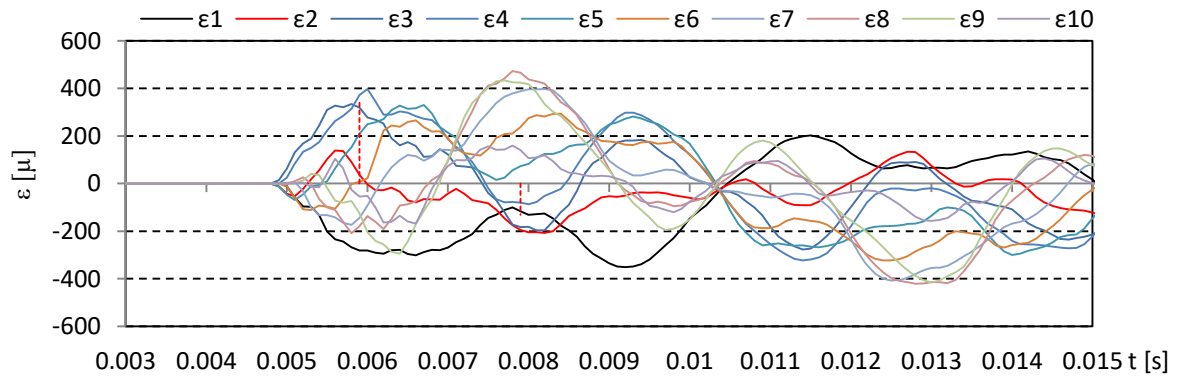
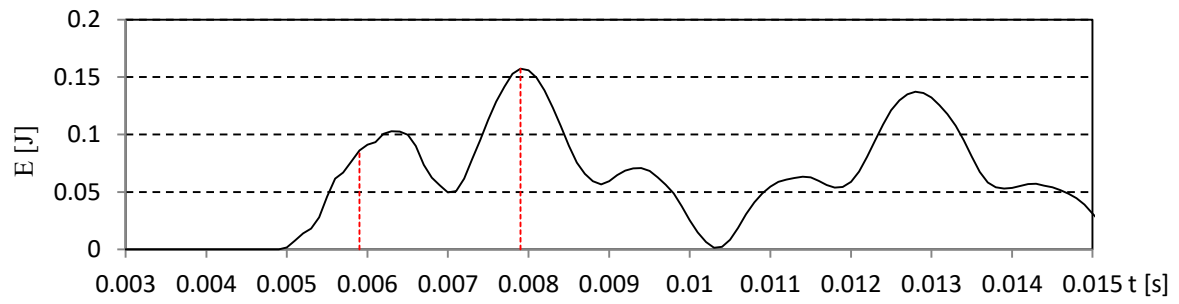


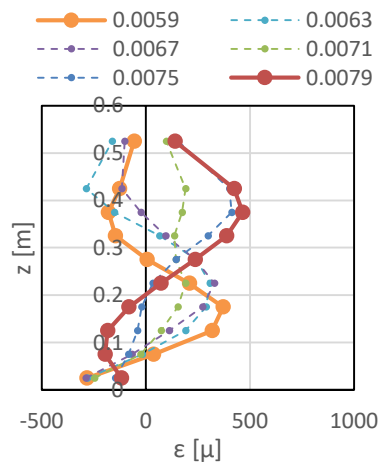
図- 4.6 気中衝突試験結果 (TypeA, 衝突高さ 12.5cm, 衝突速度 2.0m/s)



(a) ひずみ時系列



(b) ひずみエネルギー時系列



(c) ひずみの鉛直分布

図- 4.7 気中衝突試験結果 (TypeA, 衝突高さ 15.0cm, 衝突速度 2.0m/s)

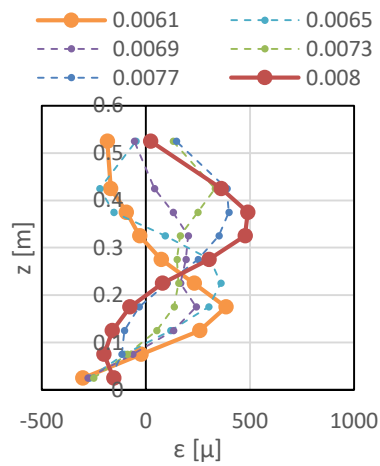
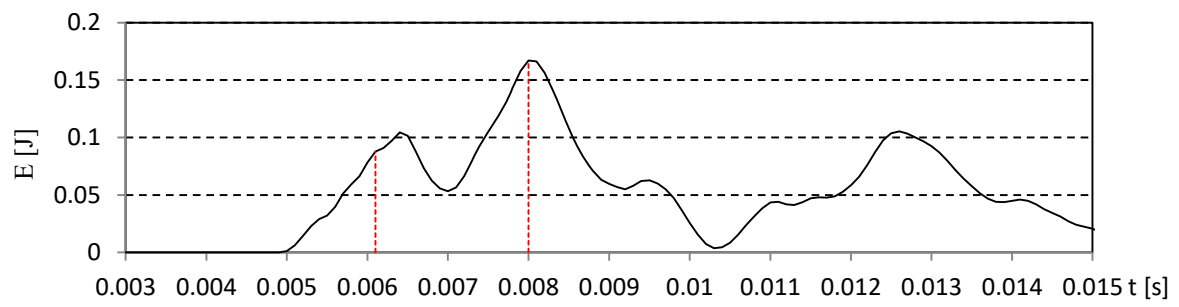
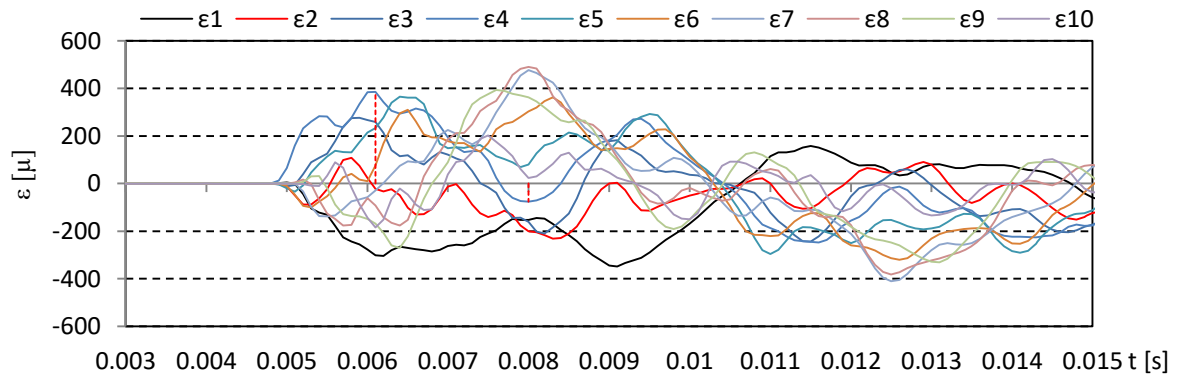
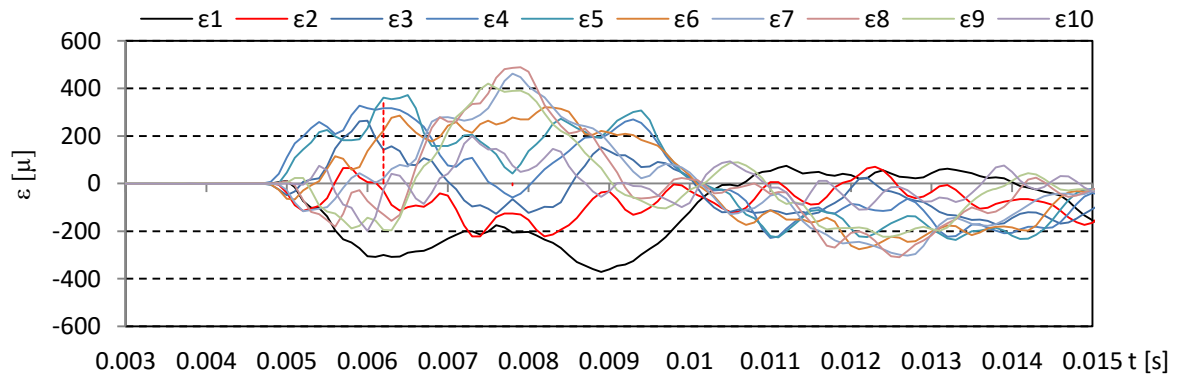
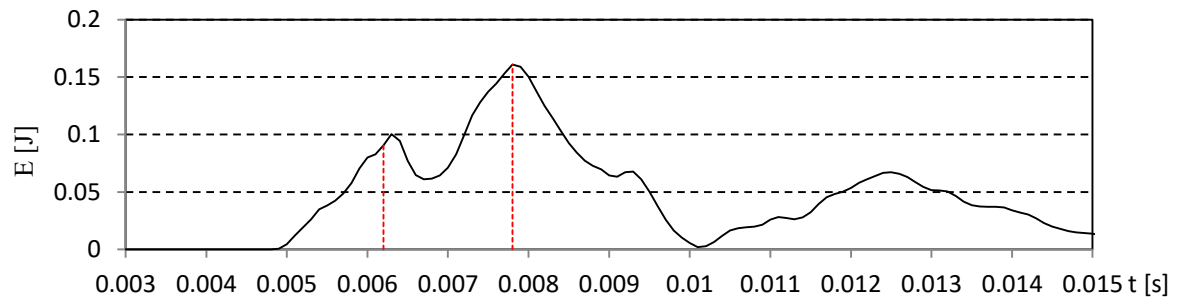


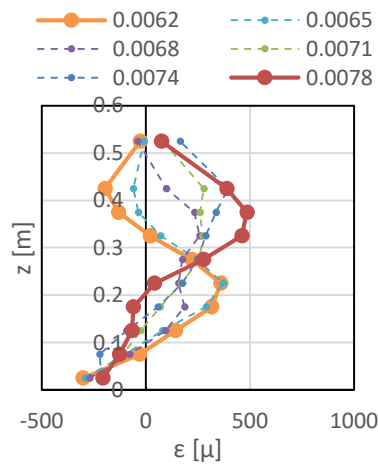
図- 4.8 気中衝突試験結果 (TypeA, 衝突高さ 17.5cm, 衝突速度 2.0m/s)



(a) ひずみ時系列

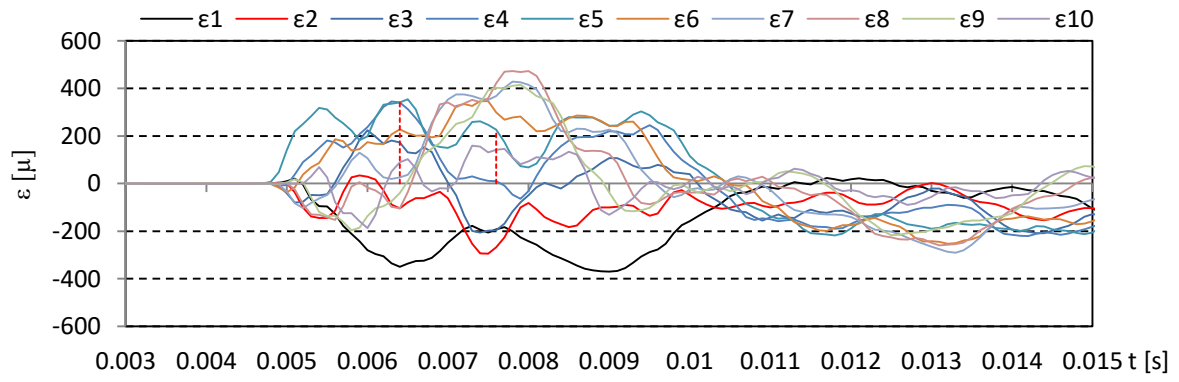


(b) ひずみエネルギー時系列

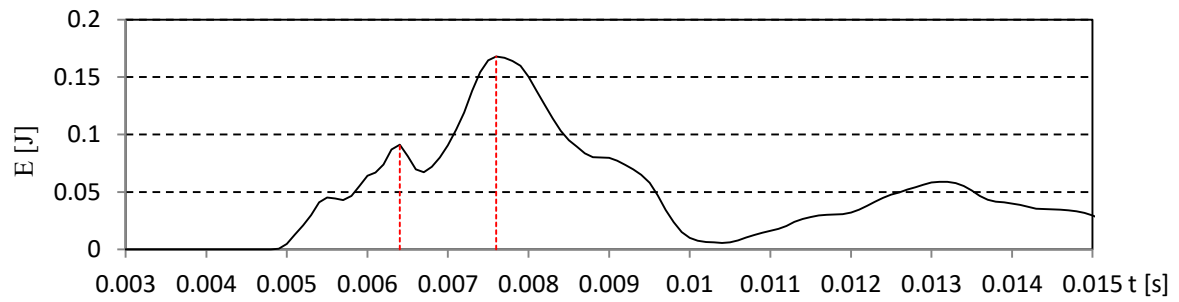


(c) ひずみの鉛直分布

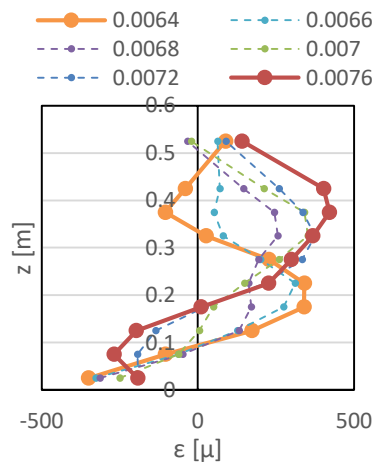
図-4.9 気中衝突試験結果 (TypeA, 衝突高さ 20.0cm, 衝突速度 2.0m/s)



(a) ひずみ時系列

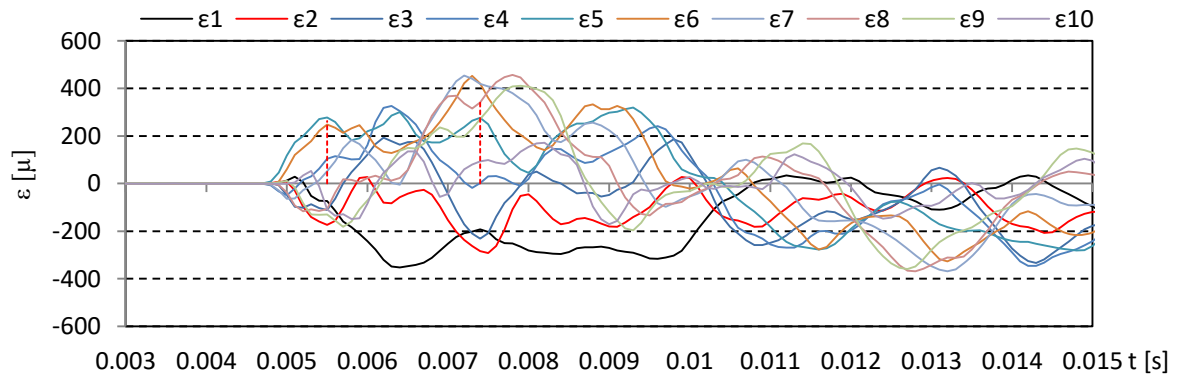


(b) ひずみエネルギー時系列

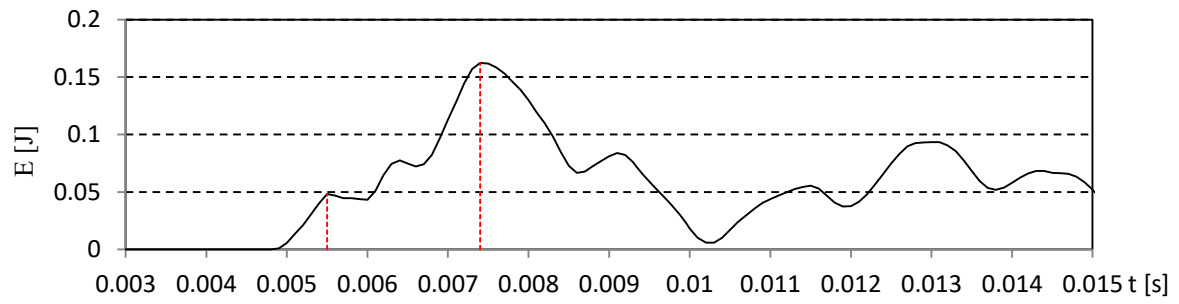


(c) ひずみの鉛直分布

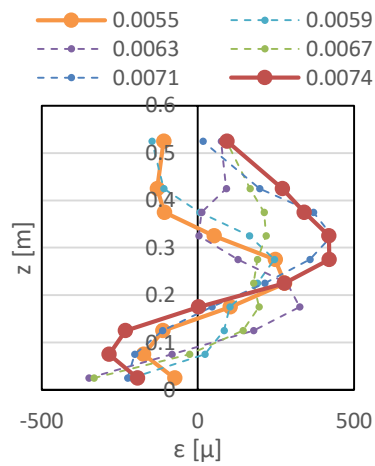
図-4.10 気中衝突試験結果 (TypeA, 衝突高さ 22.5cm, 衝突速度 2.0m/s)



(a) ひずみ時系列



(b) ひずみエネルギー時系列



(c) ひずみの鉛直分布

図- 4.11 気中衝突試験結果 (TypeA, 衝突高さ 25.0cm, 衝突速度 2.0m/s)

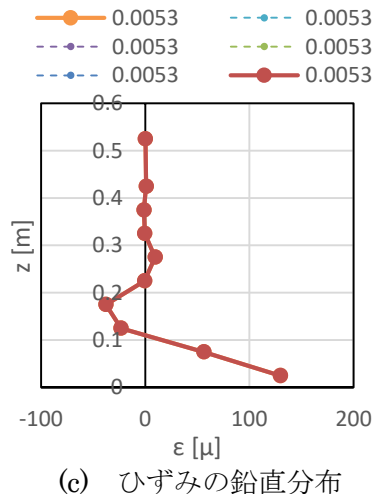
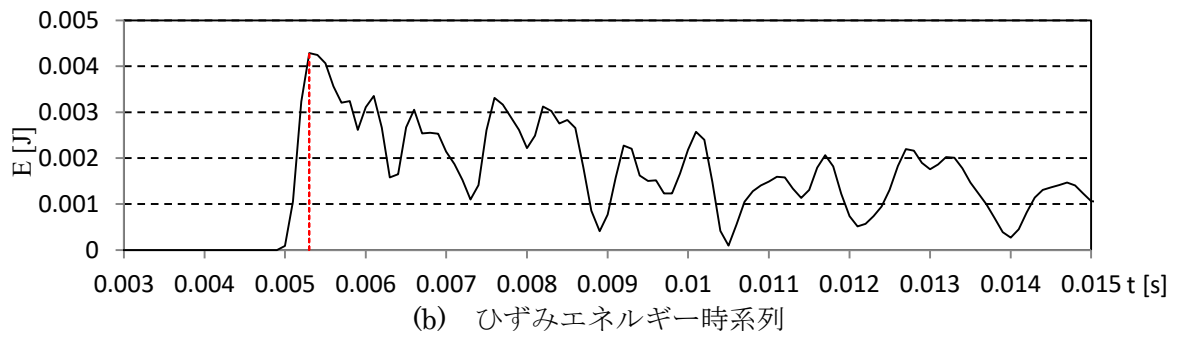
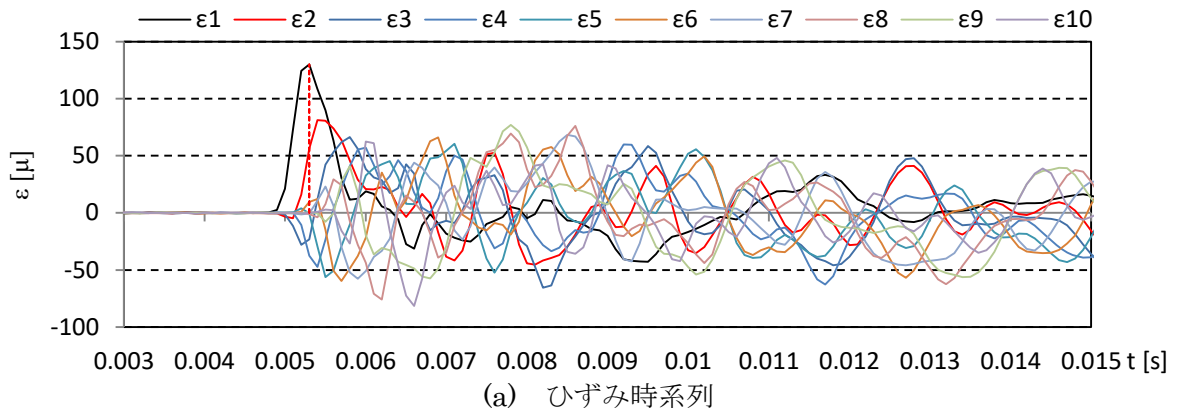


図- 4.12 気中衝突試験結果 (TypeA, 衝突高さ 2.5cm, 衝突速度 1.0m/s)

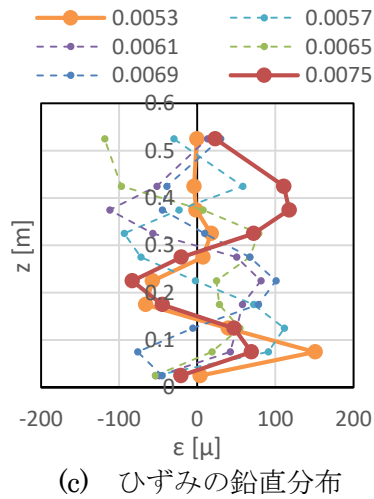
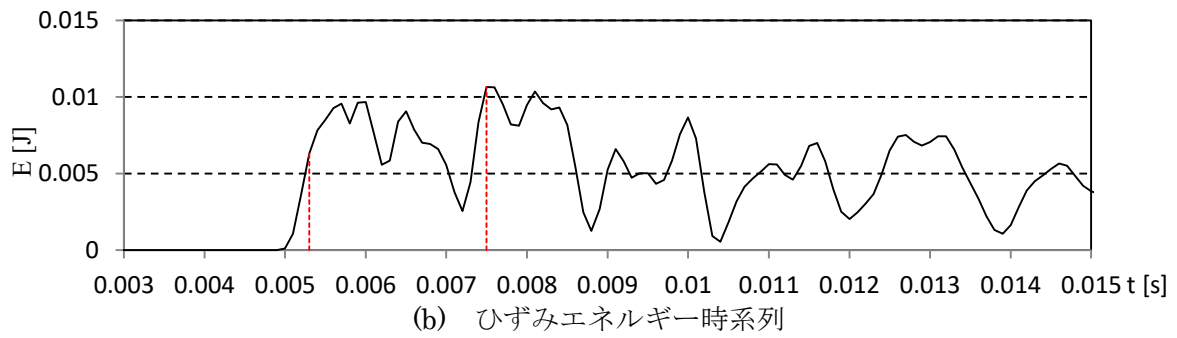
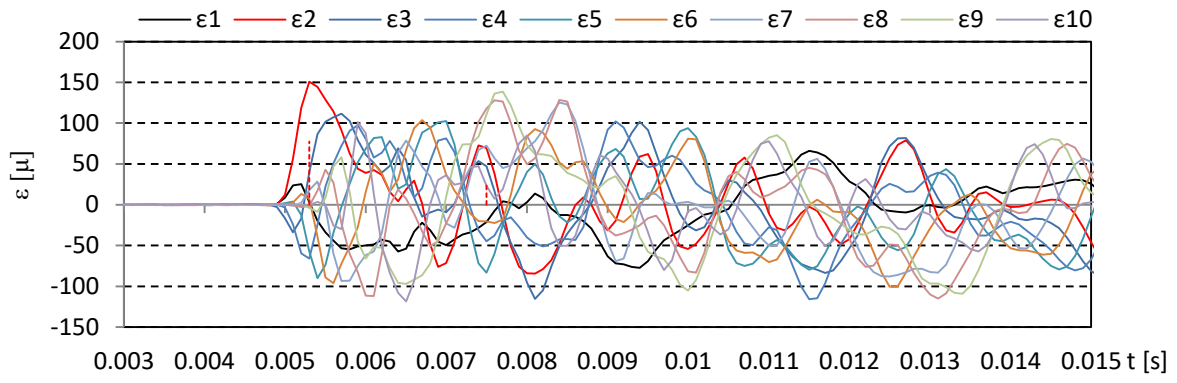


図- 4.13 気中衝突試験結果 (TypeA, 衝突高さ 5.0cm, 衝突速度 1.0m/s)

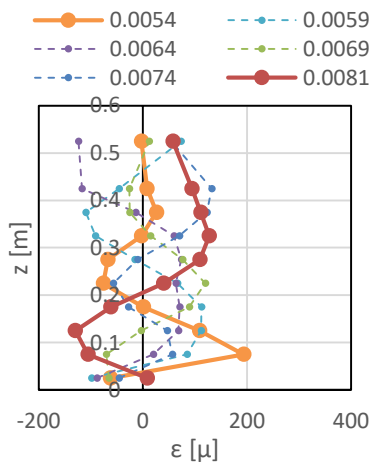
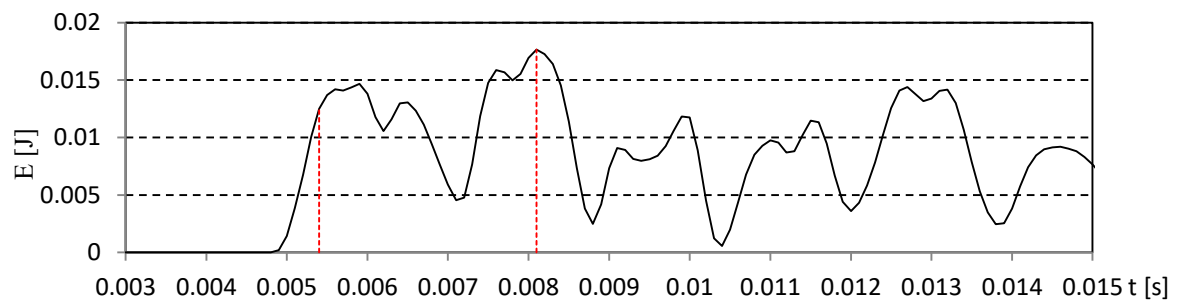
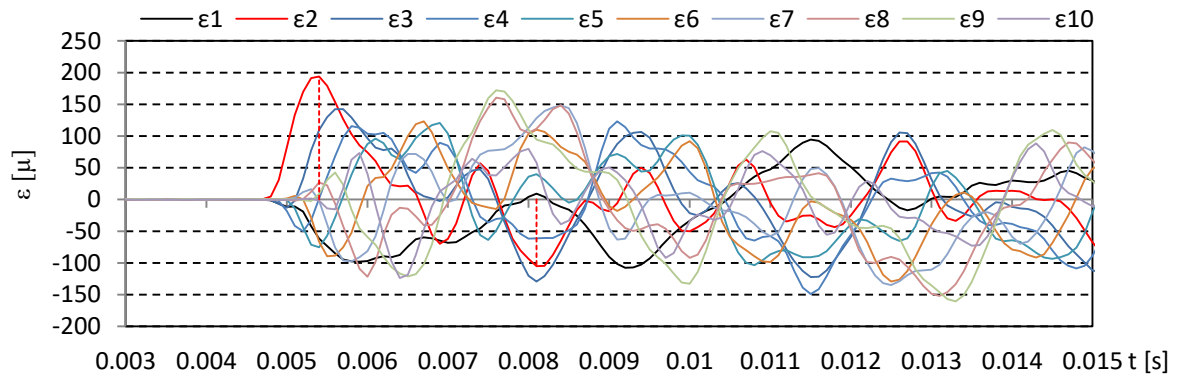


図- 4.14 気中衝突試験結果 (TypeA, 衝突高さ 7.5cm, 衝突速度 1.0m/s)

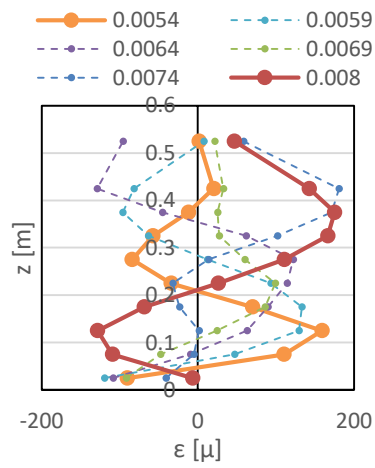
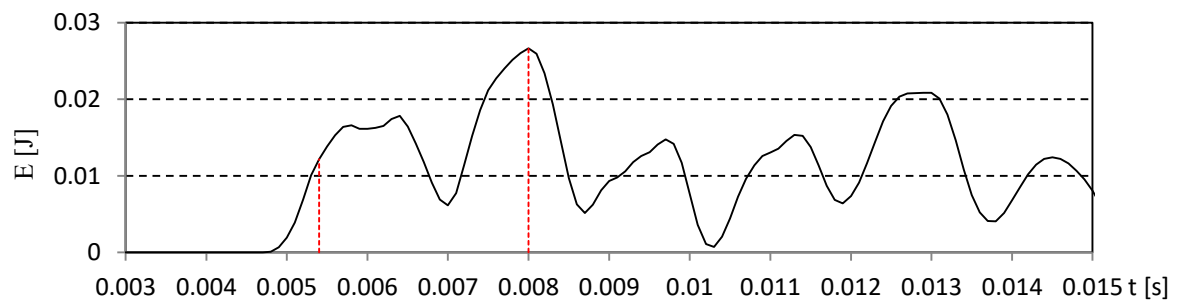
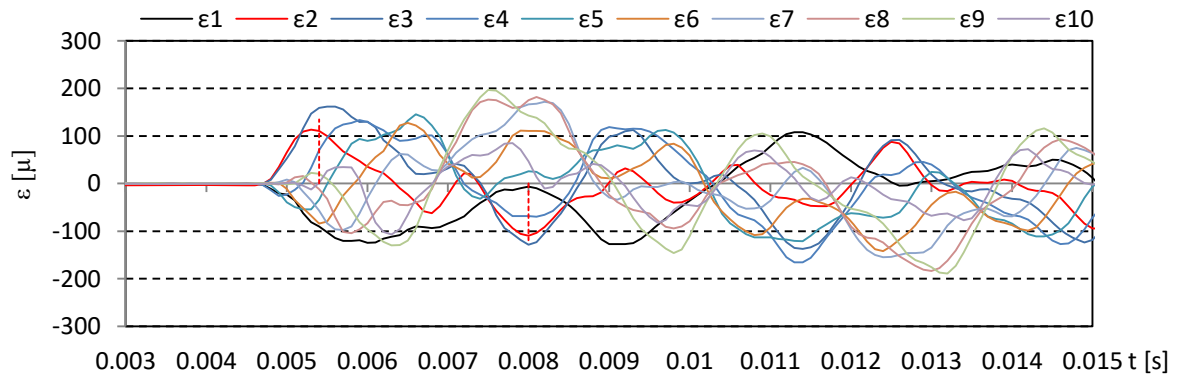


図-4.15 気中衝突試験結果 (TypeA, 衝突高さ 10.0cm, 衝突速度 1.0m/s)

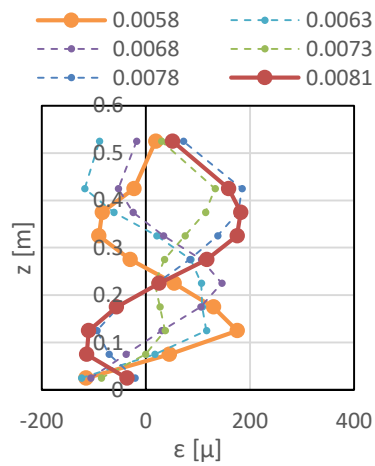
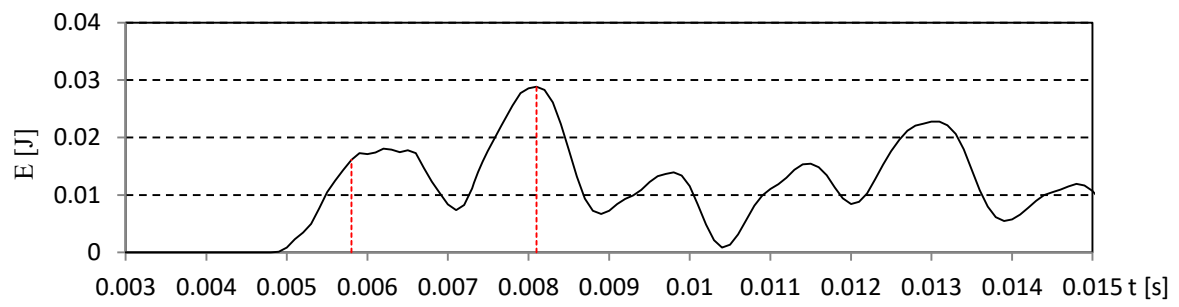
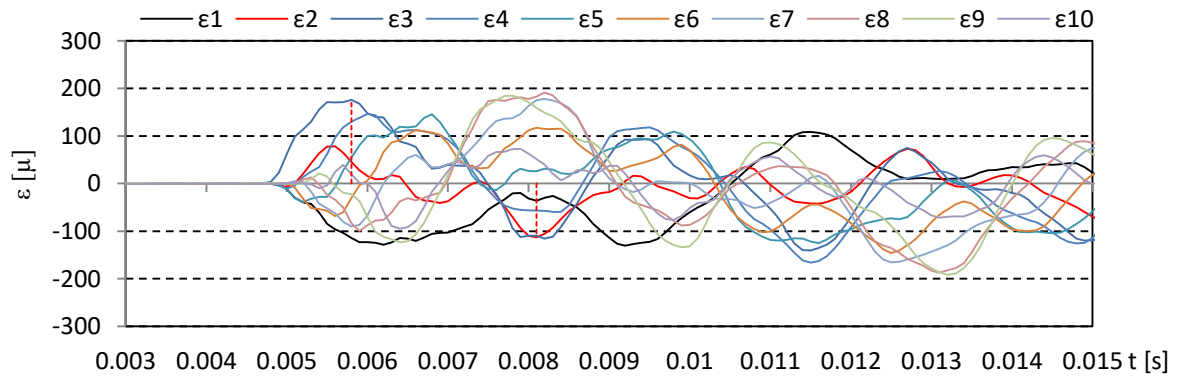


図-4.16 気中衝突試験結果 (TypeA, 衝突高さ 12.5cm, 衝突速度 1.0m/s)

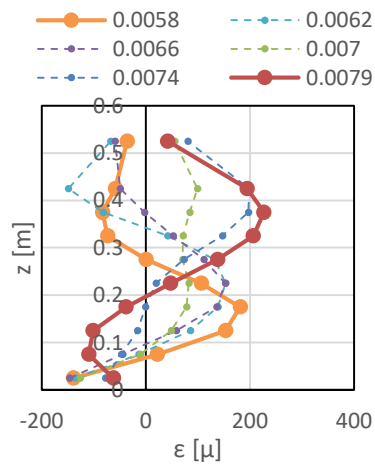
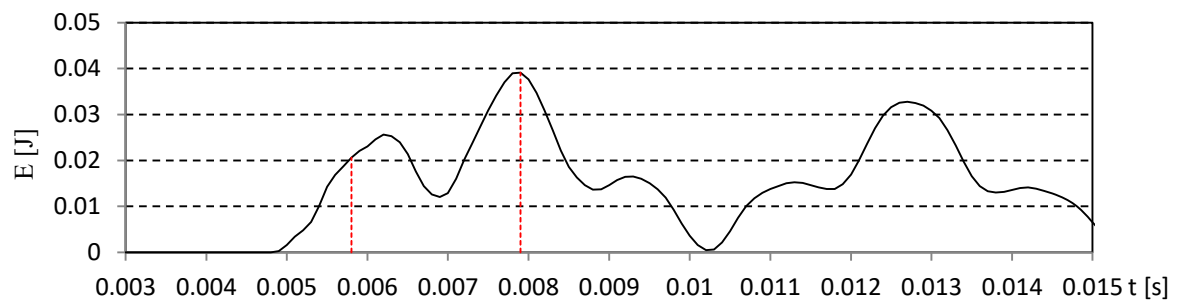
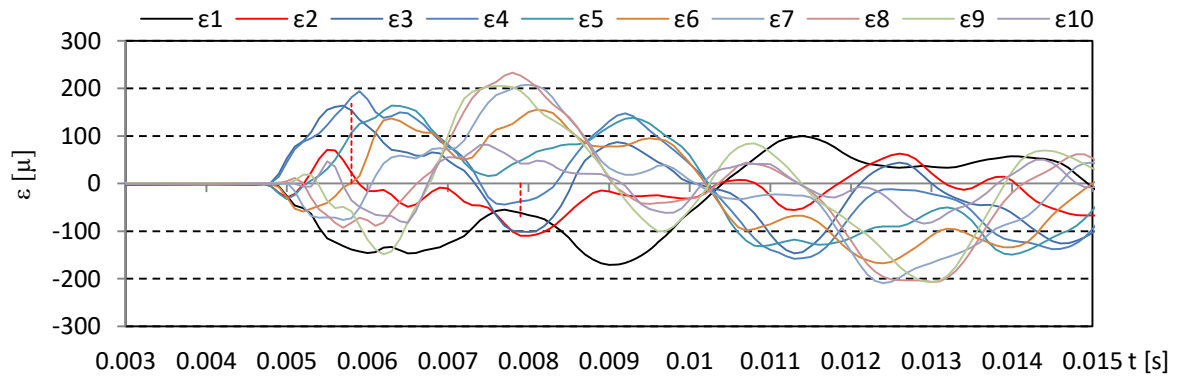


図-4.17 気中衝突試験結果 (TypeA, 衝突高さ 15.0cm, 衝突速度 1.0m/s)

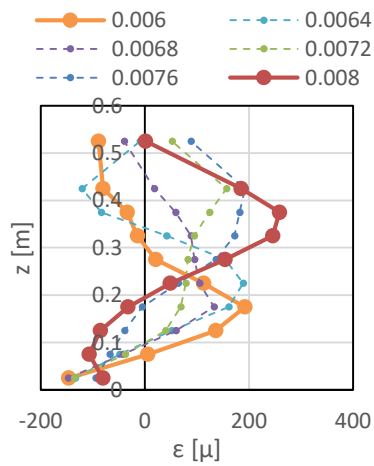
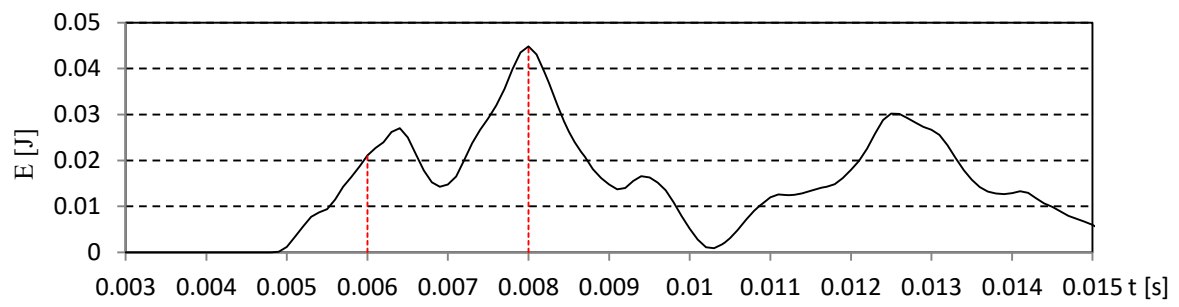
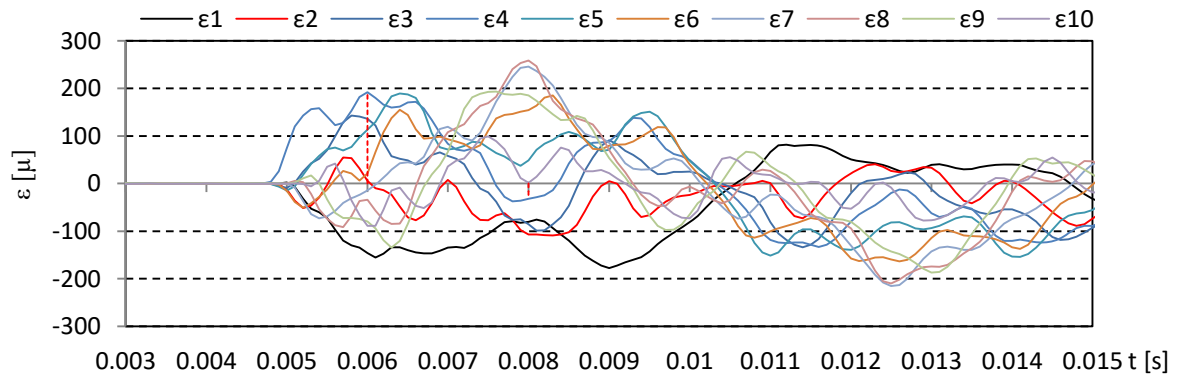
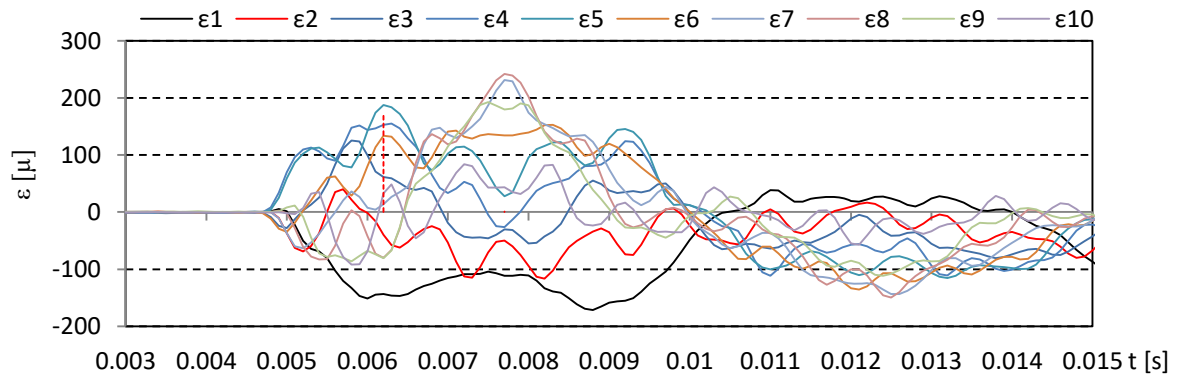
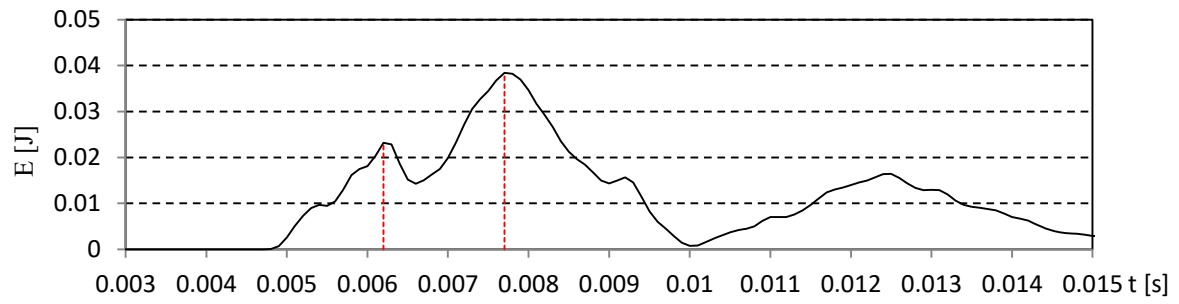


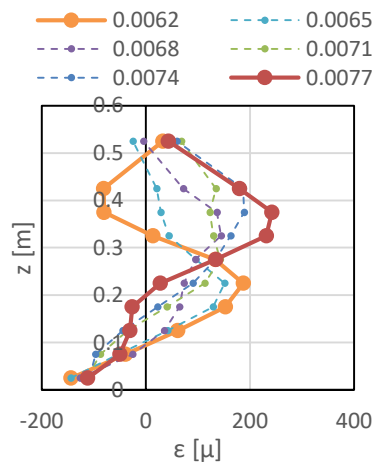
図-4.18 気中衝突試験結果 (TypeA, 衝突高さ 17.5cm, 衝突速度 1.0m/s)



(a) ひずみ時系列

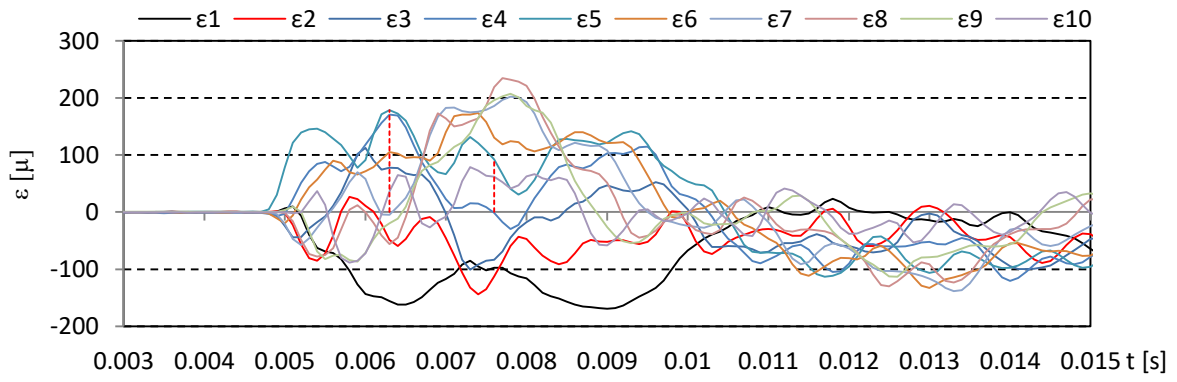


(b) ひずみエネルギー時系列

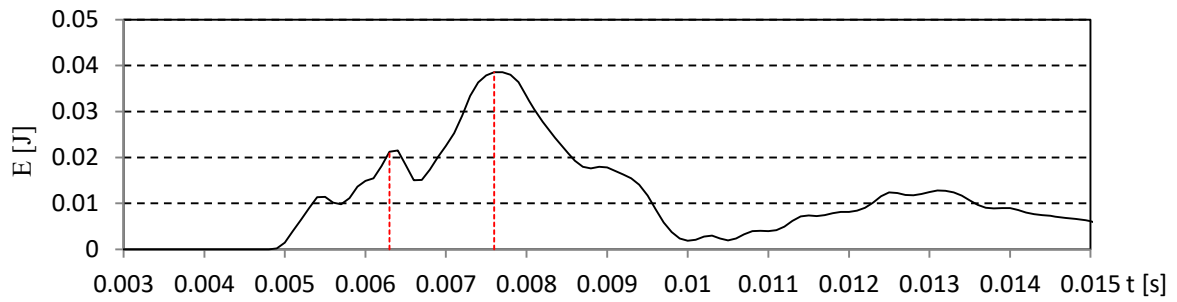


(c) ひずみの鉛直分布

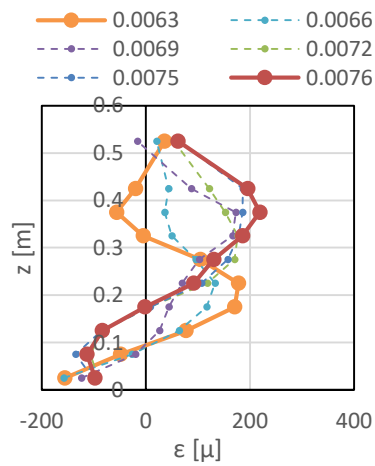
図-4.19 気中衝突試験結果 (TypeA, 衝突高さ 20.0cm, 衝突速度 1.0m/s)



(a) ひずみ時系列

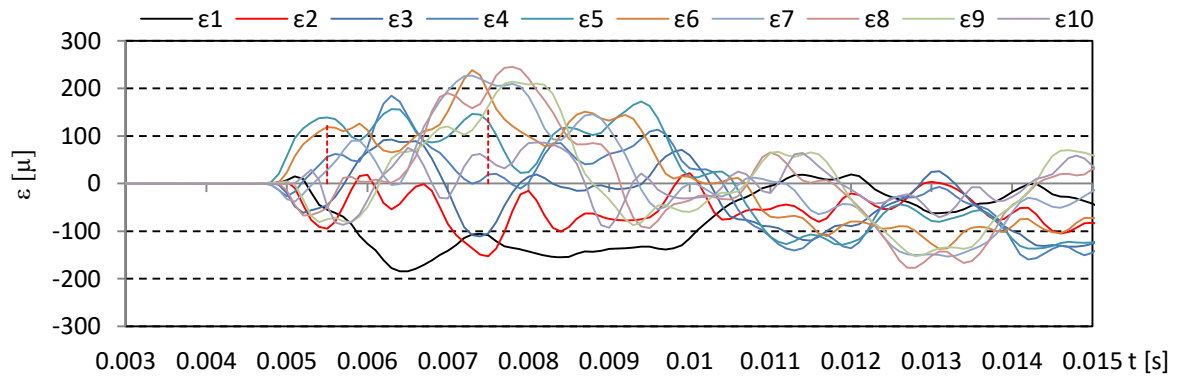


(b) ひずみエネルギー時系列

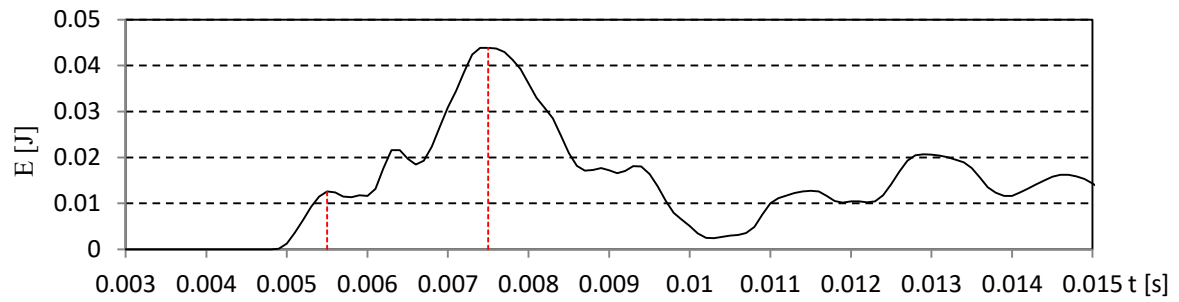


(c) ひずみの鉛直分布

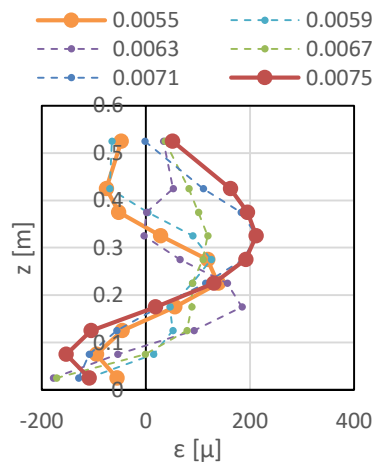
図-4.20 気中衝突試験結果 (TypeA, 衝突高さ 22.5cm, 衝突速度 1.0m/s)



(a) ひずみ時系列



(b) ひずみエネルギー時系列



(c) ひずみの鉛直分布

図-4.21 気中衝突試験結果 (TypeA, 衝突高さ 25.0cm, 衝突速度 1.0m/s)

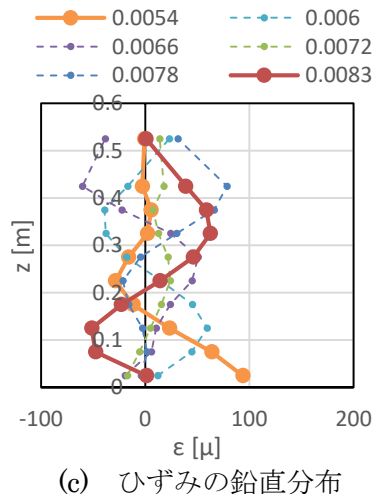
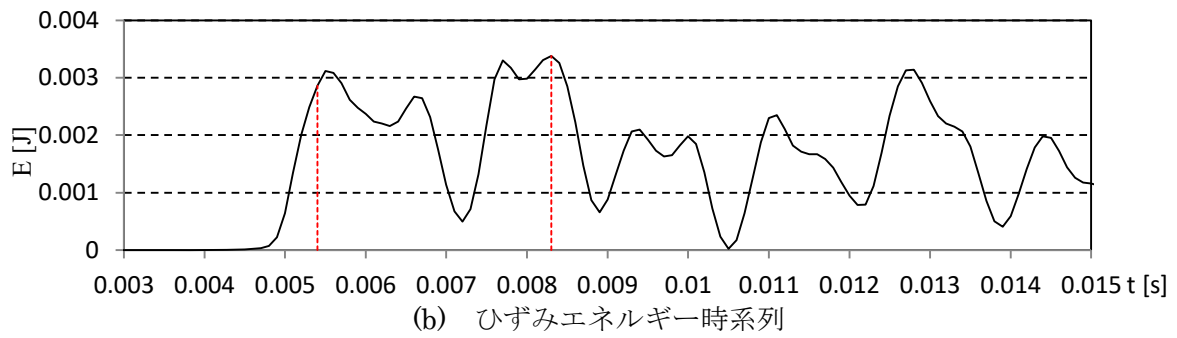
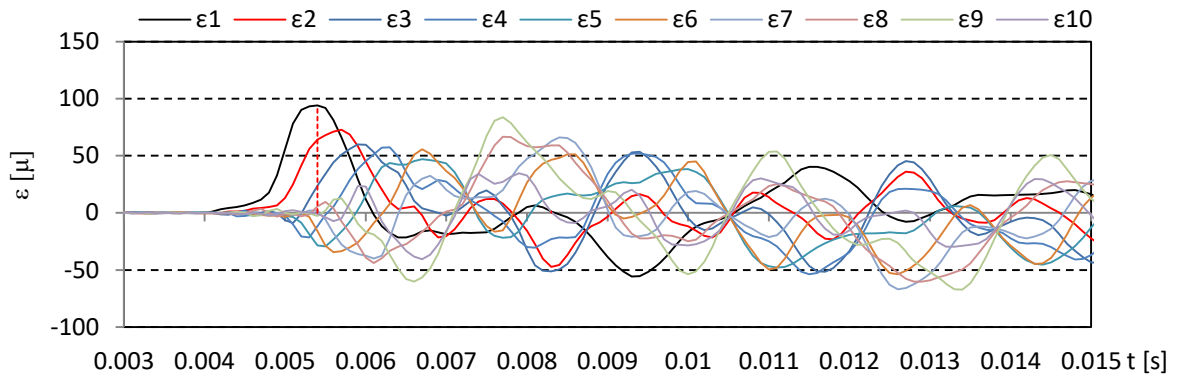


図- 4.22 気中衝突試験結果 (TypeB, 衝突高さ 2.5cm, 衝突速度 2.0m/s)

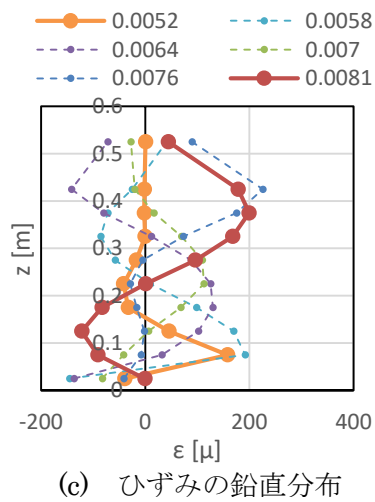
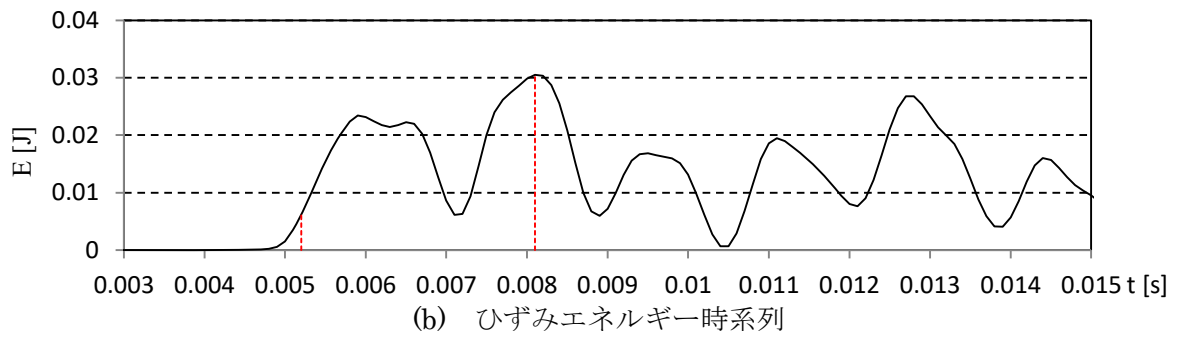
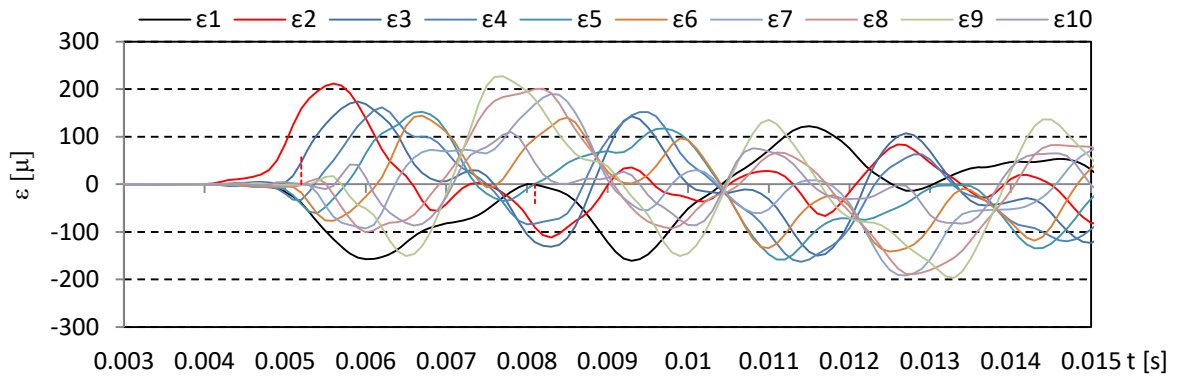


図- 4.23 気中衝突試験結果 (TypeB, 衝突高さ 5.0cm, 衝突速度 2.0m/s)

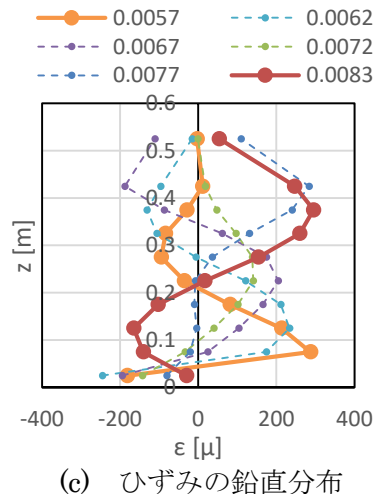
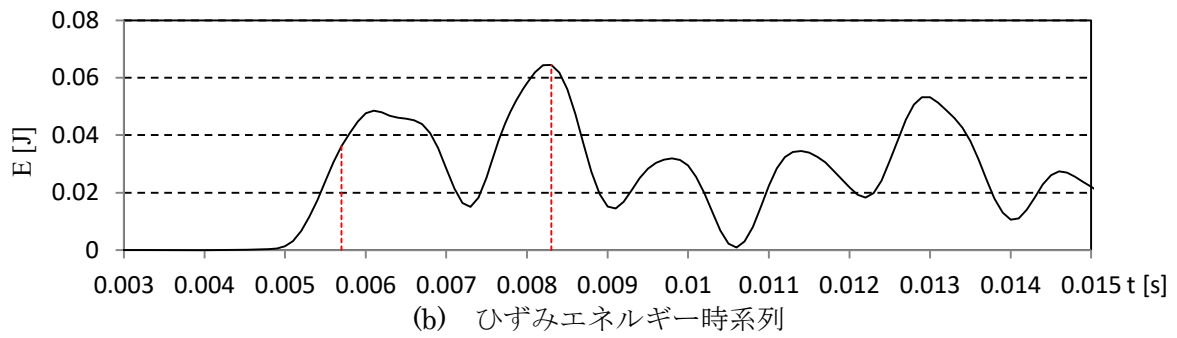
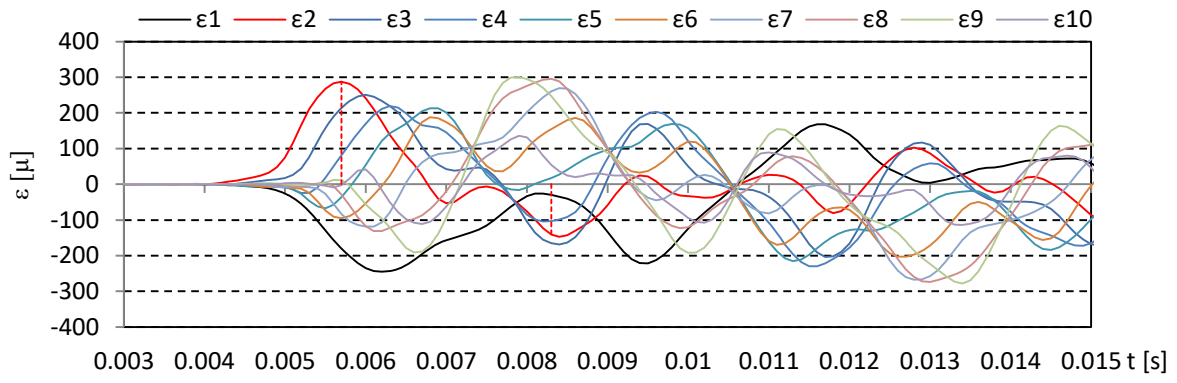
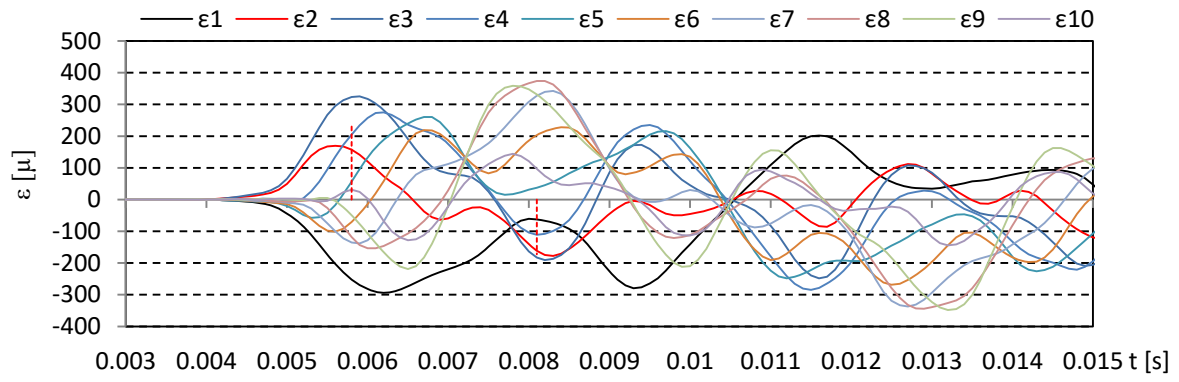
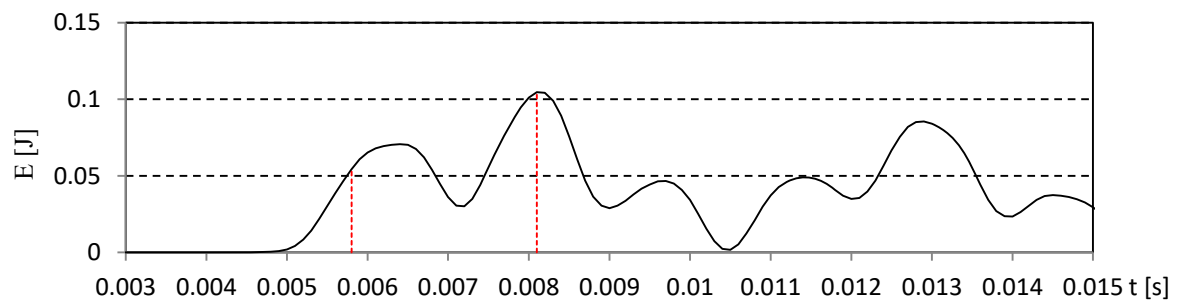


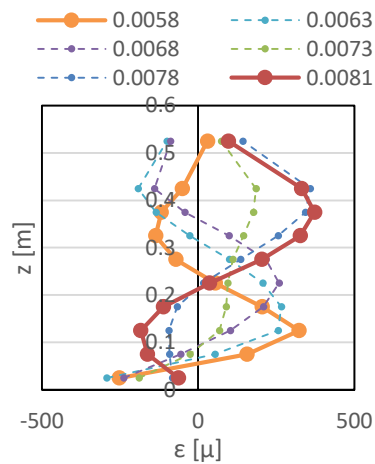
図- 4.24 気中衝突試験結果 (TypeB, 衝突高さ 7.5cm, 衝突速度 2.0m/s)



(a) ひずみ時系列

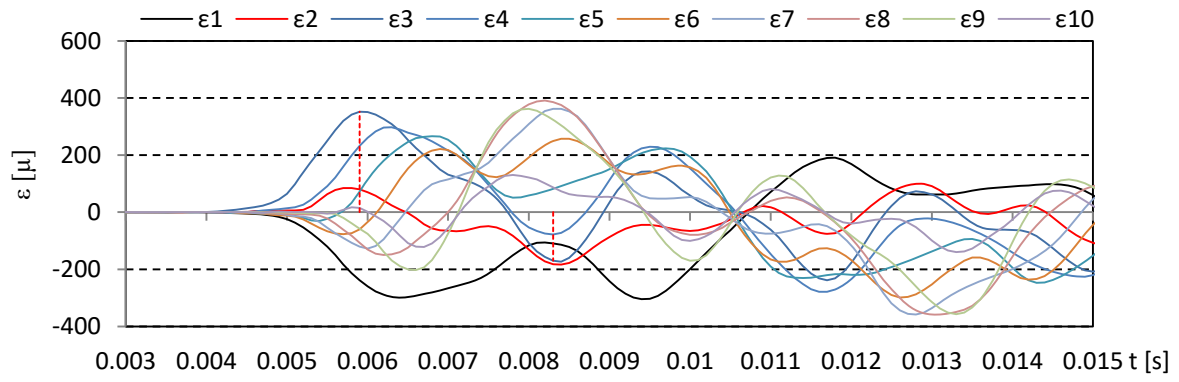


(b) ひずみエネルギー時系列

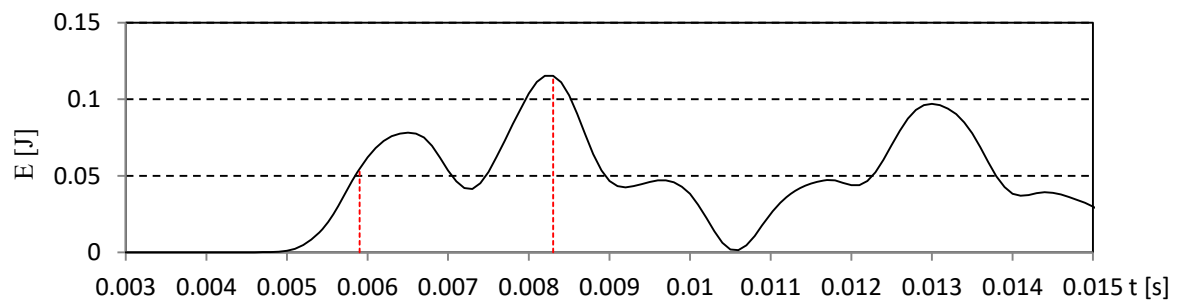


(c) ひずみの鉛直分布

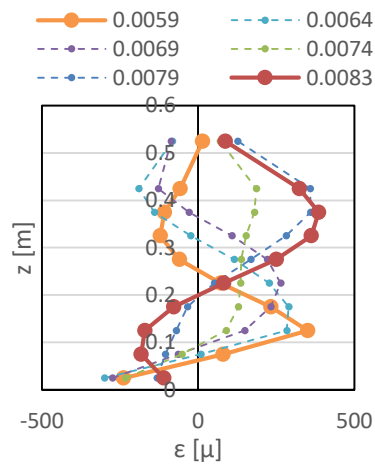
図-4.25 気中衝突試験結果 (TypeB, 衝突高さ 10.0cm, 衝突速度 2.0m/s)



(a) ひずみ時系列

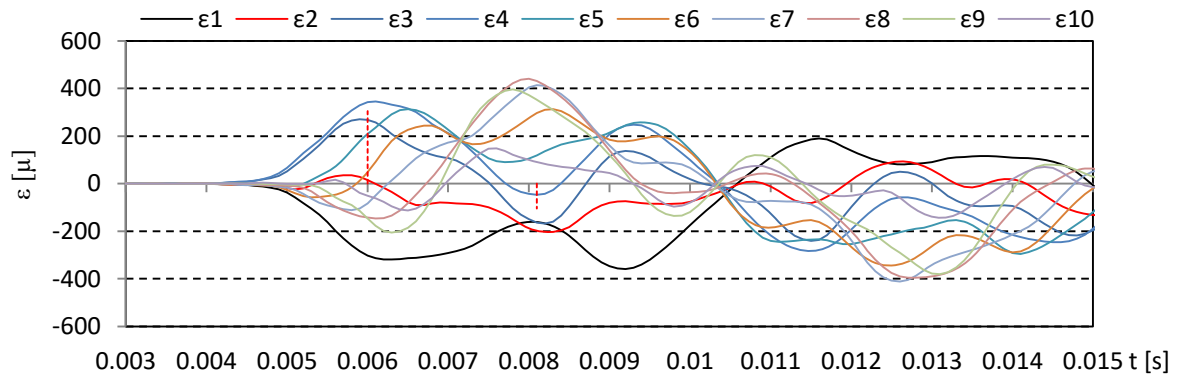


(b) ひずみエネルギー時系列

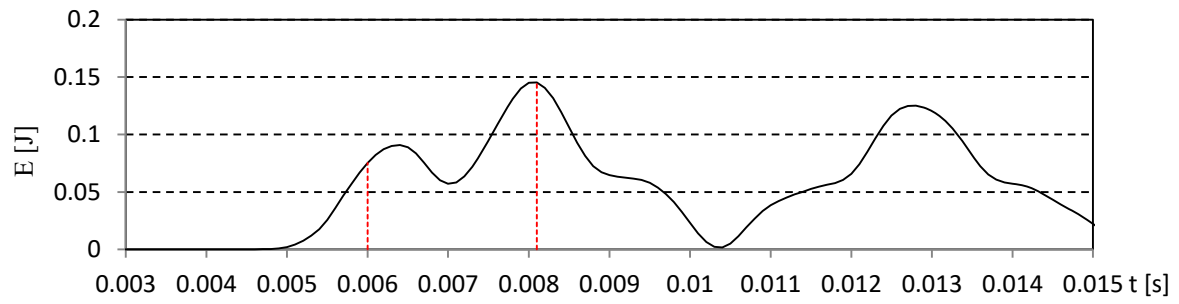


(c) ひずみの鉛直分布

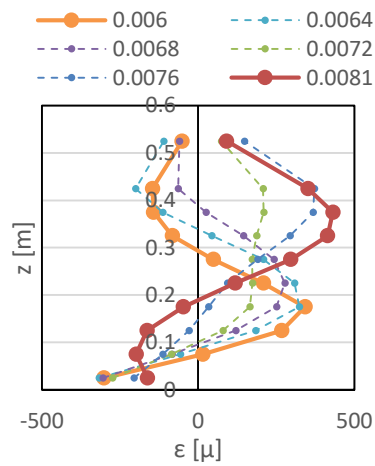
図-4.26 気中衝突試験結果 (TypeB, 衝突高さ 12.5cm, 衝突速度 2.0m/s)



(a) ひずみ時系列



(b) ひずみエネルギー時系列



(c) ひずみの鉛直分布

図-4.27 気中衝突試験結果 (TypeB, 衝突高さ 15.0cm, 衝突速度 2.0m/s)

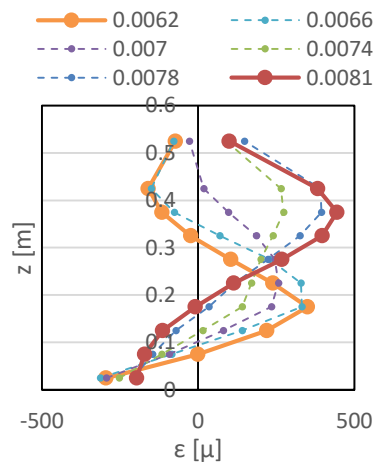
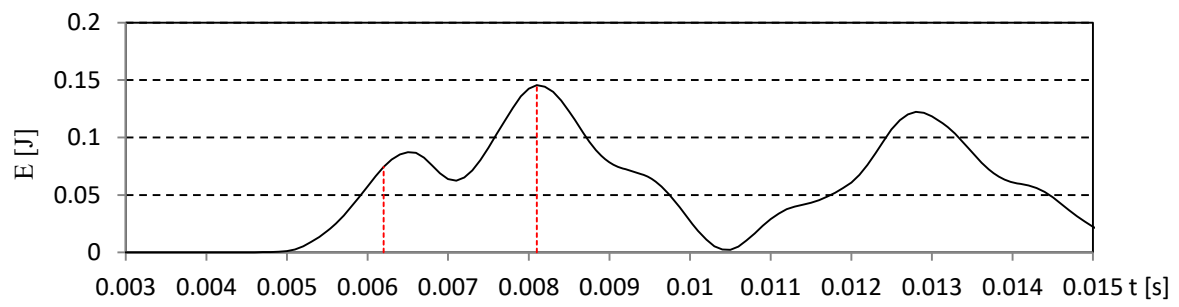
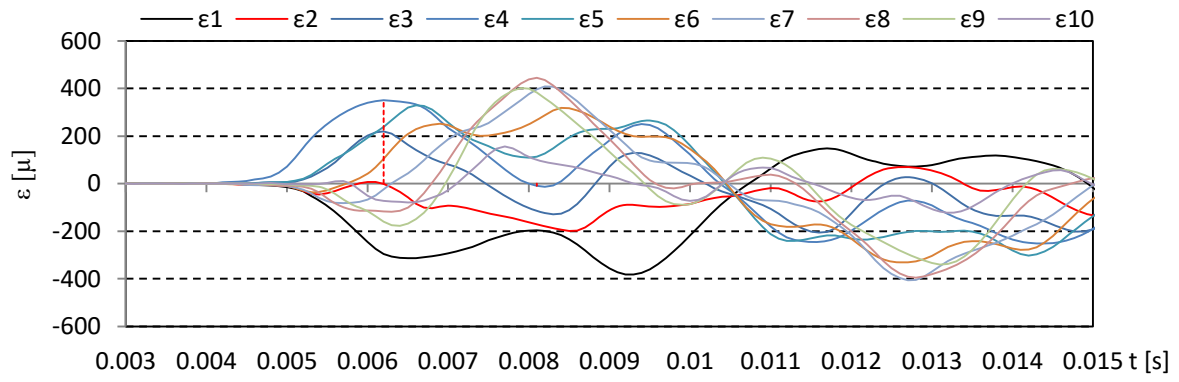
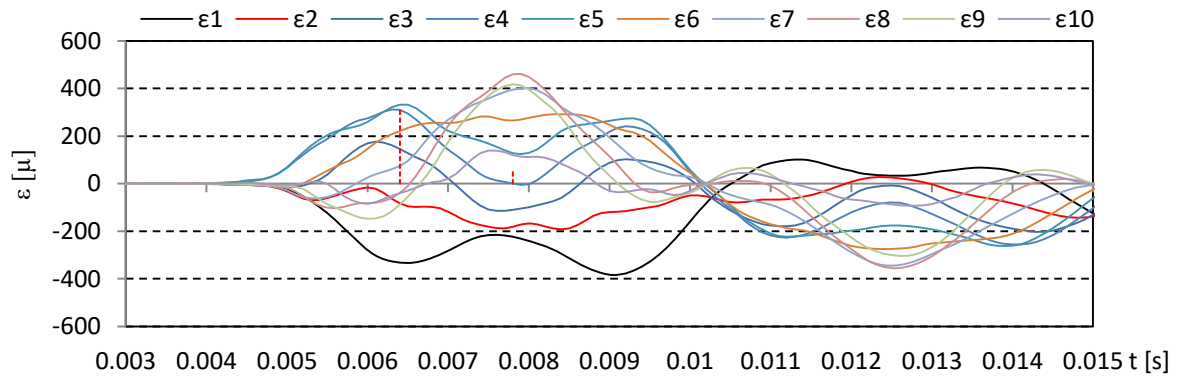
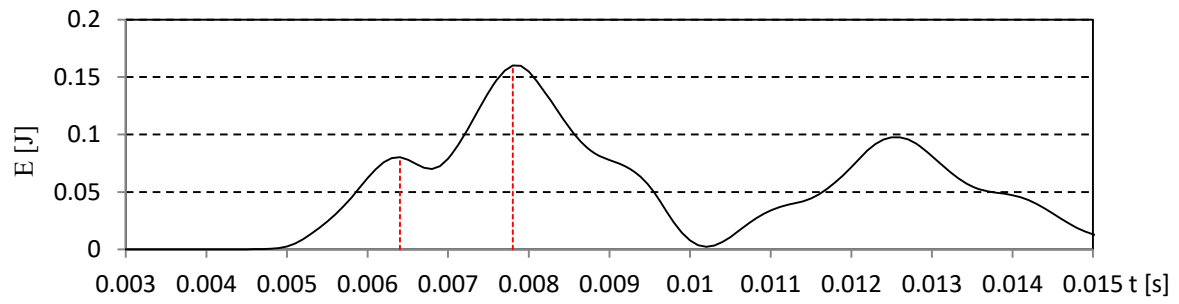


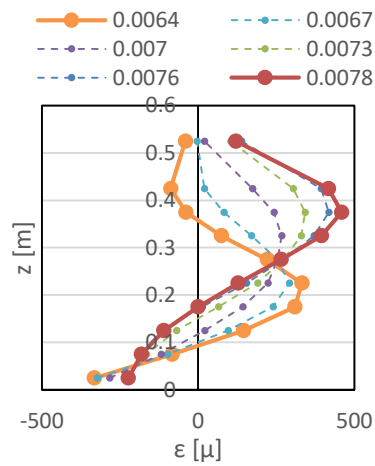
図-4.28 気中衝突試験結果 (TypeB, 衝突高さ 17.5cm, 衝突速度 2.0m/s)



(a) ひずみ時系列

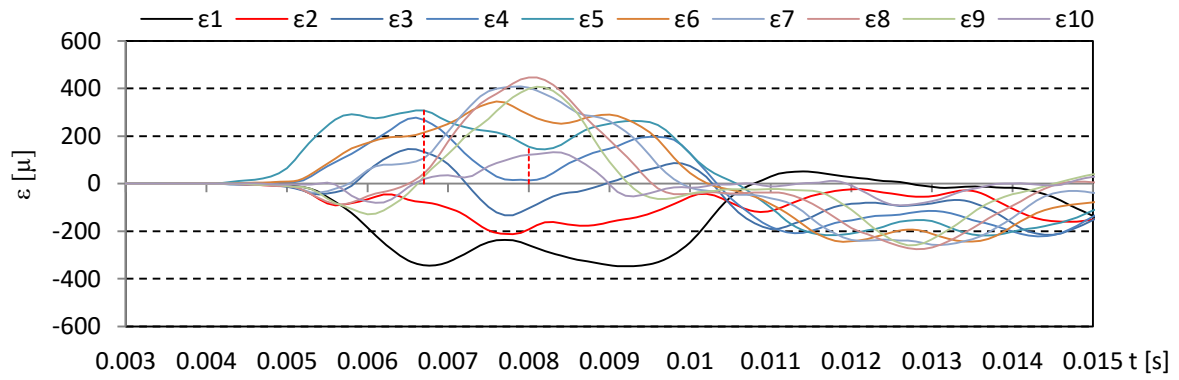


(b) ひずみエネルギー時系列

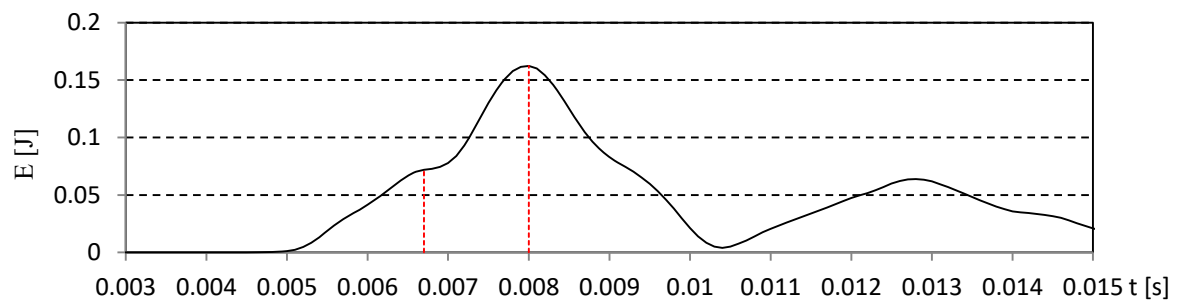


(c) ひずみの鉛直分布

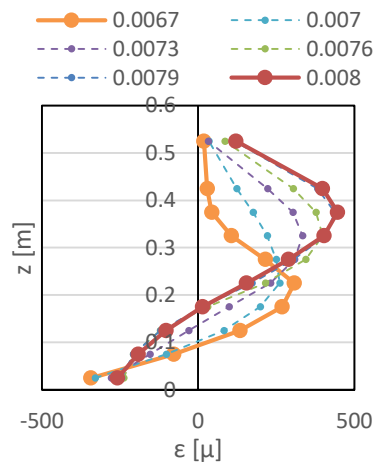
図-4.29 気中衝突試験結果 (TypeB, 衝突高さ 20.0cm, 衝突速度 2.0m/s)



(a) ひずみ時系列



(b) ひずみエネルギー時系列



(c) ひずみの鉛直分布

図-4.30 気中衝突試験結果 (TypeB, 衝突高さ 22.5cm, 衝突速度 2.0m/s)

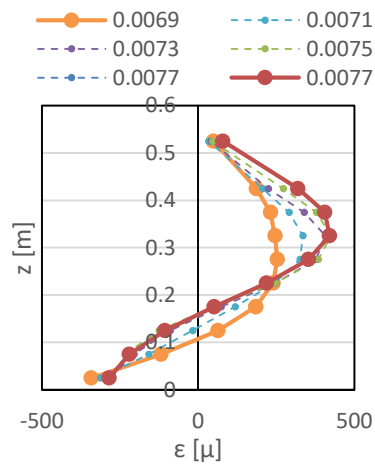
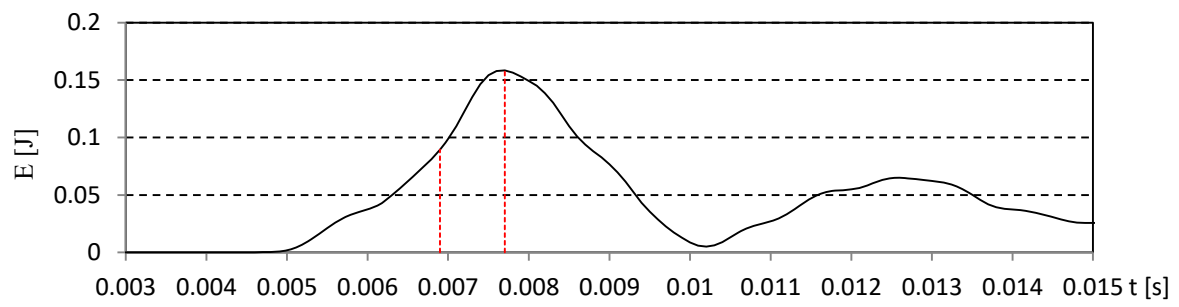
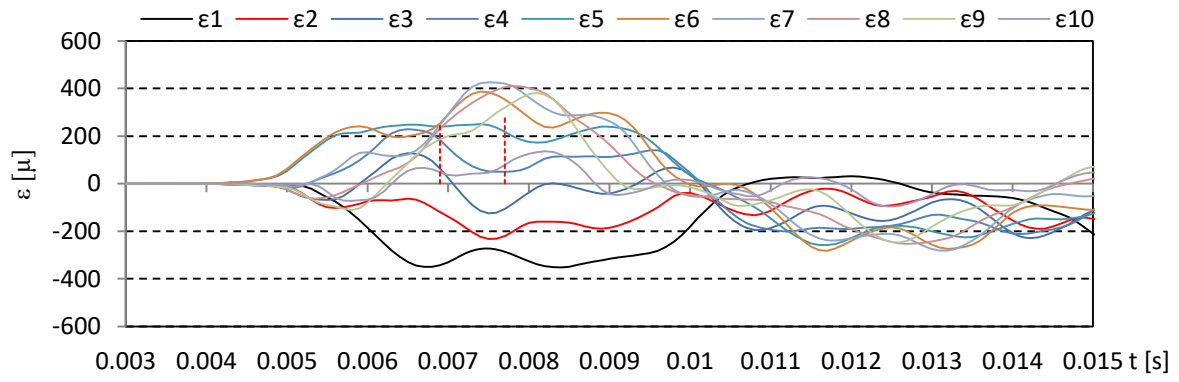


図-4.31 気中衝突試験結果 (TypeB, 衝突高さ 25.0cm, 衝突速度 2.0m/s)

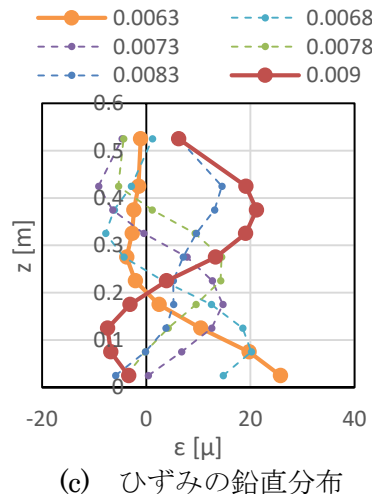
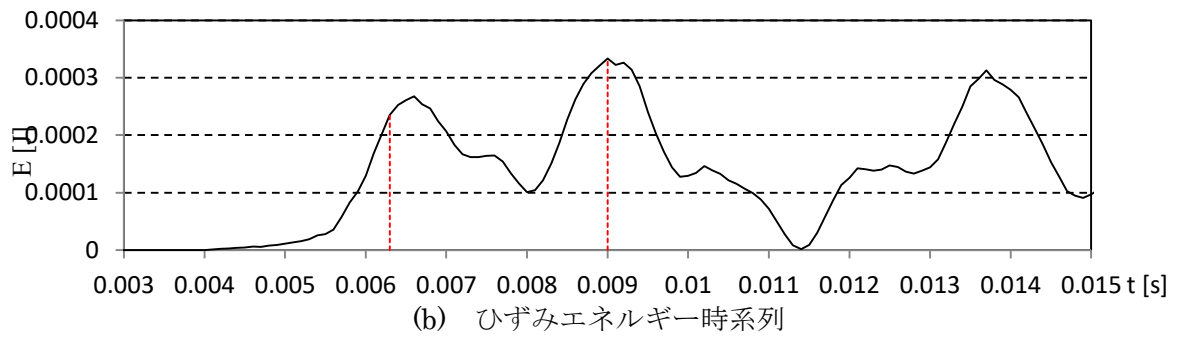
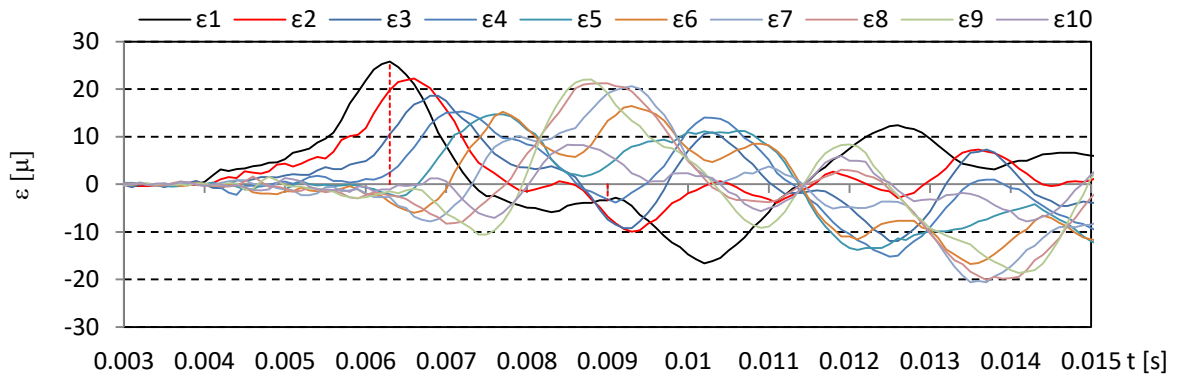


図- 4.32 気中衝突試験結果 (TypeB, 衝突高さ 2.5cm, 衝突速度 1.0m/s)

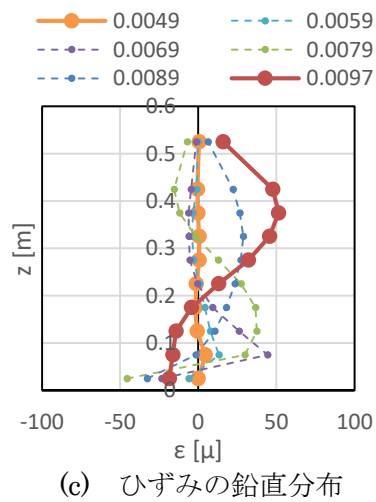
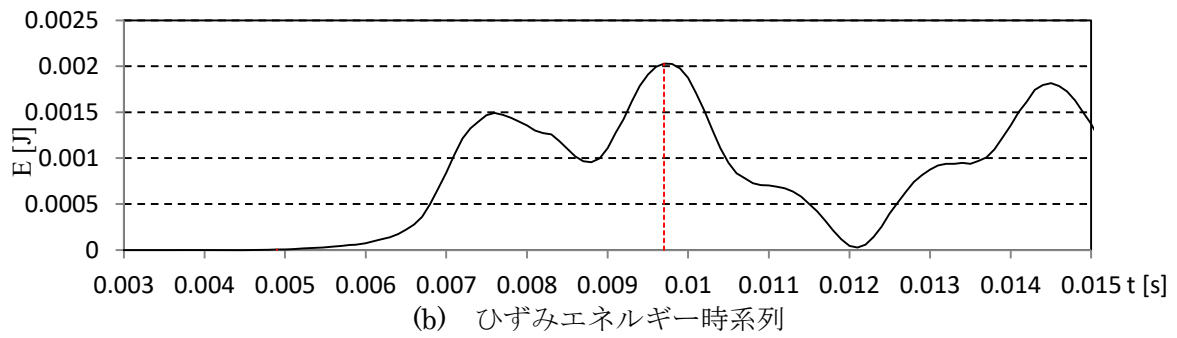
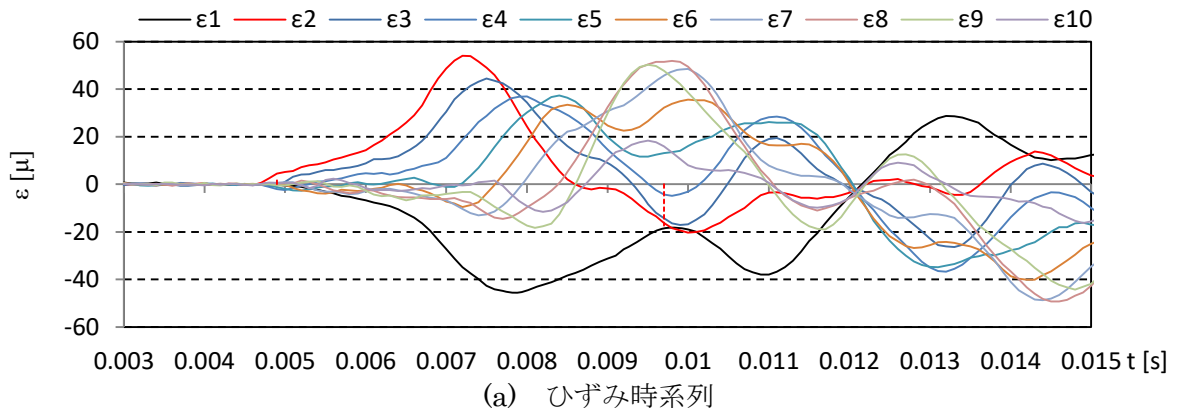
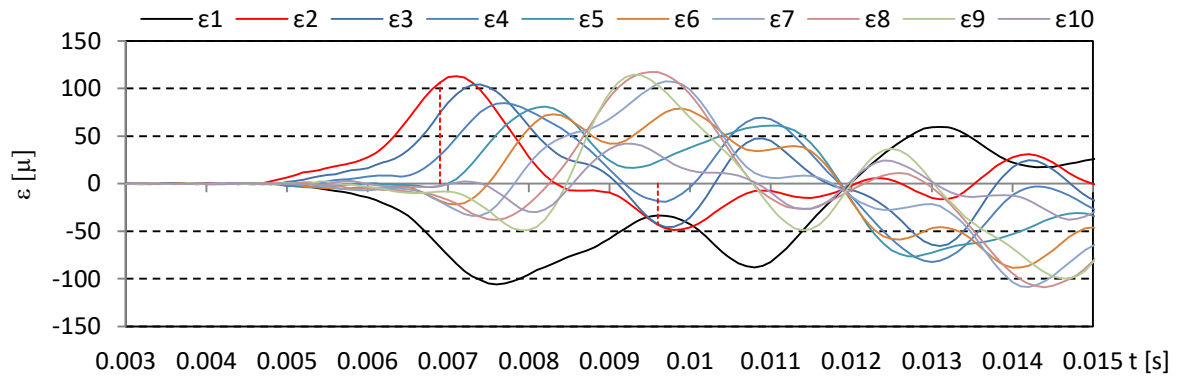
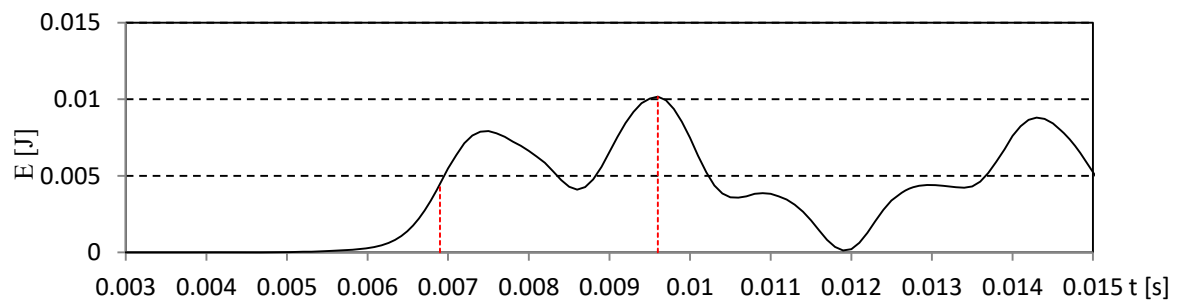


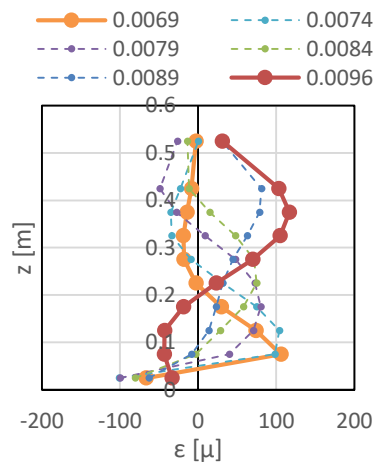
図- 4.33 気中衝突試験結果 (TypeB, 衝突高さ 5.0cm, 衝突速度 1.0m/s)



(a) ひずみ時系列

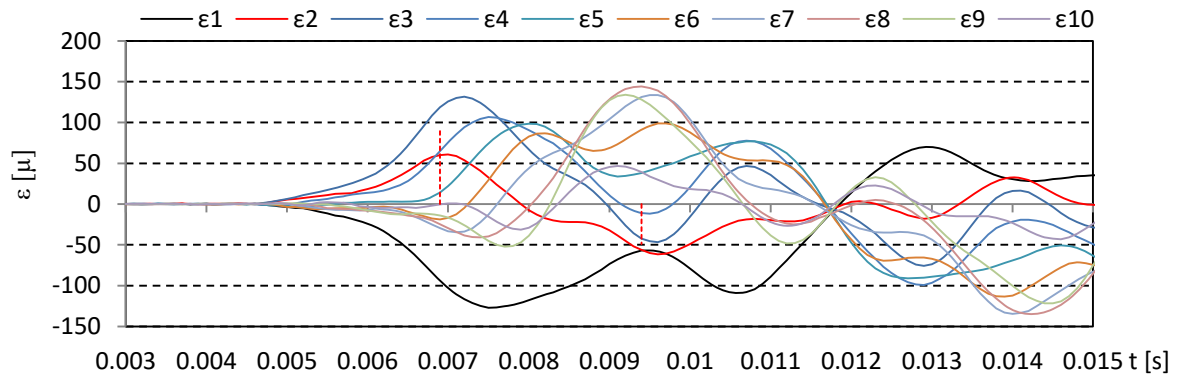


(b) ひずみエネルギー時系列

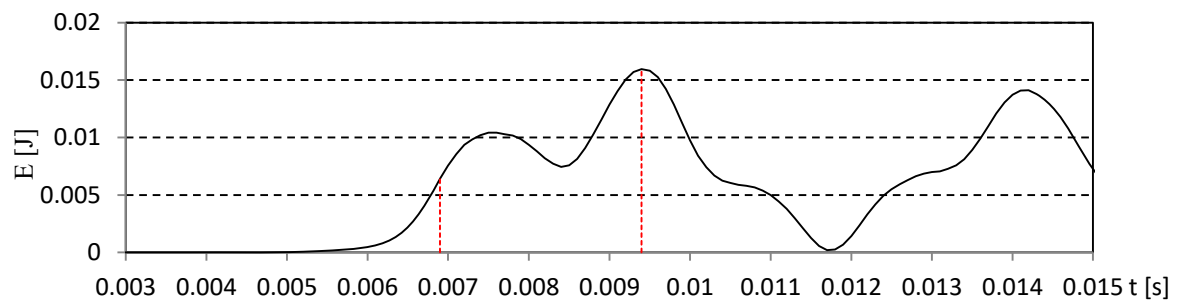


(c) ひずみの鉛直分布

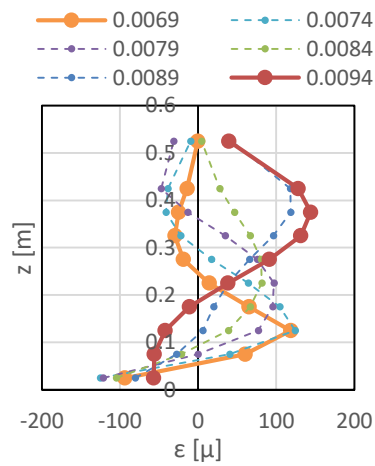
図- 4.34 気中衝突試験結果 (TypeB, 衝突高さ 7.5cm, 衝突速度 1.0m/s)



(a) ひずみ時系列

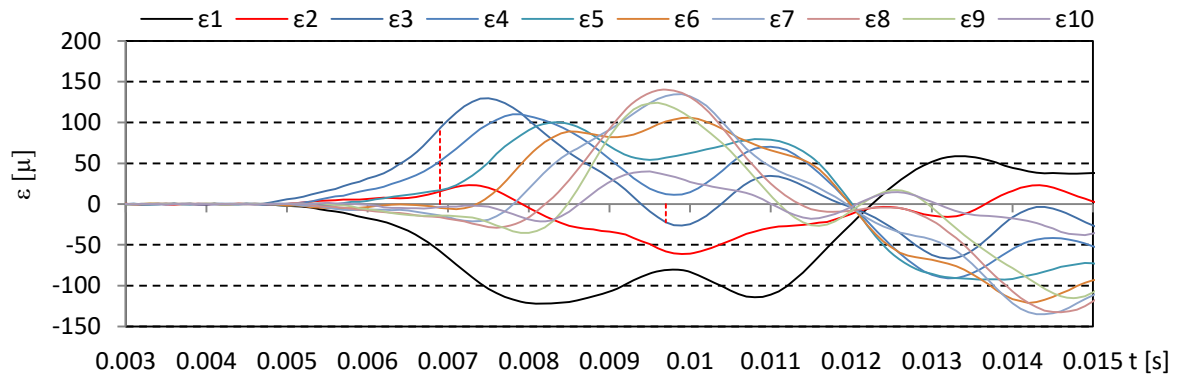


(b) ひずみエネルギー時系列

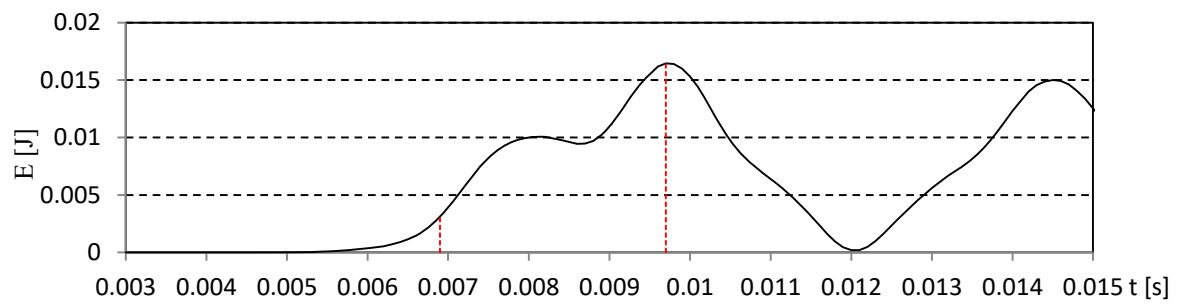


(c) ひずみの鉛直分布

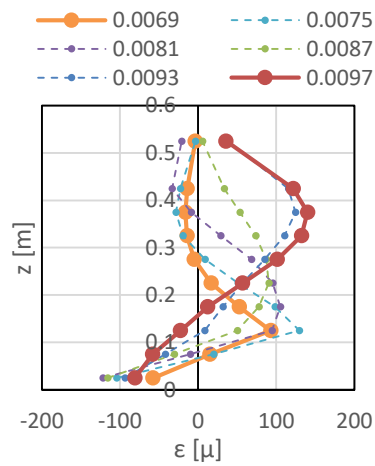
図-4.35 気中衝突試験結果 (TypeB, 衝突高さ 10.0cm, 衝突速度 1.0m/s)



(a) ひずみ時系列



(b) ひずみエネルギー時系列



(c) ひずみの鉛直分布

図-4.36 気中衝突試験結果 (TypeB, 衝突高さ 12.5cm, 衝突速度 1.0m/s)

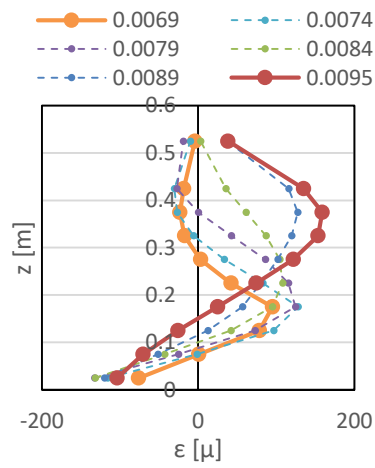
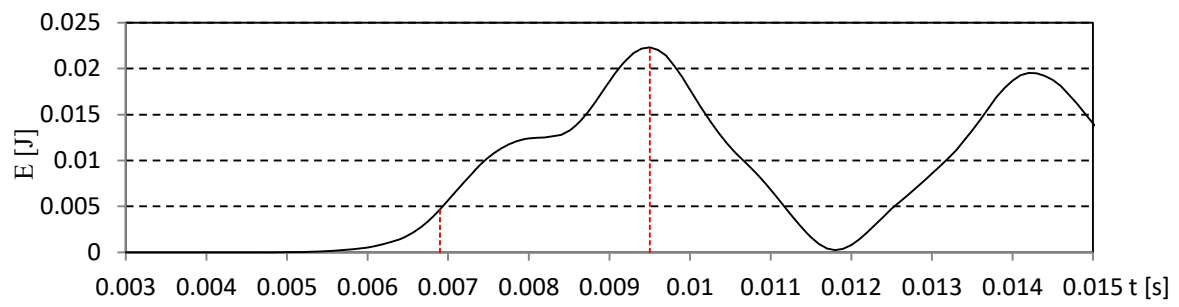
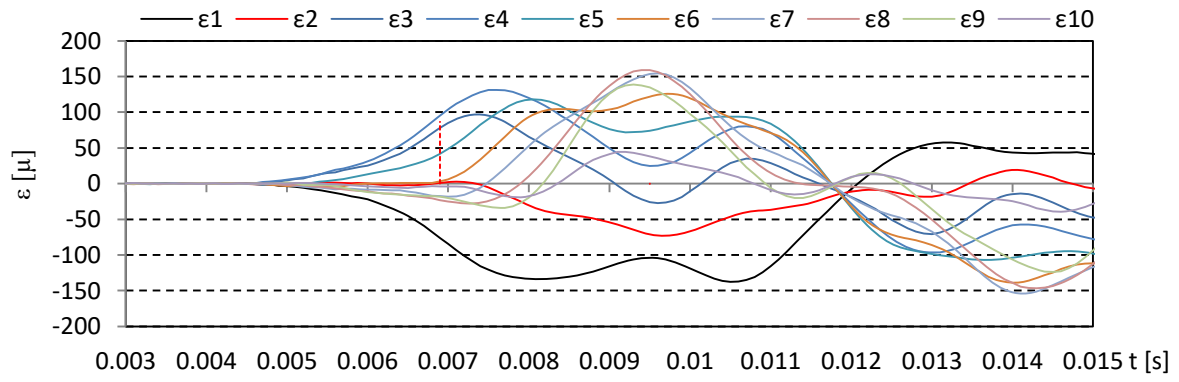
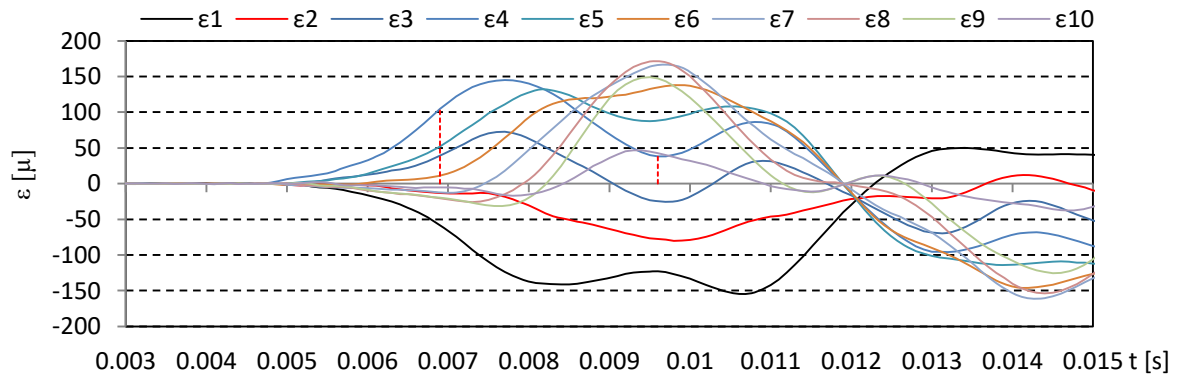
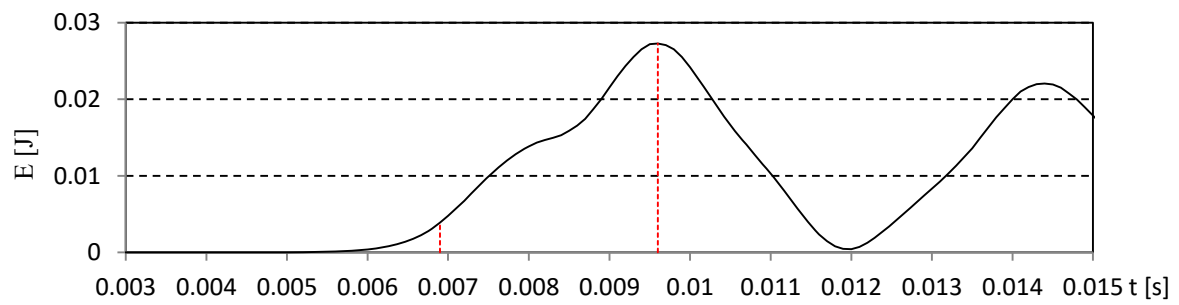


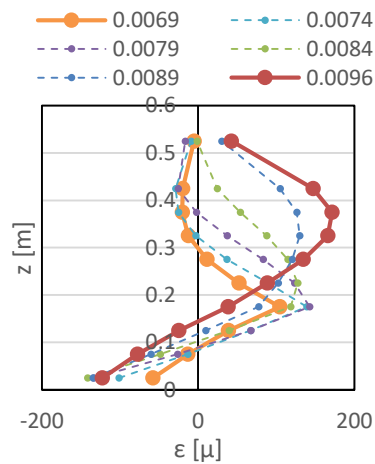
図- 4.37 気中衝突試験結果 (TypeB, 衝突高さ 15.0cm, 衝突速度 1.0m/s)



(a) ひずみ時系列

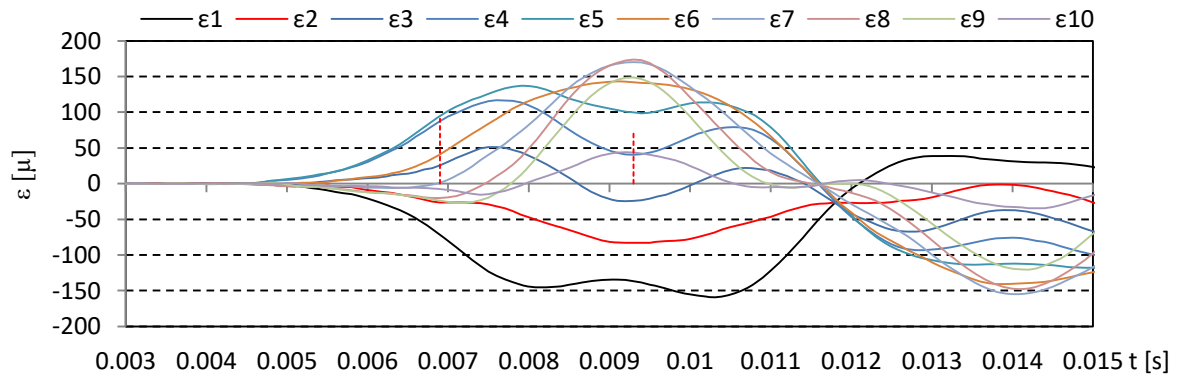


(b) ひずみエネルギー時系列

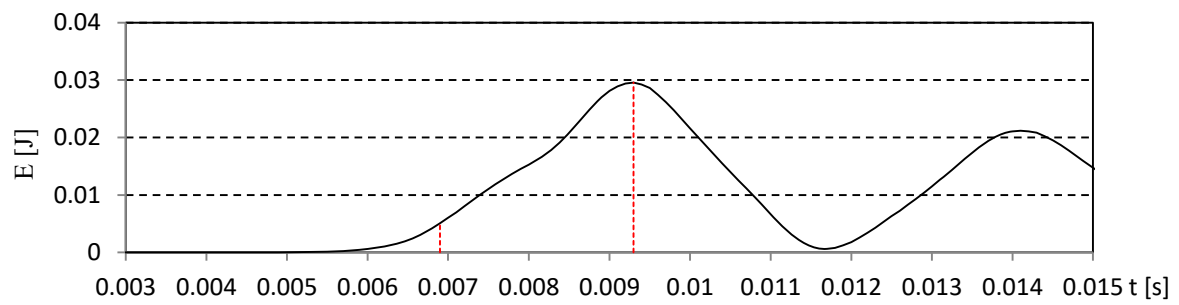


(c) ひずみの鉛直分布

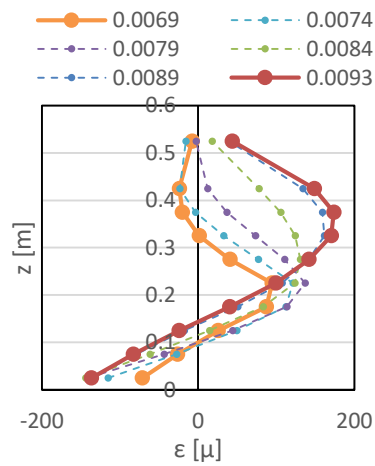
図-4.38 気中衝突試験結果 (TypeB, 衝突高さ 17.5cm, 衝突速度 1.0m/s)



(a) ひずみ時系列

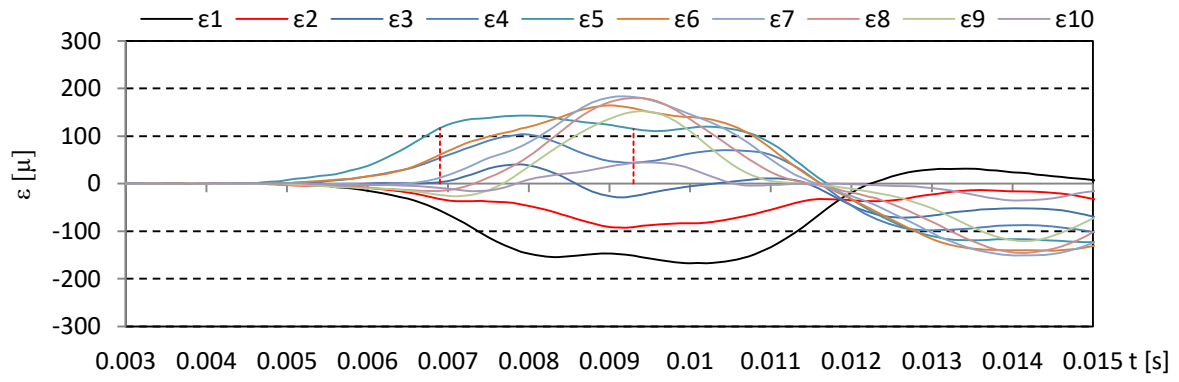


(b) ひずみエネルギー時系列

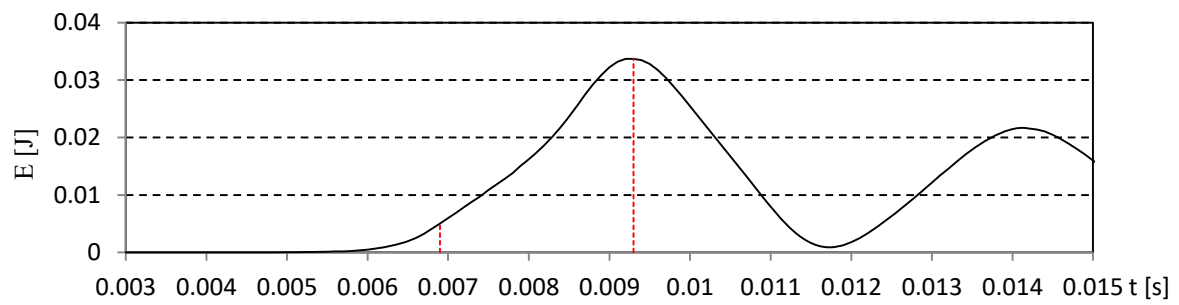


(c) ひずみの鉛直分布

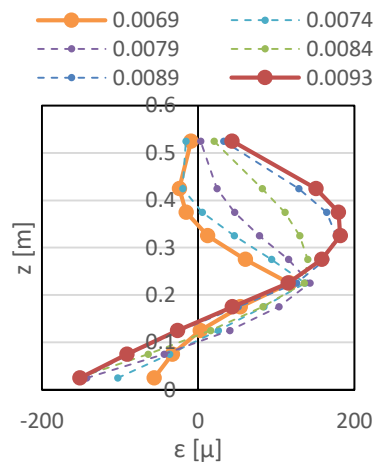
図-4.39 気中衝突試験結果 (TypeB, 衝突高さ 20.0cm, 衝突速度 1.0m/s)



(a) ひずみ時系列



(b) ひずみエネルギー時系列



(c) ひずみの鉛直分布

図-4.40 気中衝突試験結果 (TypeB, 衝突高さ 22.5cm, 衝突速度 1.0m/s)

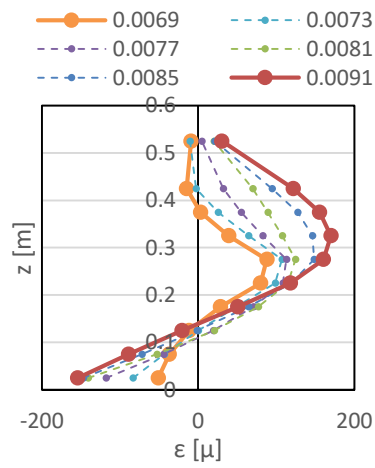
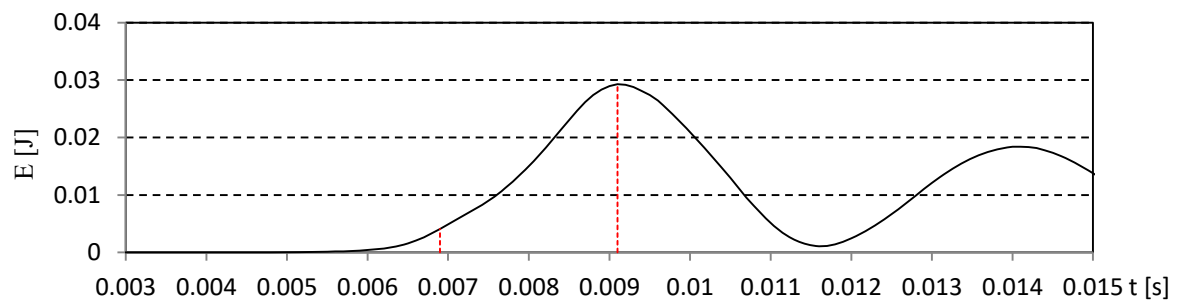
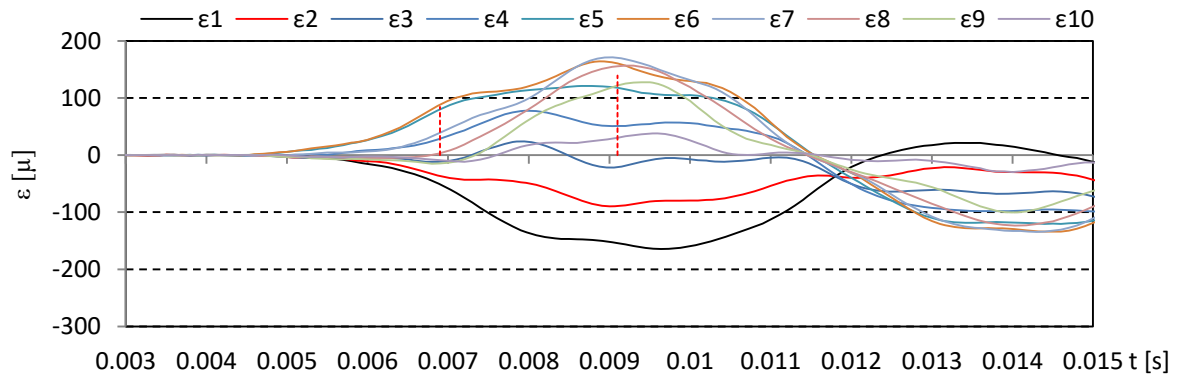


図-4.41 気中衝突試験結果 (TypeB, 衝突高さ 25.0cm, 衝突速度 1.0m/s)

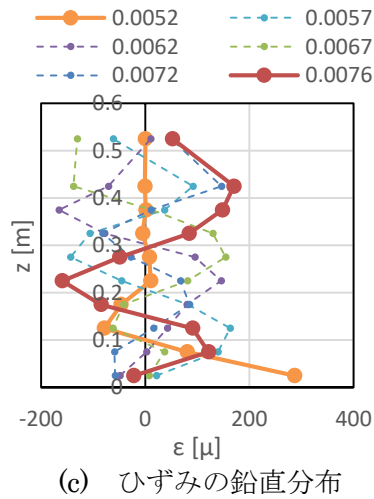
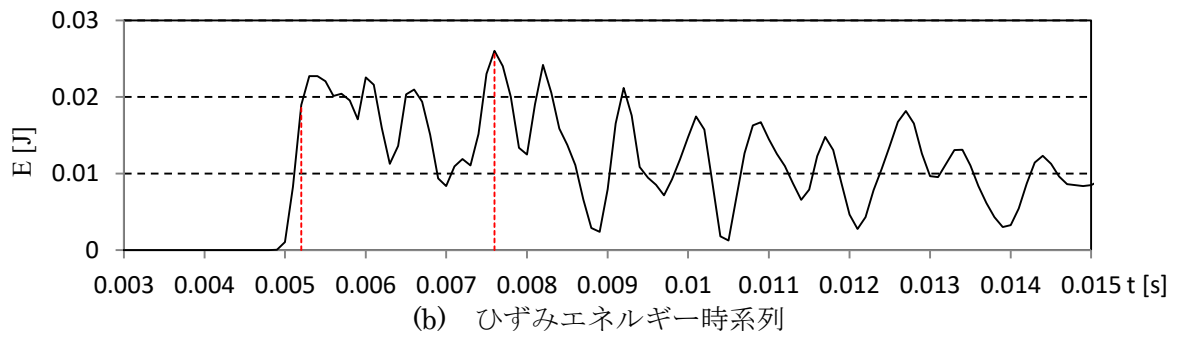
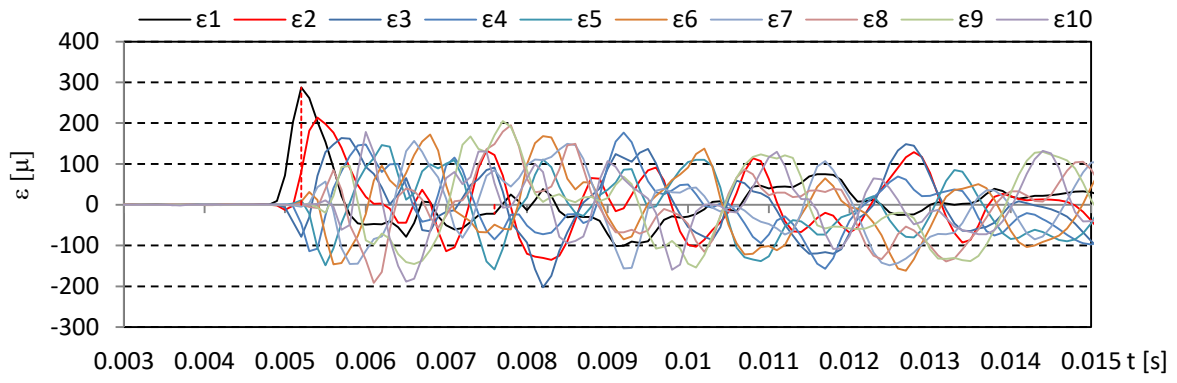


図- 4.42 気中衝突試験結果 (TypeC, 衝突高さ 2.5cm, 衝突速度 2.0m/s)

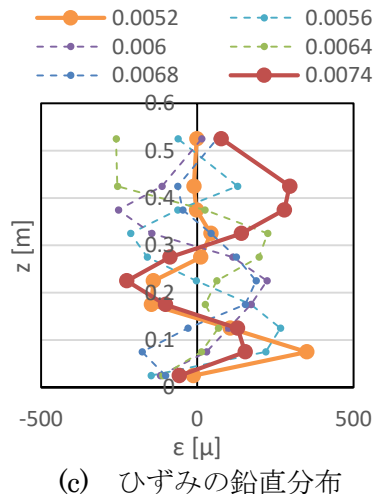
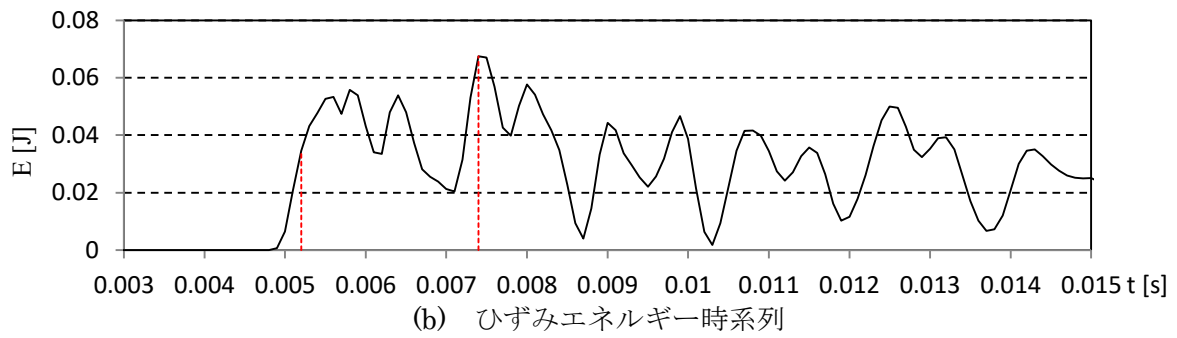
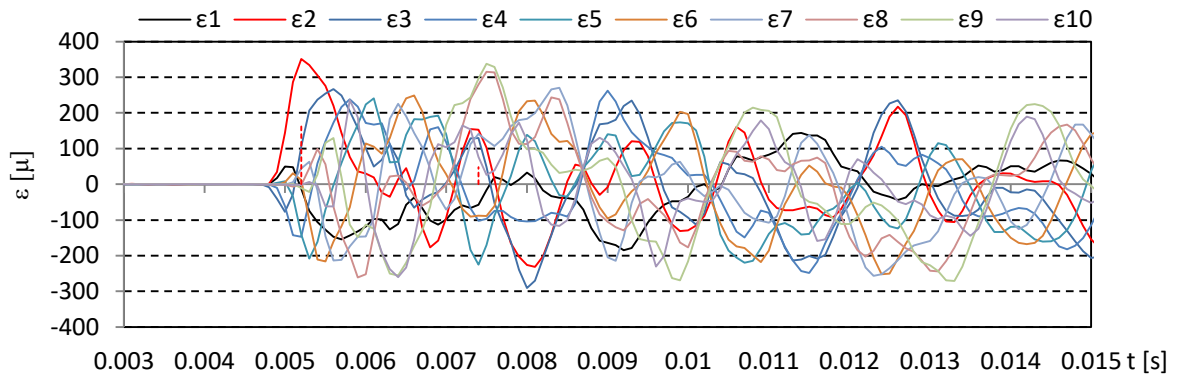
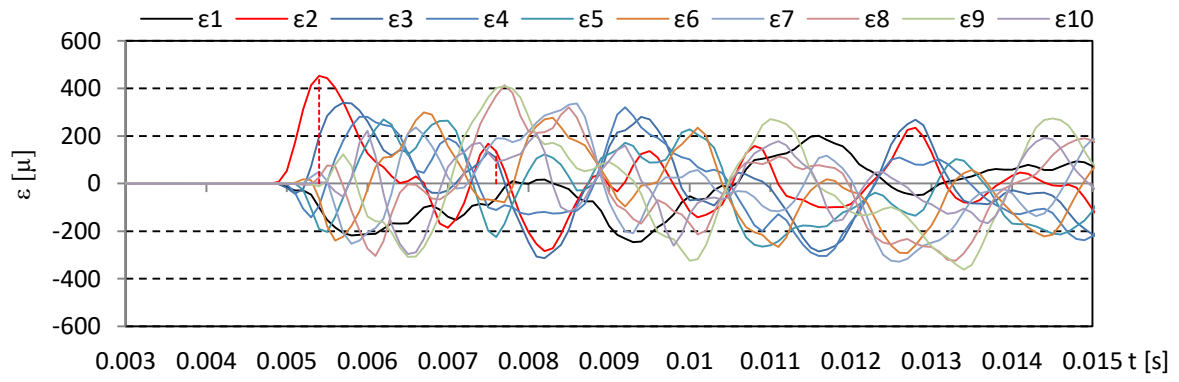
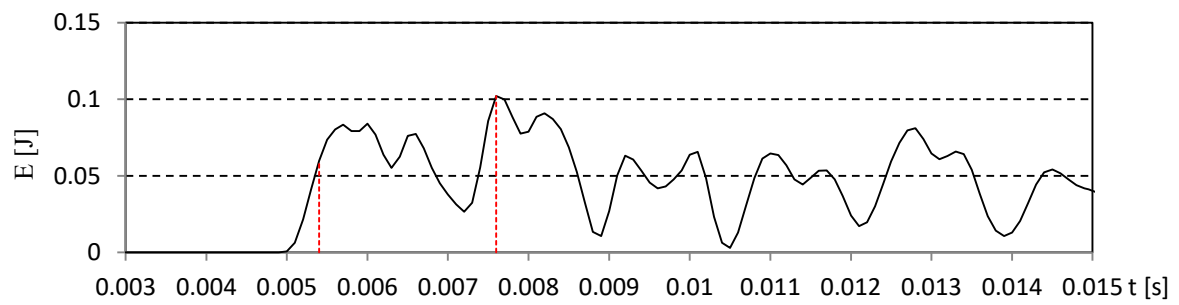


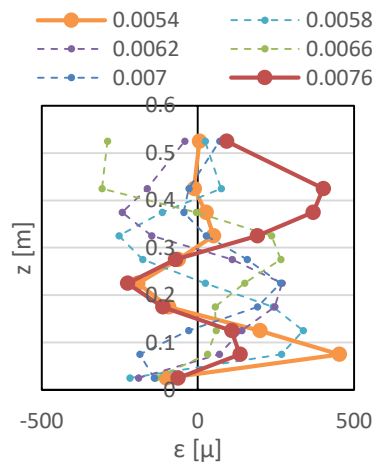
図- 4.43 気中衝突試験結果 (TypeC, 衝突高さ 5.0cm, 衝突速度 2.0m/s)



(a) ひずみ時系列



(b) ひずみエネルギー時系列



(c) ひずみの鉛直分布

図- 4.44 気中衝突試験結果 (TypeC, 衝突高さ 7.5cm, 衝突速度 2.0m/s)

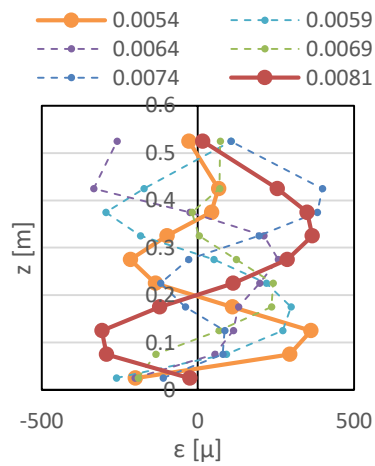
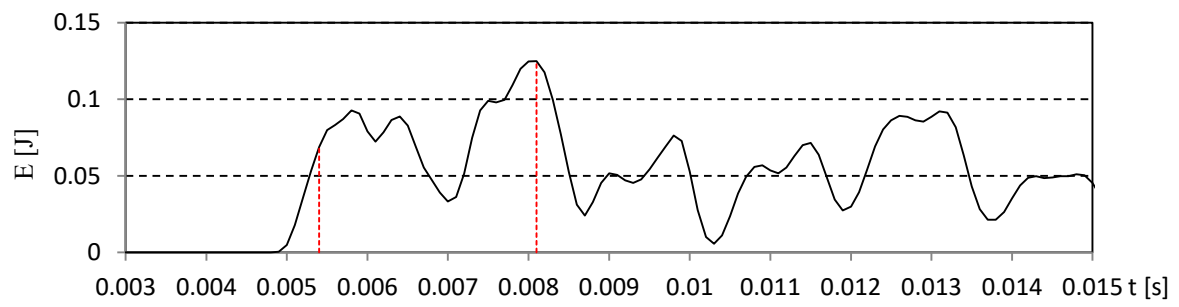
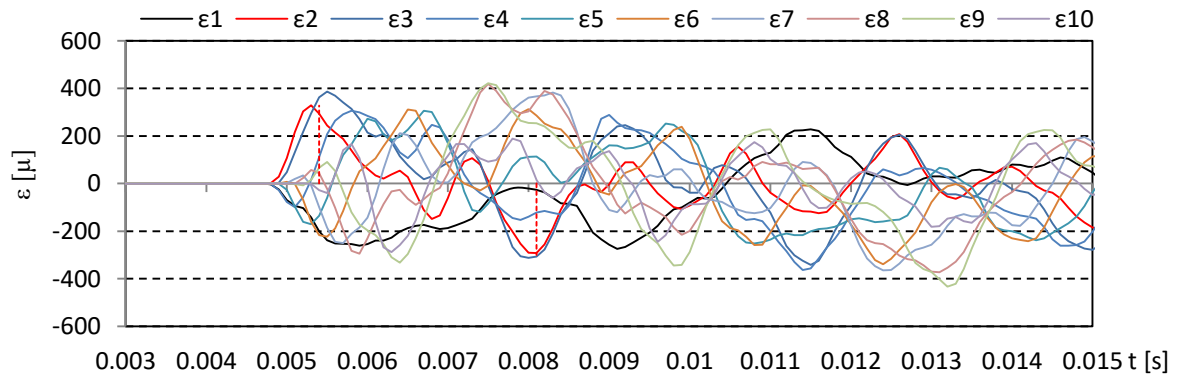
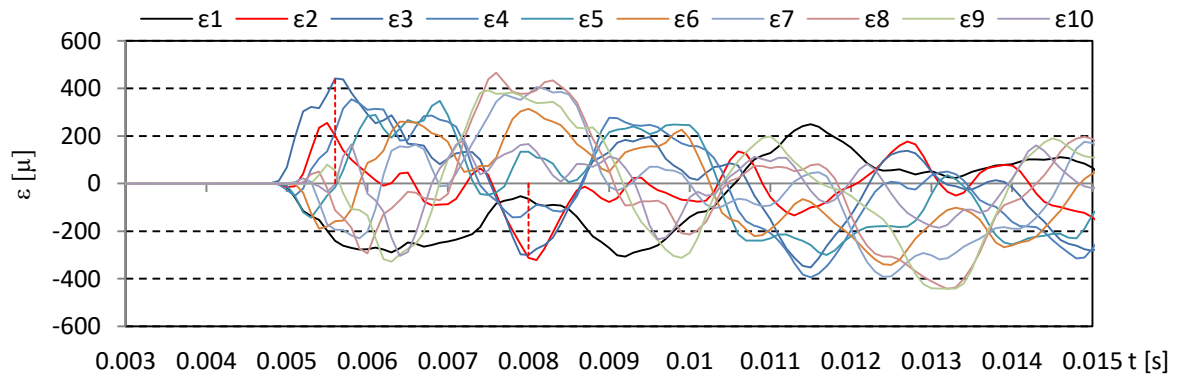
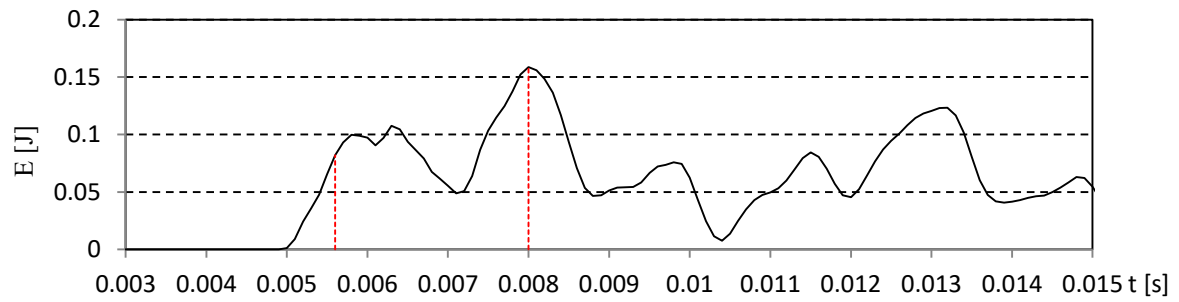


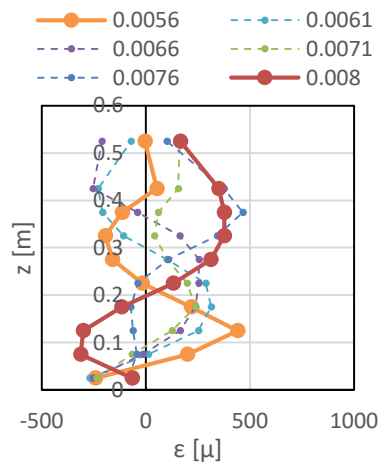
図-4.45 気中衝突試験結果 (TypeC, 衝突高さ 10.0cm, 衝突速度 2.0m/s)



(a) ひずみ時系列

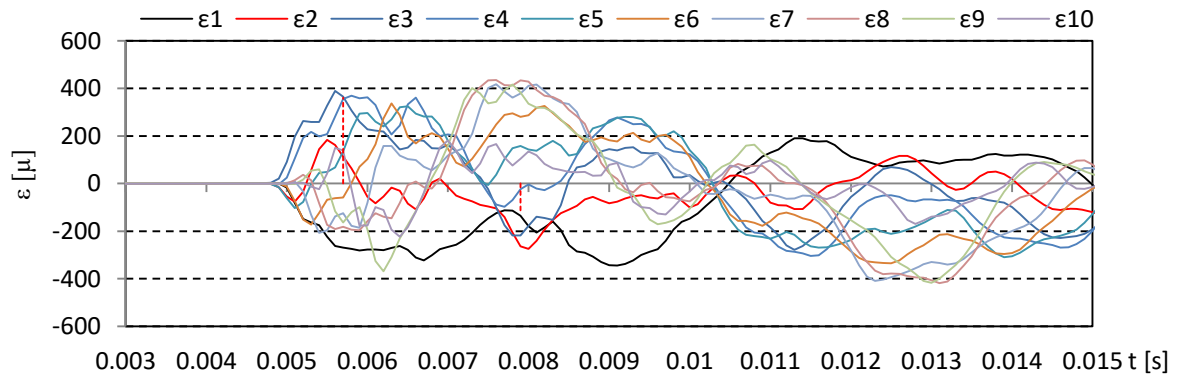


(b) ひずみエネルギー時系列

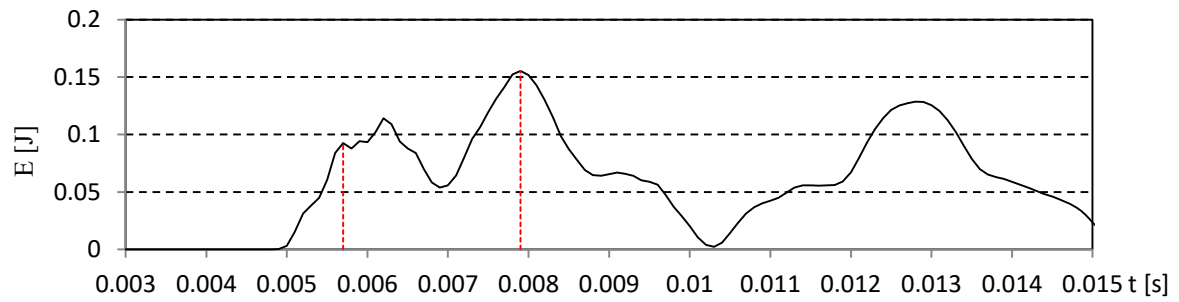


(c) ひずみの鉛直分布

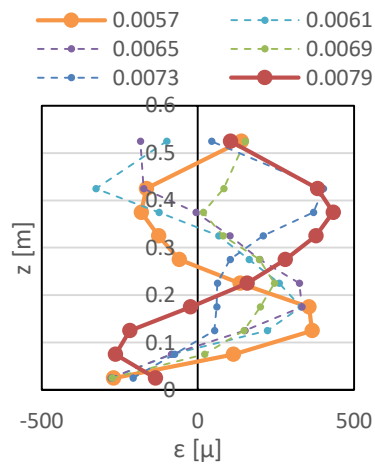
図-4.46 気中衝突試験結果 (TypeC, 衝突高さ 12.5cm, 衝突速度 2.0m/s)



(a) ひずみ時系列



(b) ひずみエネルギー時系列



(c) ひずみの鉛直分布

図-4.47 気中衝突試験結果 (TypeC, 衝突高さ 15.0cm, 衝突速度 2.0m/s)

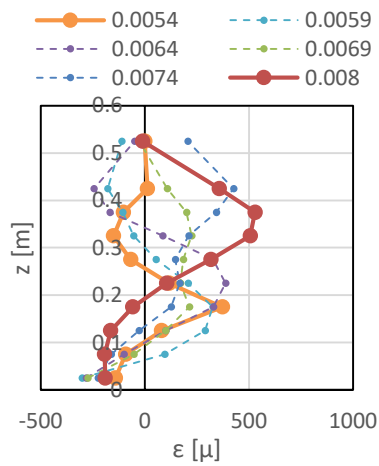
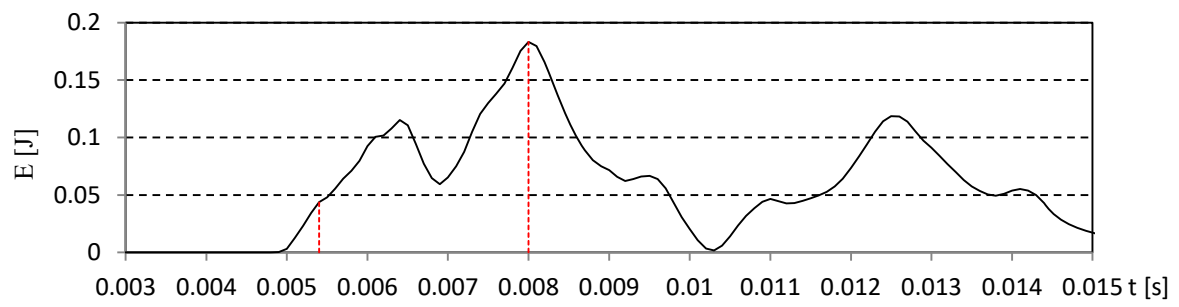
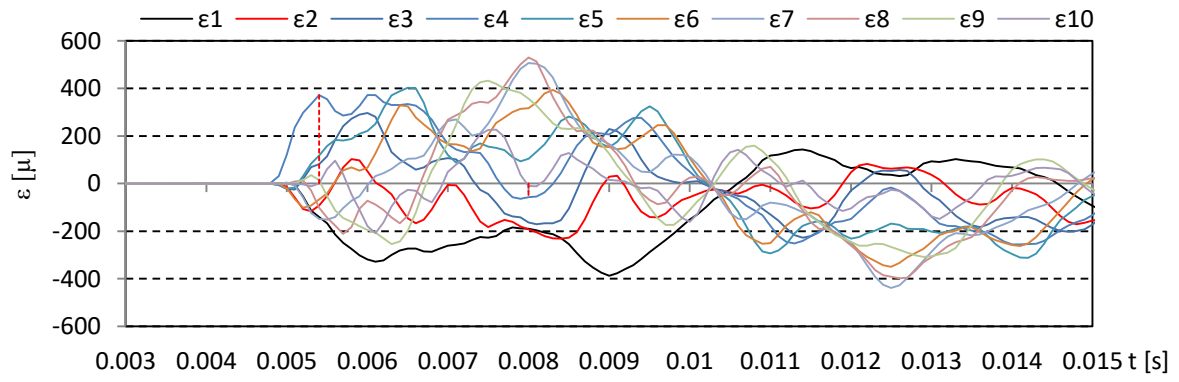
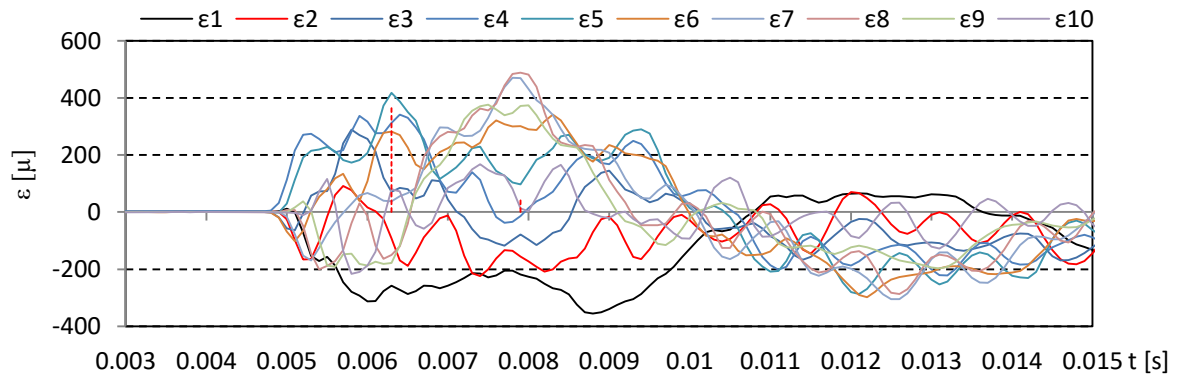
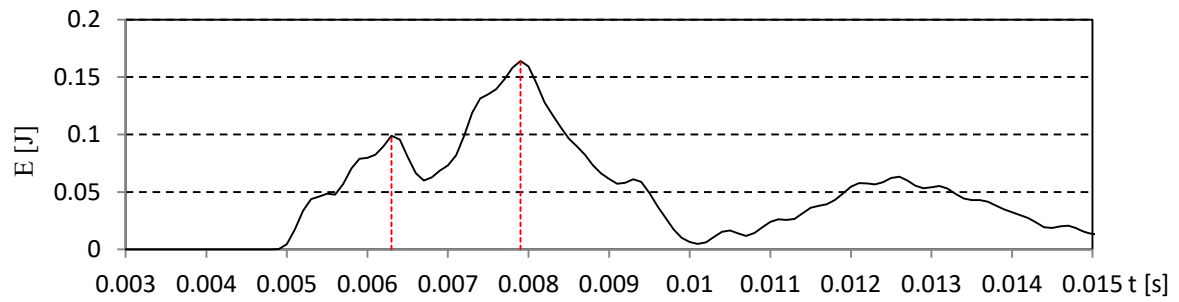


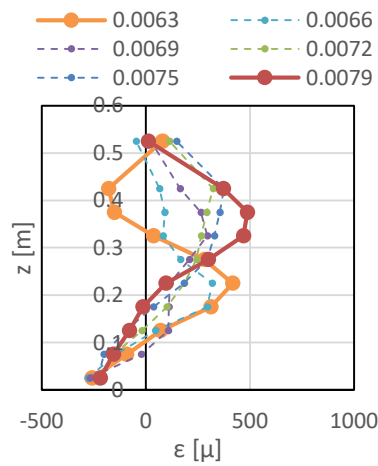
図-4.48 気中衝突試験結果 (TypeC, 衝突高さ 17.5cm, 衝突速度 2.0m/s)



(a) ひずみ時系列

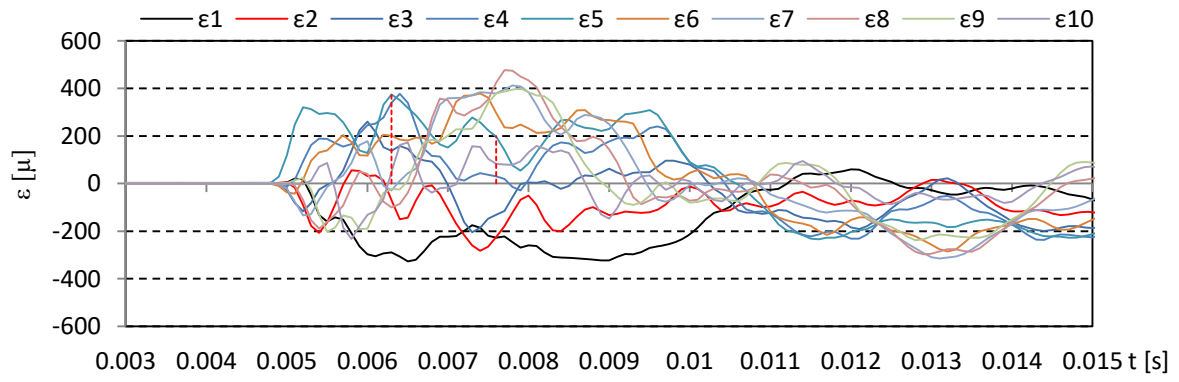


(b) ひずみエネルギー時系列

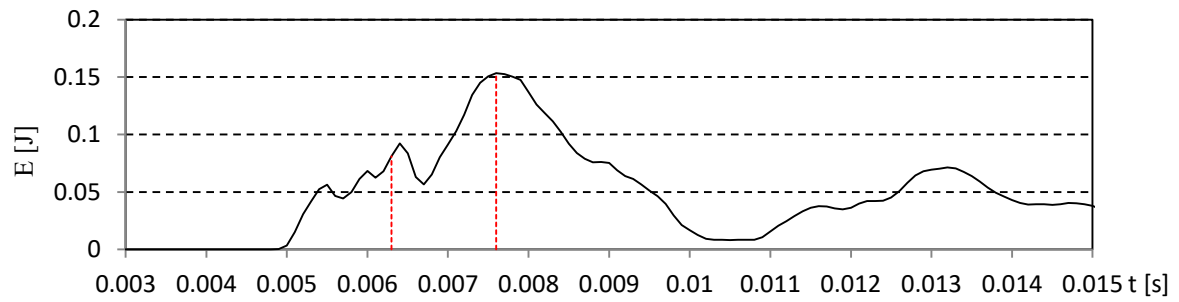


(c) ひずみの鉛直分布

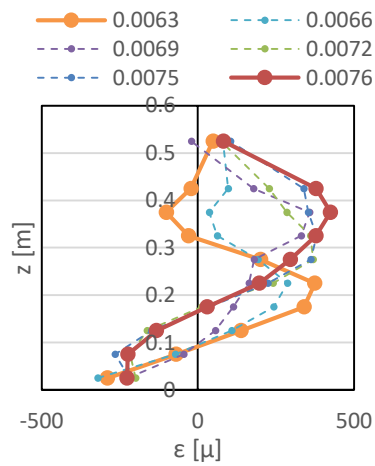
図-4.49 気中衝突試験結果 (TypeC, 衝突高さ 20.0cm, 衝突速度 2.0m/s)



(a) ひずみ時系列

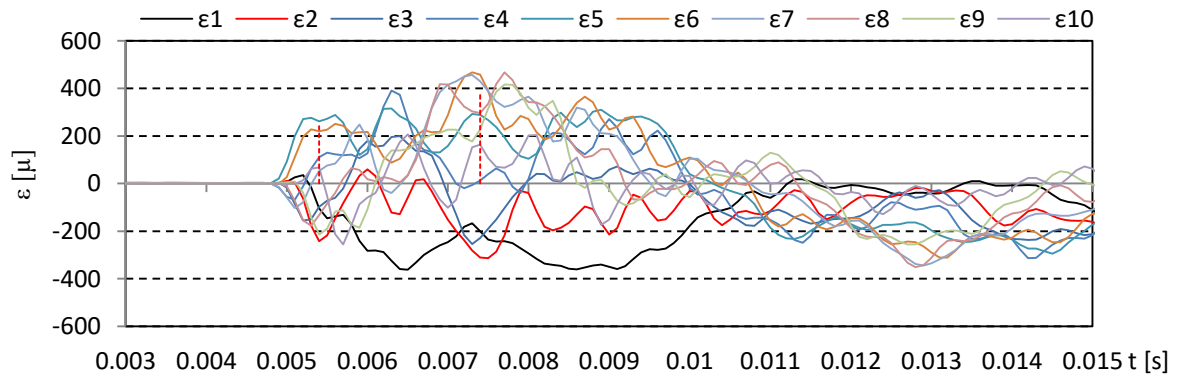


(b) ひずみエネルギー時系列

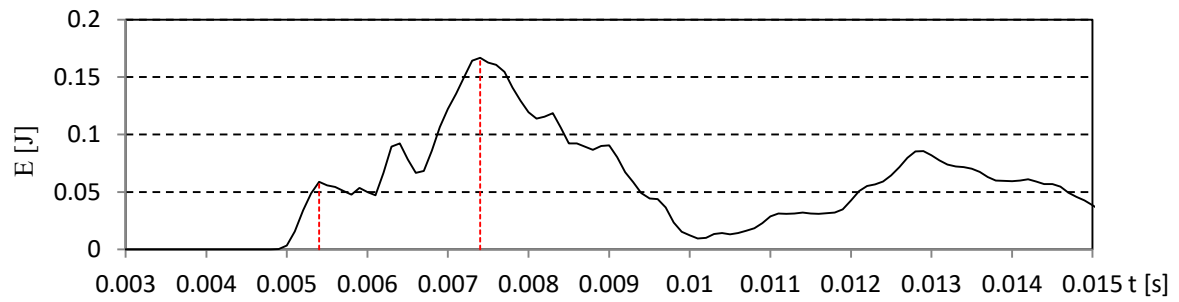


(c) ひずみの鉛直分布

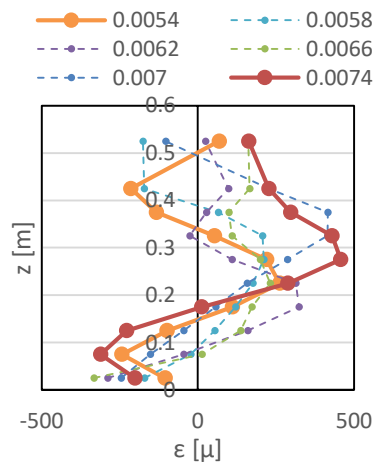
図-4.50 気中衝突試験結果 (TypeC, 衝突高さ 22.5cm, 衝突速度 2.0m/s)



(a) ひずみ時系列



(b) ひずみエネルギー時系列



(c) ひずみの鉛直分布

図-4.51 気中衝突試験結果 (TypeC, 衝突高さ 25.0cm, 衝突速度 2.0m/s)

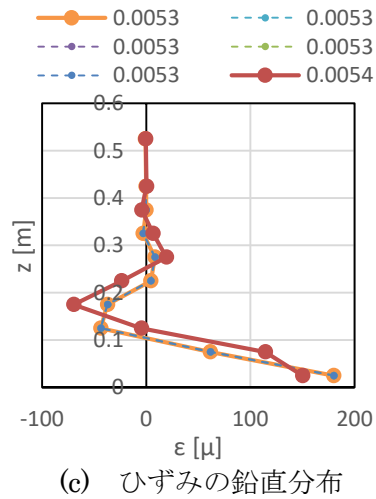
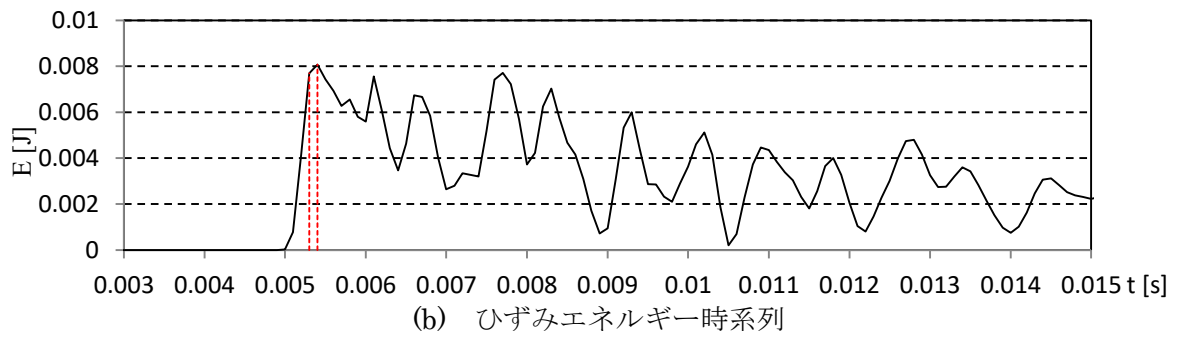
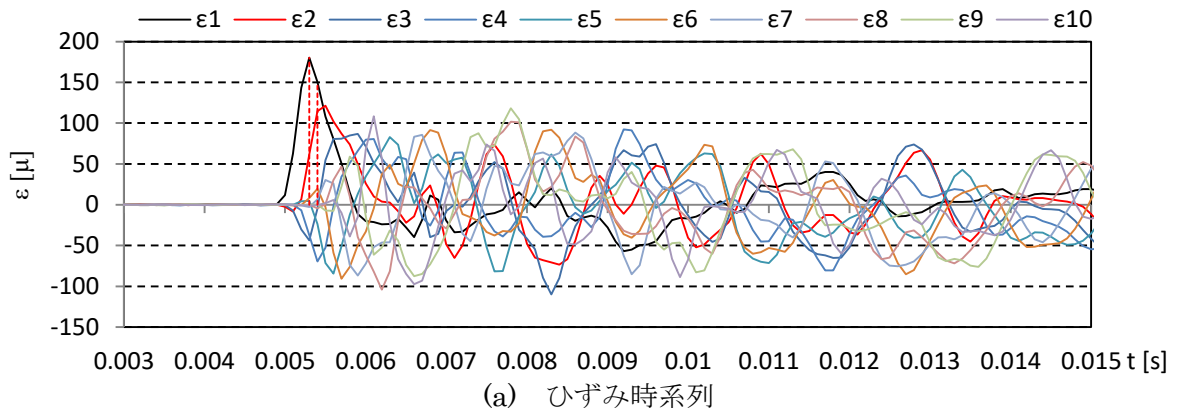


図- 4.52 気中衝突試験結果 (TypeC, 衝突高さ 2.5cm, 衝突速度 1.0m/s)

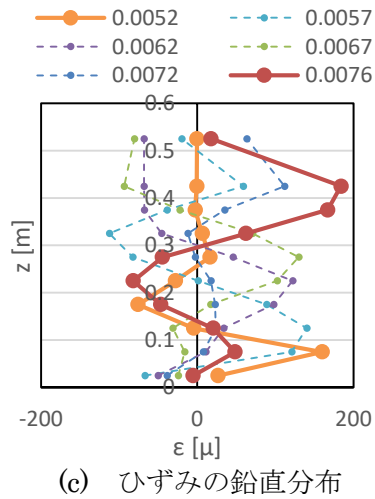
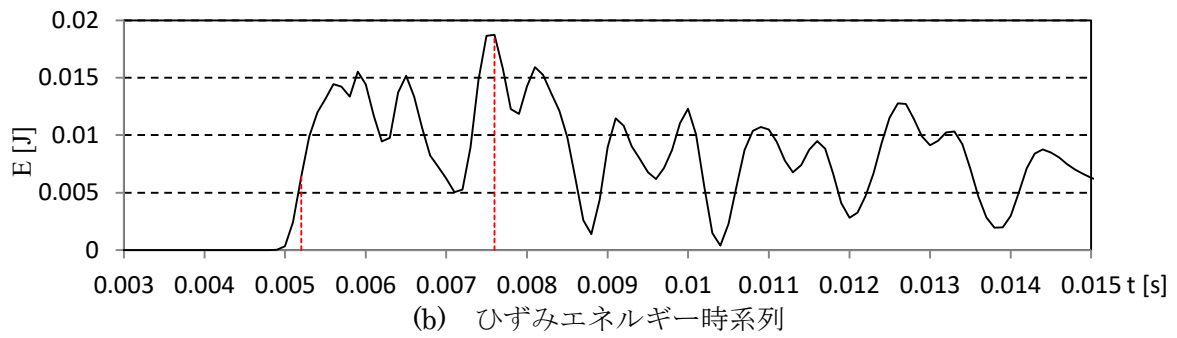
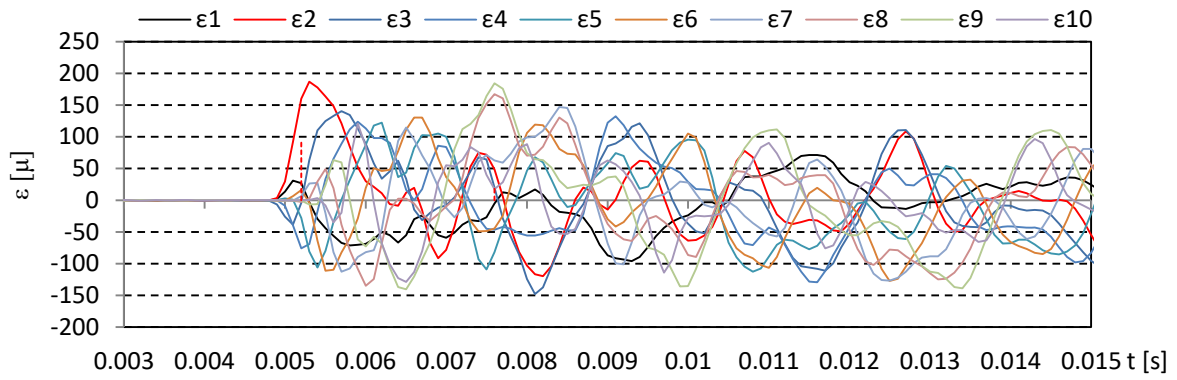
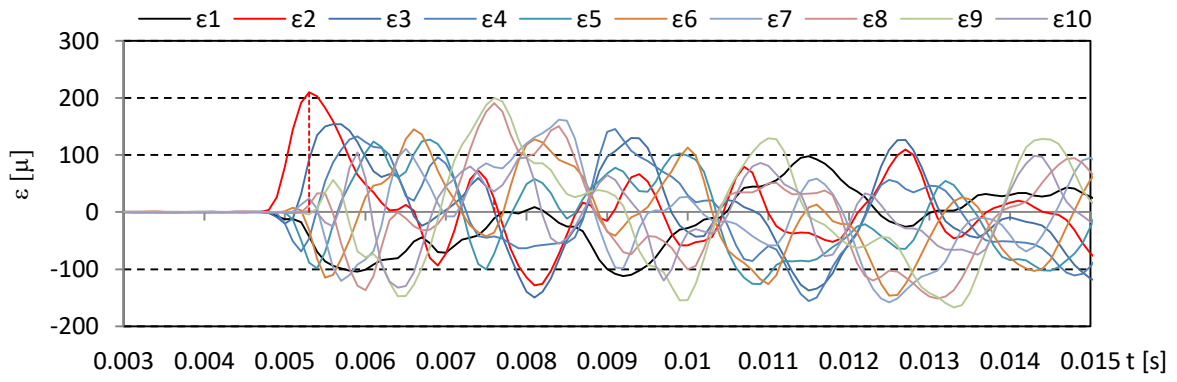
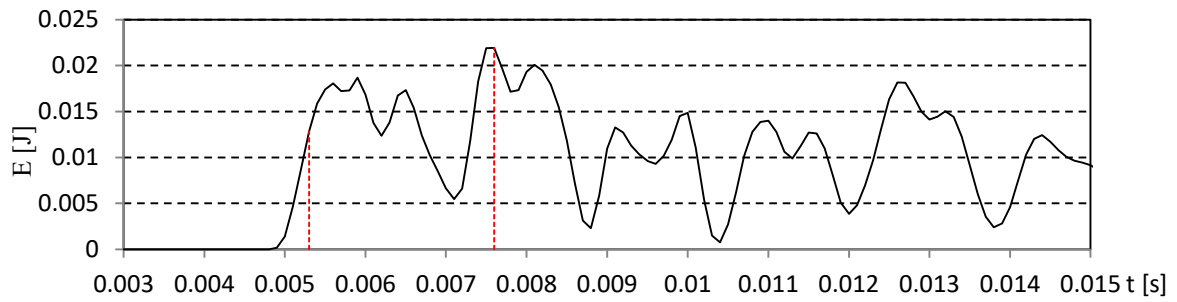


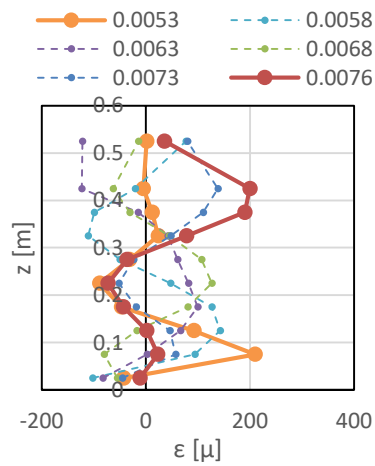
図- 4.53 気中衝突試験結果 (TypeC, 衝突高さ 5.0cm, 衝突速度 1.0m/s)



(a) ひずみ時系列

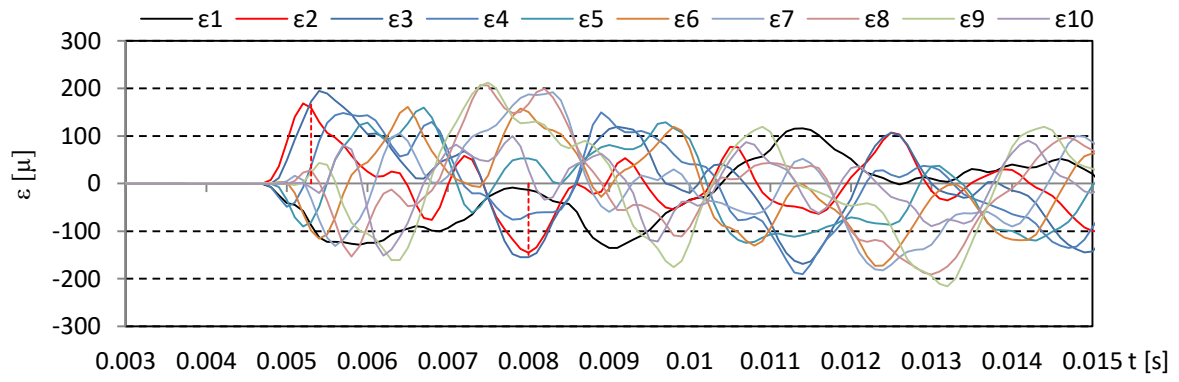


(b) ひずみエネルギー時系列

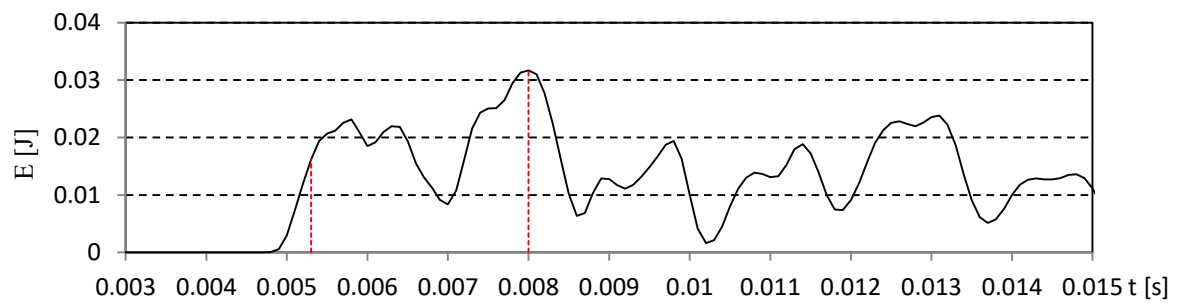


(c) ひずみの鉛直分布

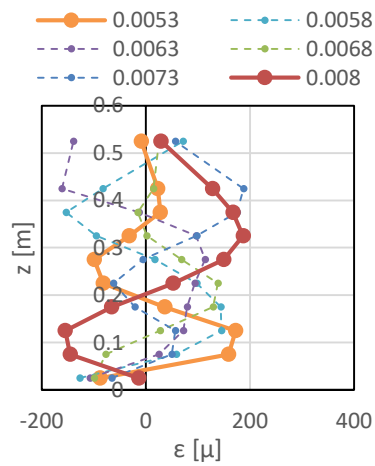
図- 4.54 気中衝突試験結果 (TypeC, 衝突高さ 7.5cm, 衝突速度 1.0m/s)



(a) ひずみ時系列

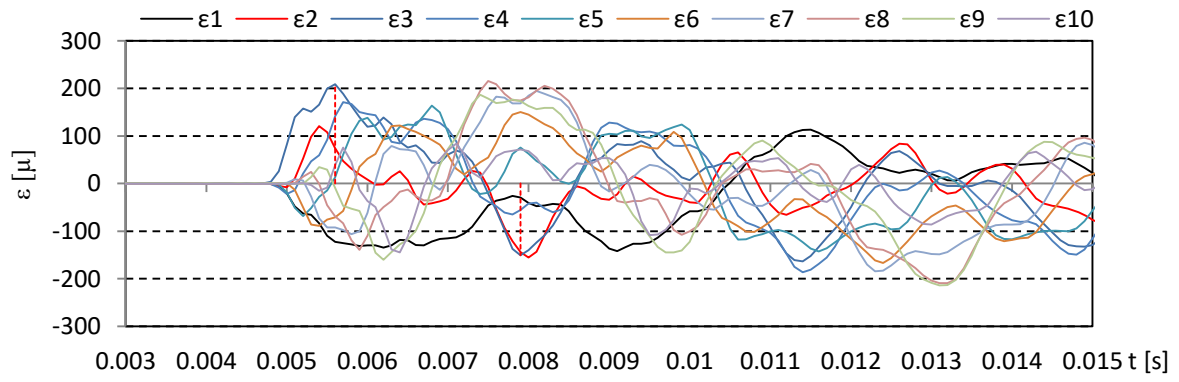


(b) ひずみエネルギー時系列

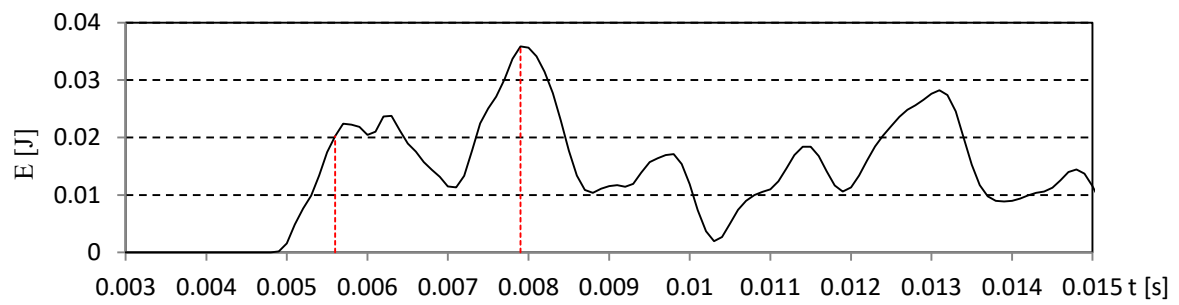


(c) ひずみの鉛直分布

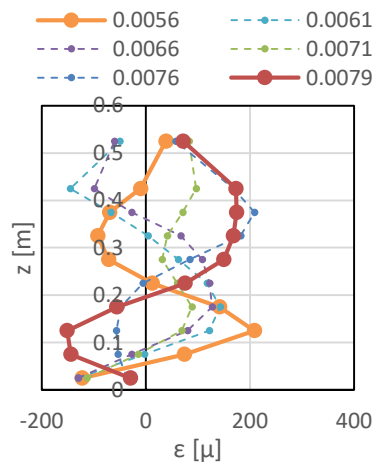
図-4.55 気中衝突試験結果 (TypeC, 衝突高さ 10.0cm, 衝突速度 1.0m/s)



(a) ひずみ時系列

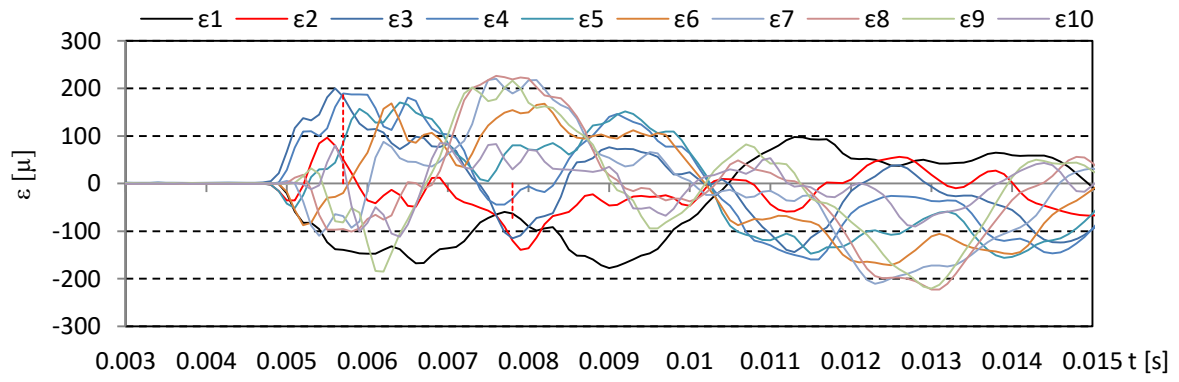


(b) ひずみエネルギー時系列

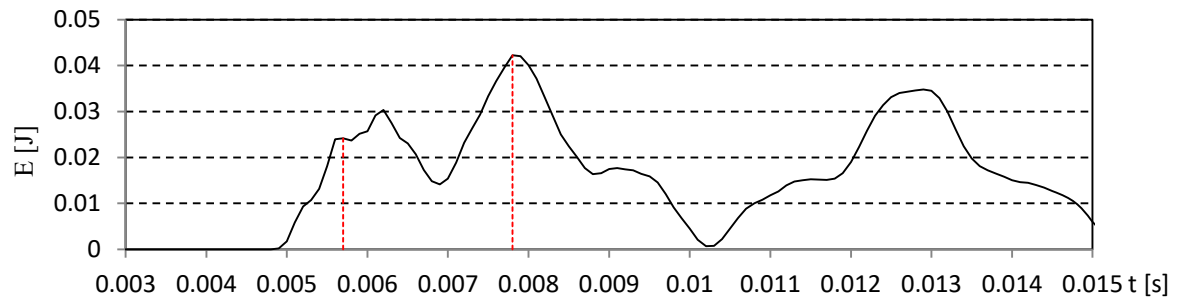


(c) ひずみの鉛直分布

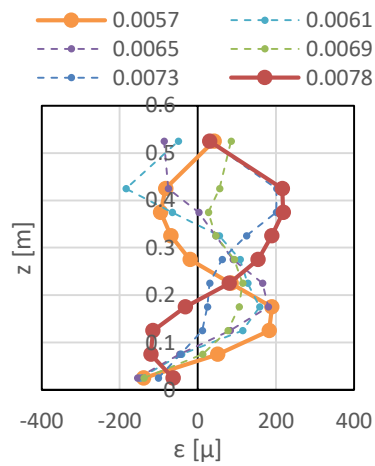
図-4.56 気中衝突試験結果 (TypeC, 衝突高さ 12.5cm, 衝突速度 1.0m/s)



(a) ひずみ時系列



(b) ひずみエネルギー時系列



(c) ひずみの鉛直分布

図-4.57 気中衝突試験結果 (TypeC, 衝突高さ 15.0cm, 衝突速度 1.0m/s)

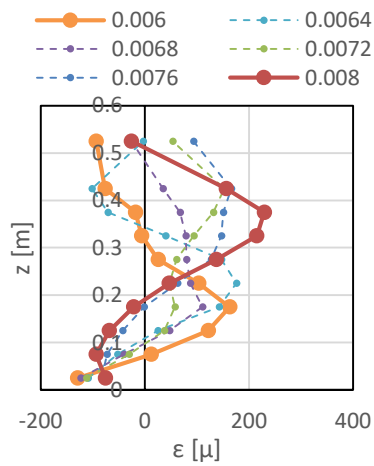
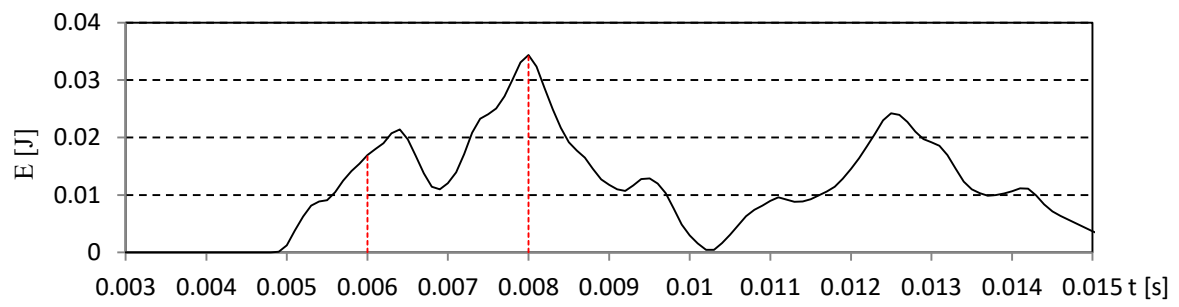
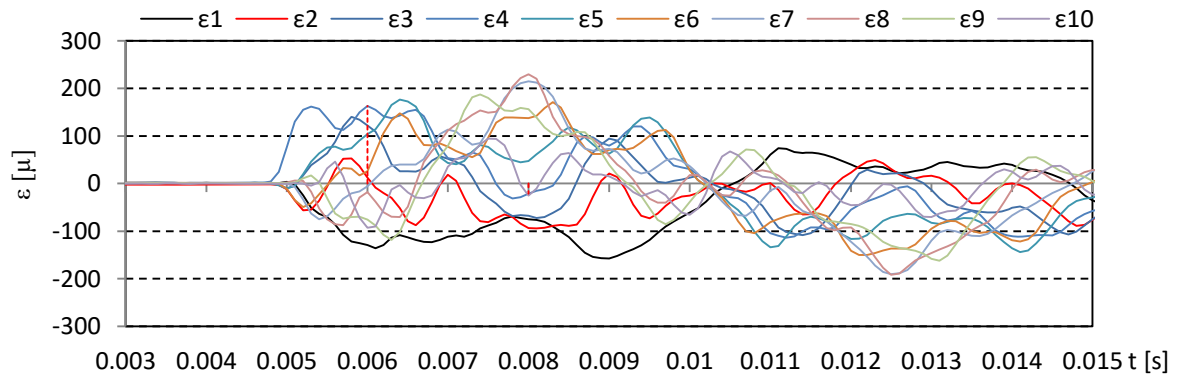
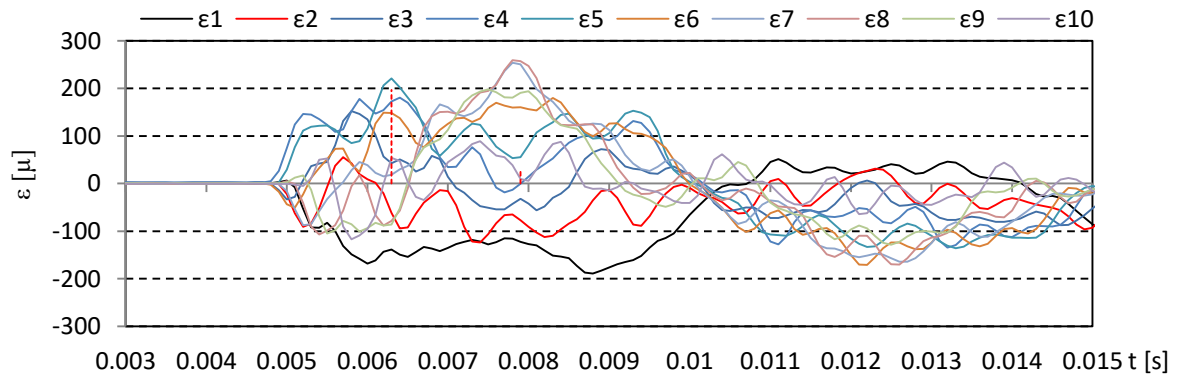
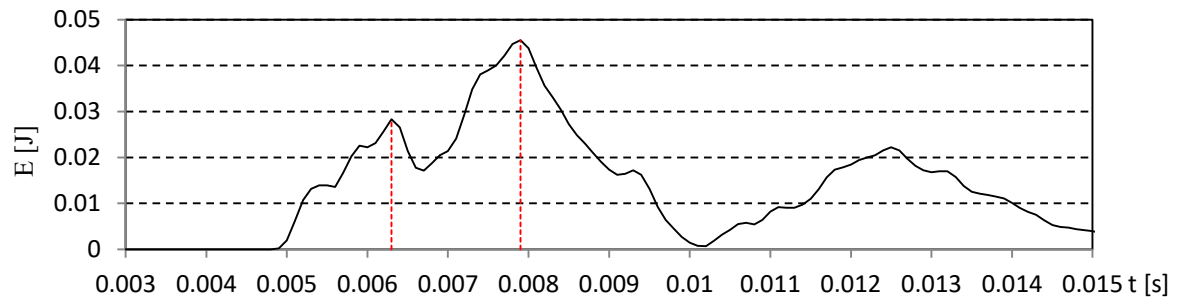


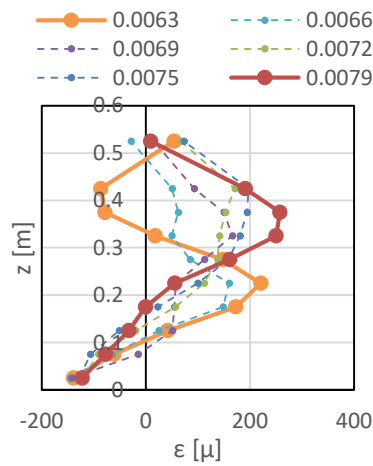
図- 4.58 気中衝突試験結果 (TypeC, 衝突高さ 17.5cm, 衝突速度 1.0m/s)



(a) ひずみ時系列



(b) ひずみエネルギー時系列



(c) ひずみの鉛直分布

図-4.59 気中衝突試験結果 (TypeC, 衝突高さ 20.0cm, 衝突速度 1.0m/s)

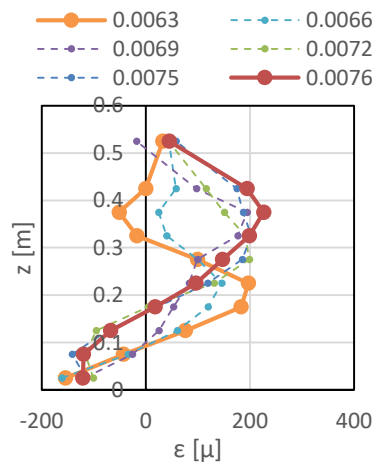
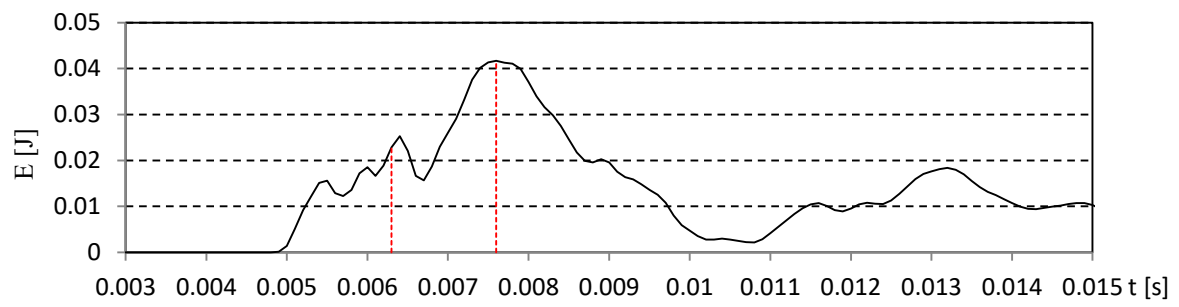
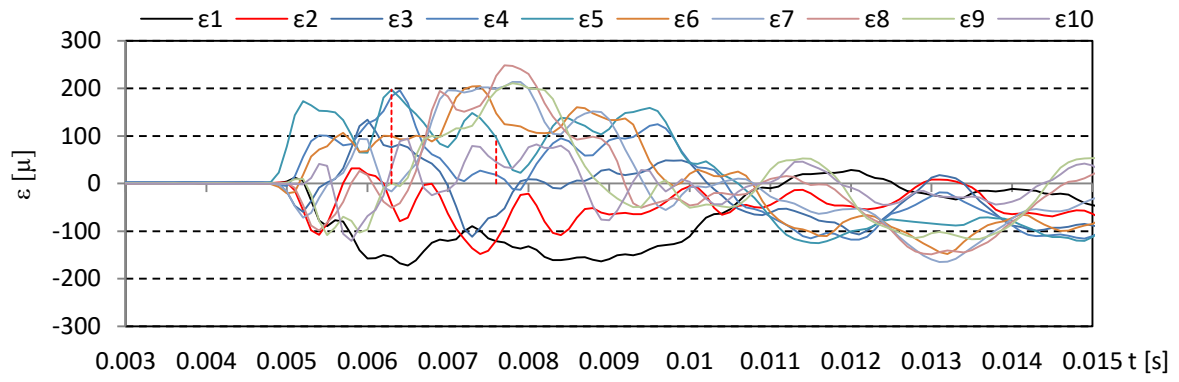
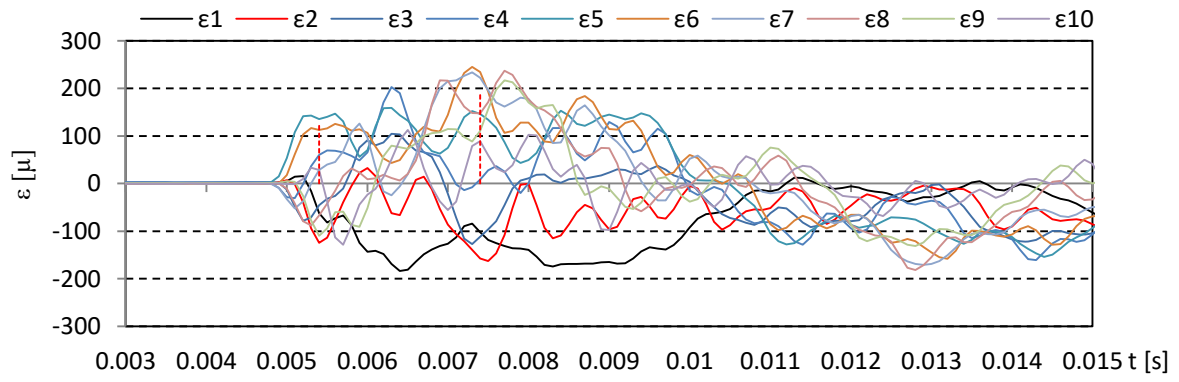
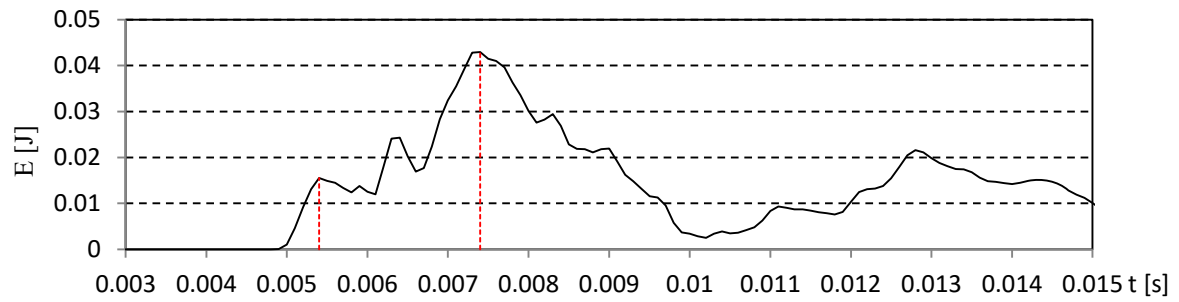


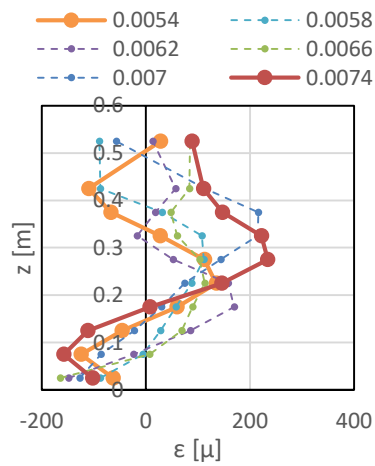
図- 4.60 気中衝突試験結果 (TypeC, 衝突高さ 22.5cm, 衝突速度 1.0m/s)



(a) ひずみ時系列



(b) ひずみエネルギー時系列



(c) ひずみの鉛直分布

図-4.61 気中衝突試験結果 (TypeC, 衝突高さ 25.0cm, 衝突速度 1.0m/s)

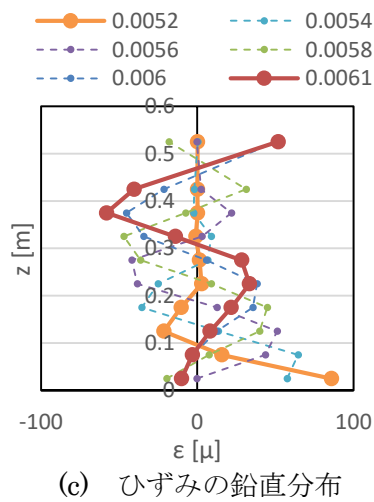
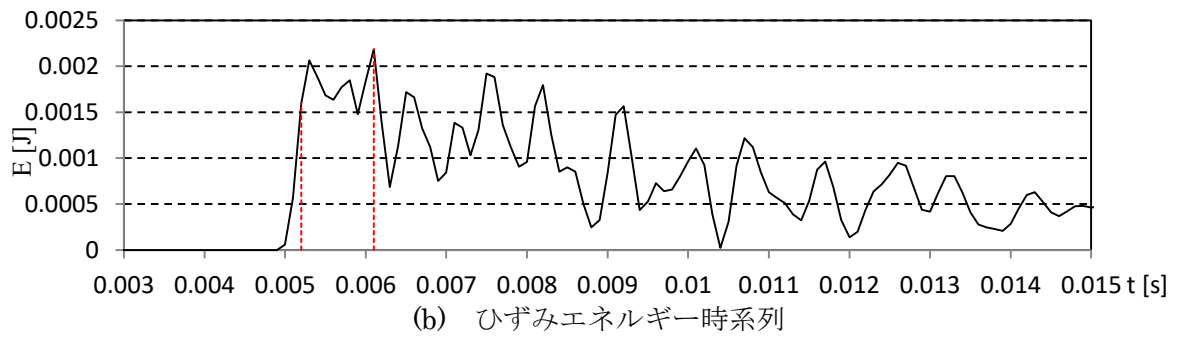
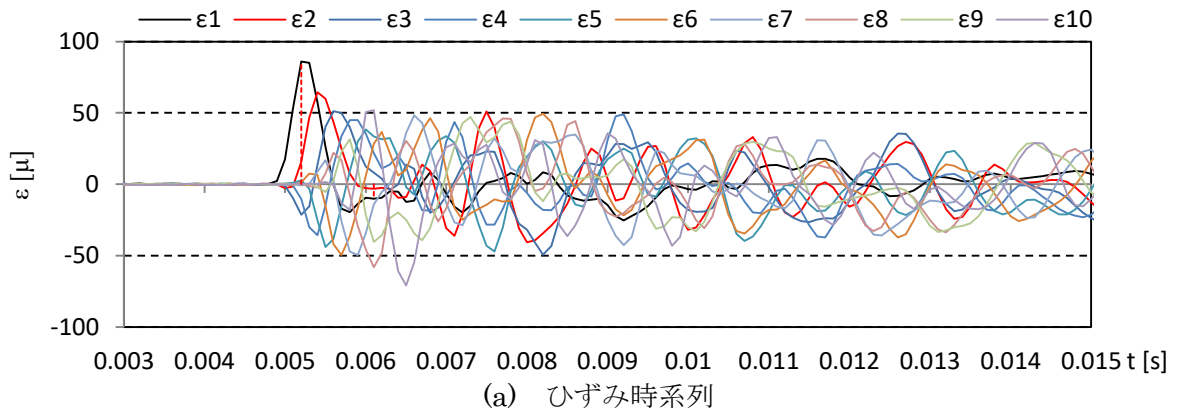


図- 4.62 気中衝突試験結果 (TypeD, 衝突高さ 2.5cm, 衝突速度 2.0m/s)

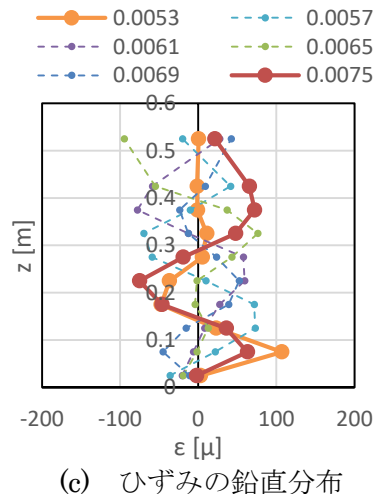
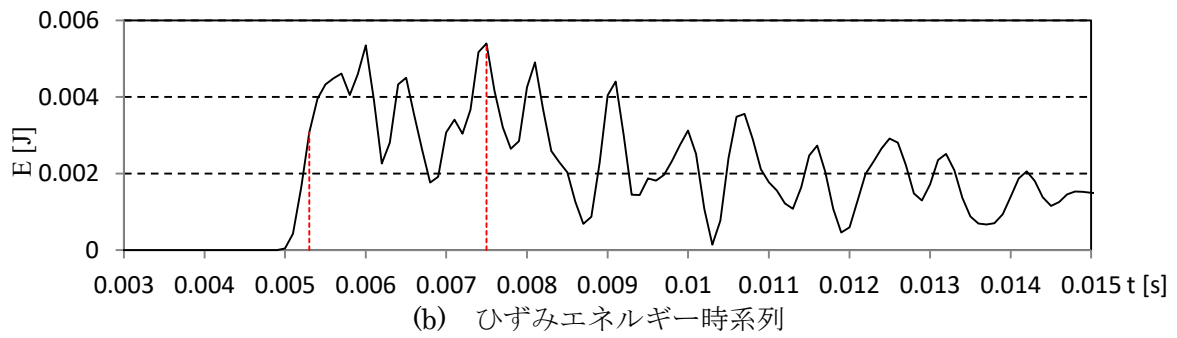
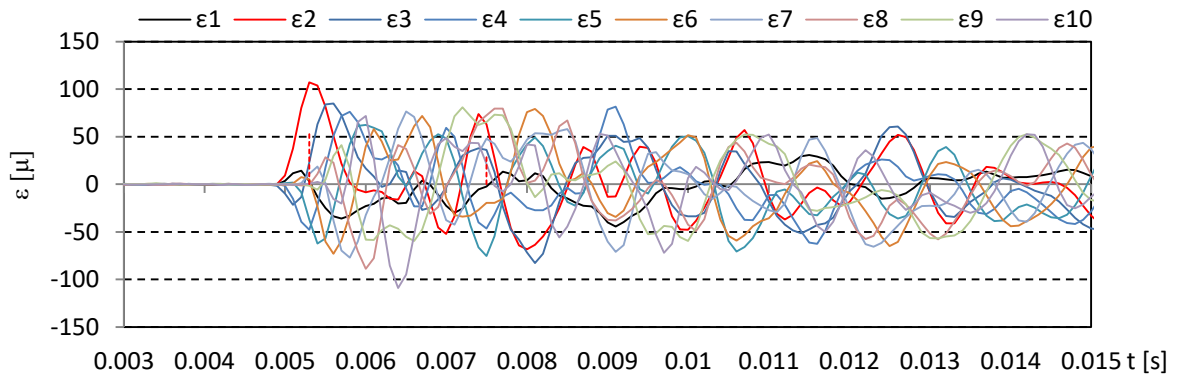
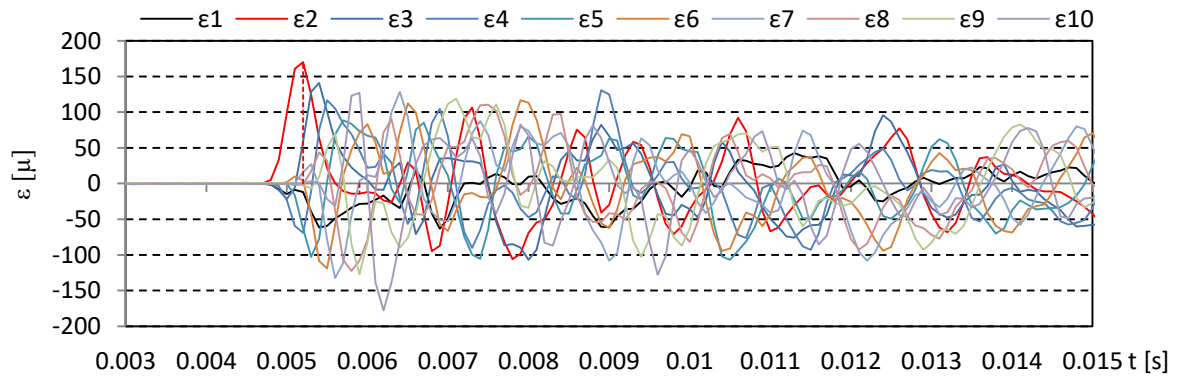
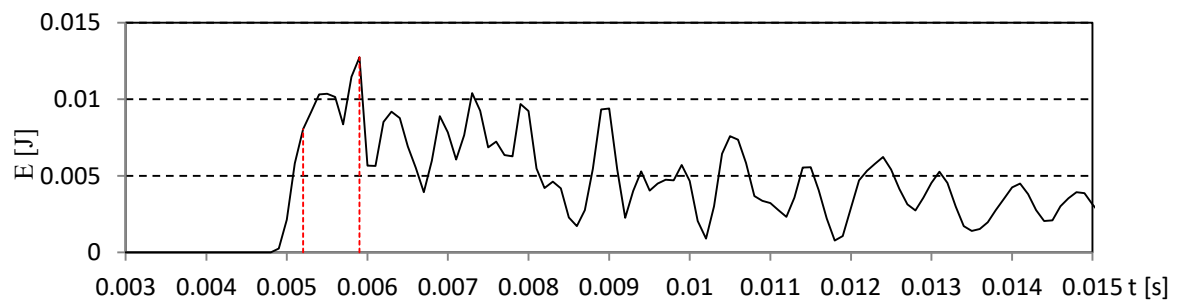


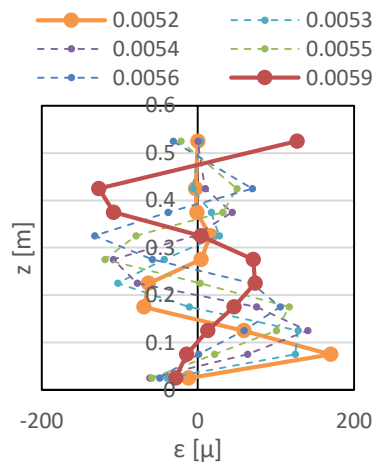
図- 4.63 気中衝突試験結果 (TypeD, 衝突高さ 5.0cm, 衝突速度 2.0m/s)



(a) ひずみ時系列

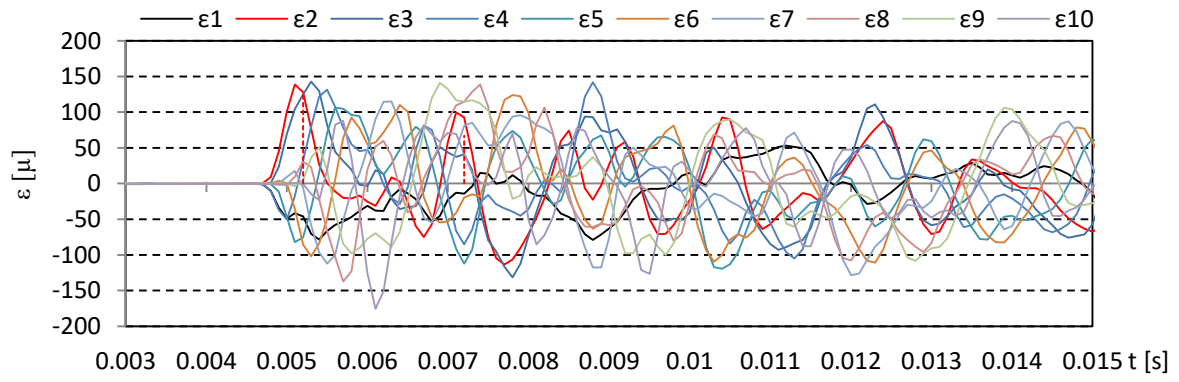


(b) ひずみエネルギー時系列

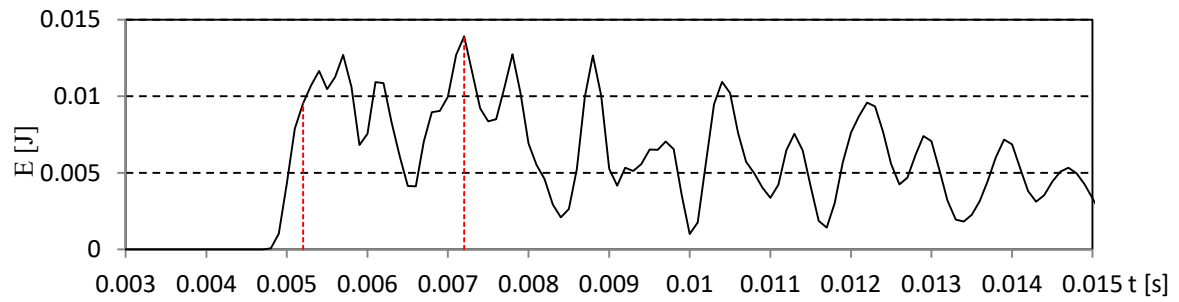


(c) ひずみの鉛直分布

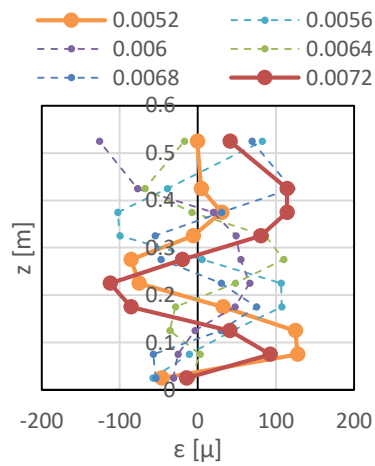
図- 4.64 気中衝突試験結果 (TypeD, 衝突高さ 7.5cm, 衝突速度 2.0m/s)



(a) ひずみ時系列



(b) ひずみエネルギー時系列



(c) ひずみの鉛直分布

図-4.65 気中衝突試験結果 (TypeD, 衝突高さ 10.0cm, 衝突速度 2.0m/s)

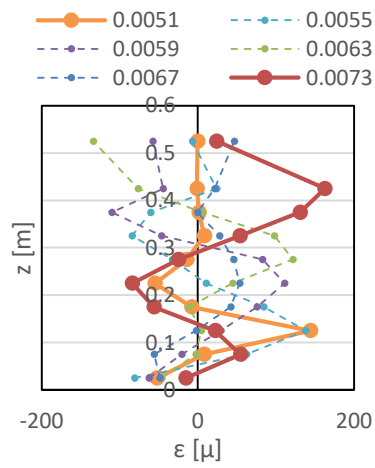
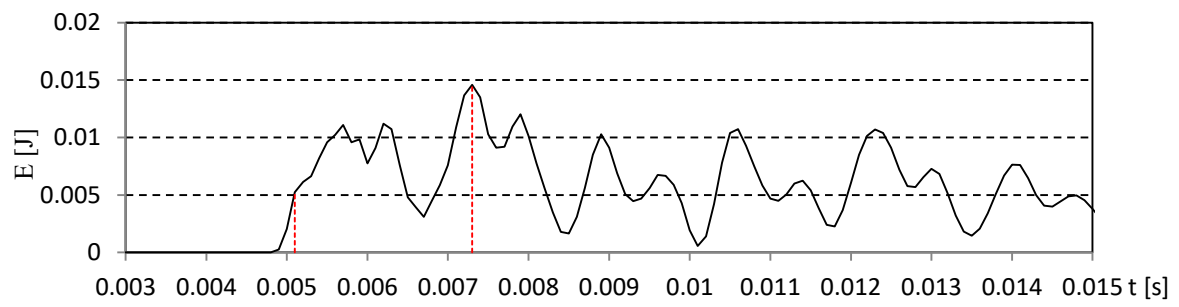
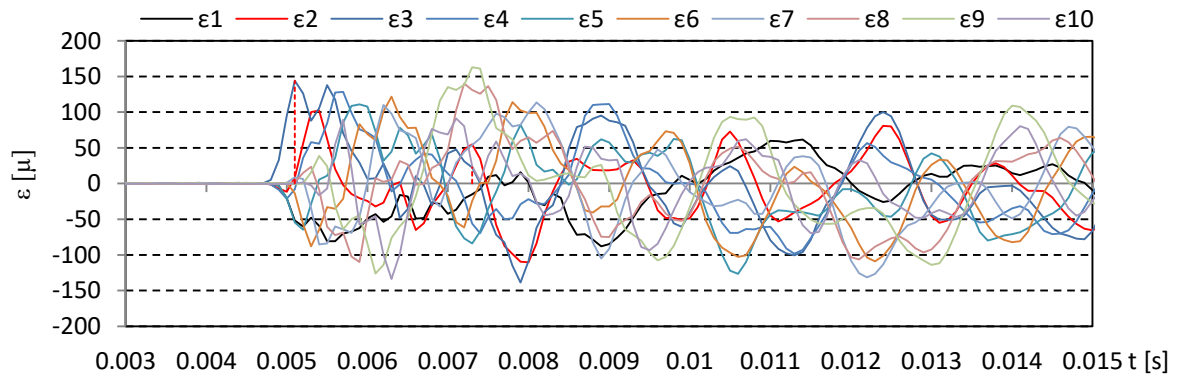
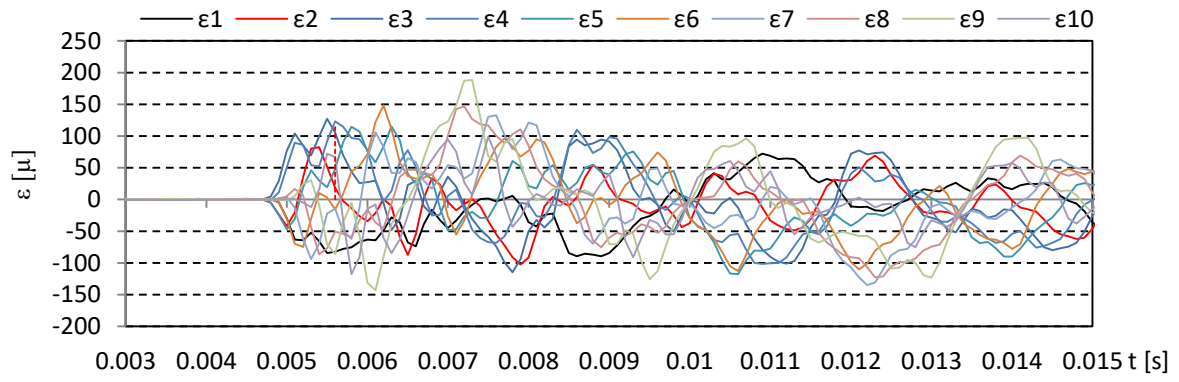
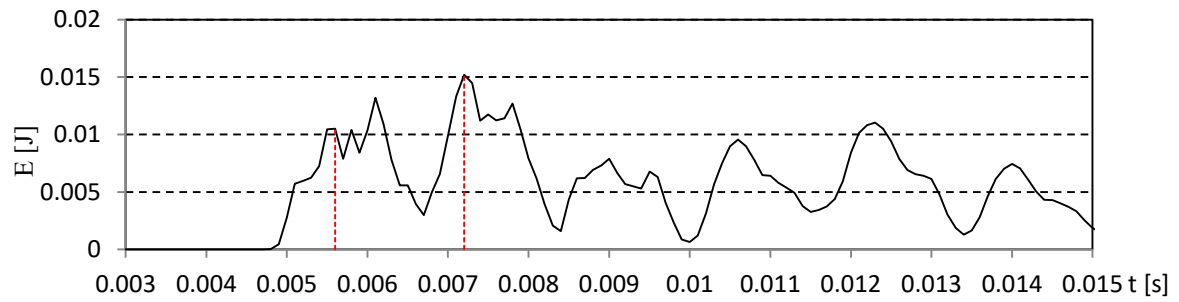


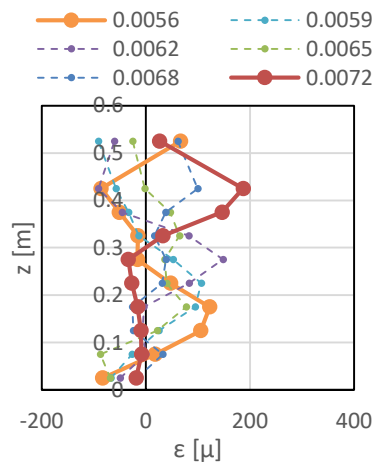
図-4.66 気中衝突試験結果 (TypeD, 衝突高さ 12.5cm, 衝突速度 2.0m/s)



(a) ひずみ時系列

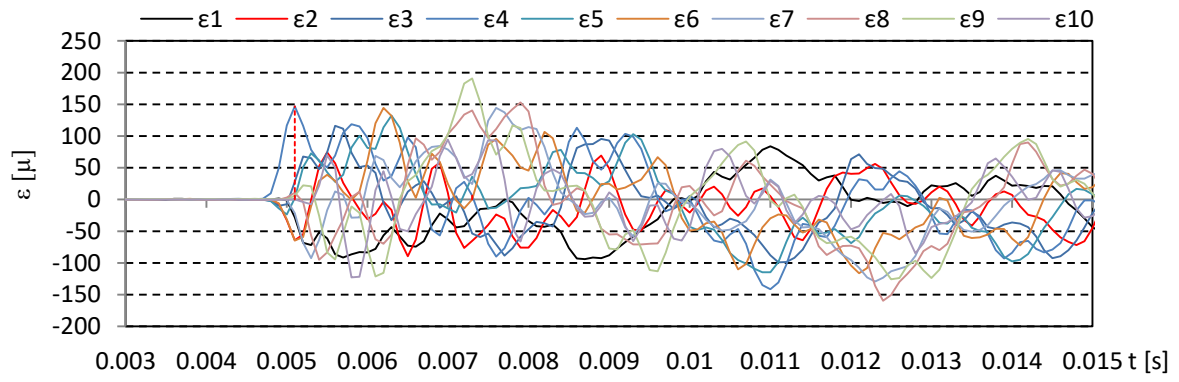


(b) ひずみエネルギー時系列

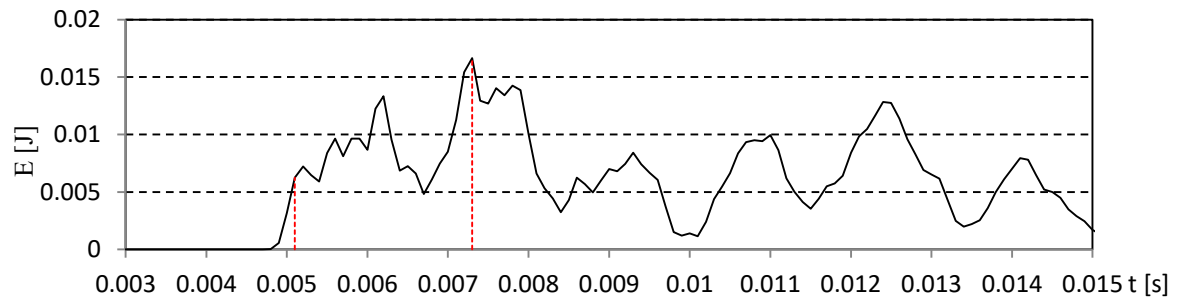


(c) ひずみの鉛直分布

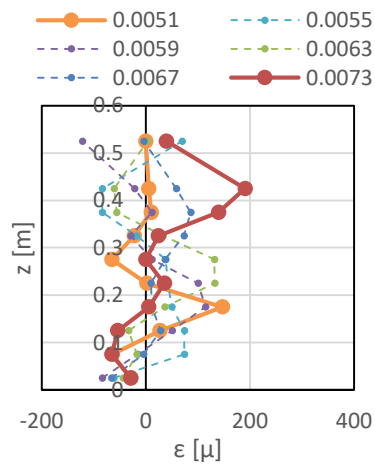
図-4.67 気中衝突試験結果 (TypeD, 衝突高さ 15.0cm, 衝突速度 2.0m/s)



(a) ひずみ時系列

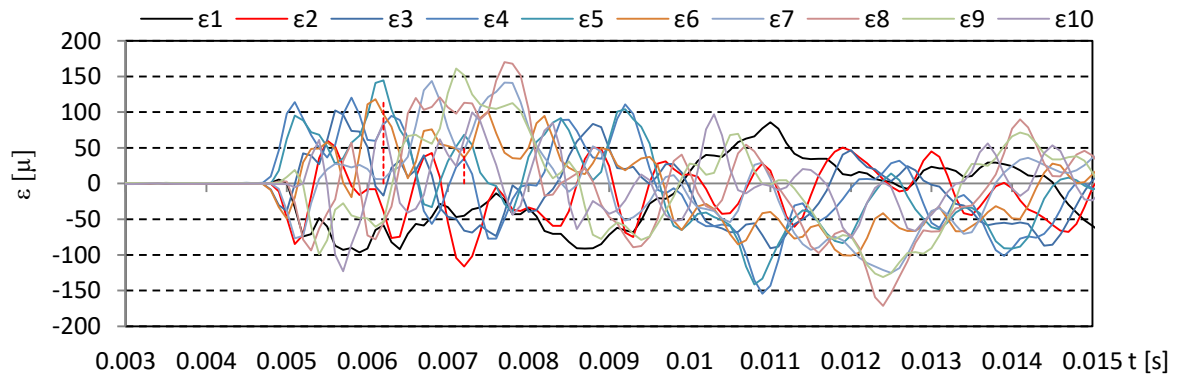


(b) ひずみエネルギー時系列

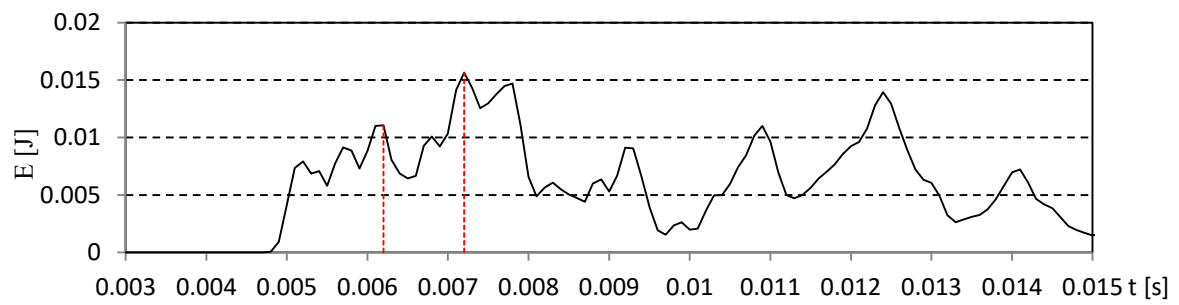


(c) ひずみの鉛直分布

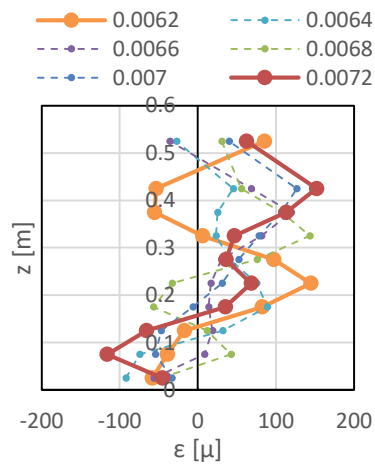
図-4.68 気中衝突試験結果 (TypeD, 衝突高さ 17.5cm, 衝突速度 2.0m/s)



(a) ひずみ時系列



(b) ひずみエネルギー時系列



(c) ひずみの鉛直分布

図-4.69 気中衝突試験結果 (TypeD, 衝突高さ 20.0cm, 衝突速度 2.0m/s)

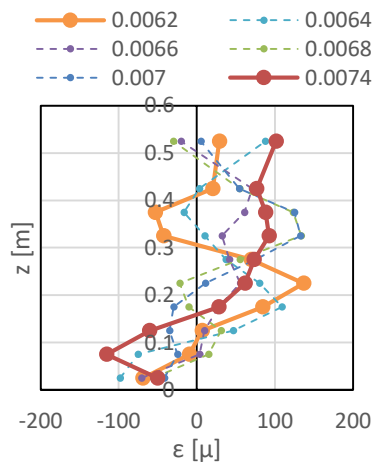
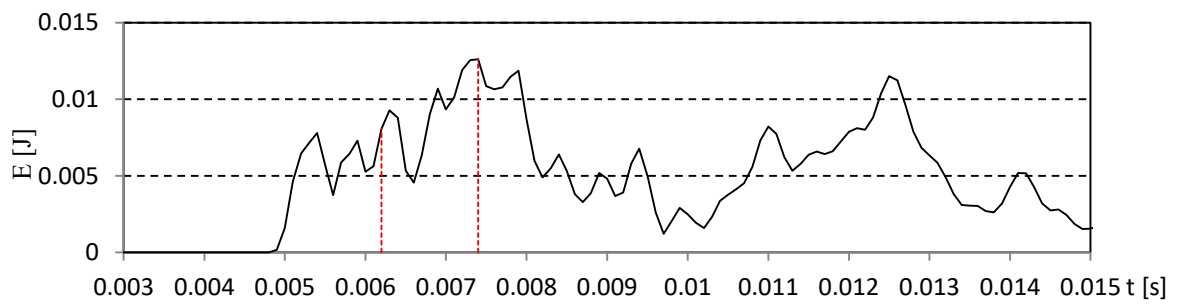
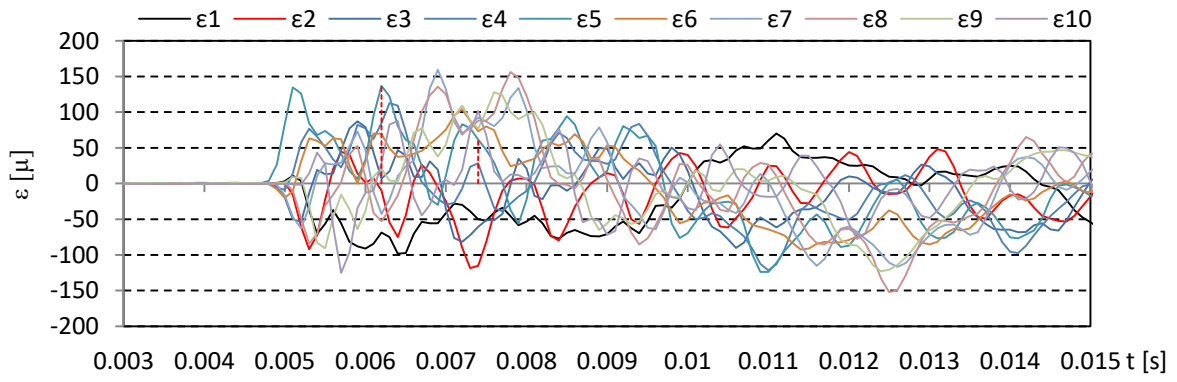


図-4.70 気中衝突試験結果 (TypeD, 衝突高さ 22.5cm, 衝突速度 2.0m/s)

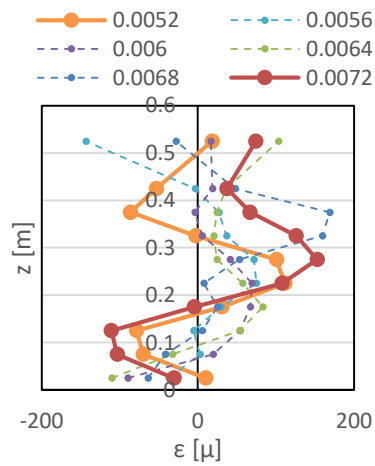
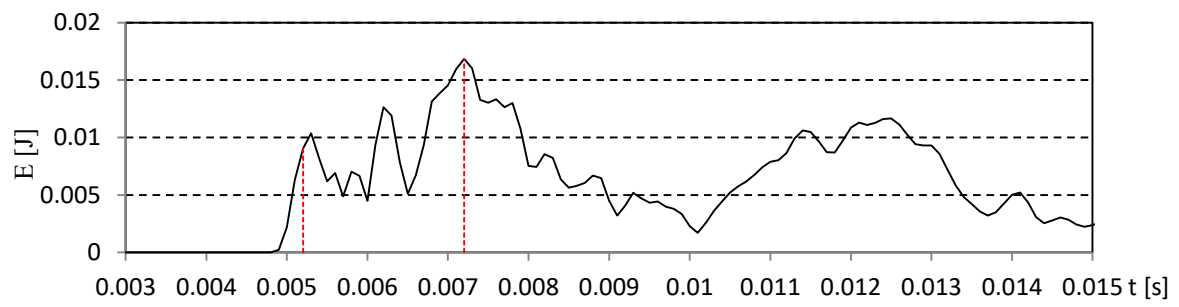
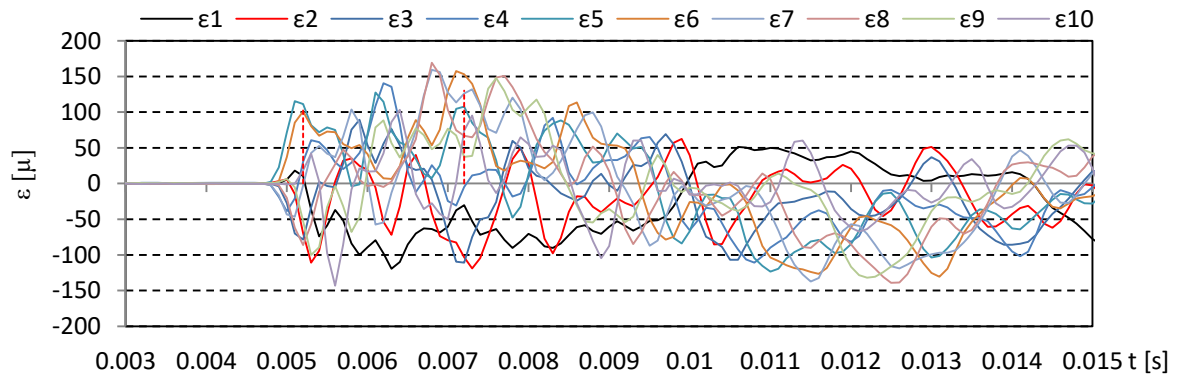


図- 4.71 気中衝突試験結果 (TypeD, 衝突高さ 25.0cm, 衝突速度 2.0m/s)

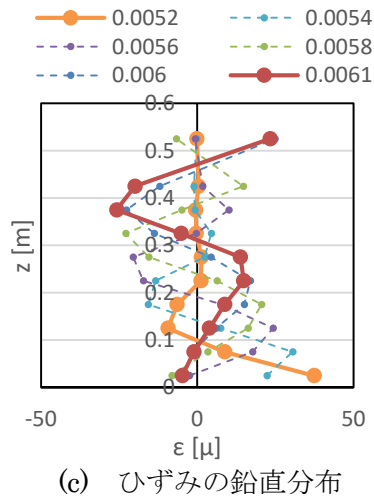
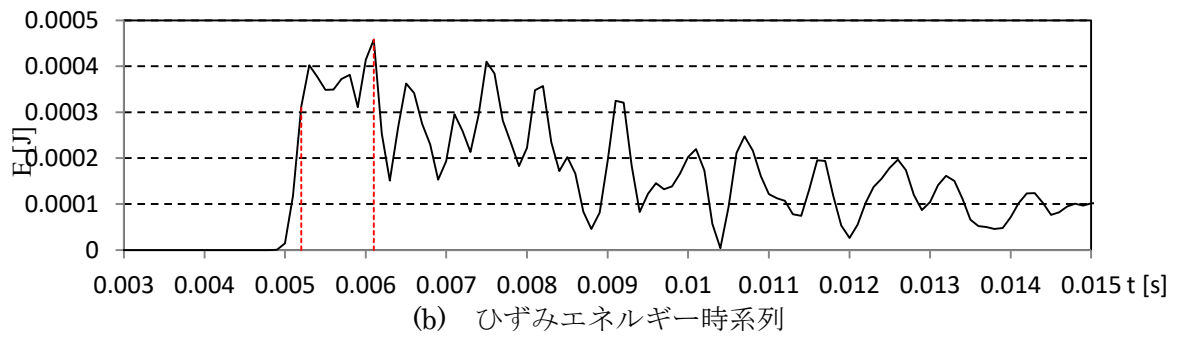
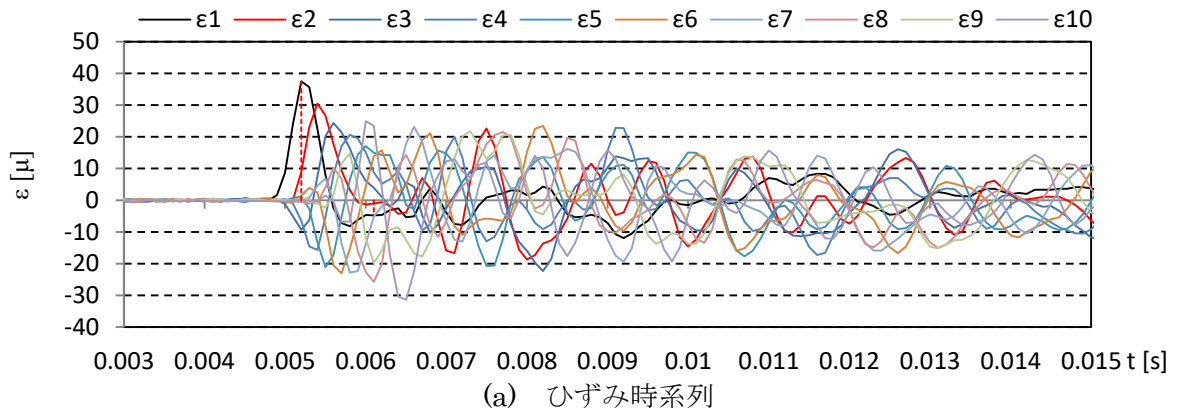


図- 4.72 気中衝突試験結果 (TypeD, 衝突高さ 2.5cm, 衝突速度 1.0m/s)

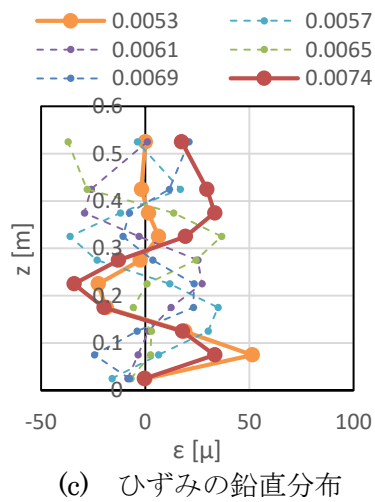
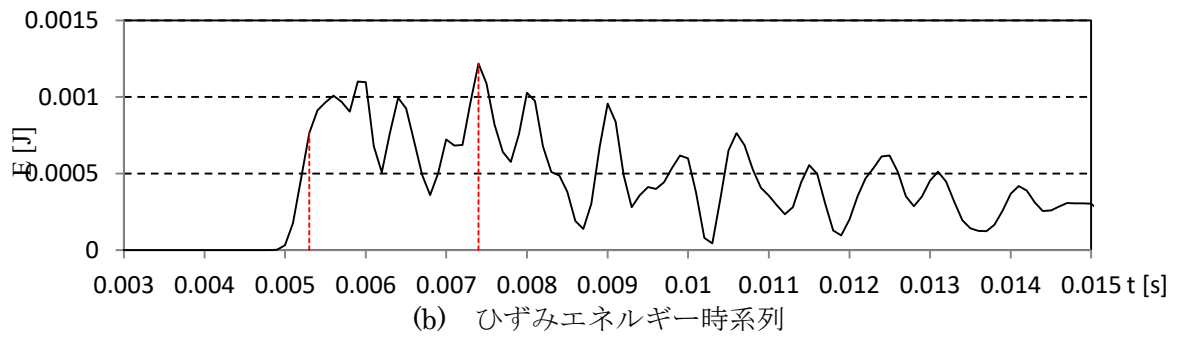
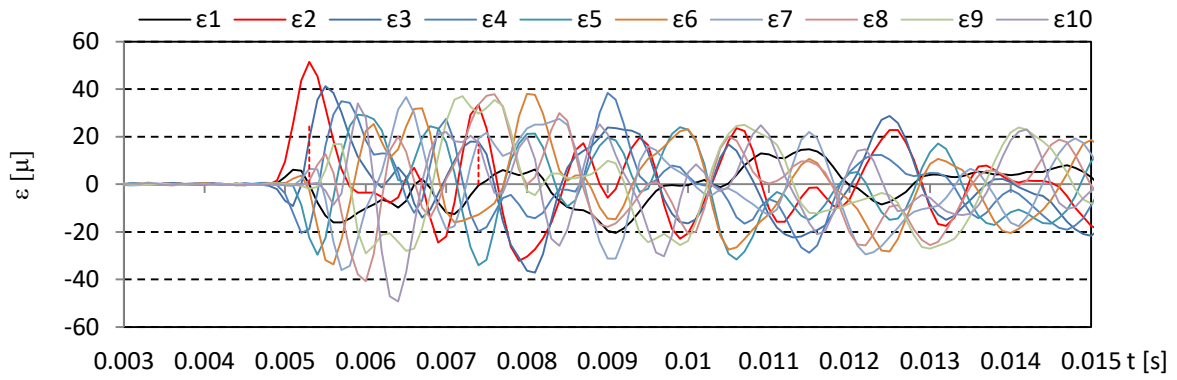
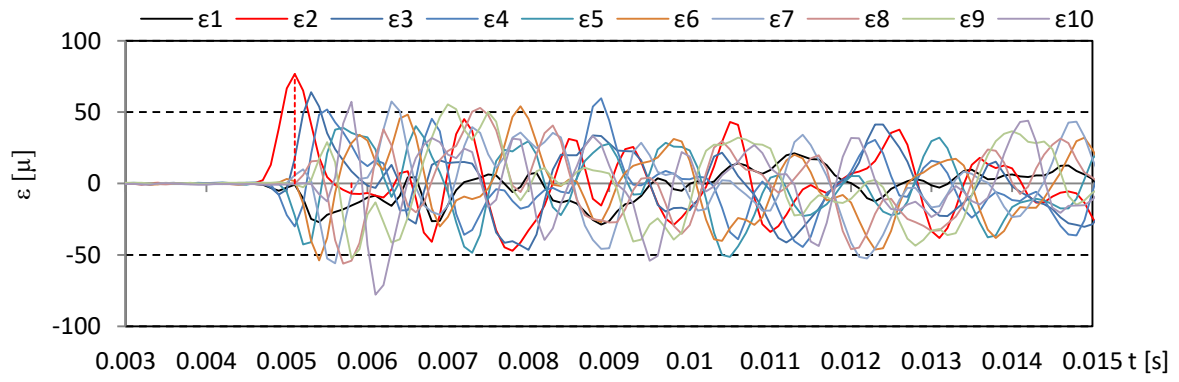
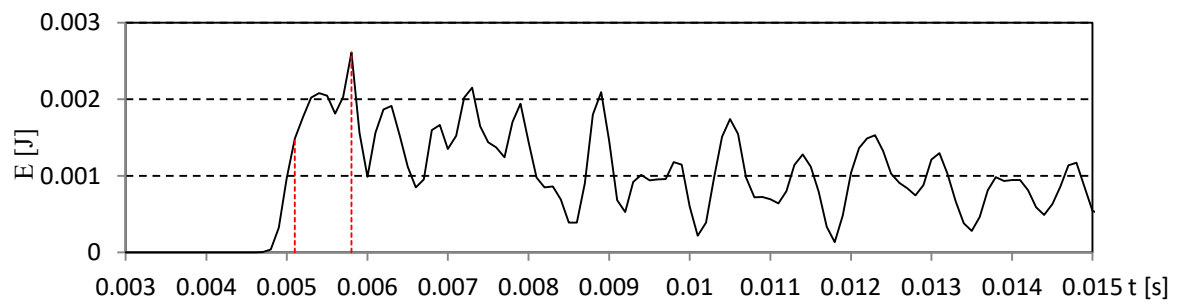


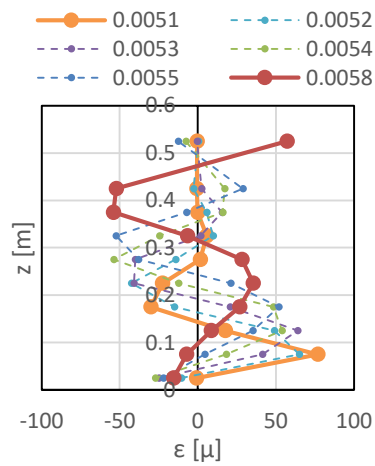
図- 4.73 気中衝突試験結果 (TypeD, 衝突高さ 5.0cm, 衝突速度 1.0m/s)



(a) ひずみ時系列



(b) ひずみエネルギー時系列



(c) ひずみの鉛直分布

図- 4.74 気中衝突試験結果 (TypeD, 衝突高さ 7.5cm, 衝突速度 1.0m/s)

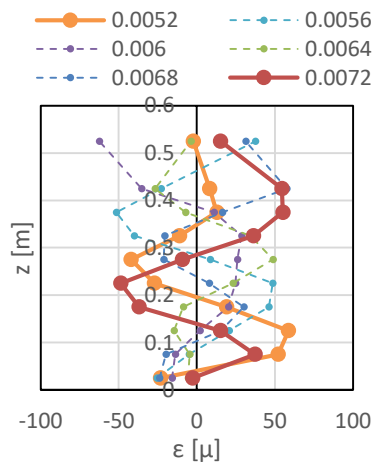
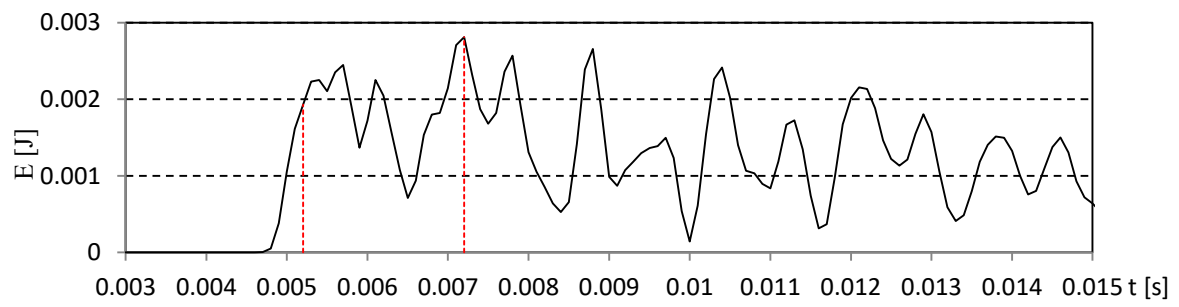
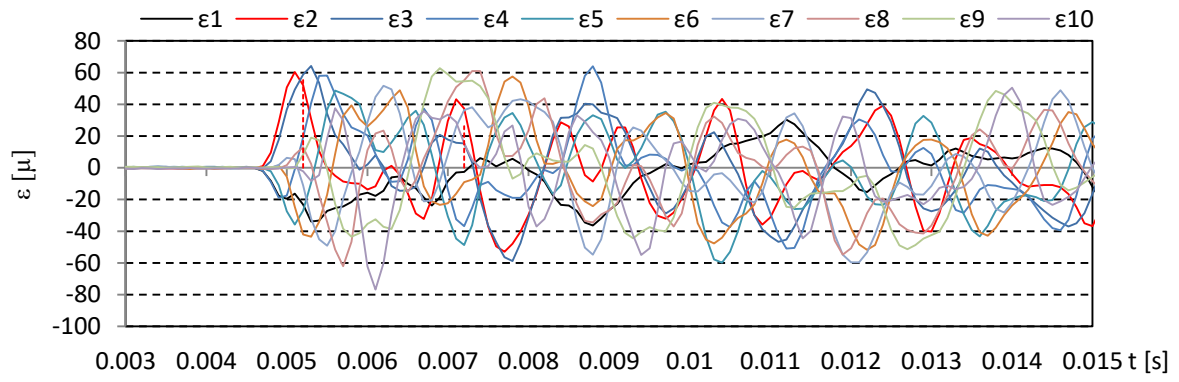


図-4.75 気中衝突試験結果 (TypeD, 衝突高さ 10.0cm, 衝突速度 1.0m/s)

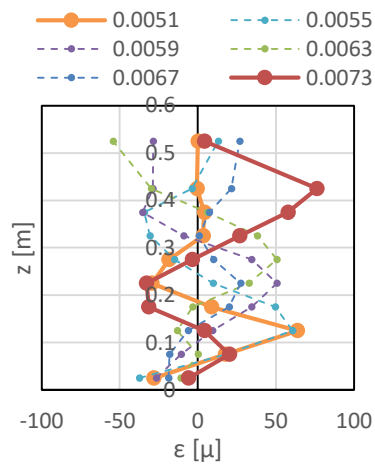
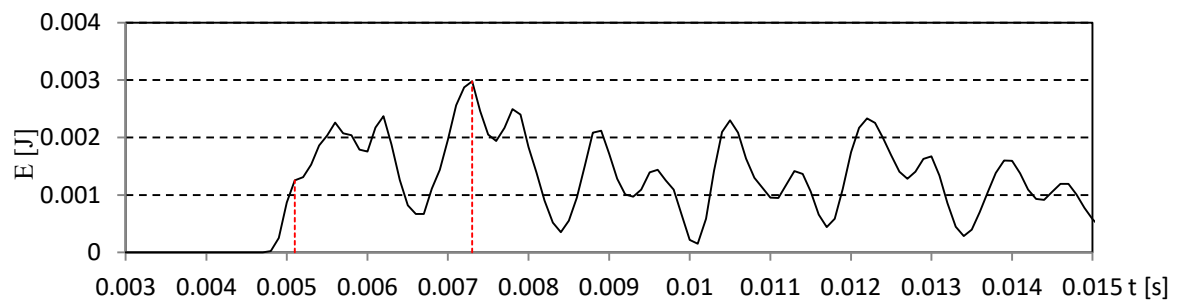
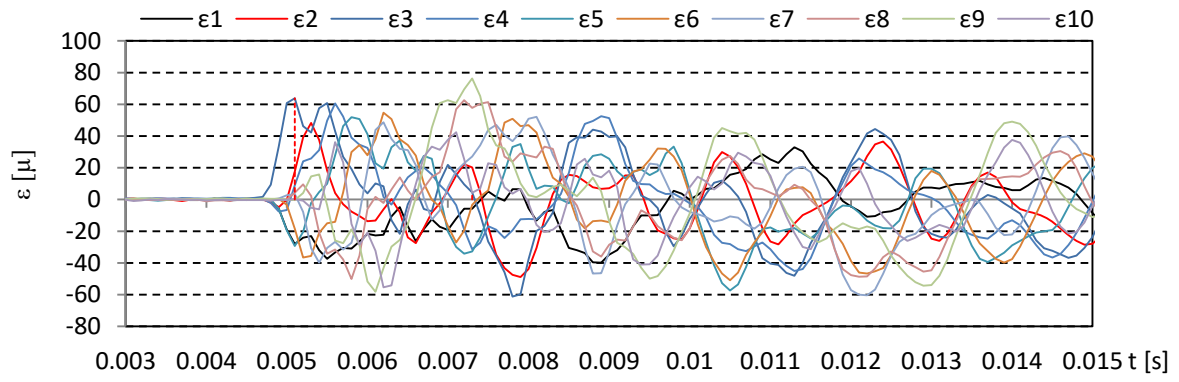


図-4.76 気中衝突試験結果 (TypeD, 衝突高さ 12.5cm, 衝突速度 1.0m/s)

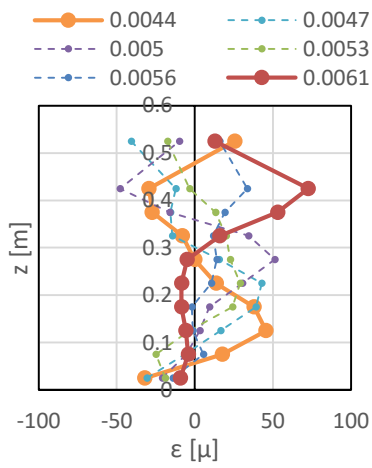
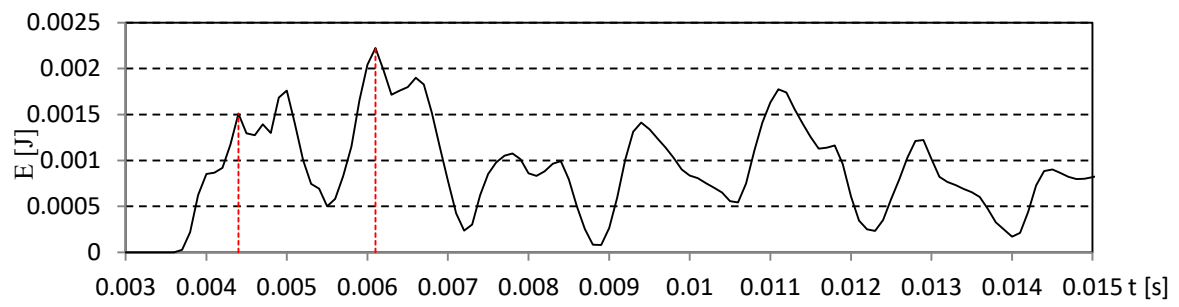
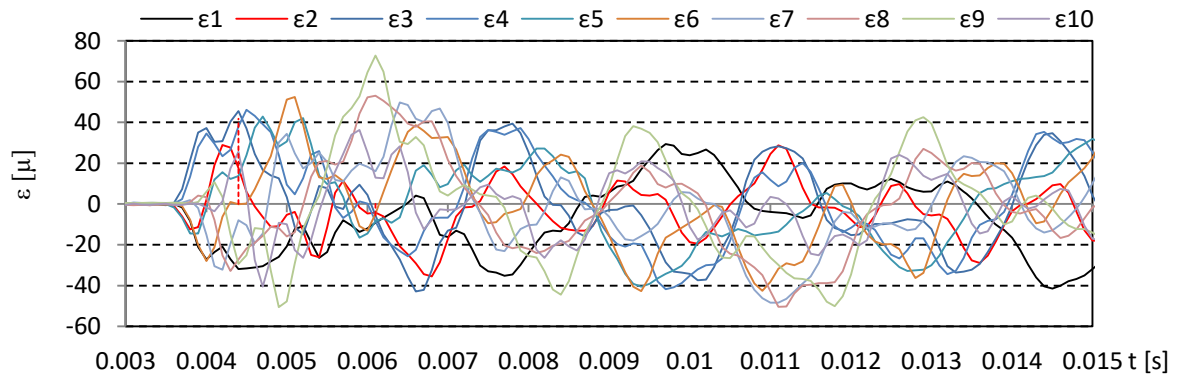
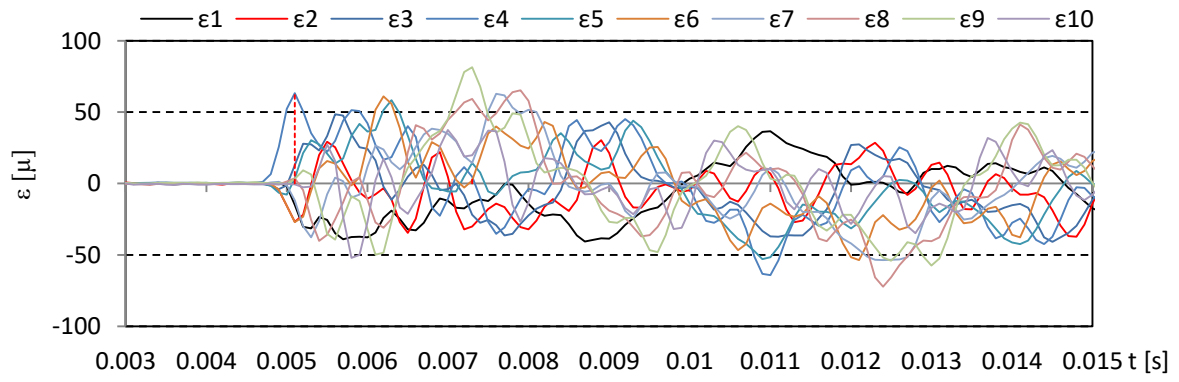
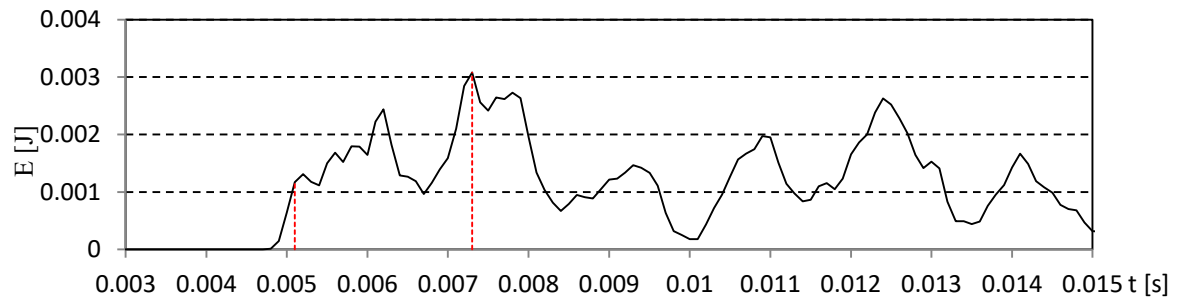


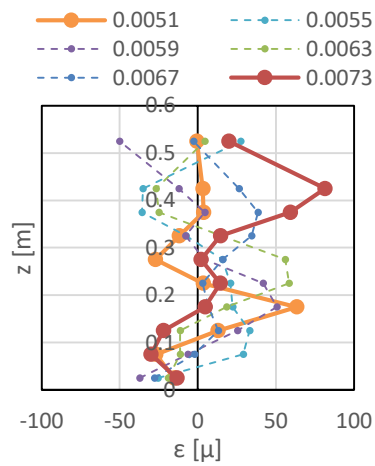
図-4.77 気中衝突試験結果 (TypeD, 衝突高さ 15.0cm, 衝突速度 1.0m/s)



(a) ひずみ時系列

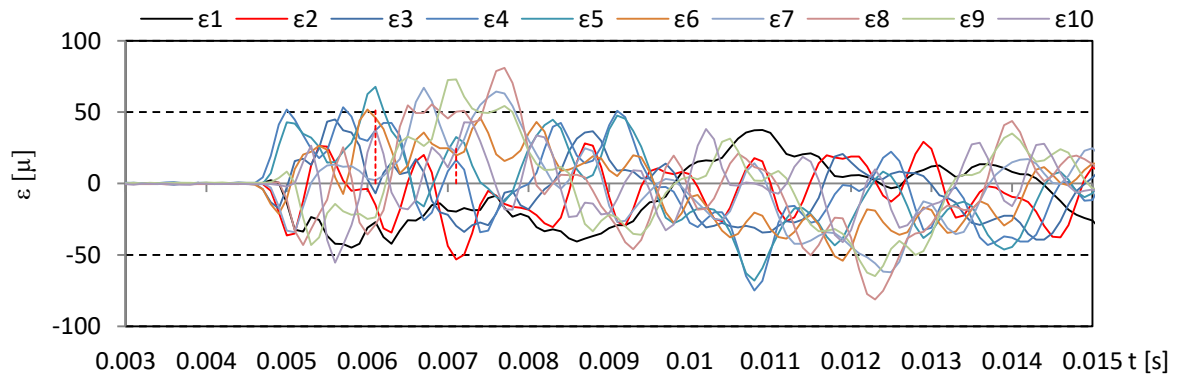


(b) ひずみエネルギー時系列

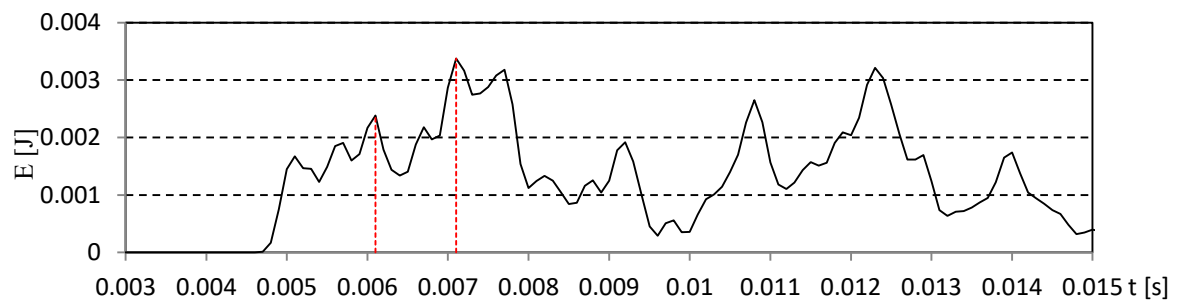


(c) ひずみの鉛直分布

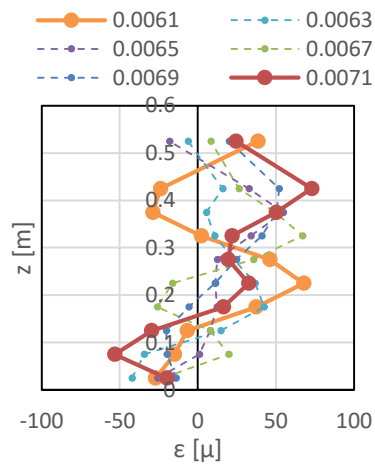
図-4.78 気中衝突試験結果 (TypeD, 衝突高さ 17.5cm, 衝突速度 1.0m/s)



(a) ひずみ時系列

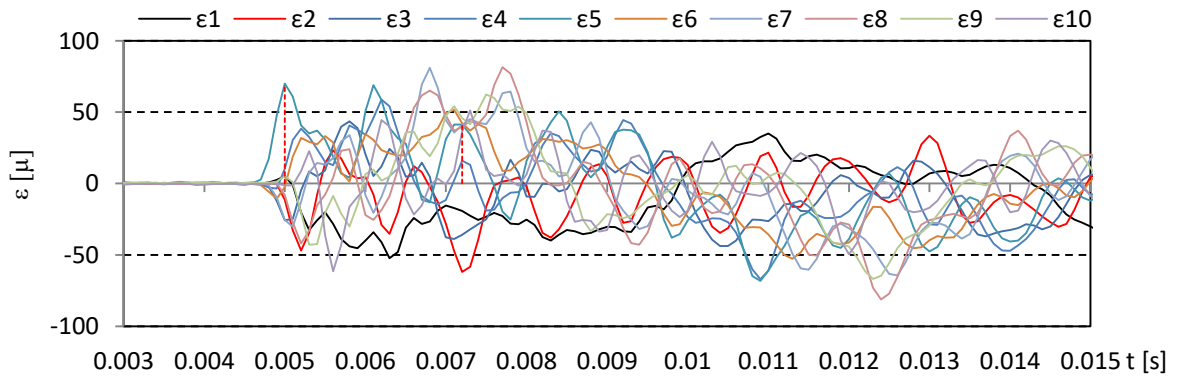


(b) ひずみエネルギー時系列

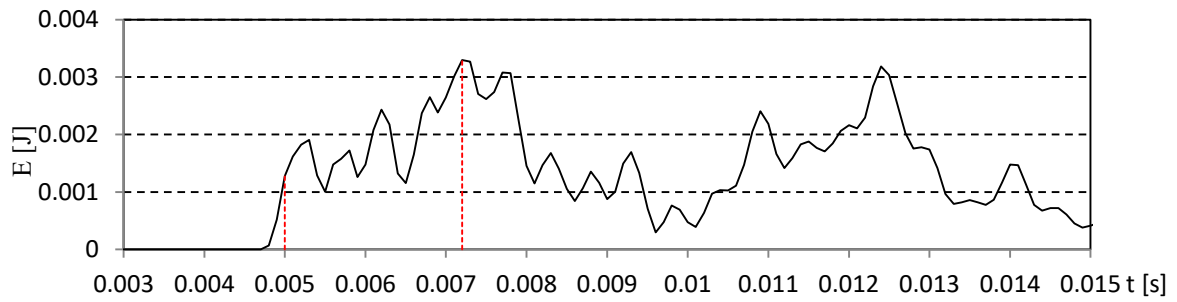


(c) ひずみの鉛直分布

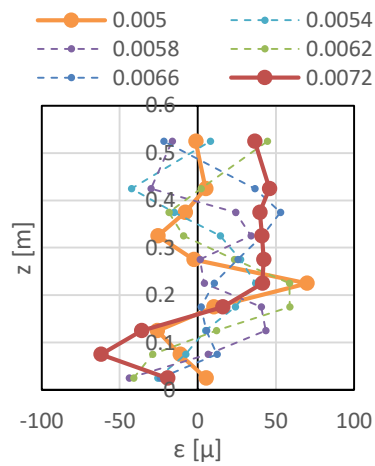
図-4.79 気中衝突試験結果 (TypeD, 衝突高さ 20.0cm, 衝突速度 1.0m/s)



(a) ひずみ時系列



(b) ひずみエネルギー時系列



(c) ひずみの鉛直分布

図-4.80 気中衝突試験結果 (TypeD, 衝突高さ 22.5cm, 衝突速度 1.0m/s)

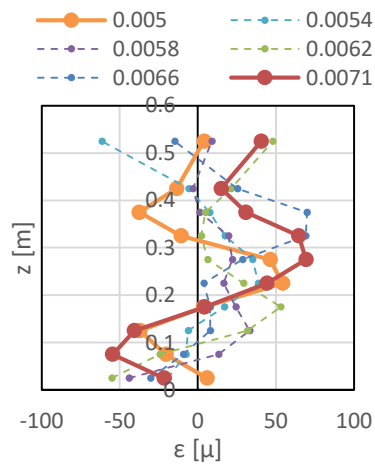
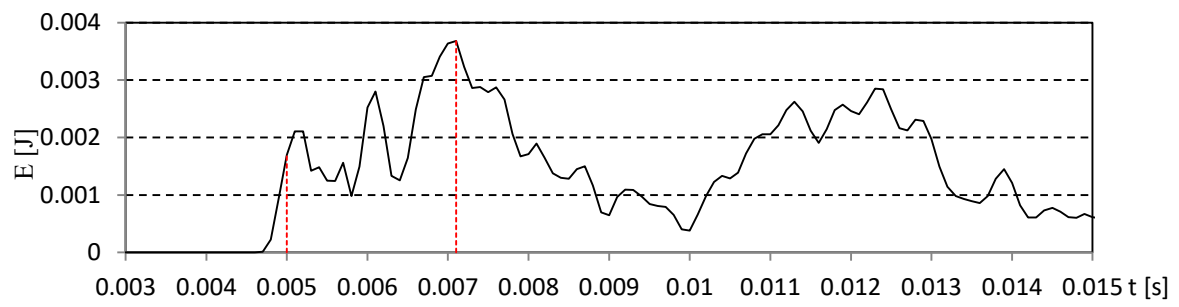
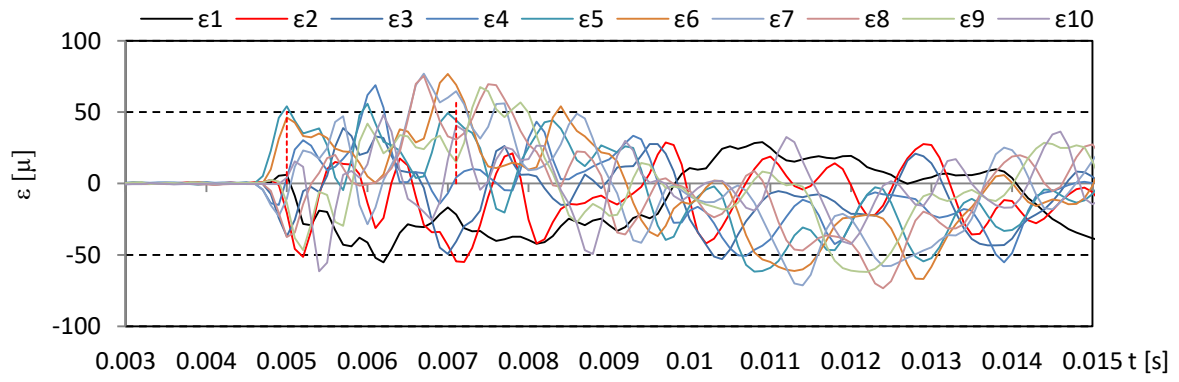


図- 4.81 気中衝突試験結果 (TypeD, 衝突高さ 25.0cm, 衝突速度 1.0m/s)

4.2. 衝突高さ、衝突速度とひずみエネルギー

図-4.82 に、各衝突高さにおける最大ひずみエネルギーの値を示す。なお、各点毎に示したバーは、3回の試験の最大と最小を表す。また図中の破線については、後述する。これによると、各ケースによって異なるが、ある高さより高い位置に衝突した場合は、最大ひずみエネルギーはほぼ一定となり、それよりも低い位置では、衝突高さが低いほど最大ひずみエネルギーが小さくなっている。この閾値となる高さは、質量と剛性のほぼ等しい TypeA と TypeC では、0.125m 程度でほぼ同じであり、質量の小さい TypeD では低く、また剛性の低い TypeB では高くなっている。この閾値は衝突速度によらずほぼ同じであり、速度が 2 倍になると、ひずみエネルギーは概略 4 倍となっている。

低い位置に衝突した場合にひずみエネルギーが小さくなっているのは、堤体底部の固定点に近付くため、衝突に対する堤体の剛性が相対的に大きくなって、漂流物のひずみエネルギーへの変換割合が大きくなったことと、曲げひずみエネルギーに対してせん断ひずみエネルギーに変換される割合が増えたことが要因として考えられる。漂流物衝突時の運動エネルギーは、堤体模型のひずみエネルギーと漂流物自体のひずみエネルギーに分配されることになる。この割合は、両者の剛性や質量（慣性力）により決まると考えられるが、相対的な剛性の高い方がその割合は低くなると考えられるため、堤体の低い位置に衝突した場合には堤体へのエネルギー伝達割合が小さくなっていると推察される。また理論的には、堤体の根元（高さ 0）に衝突した際には曲げひずみエネルギーは生じないで、せん断ひずみエネルギーが卓越することになる。せん断ひずみエネルギーについては模型架台へとエネルギーが伝達してしまうため、本試験模型に設置したひずみゲージでは計測することが出来ない。

表-4.1 には、ひずみエネルギーがほぼ等しくなっている、衝突高さ 0.15m より上の結果を平均した最大ひずみエネルギー E 、および衝突時の衝突速度と漂流物の質量から求めた運動エネルギー W との比 E/W を算出した結果を、表-4.2 には、衝突した瞬間からひずみエネルギーが最大となるまでの時間を示した。また図-4.83 に、衝突速度 V と E/W の関係を示した。ここで E/W は、衝突時の運動エネルギーに対する曲げひずみエネルギーへの伝達率を意味する。TypeA と TypeC は、エネルギー伝達率がほぼ等しく、また衝突速度によらずほぼ一定である。TypeD は、速度が小さいとエネルギー伝達率は減少傾向にあるものの、速度によるエネルギー伝達率の違いは小さい。

TypeA と TypeC に比べると、TypeD のエネルギー伝達率が小さいことが分かる。また剛性の低い TypeB では、衝突速度 2.0m/s では TypeA と TypeC とエネルギー伝達率は同程度だが、衝突速度が小さくなると明確に小さくなっている。これらのことから、漂流物の剛性が堤体に対して相対的に高い場合 (TypeA, TypeC, TypeD)、漂流物の質量と剛性が同じであれば、ひずみエネルギーは衝突速度に因らず、衝突時の運動エネルギーに比例することが分かる。TypeD ではエネルギー伝達率が小さくなっているが、漂流物の衝突エネルギーに比較して、堤体模型の剛性あるいは単位長さ当たりの質量が大きいため、より多くのエネルギーが漂流物のひずみエネルギーに変換されたと考えることが出来る。

一方、漂流物の剛性が相対的に低い場合 (TypeB)、衝突速度が小さくなると、衝突時間が長くなるために漂流物自体のひずみエネルギーへの伝達率の割合が大きくなり、 E/W が小さくなると考えられる。図-4.84 は、前述のひずみエネルギー時系列について、各衝突速度における TypeA

と TypeB の結果を比較したものである。TypeA では、衝突速度が小さいとひずみエネルギーは小さくなるものの、その時系列特性は衝突速度によらず同じであることが分かる。一方 TypeB では、衝突から最大ひずみや最大ひずみエネルギーの発生時間までの時間が長くなっており、また高周波数の振動モードの成分が小さくなっている。このことは、表- 4.2 から読み取れる。ただし、最大エネルギー発生後の自由振動状態では、高次モードの振動成分に違いはあるものの、いずれのケースも同様の時系列特性を示している。このことから、漂流物の剛性が低い場合、衝突速度が大きい場合には剛性の影響は小さいが、衝突速度が小さくなるほど、衝突時間が長くなりエネルギー伝達率が小さくなることが分かる。

TypeB は剛性が低いため、衝突エネルギーの伝達率が低いと考えられるが、表- 4.1 によれば、衝突速度が 2.0 m/s の場合は、TypeA に対して若干小さい程度である。衝突速度が小さくなると明確に伝達率は低下するが、保守的に考えた場合、伝達率に関しては TypeA と同等であると考えるのが適切である。上述したように、伝達率は衝突時間の影響を大きく受けると考えられるが、衝突時間が長くなるのは衝突速度が小さくなる場合であり、最大衝突力を評価する観点では、剛性の影響は考慮しないのが安全側である。なお表- 4.2 よれば、衝突速度は概略堤体の 2 次または 3 次モードの固有周期と同じオーダーであると推察される。実機の堤体を考える場合には、堤体の変形モードを考慮した固有周期により推定することが適当であると考えられるが、これについてはさらに検討する必要がある。

図- 4.85 に、図- 4.82 の横軸 E を、漂流物の衝突速度と質量から算定した運動エネルギー W で無次元化した E/W としたものを示す。 E/W は衝突時に漂流物が保持していたエネルギーに対する、堤体に伝わるエネルギーの割合を意味する。これによれば、各ケースにおいてエネルギー伝達率の鉛直分布が相似形で表されることが分かる。そこでここでは、 E/W を以下により近似する。

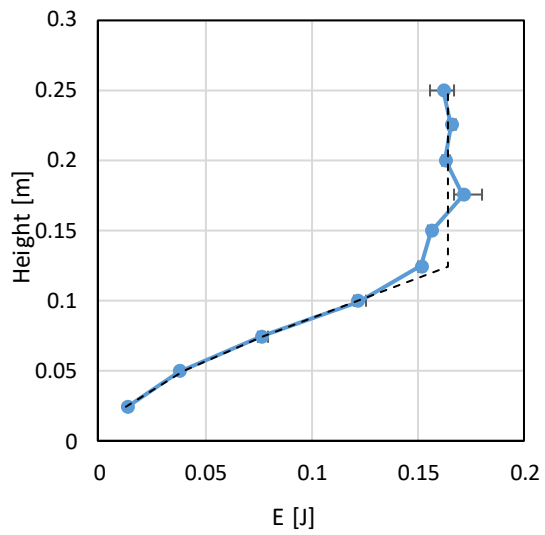
$$E/W = \xi \alpha$$

ここで、 α : 漂流物と堤体の剛性や質量により決まるエネルギー伝達係数 (表- 4.1 の E/W)、 ξ : E/W の高さ方向の分布を表す関数である。 α は、図- 4.83 に示した線形補間により求められるものとし、 ξ は図- 4.85 に破線で示す以下の式とした。

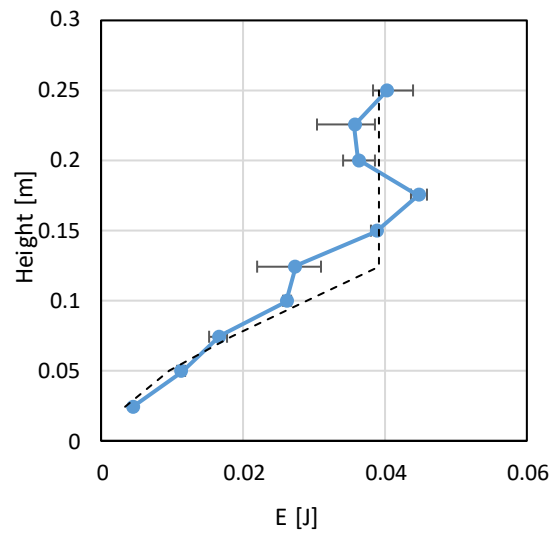
$$\xi = \min(ah^n, 1)$$

ここで、 h : 衝突高さであり、各ケースにおける a, n の値を表- 4.3 に示す。なお本式は、後述の水中衝突試験において気中衝突試験の結果との比較に用いるため、試験結果を近似出来る関数として定めたものであり物理的な根拠に基づくものではない。また試験装置の物性等によって異なるため、汎用性はない。図- 4.82 にも破線で、本式による算定値を示した。

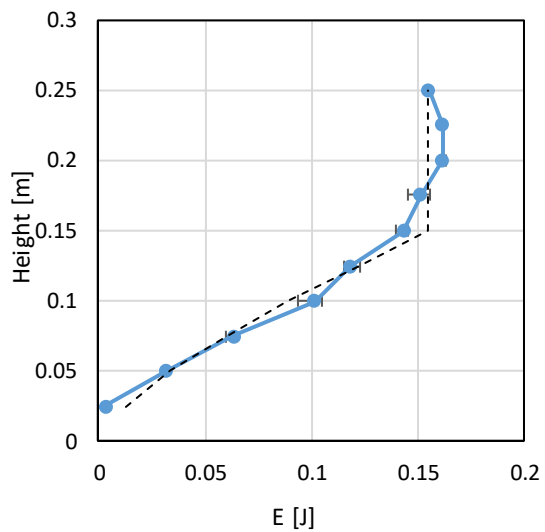
上式によれば、衝突高さがある閾値より下では E/W が小さくなるが、これは上述したように、試験装置が曲げひずみエネルギーを計測するものであり、せん断ひずみエネルギーが計測出来ないことが主な要因と想定される。したがって実際のエネルギー伝達率は、これほど小さくはならず、保守的に考えると、高さ方向に α でほぼ一定とするのが妥当である。



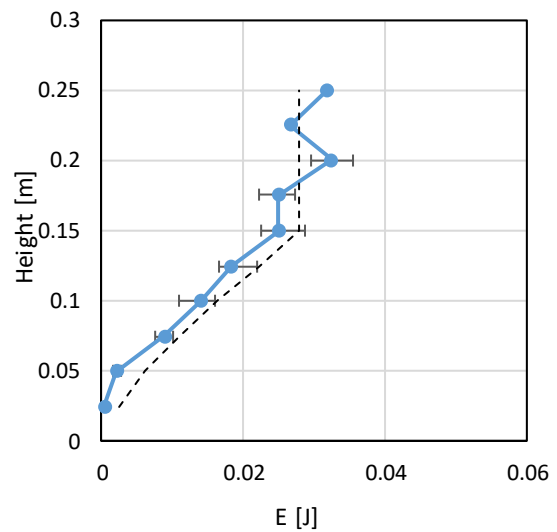
(a) TypeA, 衝突速度 2.0m/s



(b) TypeA, 衝突速度 1.0m/s

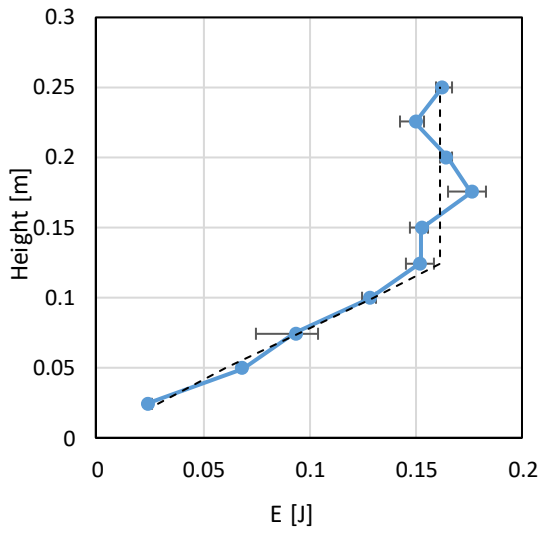


(c) TypeB, 衝突速度 2.0m/s

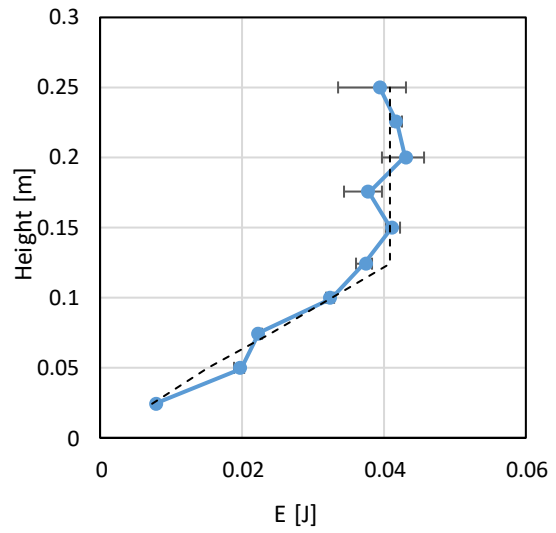


(d) TypeB, 衝突速度 1.0m/s

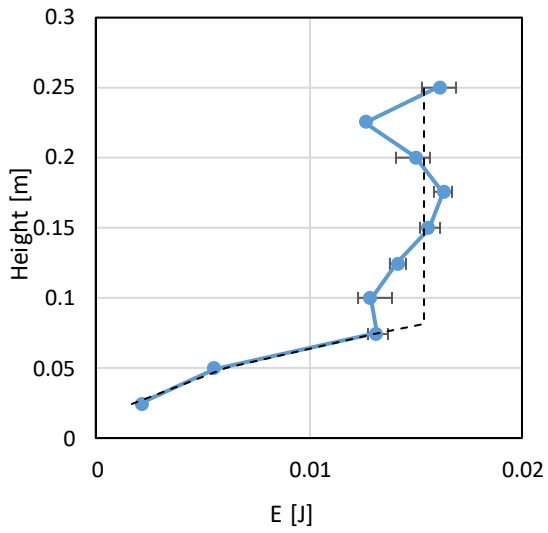
図- 4.82 衝突高さとしずみエネルギーの関係(1/2)



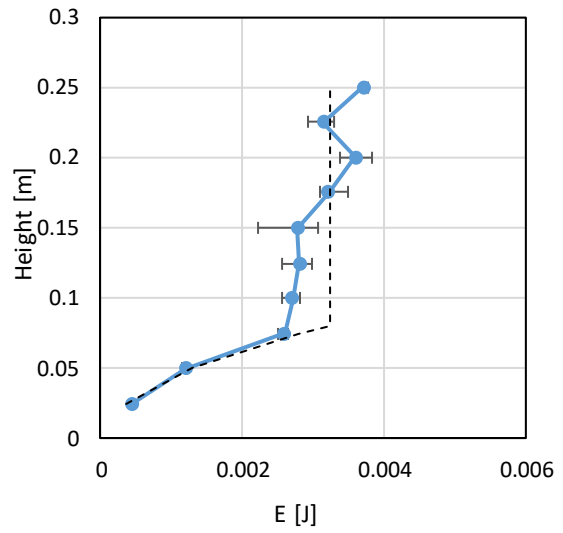
(e) TypeC, 衝突速度 2.0m/s



(f) TypeC, 衝突速度 1.0m/s



(g) TypeD, 衝突速度 2.0m/s



(h) TypeD, 衝突速度 1.0m/s

図- 4.82 衝突高さといずみエネルギーの関係(2/2)

表- 4.1 気中衝突時の運動エネルギーとひずみエネルギー

	質量 [g]	速度 [m/s]	W [J]	E [J]	E/W
TypeA	149	2.0	0.292	0.164	0.56
		1.0	0.073	0.039	0.54
TypeB	153	2.0	0.300	0.154	0.51
		1.0	0.075	0.028	0.37
TypeC	152	2.0	0.298	0.161	0.54
		1.0	0.074	0.041	0.54
TypeD	29	2.0	0.057	0.015	0.27
		1.0	0.014	0.003	0.23

表- 4.2 衝突時間（ひずみエネルギー最大となるまでの時間）

	速度 [m/s]	Δt [s]
TypeA	2.0	0.0028
	1.0	0.0027
TypeB	2.0	0.0030
	1.0	0.0044
TypeC	2.0	0.0028
	1.0	0.0027
TypeD	2.0	0.0023
	1.0	0.0019

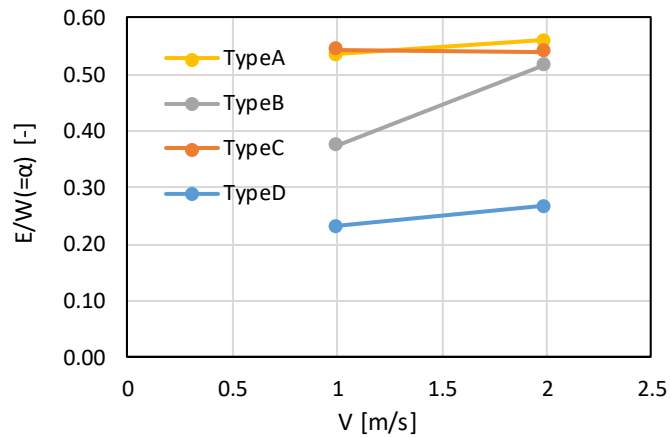
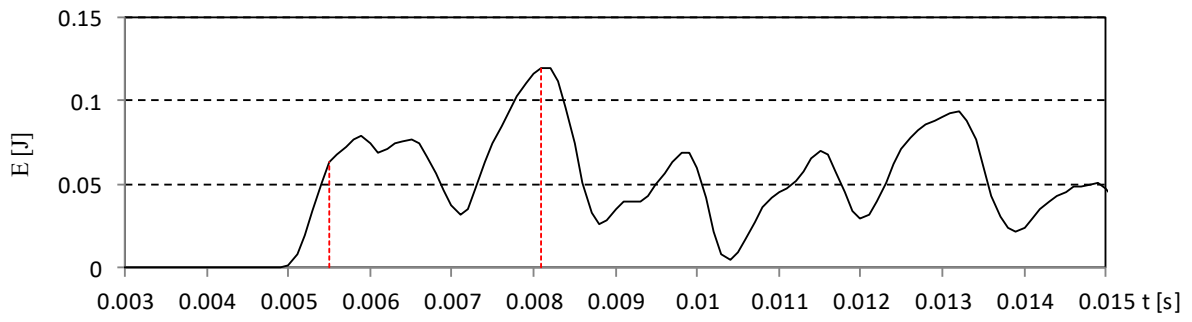
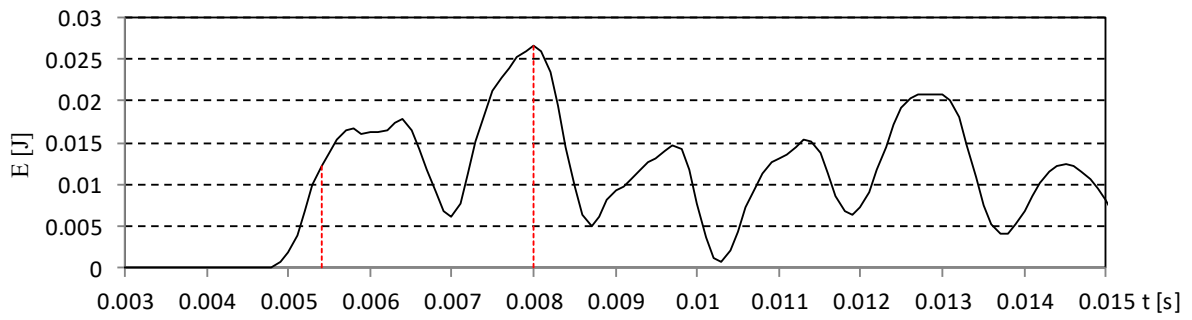


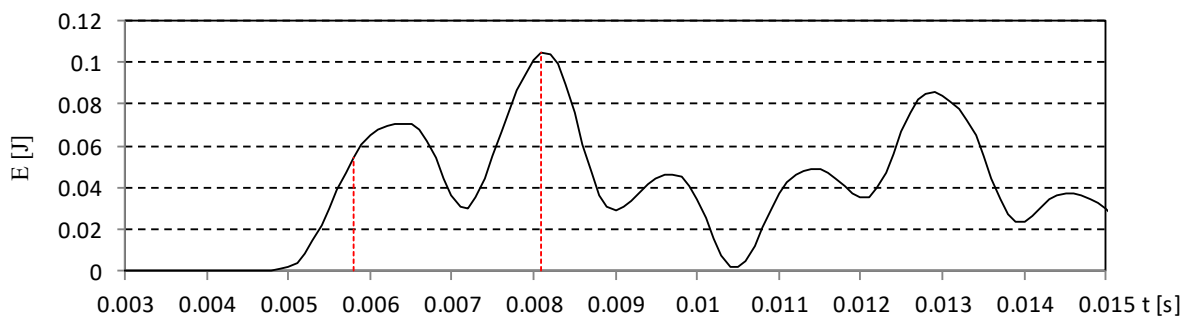
図- 4.83 衝突速度とエネルギー伝達率



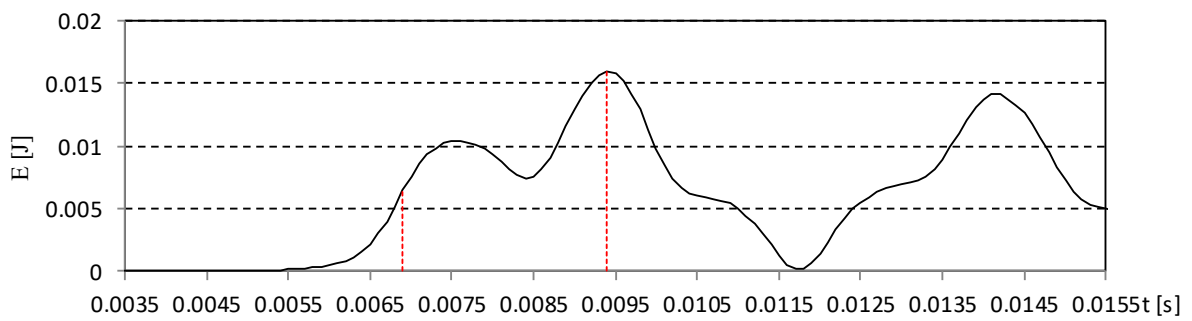
(a)TypeA V=2.0 m/s



(b)TypeA V=1.0 m/s

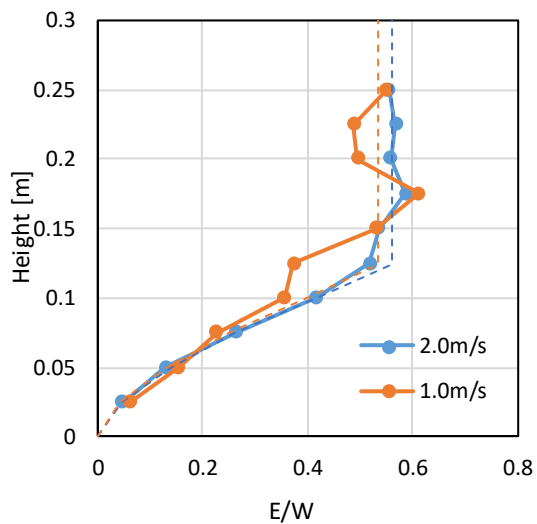


(c)TypeB V=2.0 m/s

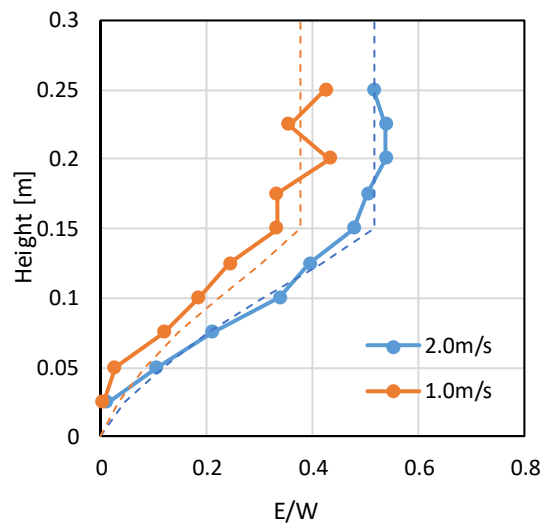


(d)TypeB V=1.0 m/s

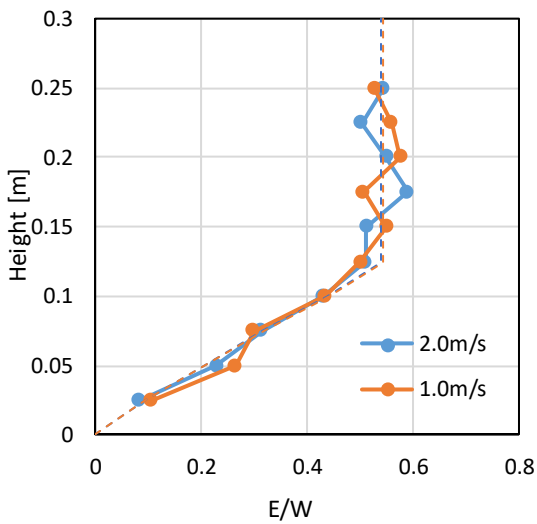
図- 4.84 ひずみエネルギーの時系列比較 (衝突高さ 10 cm)



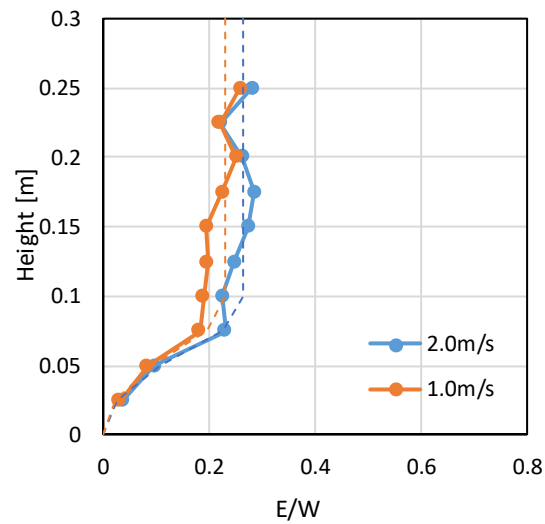
(a) TypeA



(b) TypeB



(c) TypeC



(d) TypeD

図- 4.85 衝突高さとエネルギー伝達率の関係

表- 4.3 衝突エネルギーの鉛直分布関数の係数一覧

	TypeA	TypeB	TypeC	TypeD
n	1.6	1.4	1.1	1.9
a	29.53	14.85	10.18	117.87

5. 水中衝突試験結果

5.1. 水位と波圧の時系列

図- 5.1.1～図- 5.1.4 に，堤体前面の水位，流速と波圧の計測時系列結果，および波圧の積分により求めた波力の時系列結果を示す．圧力計測は，漂流物衝突の影響を受けていないと考えられる，漂流物の衝突位置に対して水路横断方向に離れた位置で計測している．またこれらの値は，繰り返しを含めた各ケースではほぼ同じ時系列となるため，ここでは代表として漂流物 TypeA，漂流物初期位置 0.1m の結果のうち，1 回目の計測結果を示した．

表- 5.1.1 は，各波ケースにおける堤体前面流速（計測点 C）の最大値をまとめたものである．ただし，漂流物 TypeA，漂流物初期位置 0.1m のケースの，15 回繰り返し計測の平均を示した．波検定試験の結果と比較すると，水面付近で計測した沖側の流速よりは大きいものの，汀線に侵入してくる際の波速よりは小さくなっている．一方，堤体前面の動画の観察によれば，遡上の初期段階では，遡上速度と（気泡の移動速度から推定される）流速は，概略一致していることが確認出来る．遡上した津波の先端部分では，遡上速度と流速は概略一致し，また段波状態で浸入していることから遡上速度と波速は概略一致すると考えられるが，計測された流速は波速よりも小さくなっている．これは，遡上の先端部は波速と同程度の速度で遡上しているが，段波状態で気泡を含んでいるため，プロペラ流速計が十分に反応していないことが要因として考えられる．

波圧の時系列では，We10 のみ周期特性が短いために準定常的な持続波圧が生じていないが，これを除くと，津波衝突時の衝撃的な段波波圧とそれに続く持続波圧のピークが明瞭に現れている．一方，波力の時系列では，段波波圧による衝撃力が持続波圧により波力に比べて小さいため，明瞭なピークとしては表れていない．本試験で採用した波形では，段波の規模が比較的小さいため，津波衝突時の水深が小さく，波圧としては大きいですが，波力としては相対的に小さくなって，持続波圧が支配的となっている．

表- 5.1.1 堤体前面の最大流速

波ケース	We10	We20	We30	We40
最大流速	1.57 m/s	1.37 m/s	1.36 m/s	1.37 m/s

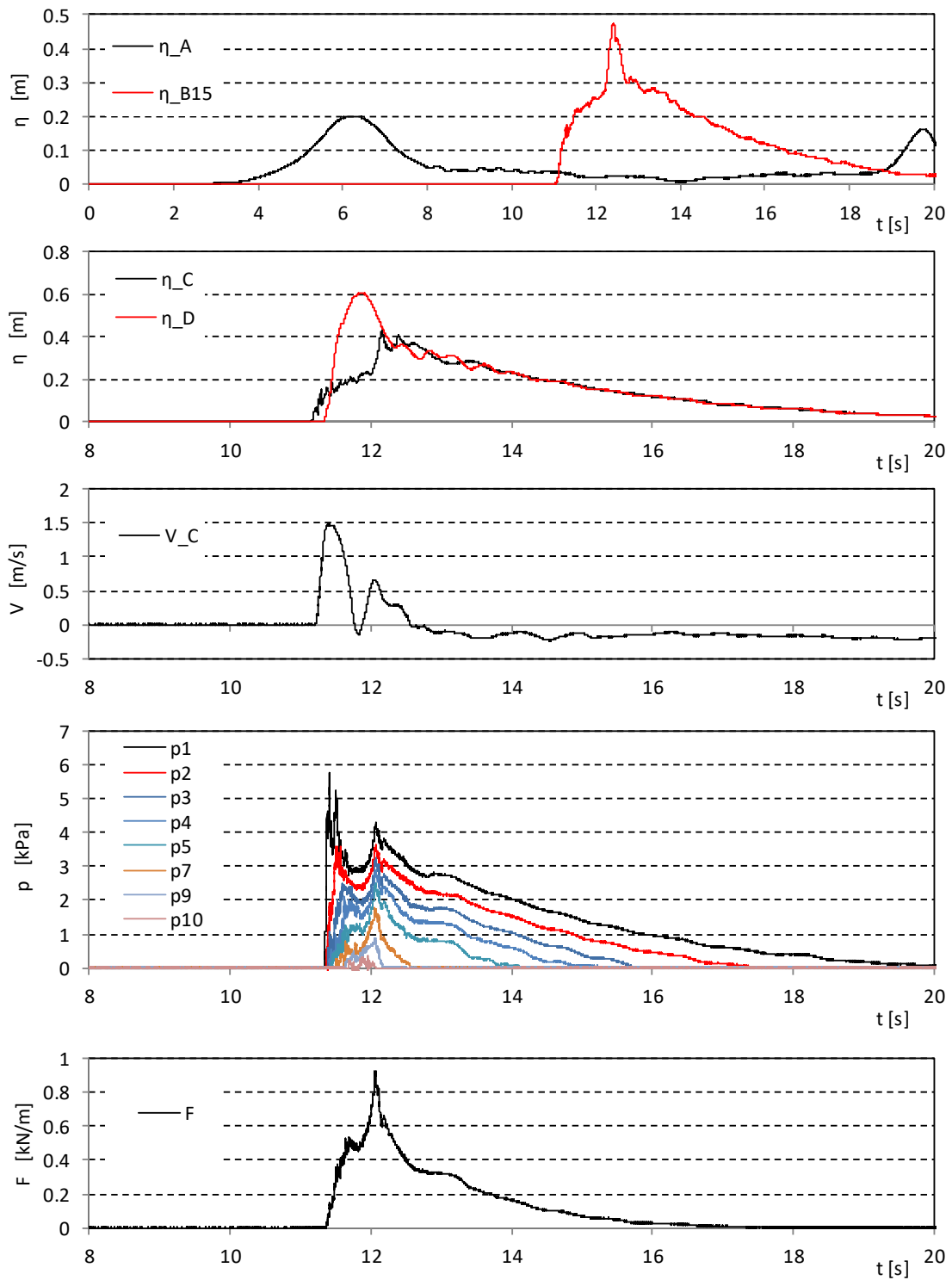


図- 5.1.1 水位，流速と波圧の計測結果 (We10)

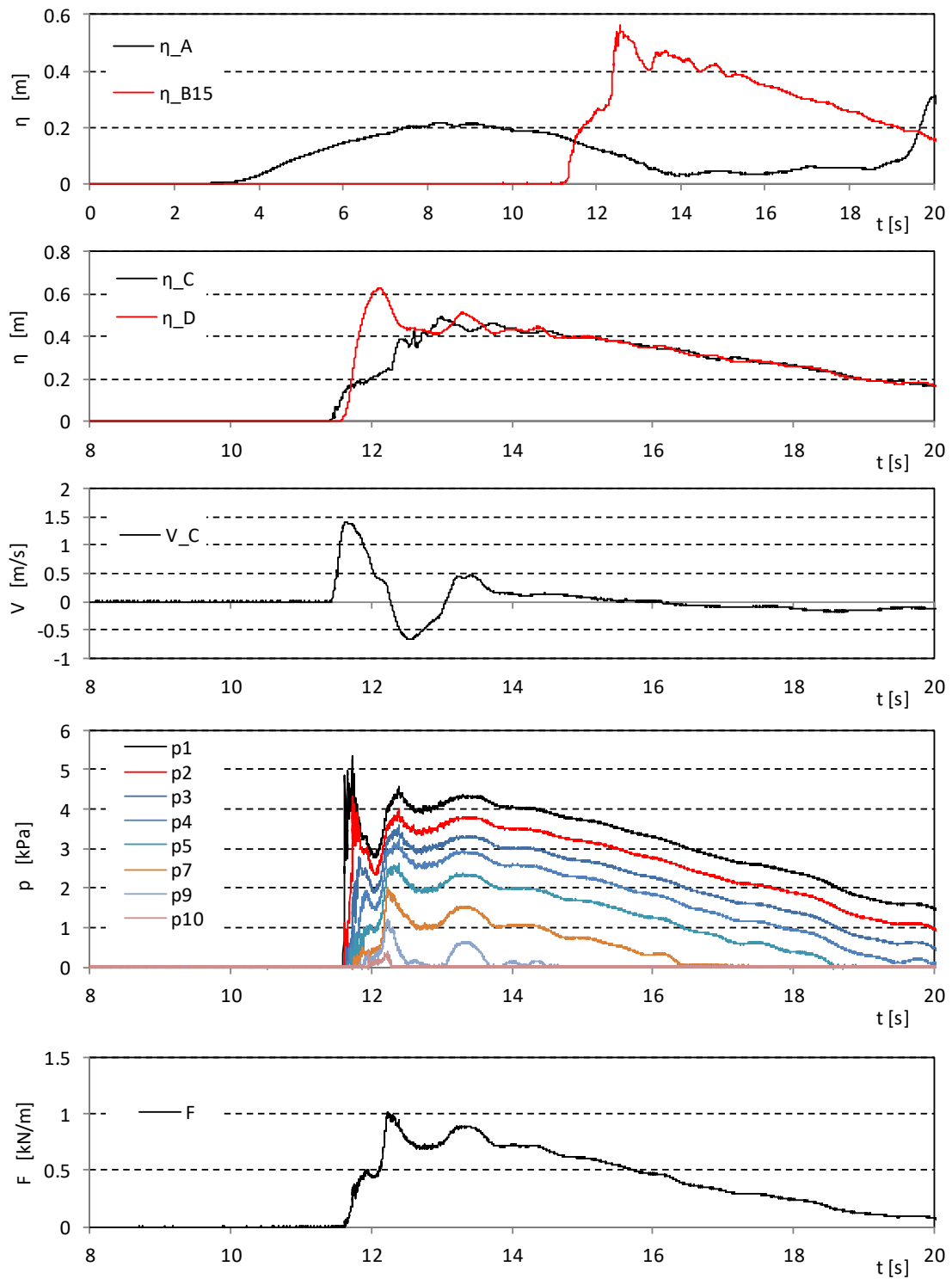


図- 5.1.2 水位，流速と波圧の計測結果（We20）

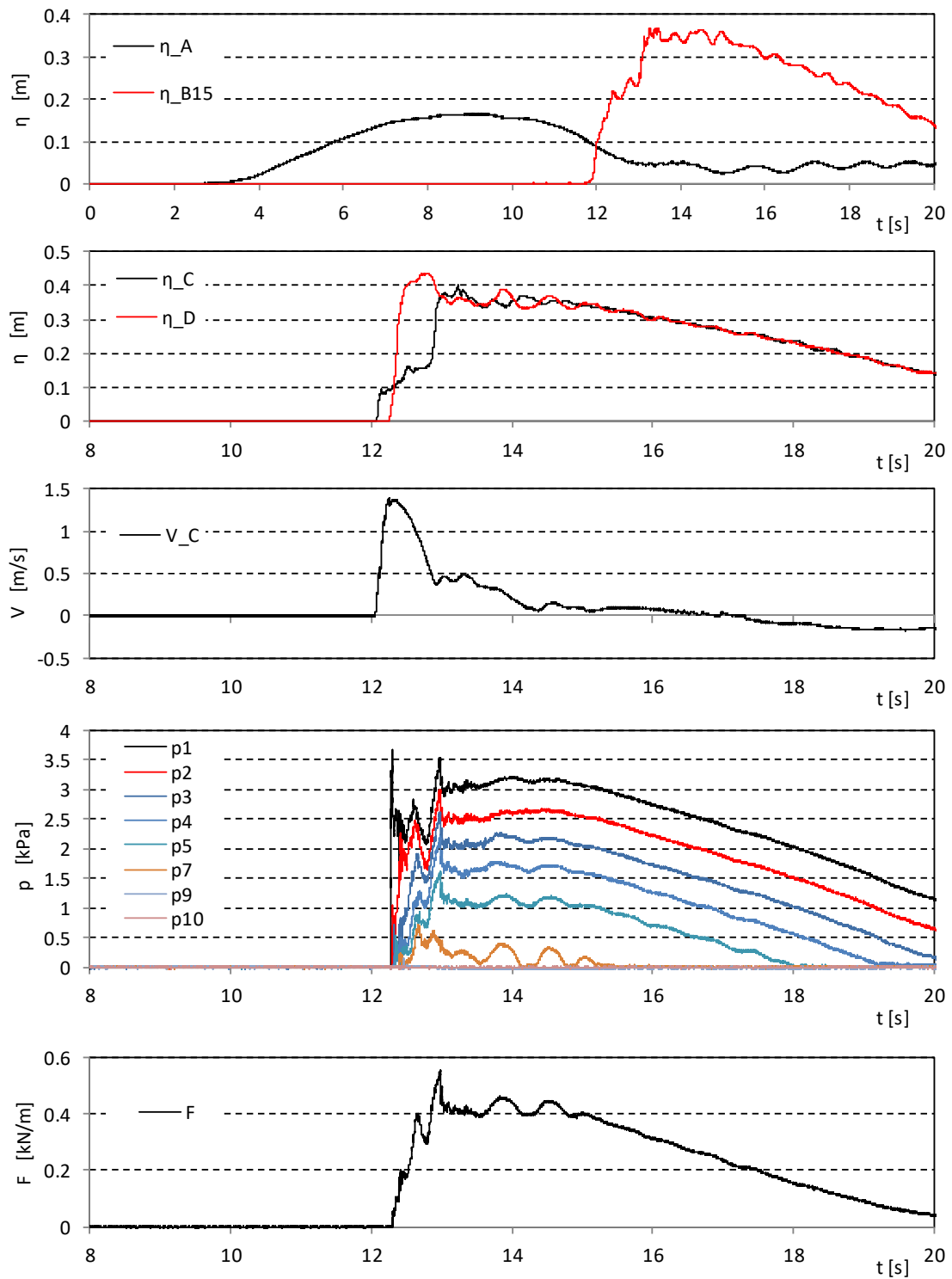


図- 5.1.3 水位，流速と波圧の計測結果 (We30)

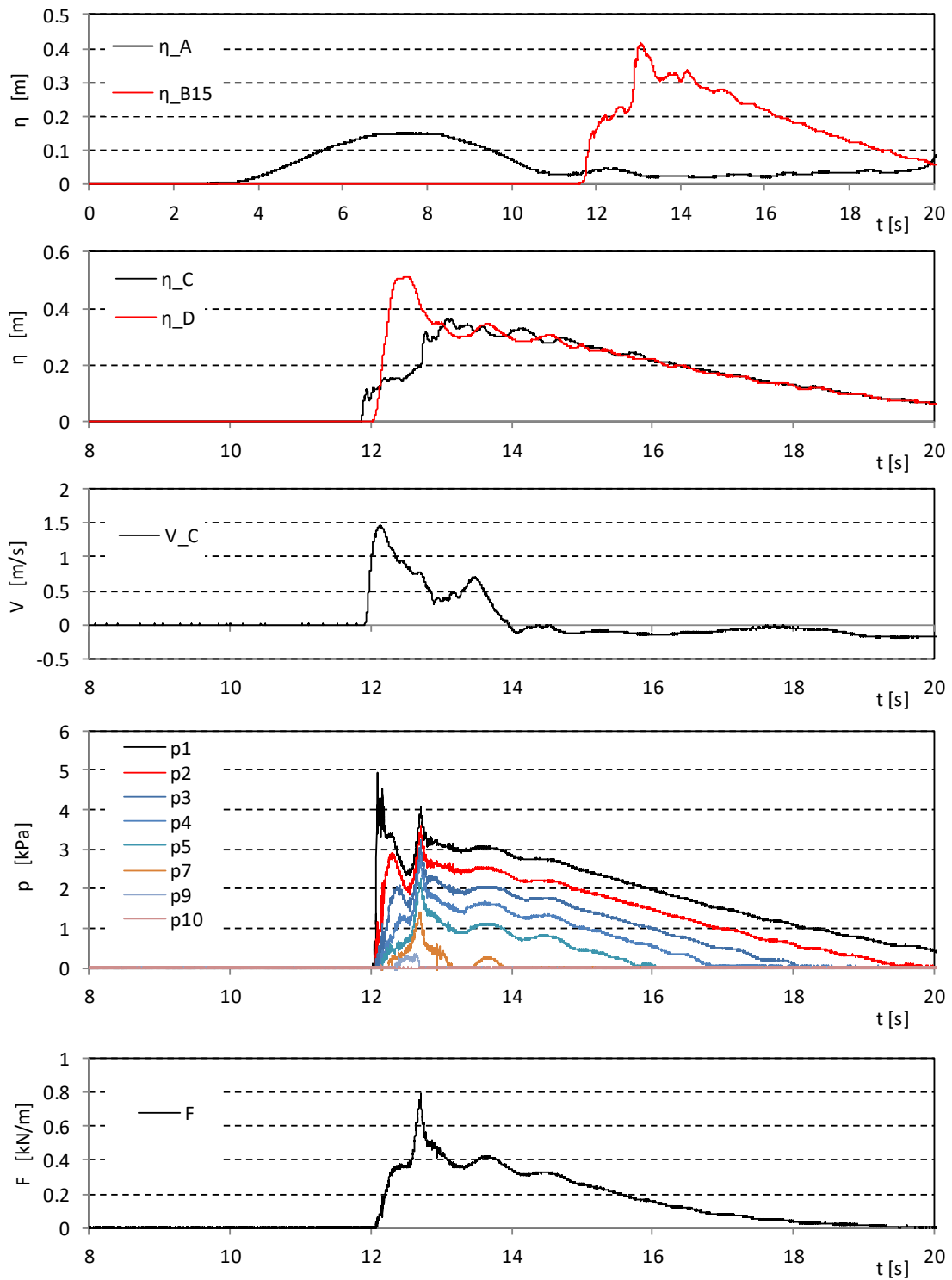


図- 5.1.4 水位，流速と波圧の計測結果 (We40)

5.2. ひずみの時系列と衝突判定

表- 5.2.1 に、衝突の有無について、結果の一覧を示す。衝突の有無は、ひずみゲージの計測結果に顕著な衝突の影響が表れているかどうか（具体的には、 5μ 以上の短周期の振動の有無）により判定した。漂流物の衝突が確認されたケースを○、非衝突のケースを×で示している。また、各ケースでひずみエネルギーが最も大きくなった試行回のひずみの時系列計測結果を、図- 5.2.1～図- 5.2.50 に示す。ただし、衝突が確認出来なかったケースについては、試行 1 回目の結果を示した。

図中の負値として徐々に増加するひずみ成分は、津波波圧の影響によるものである。この立ち上がり部分（遡上波の先端部分にあたる）に、漂流物が衝突したことによる短周期の振動成分が生じていることが分かる。津波波圧により生じるひずみはすべて負の値となることから、正のひずみは漂流物の衝突により生じたものと判断できる。なお、衝突していない列の板にも短周期の振動が生じているが、これは振動が架台を通して他の板に伝播していることと、板がひずむことにより局所的な動水圧が生じ、これにより他の板もひずんでいることが要因として考えられる。ただしこのひずみは、衝突した板の振動に対して時間的に遅れて発生し、またエネルギーとしては相対的に十分小さいため、衝突エネルギーの評価に対しては影響を無視できる程度に小さい。

漂流物の衝突が確認出来るケースでは、衝突は津波到達から概略 0.1～0.2s 後に生じている。このことから、津波波形の先端部分に連行するように漂流物が移動した場合には衝突が発生するが、先端部分に対して漂流が遅れると顕著な衝突が生じないことが分かる。漂流物が津波先端部分に遅れて波に連行される場合、津波波形の先端部分が先行して堤体に到達し、漂流物が近接する時には堤体前面の水位が上昇あるいは反射波が生じているため、この水塊あるいは反射波の影響により漂流物の衝突が抑制されると考えられる。

表- 5.2.1 漂流物の衝突頻度

(a) TypeA

波形	Type	初期位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	衝突回数	衝突頻度	
We10	A	0.1	○	○	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	13	87%	
We10	A	0.5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	×	13	87%	
We10	A	1	○	○	○	○	×	×	×	×	×	○	○	○	×	○	×	8	53%	
We10	A	2	×	○	○	○	○	○	○	×	×	○	×	○	○	○	×	10	67%	
We10	A	2.5	×	○	×	○	×	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	4	27%	
We10	A	3	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	2	13%	
We10	A	3.5	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	0	0%	
We20	A	0.1	○	○	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	11	73%
We20	A	0.5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15	100%
We20	A	1	×	○	○	×	×	○	○	○	×	○	○	○	○	×	○	○	10	67%
We20	A	2	○	×	○	×	×	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	4	27%	
We20	A	3	○	×	×	×	○	○	○	○	×	×	×	○	×	×	○	7	47%	
We20	A	3.5	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	0	0%	
We30	A	0.1	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	14	93%
We30	A	0.5	○	○	○	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	12	80%
We30	A	1	○	○	×	×	×	○	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	10	67%
We30	A	1.5	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	2	13%	
We30	A	2	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	0	0%	
We40	A	0.1	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14	93%
We40	A	0.5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	14	93%
We40	A	1	○	○	×	○	×	○	○	×	○	×	○	×	○	×	○	○	9	60%
We40	A	2	×	×	×	×	×	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	2	13%	
We40	A	2.5	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	0	0%	

(b) TypeB

波形	Type	初期位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	衝突回数	衝突頻度
We10	B	0.5	×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	○	×	10	67%
We20	B	0.5	×	○	×	×	○	×	○	○	×	○	○	○	○	○	○	10	67%
We30	B	0.5	×	×	○	○	×	○	○	○	×	○	×	○	○	○	×	9	60%
We40	B	0.5	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	×	○	○	×	12	80%

表- 5.2.1 漂流物の衝突頻度 (つづき)

(c) TypeC

波形	Type	初期位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	衝突回数	衝突頻度
We20	C	0.1	○	○	×	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	13	87%
We20	C	0.5	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	13	87%
We20	C	1	○	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	12	80%
We20	C	2	×	×	×	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	2	13%
We20	C	3	○	×	×	×	×	○	×	×	×	×	○	○	×	×	×	4	27%
We20	C	4	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	3	20%
We20	C	4.5	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	1	7%
We20	C	5	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	0	0%
We40	C	0.1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15	100%
We40	C	0.5	○	○	○	○	○	×	○	○	○	×	○	○	○	○	○	13	87%
We40	C	1	○	○	×	×	○	×	○	×	○	×	○	○	○	×	○	9	60%
We40	C	2	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	0	0%
We40	C	3	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	1	7%
We40	C	3.5	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	2	13%
We40	C	4	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	0	0%

(d) TypeD

波形	Type	初期位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	衝突回数	衝突頻度
We20	D	0.5	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	6	40%
We20	D	1	×	○	○	×	○	○	×	×	○	×	○	○	×	○	○	9	60%
We20	D	1.5	×	○	×	×	×	○	×	○	×	×	○	○	×	○	○	7	47%
We20	D	2	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	0	0%
We40	D	0.5	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	×	×	12	80%
We40	D	1	○	×	○	○	×	×	○	○	×	×	○	×	×	×	×	6	40%
We40	D	2	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	○	2	13%
We40	D	2.5	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	×	×	×	3	20%

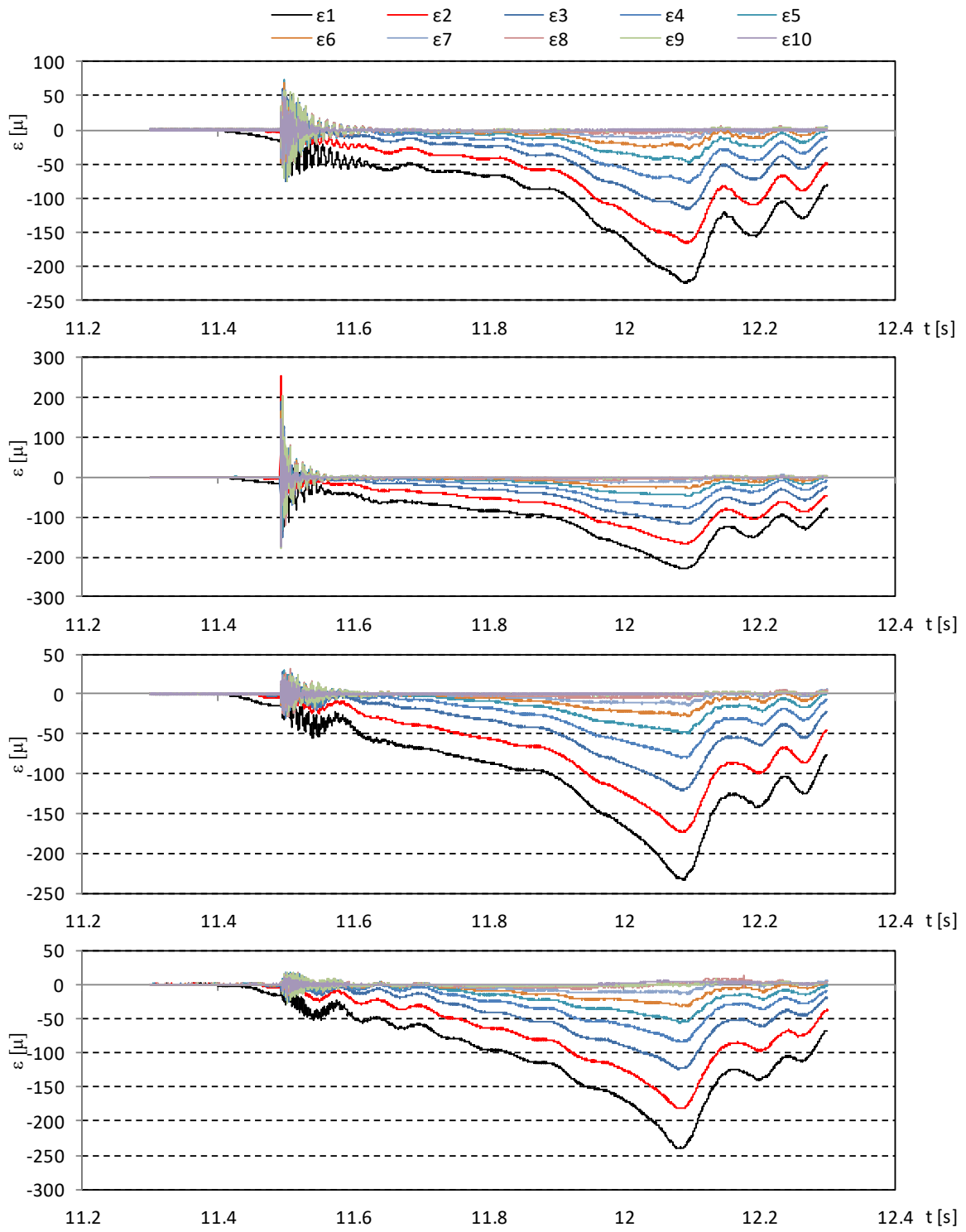


図- 5.2.1 ひずみの時系列 (We10, TypeA, 初期位置 0.1m, 1回目)

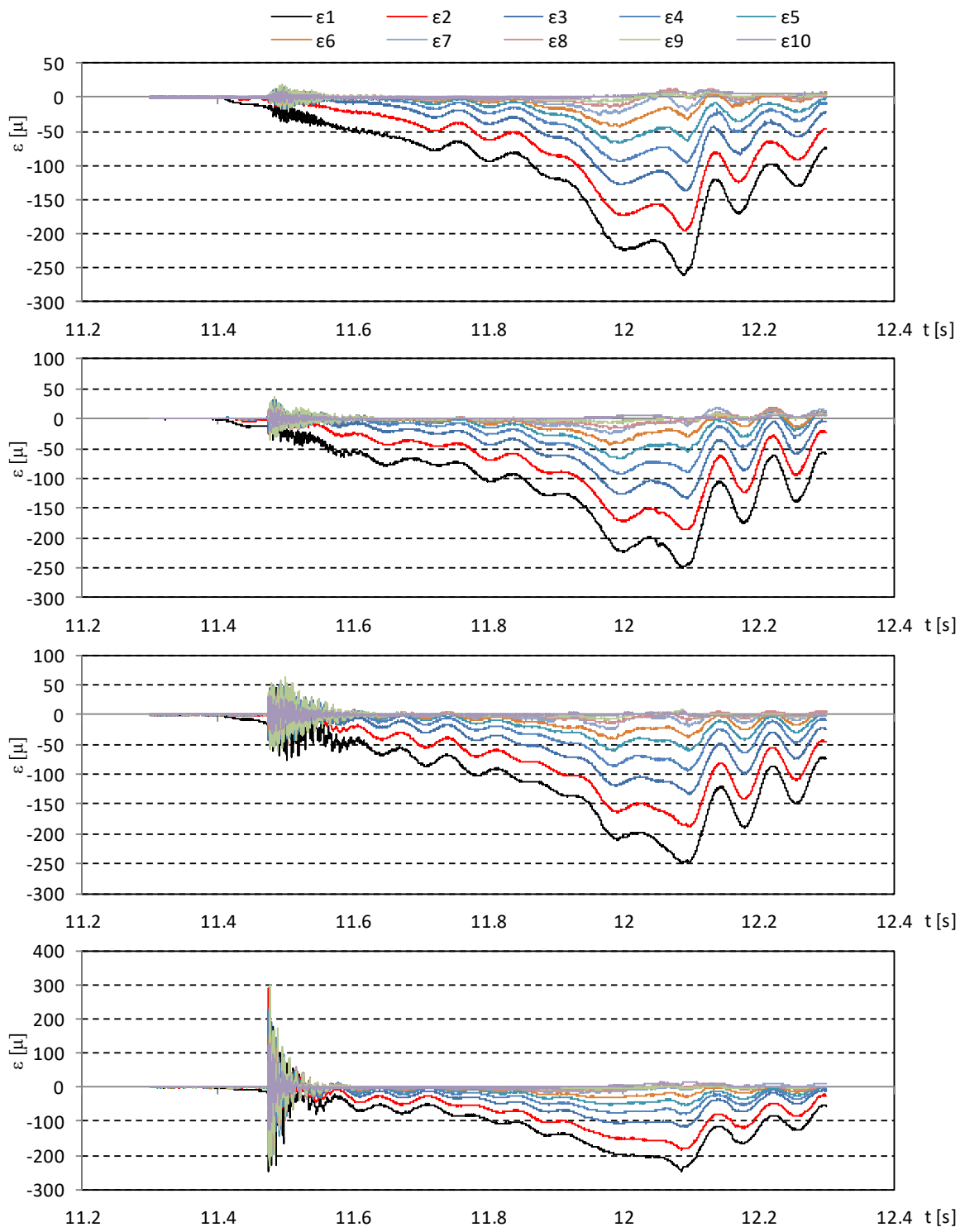


図- 5.2.2 ひずみの時系列 (We10, TypeA, 初期位置 0.5m, 12回目)

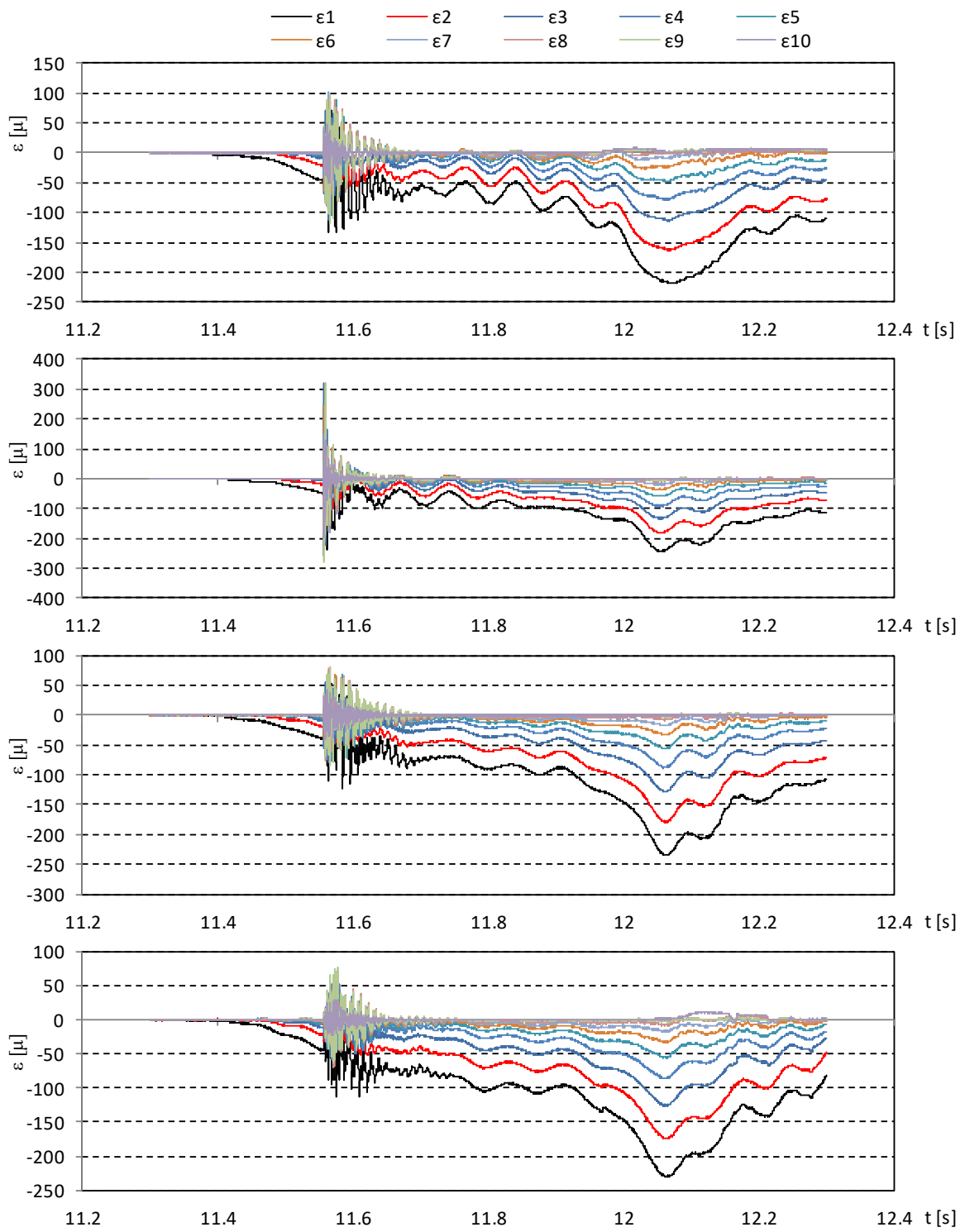


図-5.2.3 ひずみの時系列 (We10, TypeA, 初期位置 1.0m, 11回目)

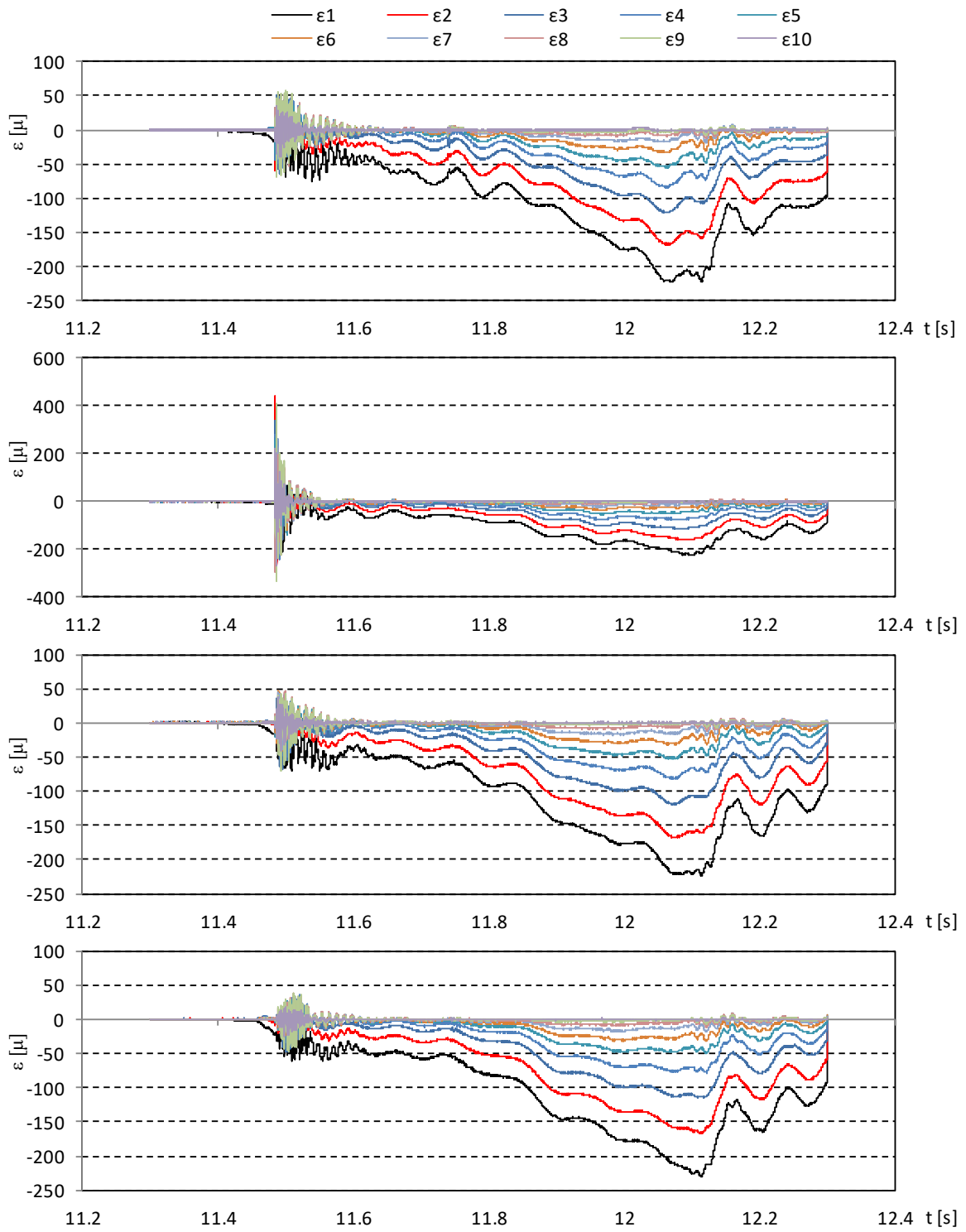


図- 5.2.4 ひずみの時系列 (We10, TypeA, 初期位置 2.0m, 4回目)

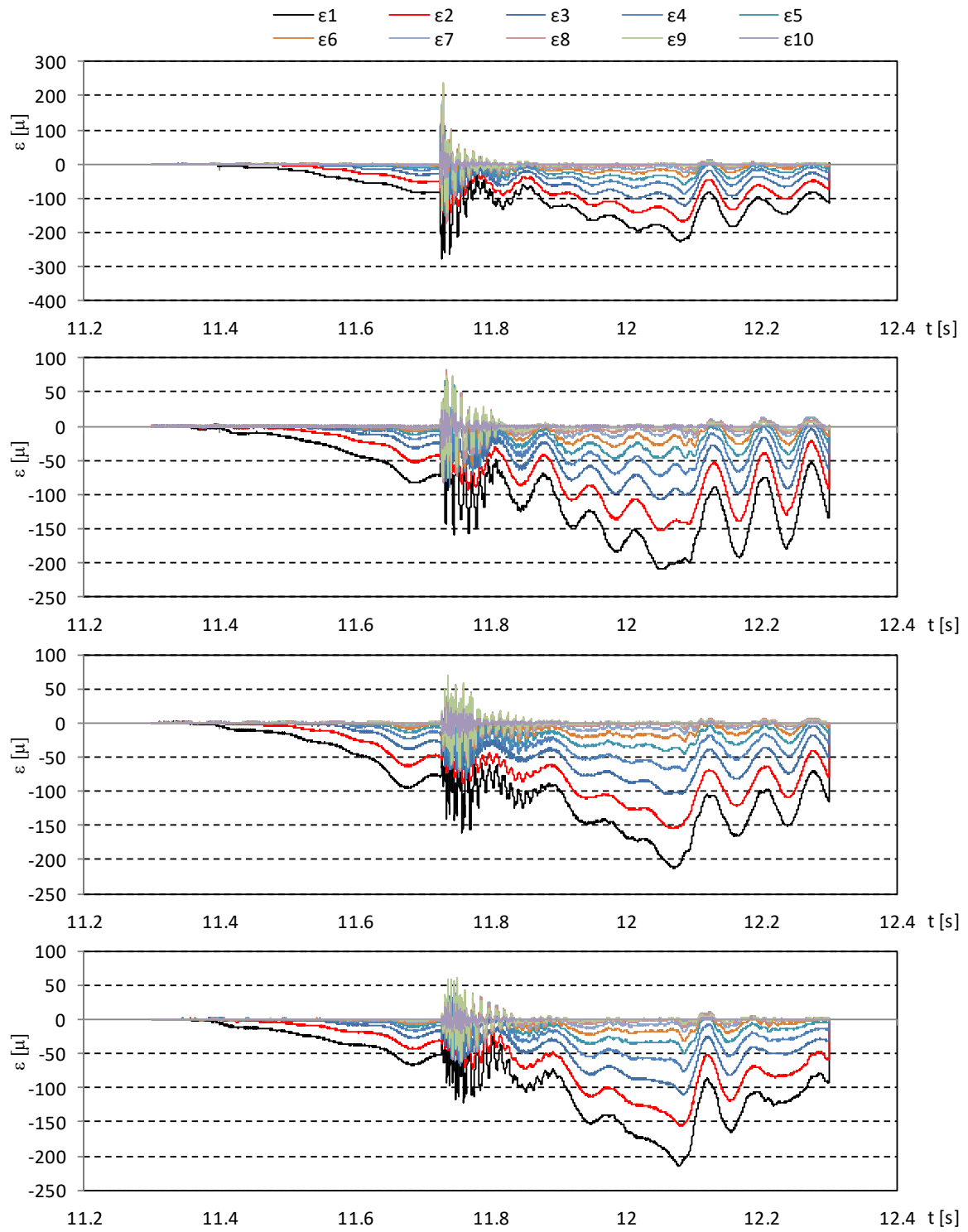


図- 5.2.5 ひずみの時系列 (We10, TypeA, 初期位置 2.5m, 7回目)

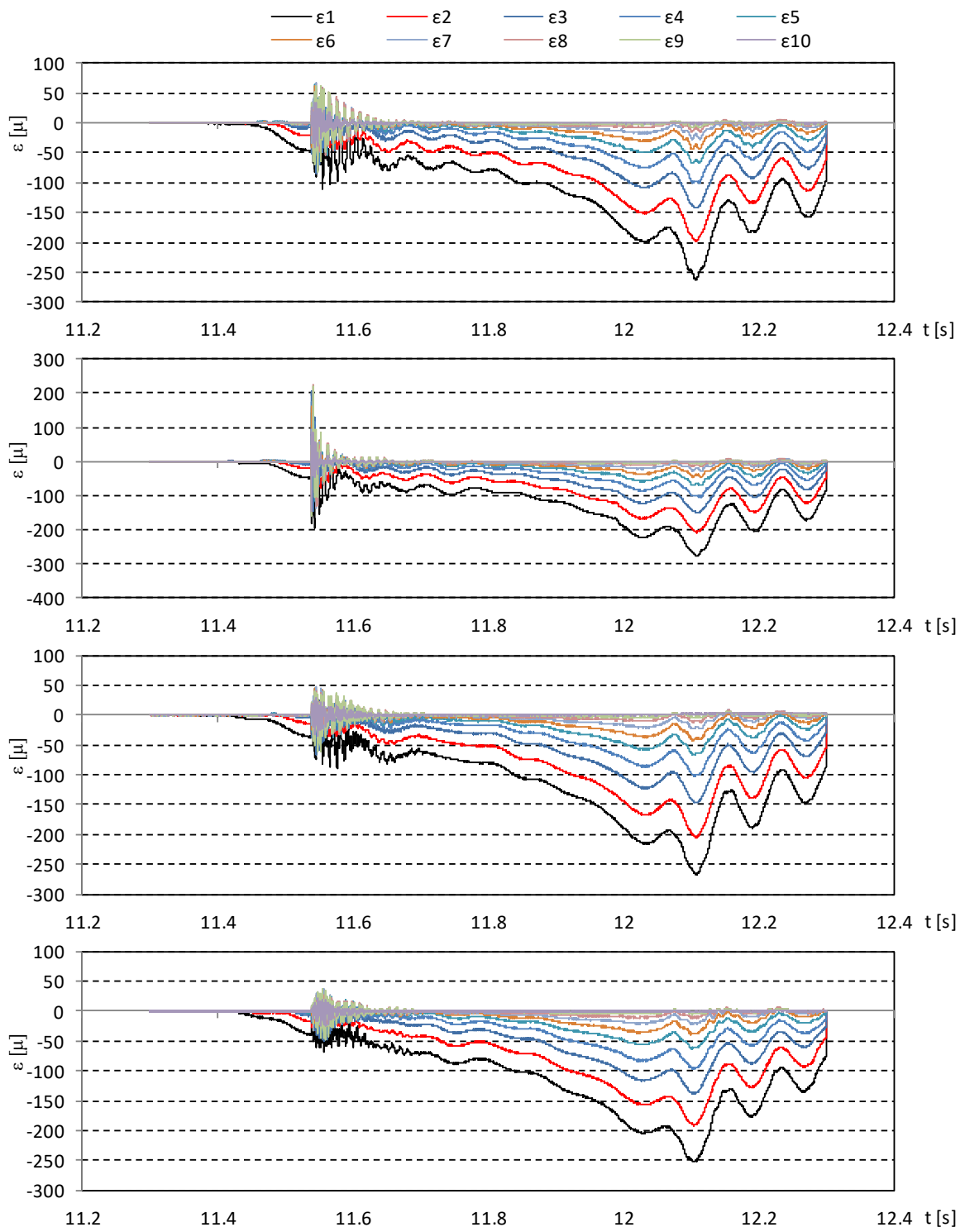


図- 5.2.6 ひずみの時系列 (We10, TypeA, 初期位置 3.0m, 1回目)

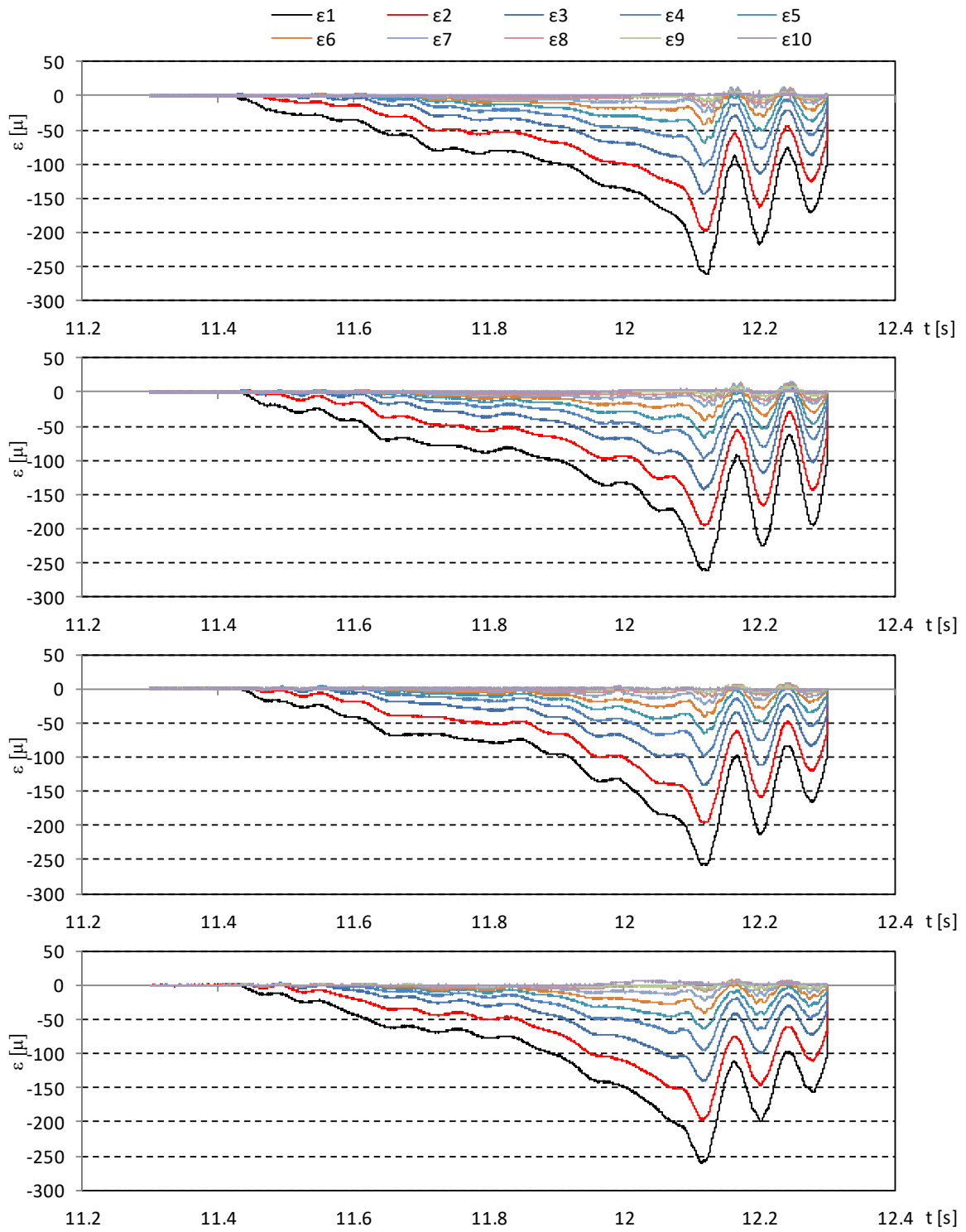


図- 5.2.7 ひずみの時系列 (We10, TypeA, 初期位置 3.5m, 1回目)

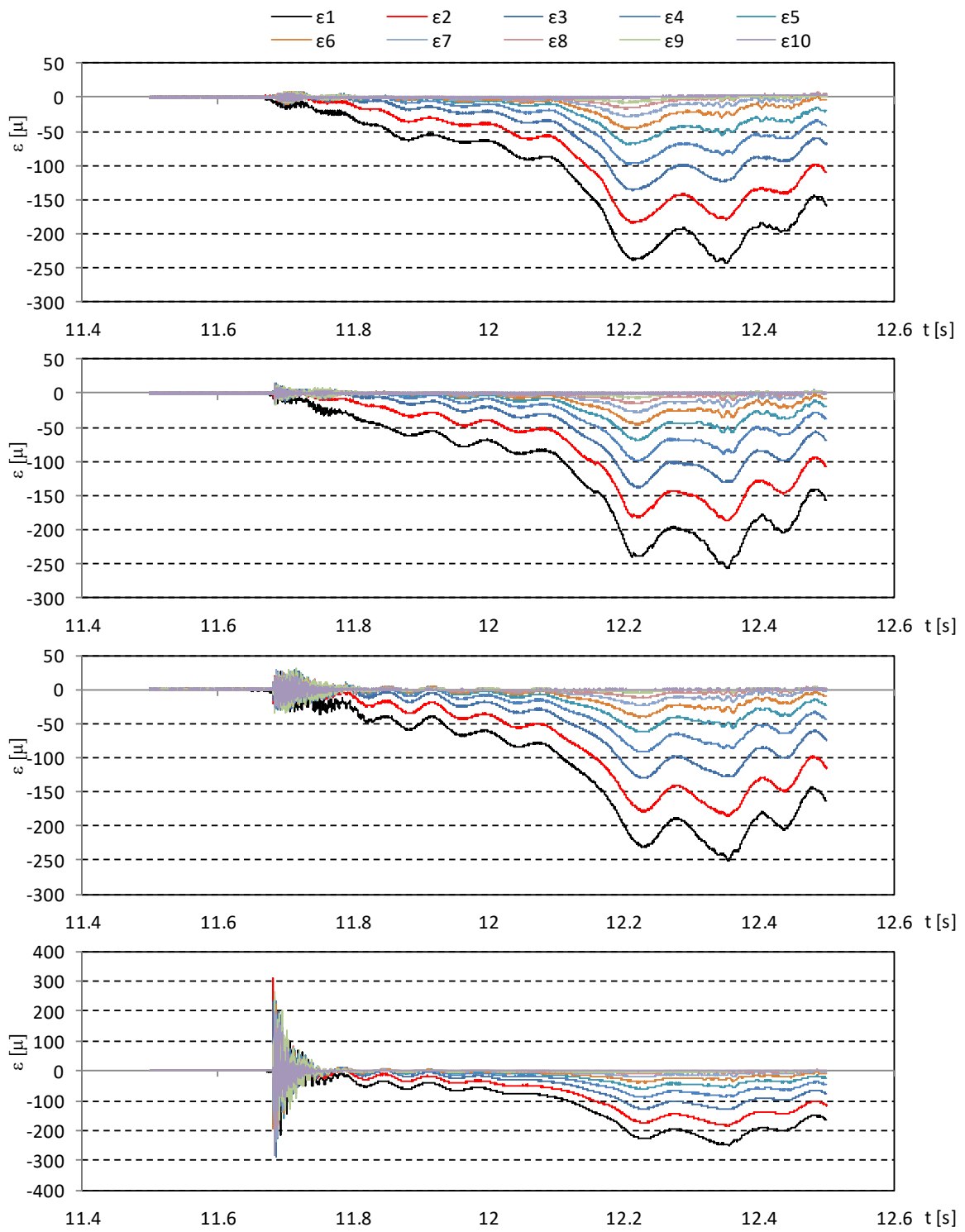


図- 5.2.8 ひずみの時系列 (We20, TypeA, 初期位置 0.1m, 15回目)

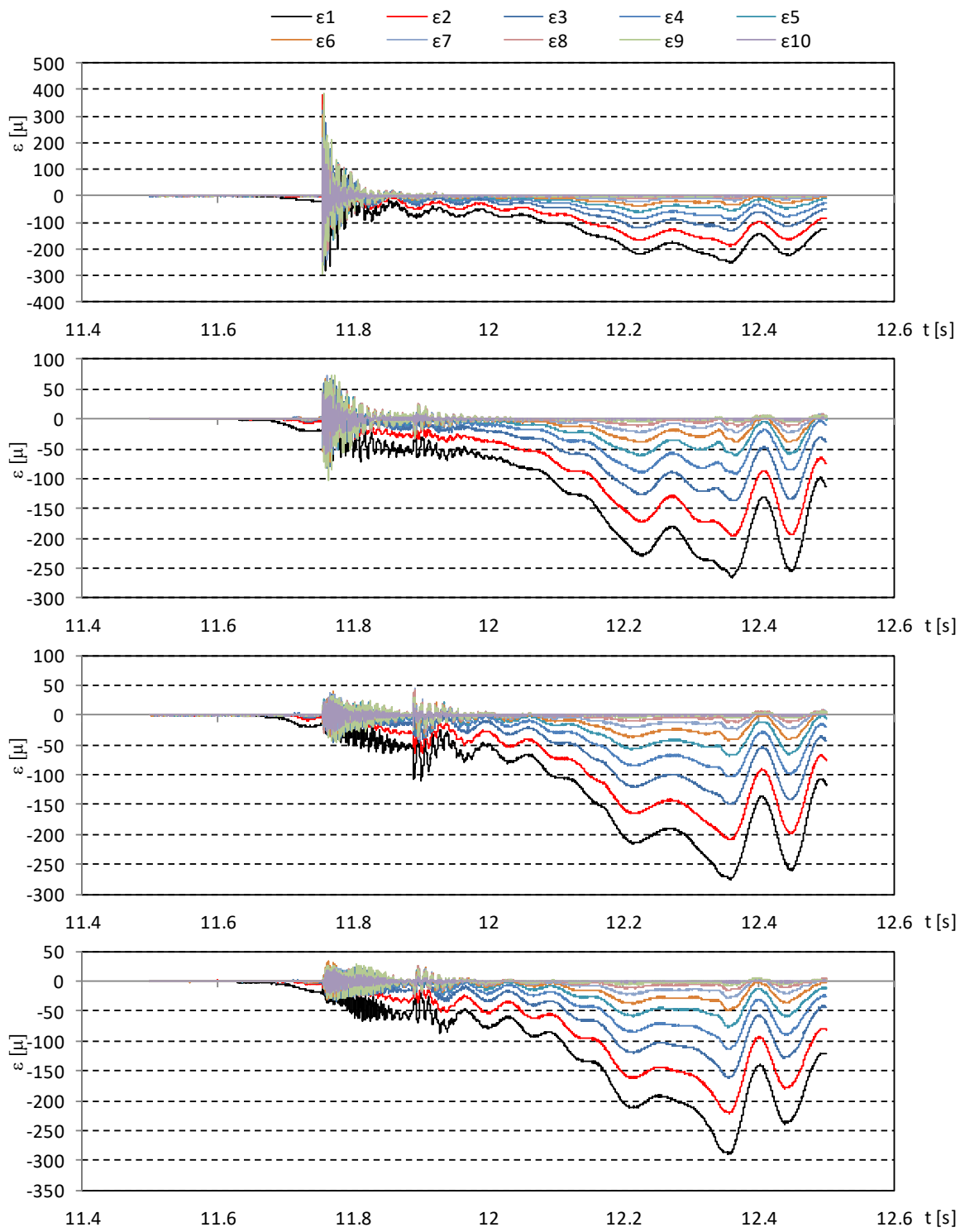


図- 5.2.9 ひずみの時系列 (We20, TypeA, 初期位置 0.5m, 5回目)

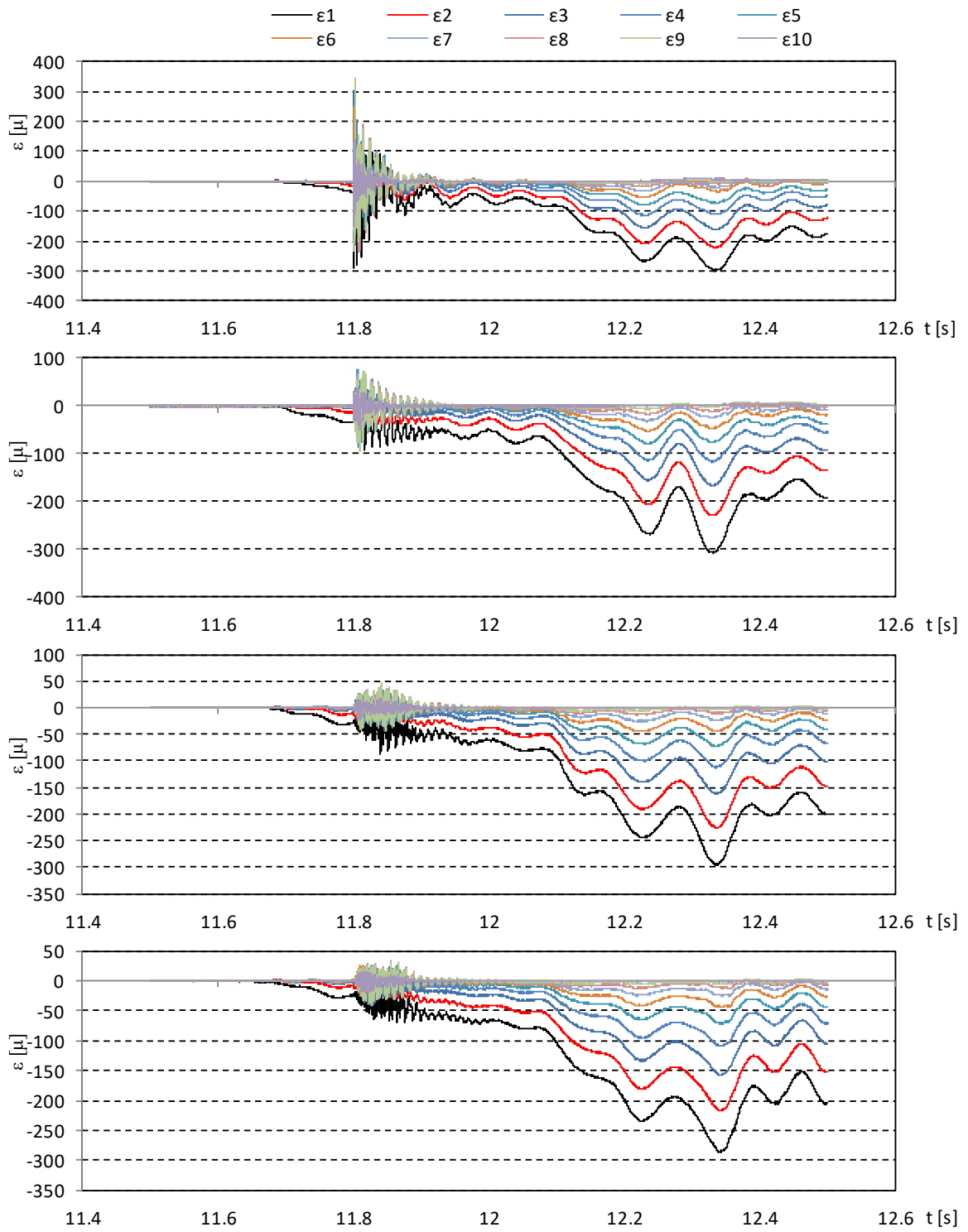


図- 5.2.10 ひずみの時系列 (We20, TypeA, 初期位置 1.0m, 11 回目)

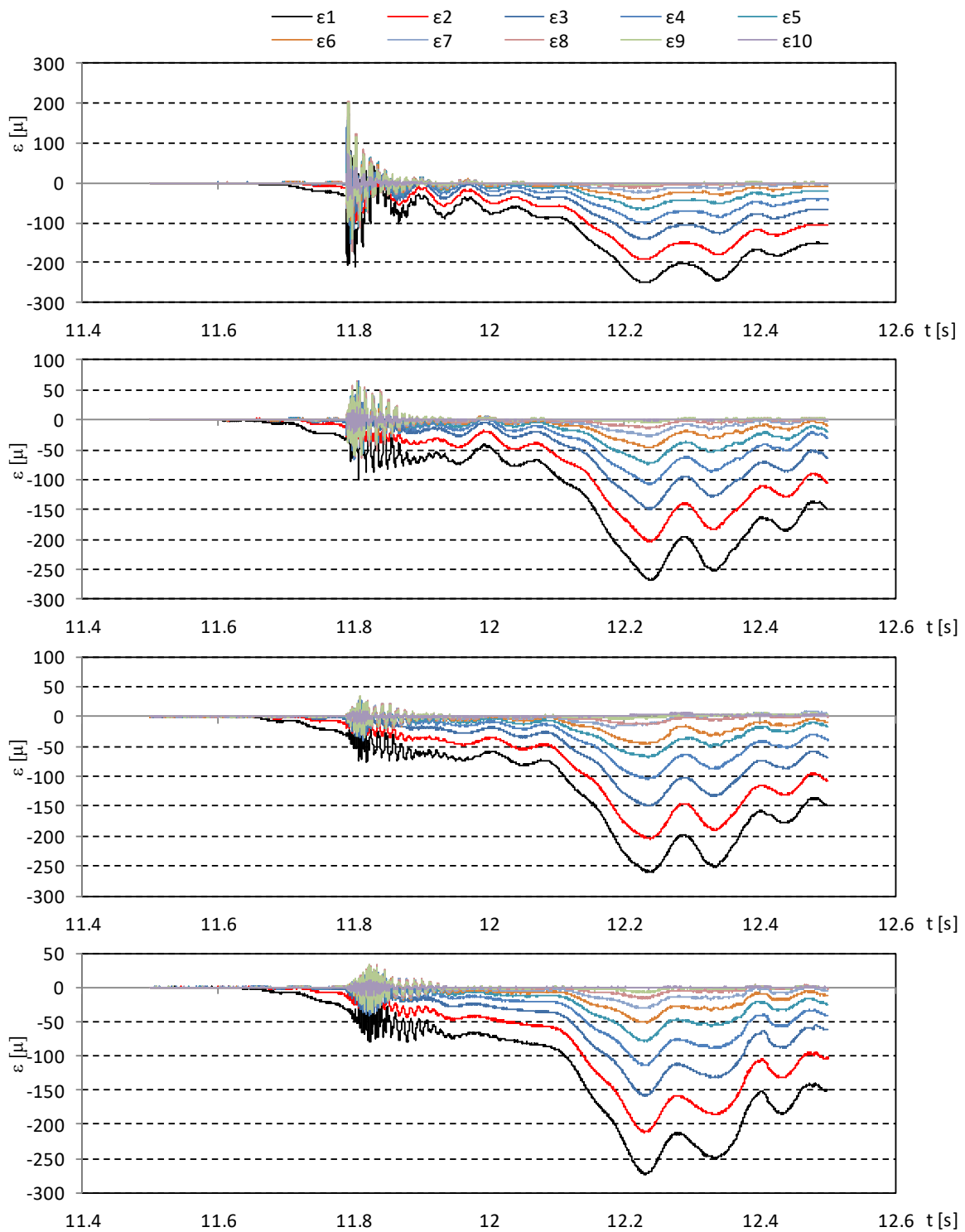


図- 5.2.11 ひずみの時系列 (We20, TypeA, 初期位置 2.0m, 1回目)

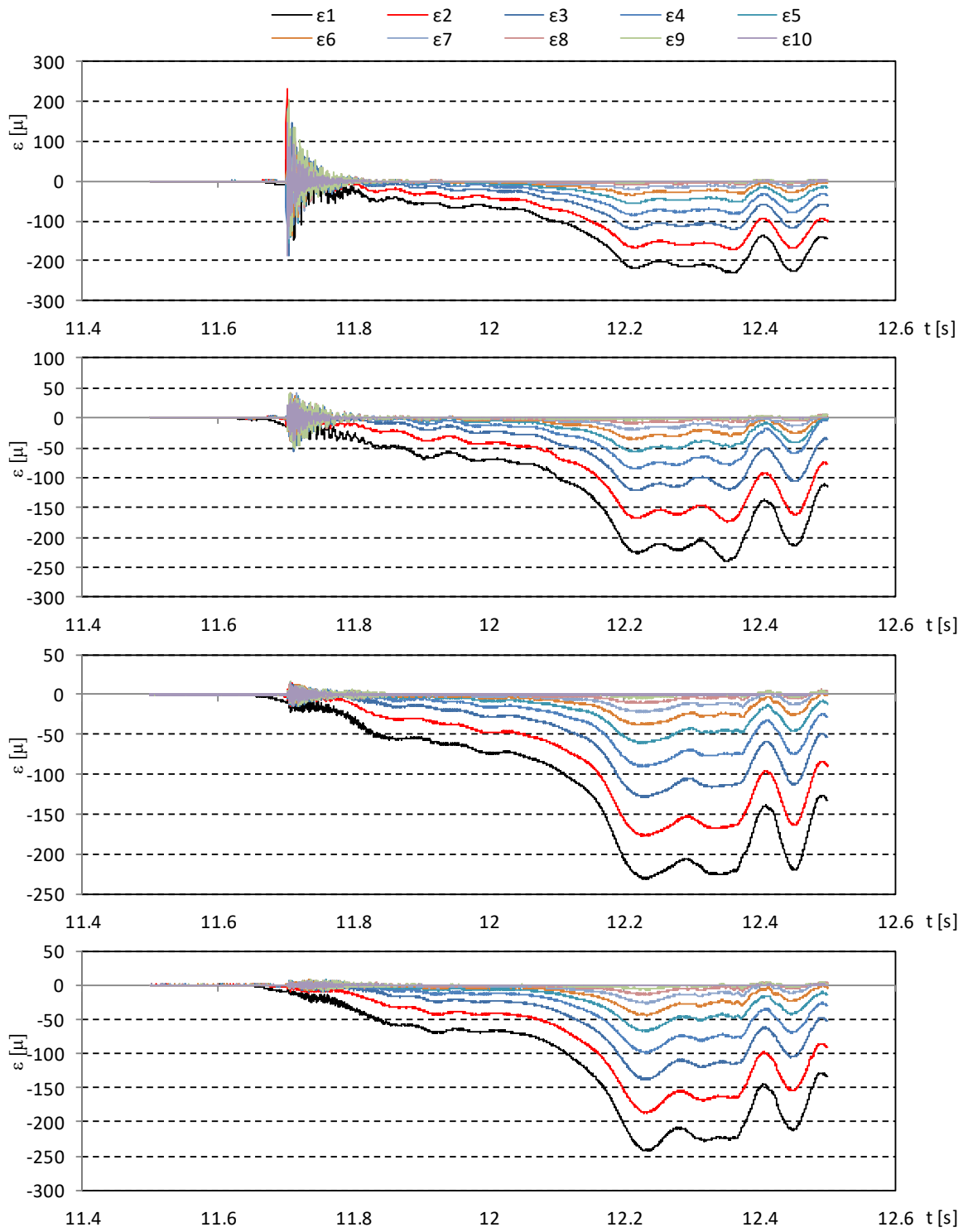


図- 5.2.12 ひずみの時系列 (We20, TypeA, 初期位置 3.0m, 8回目)

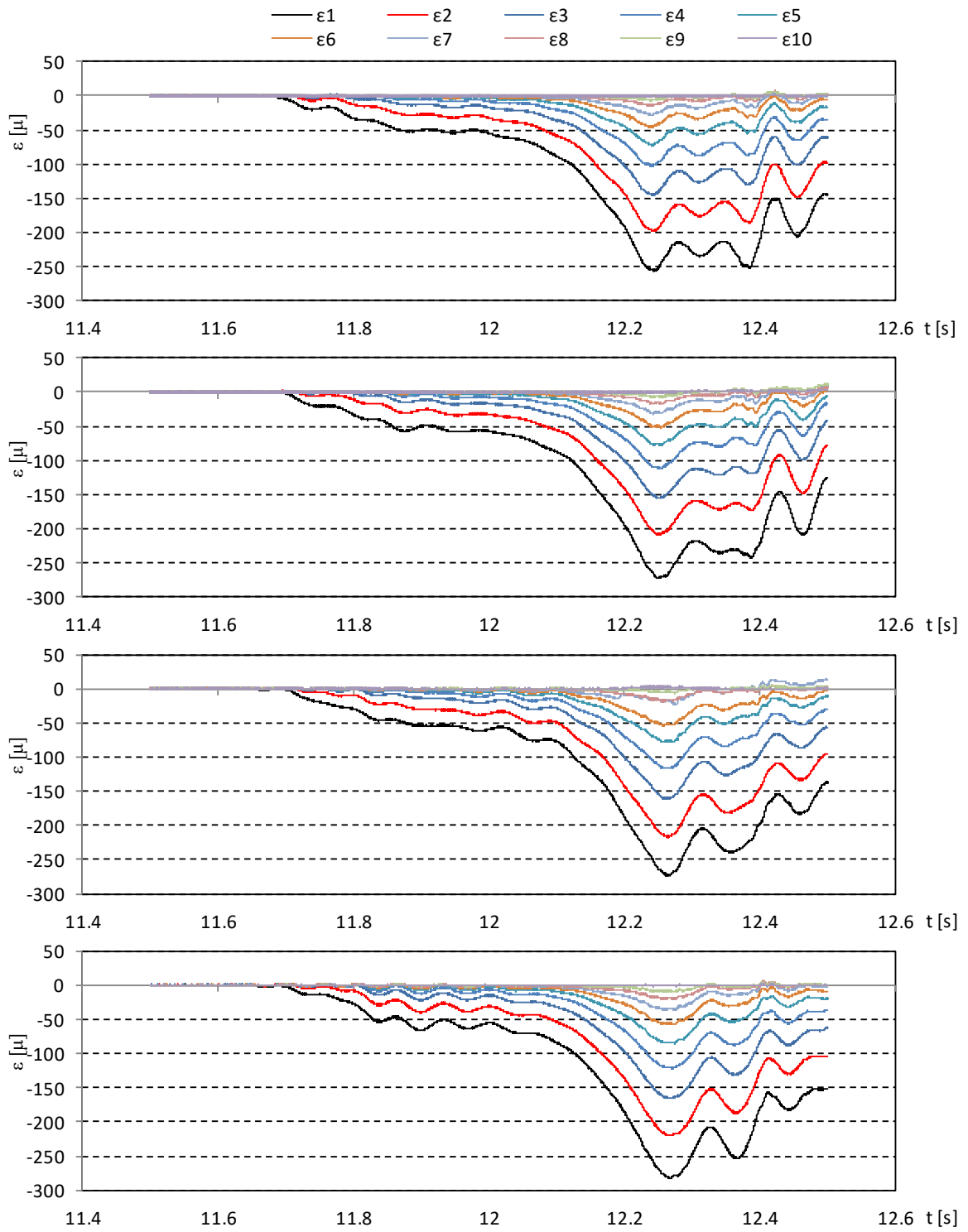


図- 5.2.13 ひずみの時系列 (We20, TypeA, 初期位置 3.5m, 1回目)

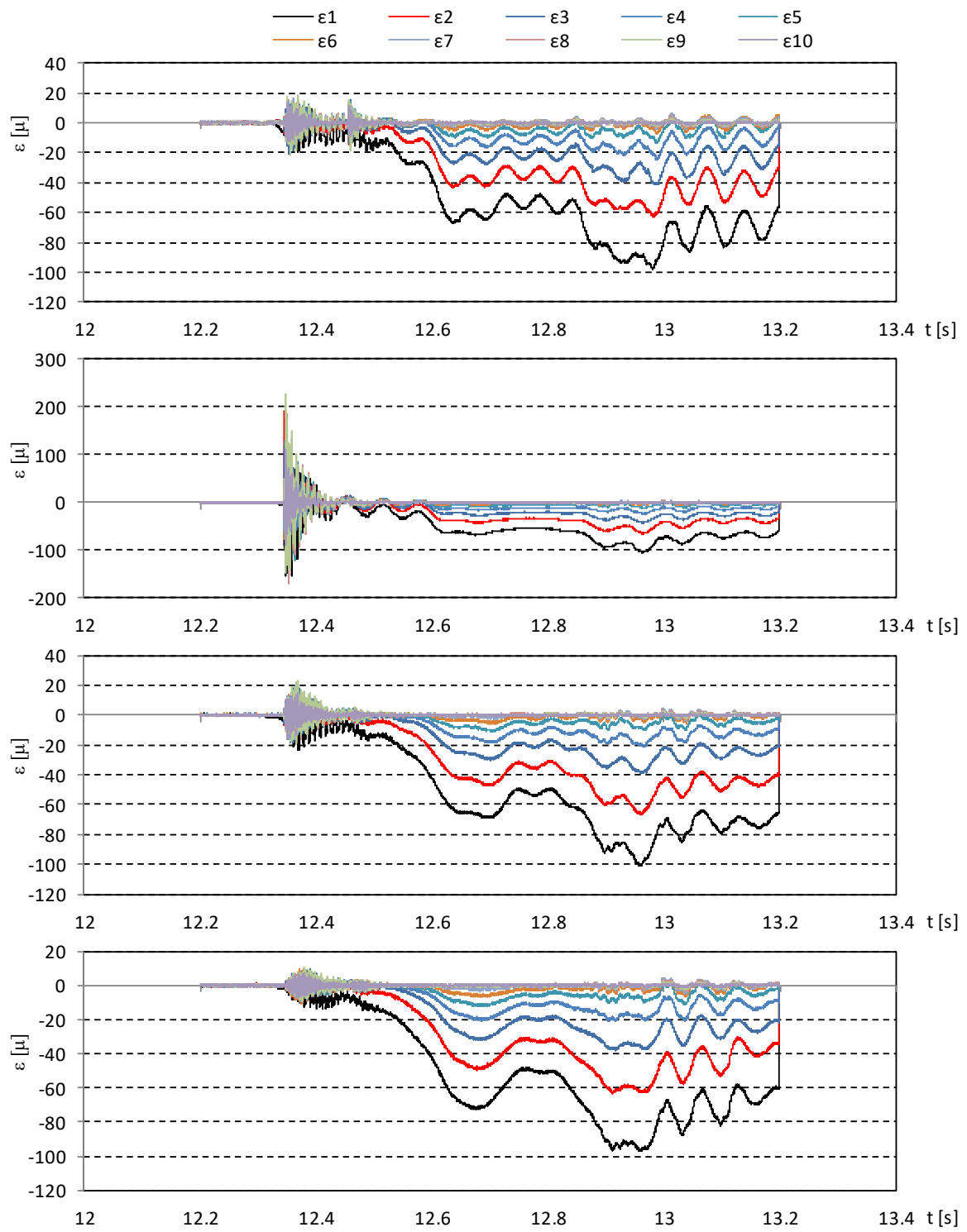


図- 5.2.14 ひずみの時系列 (We30, TypeA, 初期位置 0.1m, 11 回目)

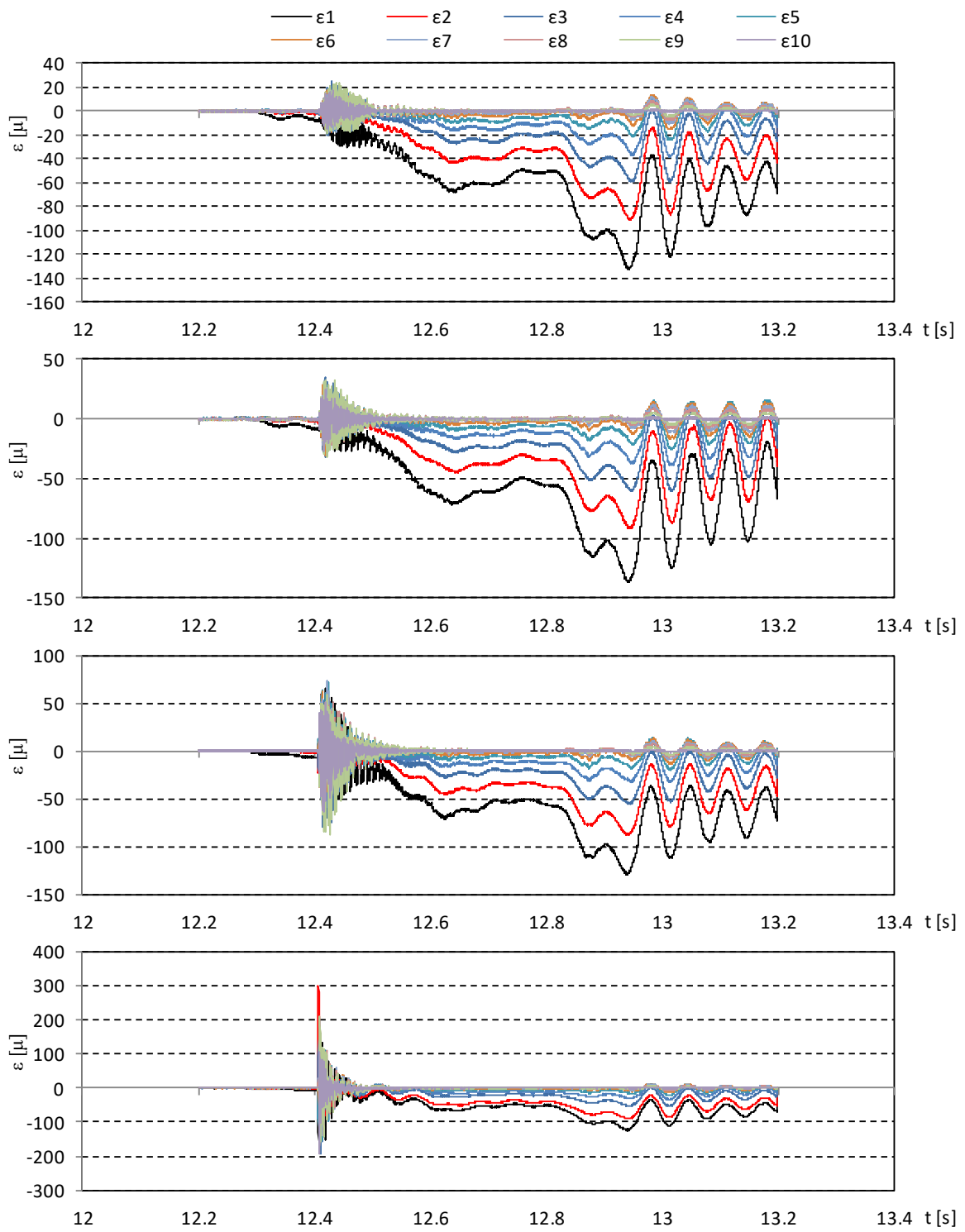


図-5.2.15 ひずみの時系列 (We30, TypeA, 初期位置 0.5m, 8回目)

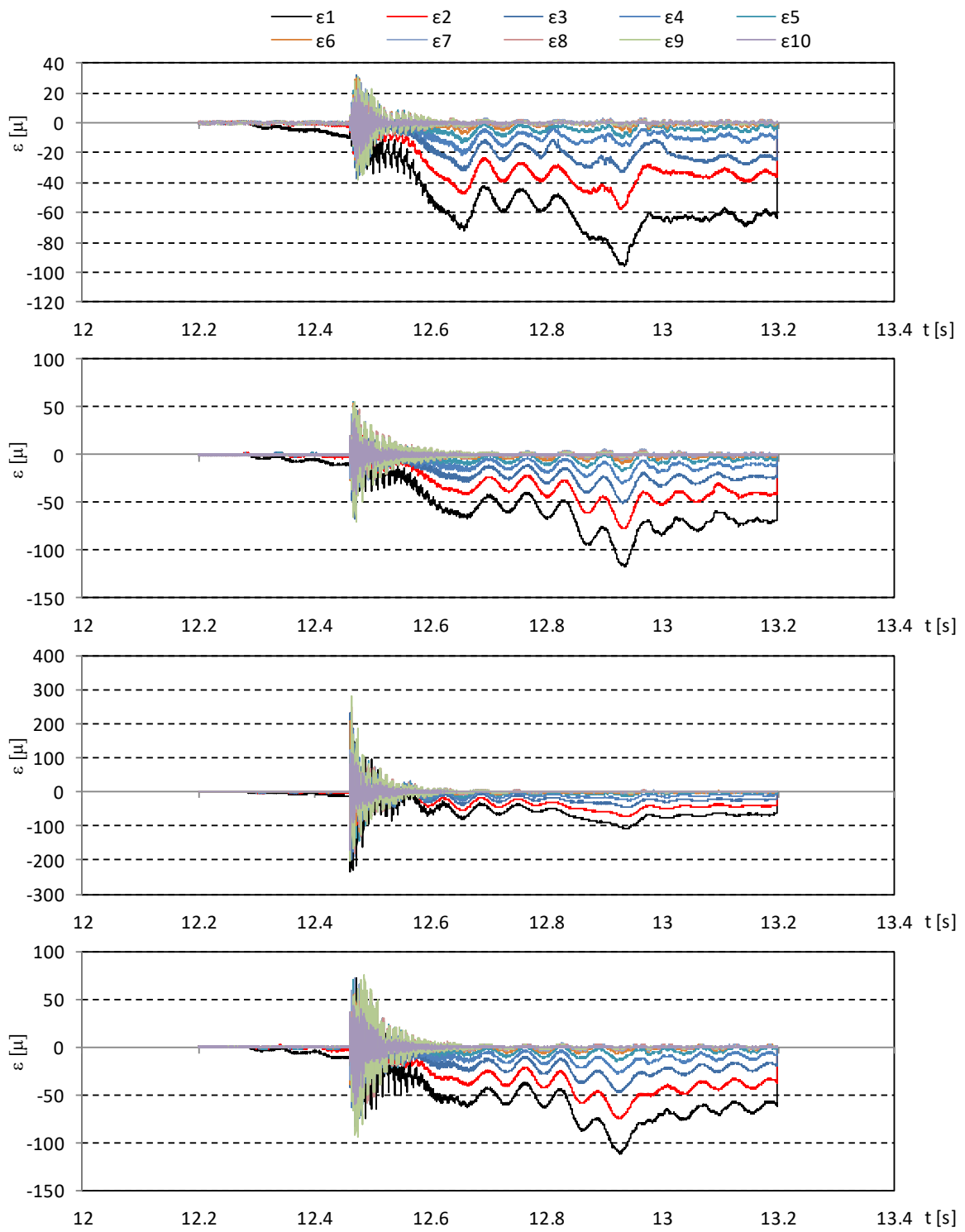


図-5.2.16 ひずみの時系列 (We30, TypeA, 初期位置 1.0m, 1回目)

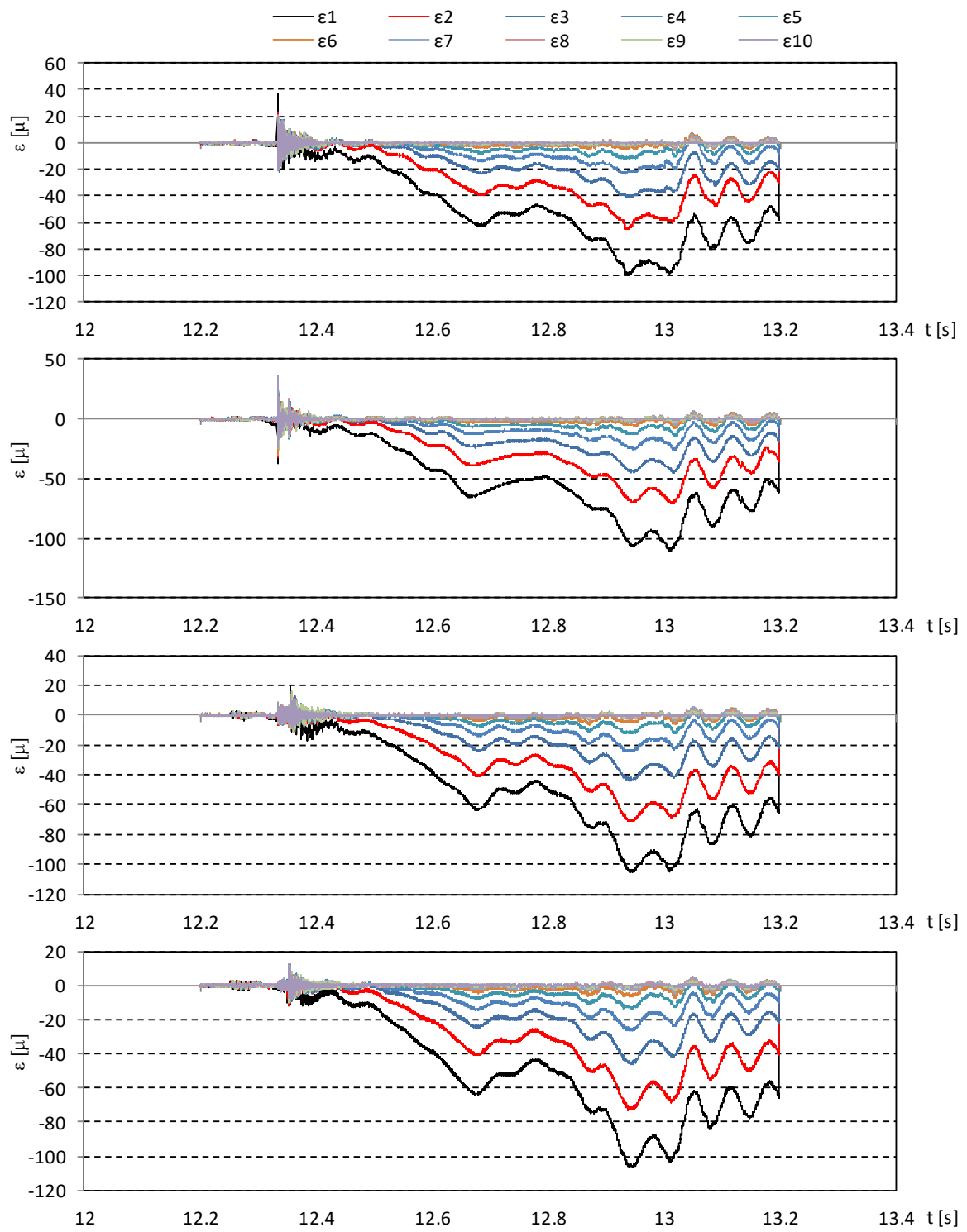


図- 5.2.17 ひずみの時系列 (We30, TypeA, 初期位置 1.5m, 12 回目)

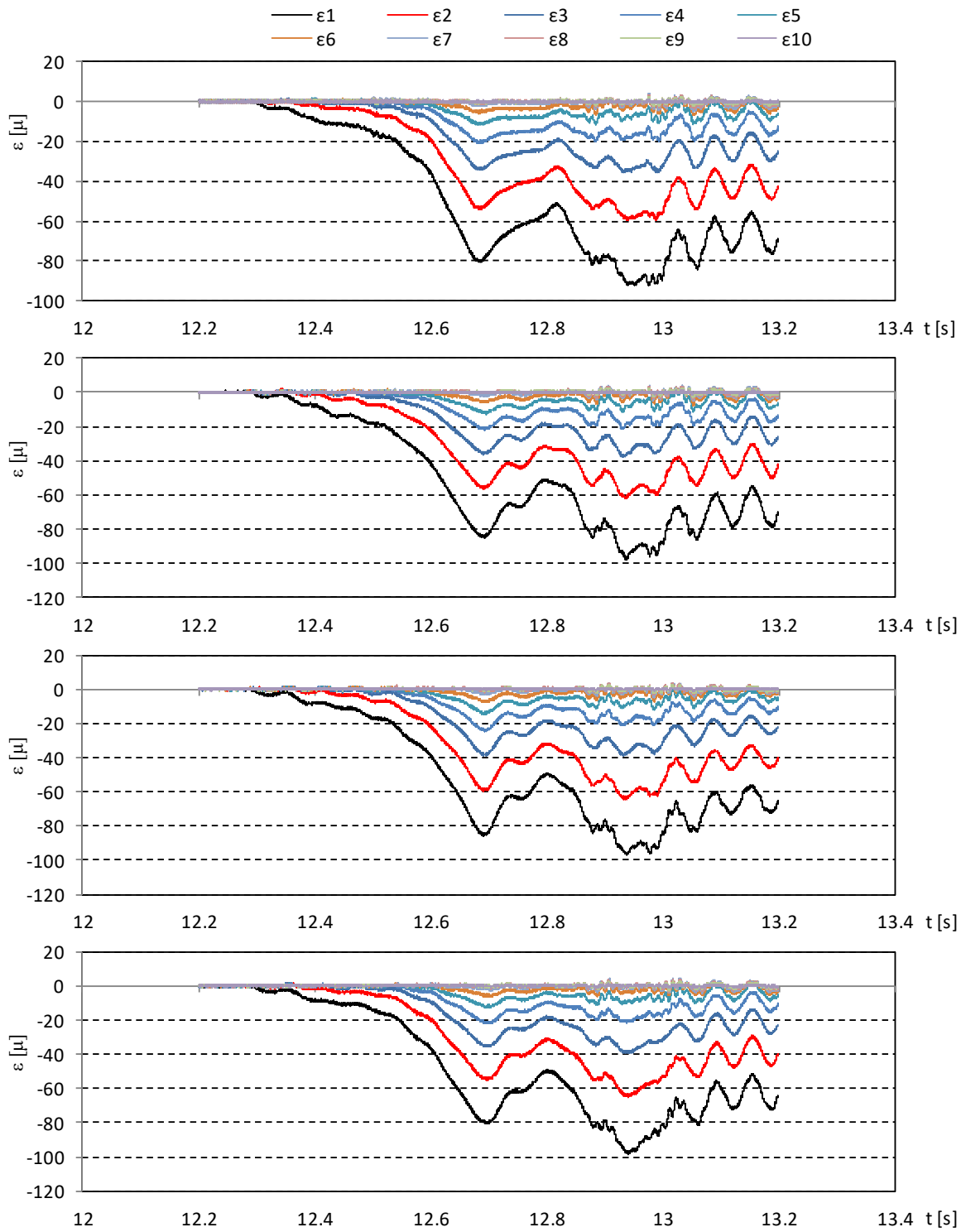


図-5.2.18 ひずみの時系列 (We30, TypeA, 初期位置 2.0m, 1回目)

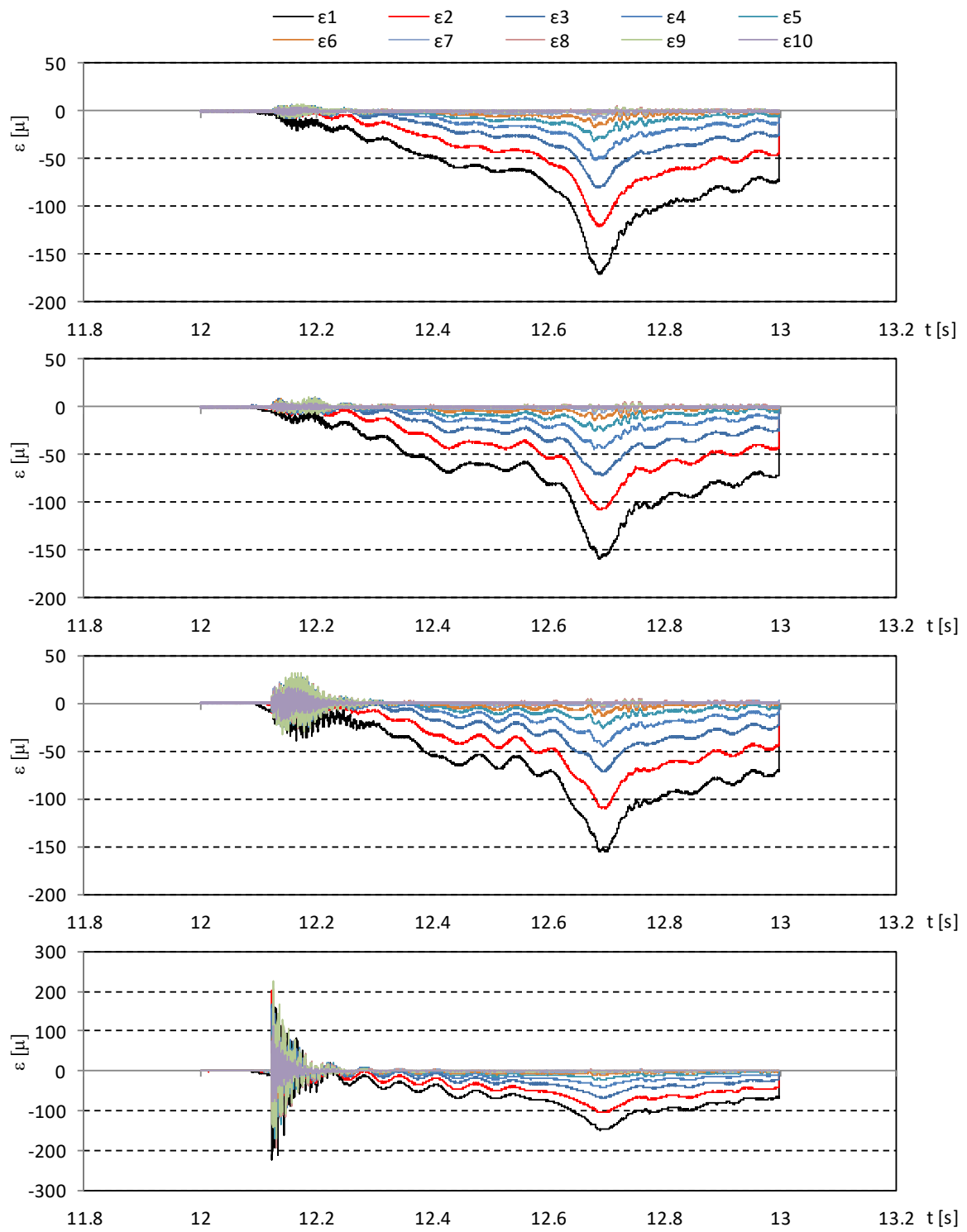


図- 5.2.19 ひずみの時系列 (We40, TypeA, 初期位置 0.1m, 14 回目)

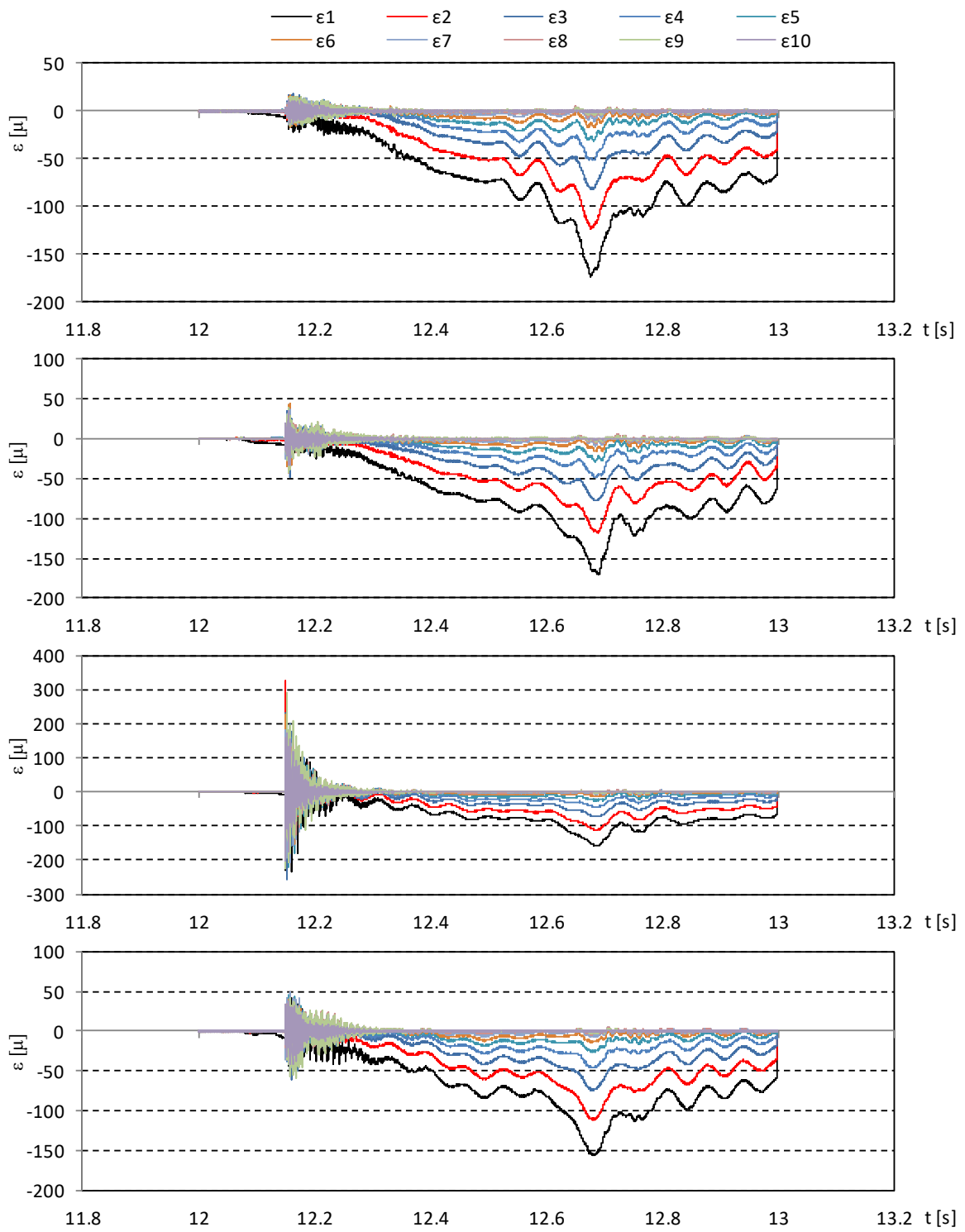


図- 5.2.20 ひずみの時系列 (We40, TypeA, 初期位置 0.5m, 1回目)

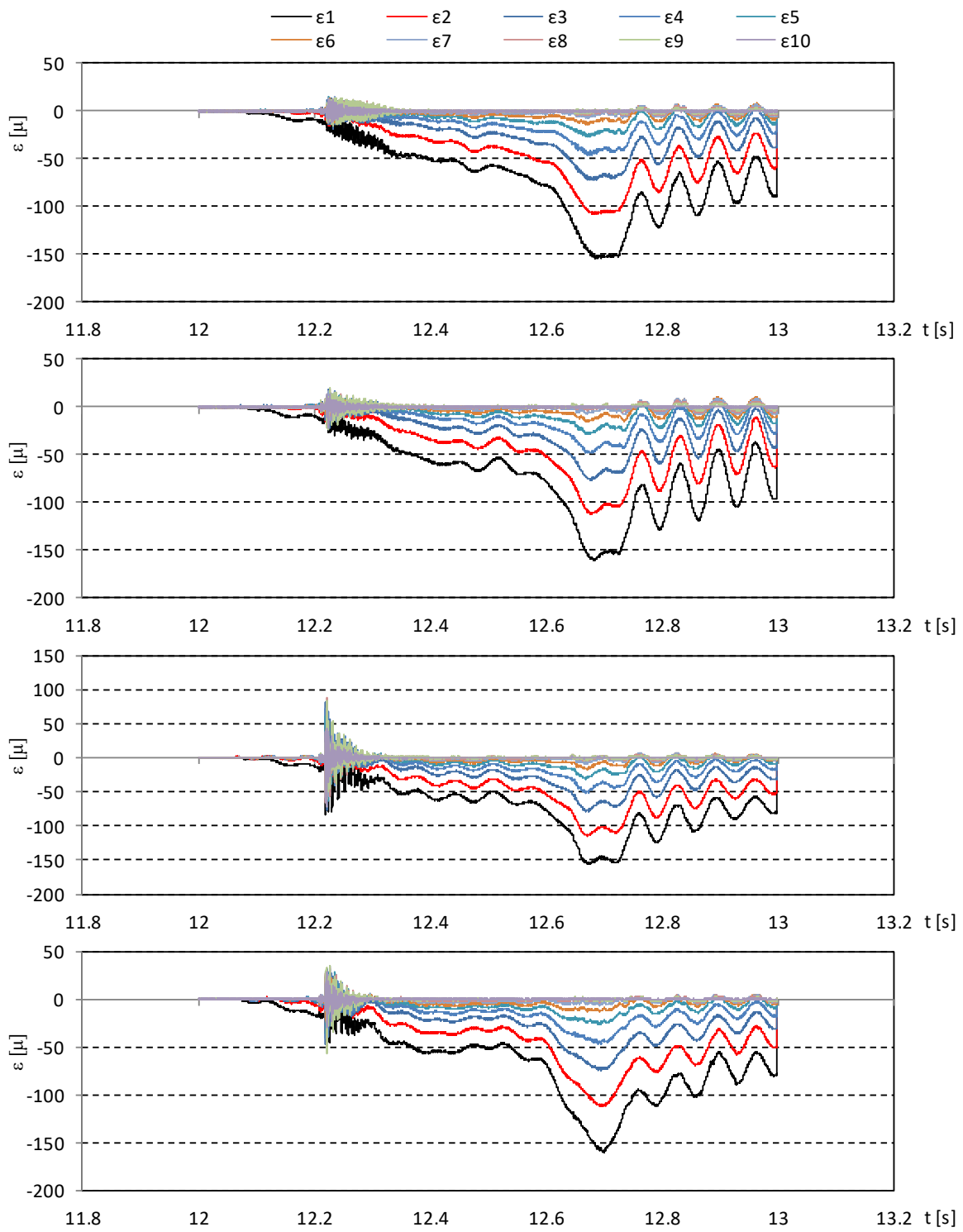


図- 5.2.21 ひずみの時系列 (We40, TypeA, 初期位置 1.0m, 1回目)

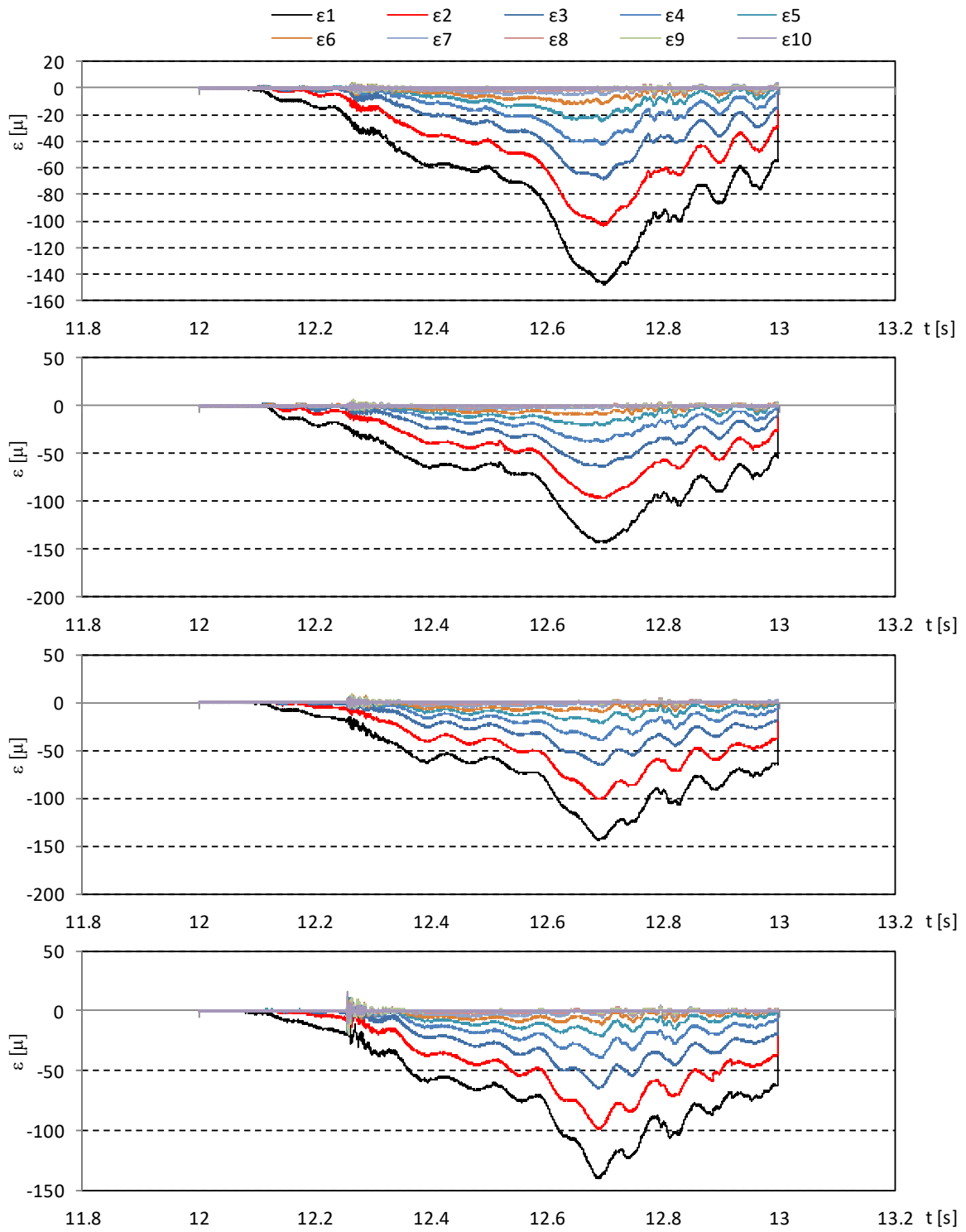


図- 5.2.22 ひずみの時系列 (We40, TypeA, 初期位置 2.0m, 6回目)

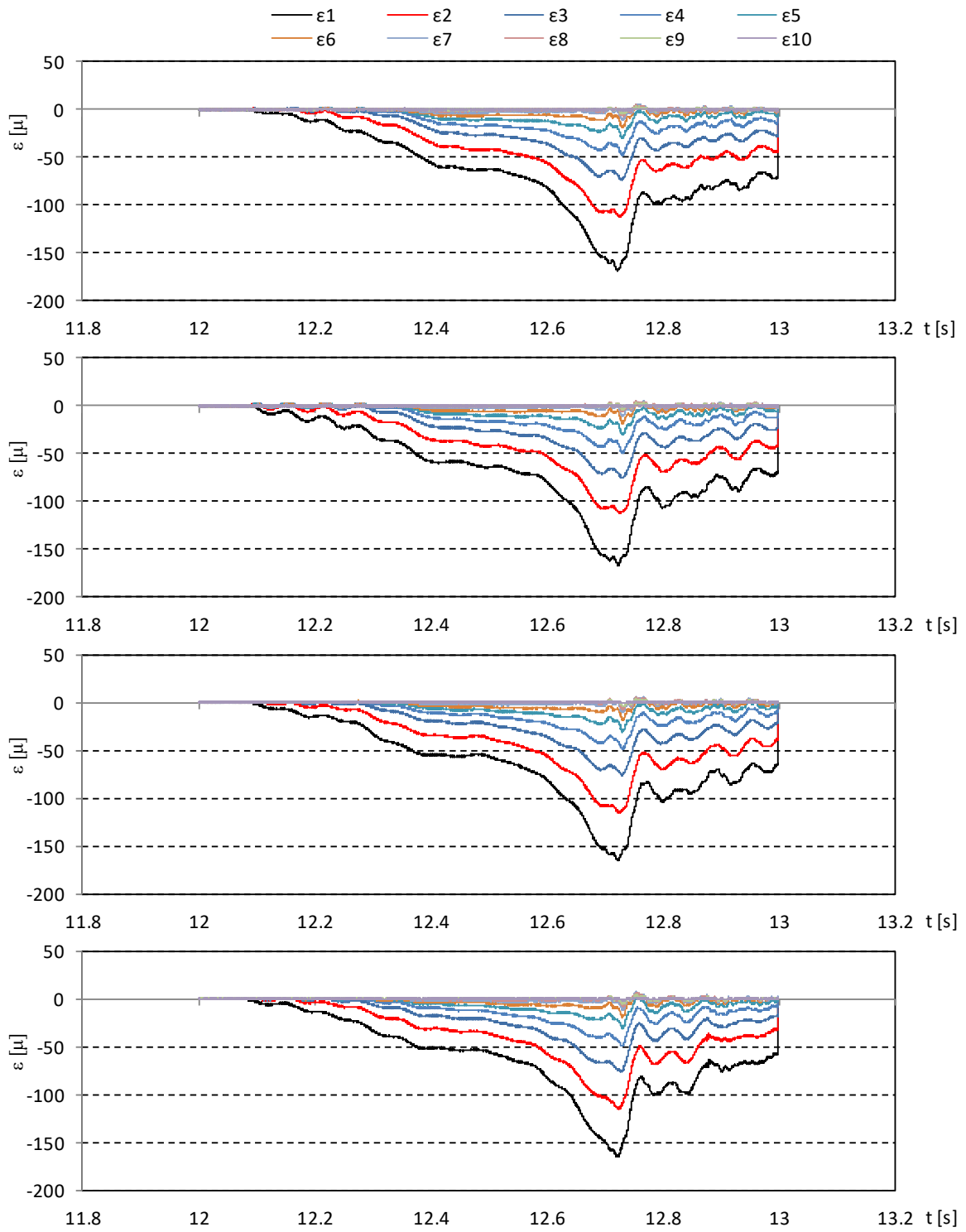


図- 5.2.23 ひずみの時系列 (We40, TypeA, 初期位置 2.5m, 1回目)

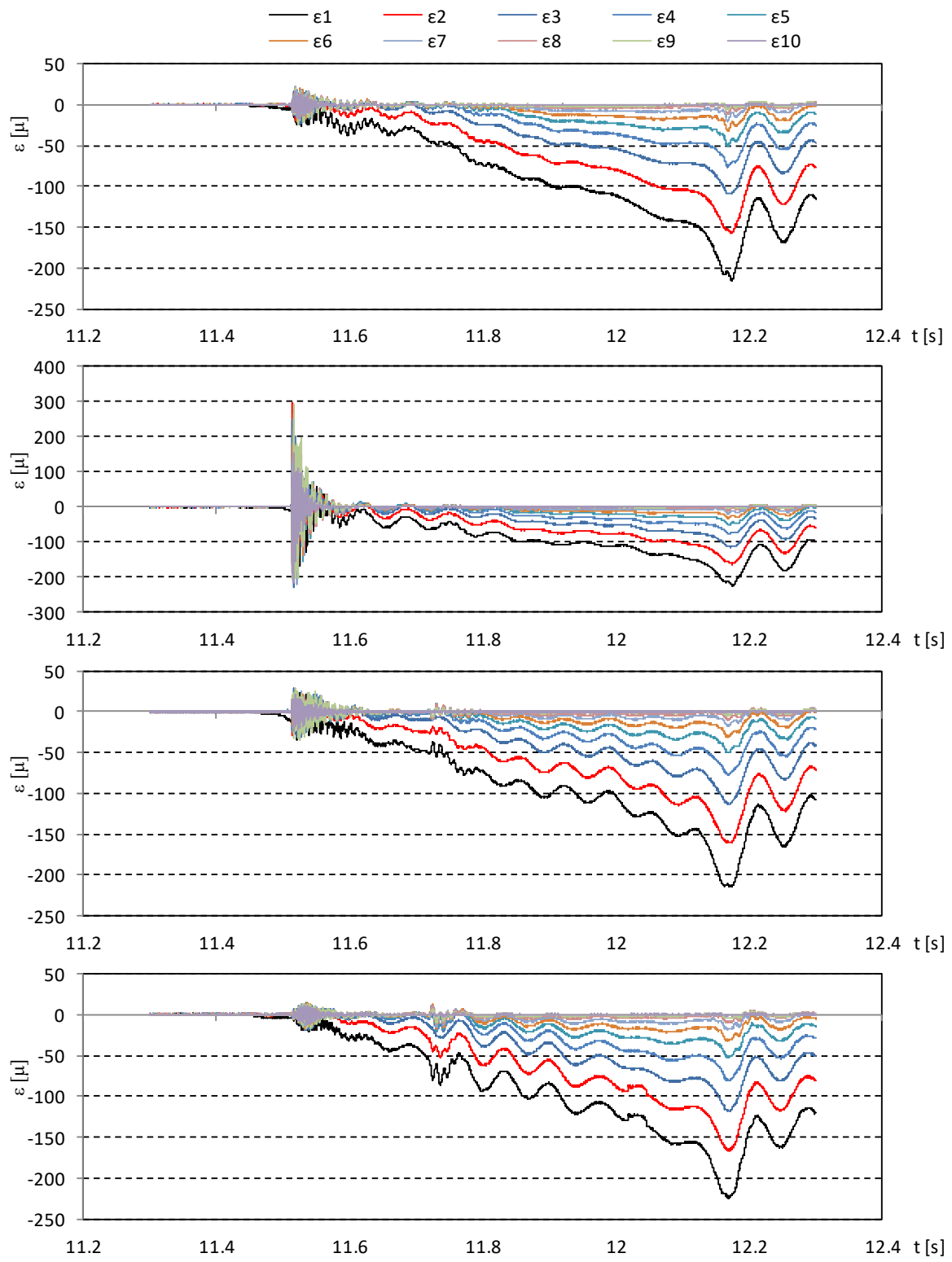


図- 5.2.24 ひずみの時系列 (We10, TypeB, 初期位置 0.5m, 12 回目)

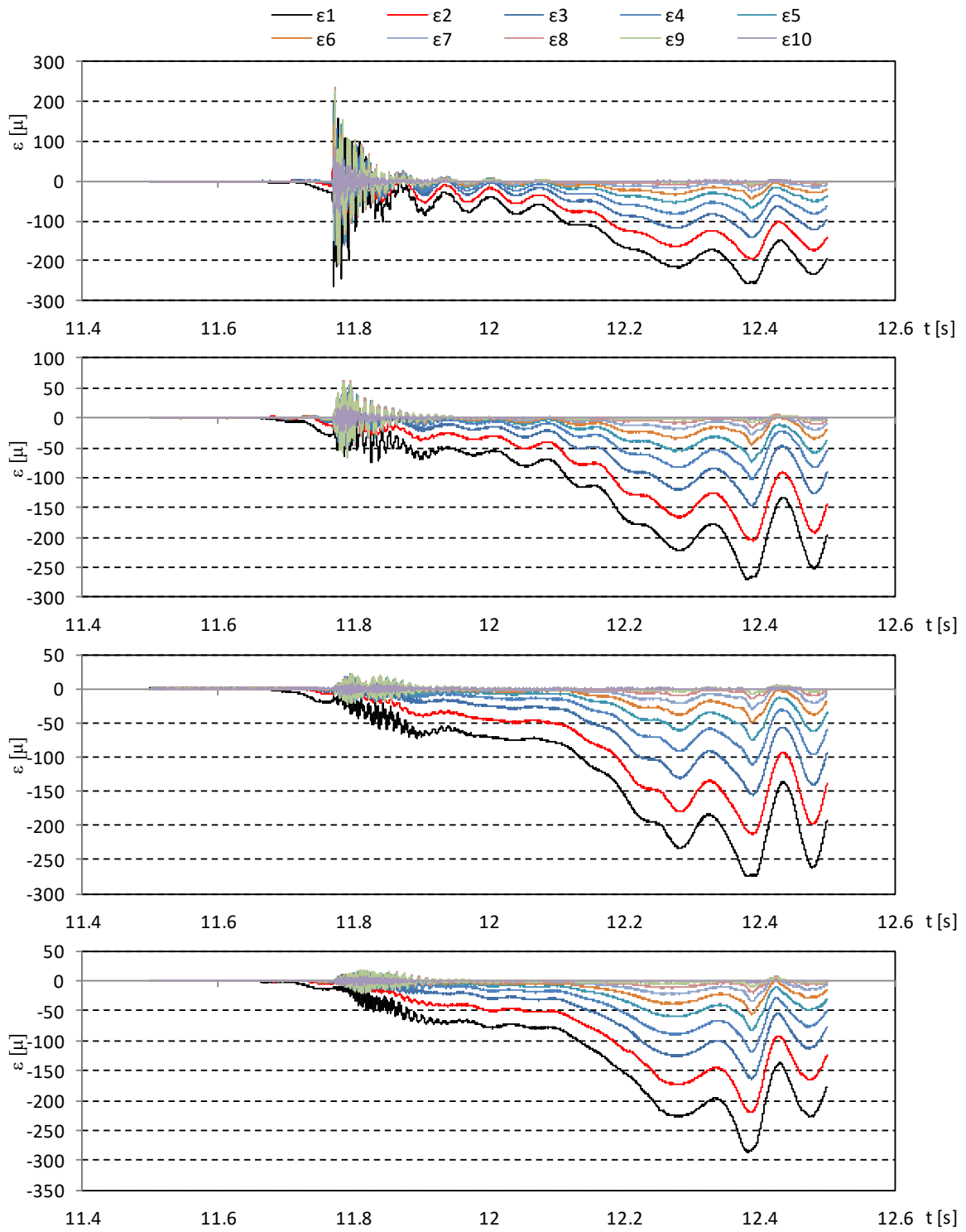


図- 5.2.25 ひずみの時系列 (We20, TypeB, 初期位置 0.5m, 14 回目)

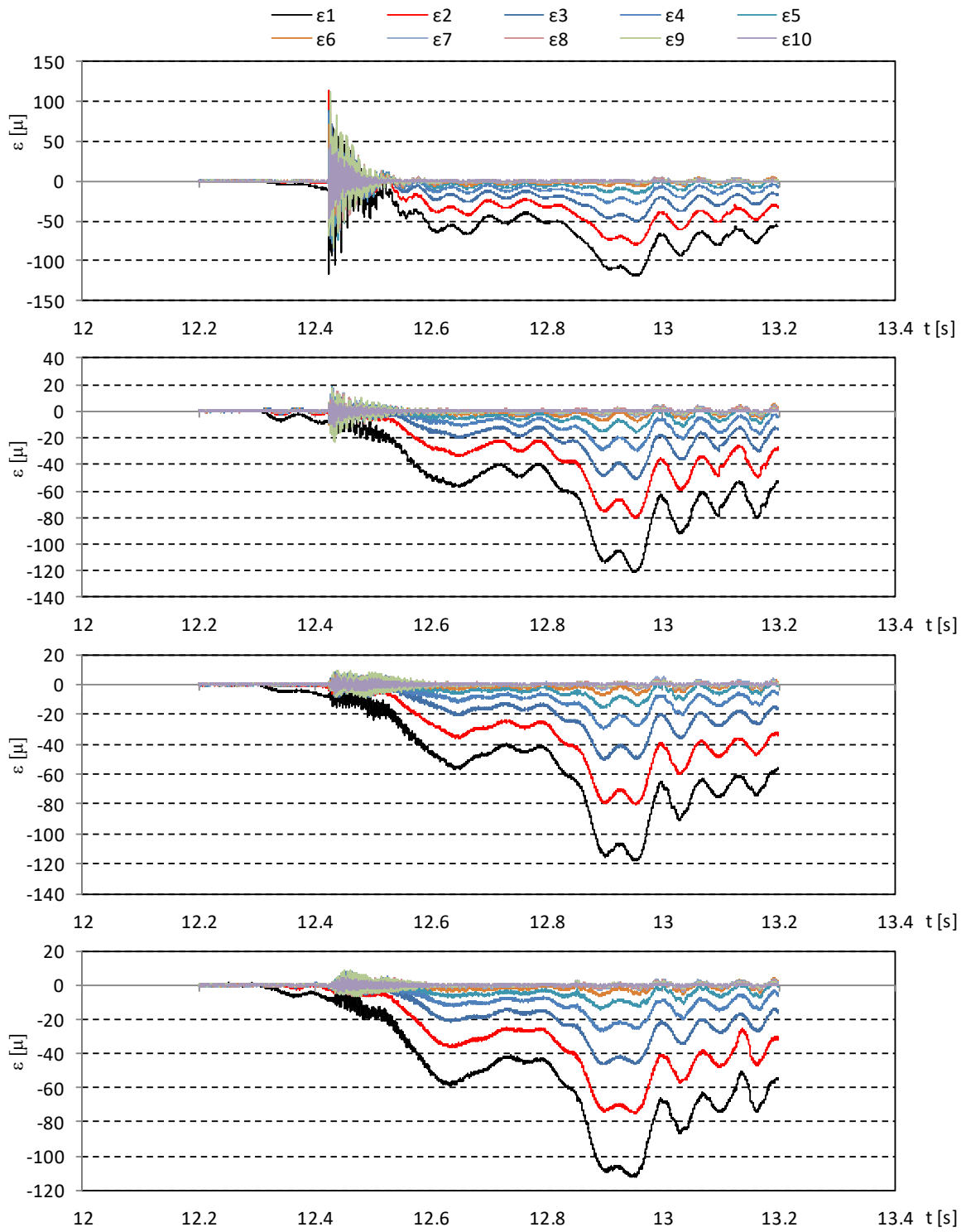


図- 5.2.26 ひずみの時系列 (We30, TypeB, 初期位置 0.5m, 11 回目)

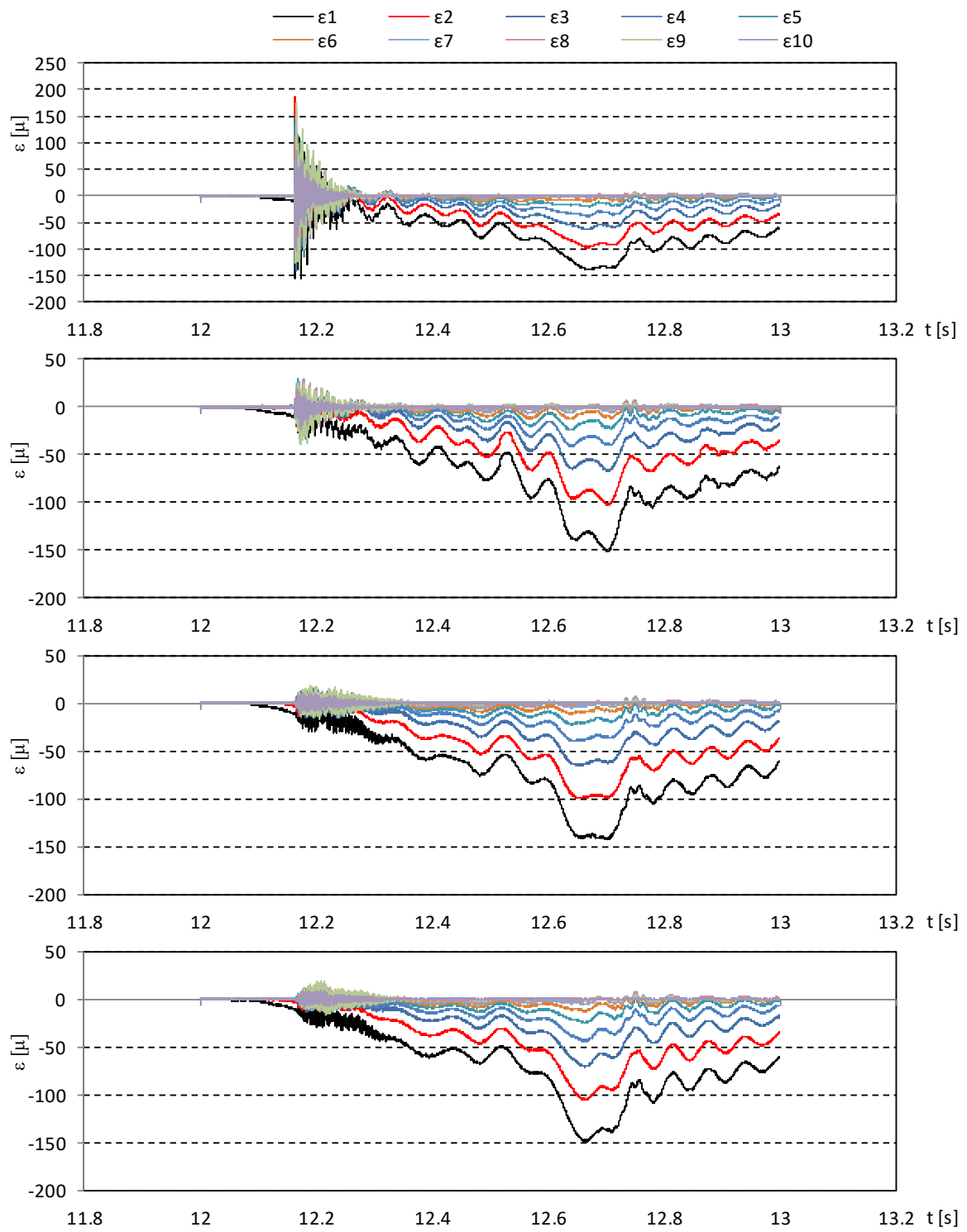


図- 5.2.27 ひずみの時系列 (We40, TypeB, 初期位置 0.5m, 14回目)

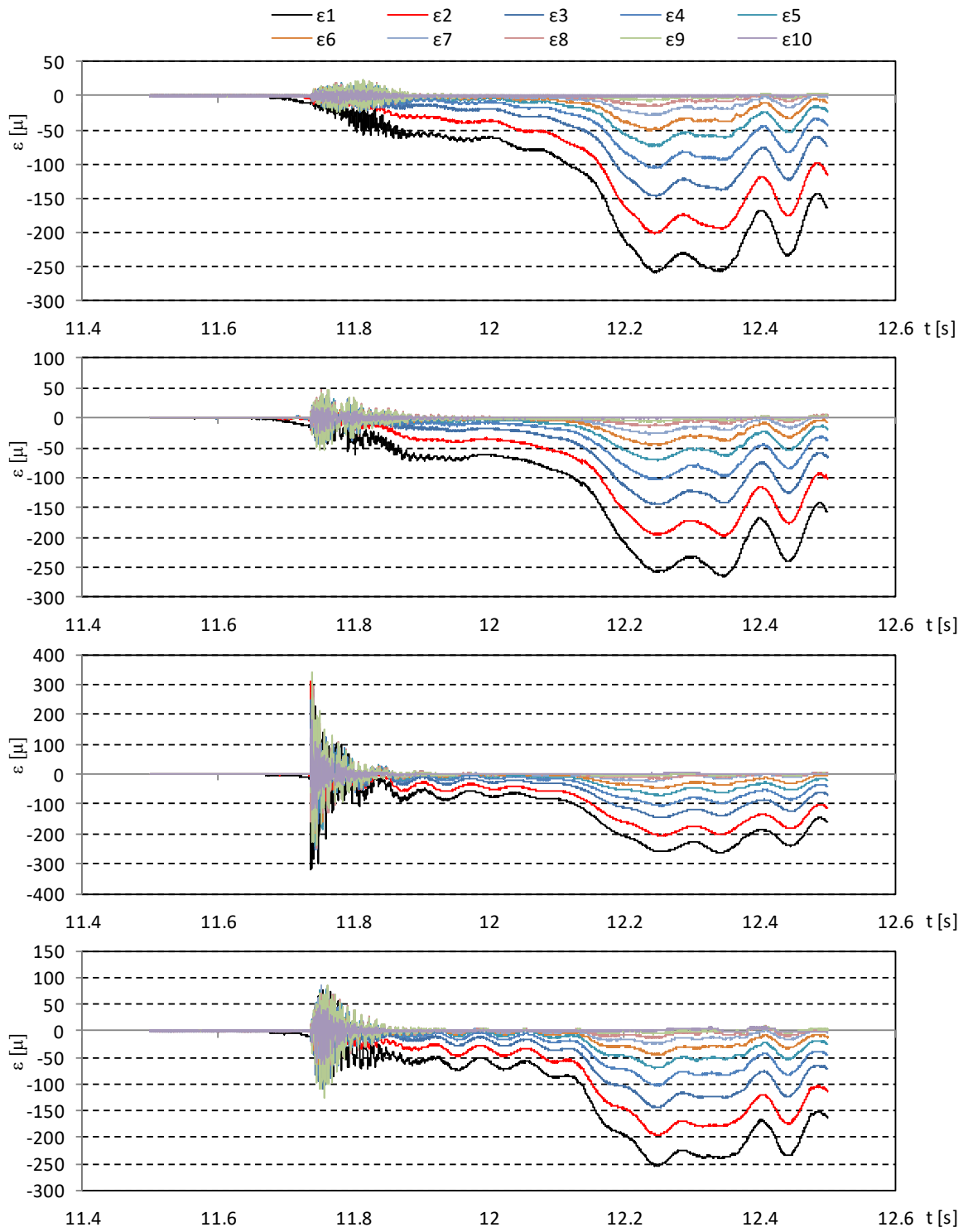


図- 5.2.28 ひずみの時系列 (We20, TypeC, 初期位置 0.1m, 14 回目)

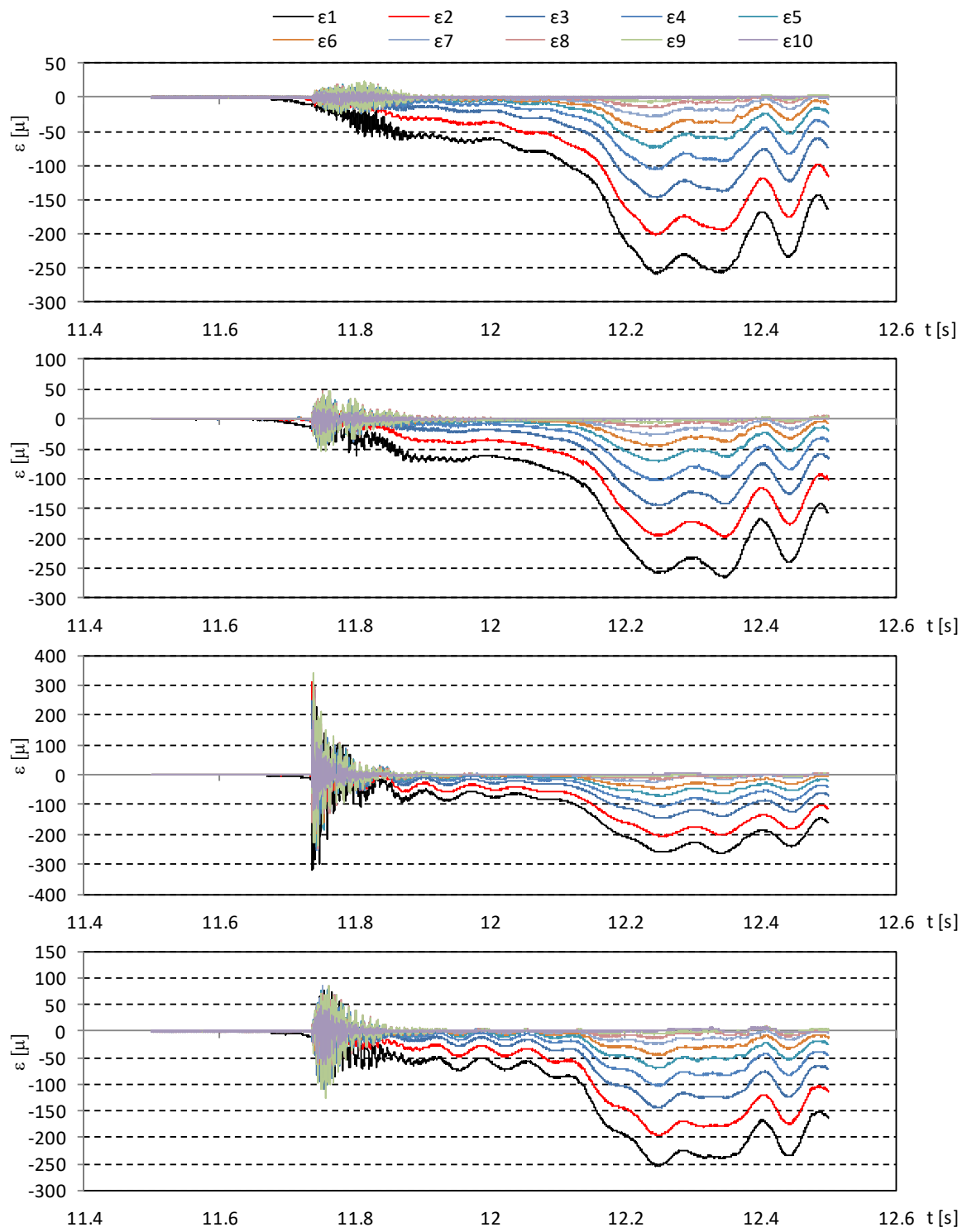


図- 5.2.29 ひずみの時系列 (We20, TypeC, 初期位置 0.5m, 2回目)

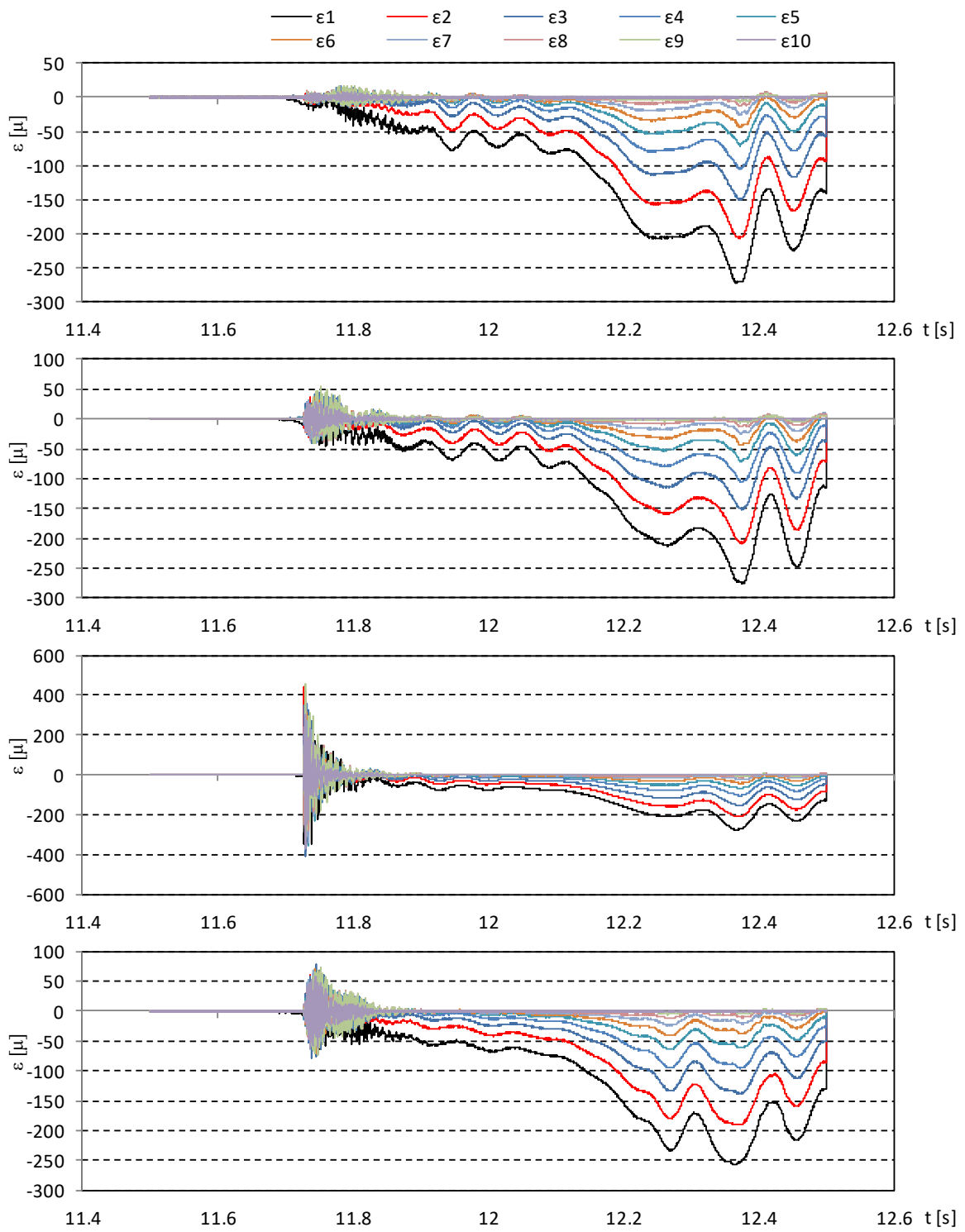


図- 5.2.30 ひずみの時系列 (We20, TypeC, 初期位置 1.0m, 3回目)

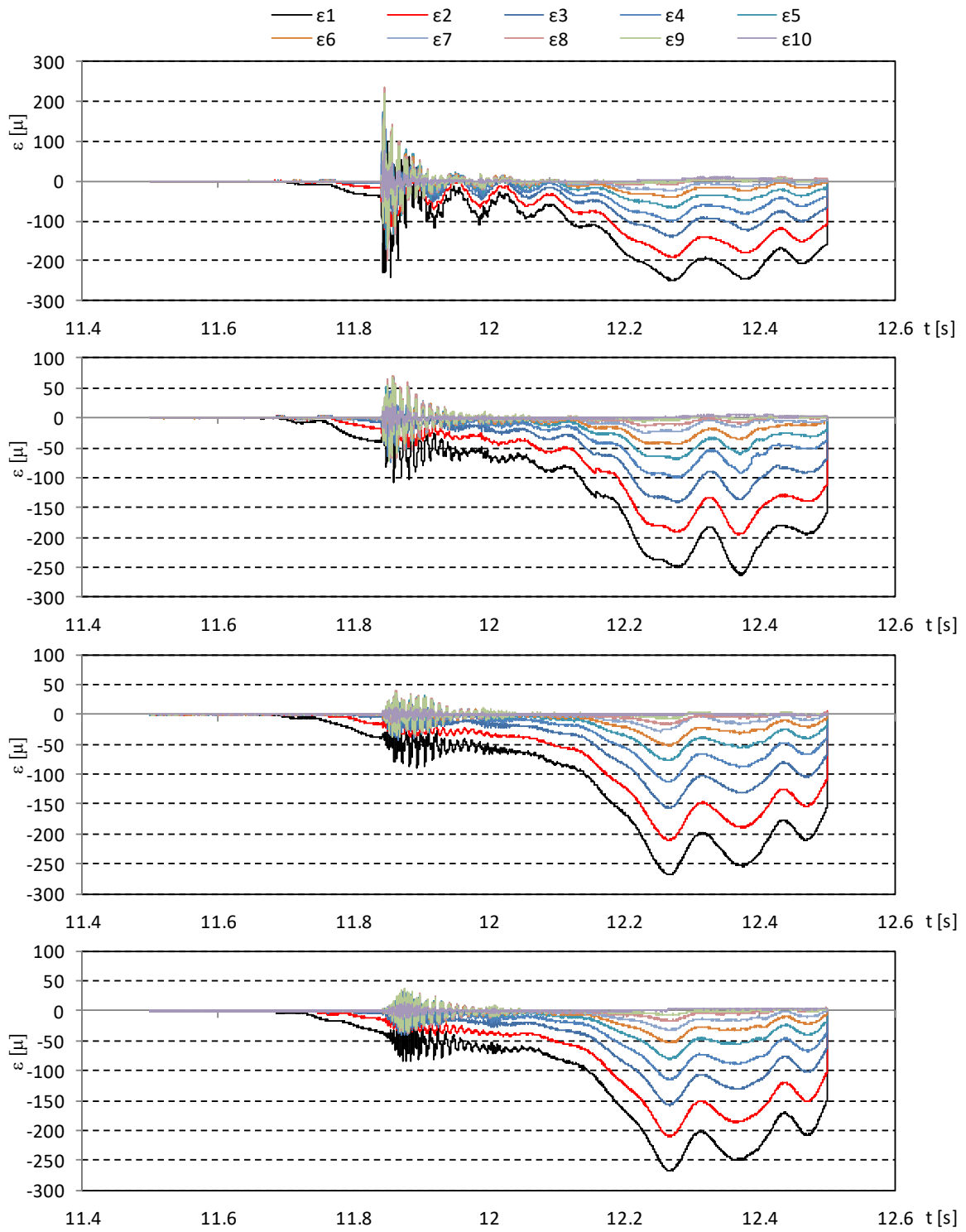


図- 5.2.31 ひずみの時系列 (We20, TypeC, 初期位置 2.0m, 6回目)

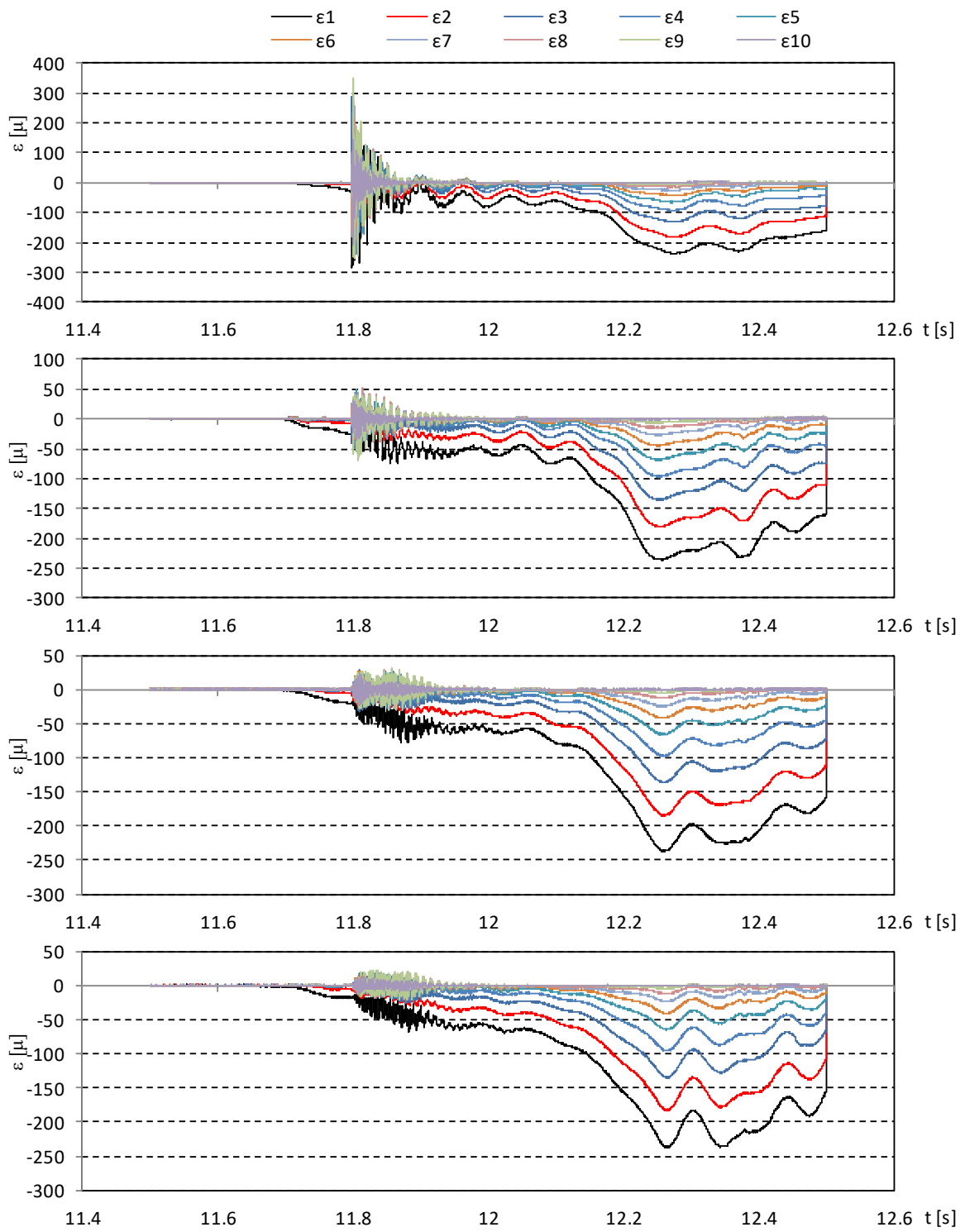


図- 5.2.32 ひずみの時系列 (We20, TypeC, 初期位置 3.0m, 12 回目)

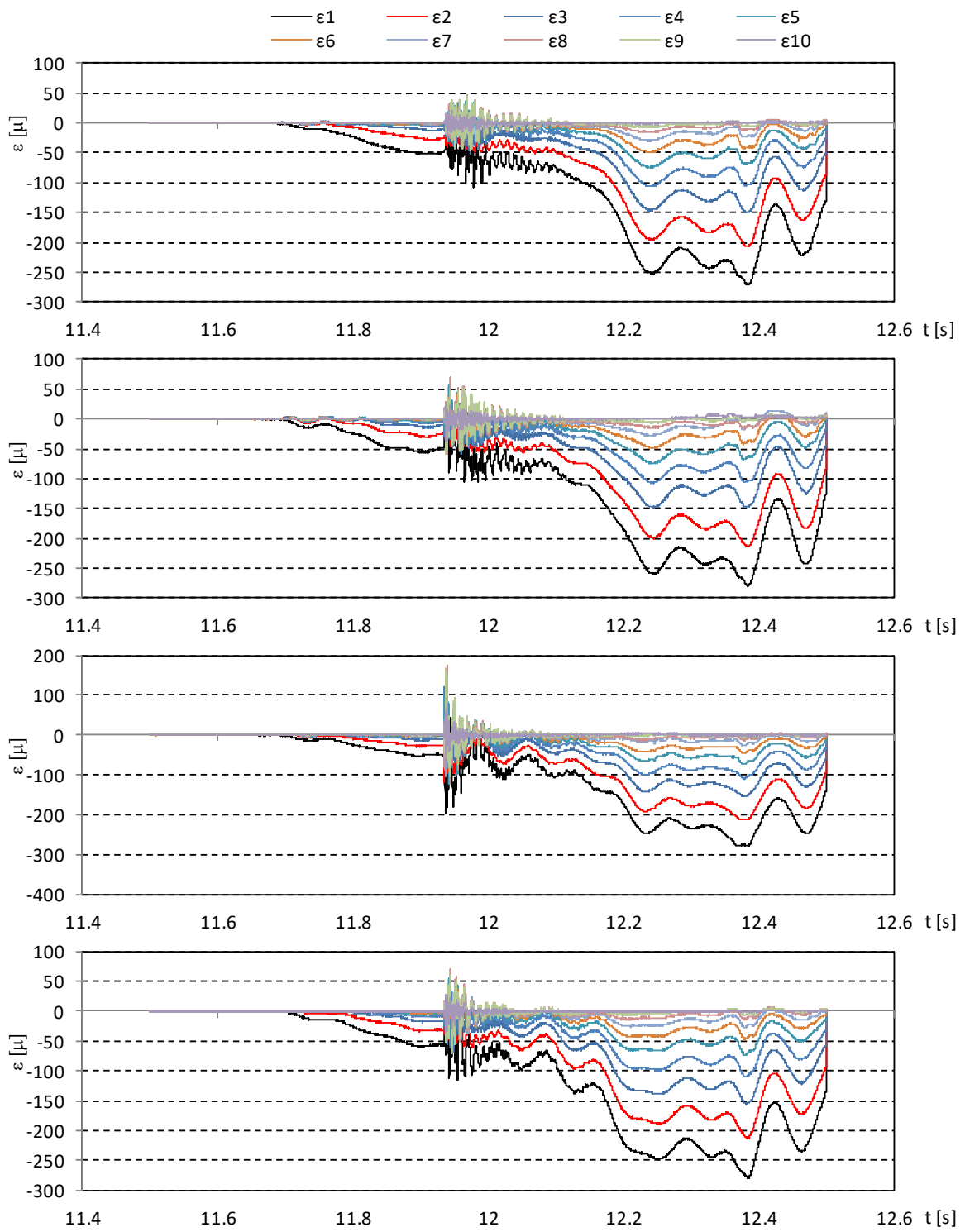


図- 5.2.33 ひずみの時系列 (We20, TypeC, 初期位置 4.0m, 7回目)

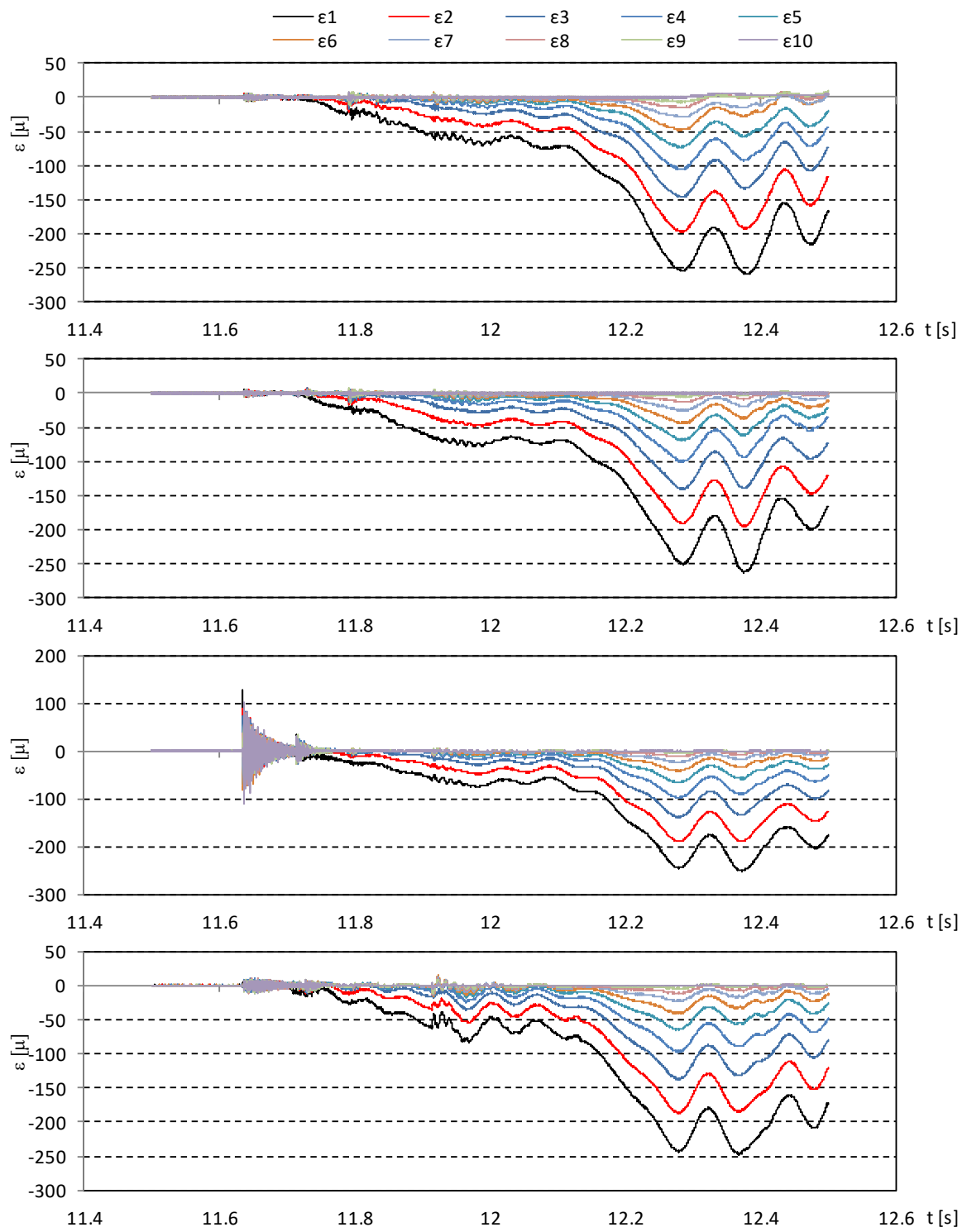


図- 5.2.34 ひずみの時系列 (We20, TypeC, 初期位置 4.5m, 4回目)

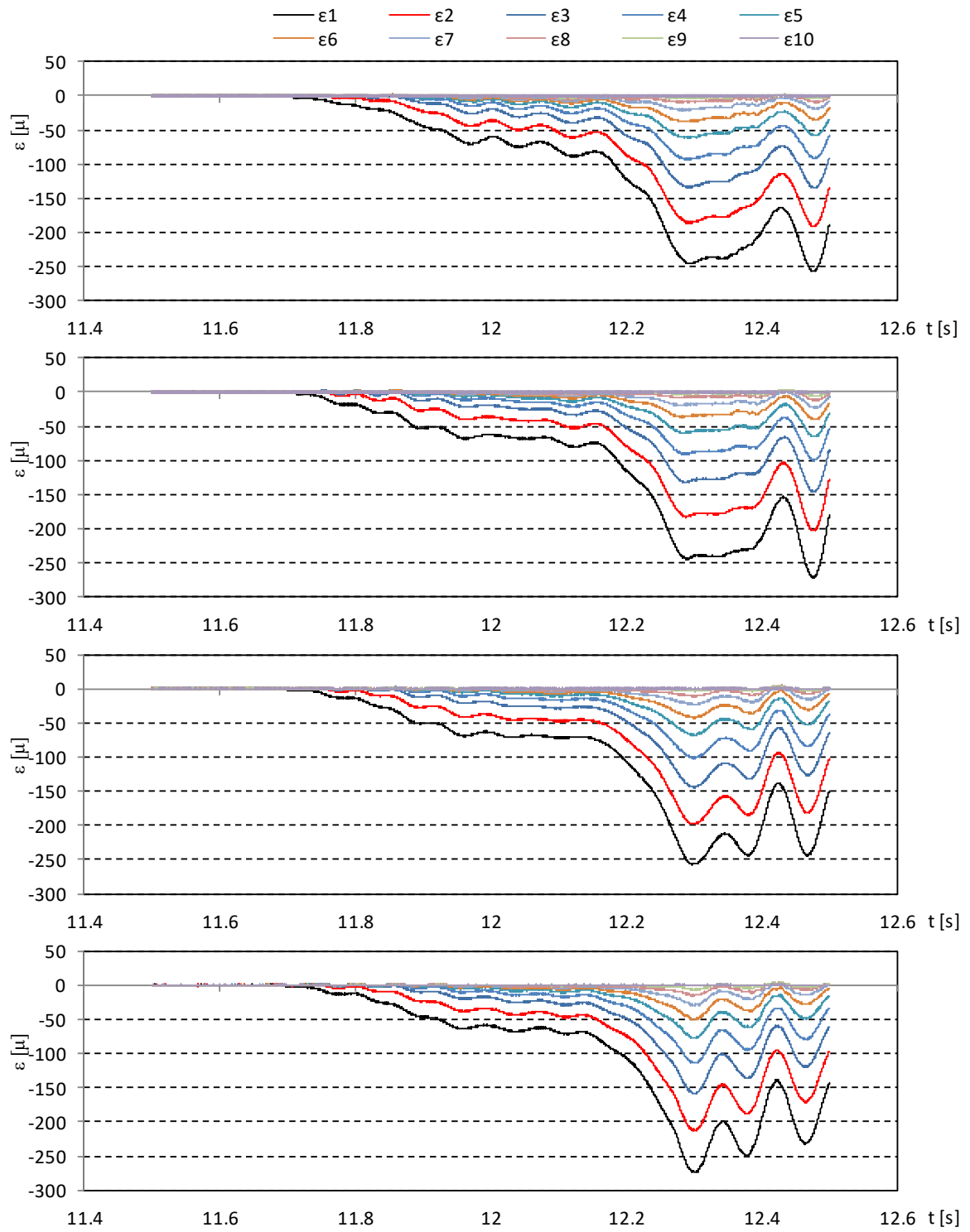


図- 5.2.35 ひずみの時系列 (We20, TypeC, 初期位置 5.0m, 1回目)

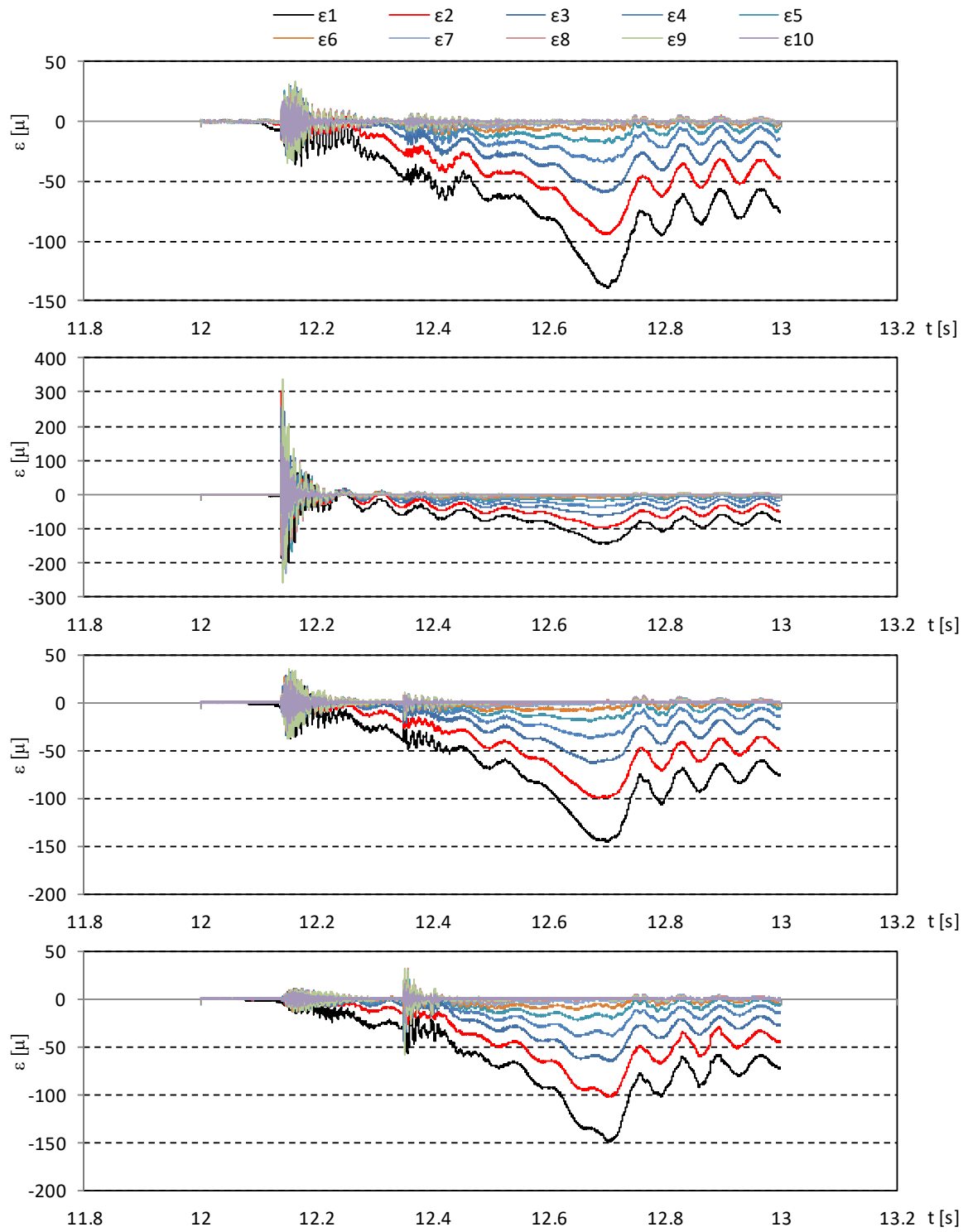


図- 5.2.36 ひずみの時系列 (We40, TypeC, 初期位置 0.1m, 11 回目)

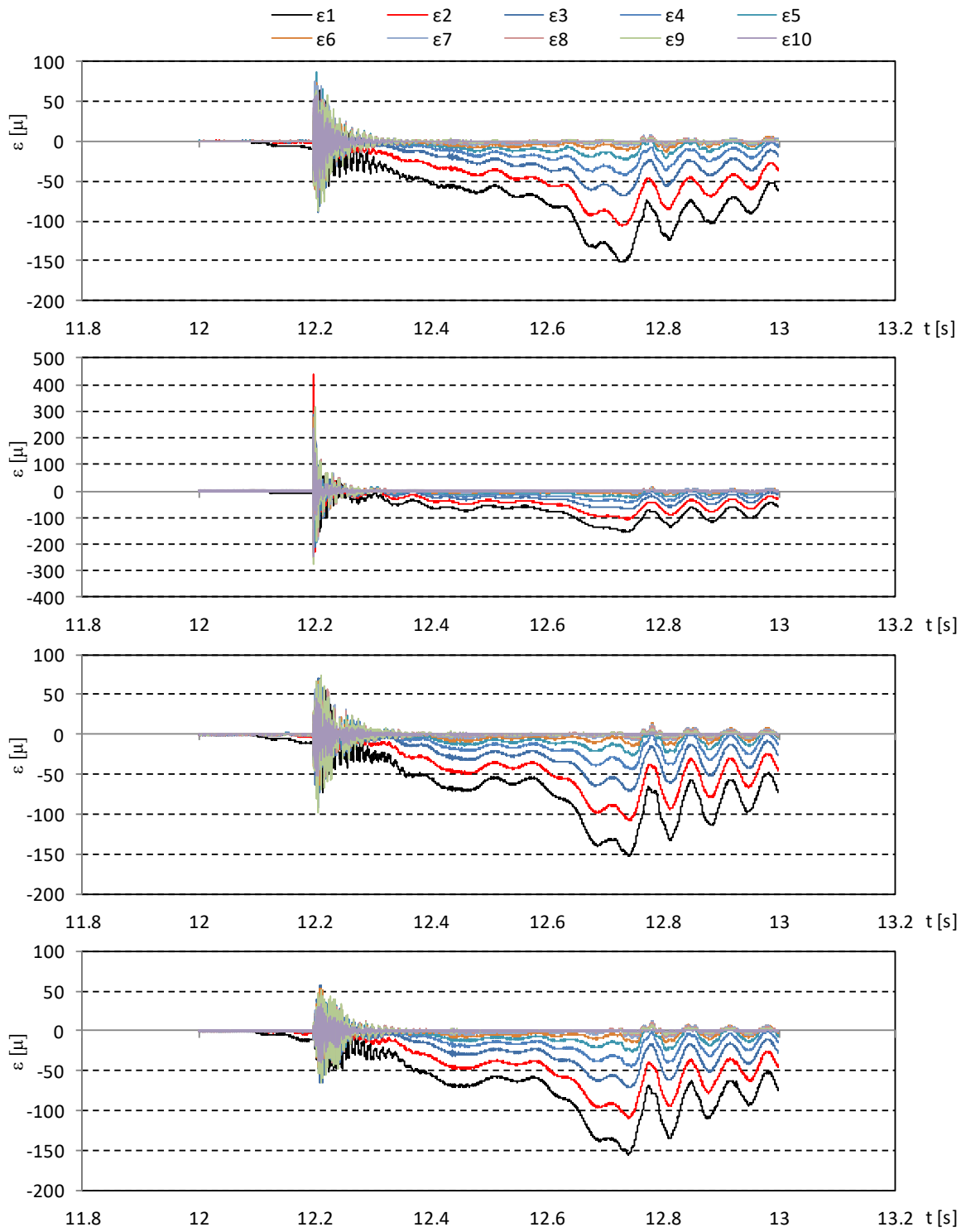


図- 5.2.37 ひずみの時系列 (We40, TypeC, 初期位置 0.5m, 7回目)

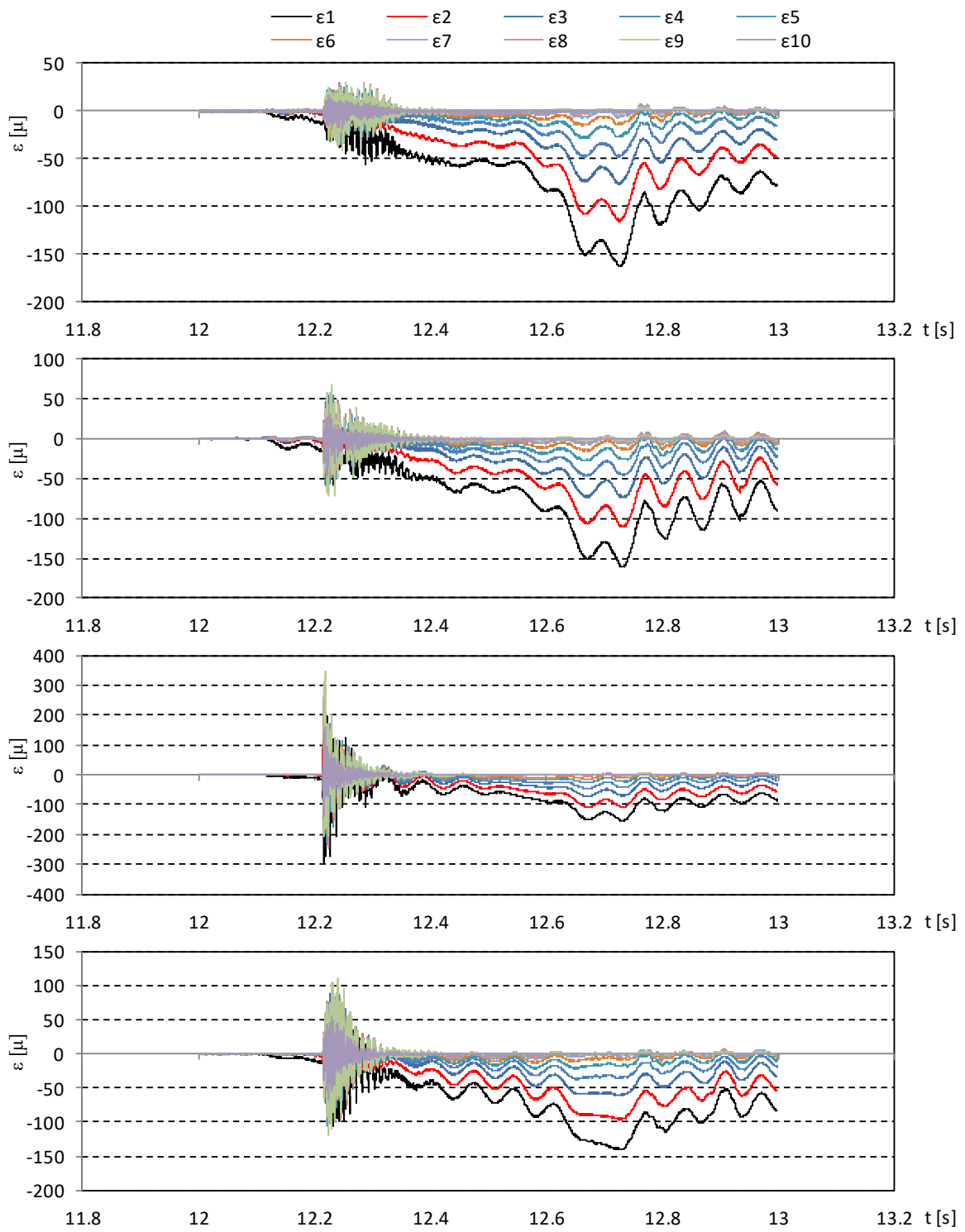


図- 5.2.38 ひずみの時系列 (We40, TypeC, 初期位置 1.0m, 13回目)

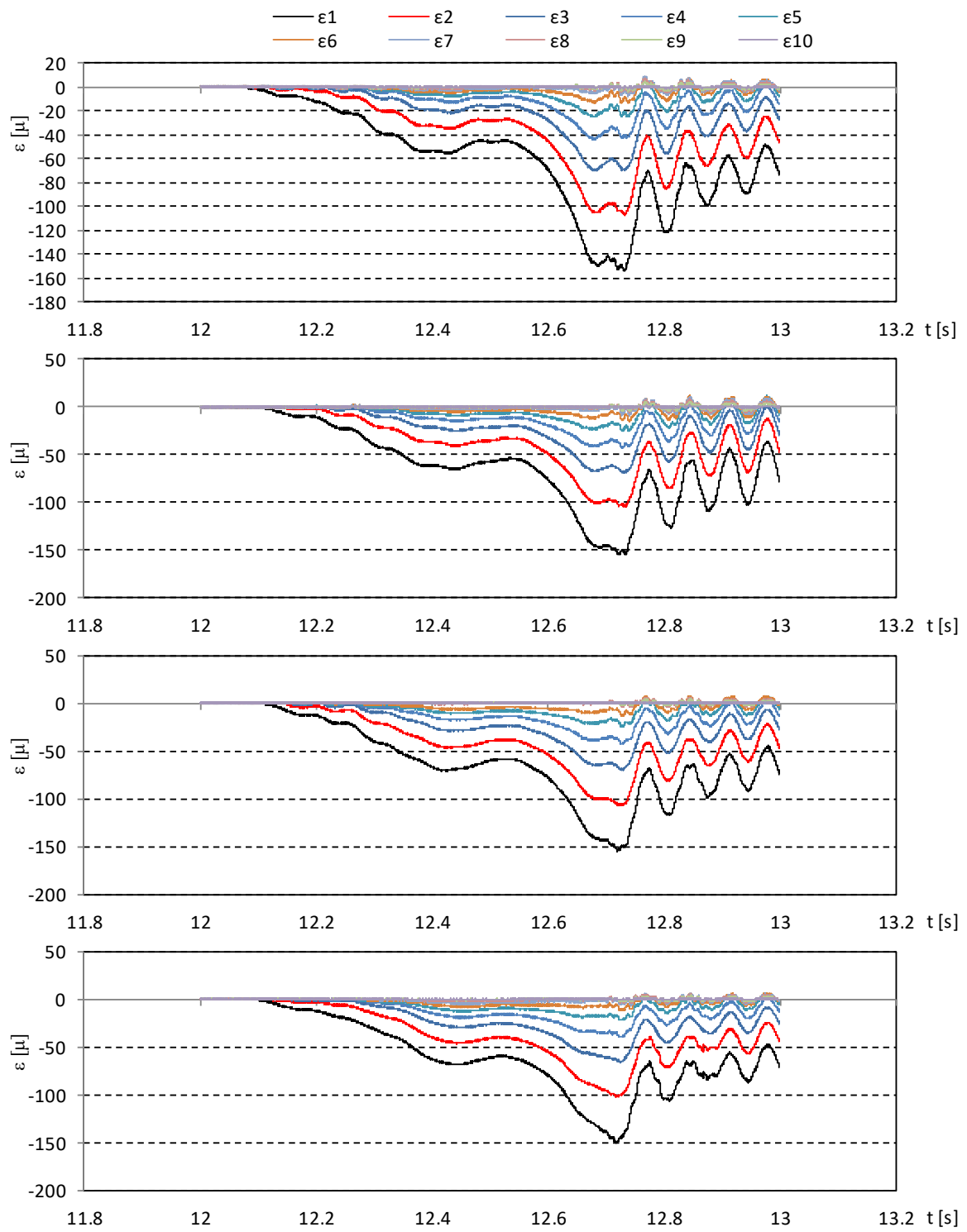


図- 5.2.39 ひずみの時系列 (We40, TypeC, 初期位置 2.0m, 1回目)

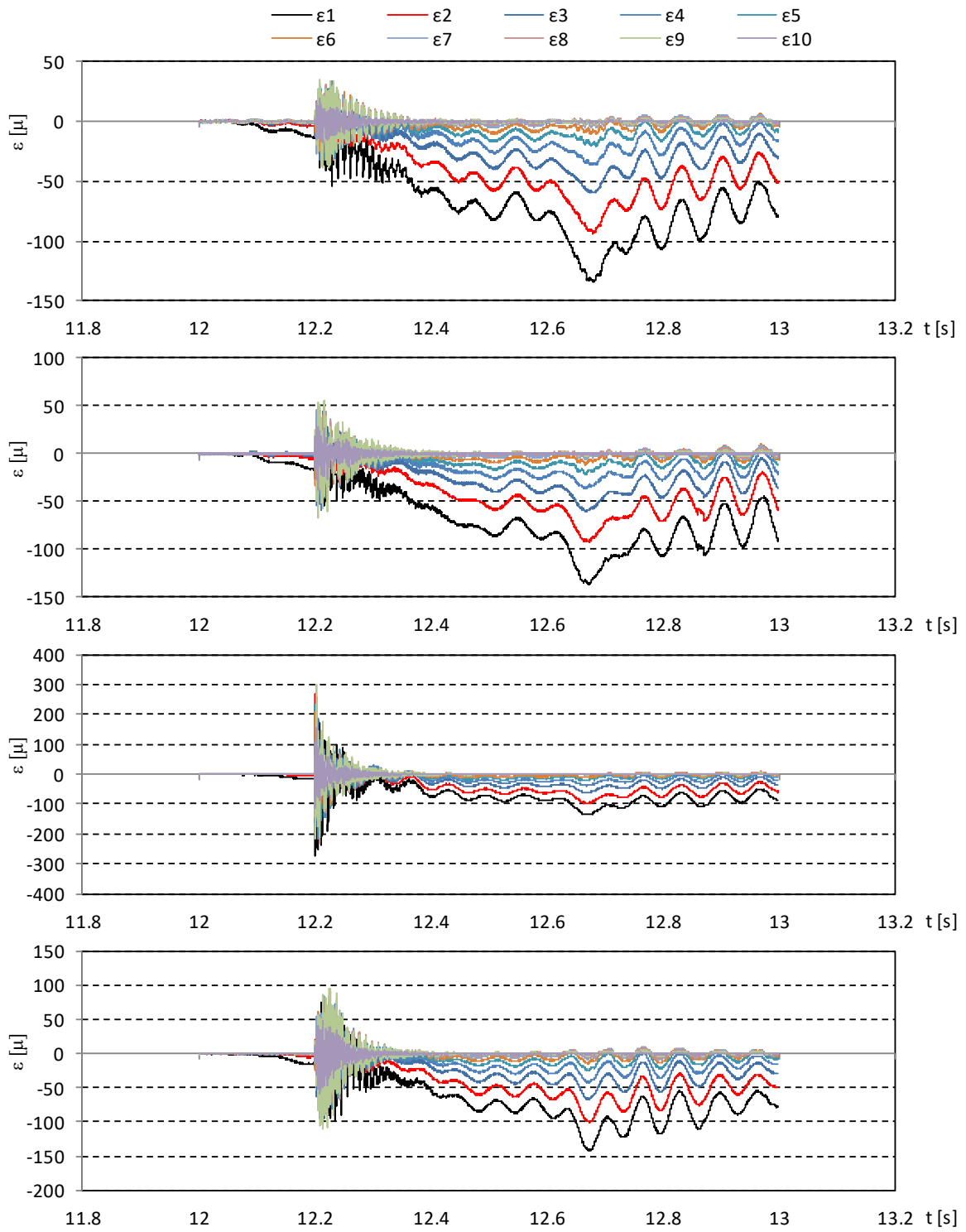


図- 5.2.40 ひずみの時系列 (We40, TypeC, 初期位置 3.0m, 12 回目)

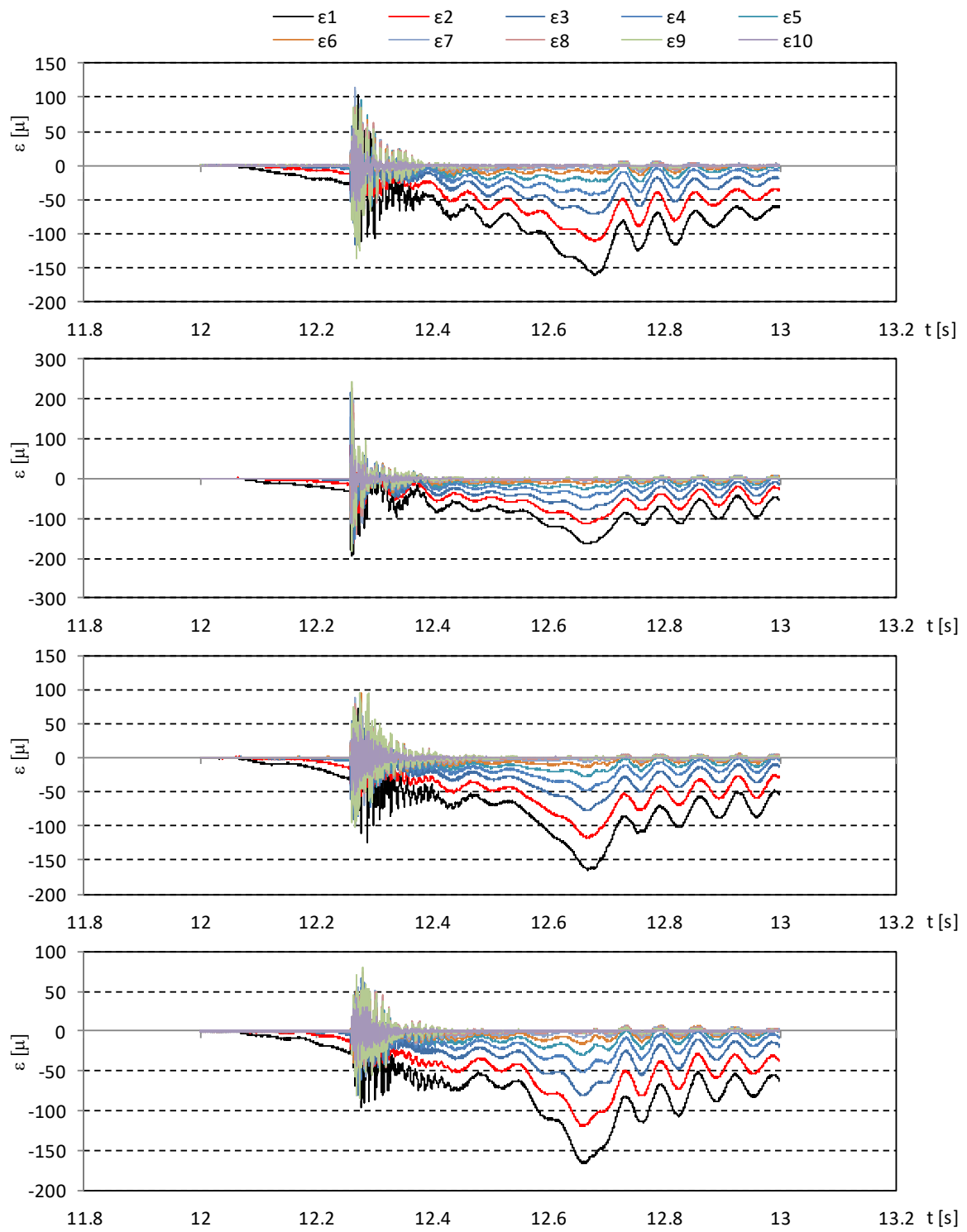


図-5.2.41 ひずみの時系列 (We40, TypeC, 初期位置 3.5m, 8回目)

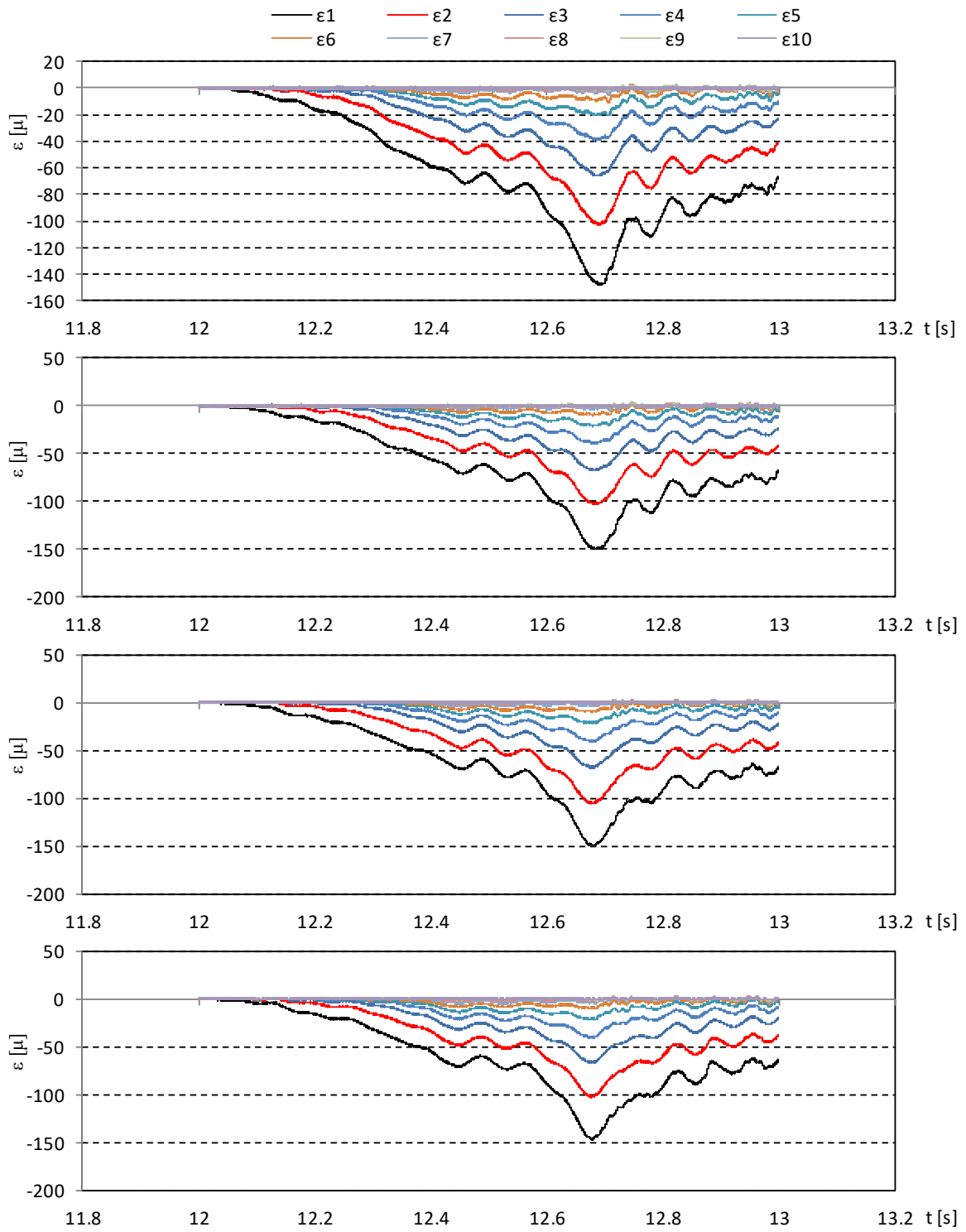


図- 5.2.42 ひずみの時系列 (We40, TypeC, 初期位置 4.0m, 1回目)

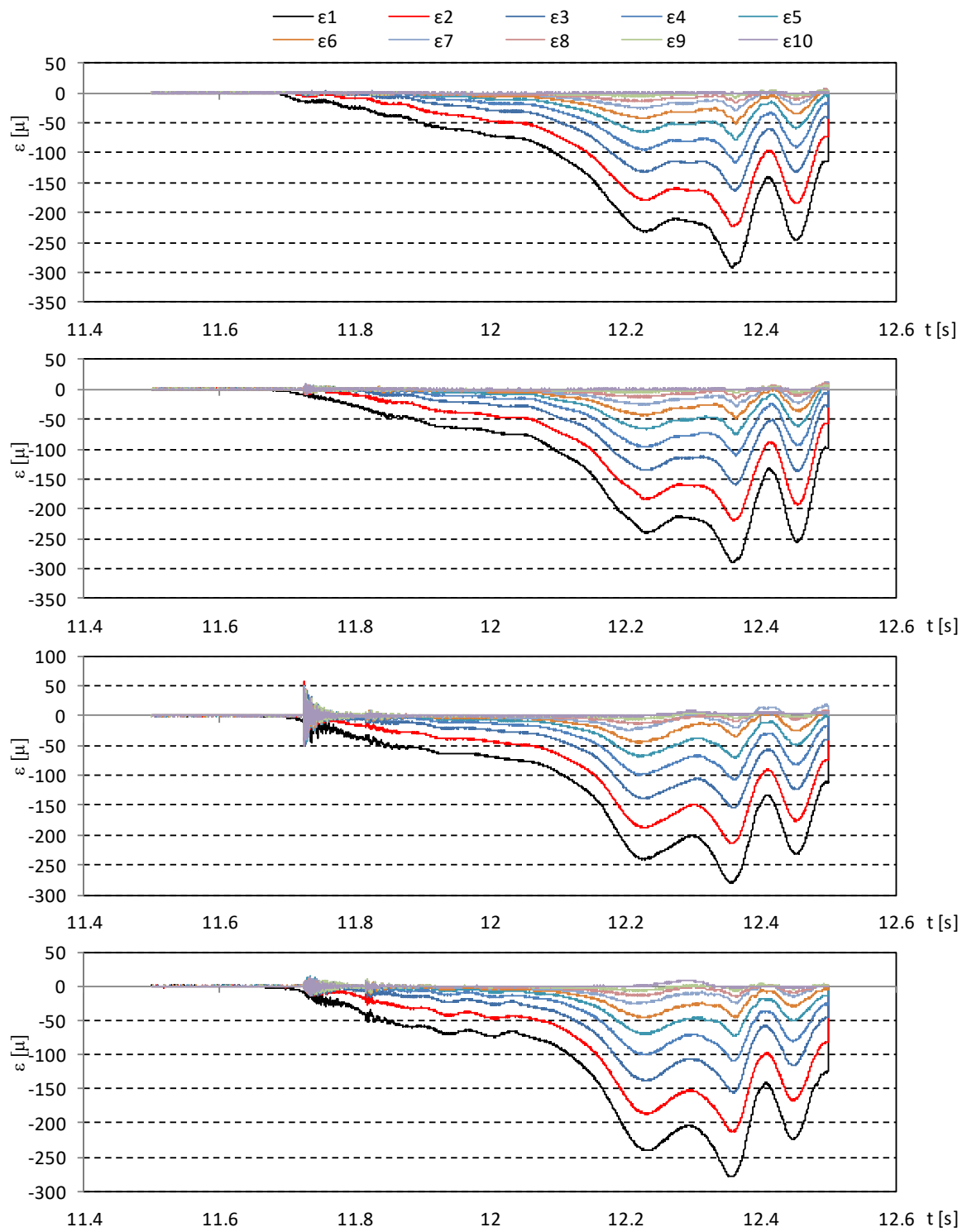


図- 5.2.43 ひずみの時系列 (We20, TypeD, 初期位置 0.5m, 2回目)

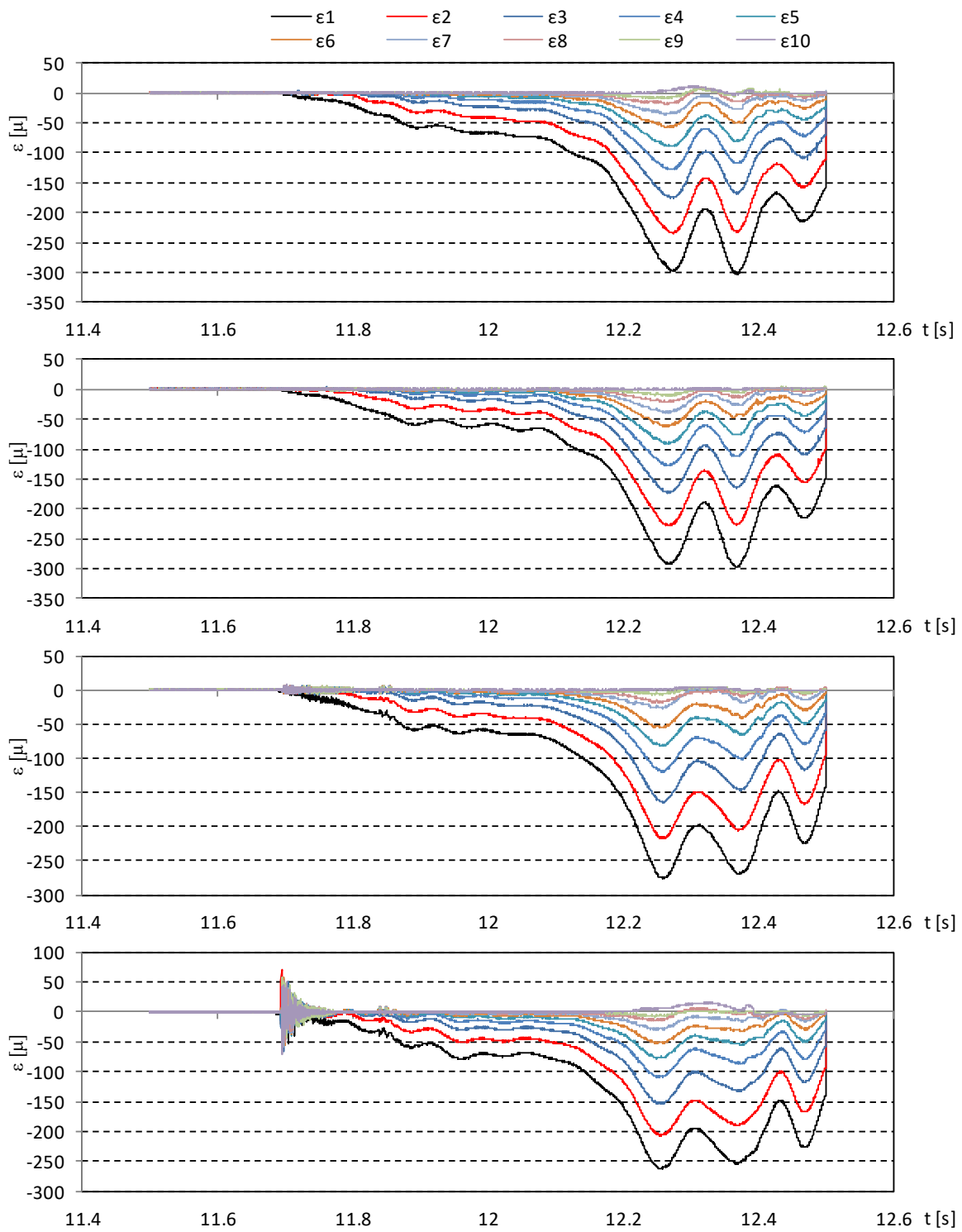


図- 5.2.44 ひずみの時系列 (We20, TypeD, 初期位置 1.0m, 2回目)

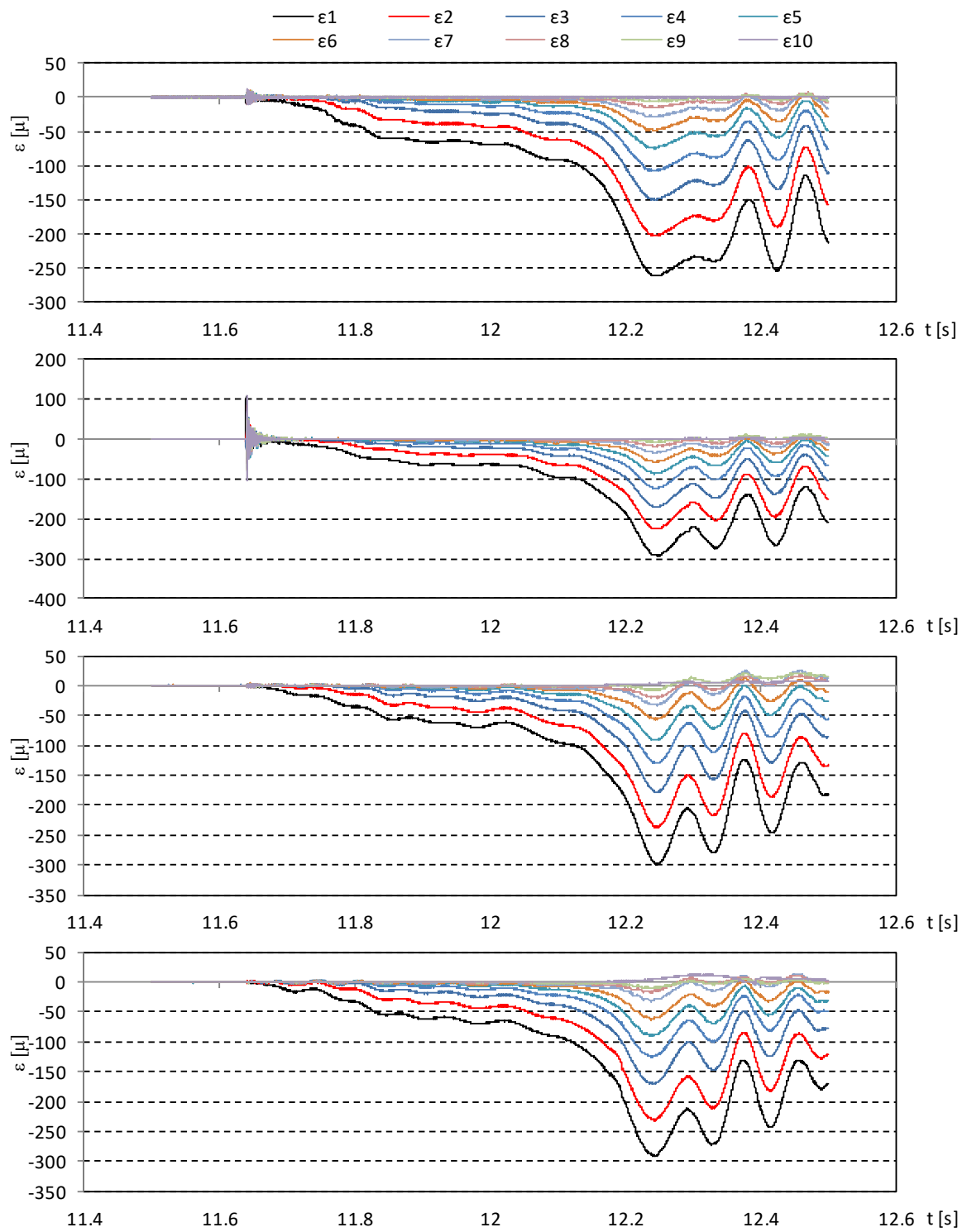


図- 5.2.45 ひずみの時系列 (We20, TypeD, 初期位置 1.5m, 11 回目)

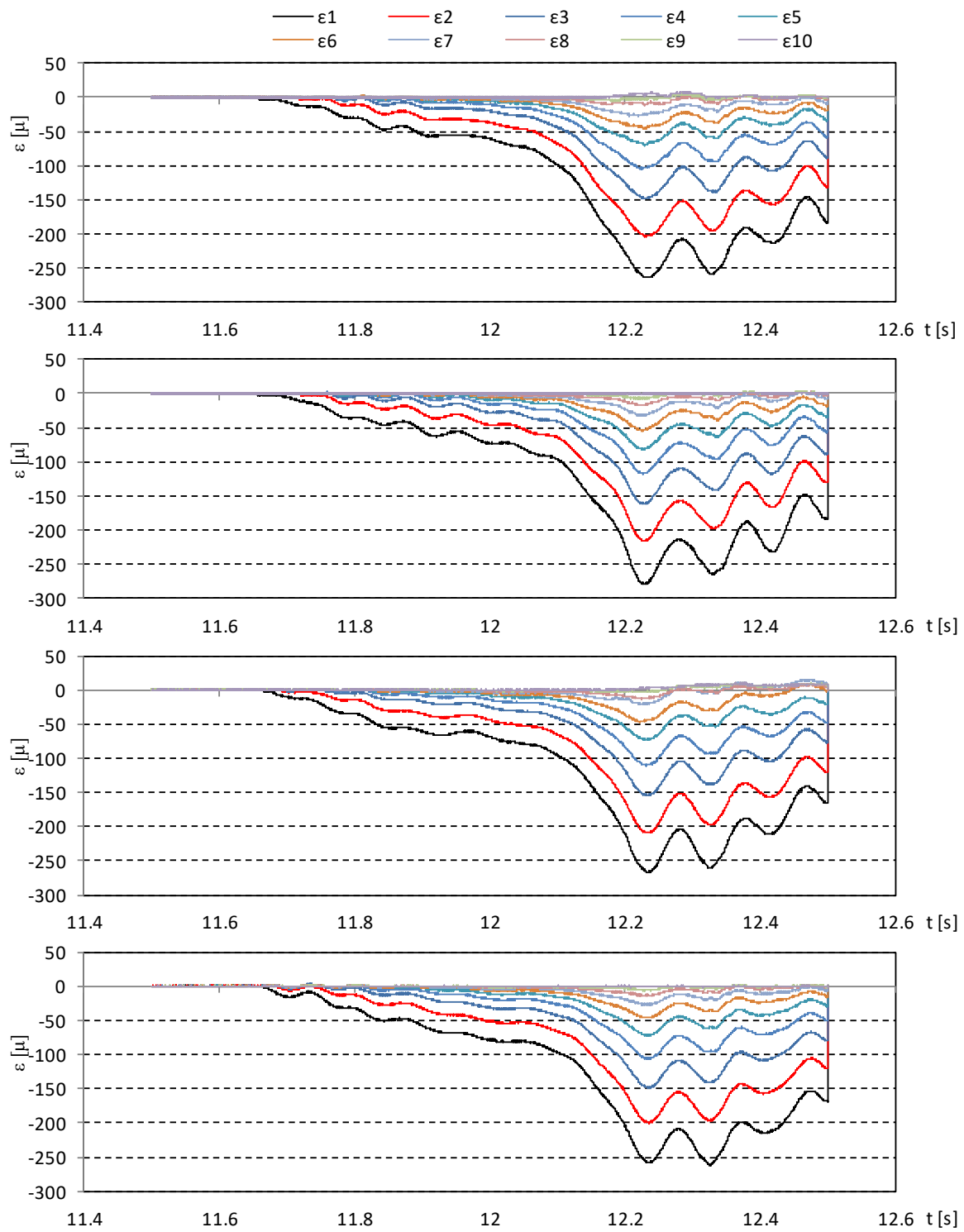


図- 5.2.46 ひずみの時系列 (We20, TypeD, 初期位置 2.0m, 1回目)

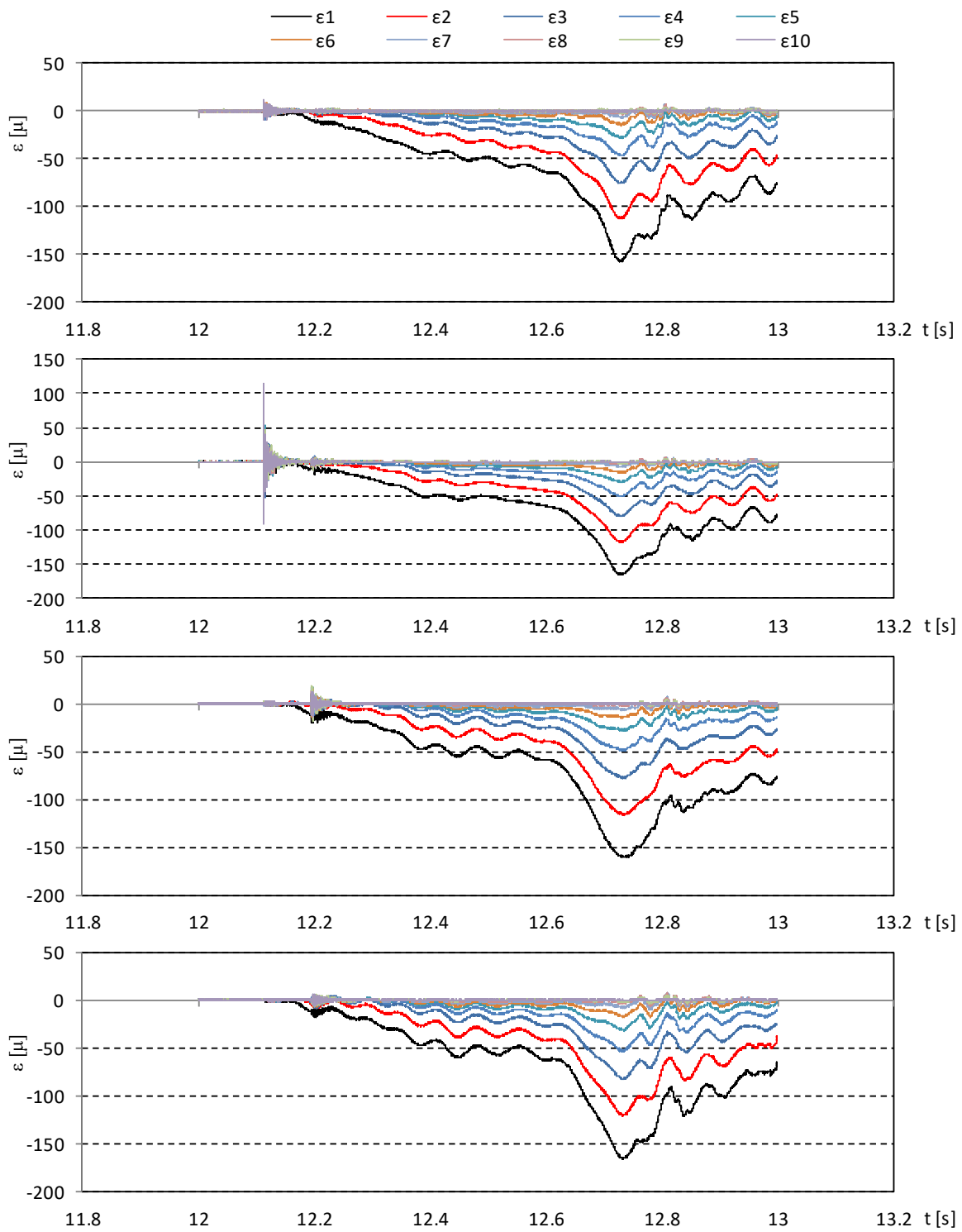


図- 5.2.47 ひずみの時系列 (We40, TypeD, 初期位置 0.5m, 4回目)

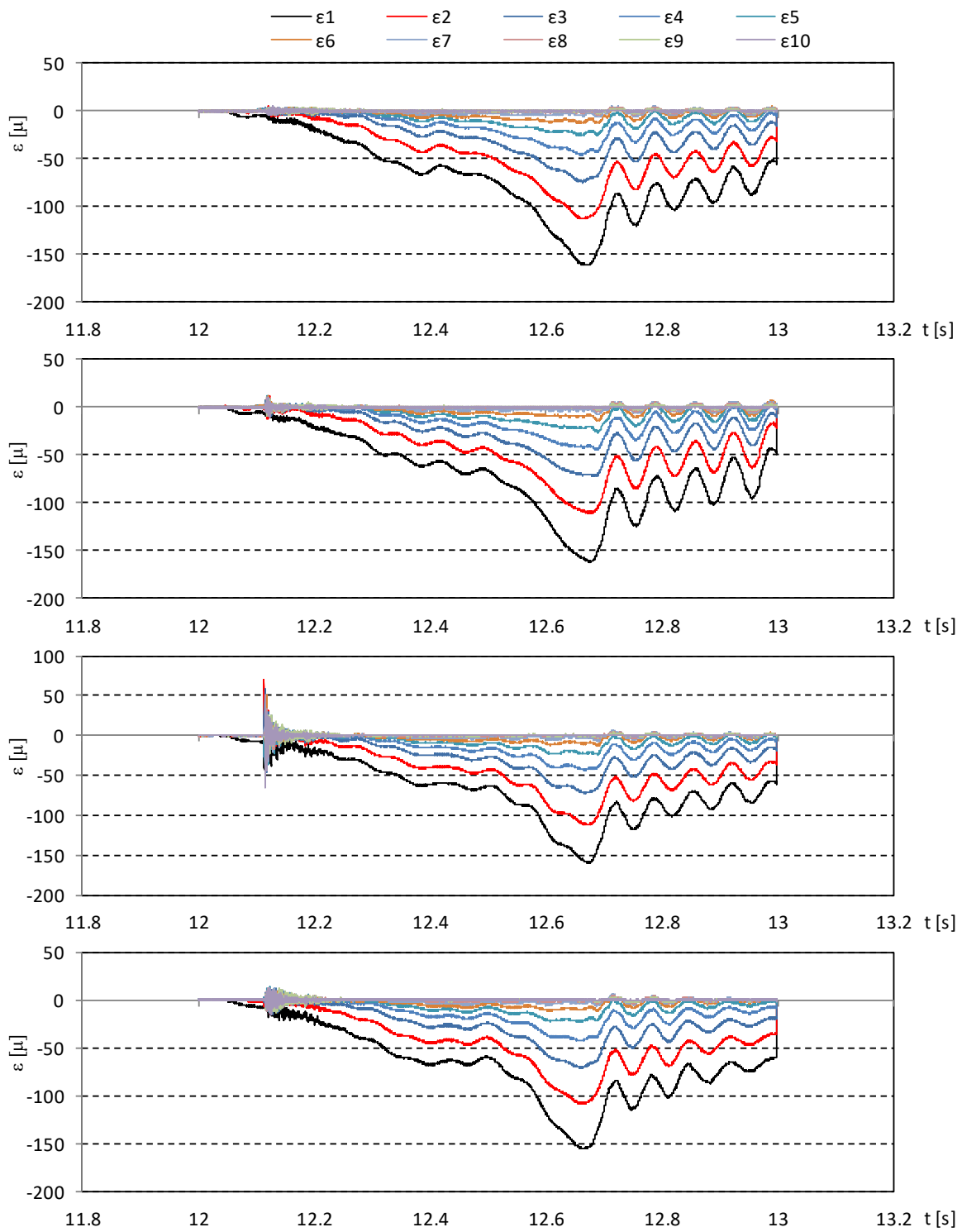


図- 5.2.48 ひずみの時系列 (We40, TypeD, 初期位置 1.0m, 8回目)

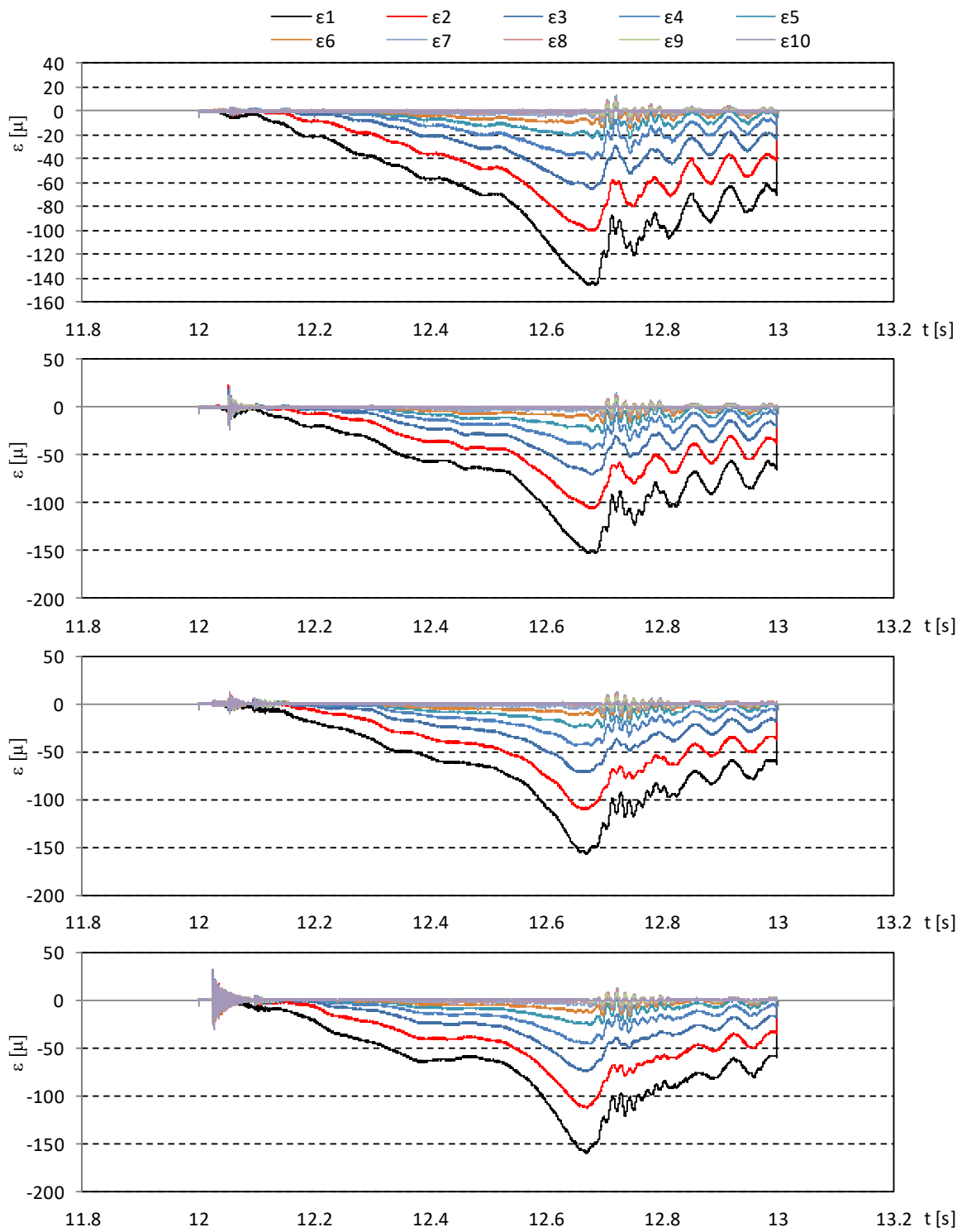


図- 5.2.49 ひずみの時系列 (We40, TypeD, 初期位置 2.0m, 8回目)

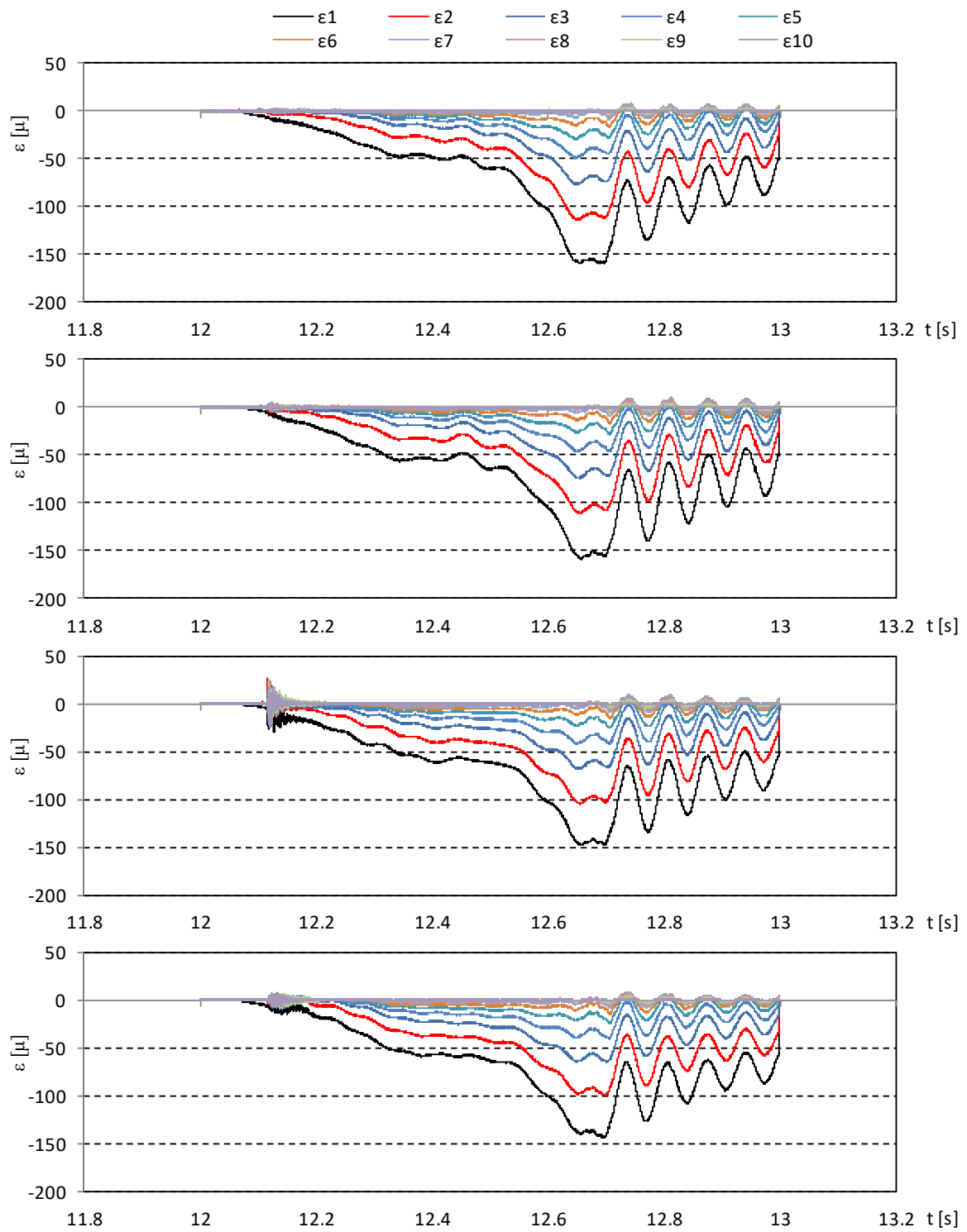


図- 5.2.50 ひずみの時系列 (We40, TypeD, 初期位置 2.5m, 10回目)

5.3. ひずみエネルギー

気中衝突試験と同様に、ひずみの計測結果鉛直分布より、衝突により生じたひずみエネルギーを算出した時系列結果を、図-5.3.1～図-5.3.42に示す。ただし、各ケースにおいてもっともひずみエネルギーが大きかった試行回の結果を示した。なおここに示したひずみエネルギーは、波圧によるひずみを含んだものであり、図中には4枚の板のひずみエネルギー時系列を示した。前述のひずみの時系列結果によれば、衝突した板以外の板にも振動が生じているが、そのひずみエネルギーは、衝突した板に対して十分小さいことが分かる。また、他の3枚の板のひずみエネルギーが相対的に十分小さいことから、衝突によるひずみエネルギーに対して波圧によるひずみエネルギーは無視できる程度に小さいと考えることが出来る。そこで、ここに示したひずみエネルギーは、波圧の影響を含んだものではあるがその影響は無視出来ると仮定し、これを衝突によるひずみエネルギーとして以降では解析する。衝突した板について、ひずみエネルギーの最大値を、表-5.3.1にまとめる。

気中における堤体模型の固有周期は、1次モードから4次モードまでそれぞれ、0.0528, 0.0084, 0.0030, 0.0015 s であり、ひずみエネルギーの振動はこの1/2周期となることから、それぞれ0.0264, 0.0042, 0.0015, 0.0008 sとなる。水中では、動水圧が生じるためにこれよりも若干固有周期は長くなると考えられるが、試験結果によれば、気中試験と同じように2次モードと3次モードで主に振動しており、試験ケースによっては4次モードが卓越していることが分かる。

表- 5.3.1 堤体に働く衝突ひずみエネルギー

(a) TypeA

波形	Type	初期位置																($\times 10^{-2}$ J)		
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	平均	最大	最小
We10	A	0.1	2.96	0.11			2.29	0.28	0.65	0.02	0.03	1.12	1.26	0.99	2.82	2.62	0.13	1.18	2.96	0.02
We10	A	0.5	1.8	0.95	0.68	0.16	4.04	4.03	0.15	4.05	3.85	0.49	1.11	6.44	6.44	0.87		2.02	4.56	0.02
We10	A	1	3.22	3.93	5.42	0.15												3.45	6.44	0.15
We10	A	2		2.26	0.02	9.97	9.97	0.94	0.53			0.03		0.03	0.01	0.62		2.44	9.97	0.01
We10	A	2.5		0.69		2.56		0.35	4.31									1.98	4.31	0.35
We10	A	3	3.2										0.01					1.61	3.2	0.01
We10	A	3.5																0	0	0
We20	A	0.1	4.86	0.4		0.24		0.19	4.65	0.46	4.1	4.4	0.68	4.17			5.43	2.69	5.43	0.19
We20	A	0.5	1.76	0.27	1.7	4	8.64	6.23	2.89	0.59	0.1	1.97	0.01	1.9	3.2	0.42	3.7	2.49	8.64	0.01
We20	A	1		4.37	2.01			0.03	0.01	0.48		3.54	7.07	3.21		3.85	0.01	2.46	7.07	0.01
We20	A	2	3.29		0.38			2.67							0.6			1.73	3.29	0.38
We20	A	3	1.13				0.11	0.19	1	3.05				1.67			0.49	1.09	3.05	0.11
We20	A	3.5																0	0	0
We30	A	0.1	0.96	0.18	0.55	0.1	0.14	1.48	0.84		1.97	0.62	2.79	0.32	0.23	2.24	1.36	0.99	2.79	0.1
We30	A	0.5	0.02	0.01	1.31		1.38		1.31	3.25	0.02	0.02	3.02	0.96	1.13		0.28	1.06	3.25	0.01
We30	A	1	4.46	0.3				3.28		0.27		0.05	0.19	0.77	0.04	0.01	0.12	0.95	4.46	0.01
We30	A	1.5									0.03			0.06				0.04	0.06	0.03
We30	A	2																0	0	0
We40	A	0.1	0.85	0.02		0.25	2.74	0.78	0.44	0.61	0.85	2.03	1.9	0.02	0.15	3.22	0.89	1.05	3.22	0.02
We40	A	0.5	4.98	0.06	2.93	0.03	1.74	2.82	1.15	2.67	2.18	0.1	0.29	2.42		0.01	0.5	1.56	4.98	0.01
We40	A	1	0.55	0.1		0.02		0.02	0.05		0.23		0.01		0.02		0.02	0.11	0.55	0.01
We40	A	2						0.03		0.01								0.02	0.03	0.01
We40	A	2.5																0	0	0

(b) TypeB

波形	Type	初期位置																($\times 10^{-2}$ J)		
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	平均	最大	最小
We10	B	0.5			1.32	0.31	0.91	0.06	0.11	0.01		1.12		5.22	3.05	0.08		1.22	5.22	0.01
We20	B	0.5		0.04			0.05		0.03	0.05		0.17	0.26	0.04	0.32	4.6	1.27	0.68	4.6	0.03
We30	B	0.5			0.48	0.29		0.08	0.01	0.01	0.59		0.72		0.11	0.44		0.3	0.72	0.01
We40	B	0.5	0.06	0.17	0.06	1.21	0.02	0.32	1.28		0.15	0.02	0.32		0.02	1.81		0.45	1.81	0.02

表- 5.3.1 堤体に働く衝突ひずみエネルギー (つづき)

(c) TypeC

波形	Type	初期位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	平均	最大	最小
We20	C	0.1	2.8	2.28		3.11	0.03		2.64	0.87	5.03	0.34	5.25	5.58	0.07	6.48	1.25	2.75	6.48	0.03
We20	C	0.5	2.88	4.26	0.03	0.66		0.11	0.04	1.22	0.09	0.04	2.25	2.18	0.68	2.95		1.34	4.26	0.03
We20	C	1	0.82		12.8		8.43	8.02	10.5	1.2	6.48	9.16	0.43	0.1	0.1	5.52		5.3	12.8	0.1
We20	C	2				0.04		4.26										2.15	4.26	0.04
We20	C	3	0.11					1.91					0.06	6.59				2.17	6.59	0.06
We20	C	4							1.96			0				0.02		0.66	1.96	0
We20	C	4.5				0.5												0.5	0.5	0.5
We20	C	5																0	0	0
We40	C	0.1	0.14	0.73	4.04	1.07	0.41	3.35	3.45	0.21	2.79	3.77	5.94	3.19	0.1	3.71	3.49	2.43	5.94	0.1
We40	C	0.5	5.83	4.61	3.69	4.22	3.17		6.32	0.9	2.91		2.93	0.04	2.2	1.72	3.61	3.24	6.32	0.04
We40	C	1	0.57	0.25			2.49		5.55		2.41		0.89	0.04	6.19		3.26	2.41	6.19	0.04
We40	C	2																0	0	0
We40	C	3												4.47				4.47	4.47	4.47
We40	C	3.5	0.46							3.58								2.02	3.58	0.46
We40	C	4																0	0	0

(d) TypeD

($\times 10^{-2}$ J)

波形	Type	初期位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	平均	最大	最小
We20	D	0.5	0.042	0.173	0.004								0.070	0.039		0.078		0.068	0.173	0.004
We20	D	1		0.268	0.116		0.016	0.026			0.029		0.018	0.033		0.073	0.026	0.067	0.268	0.016
We20	D	1.5		0.065				0.244		0.059			0.489	0.039		0.004	0.005	0.129	0.489	0.004
We20	D	2																0.000	0.000	0.000
We40	D	0.5	0.003	0.167	0.247	0.470	0.235	0.069	0.036	0.011		0.016	0.012	0.251	0.296			0.151	0.470	0.003
We40	D	1	0.019		0.002	0.177			0.008	0.189			0.157					0.092	0.189	0.002
We40	D	2								0.040							0.002	0.021	0.040	0.002
We40	D	2.5										0.047	0.006	0.008				0.020	0.047	0.006

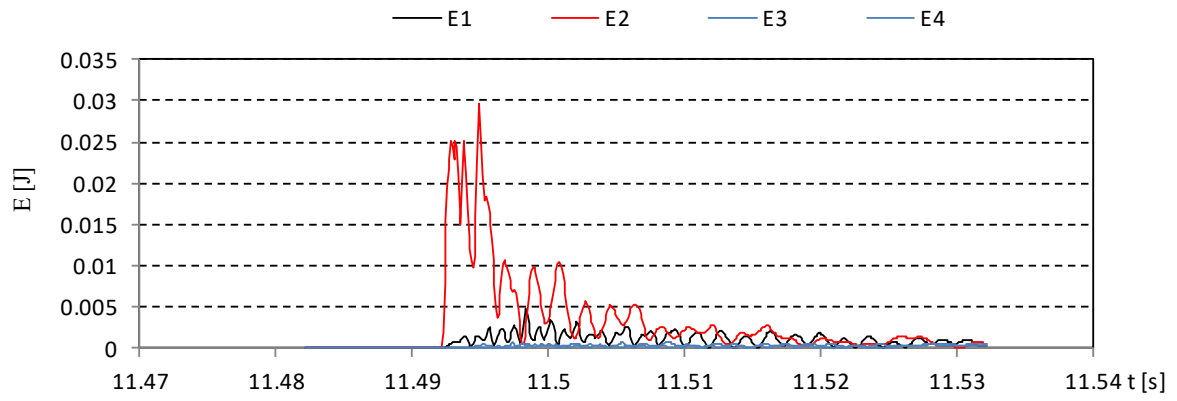


図- 5.3.1 ひずみエネルギーの時系列 (We10, TypeA, 初期位置 0.1m, 1回目)

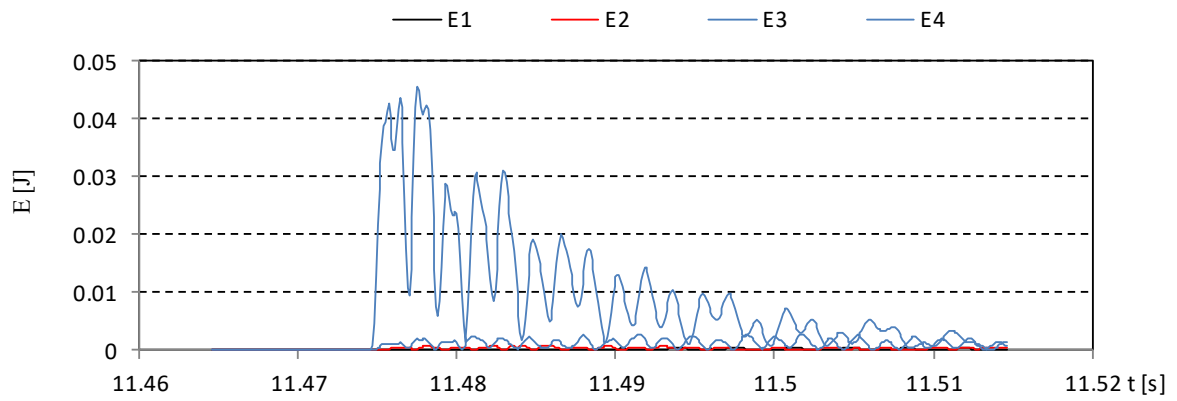


図- 5.3.2 ひずみエネルギーの時系列 (We10, TypeA, 初期位置 0.5m, 12回目)

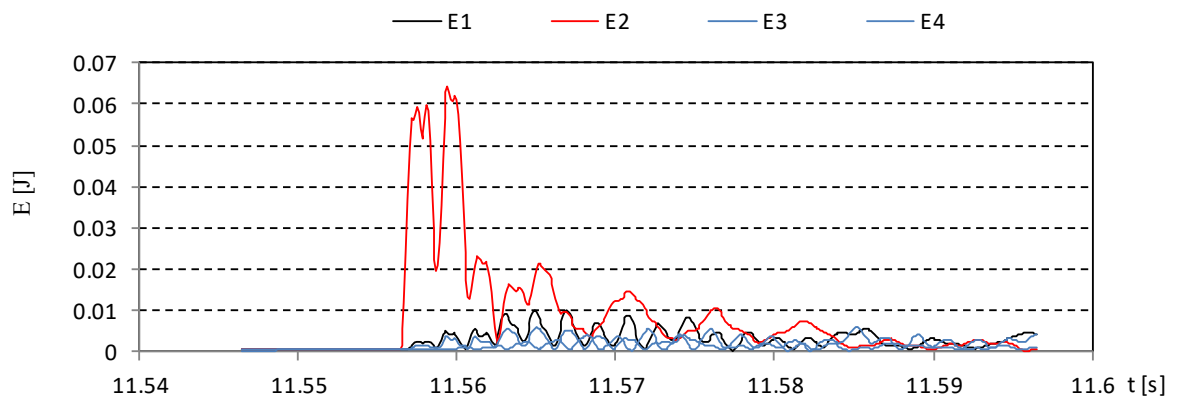


図- 5.3.3 ひずみエネルギーの時系列 (We10, TypeA, 初期位置 1.0m, 11回目)

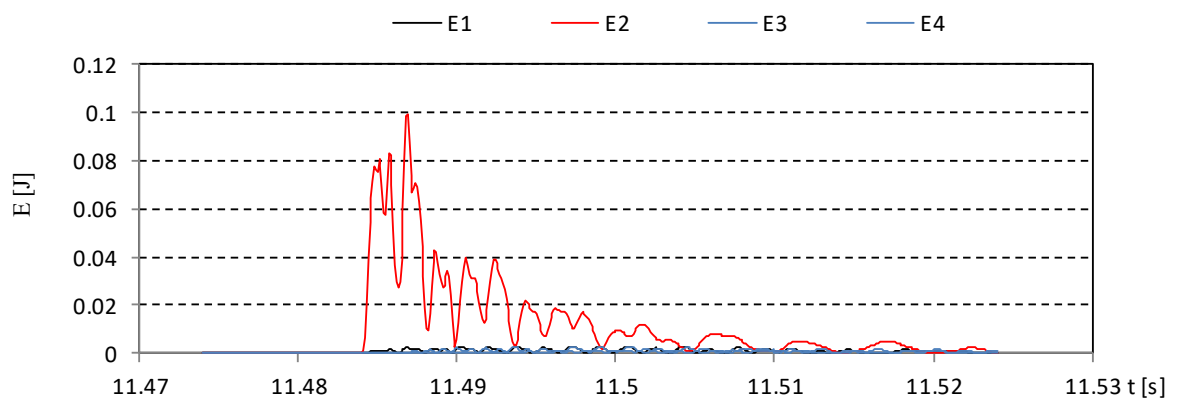


図- 5.3.4 ひずみエネルギーの時系列 (We10, TypeA, 初期位置 2.0m, 4回目)

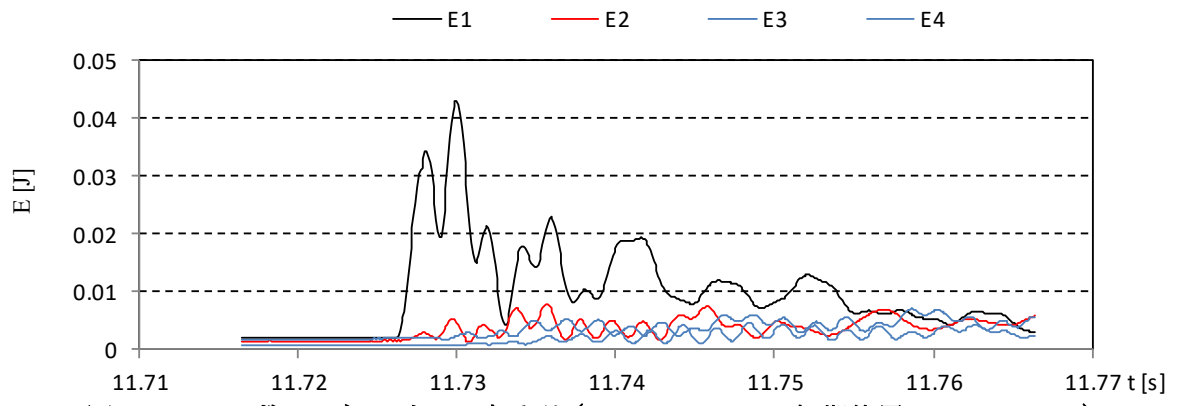


図- 5.3.5 ひずみエネルギーの時系列 (We10, TypeA, 初期位置 2.5m, 7回目)

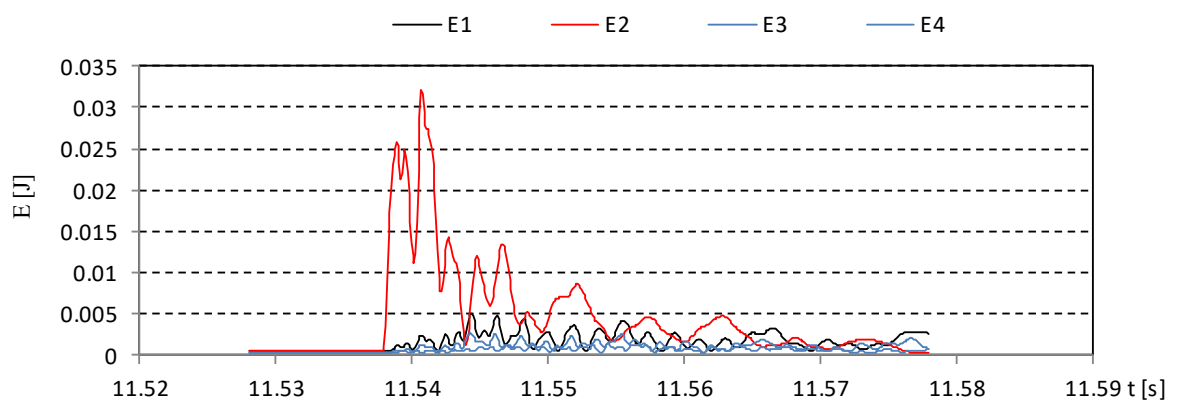


図- 5.3.6 ひずみエネルギーの時系列 (We10, TypeA, 初期位置 3.0m, 1回目)

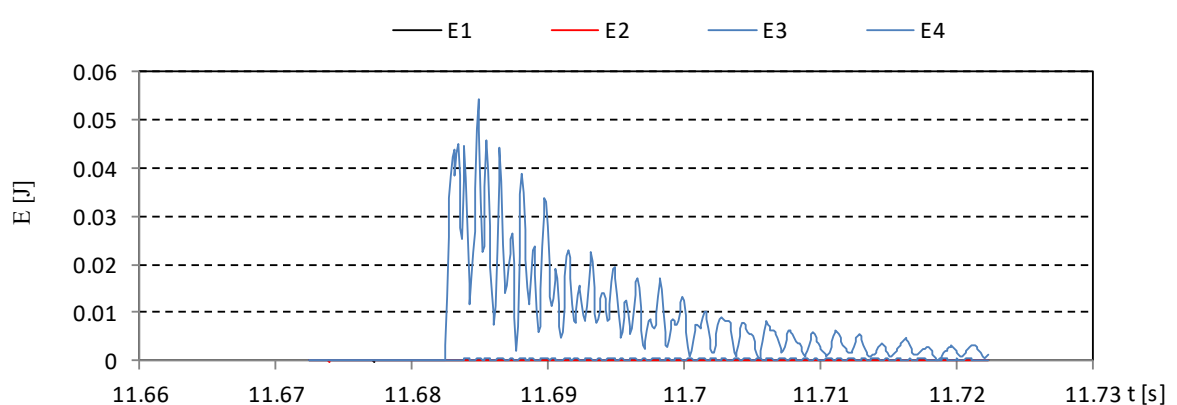


図- 5.3.7 ひずみエネルギーの時系列 (We20, TypeA, 初期位置 0.1m, 15回目)

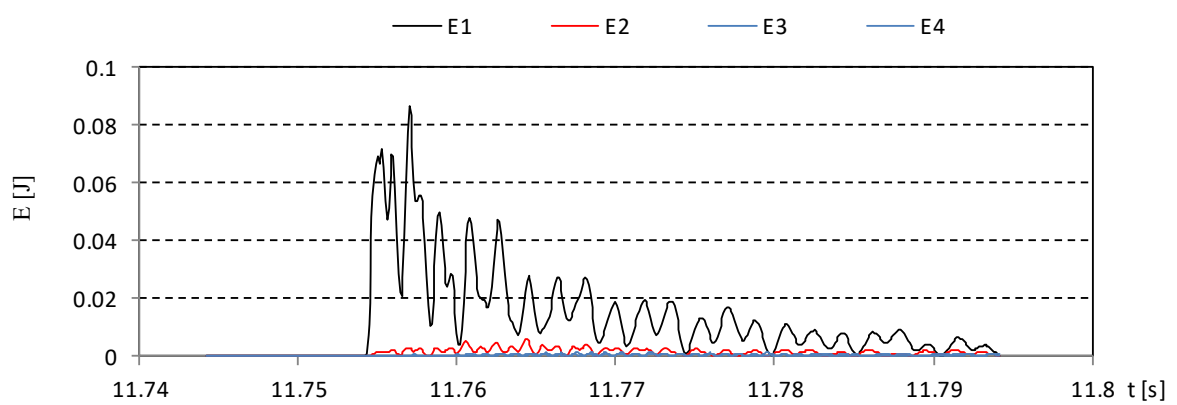


図- 5.3.8 ひずみエネルギーの時系列 (We20, TypeA, 初期位置 0.5m, 5回目)

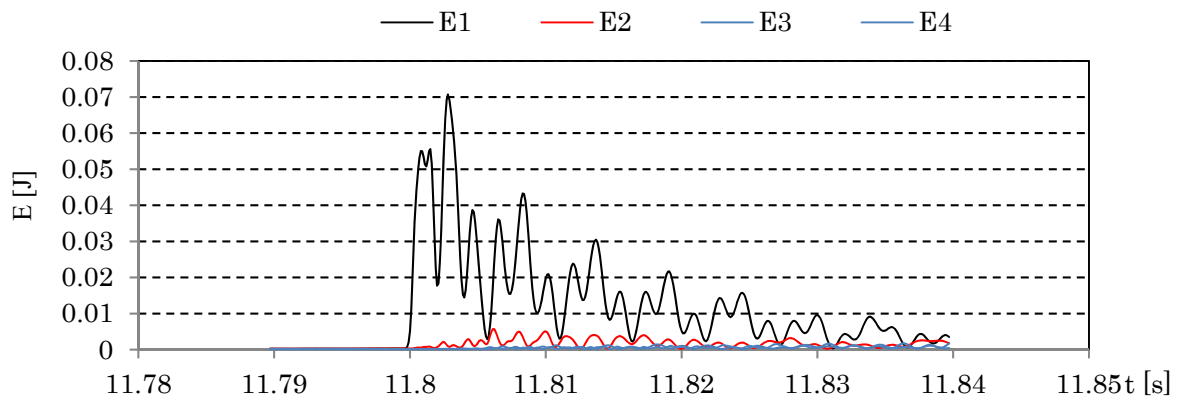


図- 5.3.9 ひずみエネルギーの時系列 (We20, TypeA, 初期位置 1.0m, 11 回目)

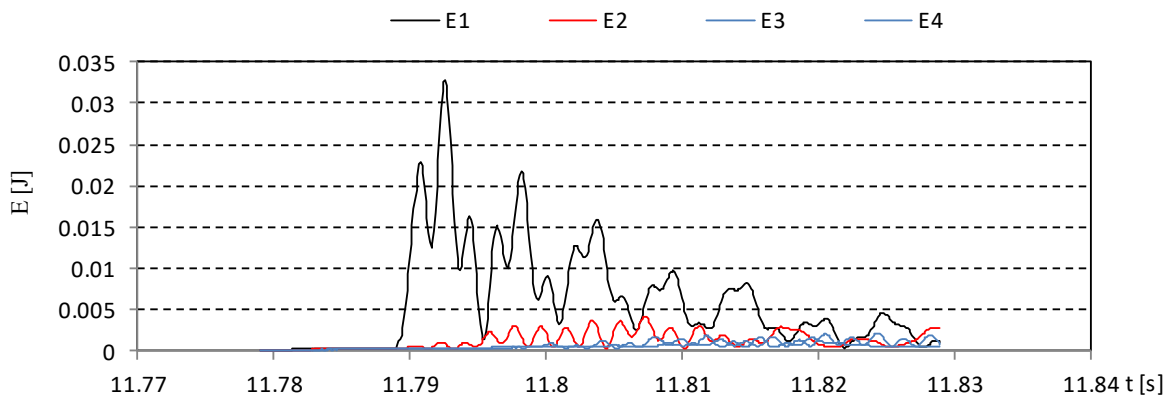


図- 5.3.10 ひずみエネルギーの時系列 (We20, TypeA, 初期位置 2.0m, 1 回目)

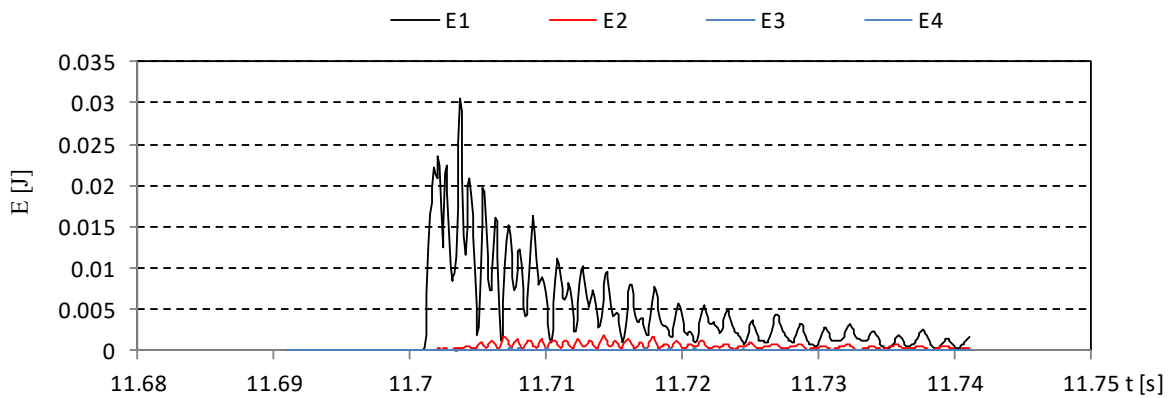


図- 5.3.11 ひずみエネルギーの時系列 (We20, TypeA, 初期位置 3.0m, 8 回目)

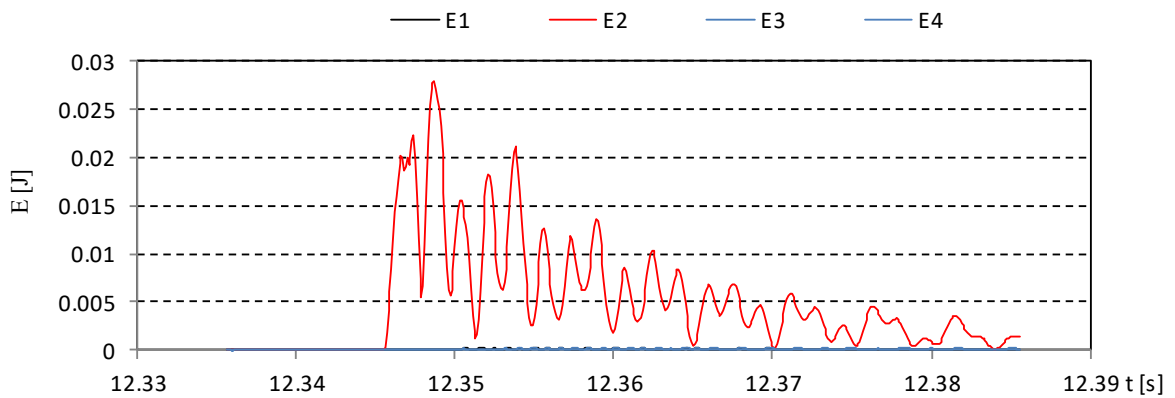


図- 5.3.12 ひずみエネルギーの時系列 (We30, TypeA, 初期位置 0.1m, 11 回目)

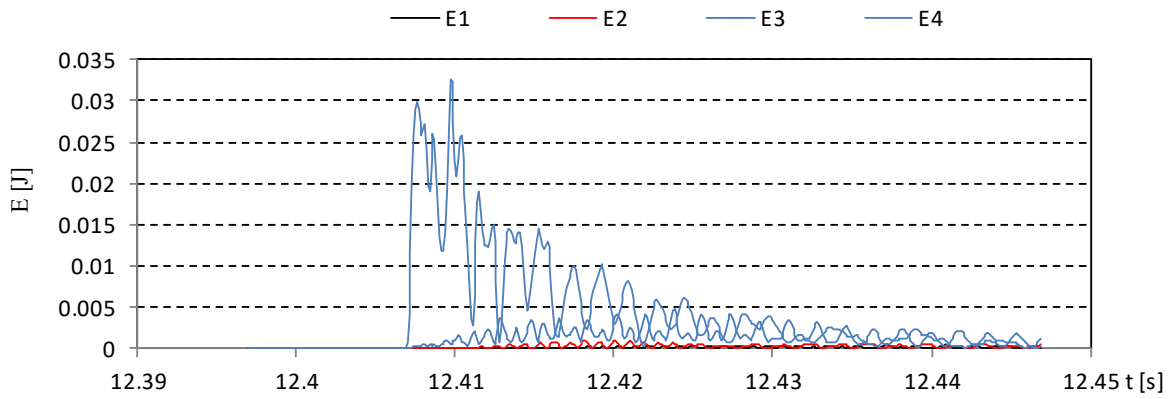


図- 5.3.13 ひずみエネルギーの時系列 (We30, TypeA, 初期位置 0.5m, 8回目)

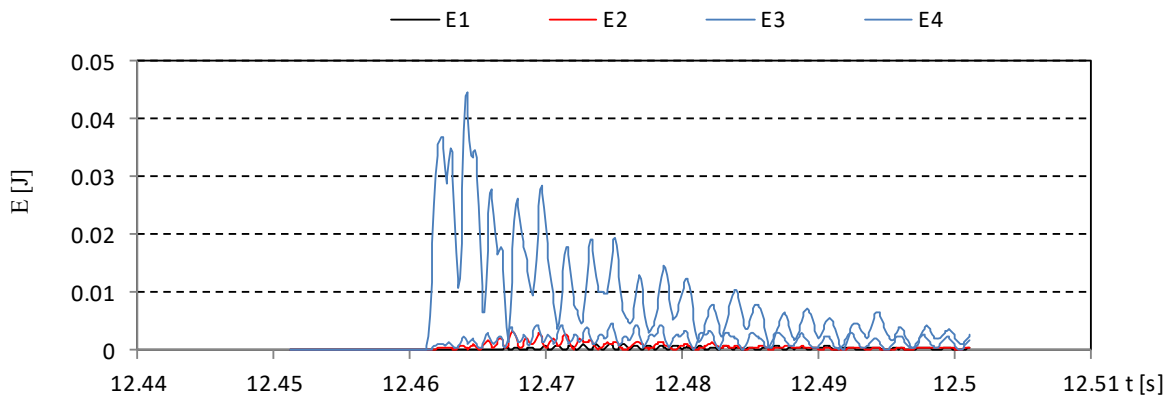


図- 5.3.14 ひずみエネルギーの時系列 (We30, TypeA, 初期位置 1.0m, 1回目)

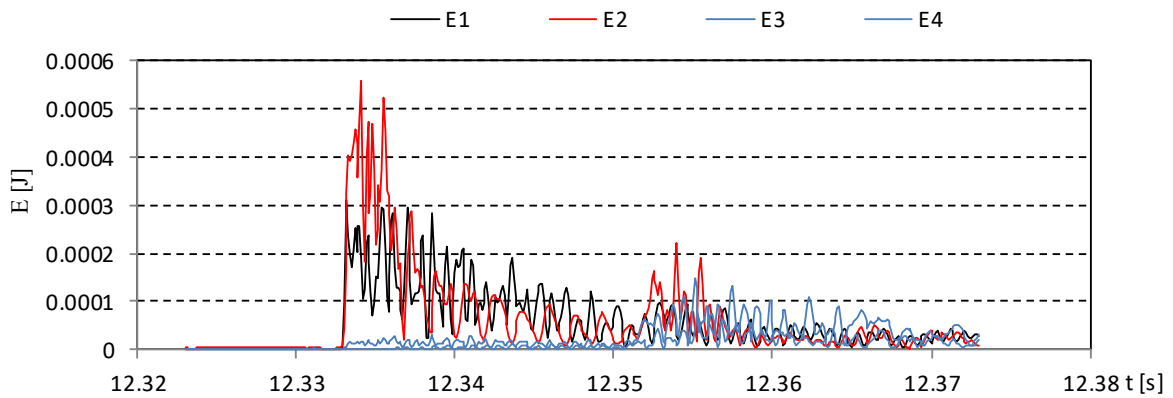


図- 5.3.15 ひずみエネルギーの時系列 (We30, TypeA, 初期位置 1.5m, 12回目)

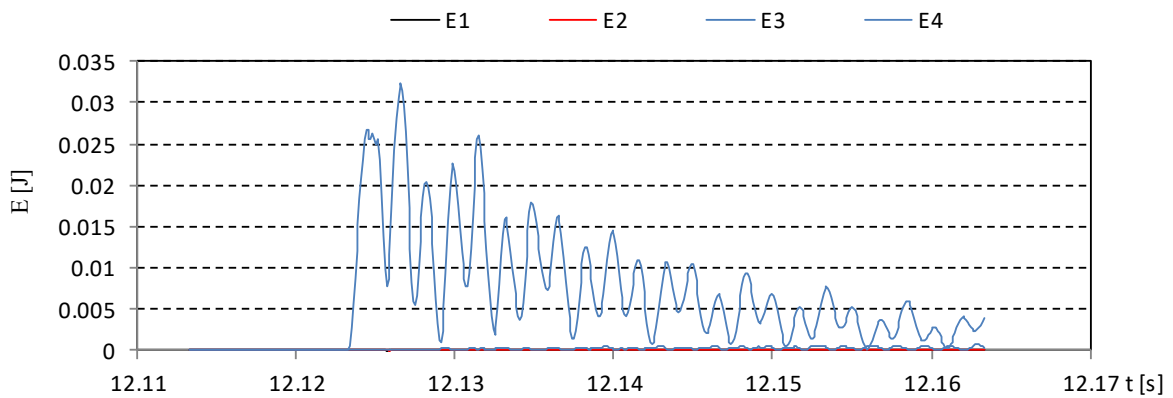


図- 5.3.16 ひずみエネルギーの時系列 (We40, TypeA, 初期位置 0.1m, 14回目)

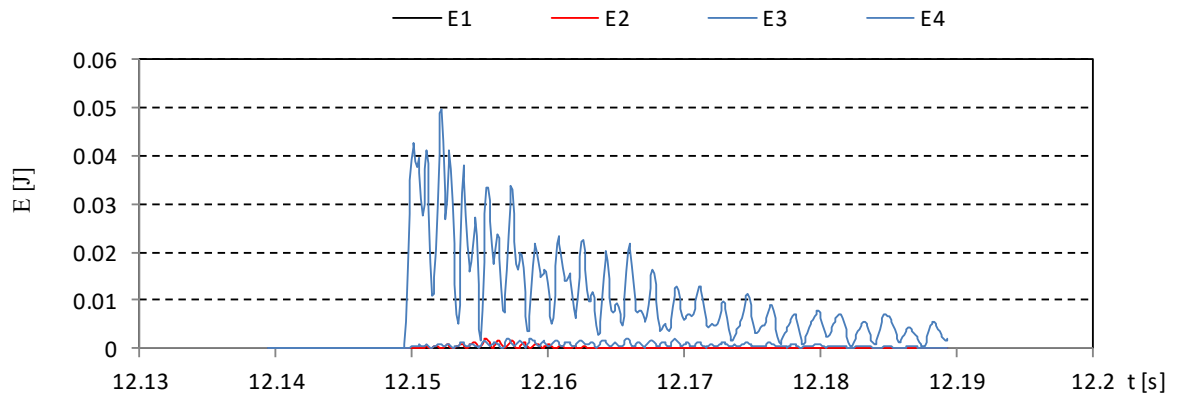


図- 5.3.17 ひずみエネルギーの時系列 (We40, TypeA, 初期位置 0.5m, 1回目)

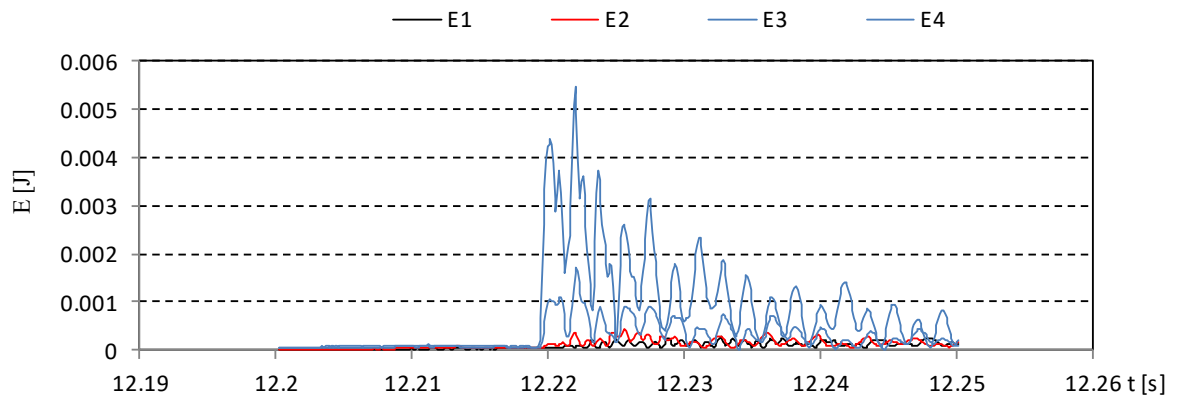


図- 5.3.18 ひずみエネルギーの時系列 (We40, TypeA, 初期位置 1.0m, 1回目)

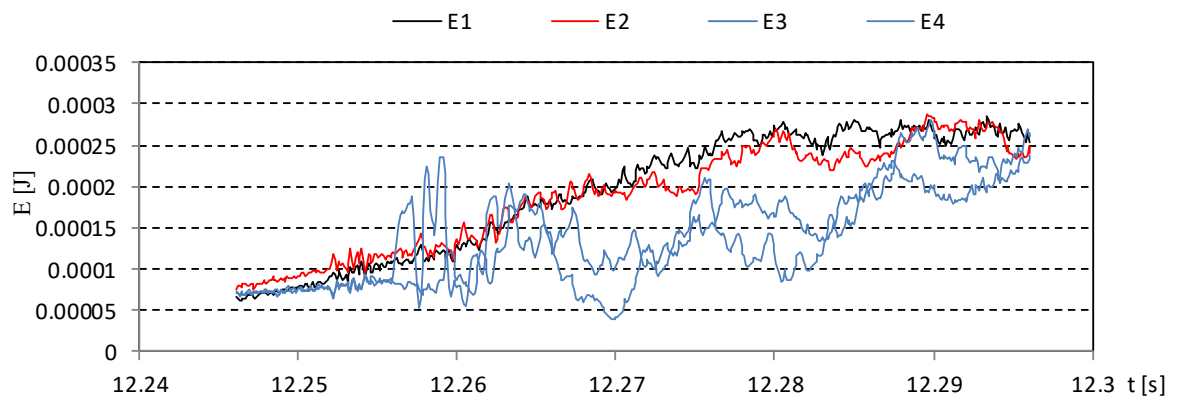


図- 5.3.19 ひずみエネルギーの時系列 (We40, TypeA, 初期位置 2.0m, 6回目)

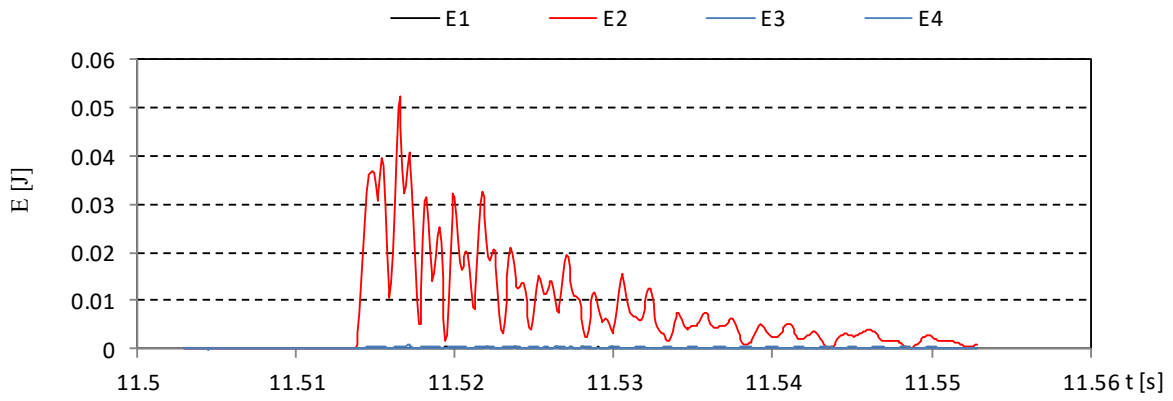


図- 5.3.20 ひずみエネルギーの時系列 (We10, TypeB, 初期位置 0.5m, 12 回目)

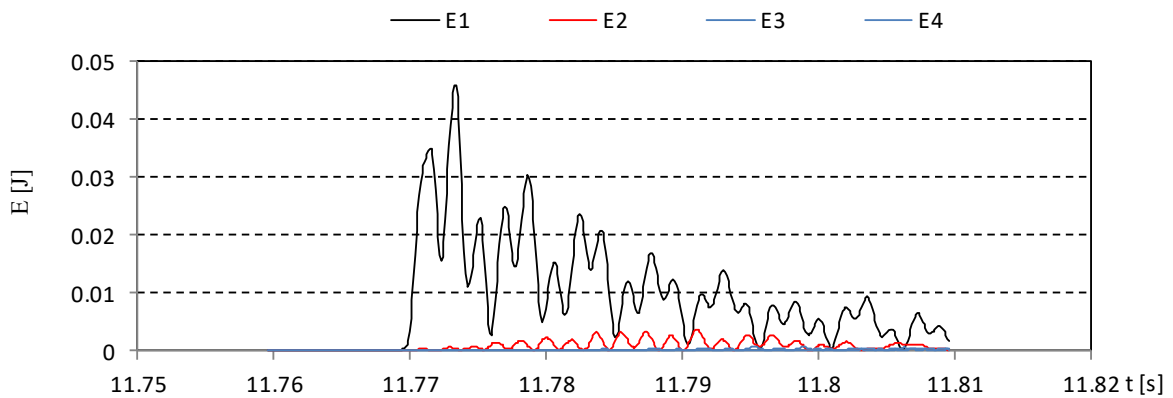


図- 5.3.21 ひずみエネルギーの時系列 (We20, TypeB, 初期位置 0.5m, 14 回目)

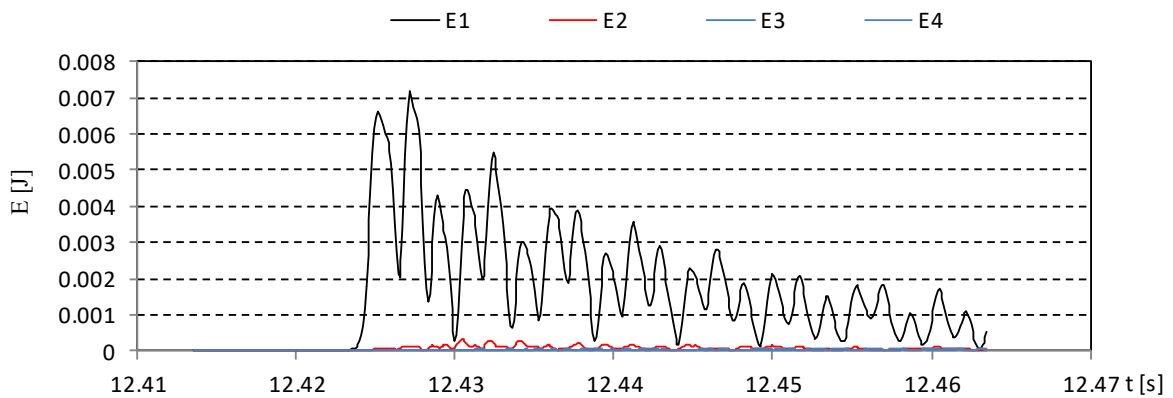


図- 5.3.22 ひずみエネルギーの時系列 (We30, TypeB, 初期位置 0.5m, 11 回目)

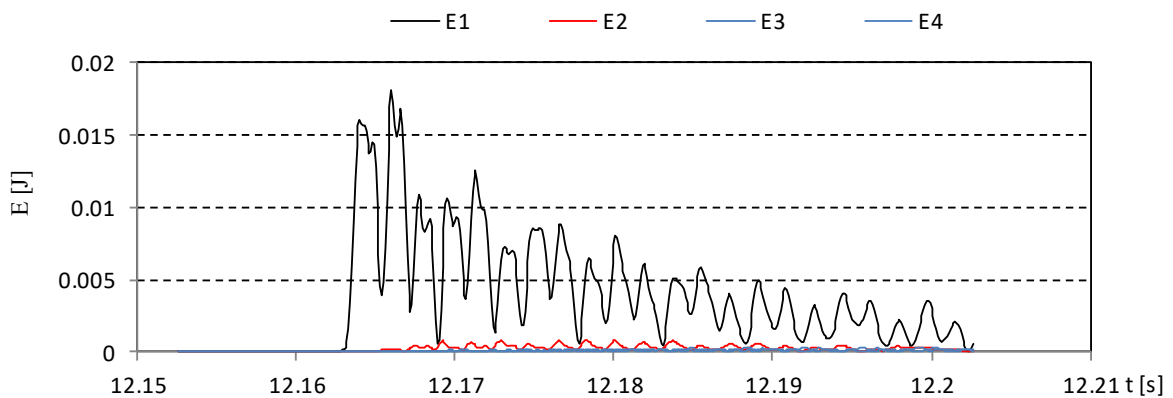


図- 5.3.23 ひずみエネルギーの時系列 (We40, TypeB, 初期位置 0.5m, 14 回目)

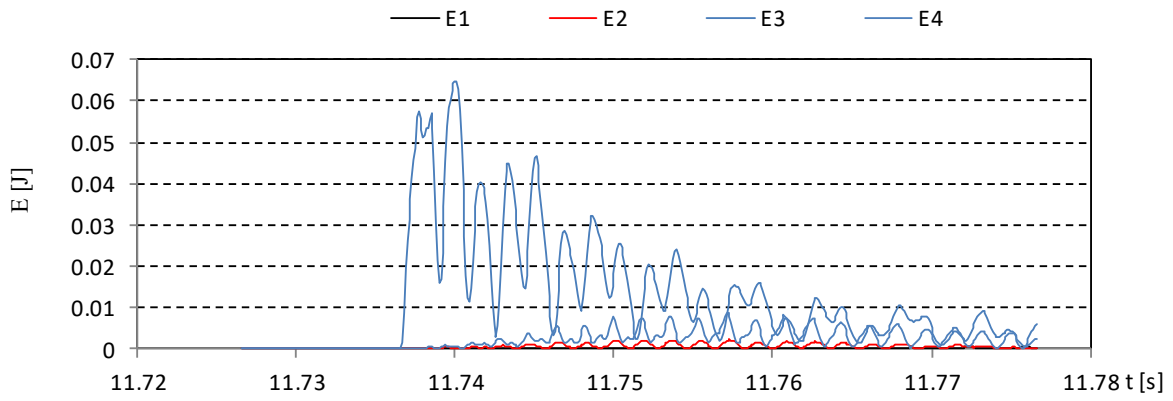


図- 5.3.24 ひずみエネルギーの時系列 (We20, TypeC, 初期位置 0.1m, 14 回目)

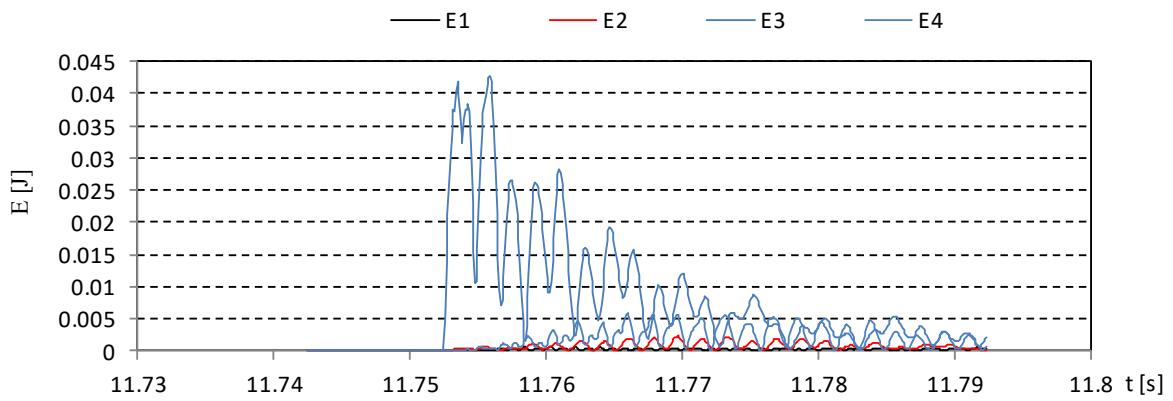


図- 5.3.25 ひずみエネルギーの時系列 (We20, TypeC, 初期位置 0.5m, 2 回目)

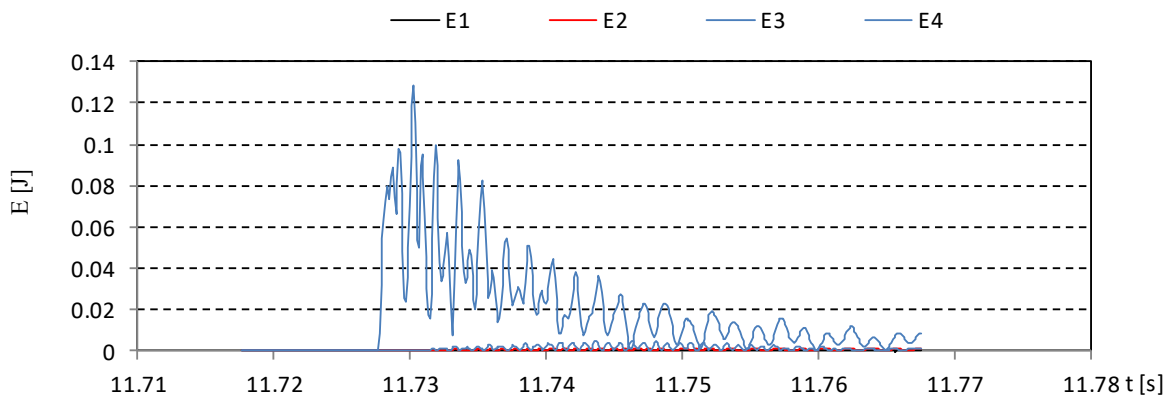


図- 5.3.26 ひずみエネルギーの時系列 (We20, TypeC, 初期位置 1.0m, 3 回目)

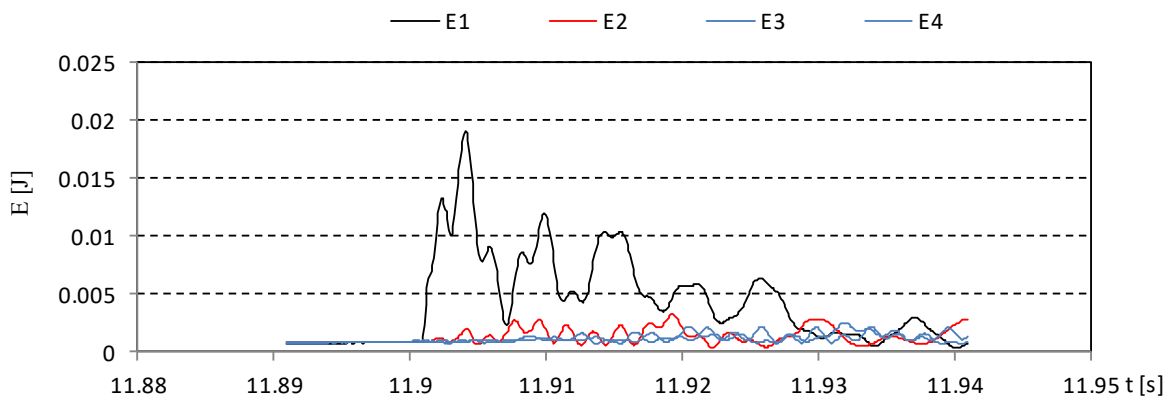


図- 5.3.27 ひずみエネルギーの時系列 (We20, TypeC, 初期位置 2.0m, 6 回目)

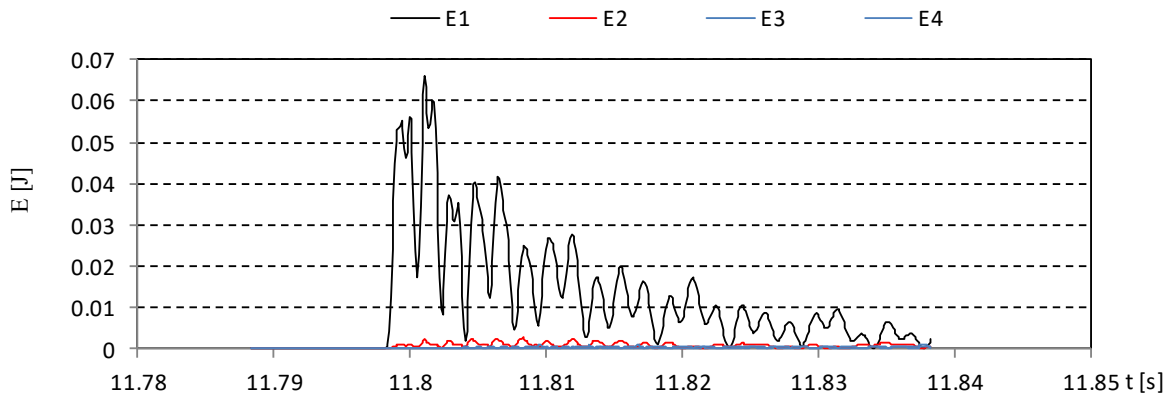


図- 5.3.28 ひずみエネルギーの時系列 (We20, TypeC, 初期位置 3.0m, 12 回目)

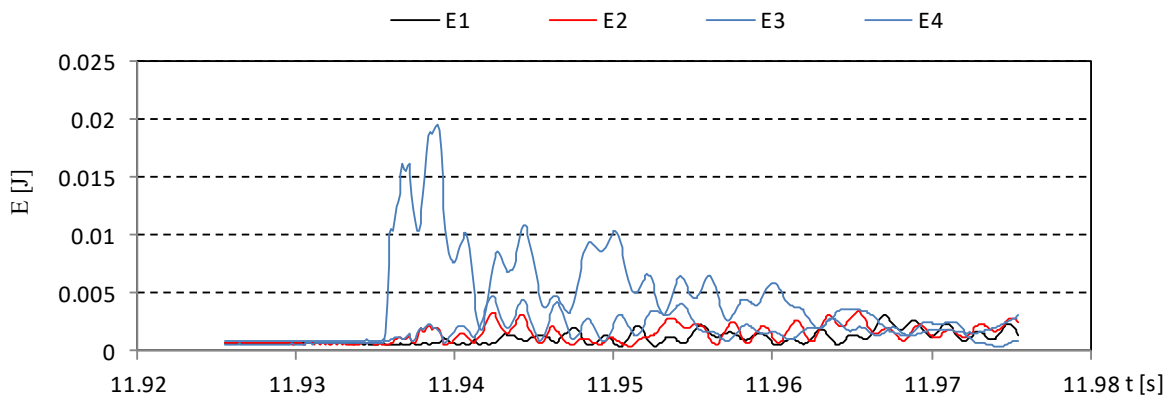


図- 5.3.29 ひずみエネルギーの時系列 (We20, TypeC, 初期位置 4.0m, 7 回目)

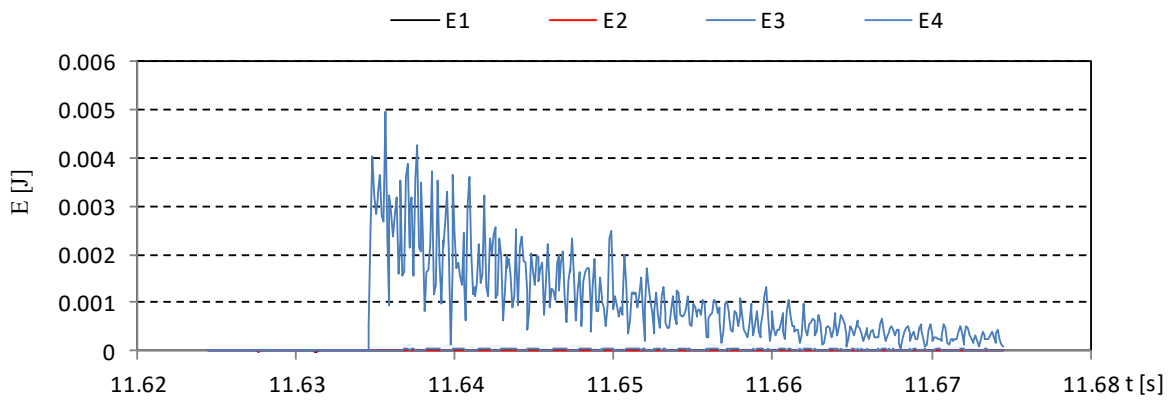


図- 5.3.30 ひずみエネルギーの時系列 (We20, TypeC, 初期位置 4.5m, 4 回目)

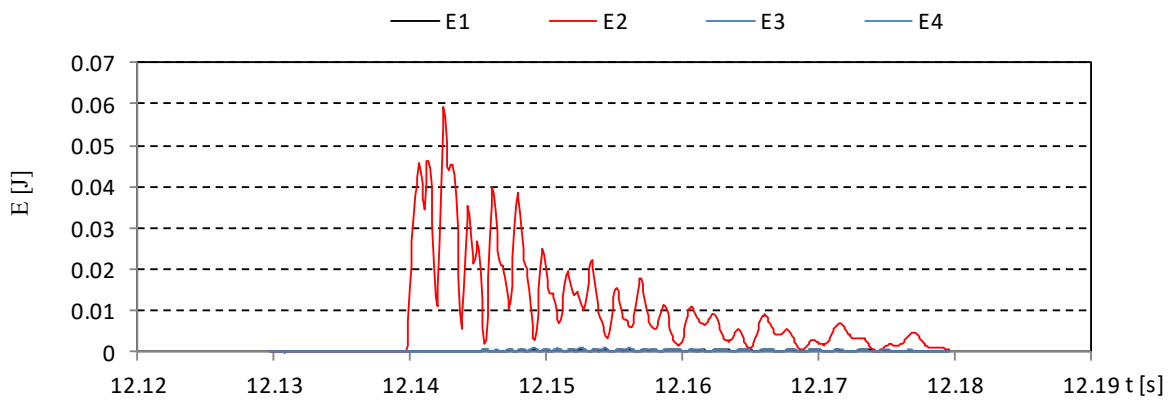


図- 5.3.31 ひずみエネルギーの時系列 (We40, TypeC, 初期位置 0.1m, 11 回目)

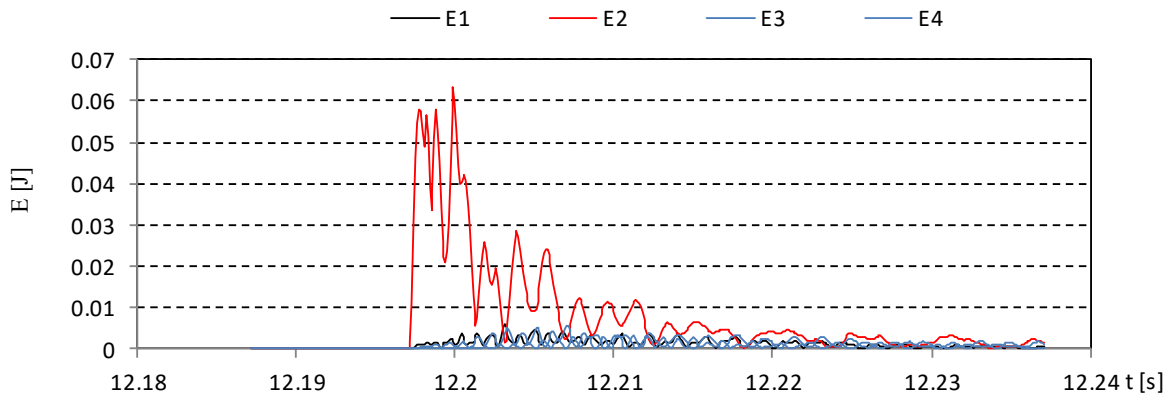


図- 5.3.32 ひずみエネルギーの時系列 (We40, TypeC, 初期位置 0.5m, 7回目)

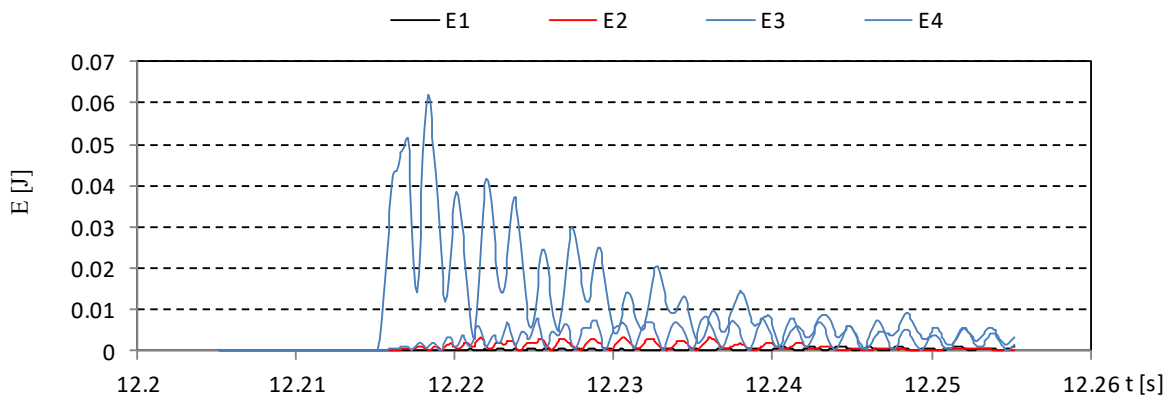


図- 5.3.33 ひずみエネルギーの時系列 (We40, TypeC, 初期位置 1.0m, 13回目)

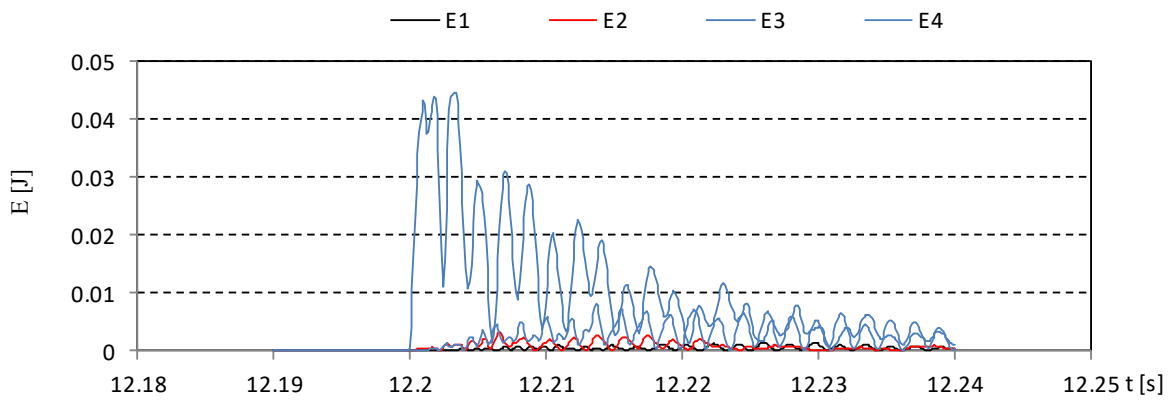


図- 5.3.34 ひずみエネルギーの時系列 (We40, TypeC, 初期位置 3.0m, 12回目)

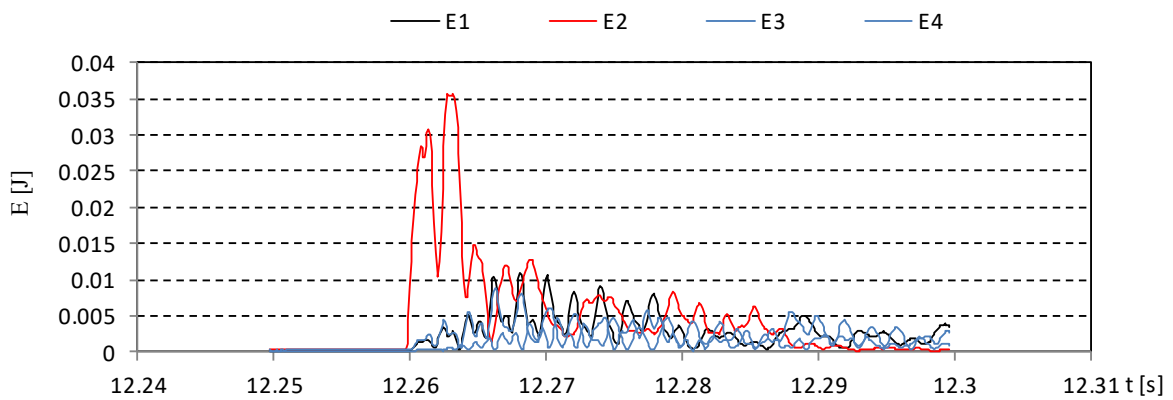


図- 5.3.35 ひずみエネルギーの時系列 (We40, TypeC, 初期位置 3.5m, 8回目)

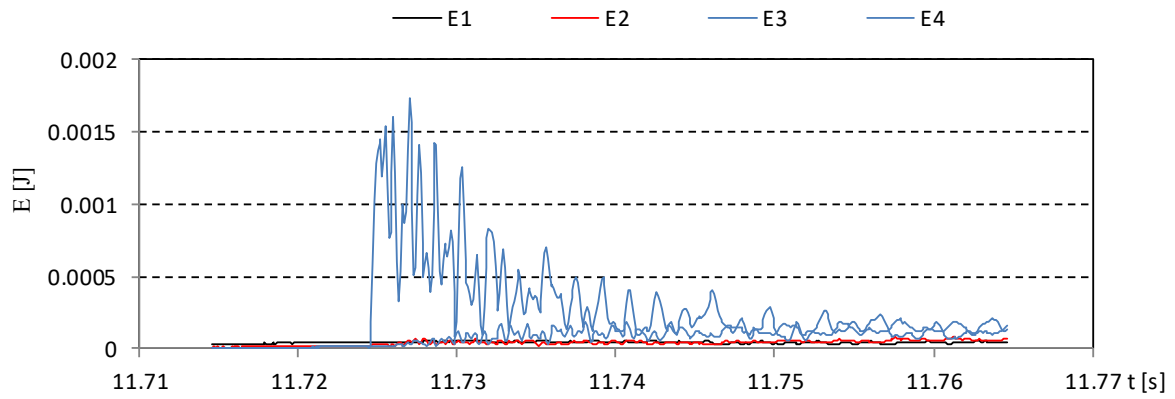


図- 5.3.36 ひずみエネルギーの時系列 (We20, TypeD, 初期位置 0.5m, 2 回目)

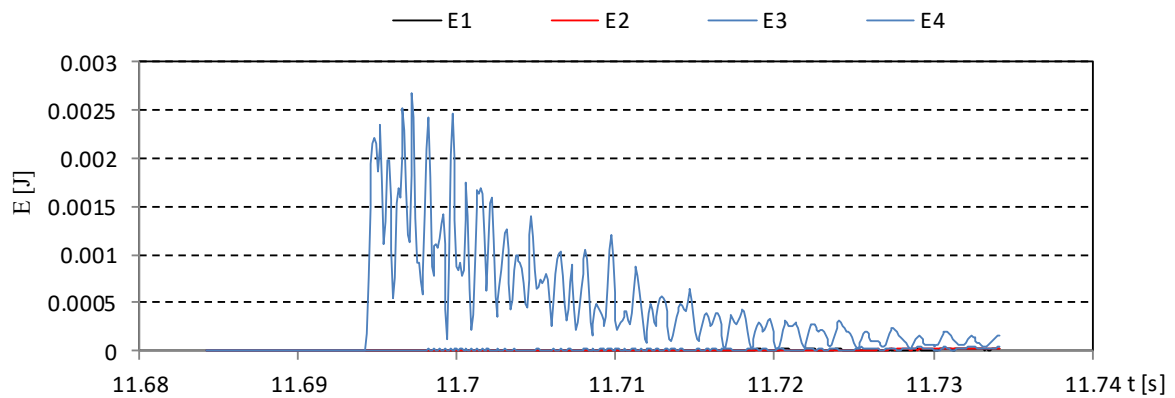


図- 5.3.37 ひずみエネルギーの時系列 (We20, TypeD, 初期位置 1.0m, 2 回目)

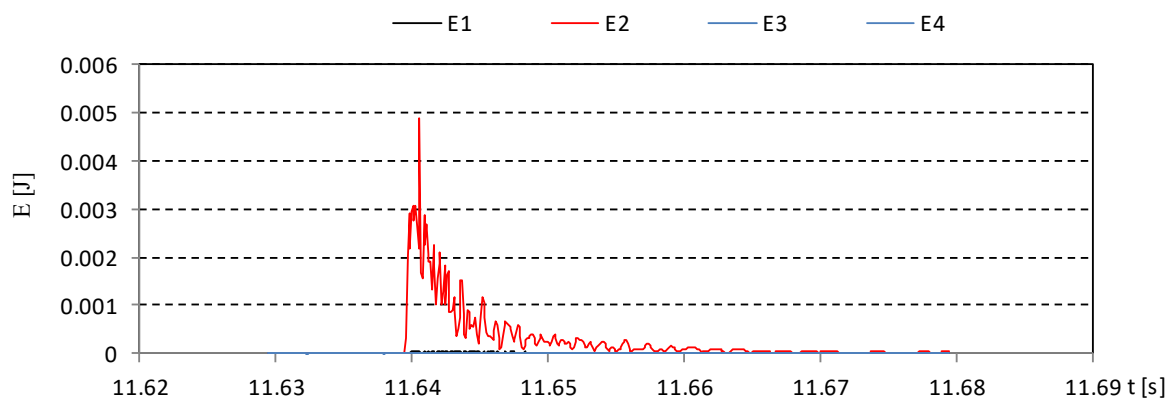


図- 5.3.38 ひずみエネルギーの時系列 (We20, TypeD, 初期位置 1.5m, 11 回目)

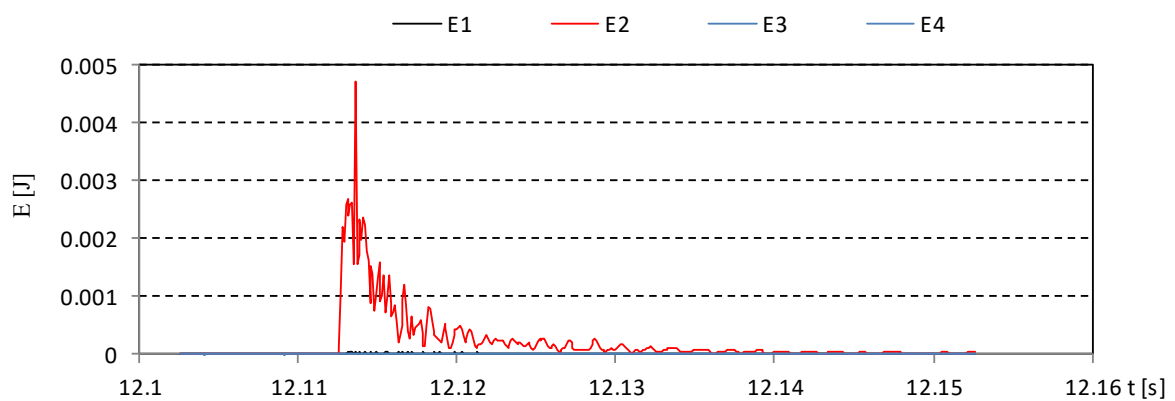


図- 5.3.39 ひずみエネルギーの時系列 (We40, TypeD, 初期位置 0.5m, 4 回目)

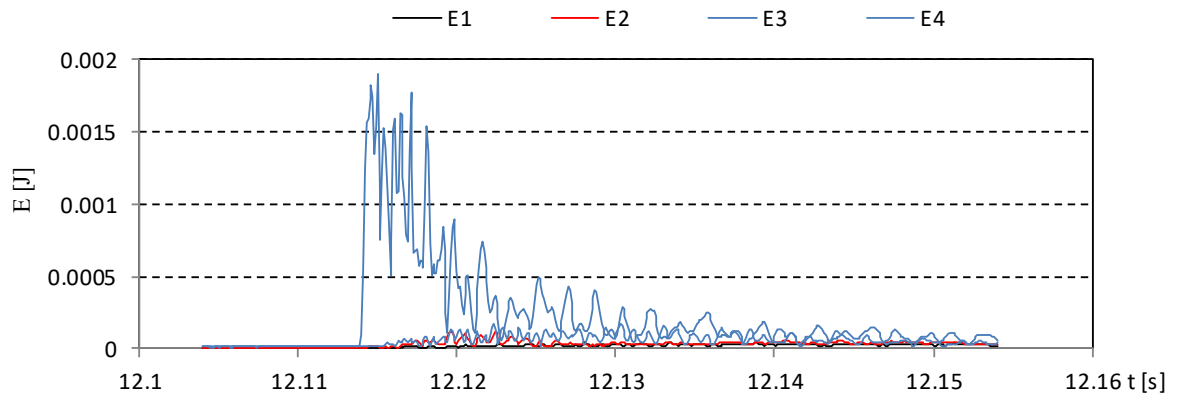


図- 5.3.40 ひずみエネルギーの時系列 (We40, TypeD, 初期位置 1.0m, 8回目)

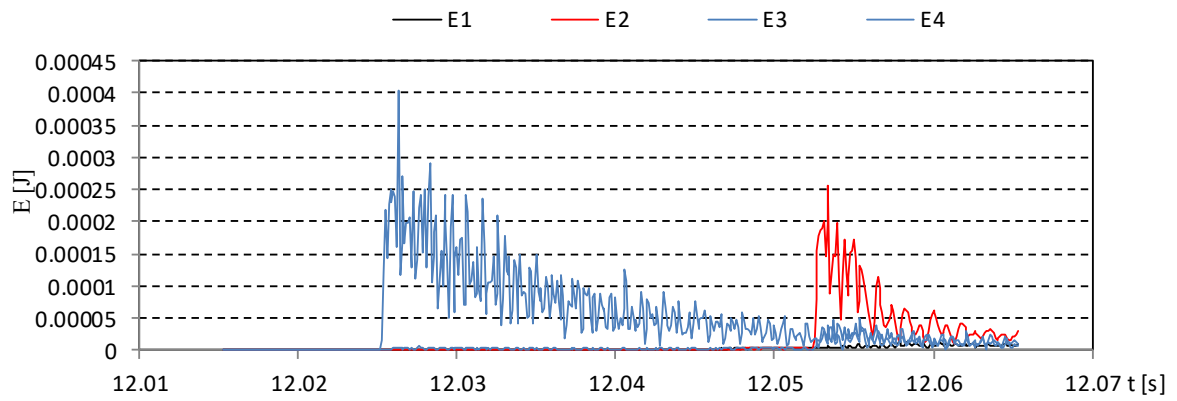


図- 5.3.41 ひずみエネルギーの時系列 (We40, TypeD, 初期位置 2.0m, 8回目)

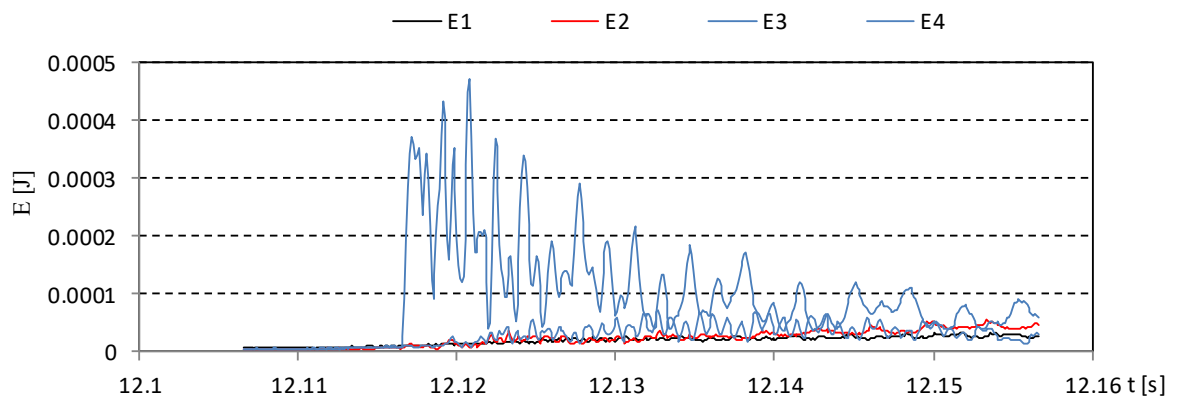


図- 5.3.42 ひずみエネルギーの時系列 (We40, TypeD, 初期位置 2.5m, 10回目)

5.4. 衝突高さ

表- 5.4.1 に、各試行回の試験における、漂流物が堤体模型に衝突した位置の高さを示す。衝突高さは、高速度カメラの画像より読み取った値である。また、衝突高さの分布および衝突エネルギーと衝突高さの関係を図- 5.4.1～図- 5.4.4 に示す。なお TypeB については対象データが少ないため、津波高のほぼ等しい、We10, We20 と We30, We40 をそれぞれまとめて示した。また、衝突が確認されたケースを対象とした衝突高さの平均を、表- 5.4.2 に示す。

図- 5.4.1～図- 5.4.4 によると、衝突頻度の高い衝突高さは、TypeD を除き 0.075～0.1m であり、分布形状から We10, We20 よりも津波高の低い We30, We40 の方が低い傾向にあることが分かる。これは、図- 5.1.1～図- 5.1.4 に示した計測点 C の水位変化のうち、津波到達時の短時間の水位上昇の値よりも若干小さい値である。衝突時の動画を確認すると、多くの場合漂流物は、衝突時、水面付近ではあるが水中に潜った状態であることから、衝突高さは衝突時の水位よりも少し低い位置であることが分かる。

TypeA と TypeB は、形状と重量が同じであるため、衝突高さもほぼ同じになっている。ただし、衝突によるひずみエネルギーは、剛性の低い TypeB の方が総じて小さい。TypeD は衝突位置が他のケースに比べて低いが、TypeD は軽いため波によって加速しやすく、衝突するケースでは波のより先端部分に連行されて、小さい浸水深の段階で衝突するためと考えられる。TypeC では、他のケースと比べて高い位置に衝突する場合があるが、TypeC では初期位置が汀線から比較的遠い場合にも衝突が確認されており、そのような場合に、高い位置に衝突している。初期位置が汀線から遠い場合、波形の立ち上がりから遅れた水位のピークに近い位置で波に連行されて衝突しており、そのため衝突高さが高くなっている。表- 5.4.2 で TypeC の衝突平均高さが高くなっているのも、このためと考えられる。

衝突高さの分布とひずみエネルギーの大きさを比較すると、衝突頻度が高い位置で衝突ひずみエネルギーも大きくなっていることが分かる。

表- 5.4.1 衝突高さ

(a) TypeA

衝突高さ																		(m)
波形	Type	初期位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
We10	A	0.1	0.02	0.04			0.03	0.08	0.02	0.05	0.11	0.1	0.09	0.07	0.08	0.11	0.09	
We10	A	0.5	0.12	0.12	0.13	0.13	0.08	0.1	0.1	0.08	0.05	0.13		0.08	0.09	0.09		
We10	A	1	0.08	0.08	0.09	0.14						0.2	0.13	0.14		0.13		
We10	A	2		0.14	0.13	0.07	0.06	0.14	0.07			0.12		0.04	0.04	0.11		
We10	A	2.5		0.14		0.12		0.09	0.15									
We10	A	3	0.11										0.03					
We10	A	3.5																
We20	A	0.1	0.06	0.06		0.09		0.07	0.07	0.1	0.06	0.07	0.12	0.1			0.08	
We20	A	0.5	0.09	0.12	0.08	0.11	0.08	0.1	0.1	0.14	0.13	0.13	0.07	0.08	0.03	0.06	0.11	
We20	A	1		0.11	0.18			0.05	0.08	0.12		0.03	0.11	0.03		0.09	0.1	
We20	A	2	0.14		0.03			0.1							0.15			
We20	A	3	0.18				0.13	0.1	0.19	0.04				0.01			0.16	
We20	A	3.5																
We30	A	0.1	0.09	0.04	0.08	0.08	0.09	0.05	0.05		0.06	0.05	0.08	0.08	0.07	0.06	0.05	
We30	A	0.5	0.13	0.12	0.11		0.12		0.11	0.09	0.06	0.07	0.08	0.11	0.06		0.08	
We30	A	1	0.09	0.2				0.12		0.12		0.09	0.05	0.15	0.08	0.1	0.14	
We30	A	1.5									0.04			0.04				
We30	A	2																
We40	A	0.1	0.08	0.11		0.05	0.08	0.11	0.07	0.08	0.1	0.07	0.06	0.14	0.06	0.06	0.09	
We40	A	0.5	0.08	0.04	0.1	0.07	0.05	0.08	0.08	0.06	0.09	0.13	0.13	0.1		0.06	0.09	
We40	A	1	0.11	0.09		0.06		0.07	0.16		0.1		0.04		0.05		0.04	
We40	A	2						0.16		0.08								
We40	A	2.5																

(b) TypeB

衝突高さ																		(m)
波形	Type	初期位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
We10	B	0.5			0.06	0.07	0.09	0.14	0.13	0.07		0.07		0.09	0.05	0.13		
We20	B	0.5		0.04			0.11		0.09	0.12		0.08	0.11	0.1	0.05	0.08	0.1	
We30	B	0.5			0.08	0.08		0.1	0.08	0.1	0.12		0.08		0.13	0.09		
We40	B	0.5	0.07	0.07	0.11	0.09	0.07	0.08	0.09		0.08	0.08	0.07		0.09	0.07		

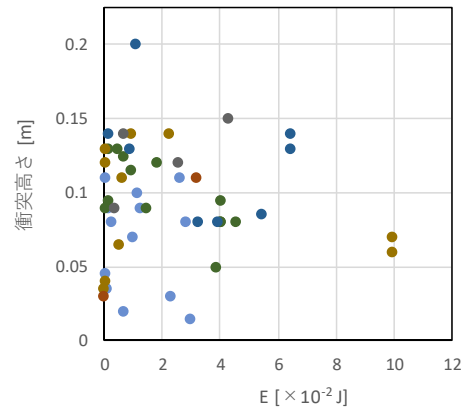
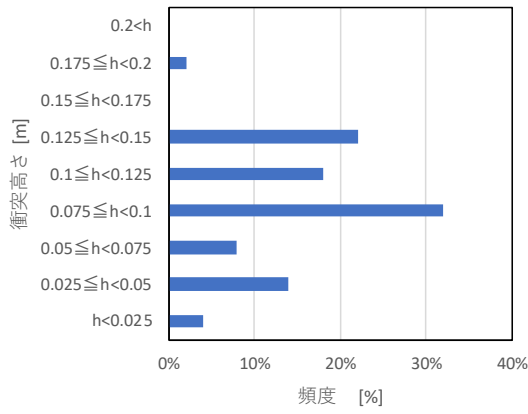
表- 5.4.1 衝突高さ (つづき)

(c) TypeC

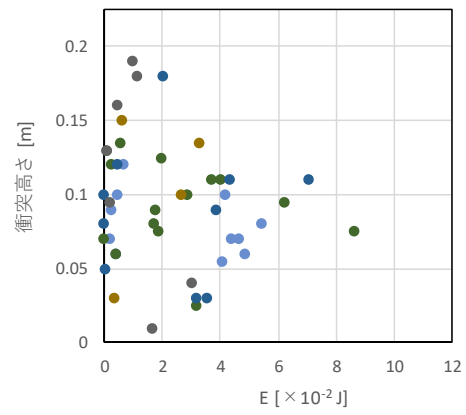
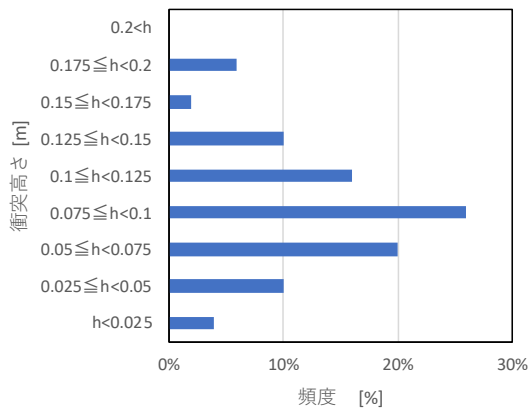
衝突高さ																		(m)
波形	Type	初期位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
We20	C	0.1	0.07	0.1		0.11	0.09		0.09	0.1	0.08	0.1	0.08	0.08	0.26	0.08	0.14	
We20	C	0.5	0.07	0.06	0.1	0.08		0.14	0.13	0.1	0.14	0.12	0.07	0.08	0.13	0.08		
We20	C	1	0.12		0.07		0.1	0.06	0.1	0.2	0.08	0.12	0.18	0.18	0.33	0.08		
We20	C	2				0.07		0.15										
We20	C	3	0.06					0.21					0.2	0.08				
We20	C	4							0.21			0.03				0.07		
We20	C	4.5				0.07												
We20	C	5																
We40	C	0.1	0.1	0.05	0.05	0.14	0.1	0.05	0.08	0.08	0.1	0.07	0.06	0.07	0.12	0.08	0.05	
We40	C	0.5	0.08	0.13	0.07	0.07	0.09		0.07	0.09	0.05		0.07	0.13	0.05	0.08	0.09	
We40	C	1	0.19	0.14			0.06		0.11		0.12		0.18	0.03	0.1		0.04	
We40	C	2																
We40	C	3												0.08				
We40	C	3.5	0.15							0.14								
We40	C	4																

(d) TypeD

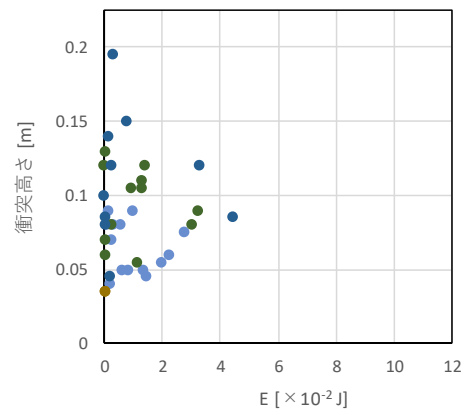
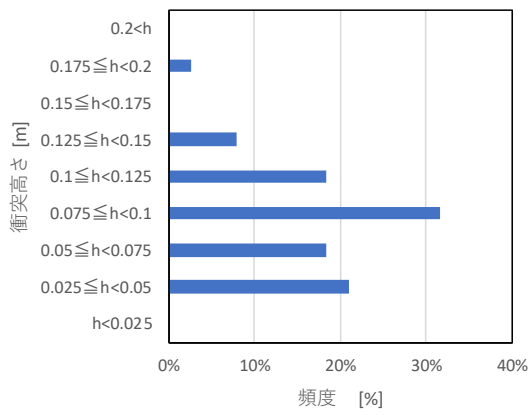
衝突高さ																		(m)
波形	Type	初期位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
We20	D	0.5	0.04	0.05	0.07								0.05	0.09		0.03		
We20	D	1		0.06	0.04		0.09	0.1			0.12		0.06	0.05		0.1	0.11	
We20	D	1.5		0.03				0.12		0.15			0.03	0.05		0.04	0.08	
We20	D	2																
We40	D	0.5	0.08	0.07	0.05	0.03	0.08	0.04	0.07	0.2		0.3	0.05	0.05	0.07			
We40	D	1	0.08		0.09	0.04			0.04	0.08			0.1					
We40	D	2								0.06							0.04	
We40	D	2.5										0.07	0.03	0.07				



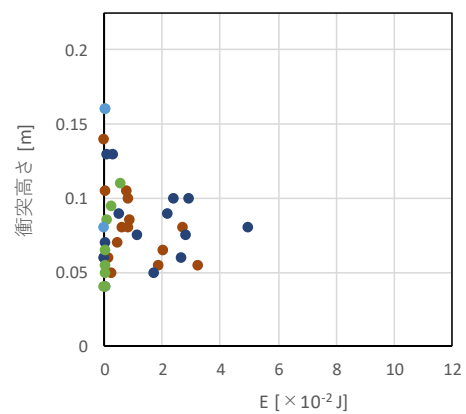
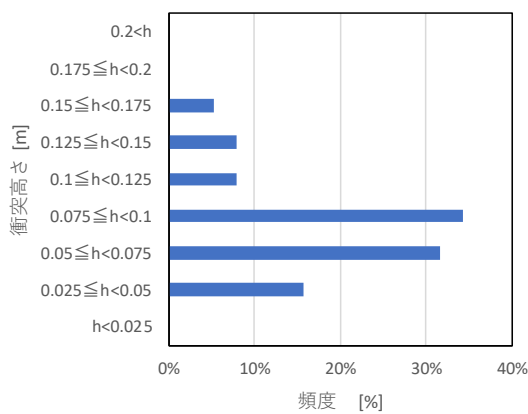
(a) We10



(b) We20

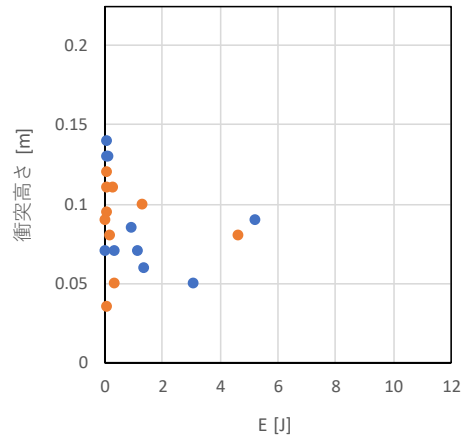
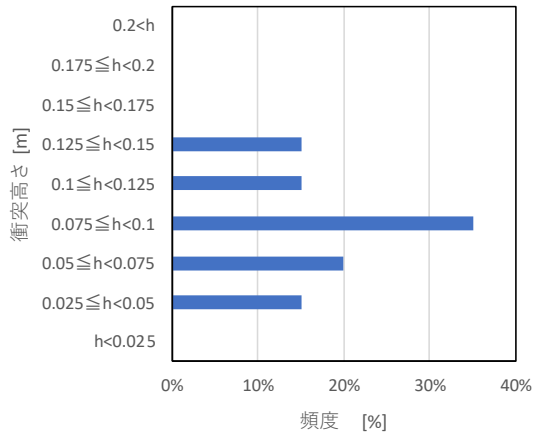


(c) We30

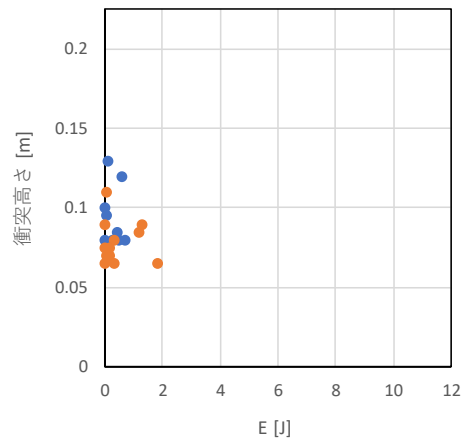
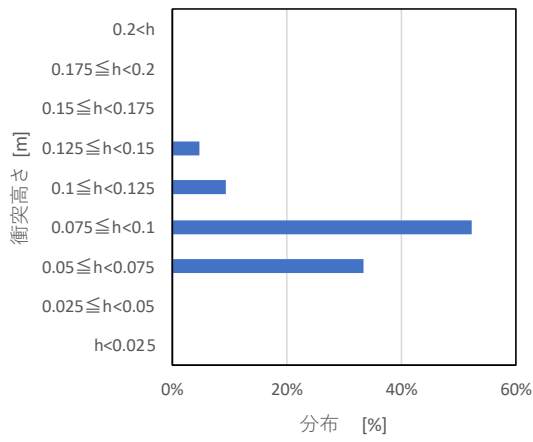


(d) We40

図- 5.4.1 衝突高さの分布とひずみエネルギーの関係 (TypeA)

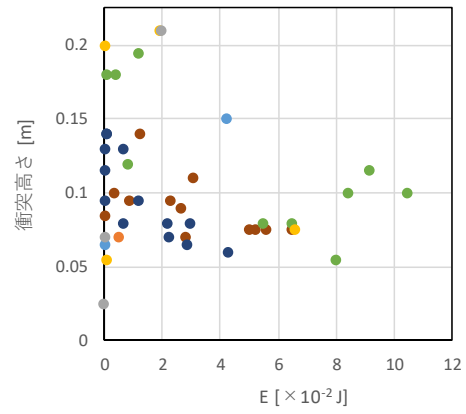
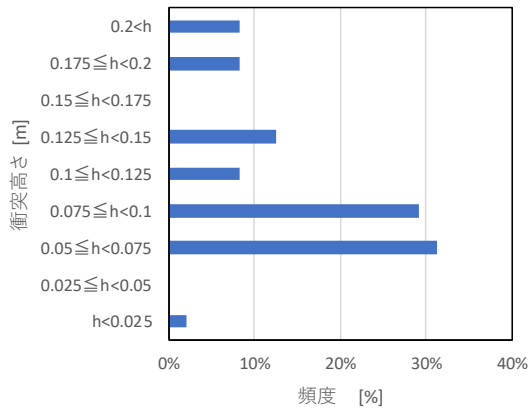


(a) We10, We20

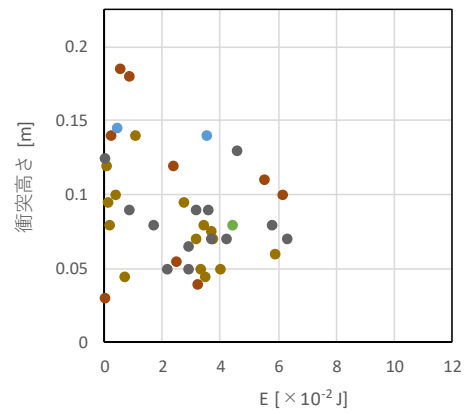
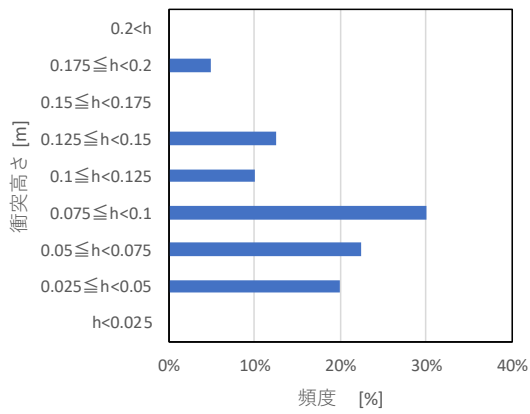


(b) We30, We40

図- 5.4.2 衝突高さの分布とひずみエネルギーの関係 (TypeB)

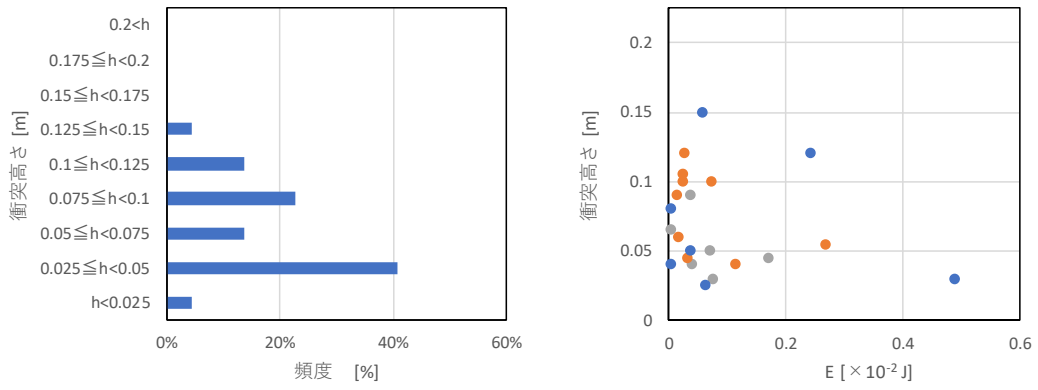


(a) We20

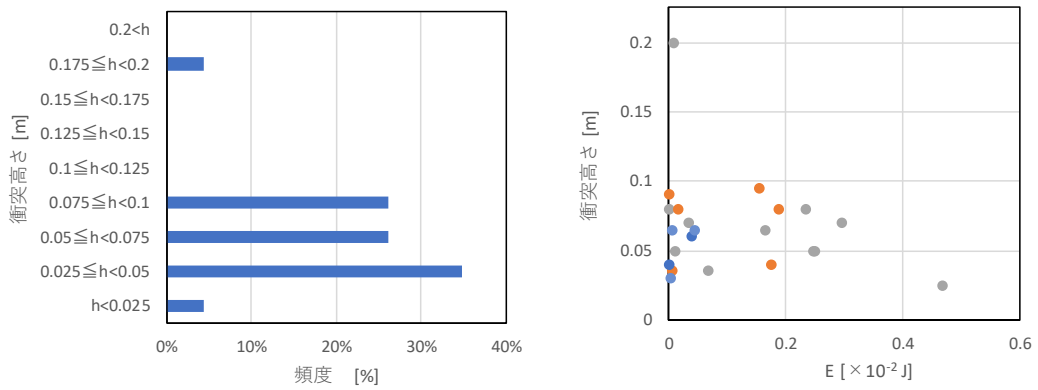


(b) We40

図- 5.4.3 衝突高さの分布とひずみエネルギーの関係 (TypeC)



(a) We20



(b) We40

図- 5.4.4 衝突高さの分布とひずみエネルギーの関係 (TypeD)

表- 5.4.2 衝突高さの平均値

(m)

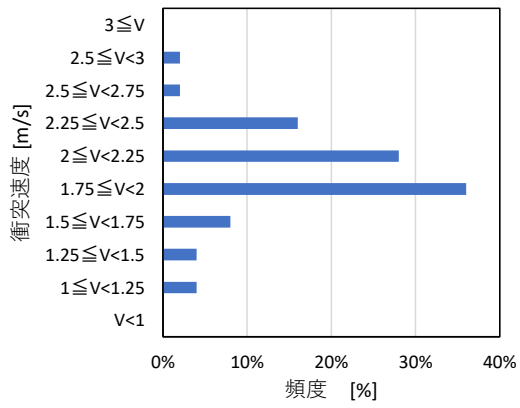
	We10	We20	We30	We40
TypeA	0.094	0.094	0.085	0.083
TypeB	0.090	0.087	0.094	0.078
TypeC	—	0.112	—	0.089
TypeD	—	0.070	—	0.076

5.5. 衝突速度

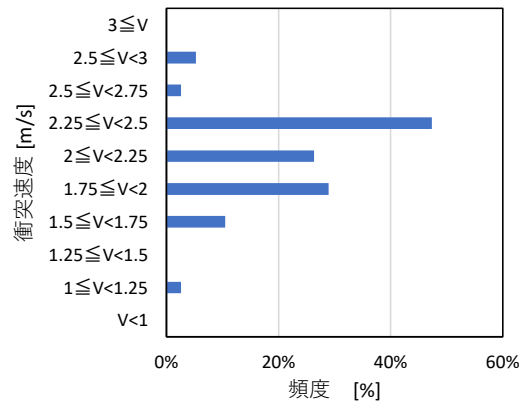
図- 5.5.1～図- 5.5.4 に、漂流物の衝突速度を高速度カメラの映像より読み取ったものを示す。衝突速度は、堤体から 30cm 以内の距離で漂流物位置が確認出来る映像から、移動時間で距離を除いて求めた。なるべく堤体に近い範囲で算出しているが、映像が不鮮明な場合には、漂流物が確認出来る映像を選択して算定した。また、各ケースの平均値を表- 5.5.1 に示した。

波検定の結果によれば、汀線近傍の波速は 2.0 m/s を少し上回る程度であった。図- 5.5.1～図- 5.5.4 によれば、衝突速度は概略これに一致する。堤体位置が汀線から 0.625 と近いとため、波に連行された漂流物および周辺の水塊は、ほぼ波速に等しい速度で堤体に衝突していることが分かる。表- 5.5.1 には、汀線近傍での波速の算出結果を同時に示しているが、衝突速度は波速よりも若干小さい。漂流物が堤体に衝突する際、漂流物と堤体の間には先行して堤体に到達した津波の先端部分による水塊があり、漂流物はこれによりいくらか減速していると考えられる。以上から、衝突速度は波速により、保守的に評価可能であると考えられる。また、この減速の程度は、衝突する際の漂流物の姿勢や位置により大きく異なると考えられる。これが、衝突速度がばらついている要因と推察される。

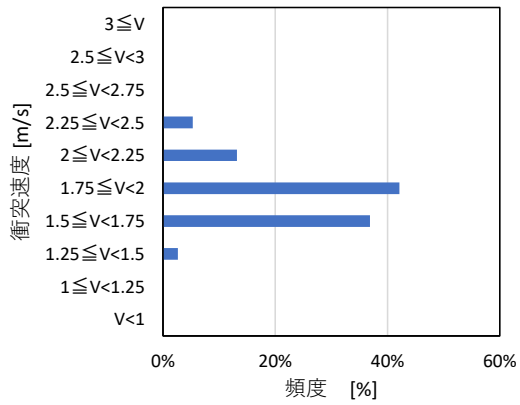
表- 5.5.1 によれば、漂流物の Type による衝突速度の違いは小さいことが分かる。ただし、前述したように衝突頻度については形状によって、頻度が異なる。このことから、漂流開始時には漂流物の重さや形状により漂流特性が異なるが、漂流して波に連行される場合のみに着目すれば、波速が支配的であり、漂流物の大きさ等による衝突速度の相違はほとんどないと言える。



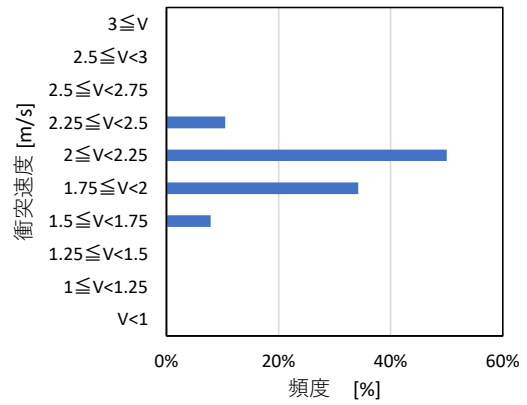
(a) We10



(b) We20

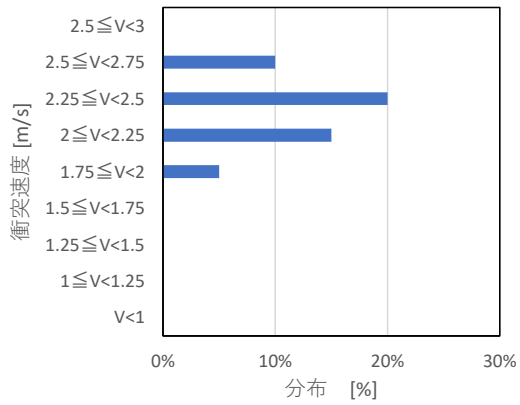


(c) We30

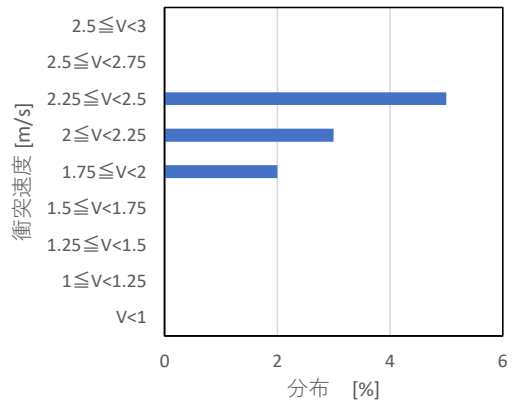


(d) We40

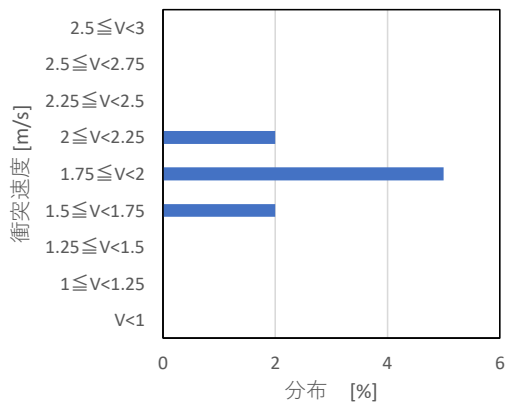
図- 5.5.1 漂流物の接近速度 (TypeA)



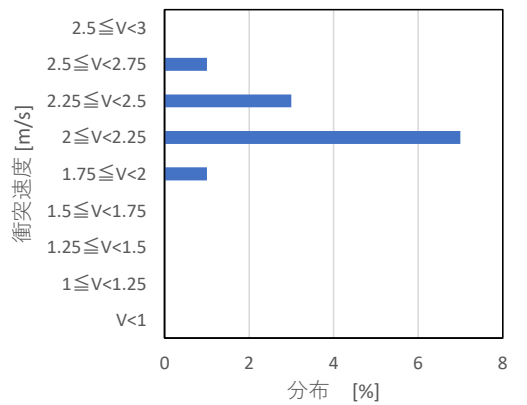
(a) We10



(b) We20



(c) We30



(d) We40

図- 5.5.2 漂流物の接近速度 (TypeB)

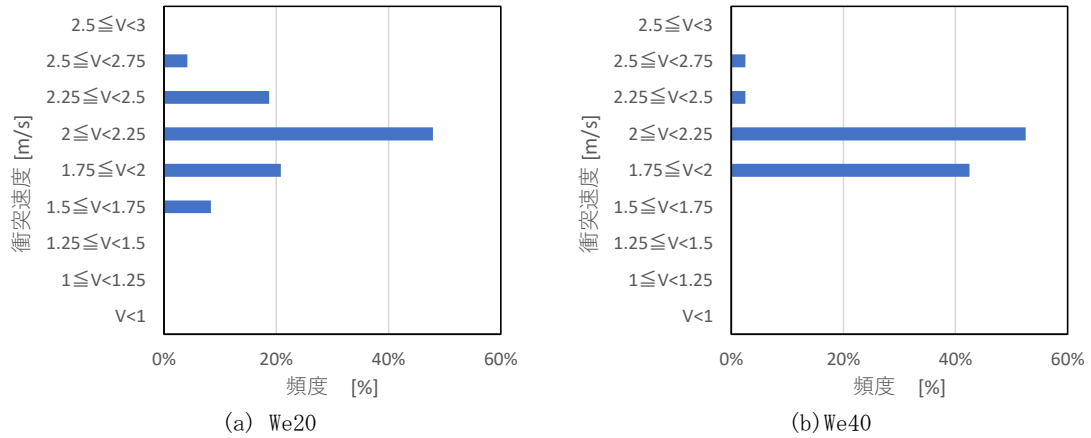


図- 5.5.3 漂流物の接近速度 (TypeC)

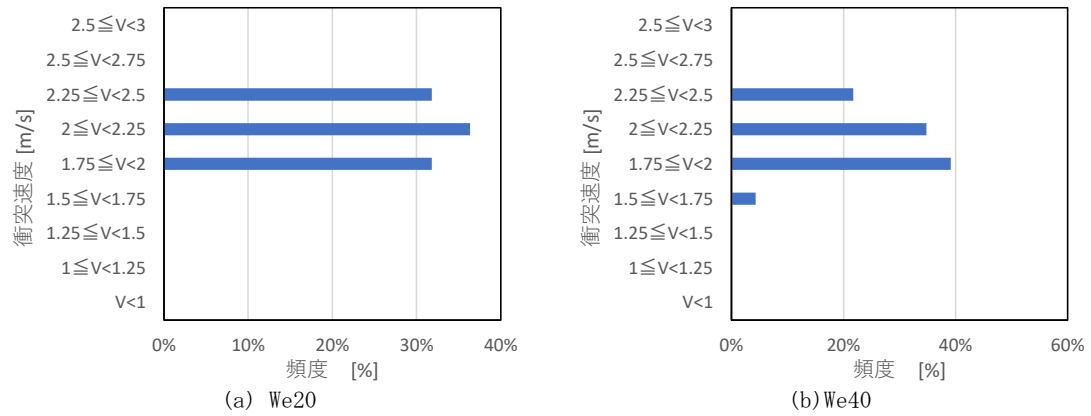


図- 5.5.4 漂流物の接近速度 (TypeD)

表- 5.5.1 衝突速度の平均値

	(m/s)			
	We10	We20	We30	We40
TypeA	2.00	2.15	1.83	2.02
TypeB	2.30	2.19	1.86	2.18
TypeC	—	2.12	—	2.04
TypeD	—	2.13	—	2.03
平均	2.15	2.15	1.85	2.07
波検定結果	2.27	2.27	2.08	2.27

6. 漂流物衝突力の評価

6.1. 衝突頻度

漂流物の衝突は、伝播する波の先端部分に漂流物が連行される（波に乗る）形で衝突する場合と、流れにより衝突する場合が考えられるが、本試験では前者を対象としている。なお、後者については平面実験等により別途検討する必要がある。またここで適用した波形は、すべて汀線に到達する前に砕波する比較的津波高の大きな波形である。周期特性が十分長い波形や津波高が小さい波形で砕波しない場合については、その漂流特性を別途検討する必要がある。

図-6.1に、漂流物の初期位置と衝突頻度の関係を示す。漂流物のTypeごとに、各波ケースについて示した。なお、TypeBについては、試験ケースの初期位置は1種類のみのため示していない。

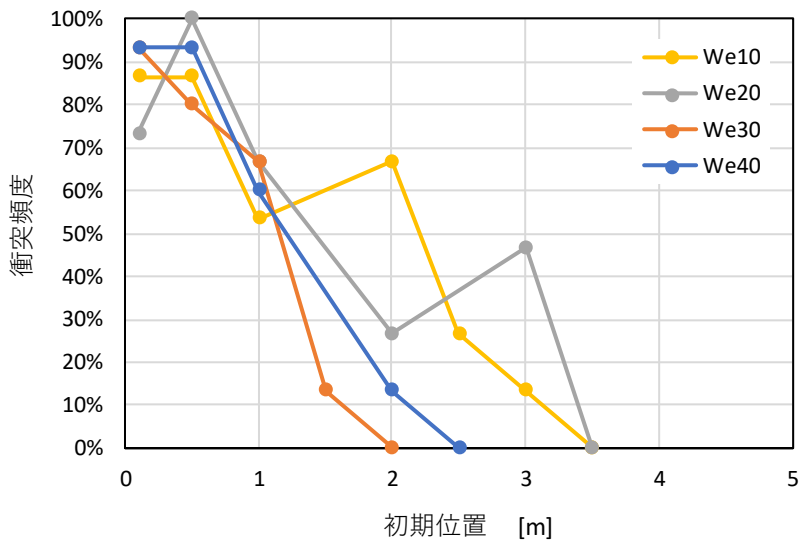
漂流物の初期位置による衝突頻度の違いを比較すると、TypeA、TypeCでは、汀線近傍である0.1、0.5mでほぼ80%以上の高い確率で衝突している。初期位置0.1m、0.5mで衝突していないケースでは、汀線を超える際に護岸の隅角部近傍を通過するため漂流物の姿勢が乱れ、横向きになる等、堤体に対し直角の姿勢で接近できず、堤体前面で上向き大きな流速に押し上げられることで、顕著な衝突が生じていない。また一部のケースでは、陸上の底面に張り付くように堤体に接近し、堤体の一番根元部分に衝突したため曲げひずみが生じず、結果としてここでは非衝突と判断されたケースもある。同様にTypeDにおいては、初期位置が汀線付近以外でも段波状の波形により姿勢が保てない傾向にあるため、前提に衝突が生じ難く衝突頻度が低くなっている。

TypeA、TypeCでは、衝突頻度は汀線から遠ざかるにしたがって、ほぼ線形的に減少しており、堤体から初期位置が遠いほど衝突確率は低下することが分かる。ただし、後述するように、TypeAでは初期位置が砕波点よりも沖だと衝突が生じていないのに対し、TypeCでは初期位置が砕波点より沖でも、衝突するケースがある。このため、沖に向けて一旦衝突頻度が低下したのち、再び増加している。

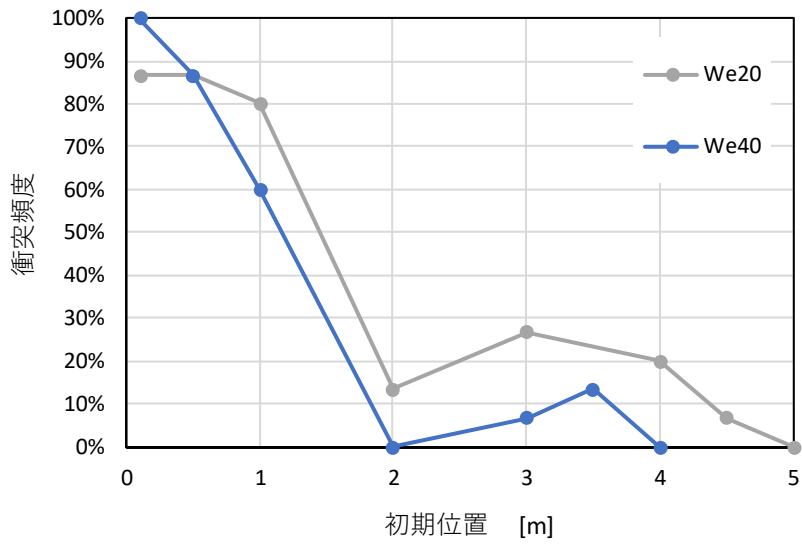
初期位置が砕波点より岸側のケースについて、TypeAとTypeCを比較すると、TypeAの方が衝突頻度は高くなる傾向にあり、初期位置が砕波点より沖側の場合と逆になっている。これは、TypeAとTypeCは重量が同じため、幅の大きなTypeAの方が船尾側の断面積が大きく、後ろから押される流体力がより大きくなることが要因と考えられる。一方砕波点より沖側では、船長が長いほど波に連行されやすいと考えられるため、特性が逆転している。

波形の違いによる衝突頻度の違いは、We10とWe20はほぼ同じになっており、We30とWe40では若干We30の方が低いもののほぼ同程度である。これらはそれぞれ、津波高が0.2mと0.15mであり、津波高が同じであれば衝突頻度は同程度となることが分かる。これは、類似事業で得られた結果と整合する。また、波検定の結果によれば、We10とWe20の砕波点は汀線から4.5m、We30は2.75m、We40は3.75mであった。TypeA、TypeDの結果によれば、砕波点から岸側へ概略1.0mの間に初期位置を設定した場合には衝突が発生しておらず、それよりも岸側になると衝突が発生する可能性が生じることが分かる。砕波直後は、砕波による乱れと空気の巻き込みが生じるために、漂流物を十分加速するだけの流体力が発生しておらず、また水中に潜りこむ場合もある。そのため波に連行されずに、非衝突になっていると推察される。砕波による空気の巻き込みや乱れの規模は、砕波時の津波の高さにほぼ比例すると考えると、砕波後から概略津波高の5倍までの

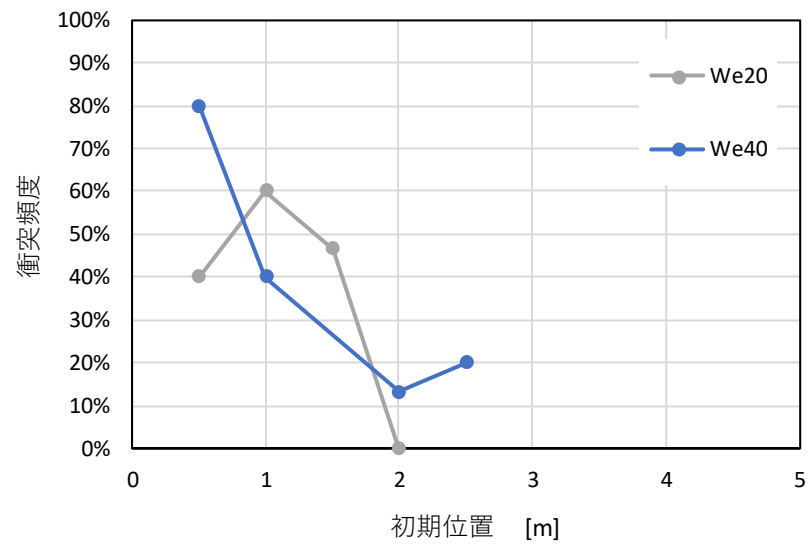
距離に初期位置を設定した場合、衝突は発生しないと考えることが出来る。ただし、TypeC のように漂流物の長さが長くなると、砕波による乱れがあっても水面に浮上した状態を保持し、波に連行されて衝突する。このような場合、初期位置が砕波点より沖側であっても、砕波帯を抜けて汀線まで漂流することになる。初期位置が砕波点より沖側の場合の特性について、次節に記述する。



(a) TypeA



(b) TypeC



(c) TypeD

図- 6.1 初期位置と衝突頻度の関係

6.2. 初期位置が砕波点より沖側の場合の漂流特性

漂流物の衝突は、一部のケースを除いて、初期位置が砕波点より岸側の場合に生じている。一方、初期位置が砕波点より沖側の場合も、衝突はしないものの波に連行されて岸側に漂流する場合がある。表-6.1は、初期位置が砕波点より沖側の場合について、漂流特性を示したものである。波のピークに対し波形の前面側で連行されない（波に乗らない）ケースを×、波に連行されるが砕波点の乱れに巻き込まれ、岸まで到達しないケースを●、岸まで連行されて衝突するケースを○で示した。試験は、同じ条件で3回繰り返し、1回でも連行された場合には、○または●として示している。なお、×のケースでも、波ではなく流れにより漂流物は岸に近付くが、先行する波の反射波に押し戻されて汀線までは漂流物が到達していない。また、TypeCのWe20のケースについては、衝突試験のケースに含まれている。

表中には、波検定で得られた水面勾配の値を示した。これによると、TypeAおよびTypeCでは、水面勾配が概略1以上となる場所に漂流物があると、波に連行される可能性があることが分かる。試験の観察によれば、TypeAよりもTypeCの方が安定して波に連行される傾向にある。またTypeDにおいても、水面勾配が1を超えると頻度は低いが波に連行される場合がある。

TypeCのいくつかのケースにおいては、堤体に衝突している。TypeAでは、砕波の際に切り立った水面により前方へ回転し、漂流物は水中に潜り込んでしまい、この間に波形のピークが前方へ進行してしまうために波に取り残される形で汀線まで漂流しない。一方TypeCの場合、船長が長いために砕波の際にも水面に浮遊したままとなる場合があり、砕波した波に押される形で堤体に衝突するケースが確認される。TypeDでは、まれに波に連行されるものの、TypeAと同様に砕波に巻き込まれて、それ以上岸側に連行されることはない。

表- 6.1 砕波点より沖に位置する漂流物の漂流特性

初期位置 [m]		2.5	2.75	3	3.25	3.5	3.75	4	4.25	4.5	4.75	5	5.25	5.5
We10	水面勾配								2.11	2.21	2.32	1.81	1.30	1.00
	TypeA									×	×	●	●	×
	TypeC									●	●	●	×	×
	TypeD									×	×	●	×	×
We20	水面勾配								0.98	1.16	1.35	0.99	0.63	0.55
	TypeA									×	●	●	×	×
	TypeC									○	×	×	×	×
	TypeD									×	×	●	×	×
We30	水面勾配	1.23	1.27	1.16	1.04	0.82								
	TypeA		●	●	×	×								
	TypeC		●	○	×	×								
	TypeD		×	×	×	×								
We40	水面勾配					1.41	1.724	1.29	0.846	0.65				
	TypeA						●	●	×	×				
	TypeC						●	×	×	×				
	TypeD						×	●	×	×				

6.3. 衝突エネルギーの評価

図- 6.2～図- 6.4 に漂流物の初期位置とひずみエネルギーの関係を示した。なおここでは、15回の試行結果のうち、最大と衝突した試行回の平均のひずみエネルギーを示している。また、TypeBについては初期位置が0.5mの1種類のため、TypeAに同時に示している。

気中試験の結果によれば、漂流物が堤体の下部に衝突した場合、試験装置のひずみゲージの計測結果から得られる曲げひずみエネルギーは、せん断ひずみエネルギー等の影響により、堤体に伝わった衝突エネルギーよりも小さくなる。そこで、図- 6.2の結果を気中試験の結果により補正する。気中試験の結果から求めた ξ を用いると、堤体に伝達されたひずみエネルギー E' は、次式により表される（水中衝突試験を参照）。

$$E' = \frac{E}{\xi}, \quad \xi = \min(ah^n, 1)$$

上式によりひずみエネルギーを補正した結果について、漂流物の初期位置とひずみエネルギーの関係を示した。図- 6.5～図- 6.7に示した。ただし、衝突高さ0.025m以下の場合には、算出誤差が大きくなるため解析対象から除外した。

図- 6.2～図- 6.4と図- 6.5～図- 6.7を比較すると、衝突頻度は汀線から離れるにしたがって線形的に低下するのに対し、試験ケースによるばらつきは大きいものの、ある一定の範囲では汀線からの距離とひずみエネルギーの間に一定の相関を確認することが出来ない。漂流物が波形の先端部分に連行されて衝突するかどうかについては、初期位置が汀線から遠いほどその確率が低下するが、衝突した場合の衝突力については、初期位置の影響は小さいと言える。

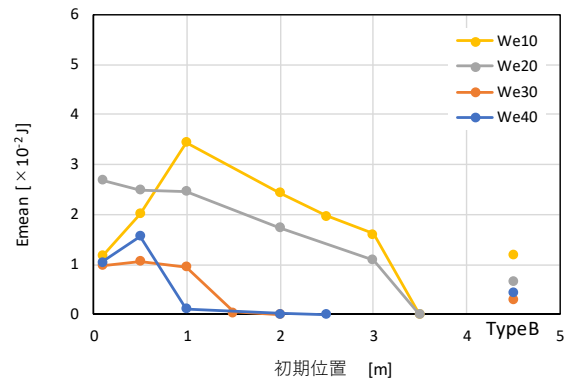
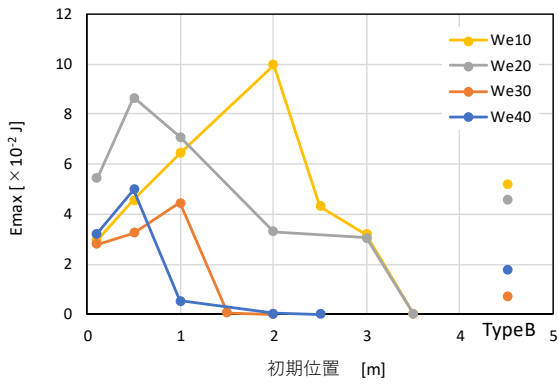
衝突が確認された初期位置の範囲で、砕波点に近い範囲（概略1m程度）では、ひずみエネルギーは汀線から遠ざかるにつれて小さくなっているが、これらのケースでは衝突した回数が少ないため、衝突エネルギーの最大値を評価するにはデータ数が十分でない。衝突エネルギーは漂流物が衝突する時の姿勢の影響を大きく受け、正面から衝突した場合には大きなひずみエネルギーが発生すると考えられるが、浮遊状態で衝突するため衝突角度は不規則である。15回の試行回数のうち、このような大きなひずみエネルギーが生じる衝突角度が含まれる場合には、ここに示したひずみエネルギーの値も大きくなるが、漂流物が堤体に対し直角の角度を保持して衝突するケースが含まれる確率は高くない。このように、衝突エネルギーには不規則性が高いため、衝突頻度に比較して結果のばらつきは大きくなる。また、衝突回数が少なればこのような大きなひずみエネルギーが生じる確率も低下するため、衝突頻度が20%以下と低い場合には、ひずみエネルギーは小さくなる傾向は確認出来る。また安全側の評価を考えた場合、ひずみエネルギーが小さい範囲も含めて、衝突する際には汀線からの距離に関係なく、同程度のひずみエネルギーが生じると評価することが妥当と考えられる。

波形の違いに着目すると、計測結果のばらつきが大きいため明瞭ではないものの、衝突頻度と同様にWe10とWe20、We30とWe40でそれぞれ同程度のひずみエネルギーが生じている。これらのケースでは、それぞれ津波高がほぼ同じであるが、衝突する際の漂流物の姿勢を確認すると、We10とWe20では浮遊状態で正面から衝突する傾向にあるが、We30とWe40では漂流開始時、段波の乱れに巻き込まれ縦方向に回転し、水中に潜り込むように動き出している。このため姿勢が安定せず、船尾が衝突する等、正面から衝突する確率が極めて低い。We10, We20とWe30, We40

では衝突速度は大きく違わないが、この衝突姿勢の影響でひずみエネルギーが小さくなっていると考えられる。

TypeA と TypeC (図- 6.5 と図- 6.6) について、衝突力が漂流物の初期位置の影響を受けないとして比較すると、最大値、平均値ともにひずみエネルギーの明確な違いは確認出来ない。TypeA と TypeC は重量や衝突速度がほぼ同じため、衝突によるひずみエネルギーもほぼ同じとなっていると考えられる。一方、図- 6.5 において TypeA と TypeB を比較すると、気中衝突試験では 2.0 m/s の衝突速度で衝突する場合には、漂流物の剛性の違いが表れなかったのに対し、水中衝突試験では TypeB の方が小さい。TypeB の試験ケースが少ないため明確な要因については確定出来ないが、気中衝突試験では正面から堤体に衝突しているのに対し、水中衝突試験では様々な角度で堤体に衝突しており、漂流物模型の先端部分以外が衝突している場合もある。このような場合には剛性の違いがひずみエネルギーに表れている可能性が考えられる。

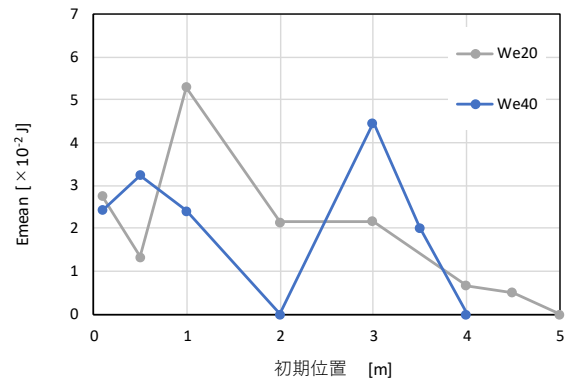
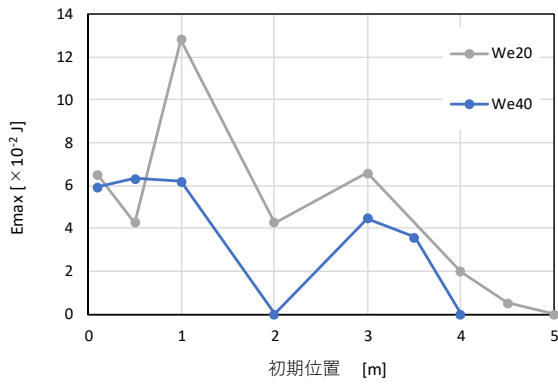
図- 6.8～図- 6.10 は、図- 6.5～図- 6.7 に示した高さ補正したひずみエネルギー E' と、衝突時の運動エネルギー W (ただし、速度は接近速度とする) の比 E'/W を算出した結果である。図中には、気中衝突試験 (衝突速度 2.0m/s) で得られた値を同時に示した。運動エネルギーに対する衝突ひずみエネルギーの比率は、概略の最大値で、TypeA で 1, TypeC で 0.7, TypeD で 0.5 程度である。一方、これを気中衝突試験と比較した場合、それぞれ 1.82 倍, 1.29 倍, 0.9 倍となる。後者は、気中と水中の違いを意味し、その要因としては付加質量の影響が考えられる。前述したように、水中衝突試験では衝突時の姿勢 (衝突角度) の影響を大きく受けるため、ここでは保守的な評価として、気中と水中の比をケースによらず 1.8 と考えると、付加質量係数は 0.8 と評価することが出来る。



(a) 最大値

(b) 平均値

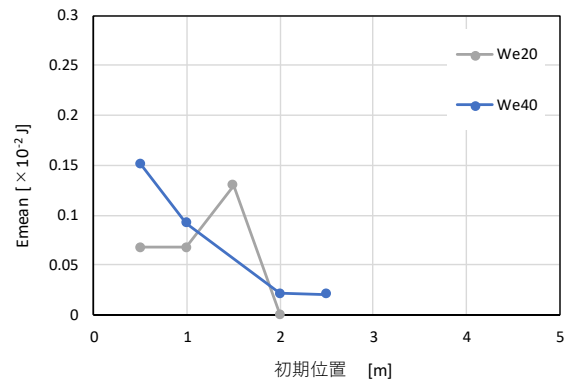
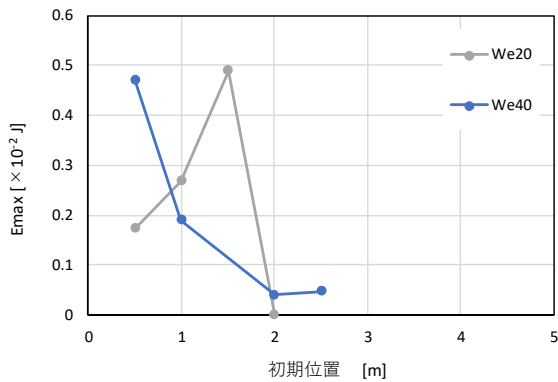
図- 6.2 漂流物の初期位置とひずみエネルギーの関係 (TypeA)



(a) 最大値

(b) 平均値

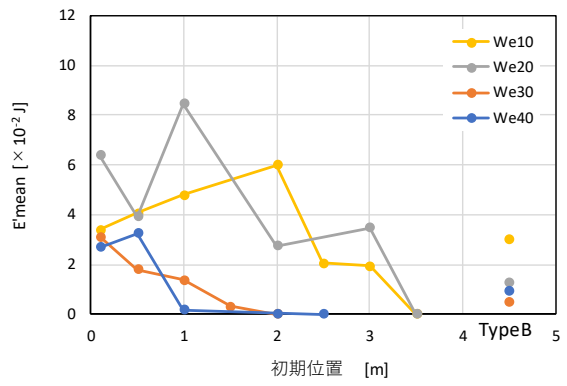
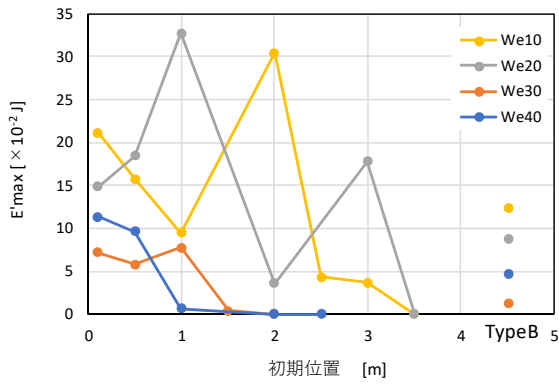
図- 6.3 漂流物の初期位置とひずみエネルギーの関係 (TypeC)



(a) 最大値

(b) 平均値

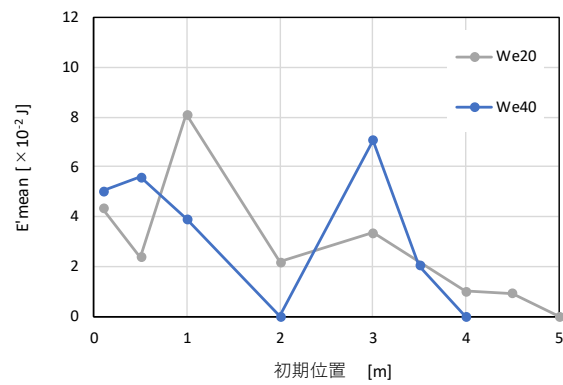
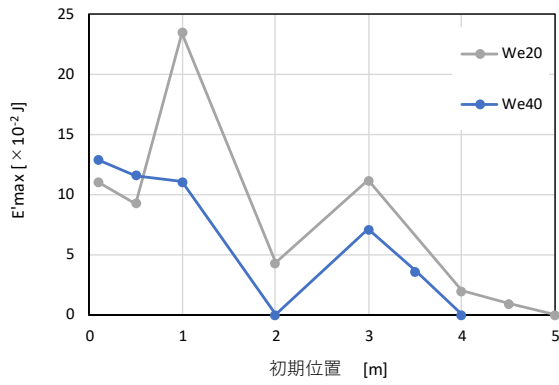
図- 6.4 漂流物の初期位置とひずみエネルギーの関係 (TypeD)



(a) 最大値

(b) 平均値

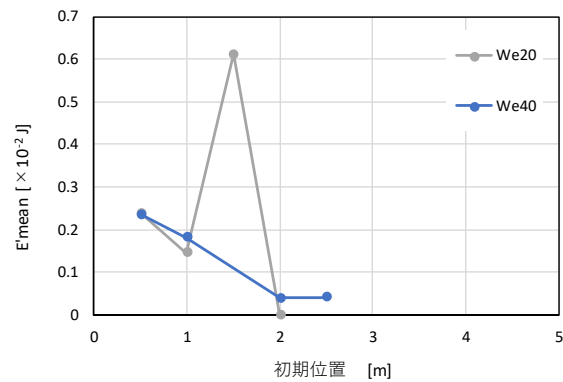
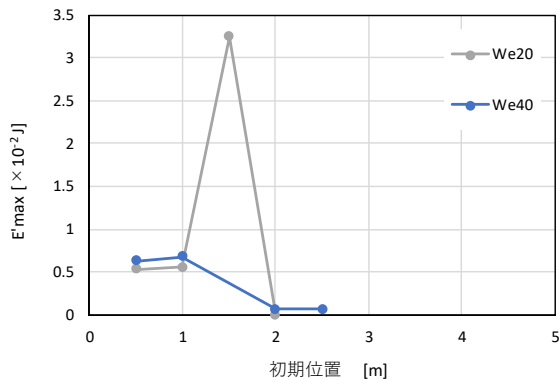
図- 6.5 漂流物の初期位置と高さ補正したひずみエネルギーの関係 (TypeA)



(a) 最大値

(b) 平均値

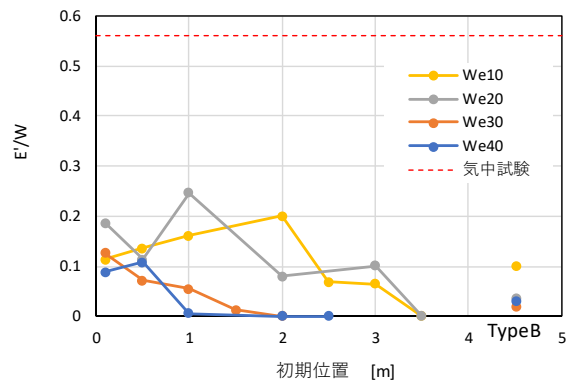
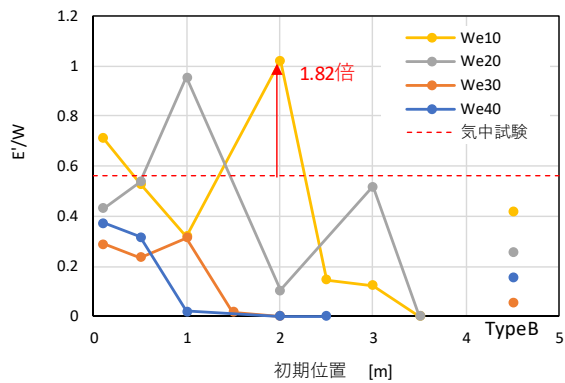
図- 6.6 漂流物の初期位置と高さ補正したひずみエネルギーの関係 (TypeC)



(a) 最大値

(b) 平均値

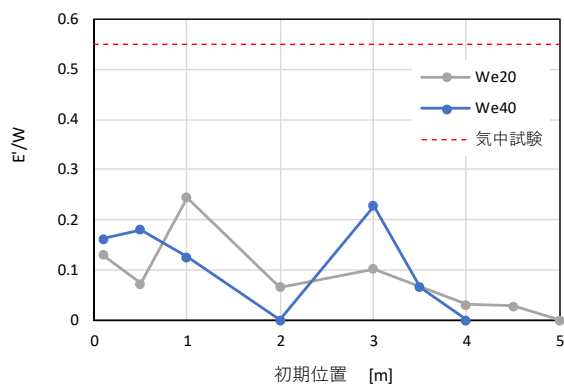
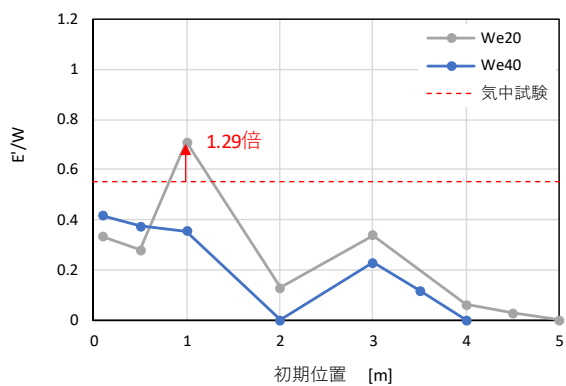
図- 6.7 漂流物の初期位置と高さ補正したひずみエネルギーの関係 (TypeD)



(a) 最大値

(b) 平均値

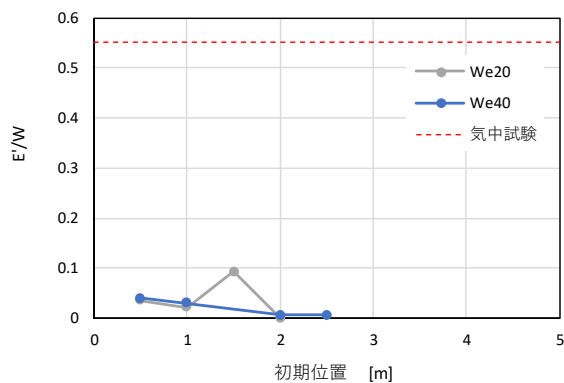
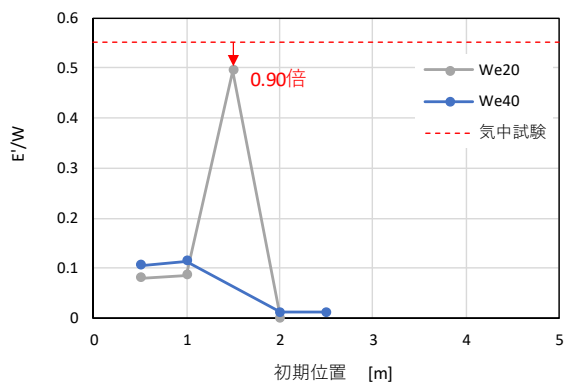
図-6.8 衝突ひずみエネルギーに対する運動エネルギーの伝達率 (TypeA)



(a) 最大値

(b) 平均値

図-6.9 衝突ひずみエネルギーに対する運動エネルギーの伝達率 (TypeC)



(a) 最大値

(b) 平均値

図-6.10 衝突ひずみエネルギーに対する運動エネルギーの伝達率 (TypeD)

6.4. 衝突力の算定

ここでは現象を単純化し、衝突による伝達エネルギー E に対し、被衝突物（防潮堤）が線形ばね定数 k で表される剛性でひずむとしてモデル化する。ばねによる反発力 F およびばねに蓄積するエネルギー E は、最大縮み量 Δx に対し、

$$F = k\Delta x$$

$$E = \frac{1}{2}k\Delta x^2$$

で表される。また、初速 V_0 でばねが縮み始め Δt で最もばねが縮むとすると、最大縮み量 Δx は

$$\Delta x = \int_0^{\Delta t} V_0 \cos\left(\frac{\pi}{2\Delta t}t\right) dt = \frac{2\Delta t}{\pi} V_0$$

で表せられる。したがって、

$$F = \frac{2\Delta t}{\pi} k V_0$$

$$E = \frac{1}{2}k\left(\frac{2\Delta t}{\pi} V_0\right)^2 = 2k\left(\frac{\Delta t}{\pi} V_0\right)^2$$

となる。両式を用いて k を消去すると、

$$k = \frac{E}{2\left(\frac{\Delta t}{\pi} V_0\right)^2}$$

$$F = \frac{2\Delta t}{\pi} \frac{E}{2\left(\frac{\Delta t}{\pi} V_0\right)^2} V_0 = \frac{\pi E}{\Delta t V_0}$$

の関係が得られる。ここで、漂流物の質量を M とすると初速 V_0 による運動エネルギー E は、

$$E = \frac{1}{2} M V_0^2$$

であるので、 F と E に対して、

$$F = \frac{\pi E}{\Delta t} \sqrt{\frac{M}{2W}} = \frac{\pi}{\Delta t} \sqrt{\frac{ME}{2}}$$

の関係が得られる。図-6.11は上式を表したものであり、ほぼ質量が同じTypeA, TypeB, TypeCとTypeDについて示した。

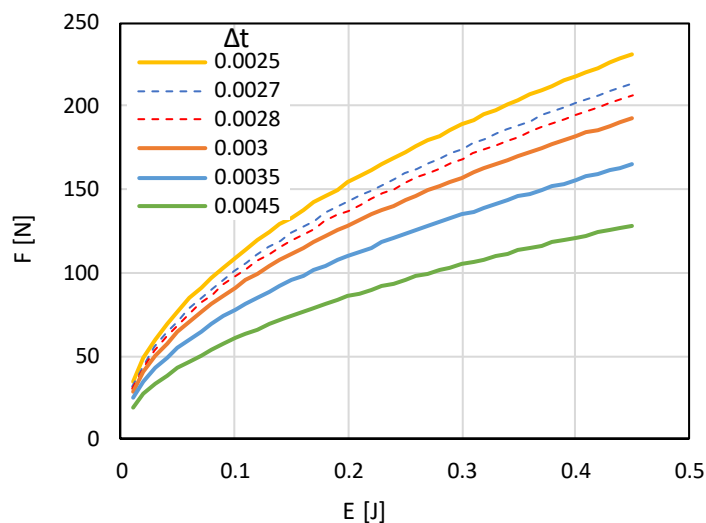
式から分かるように、同じエネルギーであっても力は衝突時間に反比例して小さくなり、衝突ひずみエネルギーを衝突力に変換するには、衝突時間 Δt を決める必要がある。上式から

$$\Delta t = \pi \sqrt{\frac{M}{4k}}$$

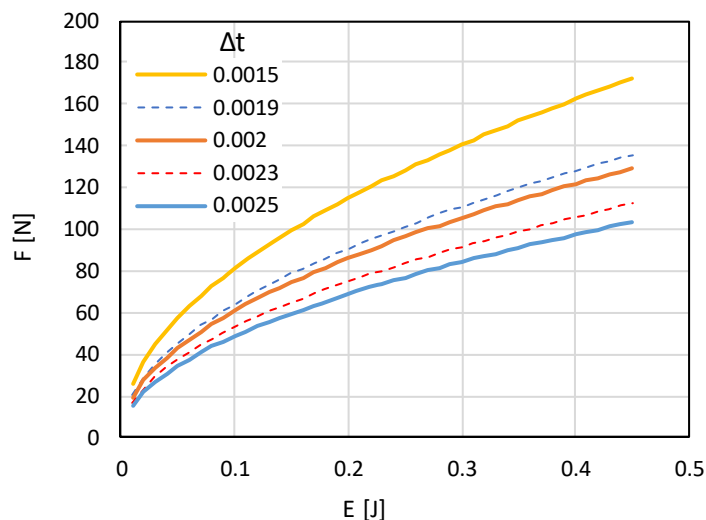
の関係が成り立つため、漂流物が同じであれば衝突時間が同じとなる。ここでは気中衝突試験の結果に基づき Δt を設定する。気中衝突試験によれば、衝突時間 Δt はTypeA, TypeCは衝突速度によらずほぼ一定であるが、TypeC, TypeDでは衝突速度によって若干異なっている。TypeDはウレ

タン素材により剛性を低くしているため線形ばねの仮定が適用出来ないことが、TypeD は、質量が小さく漂流物が跳ね返りやすいため、堤体模型が一体となっている時間が短いことがそれぞれ要因と考えられる。ここでは水中衝突試験における衝突速度に近い衝突速度 2m/s の時の値を採用し、TypeA, TypeC では $\Delta t=0.0028s$, TypeB では $\Delta t=0.003s$, TypeD では $\Delta t=0.0023s$ (表-4.2 参照) とする。

以上の理論により、図- 6.5～図- 6.7 に示した E から F を求めた結果を、図- 6.12～図- 6.14 に示す。なお、 $F-E$ 関係の式に適用する M は、付加質量を考慮した質量となるが、係数となる $1/\Delta t$ の Δt も付加質量について同じ次数の関数となるため、 $F-E$ の変換においては付加質量の影響はなくなる。

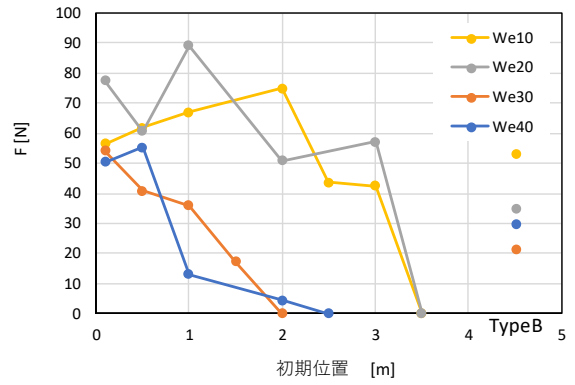
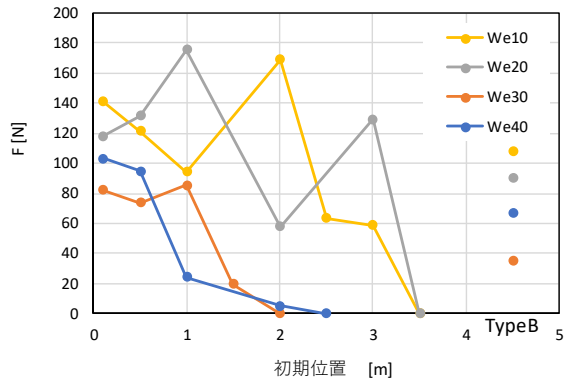


(a) TypeA, TypeB, TypeC (質量 0.15 kg)



(b) TypeD (質量 0.03 kg)

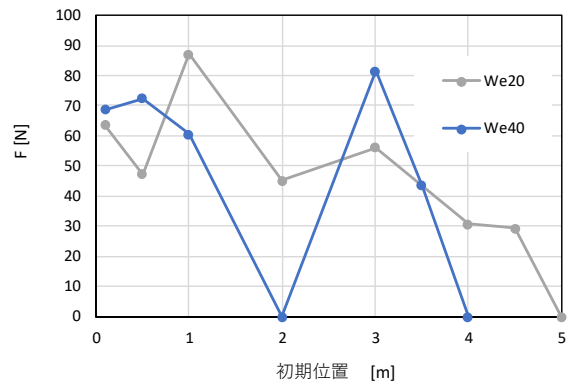
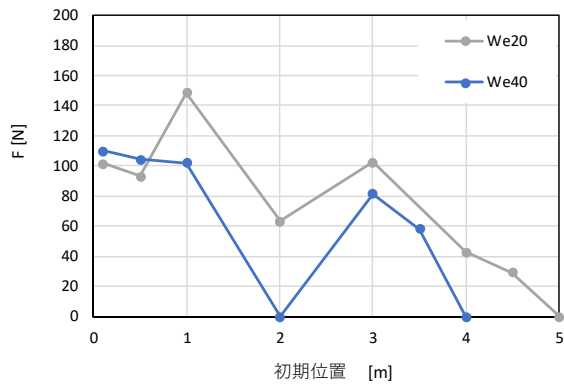
図- 6.11 衝突エネルギーと衝突力の関係



(a) 最大値

(b) 平均値

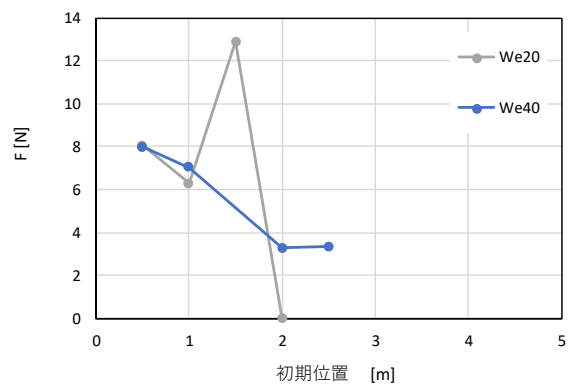
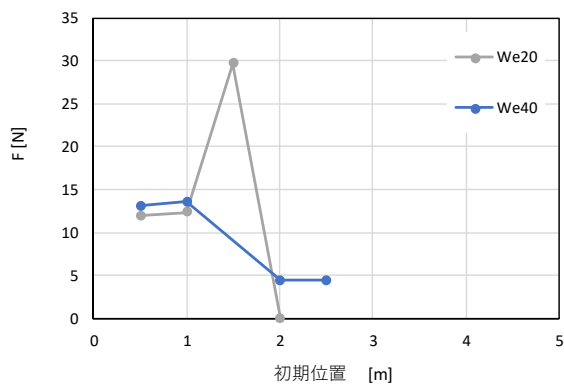
図- 6.12 漂流物衝突力の算定結果 (TypeA)



(a) 最大値

(b) 平均値

図- 6.13 漂流物衝突力の算定結果 (TypeC)



(a) 最大値

(b) 平均値

図- 6.14 漂流物衝突力の算定結果 (TypeD)

6.5. 衝突力の評価

以上の結果に基づき、衝突力の評価を以下にまとめる。

気中衝突試験によれば、代表衝突速度を 2.0 m/s とした場合、運動エネルギーに対する衝突エネルギーの伝達率 $\alpha=E/W$ は、表-6.2 となる。これは、漂流物および堤体の剛性や重量によって決まるパラメタである。これに対し水中衝突の場合、付加質量係数 C_M 、質量係数 $C_{MA}=1+C_M$ を考慮し、質量 M を $C_{MA}M$ と考える。したがって、堤体に生じるひずみエネルギーは、

$$E = \frac{1}{2} \alpha C_{MA} M V_0^2$$

と表される。次に、衝突時間を Δt とすると、

$$F = \frac{\pi}{\Delta t} \sqrt{\frac{C_{MA} M E}{2}}$$

の関係が成り立つため、衝突力 F は、衝突時間および剛性による評価式として、それぞれ

$$F = \frac{\pi}{\Delta t} \sqrt{\frac{1}{4} \alpha (C_{MA} M V_0)^2} = \frac{\pi \sqrt{\alpha}}{2 \Delta t} C_{MA} M V_0$$

$$F = \sqrt{\frac{\alpha k}{M}} \sqrt{C_{MA} M V_0}$$

と表すことが出来る。この時、 Δt は水中における衝突時間となるが、 Δt は $M^{1/2}$ に比例すると考えると、気中の衝突時間を適用した場合は、

$$F = \frac{\pi \sqrt{\alpha}}{2 \Delta t} \sqrt{C_{MA} M V_0}$$

$$F = \sqrt{\frac{\alpha k}{M}} \sqrt{C_{MA} M V_0}$$

となる。このうち α と Δt は、漂流物および堤体の剛性や重量の関数となることから、一般形としては、

$$F = f_0(K, M) \sqrt{C_{MA} M V_0} \quad f_0 = \frac{\pi \sqrt{\alpha}}{2 \Delta t} = \sqrt{\frac{\alpha k}{M}}$$

とすることが出来る。ここで f は、気中衝突において漂流物および堤体の剛性や重量によって決まる係数である。

表-6.2 本事業における水理試験での各パラメタの値

$\alpha (=E/W)$	TypeA	TypeB	TypeC	TypeD
	0.56	0.51	0.54	0.27
Δt (気中)	0.0028 s	0.003 s	0.0028 s	0.0023 s
C_M	0.8			

図-6.15に、上述の提案式による漂流物衝突力の評価結果を横軸、水理試験の結果を縦軸として両者を比較した結果を示す。図中の色違いは試験ケースの違いを表しており、すべての試行試験の結果を示した。図によれば、本提案式により、衝突力を安全側に評価できることが分かる。

一部のケースでは、提案式は2~3倍の過大評価になっている。15回の繰り返しの試行試験の中で、堤体に直角の角度で衝突するケースがなかった場合に提案式が過大になっていると推察される。したがって、試行回数を増やすことにより提案式に近い衝突力が計測される可能性があり、漂流物の衝突角度は偶発性が高いことから、安全側に評価することが適切であると考ええる。また、特にTypeBの衝突力が過大評価となる傾向にある。提案式は気中衝突試験の結果に基づいてエネルギー伝達率を算定しているが、水中衝突試験で漂流物が角度を持って衝突する場合には、剛性が低いことの影響が大きくなり、気中衝突試験よりもエネルギー伝達率が小さくなっている可能性がある。

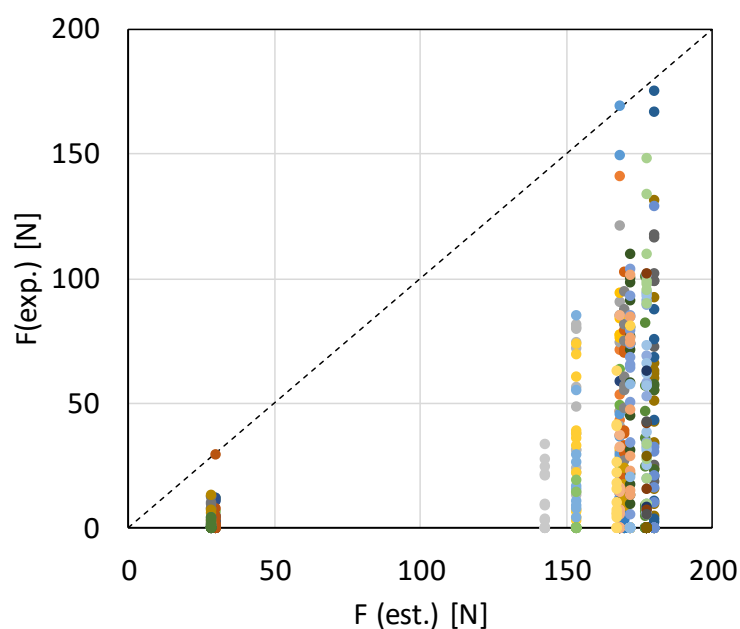


図- 6.15 提案式と試験結果の比較

7. 既往の評価式との比較

7.1. 既往の研究

津波による漂流物の衝突力の評価式として、主なものを表-7.1に示す。

これらのうち、多くの評価式は、流木を対象に提案されている式である。船舶を対象とした場合、船舶と流木では剛性が異なるため、衝撃力の算定のためには船舶の剛性を考慮する必要がある。上記評価式のうち船舶剛性を考慮出来る可能性があるものを表中に示した。ただし、いずれの式も船舶の衝突力を評価するには課題が残る。また後述するように、式の導出のために実施されている水理実験は、いずれも陸上部に漂流物を設置して段波状の津波を作用させたものである。この場合、漂流物は水塊に押されて受圧板に衝突するが、浮遊している船舶が衝突する場合は、これとは状況が異なる。陸上部の遡上津波を対象とした実験ではあるが浮遊状態も対象としている池野ら³⁾の実験では、漂流物が段波先端部と同時に移動せずこれに遅れる場合は、有意な衝突力が生じないことが示されている。

船舶の衝突の場合、例えば防潮堤の破壊等を考える場合には先に船舶が圧壊すると考えられ、そのため流木を対象とした式を船舶に適用した場合、剛性が大きすぎるために過大評価になると考えられる。一方道路橋示方書の式では、弾性変形を仮定し衝突時間を1s(後述)と仮定しているが、この衝突時間は長すぎる。しかしながら、圧壊することを考慮すると、結果として妥当な値となる可能性も考えられる。ただしこれについては、圧壊を考慮した適切な方法で衝突力を評価しないと判断できない。圧壊を考慮した評価式としては、表中の土木学会の式¹⁰⁾が挙げられるが、これは津波を対象としたものではなく、航行船舶の衝突を対象としているため、衝突速度が小さく静的な荷重による圧壊を対象としたものであり、津波衝突のような大きな速度での衝突時の衝撃的な衝突力を評価できない。

以上のように、既存の評価式では、いずれも船舶の衝突を精度良く評価するのは困難であり、剛性や波条件の観点から、適用には課題がある。以下に、各評価式の概要について記す。

(1) 松富の式²⁾

$$F = \left[1.6 C_{MA} \left\{ \frac{V}{(gD)^{0.5}} \right\}^{1.2} \left(\frac{\sigma_f}{\gamma L} \right)^{0.4} \right] \gamma D^2 L$$

γ : 漂流物の単位体積重量, D : 漂流物直径, L : 漂流物長さ, C_{MA} : 見かけの質量係数 (=1.7),
 σ_f : 木材の降伏応力

○実験範囲: $M=0.3\sim 8.6$ kg, $D=4.8\sim 12$ cm, $L=38.4\sim 160$ cm, $V=0.5\sim 2.5$ m/s

松富の式は、流木を対象としたものである。式中の係数1.6は、気中の衝突実験より安全側に求めたものである。また、基本的な式形は気中衝突実験に基づいており、質量係数のみ水中衝突実験から導いたものである。松富の式を、前述の本事業による提案式(以降、提案式と呼ぶ)と同様に一般形に変形すると、

$$F = 6.4 \frac{\sigma_f^{0.4} D^{0.2}}{\pi^{0.6} (4M)^{0.4}} C_{MA} M V^{1.2}$$

$$F = 6.4 \frac{\sigma_f^{0.4} D^{0.2}}{\pi^{0.6} (4M)^{0.4}} C_{MA} MV^{1.2} = f_1 C_{MA} MV \quad f_1 = 6.4 \frac{\sigma_f^{0.4} D^{0.2}}{\pi^{0.6} (4M)^{0.4}} V^{0.2}$$

となる。提案式と比較すると、提案式では付加質量係数が 1/2 乗で掛かっているのに対し、本式では 1 次となっている。なお、付加質量係数については、以降のいずれの提案式においても考慮する場合には 1 次となっている。これは、本提案式においても水中の衝突時間を考えた場合には付加質量係数に対して 1 次の式となるが、水中の衝突時間が付加質量係数の 1/2 乗に反比例するとしているためである。松富の式では、剛性等によって決まるエネルギー伝達率に関わる係数 f_1 が、衝突速度 V の 0.2 乗に比例している。提案式では、安全側に f は剛性に関わらず一定としているが、気中衝突試験によれば衝突速度が小さくなるとエネルギー伝達率は小さくなっており、この結果と整合する。ただし試験結果によれば、ある程度衝突速度が大きくなるとこの値は一定に近づく。したがって松富の式は、本試験結果に対しては、衝突速度が大きくなると過大評価になると考えられる。

松富の式では、衝突力は衝突速度に比例し、衝突時間に反比例するとして評価式が導出されている。この際、衝突時間は最大塑性変形長を衝突速度で除したものに比例するとしており、この最大塑性変形長は衝突力と木材の降伏応力の関数となっている。このような次元解析の結果、衝突速度の 1.2 乗に比例する形式となっている。ただし、この降伏応力と剛性（弾性係数）の関係は、材料によって異なる。松富の式は木材を対象としているため、別の材質の漂流物に適用する場合には、適切な降伏応力パラメタの入力値についても検討する必要がある。

(2) 池野らの式³⁾

$$F = \left[S \cdot C_{MA} \left\{ \frac{V}{(g^{0.5} D^{0.25} L^{0.25})} \right\}^{2.5} \right] gM, \quad S = 5$$

M : 漂流物質量, D : 漂流物直径, L : 漂流物長さ, C_{MA} : 質量係数 (=2.0)

○実験範囲 : $M=0.09 \sim 3.04$ kg, $D=2.9 \sim 8.0$ cm, $L=20 \sim 89$ cm, $V=2.5$ m/s 程度

池野らの式では、まず波速と漂流物移動速度の関係から、無次元移動速度として、 $V/(g^{0.5} D^{0.25} L^{0.25})$ を支配パラメタとして設定している。これを用いて、無次元衝突力と無次元移動速度の実験値を整理することにより、2.5 乗の上式の実験式として導出している。本式では、漂流物を衝突による変形を無視した剛体として取り扱っている。そのため、剛性に関わる変数を含んでおらず、変形を考慮する場合には課題があることが論文内にも述べられている。提案式と同様に一般形に変形すると、

$$F = \frac{SV^{1.5}}{(g^{0.25} D^{0.625} L^{0.625})} C_{MA} MV = f_2 C_{MA} MV \quad f_2 = \frac{SV^{1.5}}{(g^{0.25} D^{0.625} L^{0.625})}$$

となる。提案式と比較すると、剛性等によって決まるエネルギー伝達率に関わる係数 f_2 が、衝突速度 V の 1.5 乗に比例している。前述したように、実験データの整理に基づき、式中の 2.5 乗が決まっていることから、実験範囲からはずれた条件においては、適用性が確認されていない。また、衝突速度の影響を非常に受けやすいことが分かる。

(3) 水谷らの式⁴⁾

$$F = 2\rho_w \eta_m B V^2 + \left(\frac{MV}{\Delta t} \right)$$

M : 漂流物質量, B : 漂流物幅, η_w : 漂流物前面の水位, Δt : 衝突時間

○実験範囲 : $M=0.015\sim 0.09$ kg, $B=0.08, 0.16$ m, $V=0\sim 1$ m/s

水谷らの式は、遡上波による陸上コンテナの移動を対象としたものであり、コンテナ漂流物は、浮上せずに地面を滑るように移動して対象構造物に衝突する場合を対象としている。評価式の第1項は、漂流物の背面に対し単位時間当たりに流入する水の運動量を表し、第2項は、衝突力が衝突直後から時間的に線形に増加すると仮定した漂流物の運動量から求められるものである。他の評価式と異なり2項に式が分かれているため一般形式にすることが難しいが、提案式と同様に一般形に変形すると、

$$F = \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{2\rho_w \eta_m B V \Delta t}{M} + 1 \right) M V = f_3 M V \quad f_3 = \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{2\rho_w \eta_m B V \Delta t}{M} + 1 \right)$$

となる。ここで、 f_3 の括弧内は質量係数の意味合いを持つと考えられることも可能である。また本式では、剛性等によって決まるエネルギー伝達率に関わる変数が、 Δt に集約されている。式の適用においては、この Δt の評価方法が課題となる。水谷らによる陸上遡上波を対象としたコンテナ衝突試験では、第1項と第2項では第1項が支配的であるとしている。

両項の値を比較すると、本試験の評価値では運動量項が支配的となっている。この運動量項では、衝突時間 dt がパラメタとなっており、ここでは、試験結果からこれを0.001sとしているため、比較的試験結果を良好に再現していると考えられる。

(4) 有川らの式⁵⁾

$$F = \gamma_p \chi^{\frac{2}{5}} \left(\frac{5}{4} \tilde{M} \right)^{\frac{3}{5}} V^{\frac{6}{5}}, \quad \chi = \frac{4\sqrt{a}}{3\pi} \frac{1}{k_1 + k_2}$$

$$k_n = \frac{(1 - \nu_n^2)}{\pi E_n}, \quad \tilde{M} = C_{MA} M_1$$

M : 漂流物質量, a : 衝突面半径の1/2, E : ヤング率, ν : ポアソン比, γ_p : 塑性によるエネルギー減衰 (=0.25), 添え字1, 2は、それぞれ衝突体, 被衝突体を示す。

○実験範囲 : $M=0.09\sim 3.04$ kg, $W=0.49$ m, $H=0.52$ m, $L=1.21$ m, $V=0.9\sim 2.2$ m/s 程度

有川らは、比較的大きなコンテナ模型の衝突実験を実施し、その後同様の実験を流木についても実施している。本式は、Hertzの弾性接触理論に基づくものであり、漂流物が均質体であれば各諸量を設定することが出来る。ただし、衝突速度の次数が6/5となっているが、これは漂流物として球が平面に衝突する場合を仮定している。提案式と同様に一般形に変形すると、

$$F = \left(\frac{5}{4} \right)^{\frac{3}{5}} \gamma_p \left(\frac{\chi}{C_{MA} M} \right)^{\frac{2}{5}} C_{MA} M V^{1.2} = f_4 C_{MA} M V \quad f_4 = \left(\frac{5}{4} \right)^{\frac{3}{5}} \gamma_p \left(\frac{\chi}{C_{MA} M} \right)^{\frac{2}{5}} V^{0.2}$$

本式は、基本的に松富の式と同一の形式となっているが、漂流物や被衝突構造物の剛性を取り込むことが可能な形式になっている。評価式としては、松富の式と同様の特徴を持つ。ただし、係数の違いにより松富の式よりも小さな値となる。

(5) FEMA⁷⁾

$$F = 1.3V \sqrt{k M C_{MA}}$$

M : 漂流物質量, k : 有効軸剛性

FEMA の式は、漂流物の運動方程式に基づいたものであり、被衝突構造物の変位を無視した場合に漂流物の軸剛性のみにより衝突力を評価するものである。したがって、本試験のように堤体の変位を無視できない場合には、評価式による算定値は大きくなる。ただし本式では、被衝突構造物の剛性を考慮することも可能である。導出過程としては単純な運動方程式に基づいているため、他の評価式に比較して経験的パラメタ（経験式）の寄与が小さく理論式に近いが、軸剛性の取り扱いが課題となる。提案式と同様に一般形に変形すると、

$$F = 1.3 \sqrt{\frac{k}{M}} \sqrt{C_{MA}} MV = f_5 \sqrt{C_{MA}} MV \quad f_5 = 1.3 \sqrt{\frac{k}{M}}$$

ここに示した評価式の中では唯一、提案式と同じように衝突力が付加質量の 1/2 乗に比例する形式となっている。また、剛性等によって決まるエネルギー伝達率に関わる変数についても、ほぼ同じ形式となっている。

(6) 道路橋示方書⁸⁾（以降、道示書）

$$F = 0.1gMV$$

M ：漂流物質量

道示書の式では、衝突時間が評価式に明示的に内包されていないが、衝突時間を 1s の固定値とした時の力積から導出されたものと考えられる。ただし、この 1s の根拠は不明であり、式の妥当性を文献調査等で証明するのは難しい。また衝突時間 1s は、実施の衝突時間を考えると非常に長いため、道示書の式は一般に過小評価を与える。提案式と同様に一般形に変形すると、

$$F = f_6 MV \quad f_6 = 0.1g$$

なお道示書の式では、付加質量は考慮されていない。

表-7.2 は、大阪府の実施した「南海トラフ巨大地震土木構造物耐震対策検討部会」の第 6 回資料 2 に示されている、各式による衝突力の評価値の比較である。対象は主に流木であるが、道路橋示方書の式は他の式に比較して 1~2 オーダー小さい値となっている。これは、特に流木のような比較的剛性が大きく、また圧壊し難いものを対象とした場合、衝突時間 1s の仮定が大きすぎるものが要因である。

表-7.1 既往の衝突力評価式

評価式	根拠	対象	船舶剛性考慮	備考
松富らの式 ¹⁾ 松富の式 ²⁾	流木を対象とした段波水理実験	流木	×	木材の弾性係数と降伏応力の関係を内包する. 船舶への適用には課題がある
池野らの式 ³⁾	流木を対象とした水理実験	流木	×	材質のパラメタを含んでいない. 船舶への適用には課題がある
水谷らの式 ⁴⁾	陸上部のコンテナを対象とした水理実験	コンテナ	△	衝突時間の設定が課題となる.
有川らの式 ^{5), 6)}	実験および弾性接触理論	流木, コンテナ	△	剛性や付加質量係数の設定が課題となる.
FEMA ⁷⁾	非減衰振動方程式	流木, コンテナ	△	有効軸剛性や付加質量係数の設定が課題となる.
道路橋示方書 ⁸⁾	衝突時間 1s と仮定した力積の式	流木等	△	衝突時間 1s の根拠は不明
ガイドライン ⁹⁾	被衝突側の塑性変形に基づくエネルギー消費式	限定なし	△	有限要素法等による防潮堤の弾性解析が必要.
土木学会の式 ¹⁰⁾	船舶の静的圧壊(衝突速度小)を仮定した式	船舶	×	衝突速度を考慮しない. 船舶の剛性で衝突力が決まる.

表-7.2 各衝突力評価式による評価値の比較例

試算対象：流木 L=11m, D=0.5m, 衝突速度 0.7m/s	
評価式	衝突力 (kN/m)
松富の式	11.0
池野らの式	1.0
道路橋示方書	0.1
FEMA	7.9
有川らの式	13.0
津波漂流物対策施設設計ガイドライン	6.0

出展：大阪府 南海トラフ巨大地震土木構造物耐震対策検討部会 第6回資料2

参考文献

- 1) 松富松富英雄・池田弘樹：大規模実験に基づく流木衝突力の評価法，海岸工学論文集，Vol.43，pp.781-785，1996.
- 2) 松富松富英夫：流木衝突力の実用的な算定式と変化特性，土木学会論文集，No.621，pp.111-127，1999.
- 3) 池野正明・田中寛好：段波津波による漂流物の衝突力に関する実験的研究，電力中央研究所報告，U03052，2004.
- 4) 水谷法美・高木祐介・白石和睦・宮島正悟・富田孝史：エプロン上のコンテナに作用する津波力と漂流衝突力に関する研究，海岸工学論文集，第52巻，pp.741-745，2005.
- 5) 有川太郎・大坪大輔・中野史丈・下迫健一郎・石川信隆：遡上津波によるコンテナ漂流力に関する大規模実験，海岸工学論文集，Vol.54，pp.840-850，2007.
- 6) 有川太郎・鷺崎誠：津波による漂流木のコンクリート壁面破壊に関する大規模実験，土木学会論文集 B2，Vol.66，No.1，pp.781-785，2010.
- 7) FEMA：Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis, Second Edition, FEMA P-646, 2012.
- 8) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編，pp.71-72，2012.
- 9) 沿岸技術研究センター：津波漂流物対策施設設計ガイドライン，pp.44，2014.
- 10) 土木学会：構造物の衝撃挙動と設計法，構造工学シリーズ 6，p.296，1994.

7.2. 既往の評価式との比較

提案式と前述の衝突力評価式を以下に、比較する。評価式による算定に用いた各パラメータは、表-7.3に示す通りである。各パラメータは、各評価式の算出において提案されている値を用いた。ただし、表-7.3に赤字で示した値は、剛性に関するパラメータであり、本来は漂流物や堤体の物性によって変更すべき値である。松富の式における σ_f は、木材の降伏応力(湿潤時の木材の平均的な圧縮強度)とした。有川らの式における剛性パラメータは、それぞれアルミとアクリルの物性値を適用した。FEMA式の k については、漂流物模型のアクリル部分の断面積と漂流物長さ、およびアクリルのヤング率から算出した値を用いた、 D については、 $B \times H$ と同じ面積の円の直径とした。

図-7.1に、上述の各評価式の一般形における f の値について、図-7.2には各評価式による衝突力の算定値について、それぞれ V との関係を示す。なお、提案式とFEMA式については、 f が V によらず一定となる。また、We20の衝突速度(水中衝突試験結果参照)による衝突力の算出結果の比較を図-7.3に示す。各図の右図は、左図の一部を、 y 軸を拡大して示したものである。なお、衝突力は模型スケールで算出している。各評価式による評価値は、FEMA式、松富の式、有川らの式、水谷らの式、池野らの式、道示書の順に小さくなっている。ただし、水谷らの式と池野らの式は衝突速度約2m/sを境に、大小関係が逆転している。

これら評価式のうち、水谷らの評価式が衝突速度全体を通して本試験結果ともっとも一致する結果となっている。これは、水谷らの式には衝突時間がパラメータとして入っており、これを提案式と同じ値としているためと考えられる。衝突力を算定する際には、この衝突速度をどう評価するかが問題となる。また、水谷らの式は漂流物が地面上に接した状態を想定しているため、浮遊状態の漂流物の衝突力評価式としては、適切とは言えない。

また、水理試験における衝突速度である2m/s前後の結果に限ると、池野らの式も提案式に近い値を示す。池野らの式の根拠となった水理実験では、浮遊状態からの漂流物の漂流を対象としており、模型スケールも本試験と近かったことが要因の1つと考えられる。ただし、池野らの式では衝突力が衝突速度の2.5乗に比例するため、衝突速度が大きい場合には過大評価になり、小さい場合には過小評価になると考えられる。また、剛性に関わるパラメータを含んでいないため、実機への適用を考えた場合、適切な評価を与えるには漂流物や被衝突構造物の条件が限定される。

道示書の評価式は、上述したように衝突時間を1sとして導出されたものであるため、縮尺によるスケール効果を考慮できない。本来であれば、縮尺の1/2乗に衝突時間を短くすべきである。ただし、提案式と比較すると評価値が1/500程度になっており、縮尺を考慮したとしても2オーダー程度の過小評価となる。

松富の式と有川らの式は同形のため、衝突速度 V に対して、同じ変化を示す。なお、剛性パラメータの算出根拠は共通していないため、ここで値がほぼ同一となっているのは偶然の結果である。両式ともに、提案式よりも1オーダー大きな値となっているが、両者とも剛性の値が試験模型に対して大きいためと考えられる。

また、FEMA式においても同様に、軸剛性パラメータが大きすぎるために、提案式に対し20倍程度の値となっている。ここでは、アクリル漂流物模型の軸剛性を適用したが、堤体のひずみを考慮した場合には、値はこれよりも小さくなる。

表- 7.3 衝突力評価式の比較に用いたパラメータ一覧

(a)共通パラメータ

	M [kg]	L [m]	B [m]	H [m]	D [m]
TypeA	0.149	0.175	0.060	0.025	0.044
TypeB	0.153	0.175	0.060	0.025	0.044
TypeC	0.152	0.209	0.050	0.025	0.040
TypeD	0.029	0.1	0.034	0.014	0.025

(b)各評価式のパラメータ

提案式	C_{MA}				
	1.8				
松富の式	C_{MA}	σ_f [N/m ²]			
	1.7	2.0.E+07			
池野らの式	C_{MA}				
	2.0				
水谷らの式	C_{MA}	η_m [m]			
	-	0.0125			
有川らの式	C_{MA}	E_1 [N/m ²]	ν_1	E_2 [N/m ²]	ν_2
	1.7	7.0E+10	0.34	2.7E+09	0.39
FEMA	C_{MA}				
	2.0				

	Δt^{*1*2} [s]	α^{*1}	k^{*3} [N/m]
TypeA	0.0028	0.56	5.5.E+06
TypeB	0.0030	0.51	3.9.E+06
TypeC	0.0028	0.54	4.1.E+06
TypeD	0.0023	0.27	3.9.E+06

※1 提案式で使用 ※2 水谷らの式で使用 ※3 FEMAの式で使用

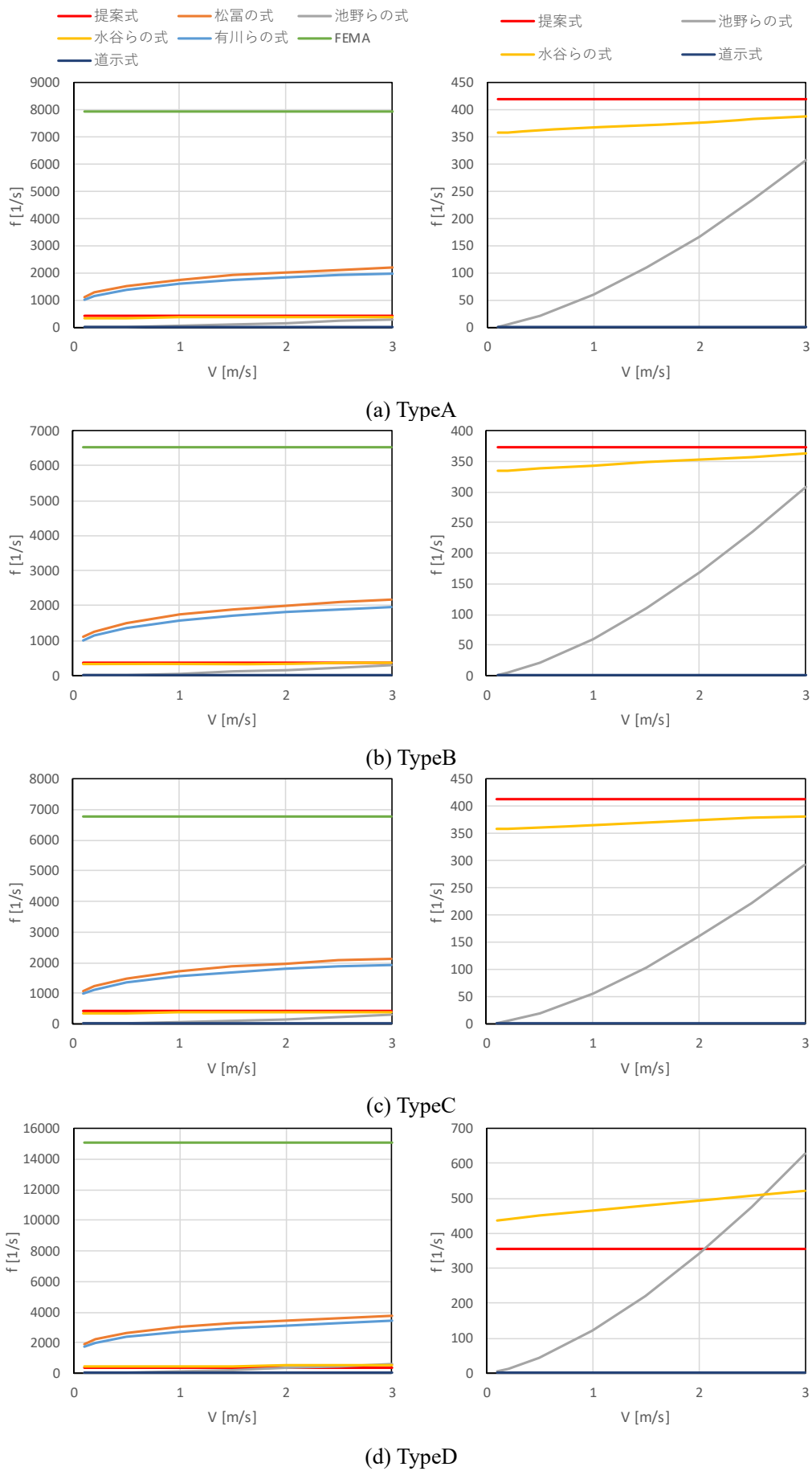


図-7.1 各評価式中のパラメタ f と衝突速度の関係

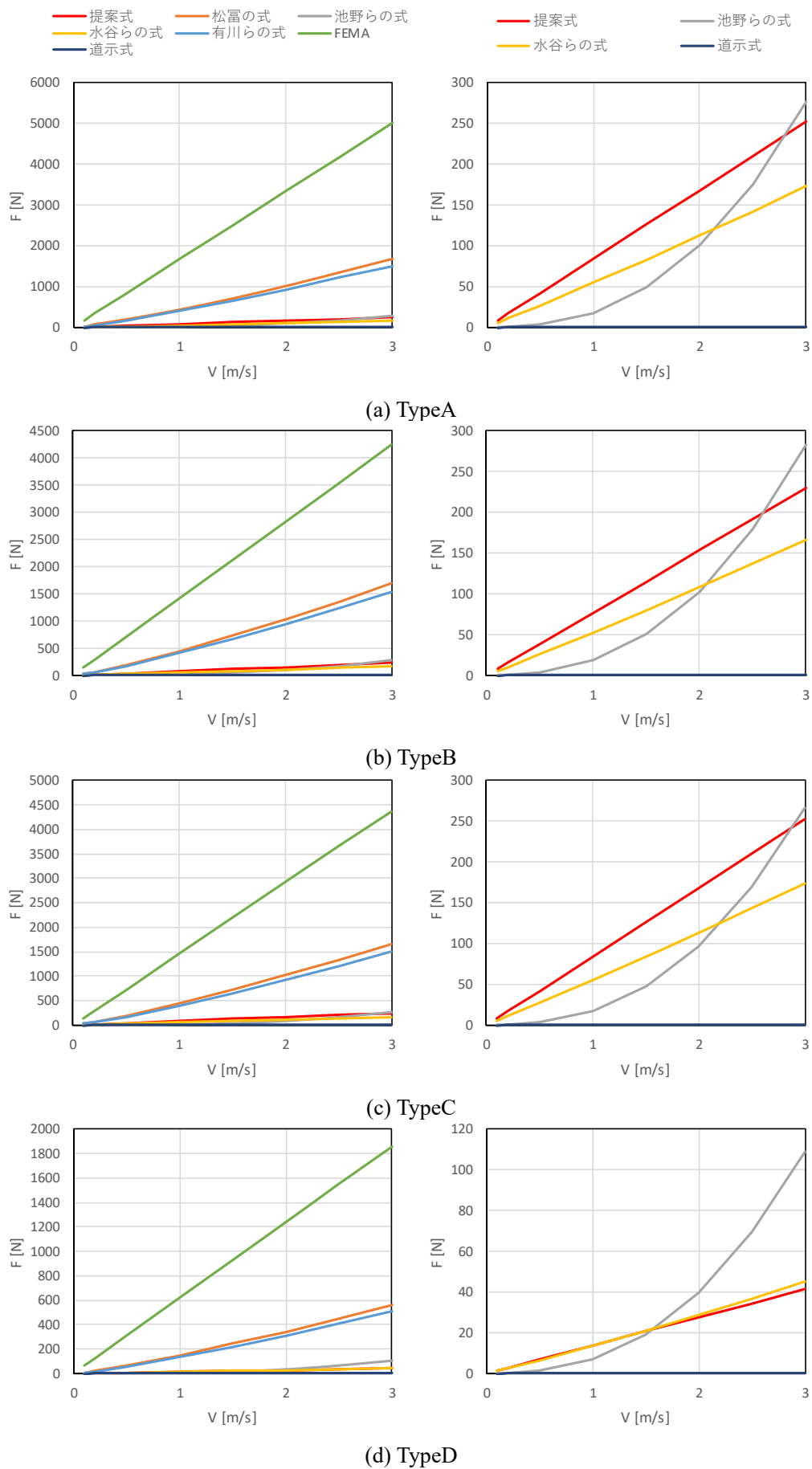


図-7.2 各評価式による衝突力算定値と衝突速度の関係

表-7.4 各評価式による衝突力算定値 (We20)

	TypeA	TypeB	TypeC	TypeD
V [m/s]	2.15	2.19	2.12	2.13
提案式	180	168	178	29
松富の式	1119	1162	1093	370
池野らの式	120	129	112	46
水谷らの式	121	119	121	31
有川らの式	1015	1054	991	335
FEMA	3591	3090	3088	1320
道示式	0.31	0.33	0.32	0.06

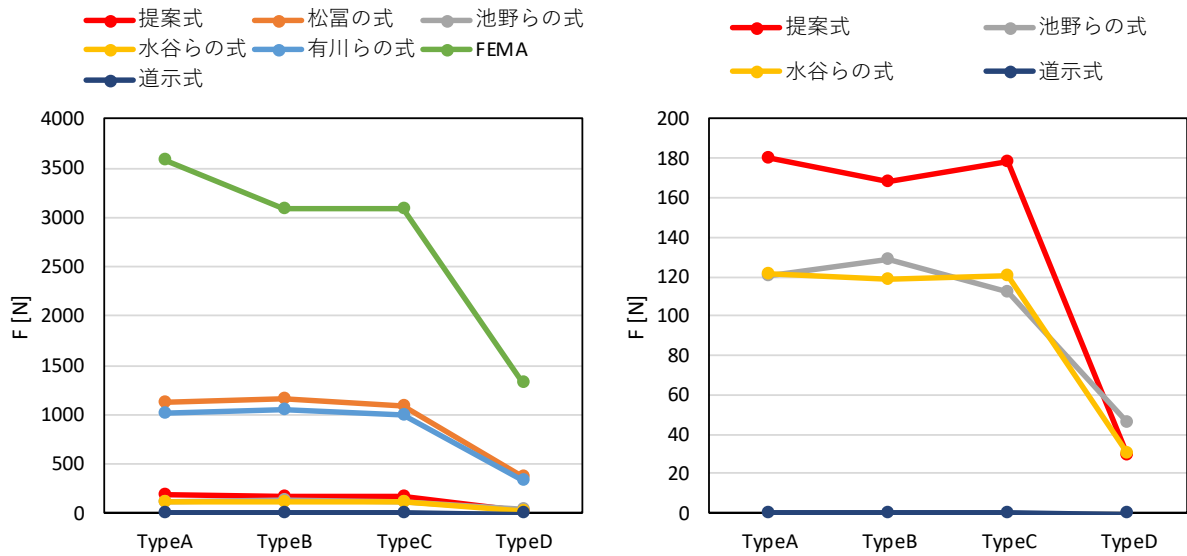


図-7.3 各評価式による衝突力算定値の比較 (We20)

7.3. 漂流物衝突力評価に係る体系的な考え方の整理

漂流物衝突力評価においては、衝突頻度と衝突力、また砕波帯の岸側と沖側に分けて考えるのが適切と考えられる。漂流物衝突力の考え方と適応可能な既往式について、表-7.5 にまとめる。

初期位置が砕波点より沖の場合、水面勾配が概略 1 を超える場合に漂流物は波に連行される。一般に、水面勾配が 1 を超えるのは砕波発生の過渡状態と考えるのが妥当であるが、連行された漂流物が砕波点を通るには、漂流物長さが長い場合に限られる。したがって、漂流物の衝突は主に、初期位置が砕波点よりも岸側の場合に発生する。

衝突した場合の漂流物衝突力は、漂流物の初期位置によらず、漂流物質量、質量係数、剛性および衝突速度によって表される。既往の評価式のうち、FEMA の式、有川らの式、松富の式は、剛性を適切に設定することにより、衝突速度によらず衝突力の評価に適用可能であると考えられる。

表- 7.5 漂流物衝突力評価に係る体系的な考え方

	初期位置が砕波帯より沖	初期位置が砕波帯より岸
衝突頻度	砕波点よりも沖側では、水面勾配が概略 1 を超えると波に連行される。ただし、砕波点を超えて汀線まで連行されるには、漂流物長さが十分長い必要がある。	衝突頻度は岸から遠ざかるにしたがい線形的に低下するが、砕波点より津波高の概略 5 倍よりも岸側であれば、衝突が生じる可能性がある。
衝突力	漂流物が波に連行されて衝突する場合、その衝突速度は漂流物の初期位置に関係なくほぼ波速に等しい。また、衝突力は、漂流物質量、質量係数、剛性および衝突速度の関数と考えることが出来る。既往の評価式のうち、衝突速度によらず衝突力を適切に評価出来る式は、FEMA の式、有川らの式、松富の式と考えられる。ただしこれらの式では、剛性に関わるパラメタを適切に設定する必要がある。また、質量係数を 1 とした場合、衝突力は気中衝突と同等になると考えられる。	