

令和 2 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 2 年度分）

大成建設株式会社

令和 2 年 9 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. 津波漂流物の衝突力に関する既往の評価式	2-1
2.1. 各評価式の概要	2-1
2.2. 既往の各評価式の比較	2-6
2.2.1. 模型スケールでの比較	2-6
2.2.2. 実機スケールでの比較	2-9
3. 試験方法	3-1
3.1. 類似事業との比較による本試験での試験確認項目	3-1
3.2. 試験縮尺	3-3
3.3. 漂流物模型	3-3
3.4. 防潮堤模型	3-5
3.5. 気中衝突試験	3-7
3.5.1. 試験内容	3-7
3.5.2. 試験方法及び試験ケース	3-7
3.6. 水中衝突試験	3-9
3.6.1. 試験内容	3-9
3.6.2. 試験水槽と地形模型	3-9
3.6.3. 入射波	3-11
3.6.4. 試験方法	3-12
3.6.5. 計測項目及び計測方法	3-14
3.6.6. 試験ケース	3-17
4. 気中衝突試験結果	4-1
4.1. ひずみ計測による気中衝突試験	4-1
4.1.1. ひずみ及びひずみエネルギーの計測結果	4-1
4.1.2. 衝突高さ, 衝突速度および衝突時間	4-31
4.2. ロードセル計測による気中衝突試験	4-40
4.3. 模型の剛性試験	4-49
5. 波検定結果	5-1
5.1. 水位時系列	5-1
5.2. 波速と水面勾配	5-6
6. 水中衝突試験結果	6-1
6.1. 水位と波圧の時系列	6-1
6.2. 衝突頻度	6-5
6.2.1. 衝突確認試験	6-5
6.2.2. 水中衝突試験による衝突頻度の計測結果	6-6
6.3. ひずみの時系列	6-7
6.4. ひずみエネルギー	6-41
6.5. 衝突高さと衝突速度	6-50
7. 漂流物衝突特性と衝突力評価	7-1
7.1. 気中衝突試験	7-1
7.1.1. ロードセル計測による衝突力の評価	7-1
7.1.2. ひずみ計測によるひずみエネルギーの評価	7-7
7.1.3. 線形剛性に基づく衝突力の評価	7-10
7.1.4. 線形剛性に基づくひずみエネルギーから衝突力への変換	7-15
7.1.5. ひずみ計測とロードセル計測の衝突力比較	7-19
7.2. 水中衝突試験	7-22
7.2.1. 水面勾配と漂流特性の関係	7-22

7.2.2. 衝突頻度.....	7-24
7.2.3. 衝突高さと衝突速度.....	7-26
7.2.4. 衝突エネルギーの評価.....	7-39
7.2.5. 衝突力の算定.....	7-43
7.2.6. 衝突力の評価.....	7-46
8. 既往の評価式との比較.....	8-1
8.1. 既往の評価式との比較.....	8-1
8.2. 漂流物衝突力評価に係る体系的な考え方の整理.....	8-7
9. 漂流物衝突シミュレーション (VOF 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.....	9-4
9.3. 水位時系列.....	9-5
9.4. 流速時系列.....	9-11
9.5. 衝突の有無.....	9-16
9.6. 漂流物の移動軌跡.....	9-18
9.7. 漂流物の挙動状況.....	9-24
10. 漂流物衝突シミュレーション (SPH 法).....	10-1
10.1. シミュレーション手法と解析条件.....	10-1
10.2. 解析ケース.....	10-6
10.3. 解析結果.....	10-7
10.3.1. 水位の時系列波形.....	10-7
10.3.2. 流速の時系列波形.....	10-17
10.3.3. 衝突の有無.....	10-21
10.3.4. 漂流物の移動軌跡.....	10-24
10.3.5. 漂流物の衝突状況.....	10-27
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評価に関連する内容として、漂流物衝突に係る水理試験及びシミュレーション解析を実施し、試験・解析データを取得するものである。また、類似事業（平成31年度原子力施設等防災対策等委託費（耐津波設計・フラジリティ評価手法の整備に係る防潮堤水理試験（漂流物影響）事業）と併せて、水理試験結果及び解析結果を整理・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ことを目的とする。

ここで、漂流物の衝突には、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、津波によって生じる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する。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。

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。類似事業における水理試験では、ひずみ計測によりひずみエネルギーを算定し、これを漂流物衝突力に変換することで、衝突力評価を行っている。本事業においても、水中衝突に関しては同様の方法により追加試験を実施し、加えて既往の評価式との比較のため、ロードセルにより直接衝突力を計測する試験を実施した。また、漂流物模型の軸剛性を確認するため、材料試験機により荷重-変位関係の計測を行った。これらの試験結果を整理することにより、防潮堤に生じる衝突力の試験結果について整理した。

また、漂流物設置位置での水面勾配、砕波位置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、本事業で実施した水理試験を対象とした再現解析を実施し、その適用性を確認した。

水理試験で計測されたデータ、解析で得られたデータについて整理し、類似事業で得られた知見とあわせて、漂流物衝突力評価に係る体系的な考え方を整理した。整理にあたっては、漂流物衝突力だけでなく衝突確率及び使用した解析コードの適用範囲についても考慮した。

2. 津波漂流物の衝突力に関する既往の評価式

2.1. 各評価式の概要

津波漂流物の衝突力を評価する既往の評価式として主なものを、表- 2.1 にまとめる。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が、これら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に連行されて移動せず、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、津波漂流物対策施設設計ガイドライン¹¹⁾に示されているような漂流物の対策を目的とした構造物では、相対的に柔な構造の対策工により漂流物の運動エネルギーを吸収して、漂流物の浸入を防止する。一方で、一般的な漂流物対策を目的としない構造物は、漂流物よりも剛な構造の場合が多く、例えば防潮堤防潮堤の破壊等を考えると先に船舶が圧壊すると考えられる。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。圧壊を考慮した評価式としては、表中の土木学会の式¹²⁾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。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）と仮定しており、この衝突時間は実際の衝突現象に対し長すぎるため過小評価になると考えられるが、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ある。ただし、この妥当性判断については、圧壊を考慮した適切な方法による衝突力の評価が必要である。

以上のように既存の評価式では、いずれも船舶の衝突を評価するには、剛性や波条件の観点から、適用には課題がある。以下に、主な評価式の概要について記し、式の特徴を明確にするため、質量係数 C_{MA} 、漂流物質量 M 、衝突速度 V の各パラメータの次数について考察する。また、衝突力は衝突直前の漂流物の持つ運動量との関連が強いと考えられることから、漂流物運動量 MV で整理した場合の剛性等によって決まると考えられるパラメータ f について示す。

(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 (=0.5: 段波の場合), 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り、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。松富の式を変形すると、

$$F = 6.4 \frac{\sigma_f^{0.4} D^{0.2}}{4^{0.4} \pi^{0.6}} C_{MA} M^{0.6} V^{1.2} = 6.4 \frac{\sigma_f^{0.4} D^{0.2} V^{0.2}}{4^{0.4} \pi^{0.6} M^{0.4}} C_{MA} M V = f_1 M V \quad f_1 = 1.85 C_{MA} \frac{\sigma_f^{0.4} D^{0.2} V^{0.2}}{M^{0.4}}$$

となり、各パラメタの次数は、質量係数: 1, 質量: 0.6, 衝突速度 1.2 となる。衝突速度 V に対し 1.2 乗となっているが、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、衝突時間が衝突速度の関数となっているため、衝突力が衝突速度の 1.2 乗に比例する形式となっている。衝突時間は、主に剛性と漂流物重量によって決まることから、剛性の特性が衝突速度によって変化していることを意味する。衝突漂流物の運動量は V に比例するため、松富の式では衝突速度が大きくなると相対的に衝突力が大きくなるが、大きな衝突速度に対してこの 1.2 乗が成立するかどうかについては確認できておらず、衝突速度が大きくなると過大評価になる可能性がある。また、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と考えられ、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: 円柱・角柱の縦向き)
○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、上式の 2.5 乗の関係を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。池野らの式を変形すると、漂流物形状が円柱の場合

$$F = \frac{S}{(g^{0.25} D^{0.625} L^{0.625})} C_{MA} M V^{2.5} = S \left(\frac{\pi \gamma D V^{2.4}}{4 g^{1.4} M} \right)^{0.625} C_{MA} M V = f_2 M V \quad f_2 = S C_{MA} \left(\frac{\pi \gamma D V^{2.4}}{4 g^{1.4} M} \right)^{0.625}$$

となり、各パラメタの次数は、質量係数: 1, 質量: 1, 衝突速度 2.5 となる。実験データの整理に基づき、無次元移動速度の 2.5 乗に比例するとして、衝突速度 V の次数は 2.5 となっているが、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おらず、衝突速度の影響を非常に受けやすいことから適用範囲には十分注意が必要である。

(3) 水谷らの式⁴⁾

$$F = 2\rho_w \eta_w B V^2 + \frac{M V}{\Delta t}$$

M : 漂流物質量, B : 漂流物幅, ρ_w : 水の密度, 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、各パラメタの次数に着目して変形すると、

$$F = 2\rho_w\eta_w BM^0V^2 + \frac{MV}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{2\rho_w\eta_w BV\Delta t}{M} + 1 \right) MV = f_3 MV \quad f_3 = \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{2\rho_w\eta_w BV\Delta t}{M} + 1 \right)$$

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ることが出来る。また、本式では剛性等によって決まるパラメタが Δt に集約されており、式の適用においては、この Δt の評価方法が課題となる。例えば、 Δt が衝突速度 V の関数である場合、 V の次数は1ではなくなる。なお、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されている。

(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。なお、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た場合の値である。また、 C_{MA} の値については明記されていないが、 $C_{MA}=1.7$ とした結果が例示されている。有川らの式を変形すると、

$$F = \left(\frac{5}{4} \right)^{\frac{3}{5}} \gamma_p \left(\frac{\chi}{C_{MA} M} \right)^{\frac{2}{5}} C_{MA} M V^{1.2} = \left(\frac{5}{4} \right)^{\frac{3}{5}} \gamma_p \left(\frac{\chi V^{0.5}}{M} \right)^{\frac{2}{5}} C_{MA}^{0.6} M V = f_4 M V \quad f_4 = 1.14 C_{MA}^{0.6} \frac{\gamma_p \chi^{0.4} V^{0.2}}{M^{0.4}}$$

となり、各パラメタの次数は、質量係数:0.6, 質量:0.6, 衝突速度1.2となる。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。

(5) FEMA⁷⁾

$$F = 1.3V\sqrt{kMC_{MA}}$$

$$1/k = 1/k_s + 1/k_d$$

M : 漂流物質量, k : 有効軸剛性, k_s : 被衝突構造物の剛性, k_d : 漂流物の剛性

FEMA(2nd Edition)の式は、漂流物の運動方程式に基づいたものであり、有効軸剛性のみにより衝突力を評価するものである。被衝突構造物の変位を無視出来る場合には、 k を漂流物の軸剛性とすることが出来るが、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。そのような場合には、被衝突構造物の剛性を考慮した有効軸剛性を考慮する必要がある。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、他の評価式と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。 C_{MA} の値は表形式で与えられており、木材の場合は $C_{MA}=1.0$ 、コンテナの場合は $C_{MA}=1.2\sim 1.3$ （ともに縦衝突の場合）としているが、柱等の透過性構造物に衝突する場合の値であり、不透過な壁に衝突する場合はこれよりも小さくなるのが指摘されている。なお、式中の 1.3 は、リスクカテゴリーによる重要度係数である。また現在は、後述する 3rd Edition が刊行されており、若干異なった評価手法が提案されている。提案式と同様に一般形に変形すると、

$$F = 1.3\sqrt{k}C_{MA}^{0.5}M^{0.5}V = 1.3\sqrt{\frac{k}{M}}C_{MA}^{0.5}MV = f_5MV \quad f_5 = 1.3\sqrt{C_{MA}\frac{k}{M}}$$

各パラメタの次数は、質量係数:0.5、質量:0.5、衝突速度 1.0 となり、ここに示した評価式の中では唯一、後述する本事業での提案式と同じように、衝突力が質量および質量係数の 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変数についても、ほぼ同じ形式となっている。

(6) FEMA⁸⁾, ASCE⁹⁾

$$F = I_{tsu}C_0V\sqrt{kM}$$

M : 漂流物質量, k : 有効軸剛性, I_{tsu} : 重要度係数, C_0 : 方向係数,

FEMA(3rd Edition)では直接評価手法を提示しておらず、ASCE の建築およびその他構造物の設計外力基準に準拠することとしている。ASCEによると、 $I_{tsu}=1.25$, $C_0=0.65$ であるが、 C_0 は漂流物の衝突方向の不確実性を考慮した低減係数であるため、これを 1 と考えると、FEMA(2nd Edition)との相違は、重要度係数が 1.3 から 1.25 となっていることと、質量係数 C_{MA} が考慮されていないことである。なお、剛性 k については、被衝突構造物と漂流物の剛性の小さい方の値としているため、FEMA(2nd Edition)よりも剛性は大きくなり、安全側の評価を与える。また、 C_{MA} については、FEMA(2nd Edition)において、木材の場合は $C_{MA}=1.0$ とされ、不透過の壁構造物に衝突する際には 1 以下となる場合もあることが指摘されていることから、これを考慮しないことにより評価値の低減は限定的である。

本式を変形すると、

$$F = I_{tsu}C_0\sqrt{k}M^{0.5}V = I_{tsu}C_0\sqrt{\frac{k}{M}}MV = f_6MV \quad f_6 = I_{tsu}C_0\sqrt{\frac{k}{M}}$$

となり、各パラメタの次数は、質量係数を除き FEMA(2nd Edition)と同じ、質量:0.5、衝突速度:1.0 となる。

(7) 道路橋示方書¹⁰⁾ (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、実際の衝突時間よりも長いことが想定される。そのため道示書の式の適用は限定的であり、適用条件に注意が必要である。本式を変形すると、

$$F = f_7MV \quad f_7 = 0.1g$$

となり、各パラメタの次数は、質量係数: 0, 質量: 1.0, 衝突速度: 1.0 となる。道示書の式では、付加質量は考慮されていない。

表- 2.1 既往の衝突力評価式

評価式	根拠	質量の次数	衝突速度の次数	備考
松富らの式 ¹⁾ 松富の式 ²⁾	流木を対象とした水理実験	0.6	1.2	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	1	2.5	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	0, 1	2, 1	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	0.6	1.2	剛性や質量係数の設定が課題となる。
FEMA(II) ⁷⁾	非減衰振動方程式	0.5	1	有効軸剛性や質量係数の設定が課題となる。
FEMA(III) ⁸⁾ ASCE ⁹⁾	非減衰振動方程式	0.5	1	有効軸剛性や質量係数の設定が課題となる。
道路橋示方書 ¹⁰⁾	衝突時間 1s と仮定した力積の式	1	1	係数が無次元化されていない。衝突時間 1s の根拠は不明。

2.2. 既往の各評価式の比較

2.2.1. 模型スケールでの比較

前述の各衝突力評価式を以下に比較する。まず、モデルスケールでの比較を行う。表-2.2に、算定に用いた各パラメタを示す。各パラメタは、各評価式の導出において採用されている値、および後述する本試験の TypeA に相当する漂流物模型を参考に設定した。なお、赤字で示した値は剛性に関するパラメタであり、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。ここでは、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、有川らの式における剛性パラメタは、それぞれアルミとアクリルの物性値を適用した。また、FEMA 式の k については、後述する漂流物模型のひずみ剛性試験の結果（4章参照）から設定しており、被衝突構造物の剛性は考慮していない。また、水谷らの式の Δt は、気中試験のひずみ計測による値を用いた。D については、 $B \times H$ と同じ面積の円の直径とした。

図-2.1 に、前述の各評価式の運動量に掛かる係数 f の値および衝突力の評価値と衝突速度 V の関係をそれぞれ示す。なお、漂流物質量は $M=0.154\text{kg}$ とした。FEMA 式および道示式については、 f が V によらず一定となる。 f は、その次元から主に衝突時間の逆数に相当する意味を持つ係数であることが分かる。したがって、FEMA 式および道示式は衝突速度によらず衝突時間が一定であり、松富の式、有川らの式では衝突速度が大きくなると衝突時間が短くなるものの、その勾配は徐々に小さくなることが分かる。一方、池野らの式では、衝突速度が大きくなるとともに衝突時間が急激に短くなる。なお、水谷らの式も f が V によらず一定であるが、これは Δt を一定値として与えているためである。各評価式による評価値は、衝突速度が 1m/s を超える範囲では、有川らの式、FEMA(II)式、FEMA(III)式、水谷らの式、松富の式、池野らの式、道示書の式の順に小さくなる。ただし、水谷らの式と松富の式は衝突速度約 2m/s を境に、大小関係が逆転している。松富の式と有川らの式は類似形の式であるが、質量係数の値を松富の式では 0.5 、有川らの式では 1.7 としたために有川らの式の方が大きくなっている。なお、FEMA 式は質量係数が 1.1 あるいは 1.0 である。道示式は、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 $1/2$ 乗を乗じた衝突時間に短くするべきであるが、縮尺を考慮したとしても他の評価式に対し 2 オーダー以上の過小評価となる。

図-2.2 には、図-2.1 と同様に係数 f および衝突力と漂流物質量 M との関係をそれぞれ示す。なお、衝突速度は $V=1.5\text{m/s}$ とした。これによると有川らの式と FEMA 式は、若干値は異なるものの同じような曲線を示しており、また、松富の式も値は小さいが類似の曲線となっていることが分かる。松富の式、有川らの式では f は M の 0.4 乗に反比例し、FEMA 式では 0.5 乗に反比例しているため、質量に対する変化特性が類似であることが分かる。また、上述したように、これら評価式の質量係数を同じとすると、評価値自体も近似する値となる。参考に、すべての評価式で質量係数を 1.0 とした場合の衝突力を、図-2.3 に示す。FEMA の式が全体に高い傾向にあるものの、これら 4 つの評価式は同程度の値となっている。

表-2.2 衝突力評価式の比較に用いたパラメータ一覧（模型スケール）

M [kg]	L [m]	B [m]	H [m]	D [m]	V [m/s]
0.154	0.175	0.06	0.025	0.044	1.5

松富の式	C_{MA}	σ_f [N/m ²]			
	0.5	2.0.E+07			
池野らの式	C_{MA}	γ [N/m ³]			
	2.0	7,000			
水谷らの式	C_{MA}	η_m [m]	Δt [s]		
	-	0.0125	0.001		
有川らの式	C_{MA}	E_1 [N/m ²]	v_1	E_2 [N/m ²]	v_2
	1.7	7.00E+10	0.34	2.65E+09	0.39
FEMA(II)	C_{MA}	k [N/m]			
	1.0	6.53E+05			
FEMA(III)	I_{tsu}	C_0	k [N/m]		
	1.25	1.0	6.53E+05		

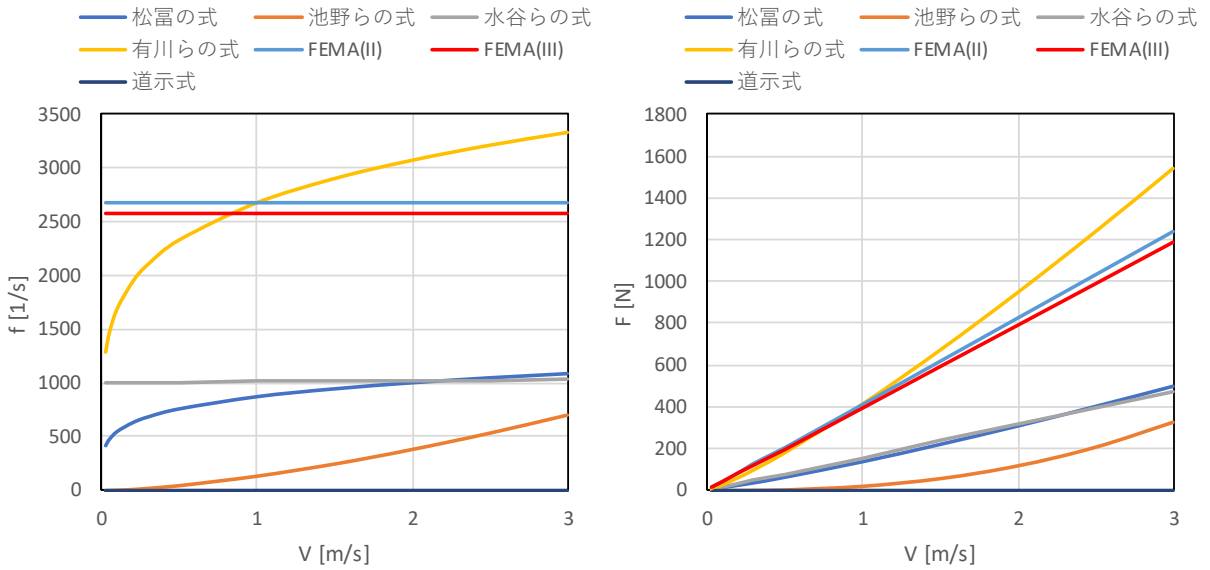


図-2.1 各評価式中のパラメータ f および衝突力評価値と衝突速度の関係（模型スケール）

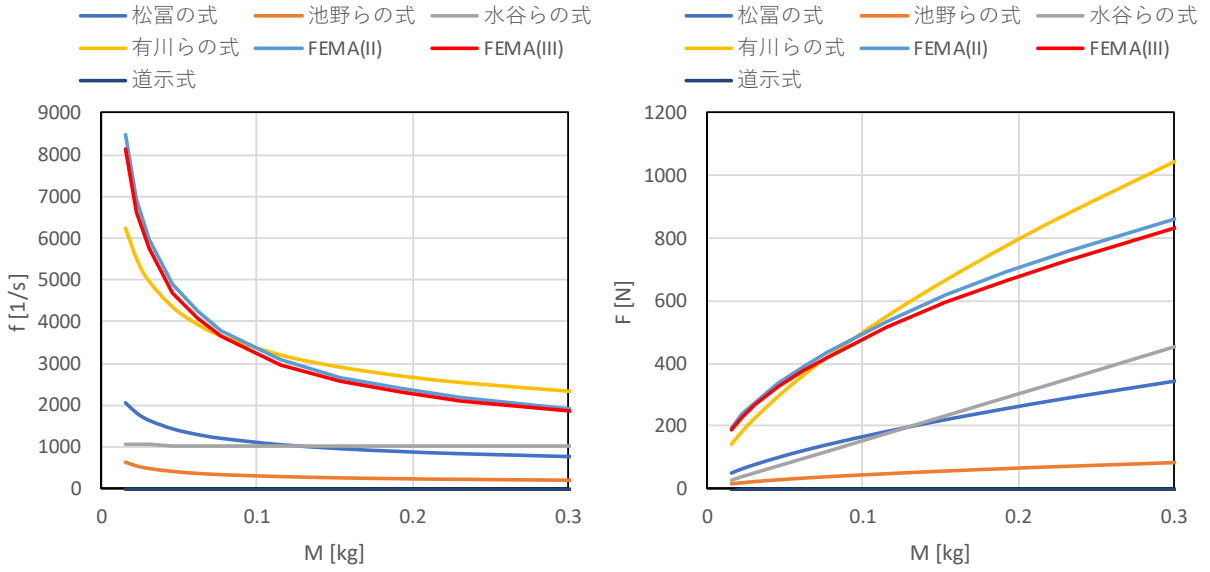


図-2.2 各評価式中のパラメタ f および衝突力評価値と漂流物質量の関係 (模型スケール)

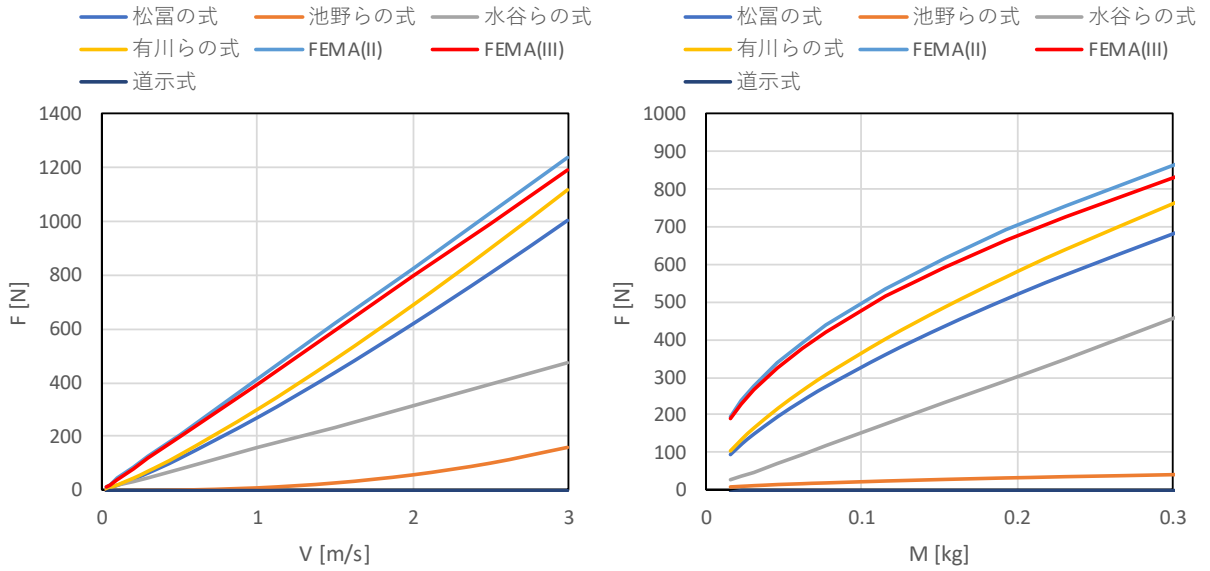


図-2.3 衝突力評価値と衝突速度、漂流物質量の関係 (模型スケール, $C_{MA}=1$ とした場合)

2.2.2. 実機スケールでの比較

次に、実機スケールにおいて各衝突力評価式を比較した。表- 2.3 に、算定に用いた各パラメータを示す。例として排水量 30t クラスの船舶を対象とし、各パラメータについて模型スケールの検討での値を、縮尺 1/60 で実機に割り戻した値とした。また、FEMA の式における k は、それぞれの評価式において提案されている 40ft コンテナの値を適用した。各パラメータのうち青字で示した値が模型スケールに対して変更した値であり、物性に関する赤字で示したパラメータは模型スケールでの検討と同じ値とした。

図-2.4、図-2.5 に、図-2.1、図-2.2 と同様に、係数 f および衝突力と、衝突速度 V 、漂流物質量 M の関係をそれぞれ示す。なお、漂流物質量は 32t、衝突速度は $V=5.0\text{m/s}$ とした。基本的な衝突速度および質量に対する変化特性は、模型スケールと同様であるが、水谷らの式が大きくなっている。水谷らの式は Δt の影響を大きく受けるが、ここでは上述の縮尺を仮定して模型スケールでの値を割り戻しているが、これが相対的に小さいことが要因と考えられる。FEMA(II)と FEMA(III)の値が模型スケールよりも大きくなっているが、これは、剛性 k の推奨値がそれぞれの評価式で異なっているためである。道示式については、他の評価式よりも小さいものの、模型スケールでの評価に比べると衝突力の評価値が相対的に大きくなっている。

図- 2.6 には、図- 2.3 と同様にすべての評価式で質量係数を 1.0 とした場合の結果を示す。これによると、松富の式、有川らの式、FEMA(II)式、FEMA(III)式は同じオーダーの評価値を与えることが分かる。ただし、衝突力の評価値が非常に大きく、これは剛性に係るパラメータを木材やコンテナといった比較的小さな漂流物の値を用いているためと考えられる。剛性に関するパラメータを明示的に含んでいるのは FEMA の式のみであり、船舶等の大型の漂流物について衝突力を評価するためには、FEMA 式において剛性パラメータを適切に評価することが適当であることが示唆される。

表- 2.3 衝突力評価式の比較に用いたパラメータ一覧（実機スケール）

M [kg]	L [m]	B [m]	H [m]	D [m]	V [m/s]
32000	10.5	3.6	1.5	2.6	5.0

松富の式	C_{MA}	σ_f [N/m ²]			
	0.5	2.0.E+07			
池野らの式	C_{MA}	γ [N/m ³]			
	2.0	7,000			
水谷らの式	C_{MA}	η_m [m]	Δt [s]		
	-	0.75	0.008		
有川らの式	C_{MA}	E_1 [N/m ²]	v_1	E_2 [N/m ²]	v_2
	1.7	7.00E+10	0.34	2.7E+09	0.39
FEMA(II)	C_{MA}	k [N/m]			
	1.2	6.0E+07			
FEMA(III)	I_{tsu}	C_0	k [N/m]		
	1.25	1.0	3.0E+07		

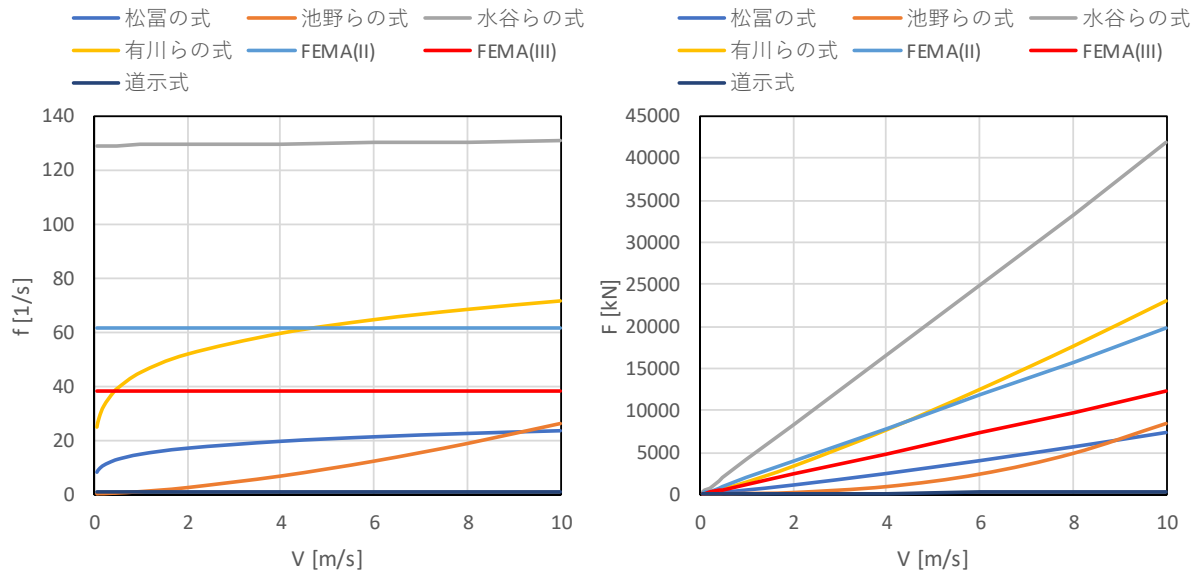


図-2.4 各評価式中のパラメタ f および衝突力評価値と衝突速度の関係（実機スケール）

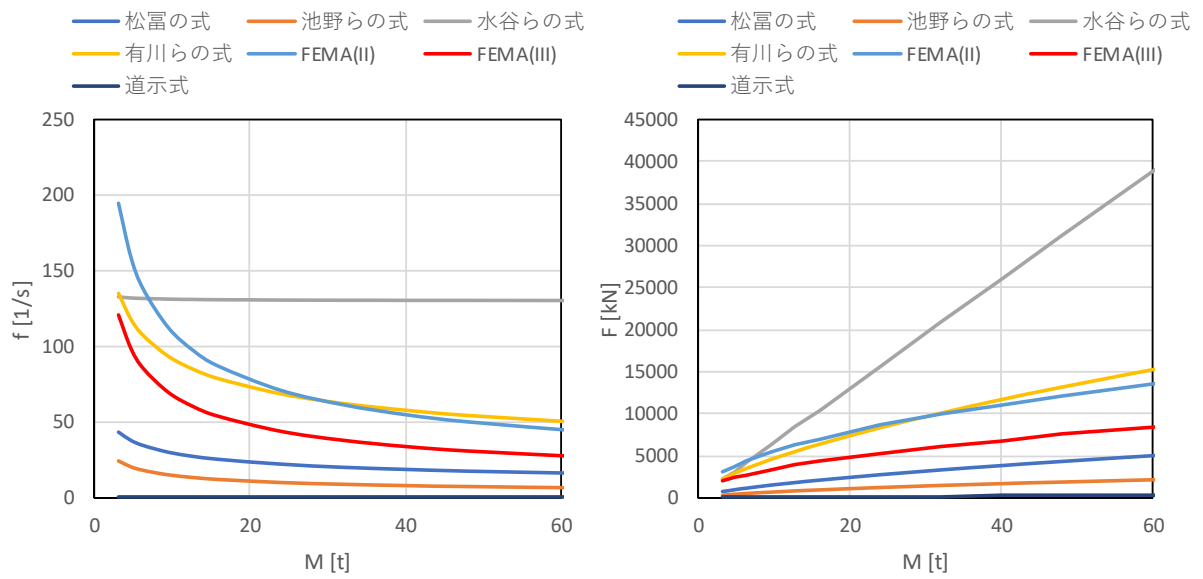


図-2.5 各評価式中のパラメタ f および衝突力評価値と漂流物質量の関係（実機スケール）

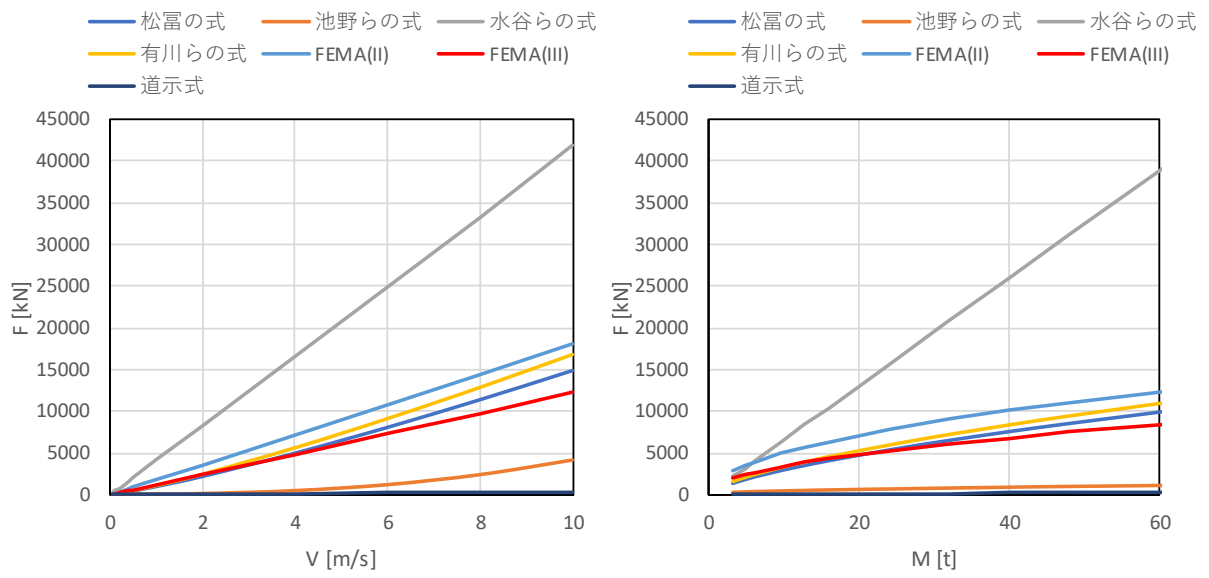


図- 2.6 衝突力評価値と衝突速度，漂流物質量の関係（実機スケール， $C_{MA}=1$ とした場合）

参考文献

- 1) 松富英夫・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) FEMA：Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis, Third Edition, FEMA P-646, 2019.
- 9) ASCE：Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, ASCE/SEI Standard 7-16, 2016.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.

3. 試験方法

3.1. 類似事業との比較による本試験での試験確認項目

(1) ロードセルによる気中衝突試験

本試験では、浮遊状態の漂流物の衝突を対象とするため、防潮堤模型への衝突位置が不規則であり、ロードセルによる衝突力の計測が困難である。そのため、類似事業では防潮堤模型のひずみ計測により衝突力を評価しており、本試験においても同様の試験を実施した。一方、既往の評価式は主に、ロードセルに衝突させることにより衝突力を直接計測する水理実験の結果に基づいて提案されている。そこで本試験では、類似事業で実施したひずみ計測による気中試験と同条件で、ロードセルによる気中衝突試験による衝突力計測を実施した。類似事業では、ひずみから算出した衝突エネルギーを衝突力に変換しているが、ロードセルの試験結果に基づき、この変換手法の妥当性を検証した。

(2) 波速の影響

類似事業の結果から、衝突時の衝突速度は波速との関連性が高いことが明らかとなった。表-3.1に、類似事業の試験における波速の一覧を示す。波速は主に水深により決まり、類似事業では水深条件を一定としているため、波速がすべてのケースで同程度となっている。本試験では、水深を変更したケースを含めることにより波速の異なる試験ケースを設定し、衝突力に対する衝突速度の影響について検討した。

(3) 砕波点より沖での漂流特性

図-3.1は、類似事業で得られた汀線からの距離と水面勾配変化の関係の例である。初期位置を汀線から5m以内とする試験ケースを対象としているため、初期位置が砕波点より沖の場合の漂流特性についての試験結果が得られていない。また、図-3.1に示すように砕波直前の水面勾配が短時間に大きくなるため、水面勾配と漂流特性の関係を明確にすることが難しい。そこで本試験では、津波高が小さく、水面勾配が緩やかに増大する波条件を試験ケースに含むことにより、水面勾配と漂流特性の関係を明らかにした。

(4) 漂流物形状

類似事業では、漂流物形状として3種類の模型を対象とした。これに対し本試験では、漂流物形状と漂流特性（特に、波に連行されるか否か）の関係についてさらに検討するため、相似形で乾舷の異なる漂流物、重さが同じで縦横比の異なる漂流、相似形で大型の漂流船舶を対象模型として適用した。

(5) 漂流物模型の剛性確認

既往の各評価式（松富，有川，FEMA）について、剛性パラメタを適切に変更することにより、衝突力の試験結果を評価可能となるかを検討するため、材料試験機により衝突試験に使用した船舶模型の軸剛性を計測した。FEMAの式では、軸剛性がパラメタとなっているため、これに反映した場合の評価式の適用性を検証した。また、松富，有川らの式では、パラメタの適用が実施された水理実験（木材を対象）に限定されているため、これに軸剛性試験の結果を適用した場合の適切なパラメタについて検討した。

表- 3.1 類似事業における汀線近傍での波速

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

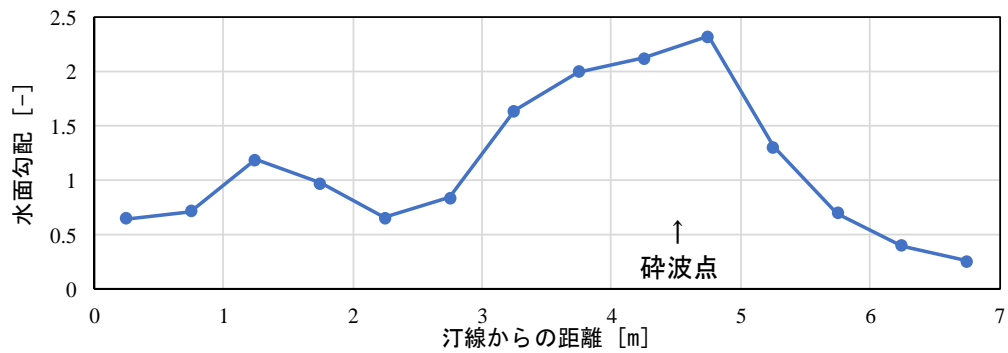


図- 3.1 類似事業における水面勾配の変化の例 (We10)

3.2. 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。対象とする流速を $v=5.0$ m/s 程度、漂流物長を $l=8$ 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 2.5×10^7 、縮尺模型で 4.9×10^4 となる。

$$Re = v l / \nu$$

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。

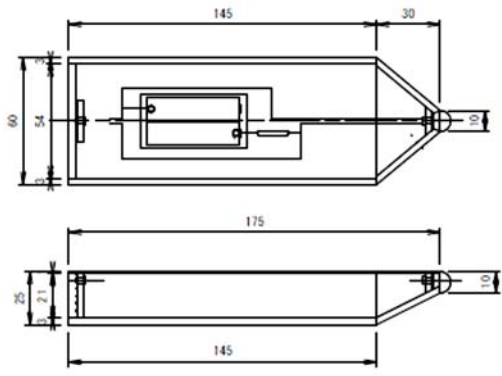
フルード則に基づく各物理量の縮尺は、模型の縮尺を λ (ここでは 1/80) とすると以下の通りとなる。本試験では、この縮尺に沿って各諸元を設定した。

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

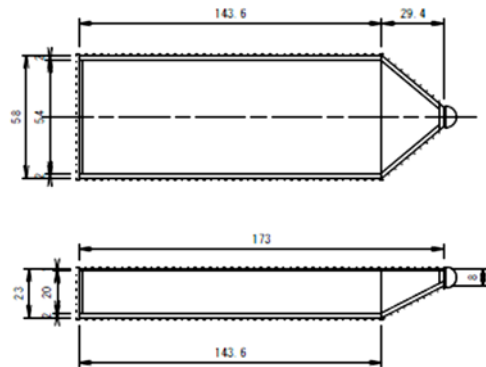
3.3. 漂流物模型

漂流物は小型船舶を対象に、図-3.2 に示す 7 種類を適用した。このうち、TypeA~TypeD は、類似事業に適用されたものと同じ模型であり、TypeE~TypeG は本事業において新たに適用した漂流物模型である。このうち、後述する気中衝突試験では 7 種類すべてを、水中衝突試験では TypeA, E, F, G の 4 種類を適用した。

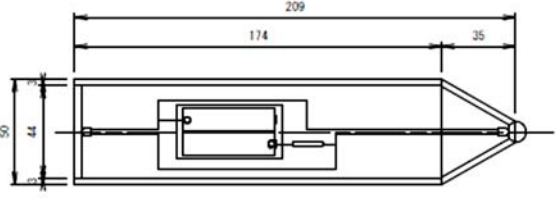
水中衝突試験では、類似事業との比較のため TypeA を同一の模型として適用し、漂流特性への影響が大きいと考えられる、漂流物の長さや重量を変えた模型を新たに対象とした。TypeA に対しそれぞれ、TypeE は同重量で縦横比が異なった細長体の模型、TypeF は乾舷を同じまま重量を小さくすることで船尾の受圧面積を相対的に大きくした模型、TypeG は 1.5 倍の相似形で重量を約 3.3 倍とした模型である。



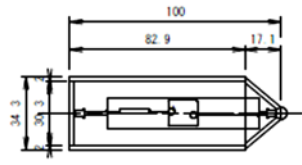
TypeA : アクリル製 (153.7g)



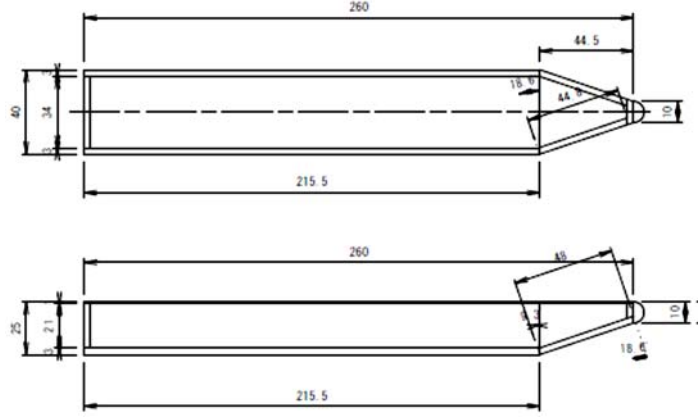
TypeB : ウレタン巻 (152.8g)



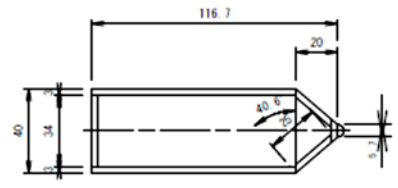
TypeC : アクリル製 (155.3g)



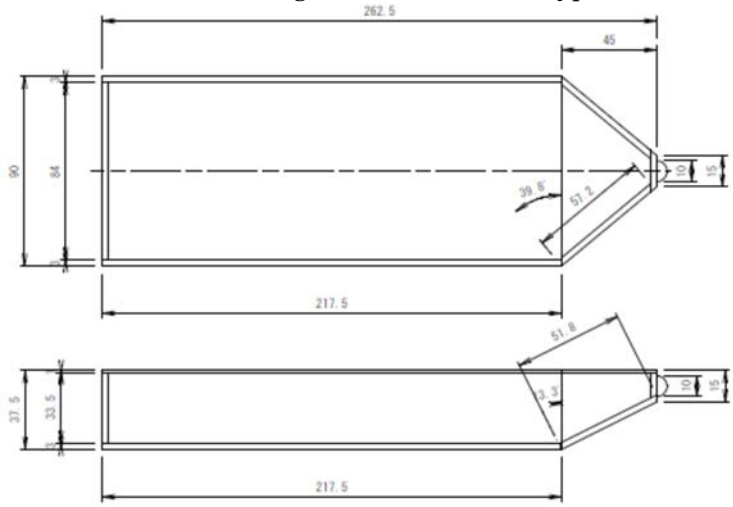
TypeD : アクリル製 (31.1g)



TypeE : アクリル製 (150.1g)



TypeF : アクリル製 (44.2g)



TypeG : アクリル製 (503g)

[unit: mm]

図- 3.2 漂流物模型

3.4. 防潮堤模型

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、漂流物の衝突力を防潮堤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、堤体のひずみが水路横断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、以下のような防潮堤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-3.3 に、防潮堤模型図を図-3.4 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 4 cm 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る。ただし、これによる水圧への影響は多少考えられるものの、漏水量はわずかなため、波形への影響はほとんどなく、衝突力計測への影響は極めて小さいと考えられる。帯状の壁体それぞれにひずみゲージを鉛直方向に設置し、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試験を実施した。この方法によると、衝突力は幅 4 cm 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。

防潮堤模型の陸上部の設置位置は、類似事業では 0.625m のみであったが、本試験では汀線からの距離の影響を検討するため、汀線から 0.625m と 1.25m の 2 種類とした（図-3.7 参照）。

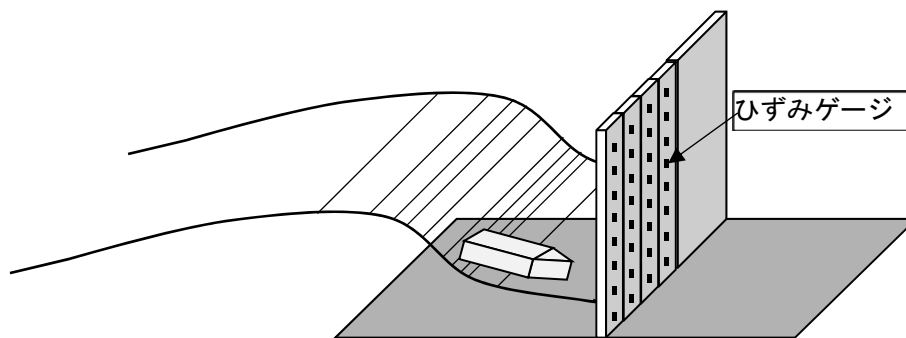


図-3.3 防潮堤模型のイメージ図

平面图

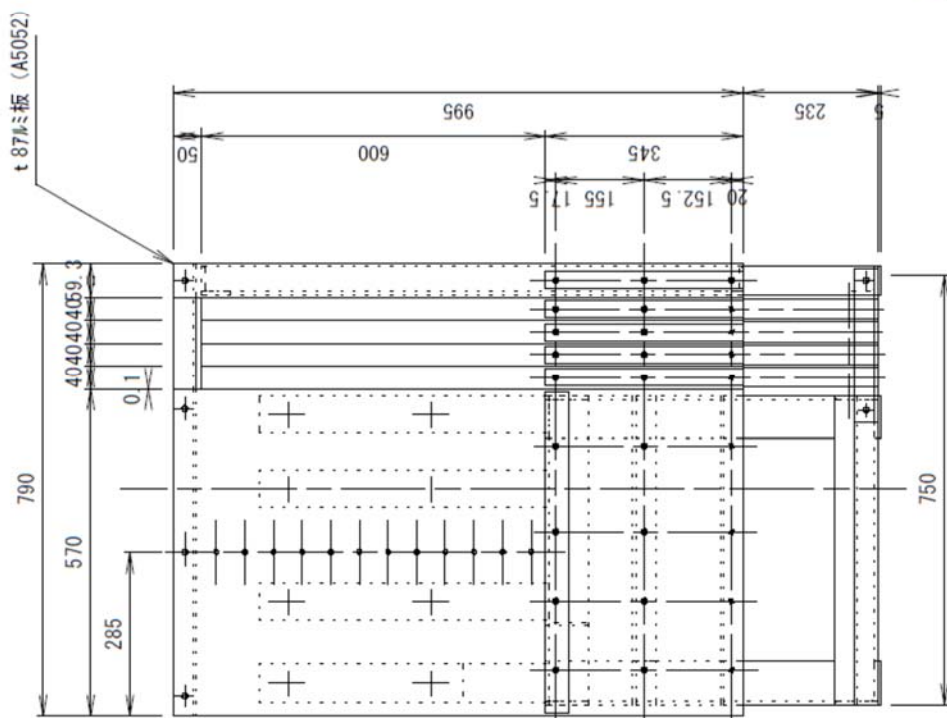
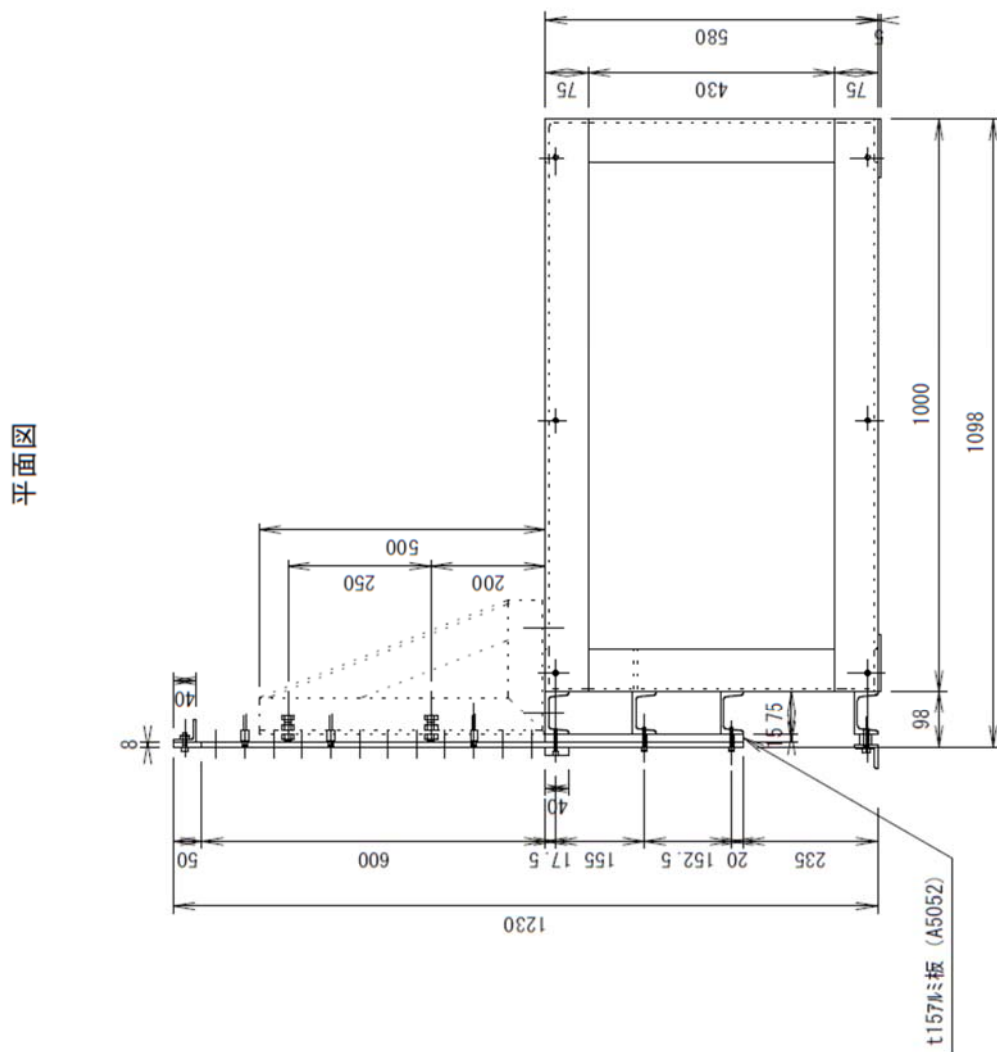


图-3.4 防潮堤模型图

3.5. 気中衝突試験

3.5.1. 試験内容

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。そこで、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-3.5）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にした。

類似事業では、水中衝突試験と同じ防潮堤模型を用いて、ひずみ計測による気中試験を実施しているが、既往の評価式では、衝突力をロードセルにより計測している。そこで、類似事業で実施した気中試験と同条件の試験に加え、ロードセルにより衝突試験を実施し、結果を比較した。また、2種類の容量のロードセルにより計測を実施し、被衝突物の剛性の違いの影響について検討した。

3.5.2. 試験方法および試験ケース

ひずみによる計測、ロードセルによる計測ともに、漂流物模型を4本のロープにより水平にぶら下げ、一定の距離だけ引き上げて瞬間的に離すことにより、対象物に衝突させて試験を実施した（図-3.5、図-3.6参照）。

試験対象の漂流物模型は、類似事業に適用した模型4種類と本事業で追加適用する3種類の計7種類とし、類似事業と同様の防潮堤模型によるひずみによる計測と、容量（剛性）の異なる2種類のロードセルによる衝突力計測を実施した。また、ばらつきを確認するため同じ試験を3回繰り返した。

防潮堤模型を用いたひずみ計測による試験では、漂流物模型7種類に対し、水中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、衝突位置高さ h を5cmから25cmまで5cmピッチで変化させ、水中衝突試験と同じ方法でひずみを計測した。試験結果は、後述するように、ひずみの計測結果からひずみエネルギーを算出し、衝突時間を仮定することにより、衝突エネルギーを衝突力に変換した。衝突速度は、概略1.7 m/sと0.6 m/sの2種類であるが、試験毎に高速度カメラで撮影した画像から衝突速度を算出した。

ロードセルによる衝突力計測試験は、ひずみ計測による試験と同様に、漂流物模型7種類に対し、容量の異なる2種類のロードセル（共和電業製、容量500Nと2kN）を用い、漂流物模型を直接ロードセルに衝突させ衝突力を計測した。衝突速度は、概略1.9, 1.4, 1.0 m/sの3種類とした。

なお、ばらつきを確認するため全てのケースで、同じ条件の試験を3回繰り返した。

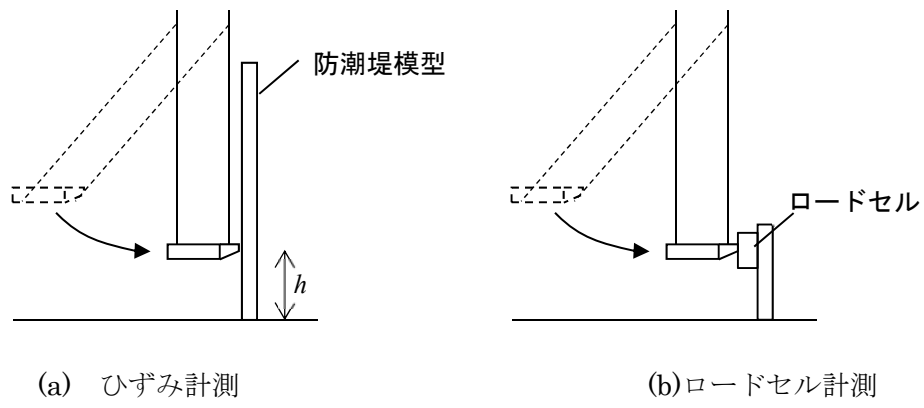


図- 3.5 気中衝突試験の試験方法



(a) ひずみ計測



(b) ロードセル計測

図- 3.6 ひずみ計測およびロードセル計測による気中衝突試験の状況

3.6. 水中衝突試験

3.6.1. 試験内容

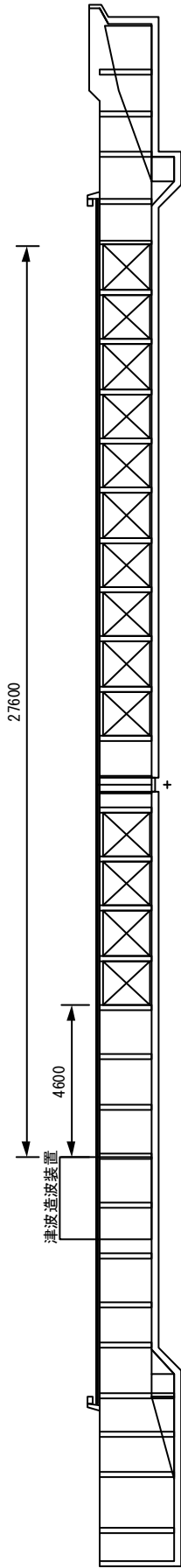
水中衝突試験では、津波の伝播による波形変化を詳細に計測するための波検定試験、主に漂流物初期位置と津波に連行され漂流するかどうかの漂流特性の関係を確認するための衝突確認試験、および堤体衝突時の堤体に生じるひずみ分布からひずみエネルギーを計測する衝突力計測試験の3つの試験を実施した。

3.6.2. 試験水槽と地形模型

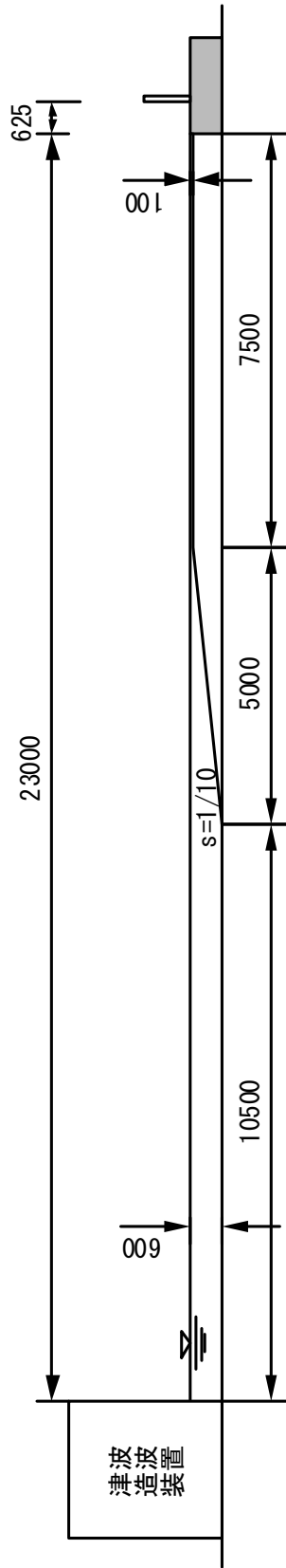
水理試験は、幅 80cm、長さ 47m、片面ガラス張りの二次元長水槽を用いて実施した（図- 3.7 (a)参照）。水槽の端部には、津波造波装置が設置されており、これにより津波を造波した。

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。

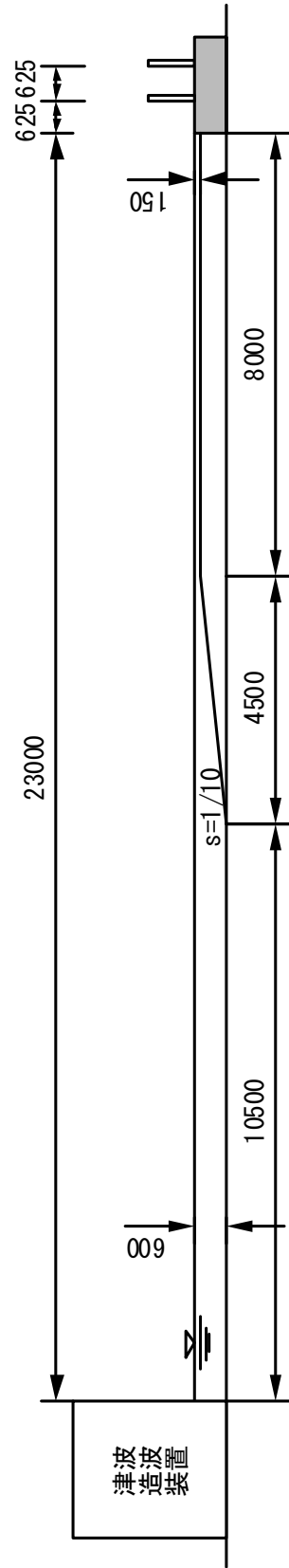
海底地形として、図- 3.7(b)(c)に示す直立護岸タイプを対象に試験を実施した。造波装置前面の水深は 60cm とし、護岸前面水深 10cm で長さ 7.5m または、護岸前面水深 15cm で長さ 8m の水平海底地形を、1/10 勾配で水槽底面に擦り付けた。陸上地形は汀線において水面と同一の高さとした。地形模型の表面は、塩ビ製とした。



(a) 試験水槽



(b) 地形模型 (Wf10)



(c) 地形模型 (Wf20, Wf30)

図-3.7 試験水槽と試験模型

3.6.3. 入射波

対象とした波ケースの目標波形（後述する計測点 A における沖波波形）を，図- 3.8 に示す．

類似事業では，衝突速度が概略 2m/s で一定となっている．これは，衝突速度は波速にほぼ一致し，水深一定の条件で試験を実施したため，波速がすべてのケースでほぼ同一となったことによる．そこで本試験では，波形に水深違いのケースとして Wf10 を加えることにより，波速の異なるケースを設定した．

また，類似事業では，全ての波形が砕波しており，水面勾配の変化が比較的短時間に生じている．そのため，初期位置の違いによる水面勾配の変化が大きく，水面勾配と漂流物連行の関係が明確に分からなかった．そこで本試験では，津波高が比較的小さく，砕波前で水面勾配の変化が緩やかな波形として Wf30 を設定した．

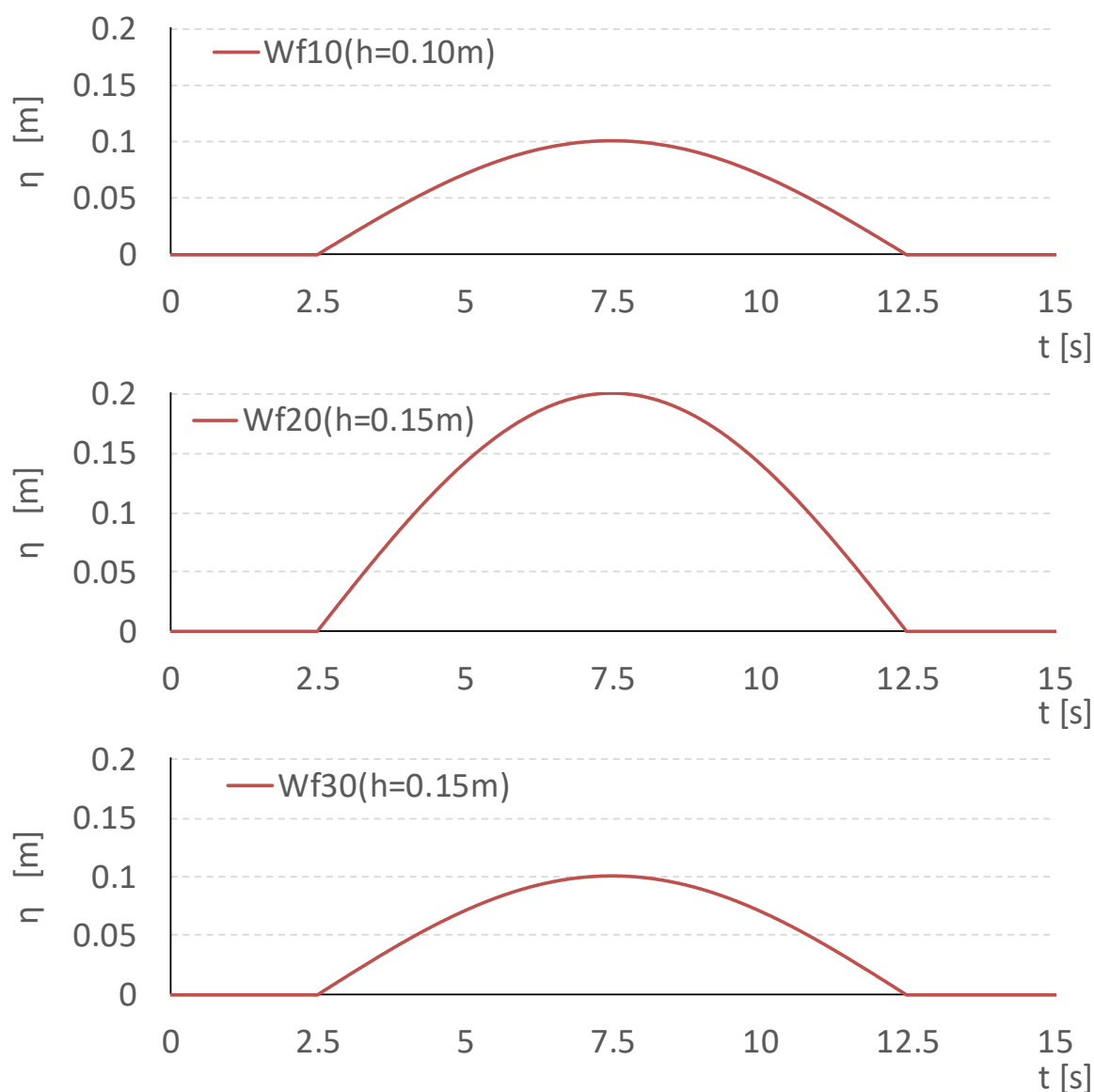


図- 3.8 目標入射波形（計測点 A）

3.6.4. 試験方法

(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。目標波形は、後述する計測点 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) 衝突確認試験

水中衝突試験に先立ち、初期位置と漂流特性の関係を確認するため、初期位置を変化させながら繰り返し試験を実施し、波に連行される状況と衝突の有無を確認した。繰り返し回数は最大で 3 回とし、初期位置を変えながら試験を実施した。

(3) 衝突力計測試験

津波漂流物の衝突力計測試験では、漂流物模型を沖合に浮遊させた状態で津波を作用させ、防潮堤模型に衝突させて、模型に生じるひずみ分布を時系列で計測した。この際、巻波状になった波に漂流物が巻き込まれると、衝突時の漂流物模型の位置を撮影画像から特定できないことが想定された。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- 3.9 参照)。また、試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- 3.10 参照)。

津波の造波準備が完了後、漂流物の初期位置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- 3.11)、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防潮堤模型に衝突させ、防潮堤模型に生じるひずみを計測した。衝突状況は、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。漂流物初期位置の試験ケースは、波形によって特徴的な漂流特性が確認出来るように、衝突確認試験に基づき決定した。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高さや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頻度を算定した。



図- 3.9 漂流物模型の製作イメージ図

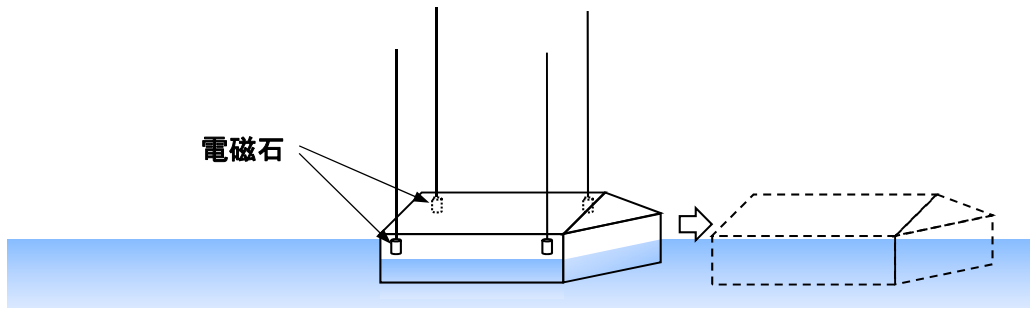


図- 3.10 漂流物の初期位置保持方法

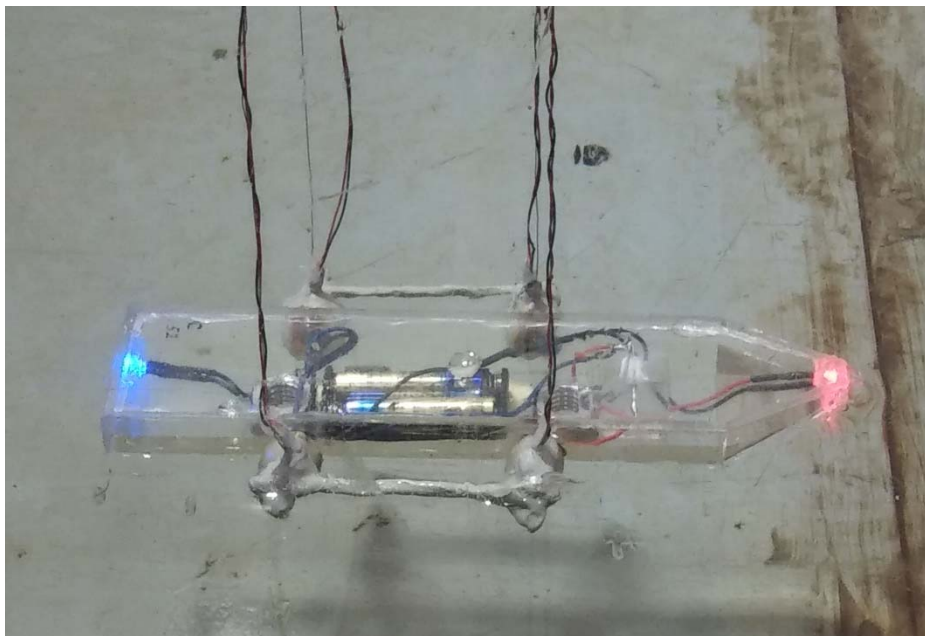
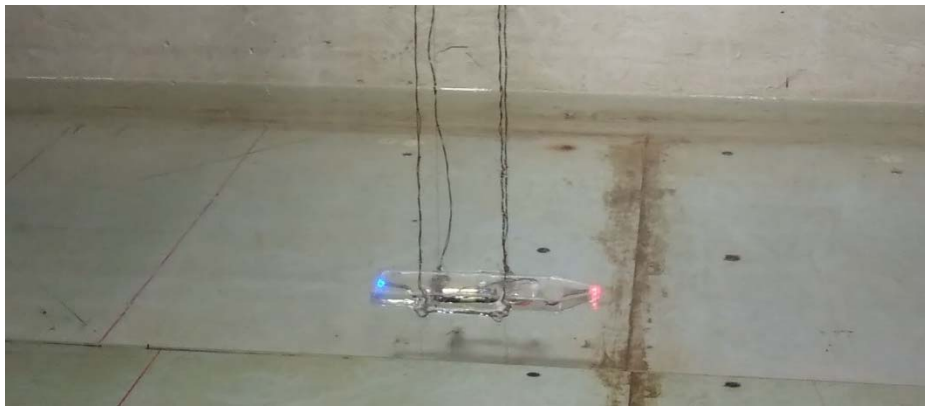


図- 3.11 漂流物の初期位置保持状況

3.6.5. 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、衝突高さ、防潮堤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- 3.12 に示す。各計測値のサンプリング周波数は、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, E 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~B16 の 16 点で水位を計測して、時間波形の比較から伝播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- 3.13 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水位計を設置した。

(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 において初期水深中央の高さ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, D 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。

(3) ひずみ・圧力

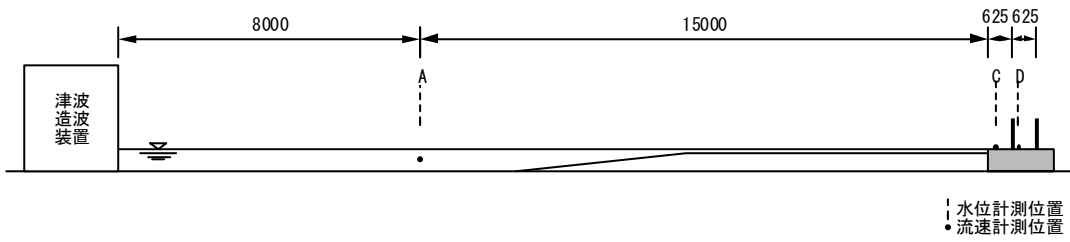
ひずみは防潮壁模型の裏側にひずみゲージ（共和電業，KFG-5-120-C1-23）を貼り付けて計測した。ひずみゲージの設置高さは鉛直方向 5 cm 間隔とした。圧力の計測点は、側壁より 29cm の位置とし、高さ方向に 5cm または 10cm 間隔で小型の水圧計（エス・エス・ケイ，P208-02）を設置して計測した。ひずみと圧力の計測位置を、図- 3.14 に示す。なお、防潮堤模型の全体幅は 79cm とし、両側 0.5cm の隙間は模型を設置後に間詰した。

(4) 動画

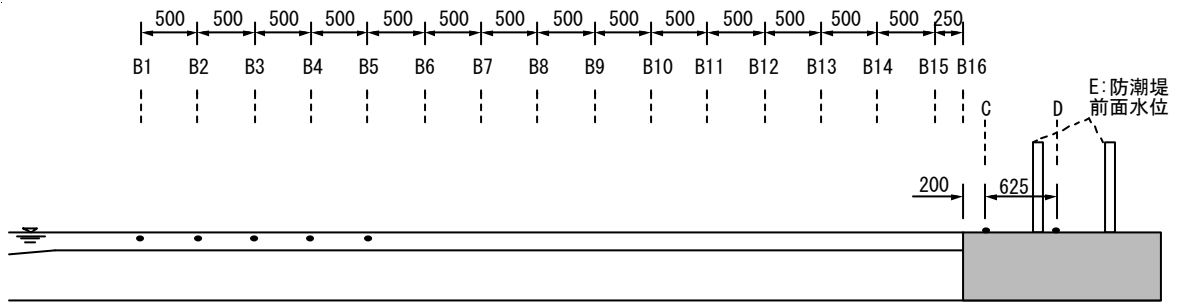
漂流状況は、以下の 2 通りの手法で水路側面から撮影した。

- ・通常カメラによる試験全体の動画撮影
- ・高速カメラによる防潮堤模型近傍の動画撮影

防潮堤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。高速カメラの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- 3.12 水位・流速の計測位置

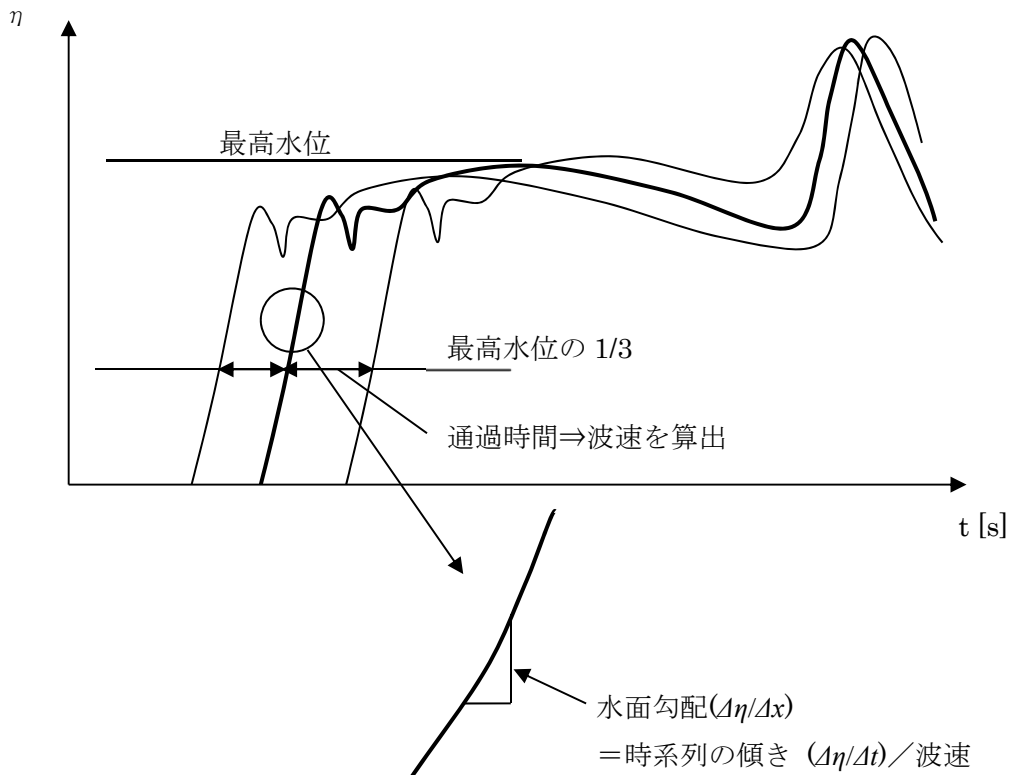


図- 3.13 波速・水面勾配の算定方法

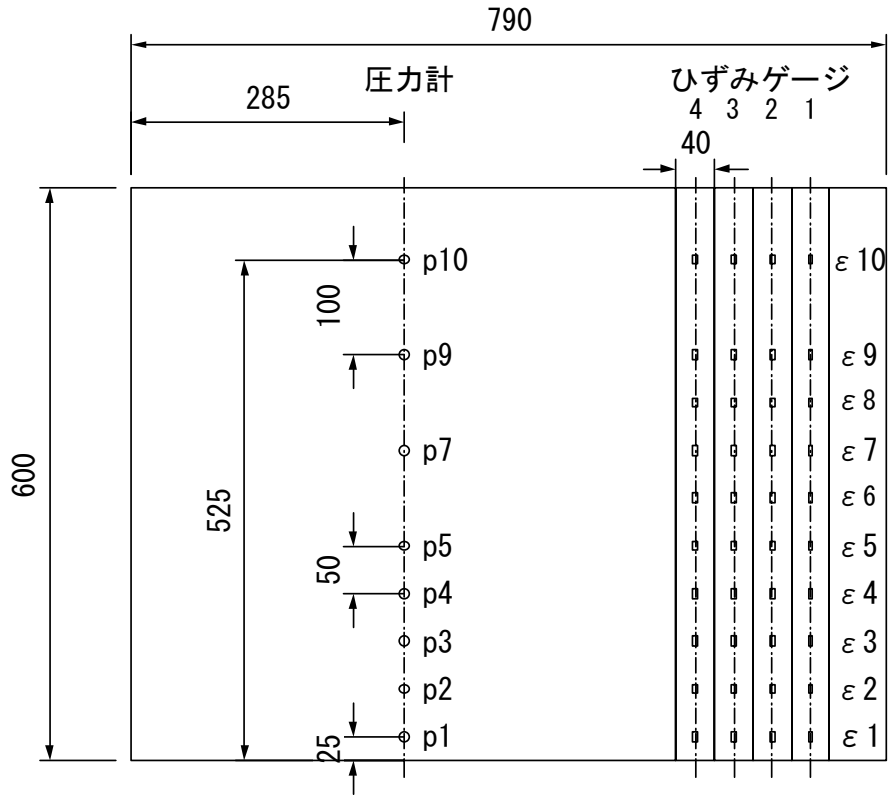


図- 3.14 防潮堤模型の圧力・ひずみ計測位置

3.6.6. 試験ケース

試験ケースは、表-3.2 に示す 32 ケースであり、それぞれ 15 回の同条件による試験を実施しており、造波回数は合計 480 回である。

漂流物 TypeG は、砕波点の沖側において漂流物 TypeA が砕波点を超えて連行されない条件において、重量が増加することで衝突するようになるかどうかを確認することを目的とした。また、堤体位置 1.25m は、堤体位置の違いにより、漂流物衝突力が変化するかを確認するためのものである。

表- 3.2 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-Wf10-A-10	Wf10	0.625m	A	1.0m	15		
2	F-Wf10-A-15				1.5m			
3	F-Wf10-A-20				2.0m			
4	F-Wf20-A-20	Wf20			2.0m			
5	F-Wf20-A-25				2.5m			
6	F-Wf20-A-40				4.0m			
7	F-Wf20-A-50				5.0m			
8	F-Wf30-A-05	Wf30			0.5m			
9	F-Wf30-A-07				0.75m			
10	F-Wf30-A-10				1.0m			
11	O-Wf20-A-20	Wf20	1.25m	2.0m				
12	O-Wf20-A-40			4.0m				
13	O-Wf20-A-50			5.0m				
14	F-Wf10-E-10	Wf10	0.625 m	E	1.0m			
15	F-Wf10-E-15				1.5m			
16	F-Wf10-E-20				2.0m			
17	F-Wf20-E-20	Wf20			2.0m			
18	F-Wf20-E-40				4.0m			
19	F-Wf20-E-50				5.0m			
20	F-Wf30-E-05	Wf30			0.50m			
21	F-Wf30-E-07				0.75m			
22	F-Wf30-E-10				1.0m			
23	F-Wf20-F-20	Wf20			0.625 m		F	2.0m
24	F-Wf20-F-40		4.0m					
25	F-Wf20-F-50		5.0m					
26	F-Wf20-F-55		5.5m					
27	F-Wf30-F-07	Wf30	0.75m					
28	F-Wf30-F-10		1.0m					
29	F-Wf30-F-12		1.25m					
30	F-Wf20-G-20	Wf20		G				2.0m
31	F-Wf20-G-40							4.0m
32	F-Wf20-G-50							5.0m

合計 480 ケース

4. 気中衝突試験結果

4.1. ひずみ計測による気中衝突試験

4.1.1. ひずみ及びひずみエネルギーの計測結果

図-4.2～図-4.29 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。衝突高さ 7.5cm と 15.0cm の結果を示した。また、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。

防潮堤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） E は以下の式によって求められる。

$$E = \int \frac{M^2}{2E_y I} dz = \int \frac{2\varepsilon^2 E_y I}{d^2} dz \quad (4.1)$$

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。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、局所的な速度は異なるものの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-4.2 は、漂流物を高さ 0.075m 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、 ε_2 （高さ 0.075m）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 0.075m 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伝達されたエネルギーは、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-4.2 の場合、ひずみエネルギーの時系列では、0.0077s 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、各変形モードの固有周期で自由振動しながら徐々に減衰している。堤体の自由振動は複数のモードで生じているため、この最大値発生時に運動エネルギーは完全にゼロとなっていないこと、衝突直後からいくらかエネルギーは減衰あるいは架台を通して防潮堤模型外に伝達していること等から、この最大値は、堤体に伝達された全エネルギーより小さいと考えられるが、ここではまず、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て結果を整理する。なお、片持ち単純梁として求めた防潮堤模型運動の固有周期は、1 次モードから 4 次モードまでそれぞれ、0.0528s, 0.0084s, 0.0030s, 0.0015s であり、ひずみエネルギーの固有周期はこの 1/2 周期となることから、それぞれ 0.0264s, 0.0042s, 0.0015s, 0.0008s となる。

下段のひずみ鉛直分布には、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、衝突位置に正のひずみ、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。

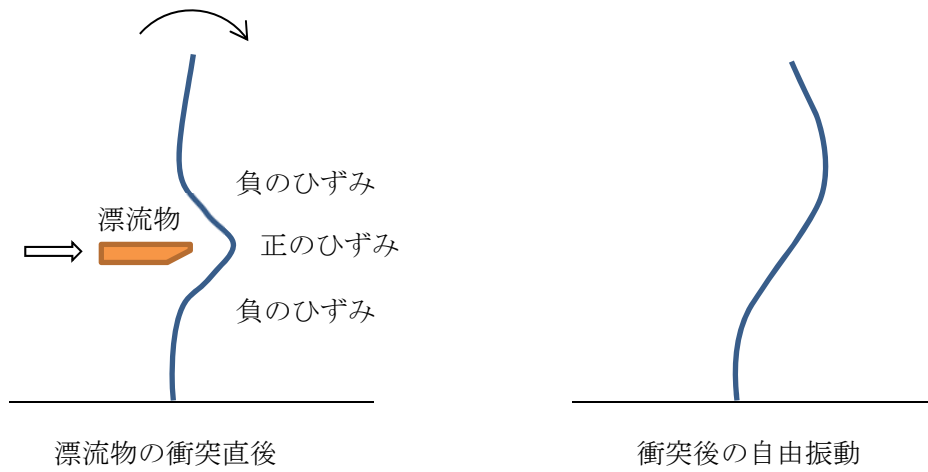
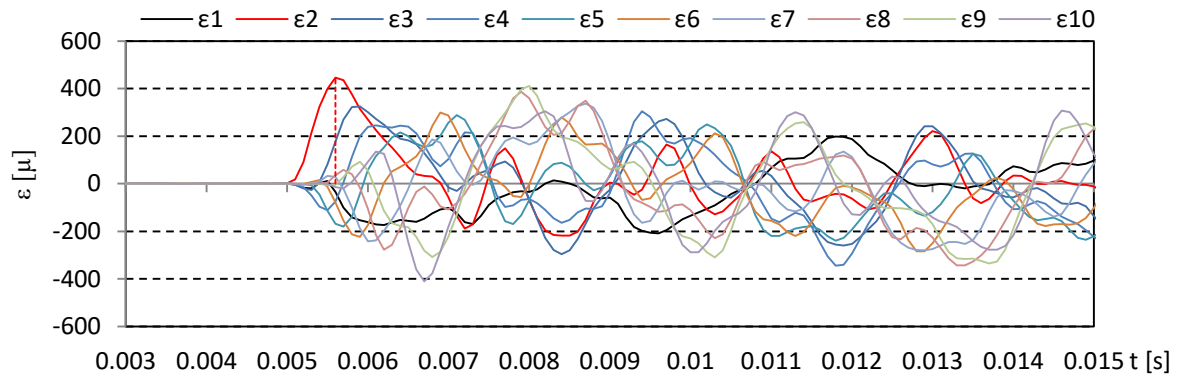
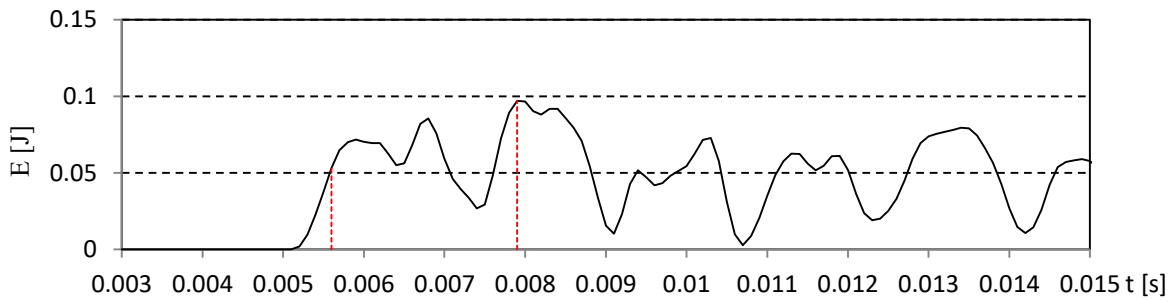


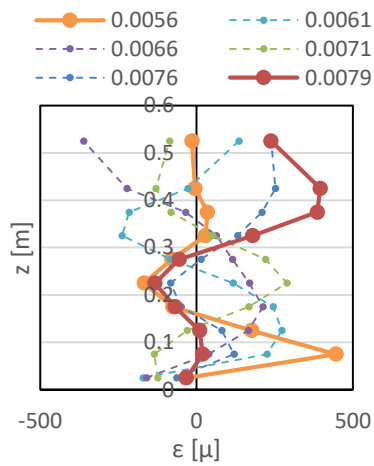
図-4.1 ひずみの発生状況



(a) ひずみ時系列

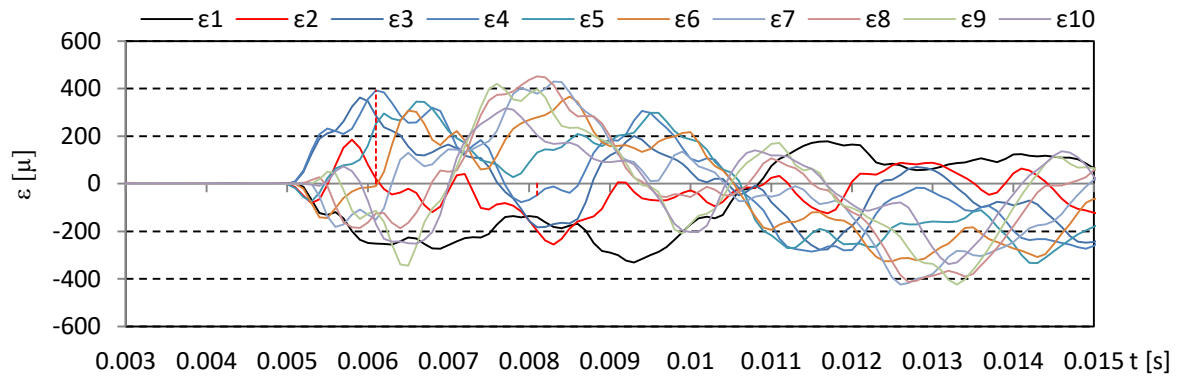


(b) ひずみエネルギー時系列

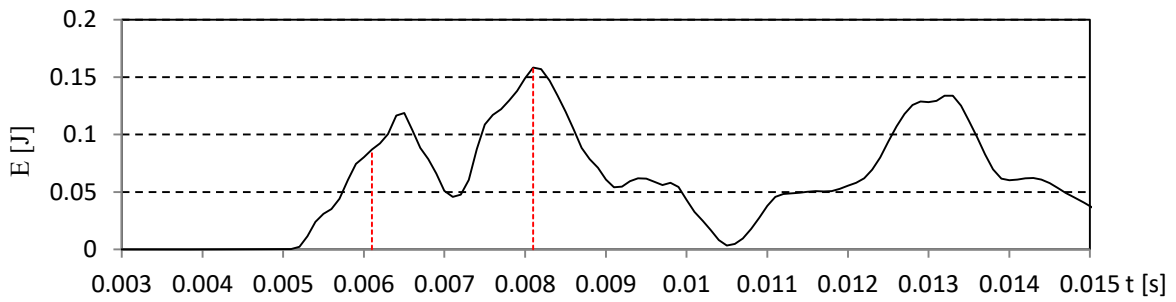


(c) ひずみの鉛直分布

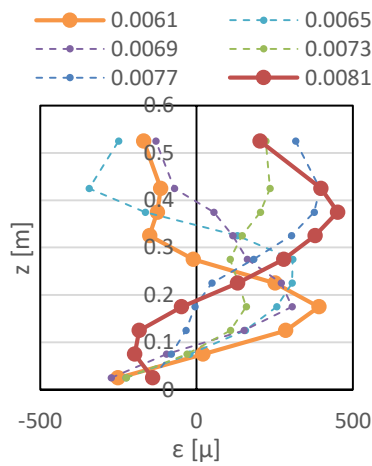
図-4.2 気中衝突試験結果 (TypeA, 衝突高さ 7.5cm, 衝突速度 1.7m/s)



(a) ひずみ時系列

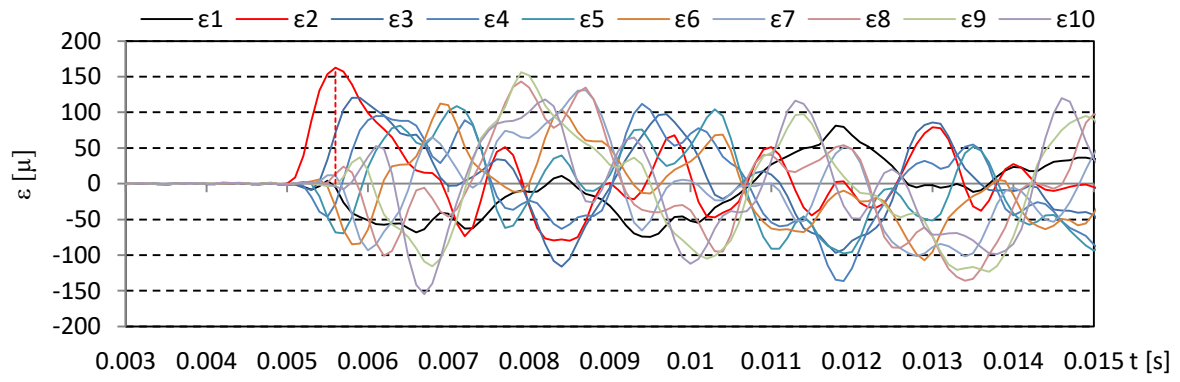


(b) ひずみエネルギー時系列

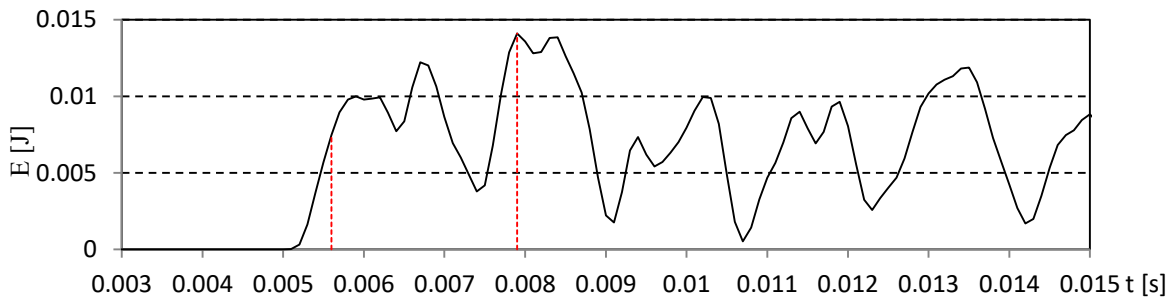


(c) ひずみの鉛直分布

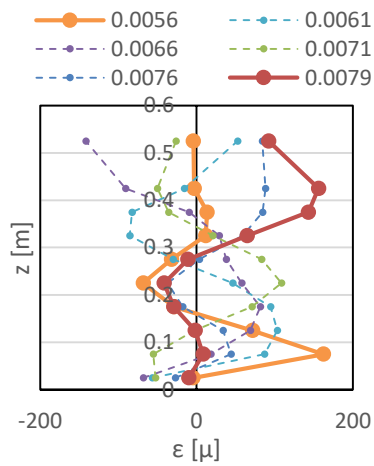
図- 4.3 気中衝突試験結果 (TypeA, 衝突高さ 15.0cm, 衝突速度 1.7m/s)



(a) ひずみ時系列

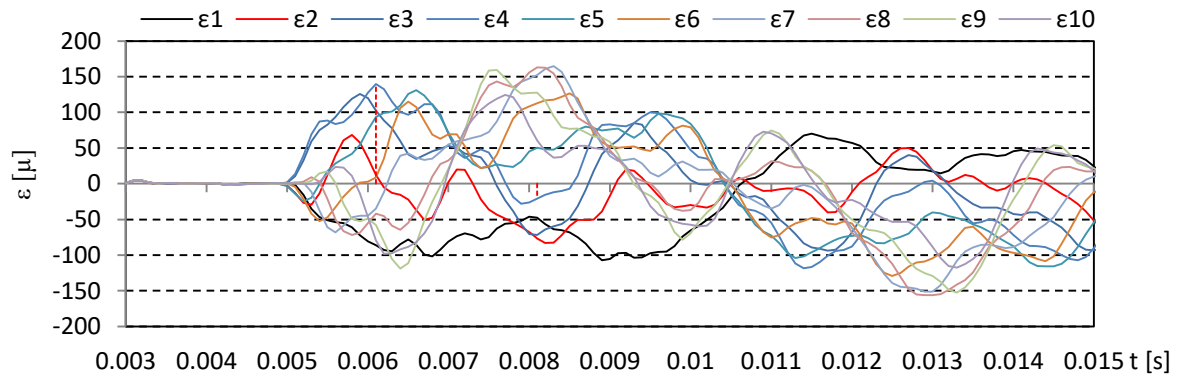


(b) ひずみエネルギー時系列

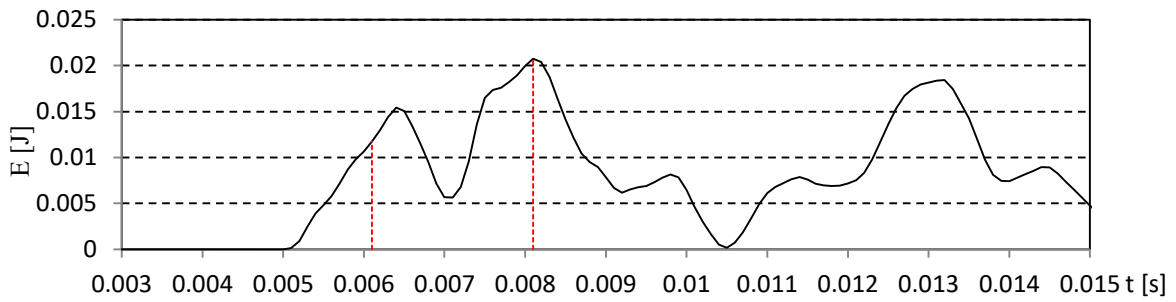


(c) ひずみの鉛直分布

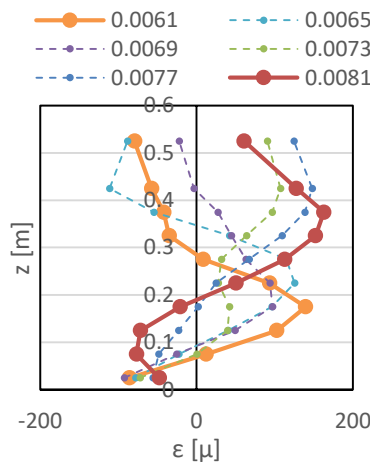
図-4.4 気中衝突試験結果 (TypeA, 衝突高さ 7.5cm, 衝突速度 0.6m/s)



(a) ひずみ時系列

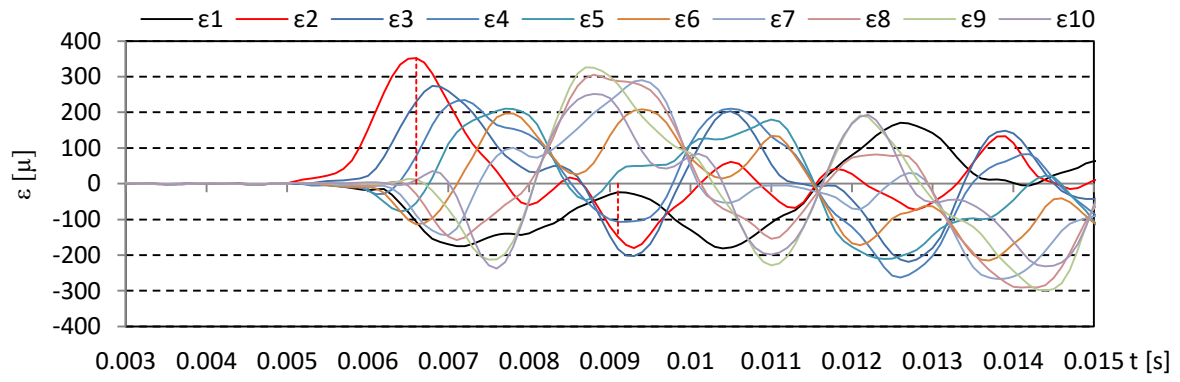


(b) ひずみエネルギー時系列

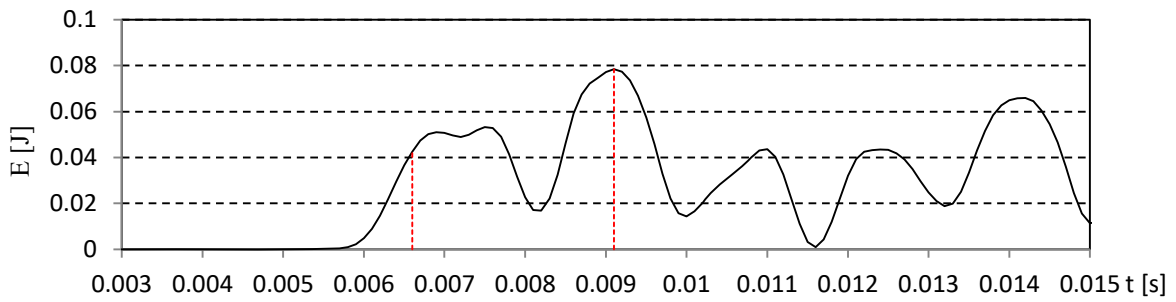


(c) ひずみの鉛直分布

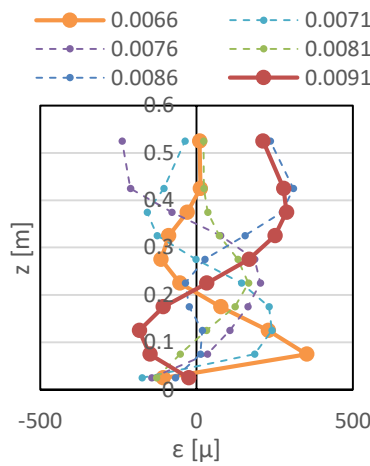
図-4.5 気中衝突試験結果 (TypeA, 衝突高さ 15.0cm, 衝突速度 0.6m/s)



(a) ひずみ時系列

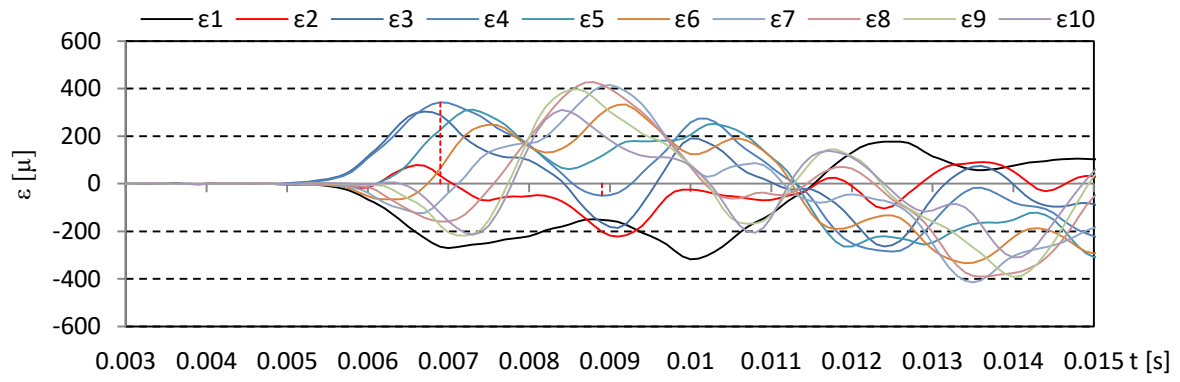


(b) ひずみエネルギー時系列

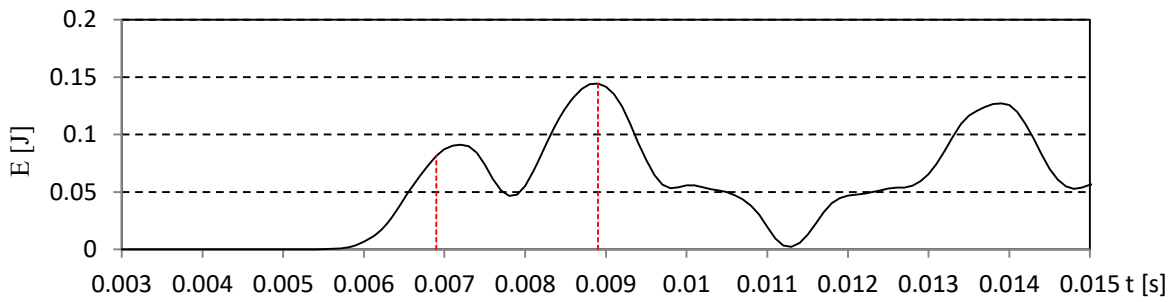


(c) ひずみの鉛直分布

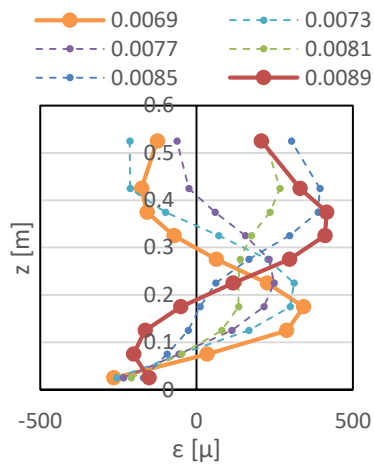
図-4.6 気中衝突試験結果 (TypeB, 衝突高さ 7.5cm, 衝突速度 1.7m/s)



(a) ひずみ時系列

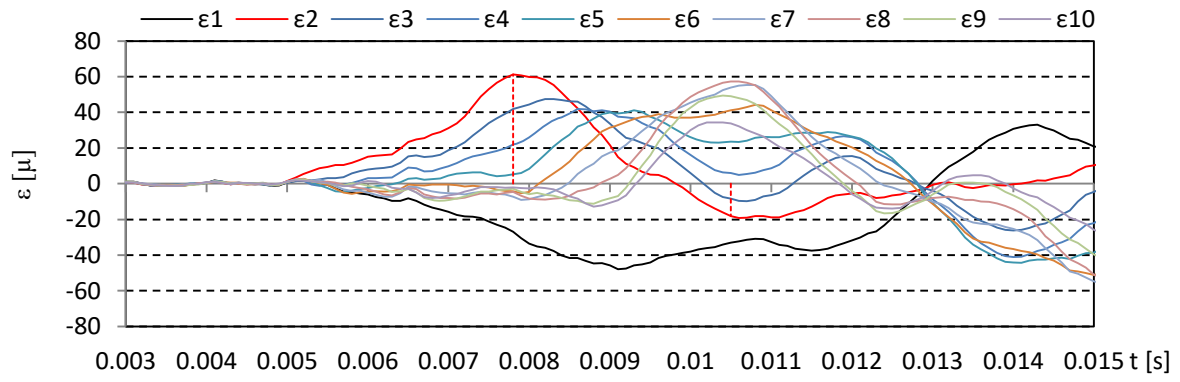


(b) ひずみエネルギー時系列

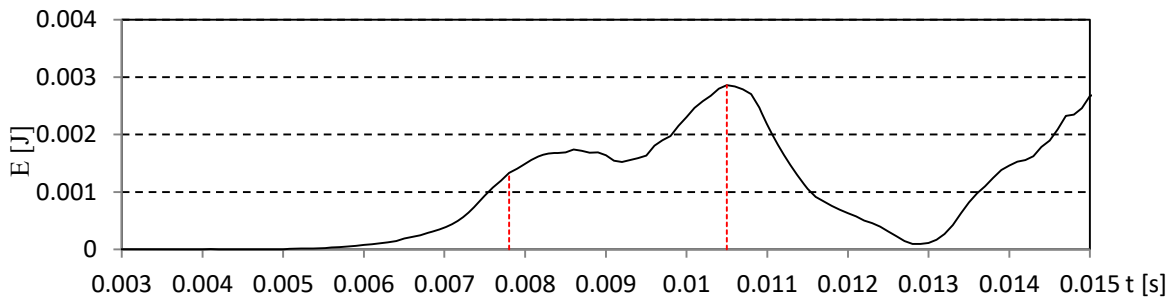


(c) ひずみの鉛直分布

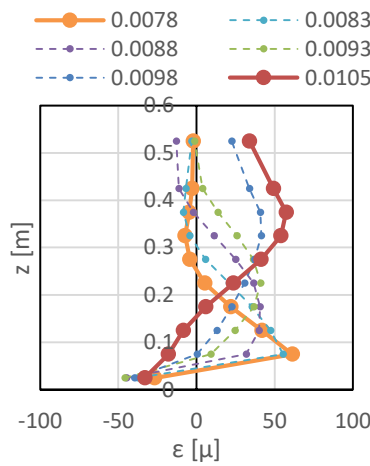
図- 4.7 気中衝突試験結果 (TypeB, 衝突高さ 15.0cm, 衝突速度 1.7m/s)



(a) ひずみ時系列

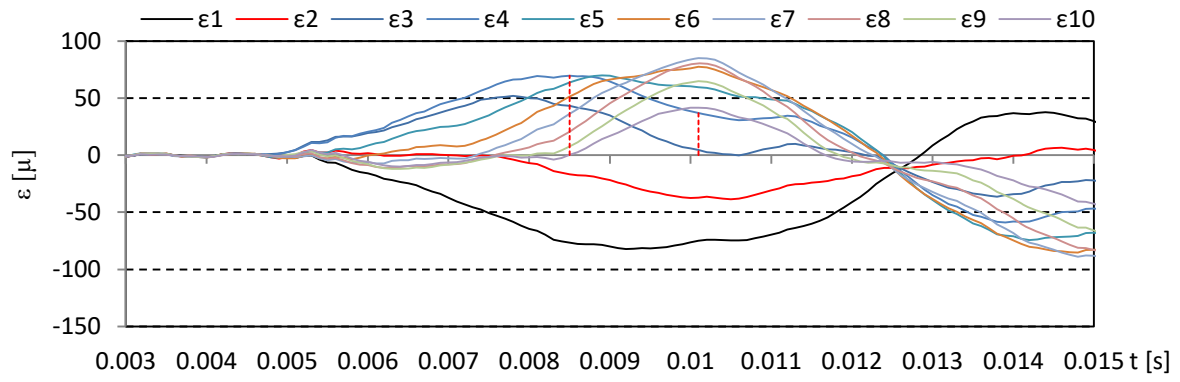


(b) ひずみエネルギー時系列

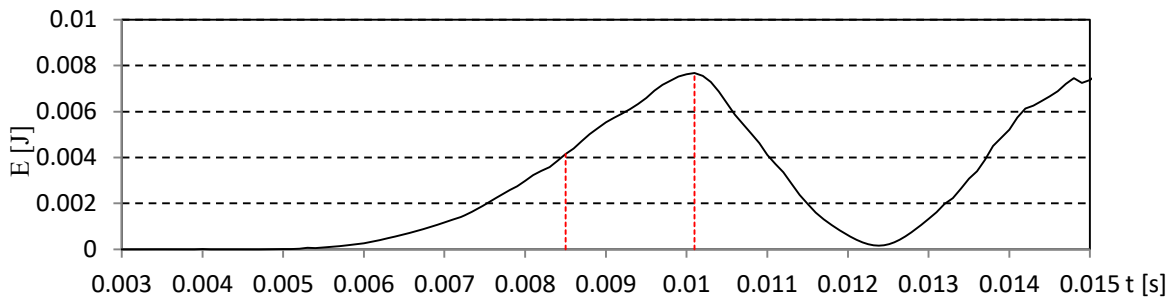


(c) ひずみの鉛直分布

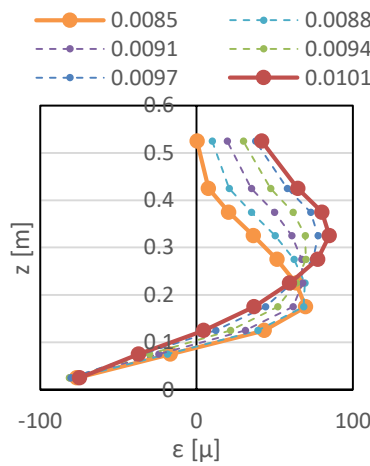
図-4.8 気中衝突試験結果 (TypeB, 衝突高さ 7.5cm, 衝突速度 0.6m/s)



(a) ひずみ時系列

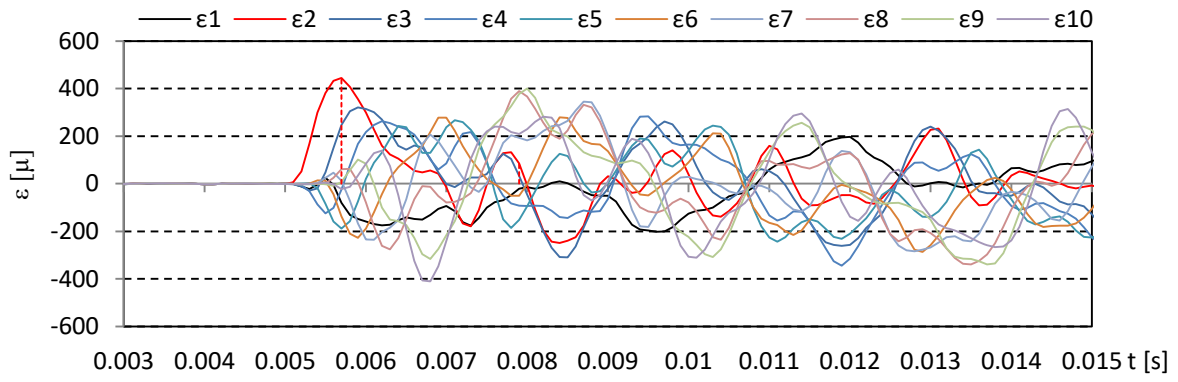


(b) ひずみエネルギー時系列

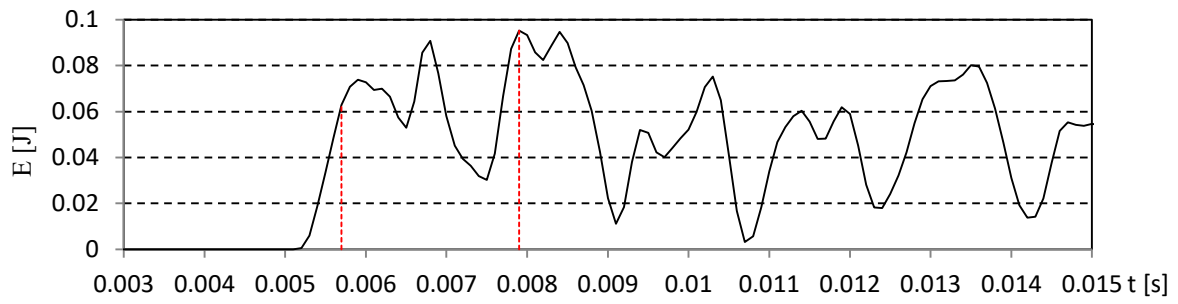


(c) ひずみの鉛直分布

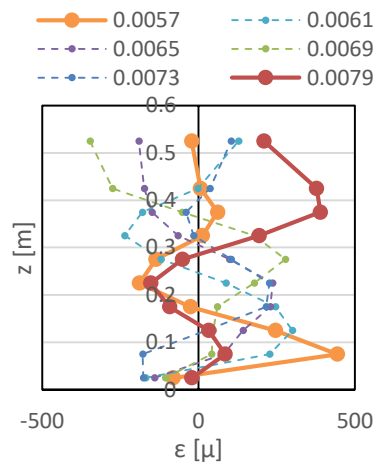
図-4.9 気中衝突試験結果 (TypeB, 衝突高さ 15.0cm, 衝突速度 0.6m/s)



(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 (TypeC, 衝突高さ 7.5cm, 衝突速度 1.7m/s)

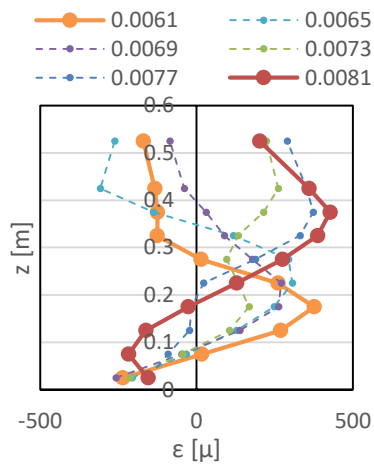
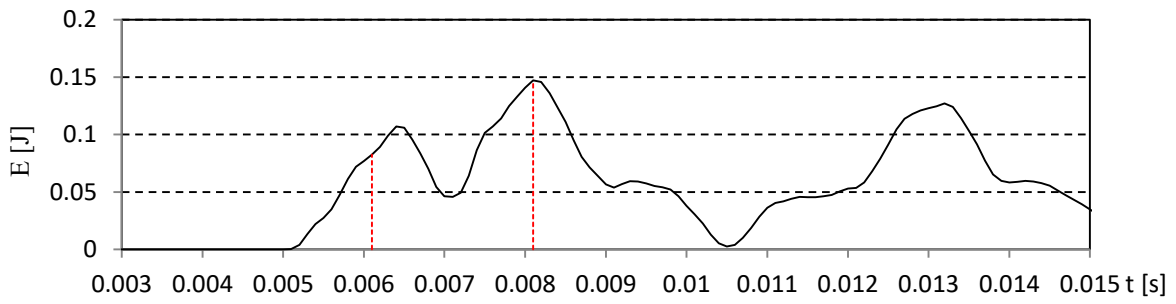
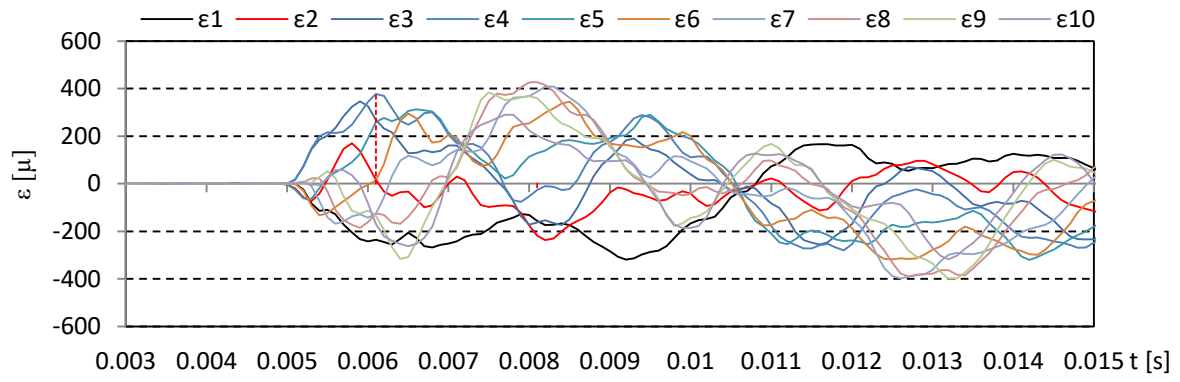
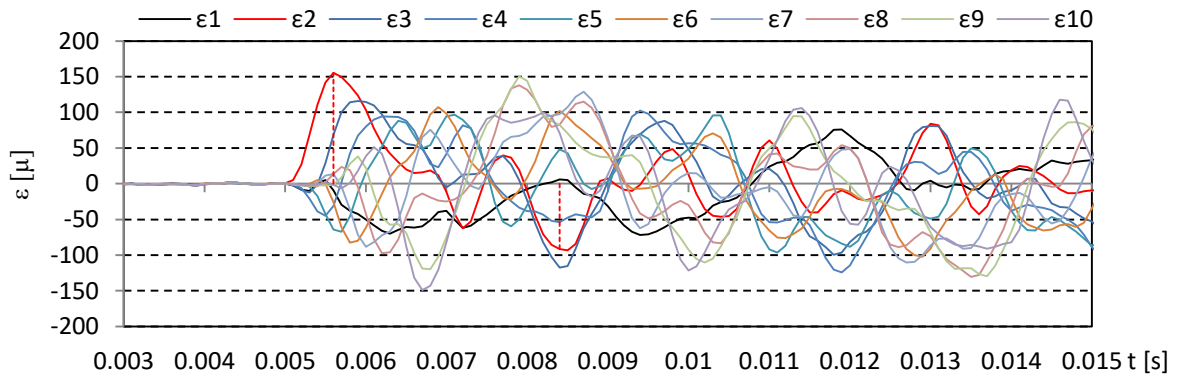
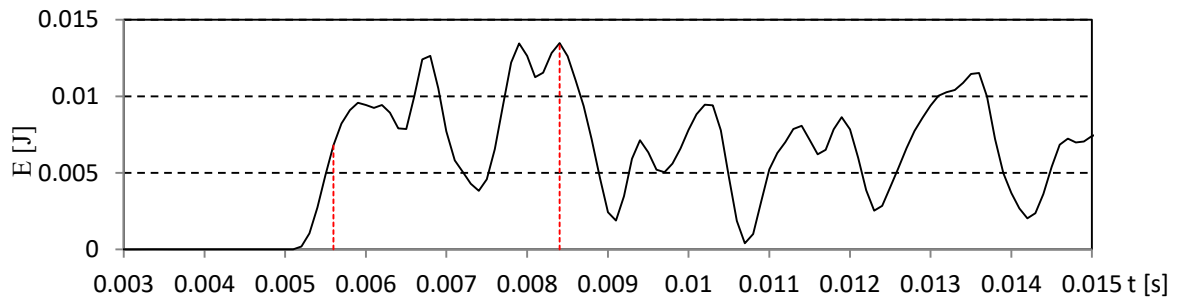


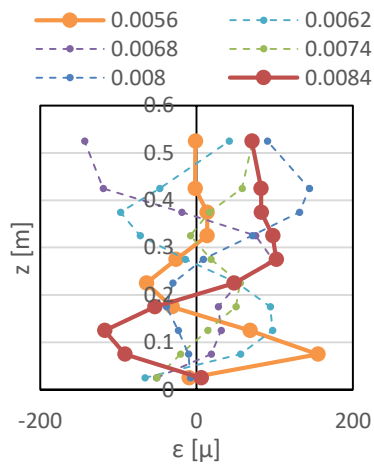
図- 4.11 気中衝突試験結果 (TypeC, 衝突高さ 15.0cm, 衝突速度 1.7m/s)



(a) ひずみ時系列

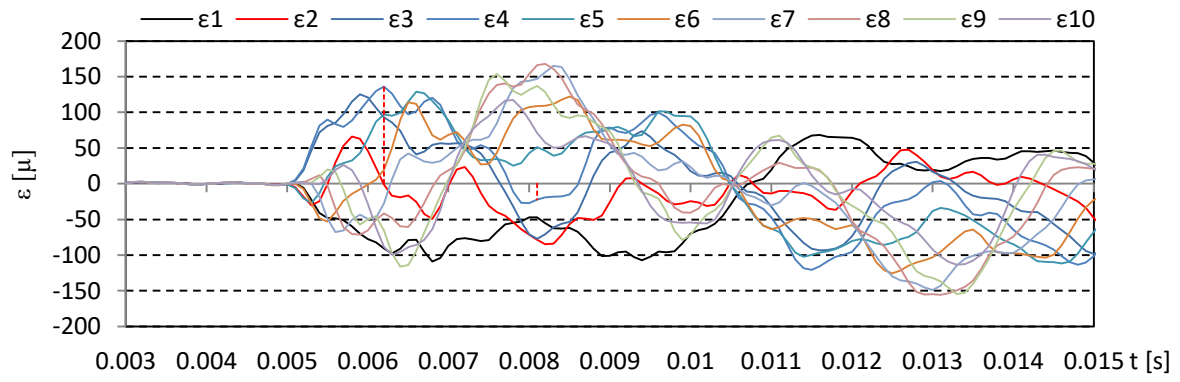


(b) ひずみエネルギー時系列

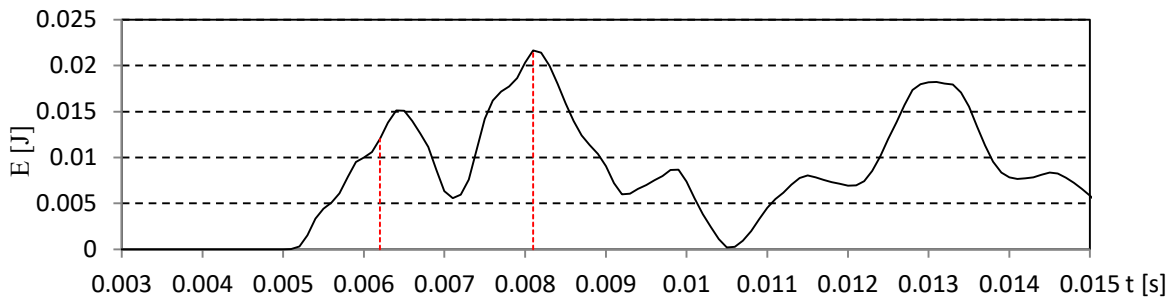


(c) ひずみの鉛直分布

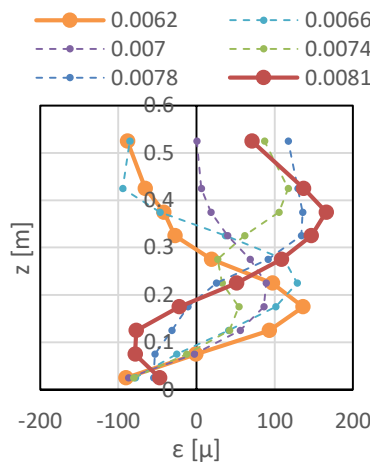
図- 4.12 気中衝突試験結果 (TypeC, 衝突高さ 7.5cm, 衝突速度 0.6m/s)



(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-4.13 気中衝突試験結果 (TypeC, 衝突高さ 15.0cm, 衝突速度 0.6m/s)

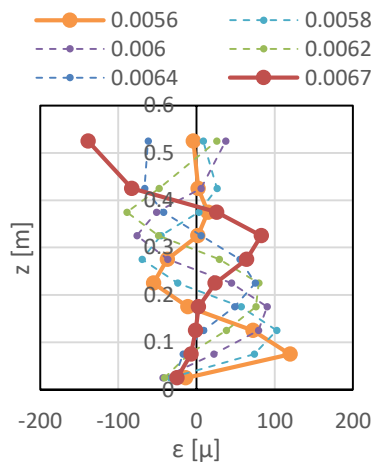
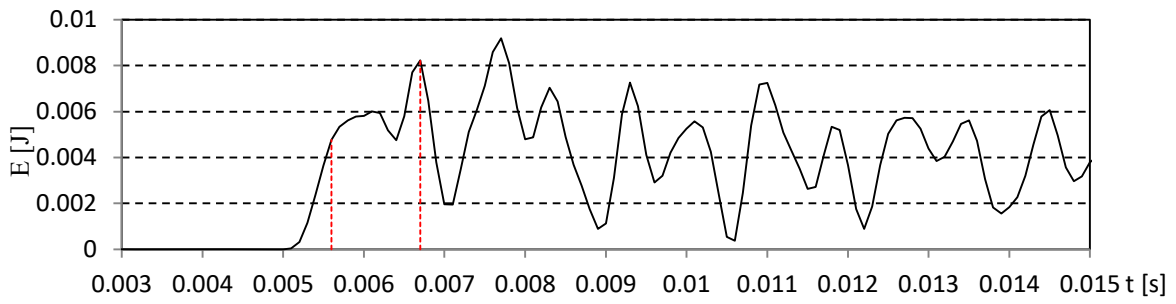
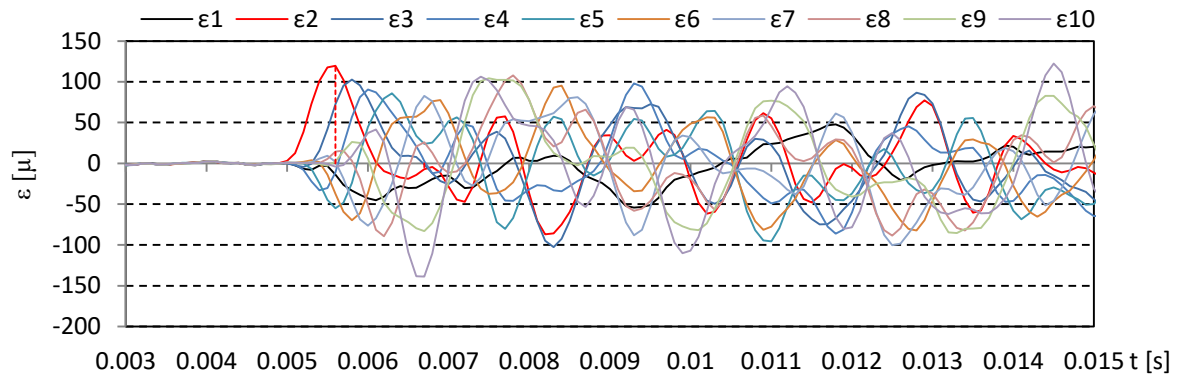


図-4.14 気中衝突試験結果 (TypeD, 衝突高さ 7.5cm, 衝突速度 1.7m/s)

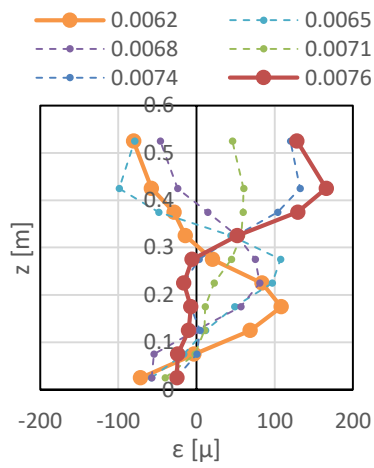
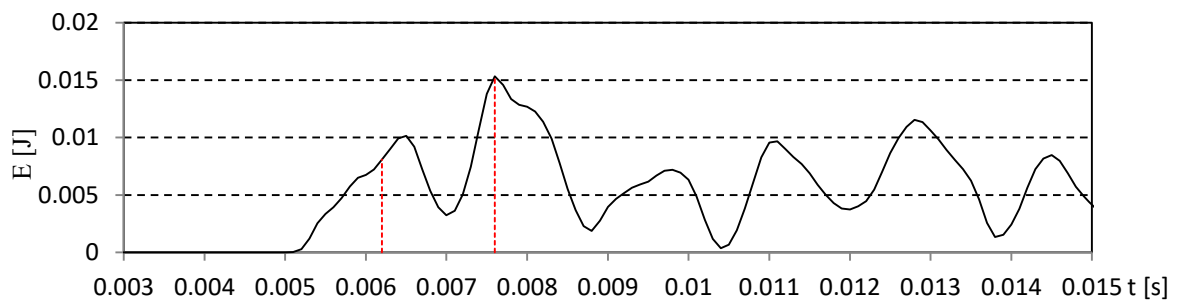
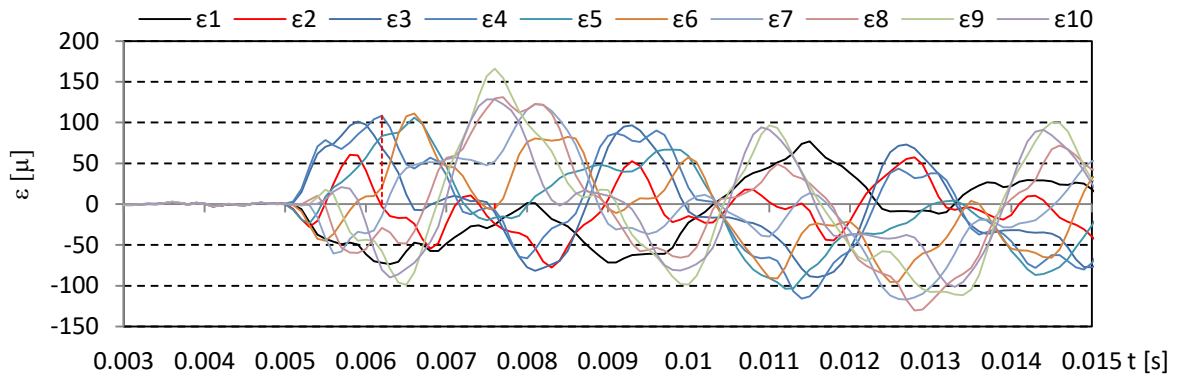


図-4.15 気中衝突試験結果 (TypeD, 衝突高さ 15.0cm, 衝突速度 1.7m/s)

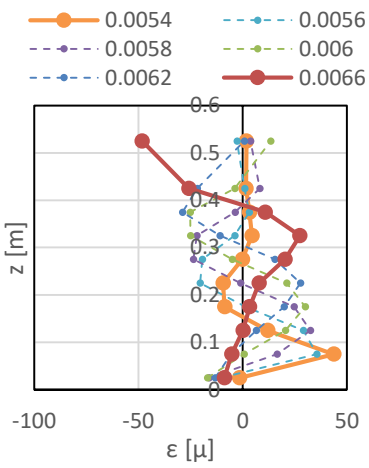
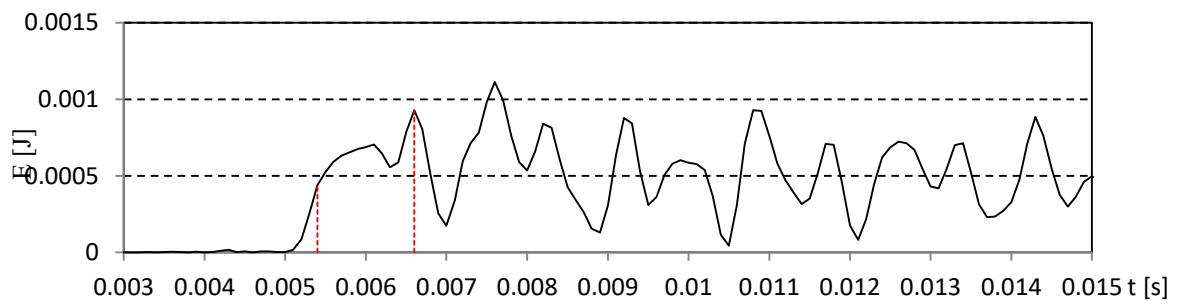
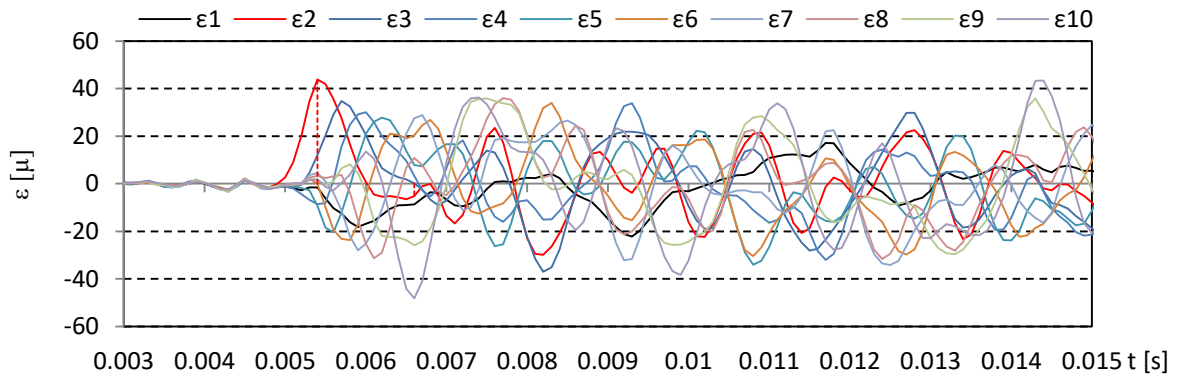
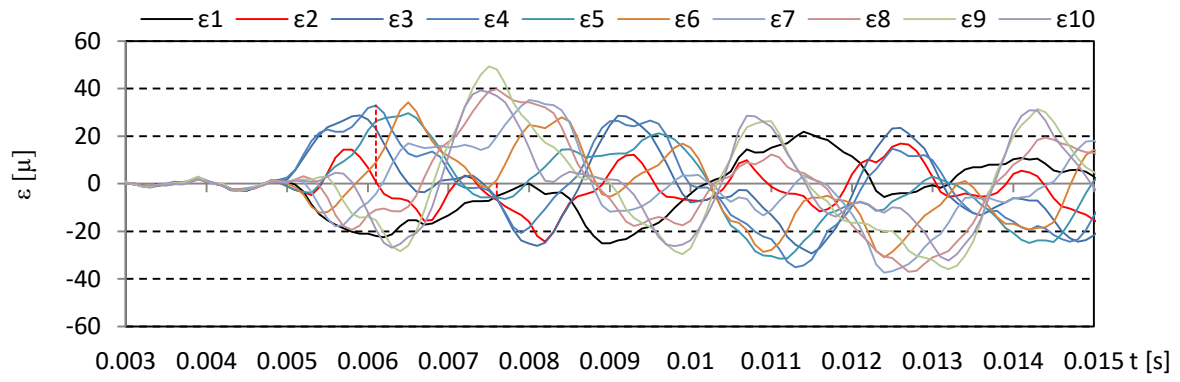
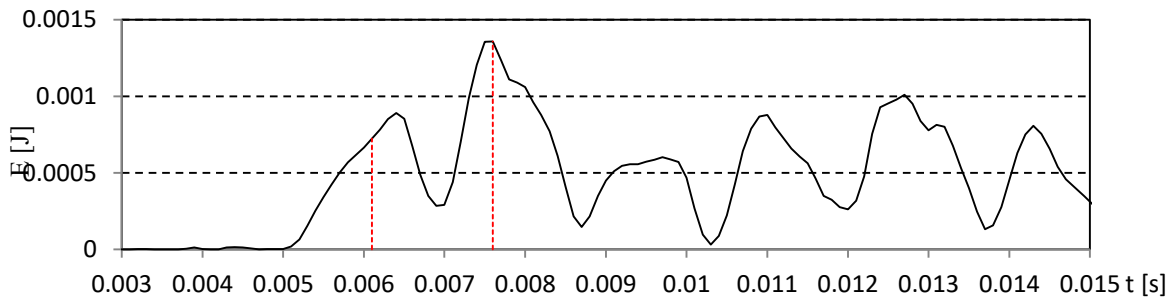


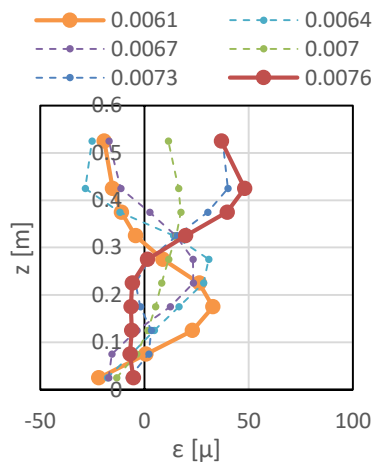
図- 4.16 気中衝突試験結果 (TypeD, 衝突高さ 7.5cm, 衝突速度 0.6m/s)



(a) ひずみ時系列

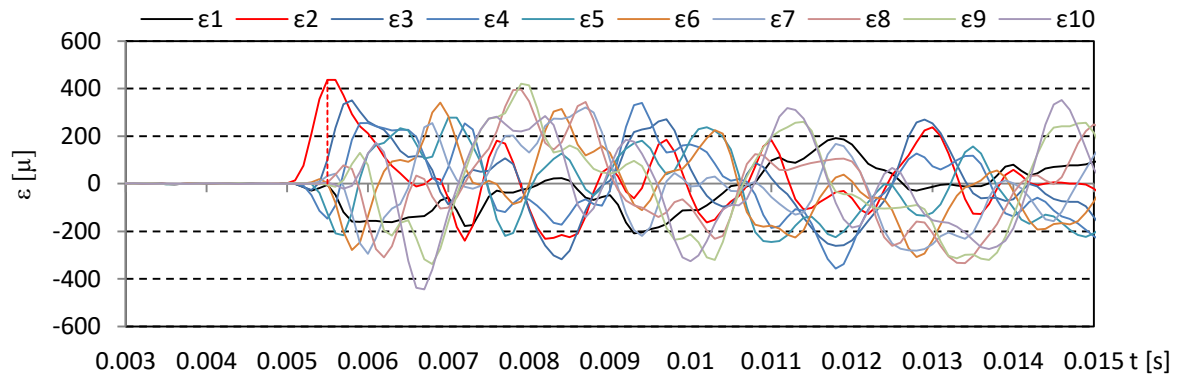


(b) ひずみエネルギー時系列

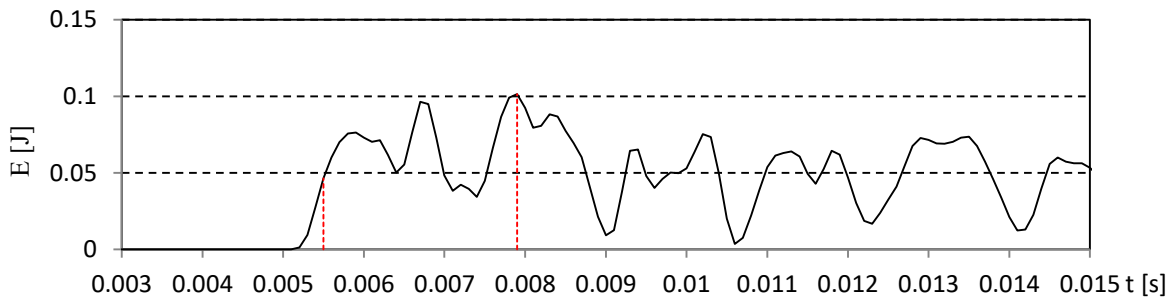


(c) ひずみの鉛直分布

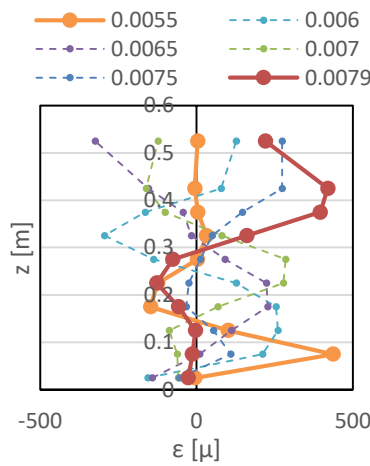
図-4.17 気中衝突試験結果 (TypeD, 衝突高さ 15.0cm, 衝突速度 0.6m/s)



(a) ひずみ時系列

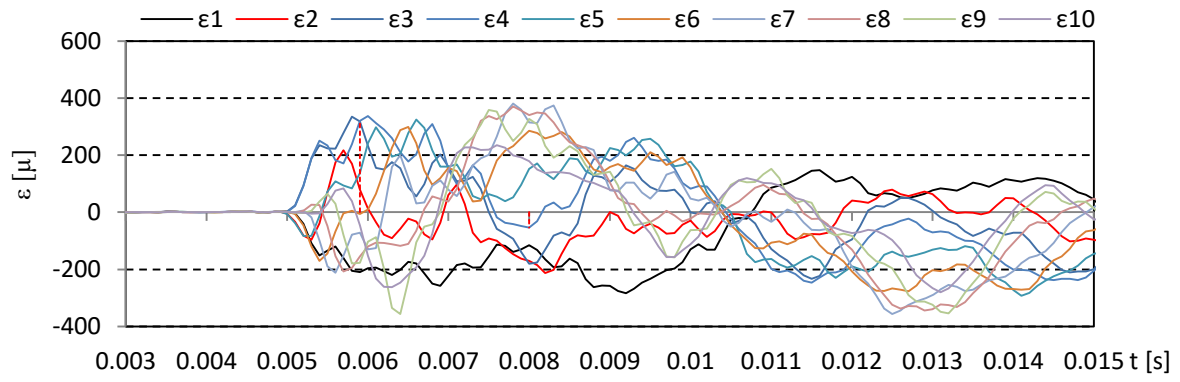


(b) ひずみエネルギー時系列

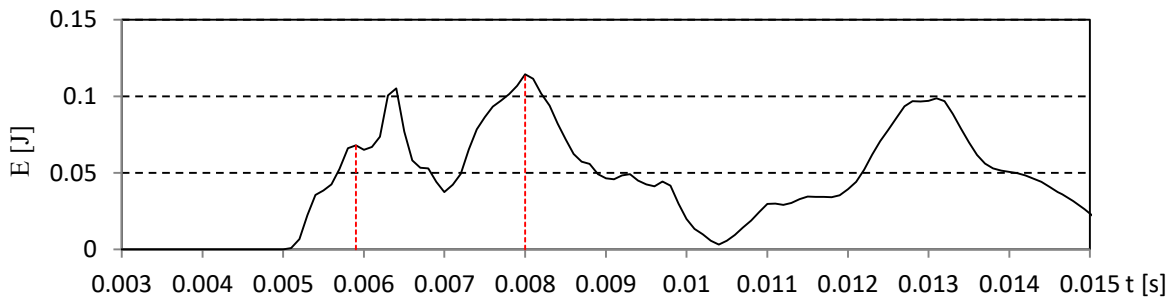


(c) ひずみの鉛直分布

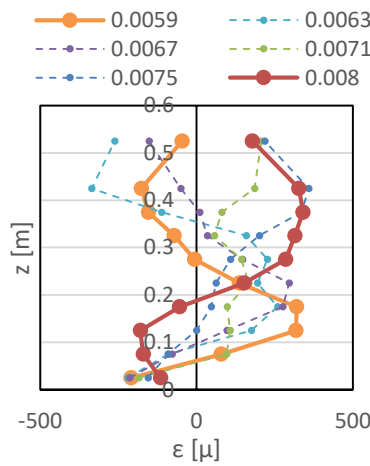
図- 4.18 気中衝突試験結果 (TypeE, 衝突高さ 7.5cm, 衝突速度 1.7m/s)



(a) ひずみ時系列

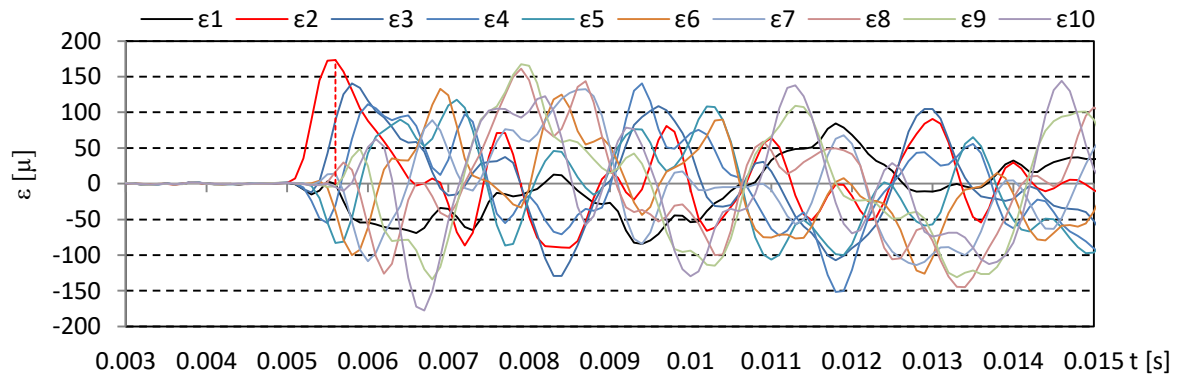


(b) ひずみエネルギー時系列

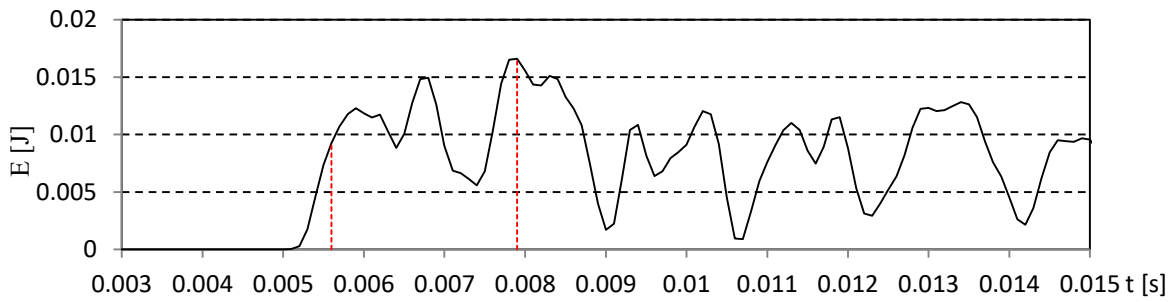


(c) ひずみの鉛直分布

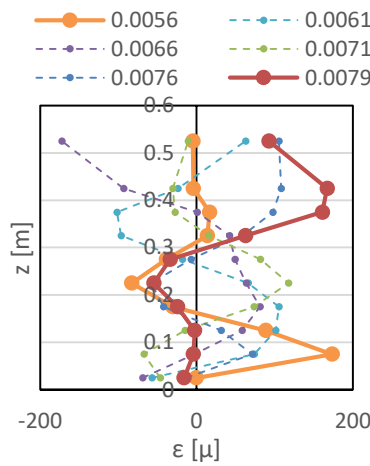
図- 4.19 気中衝突試験結果 (TypeE, 衝突高さ 15.0cm, 衝突速度 1.7m/s)



(a) ひずみ時系列

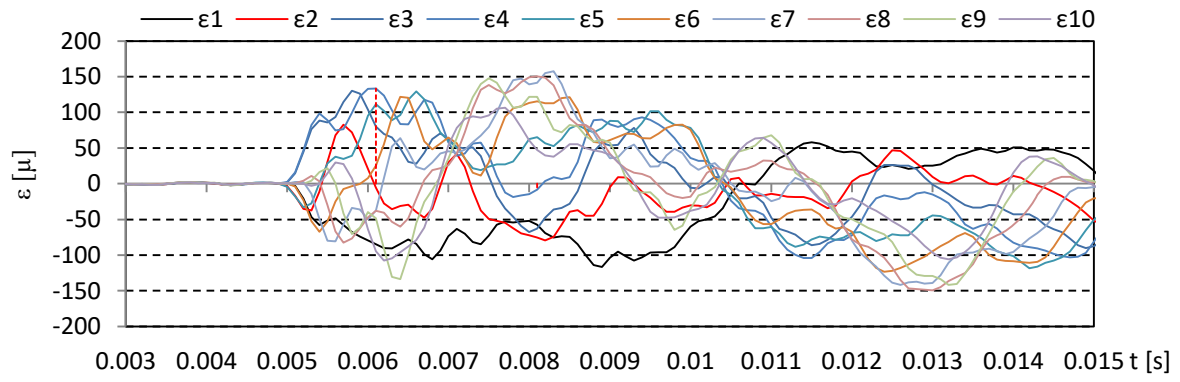


(b) ひずみエネルギー時系列

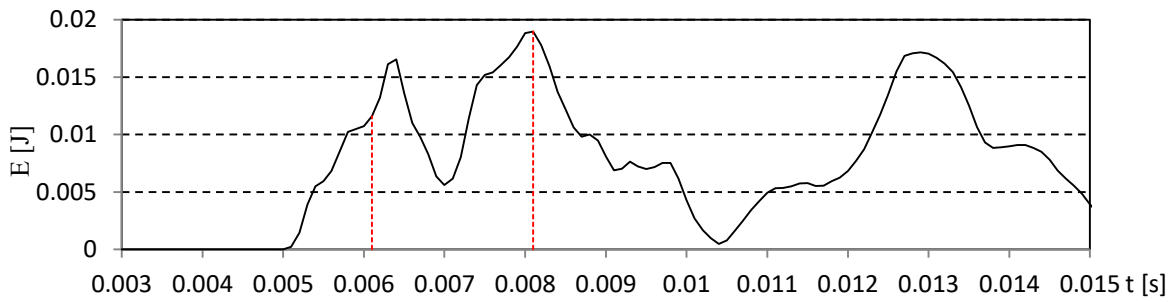


(c) ひずみの鉛直分布

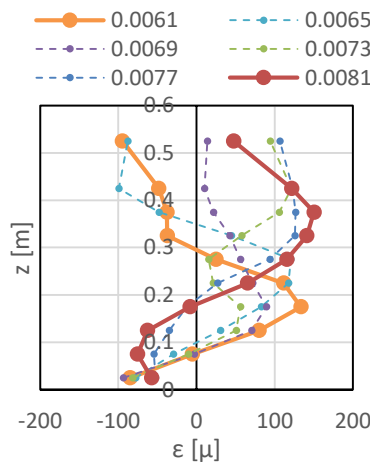
図- 4.20 気中衝突試験結果 (TypeE, 衝突高さ 7.5cm, 衝突速度 0.6m/s)



(a) ひずみ時系列

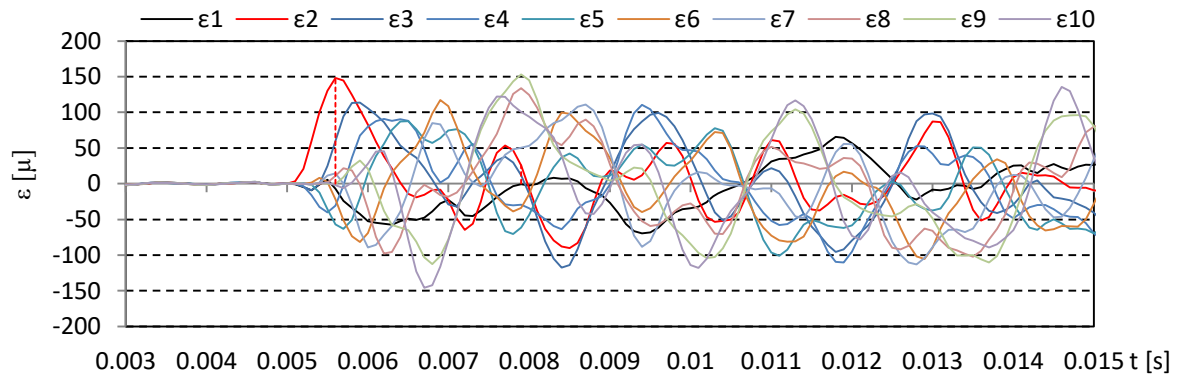


(b) ひずみエネルギー時系列

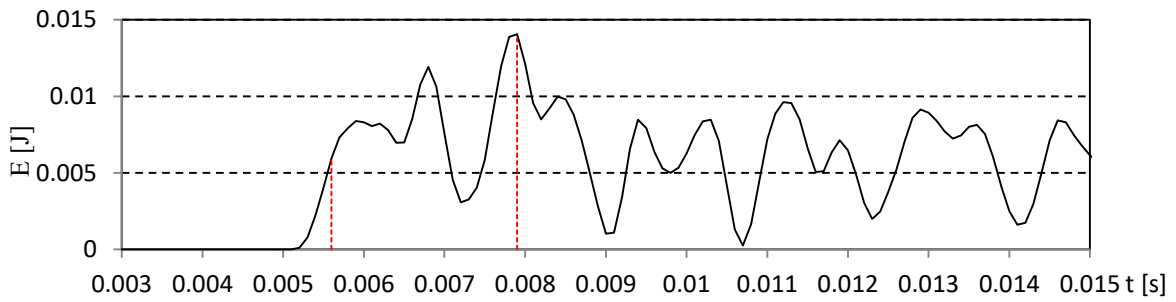


(c) ひずみの鉛直分布

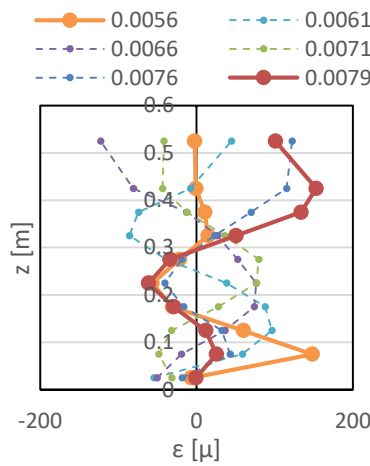
図- 4.21 気中衝突試験結果 (TypeE, 衝突高さ 15.0cm, 衝突速度 0.6m/s)



(a) ひずみ時系列

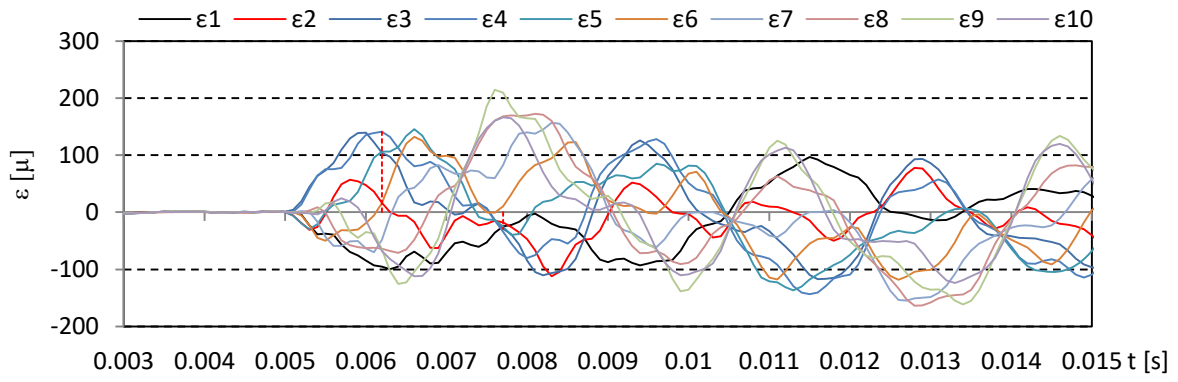


(b) ひずみエネルギー時系列

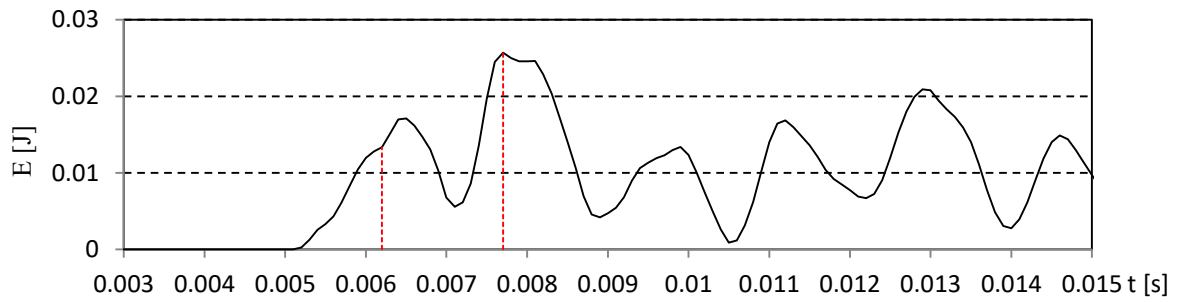


(c) ひずみの鉛直分布

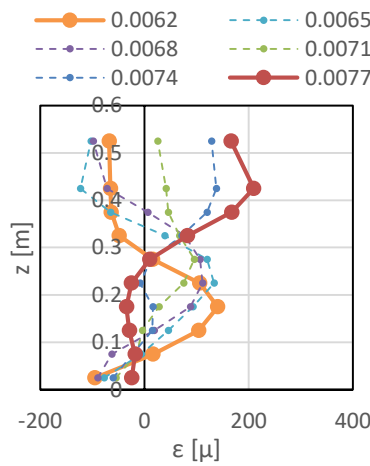
図- 4.22 気中衝突試験結果 (TypeF, 衝突高さ 7.5cm, 衝突速度 1.7m/s)



(a) ひずみ時系列

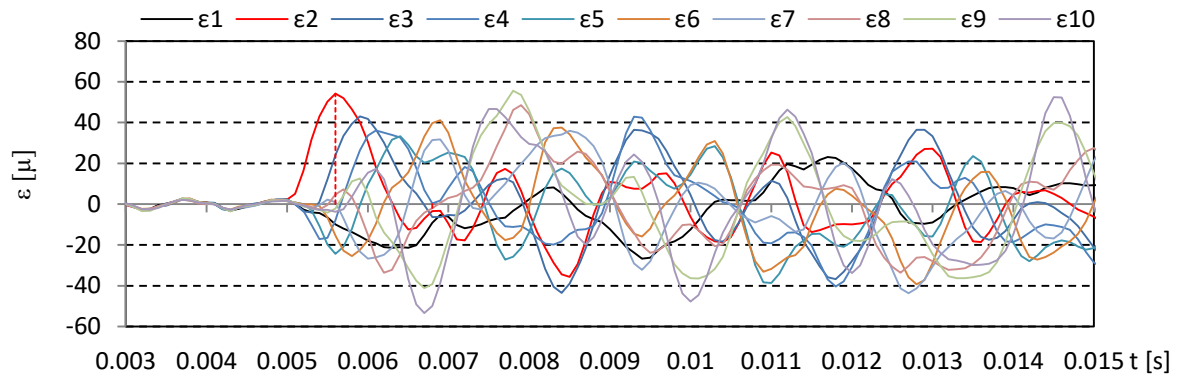


(b) ひずみエネルギー時系列

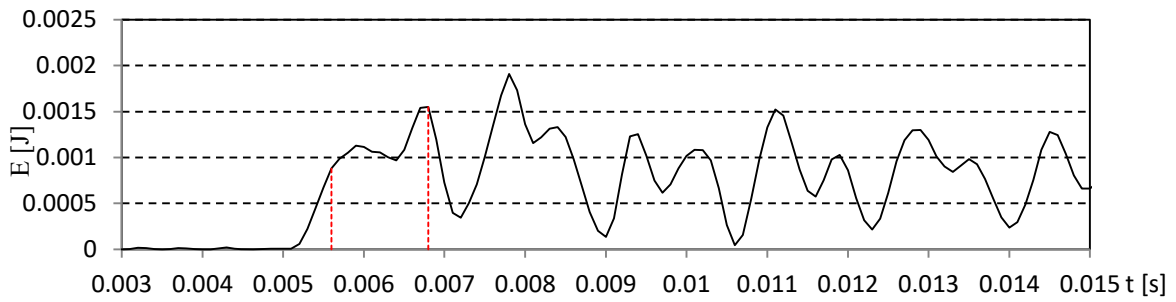


(c) ひずみの鉛直分布

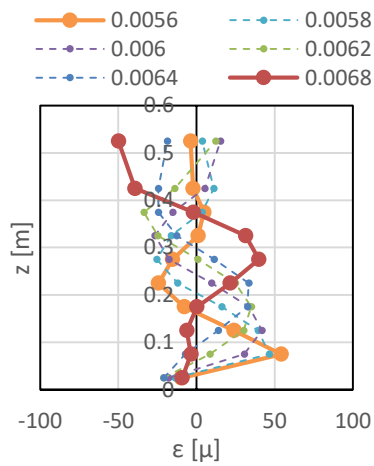
図-4.23 気中衝突試験結果 (TypeF, 衝突高さ 15.0cm, 衝突速度 1.7m/s)



(a) ひずみ時系列

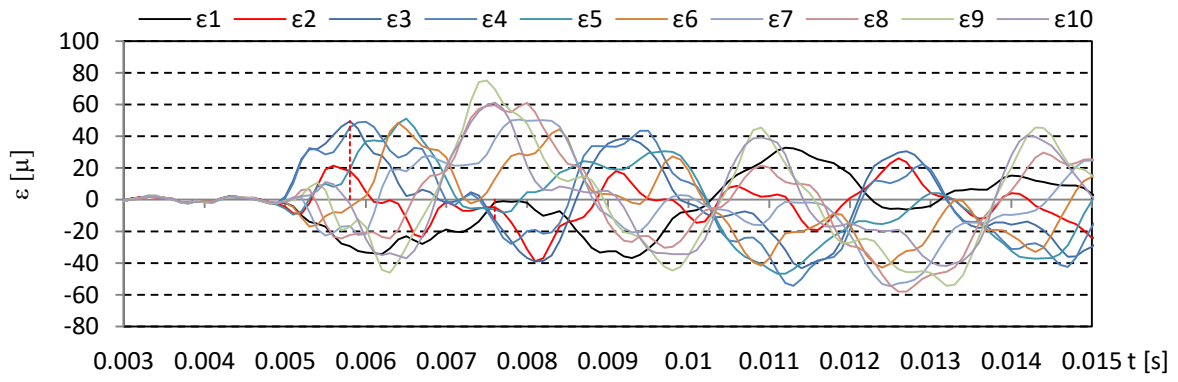


(b) ひずみエネルギー時系列

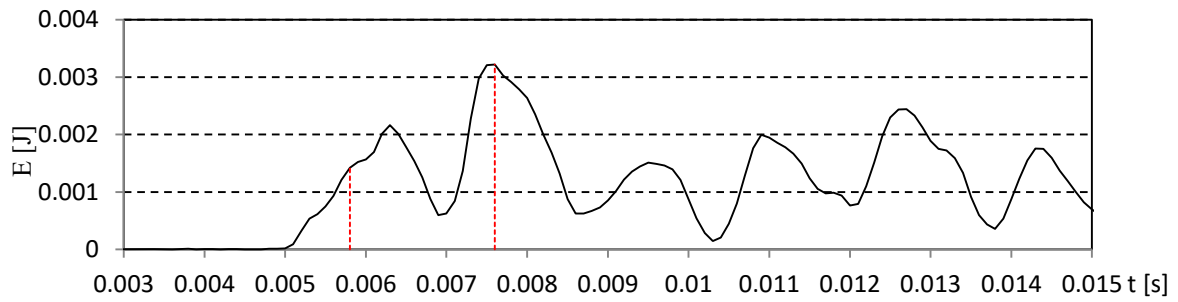


(c) ひずみの鉛直分布

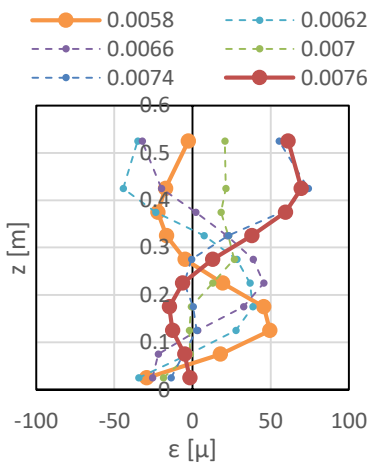
図- 4.24 気中衝突試験結果 (TypeF, 衝突高さ 7.5cm, 衝突速度 0.6m/s)



(a) ひずみ時系列

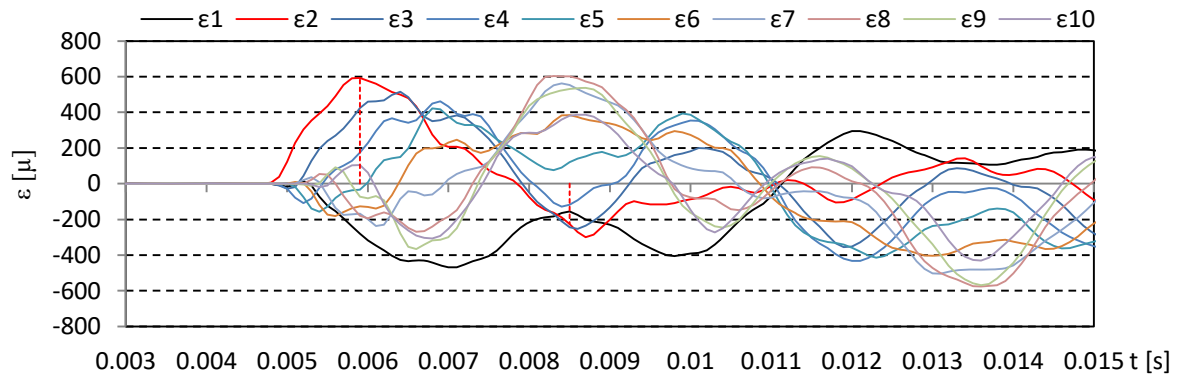


(b) ひずみエネルギー時系列

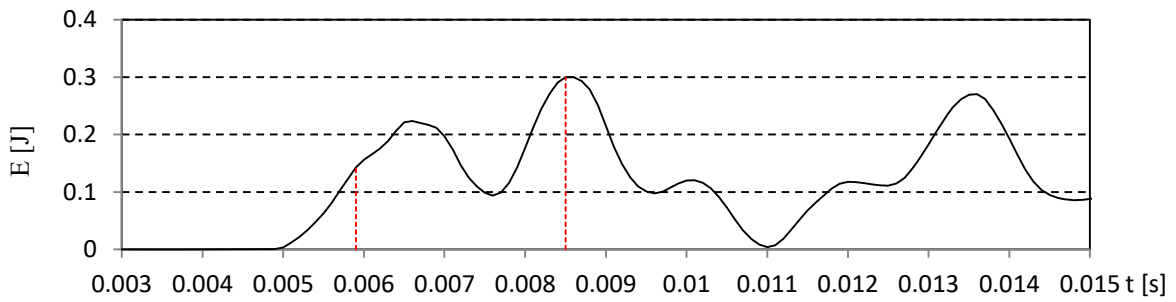


(c) ひずみの鉛直分布

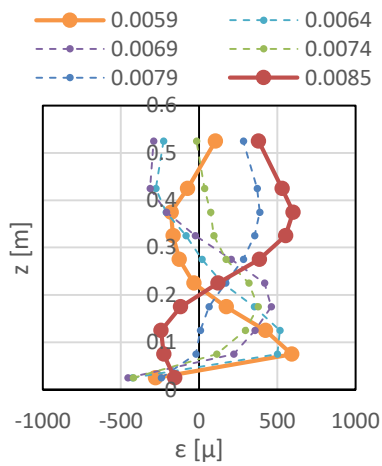
図- 4.25 気中衝突試験結果 (TypeF, 衝突高さ 15.0cm, 衝突速度 0.6m/s)



(a) ひずみ時系列

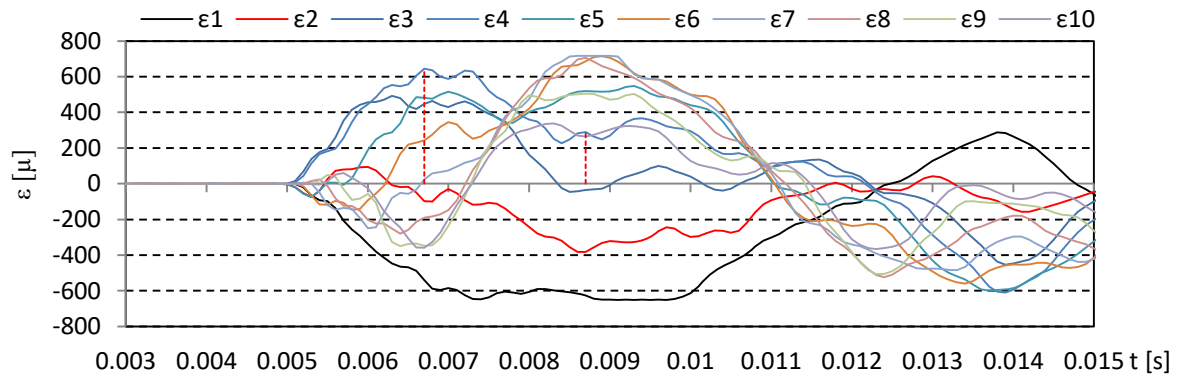


(b) ひずみエネルギー時系列

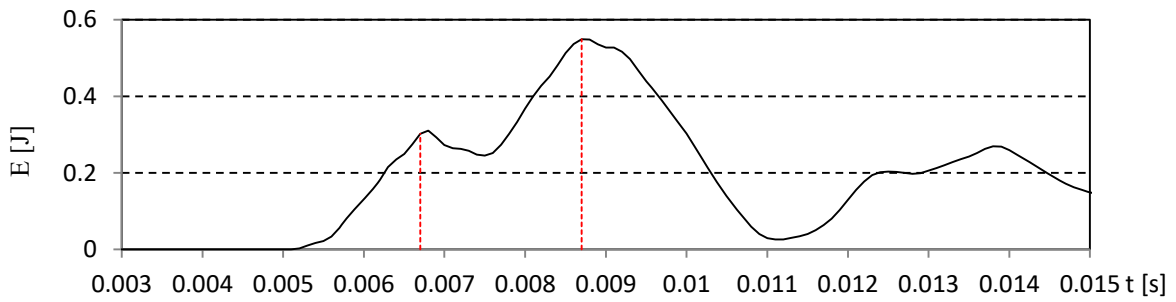


(c) ひずみの鉛直分布

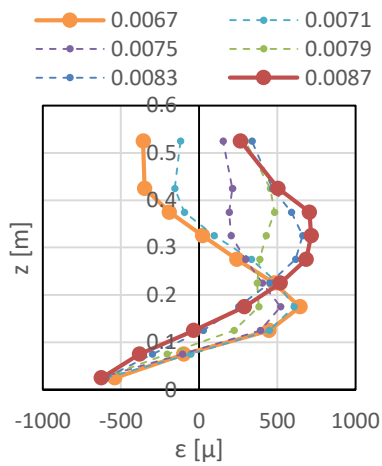
図- 4.26 気中衝突試験結果 (TypeG, 衝突高さ 7.5cm, 衝突速度 1.7m/s)



(a) ひずみ時系列

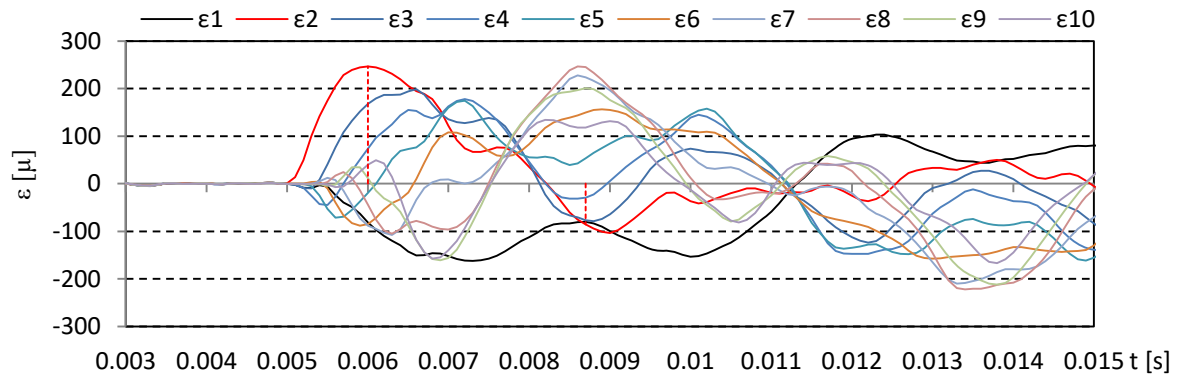


(b) ひずみエネルギー時系列

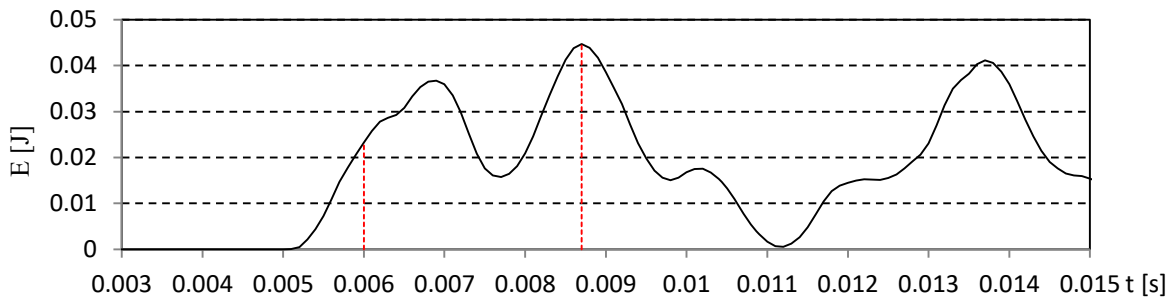


(c) ひずみの鉛直分布

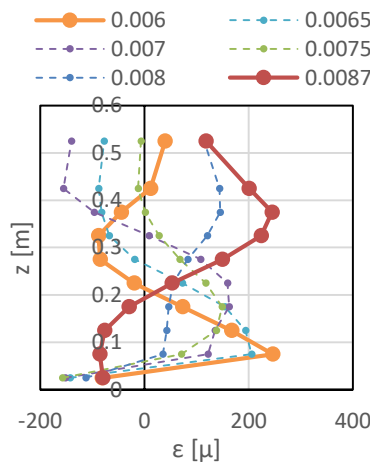
図- 4.27 気中衝突試験結果 (TypeG, 衝突高さ 15.0cm, 衝突速度 1.7m/s)



(a) ひずみ時系列

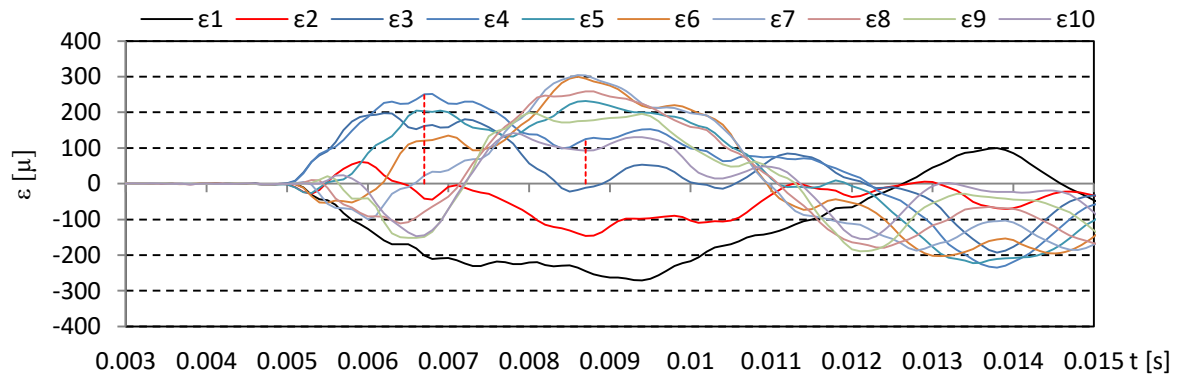


(b) ひずみエネルギー時系列

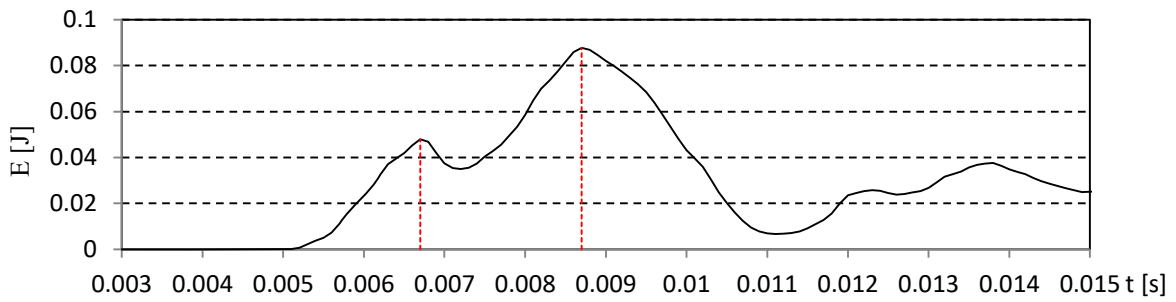


(c) ひずみの鉛直分布

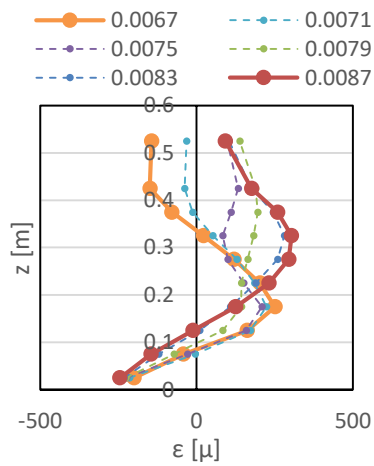
図- 4.28 気中衝突試験結果 (TypeG, 衝突高さ 7.5cm, 衝突速度 0.6m/s)



(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 (TypeG, 衝突高さ 15.0cm, 衝突速度 0.6m/s)

4.1.2. 衝突高さ，衝突速度および衝突時間

図-4.30~図-4.36 に，各衝突高さにおいて生じた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．これによると，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ケースによって異なるが，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倍となっていることが分かる．

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，防潮堤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が，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．堤体の剛性が相対的に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発生せず，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一定となる衝突高さ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 ，衝突時間 Δt を示した．このうち衝突時間に関しては，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 Δt_E と，衝突した瞬間から衝突位置のひずみが最大となるまでの時間 Δt_I の2種類を示した．

図-4.37，図-4.38に，図-4.30~図-4.36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 で無次元化したエネルギー伝達率 E/W としたものを示す．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．

$$\frac{E}{W} = \xi \alpha \quad (4.2)$$

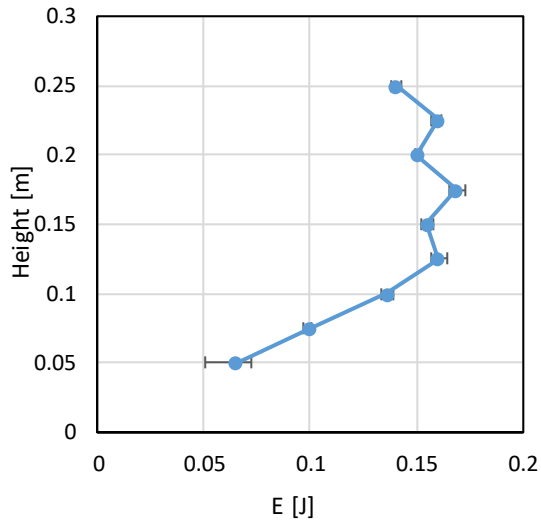
ここで， α ：漂流物と堤体の剛性や質量により決まるエネルギー伝達係数（表-4.1の E/W ）， ξ ： E/W の高さ方向の分布を表す関数である． ξ は図-4.37，図-4.38に破線で示す以下の式とした．

$$\xi = \min(ah^n, 1) \quad (4.3)$$

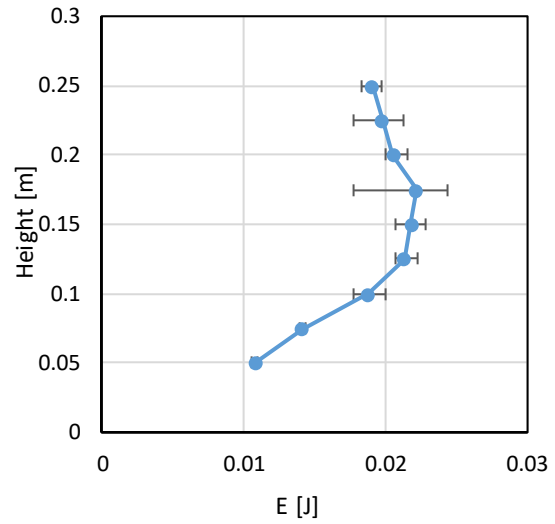
で， h ：衝突高さであり，各ケースにおける a, n の値を表-4.2に示す．なお，ここに示した値は，後述するように衝突速度は波速と同程度であり，波速は1.5~2.0m/s程度であるため，これに近い衝突速度である1.7m/sのケースに基づいて設定した．また，本式は後述の水中衝突試験において気中衝突試験の結果との比較に用いるため，試験結果を近似出来る関数として定めたものであり物理的な根拠に基づくものではなく，試験装置の物性等によっても異なるため，汎用性はない．

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。

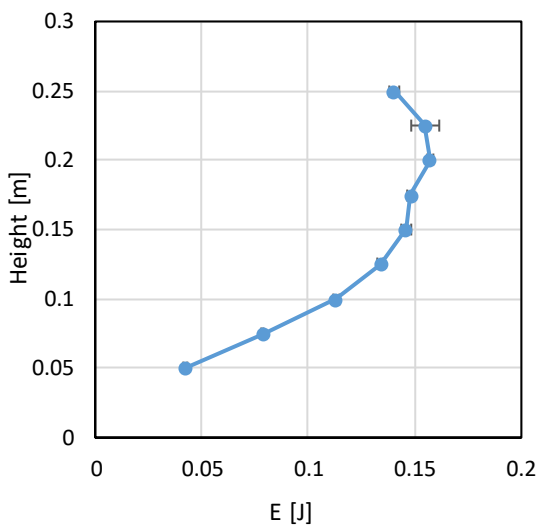


(a) 衝突速度 1.7m/s

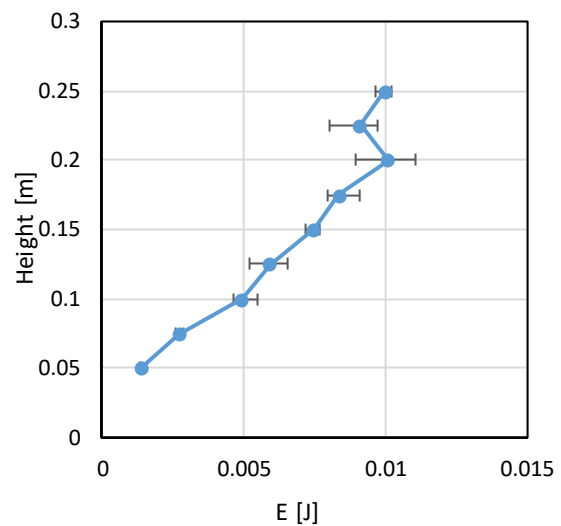


(b) 衝突速度 0.6m/s

図- 4.30 衝突高さといずみエネルギーの関係 (TypeA)

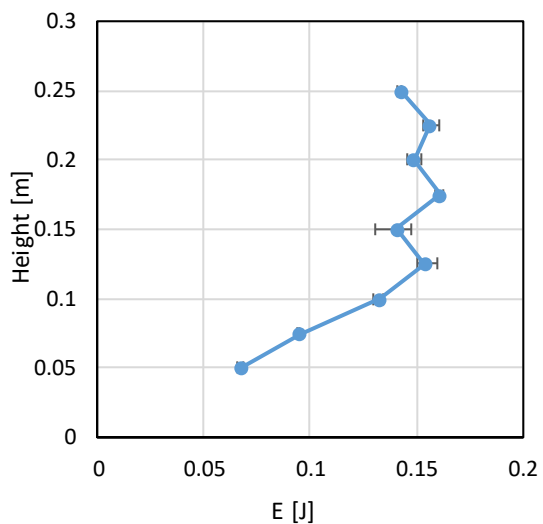


(a) 衝突速度 1.7m/s

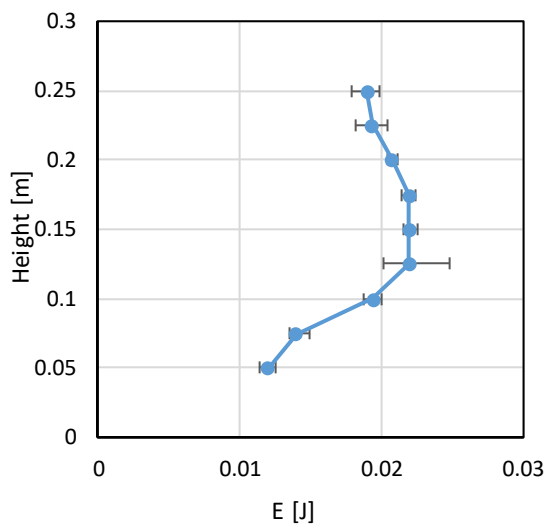


(b) 衝突速度 0.6m/s

図- 4.31 衝突高さといずみエネルギーの関係 (TypeB)

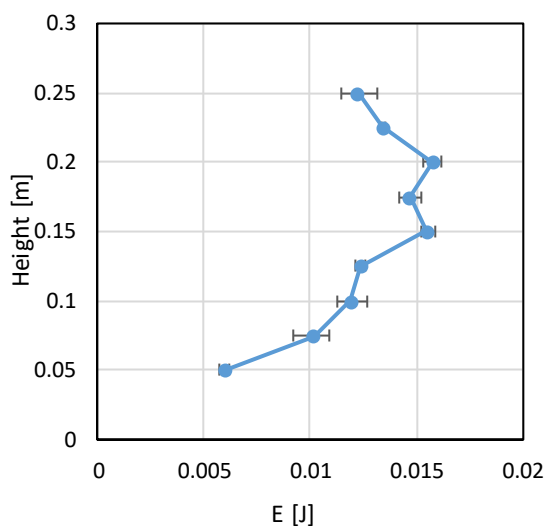


(a) 衝突速度 1.7m/s

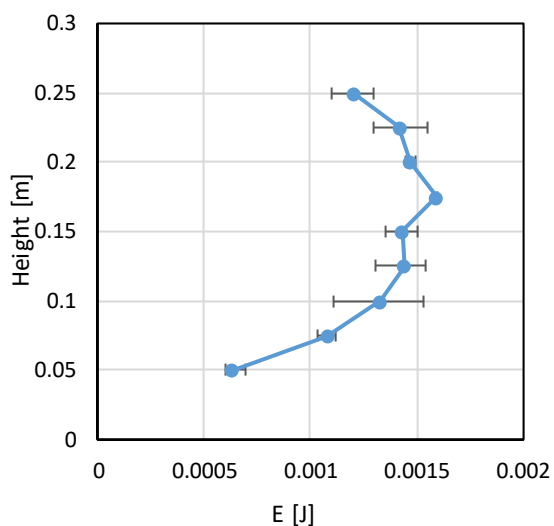


(b) 衝突速度 0.6m/s

図- 4.32 衝突高さといずみエネルギーの関係 (TypeC)

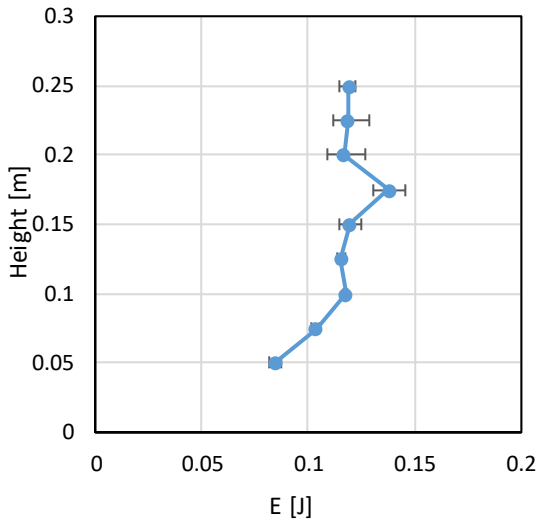


(a) 衝突速度 1.7m/s

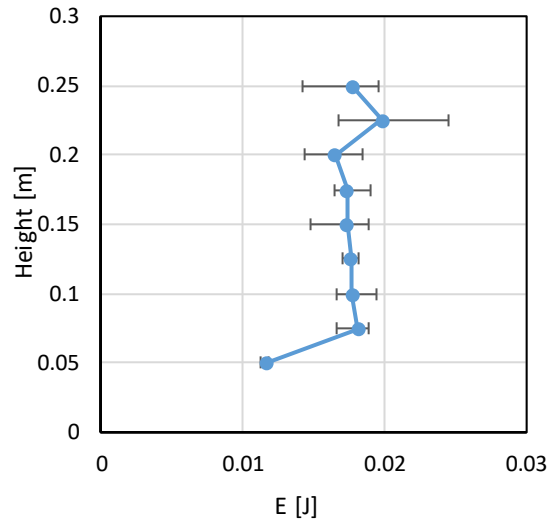


(b) 衝突速度 0.6m/s

図- 4.33 衝突高さといずみエネルギーの関係 (TypeD)

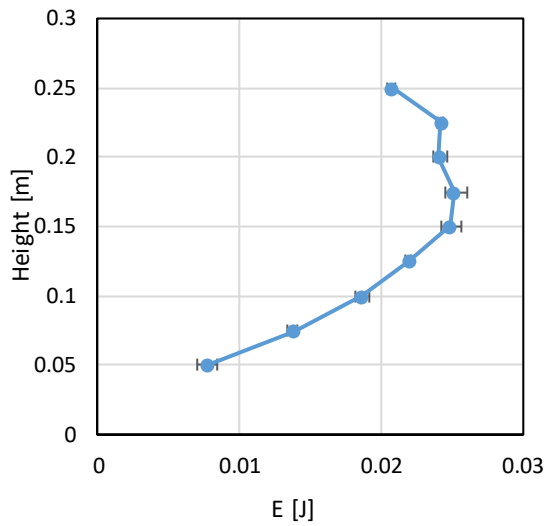


(a) 衝突速度 1.7m/s

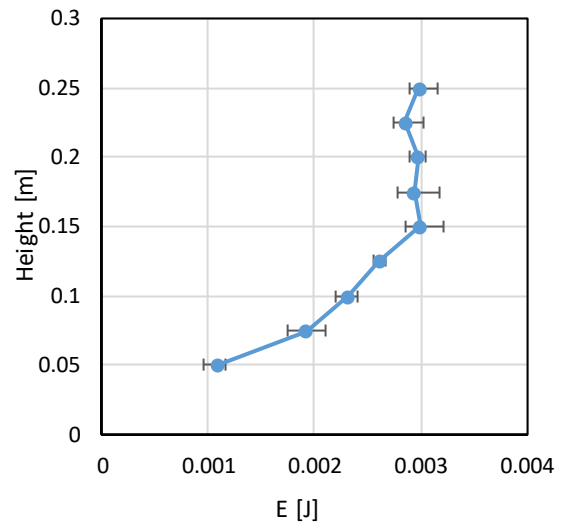


(b) 衝突速度 0.6m/s

図- 4.34 衝突高さといずみエネルギーの関係 (TypeE)

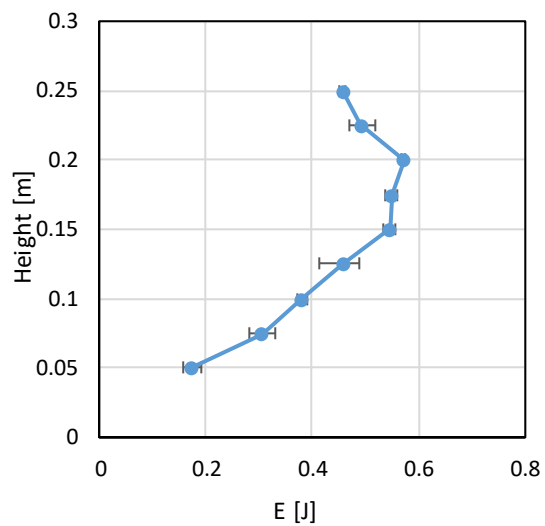


(a) 衝突速度 1.7m/s

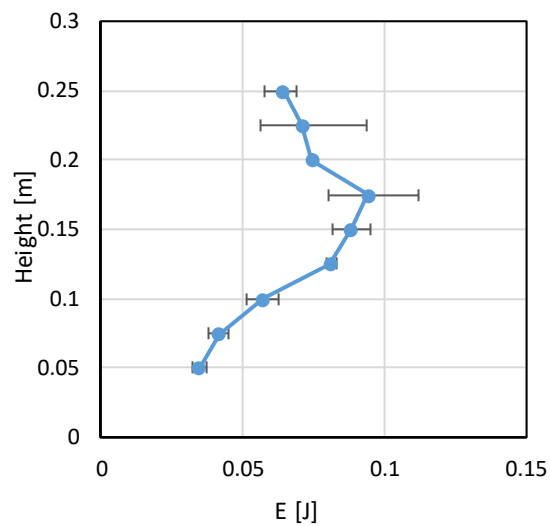


(b) 衝突速度 0.6m/s

図- 4.35 衝突高さといずみエネルギーの関係 (TypeF)



(a) 衝突速度 1.7m/s

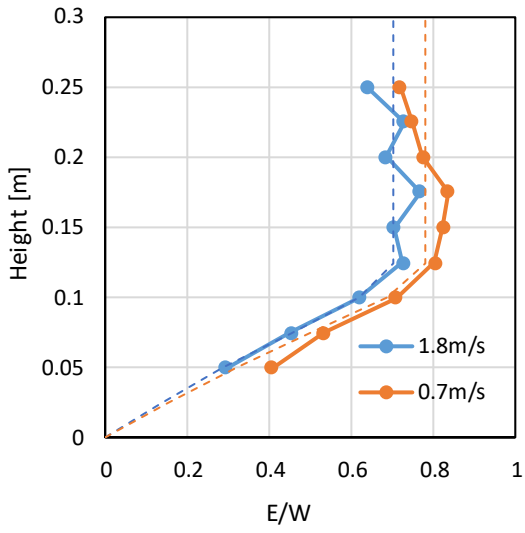


(b) 衝突速度 0.6m/s

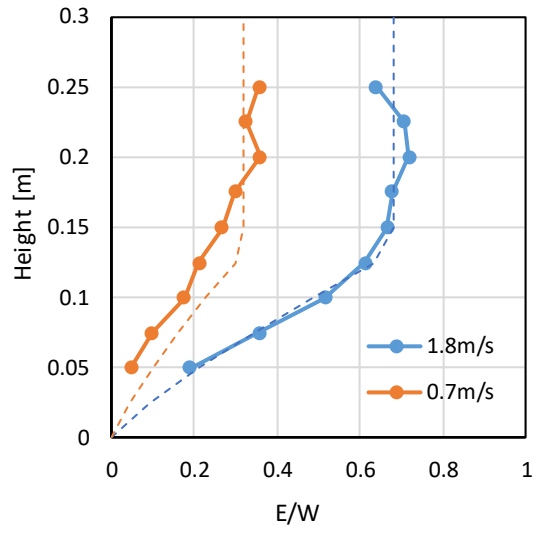
図-4.36 衝突高さといずみエネルギーの関係 (TypeG)

表- 4.1 ひずみ計測によるひずみエネルギーの計測結果と運動エネルギー

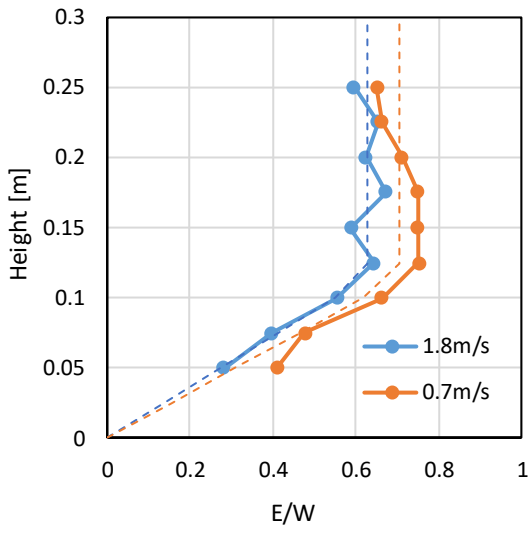
	質量 [g]	速度 [m/s]	W [J]	E [J]	E/W	Δt_E [s]	Δt_I [s]
TypeA	153.7	1.695	0.221	0.155	0.70	0.0030	0.0010
		0.588	0.027	0.021	0.78	0.0030	0.0009
TypeB	152.8	1.695	0.219	0.149	0.68	0.0038	0.0018
		0.606	0.028	0.009	0.32	0.0050	0.0039
TypeC	155.3	1.754	0.239	0.150	0.63	0.0030	0.0011
		0.613	0.029	0.021	0.71	0.0030	0.0009
TypeD	31.1	1.639	0.042	0.014	0.34	0.0026	0.0008
		0.565	0.005	0.001	0.29	0.0026	0.0008
TypeE	150.1	1.724	0.223	0.121	0.54	0.0029	0.0008
		0.592	0.026	0.018	0.68	0.0030	0.0008
TypeF	44.2	1.667	0.061	0.024	0.39	0.0029	0.0011
		0.595	0.008	0.003	0.38	0.0028	0.0008
TypeG	503	1.667	0.699	0.523	0.75	0.0036	0.0017
		0.610	0.094	0.079	0.84	0.0035	0.0017



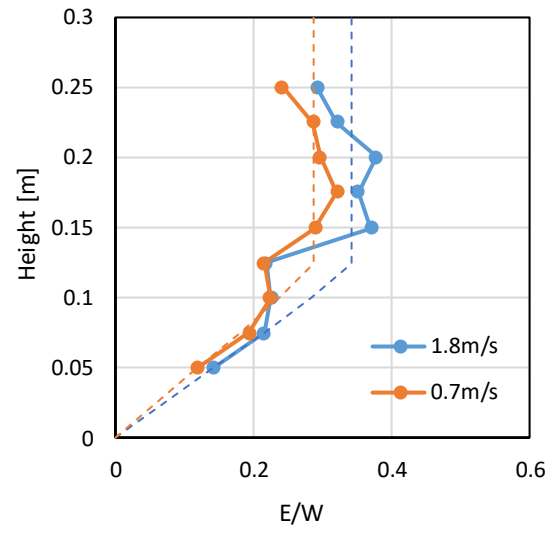
(a) TypeA



(b) TypeB

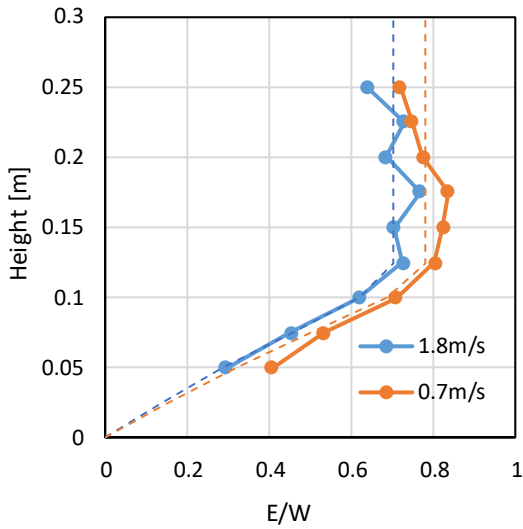


(c) TypeC

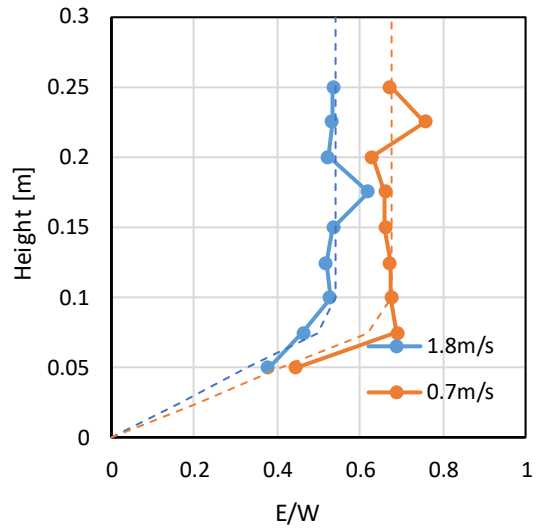


(d) TypeD

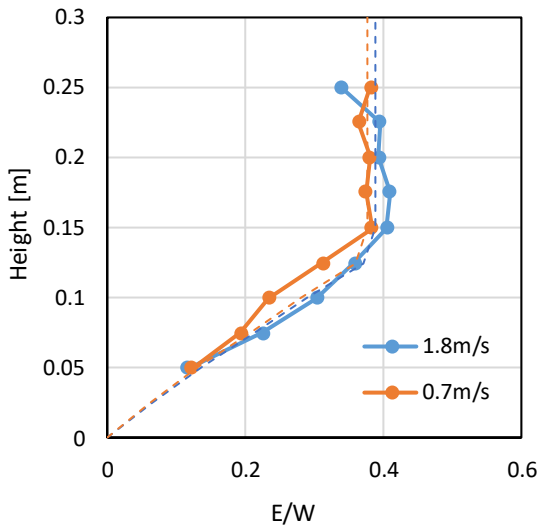
図- 4.37 衝突高さとエネルギー伝達率の関係 (TypeA~TypeD)



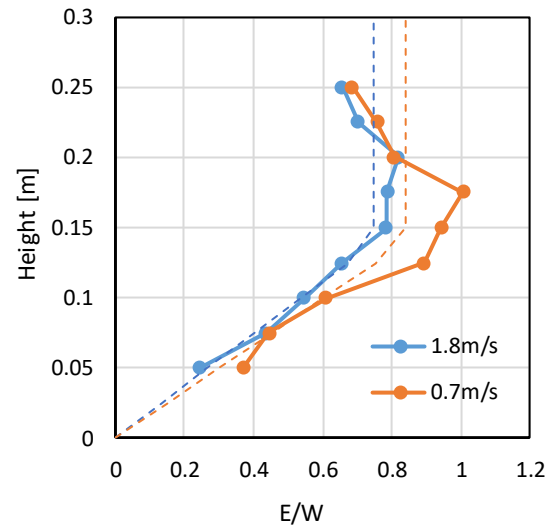
(a) TypeA



(b) TypeE



(c) TypeF



(d) TypeG

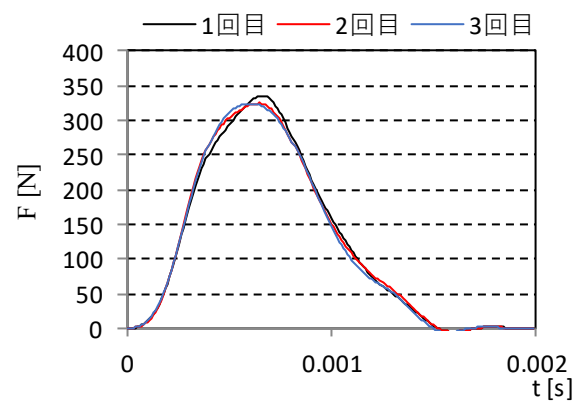
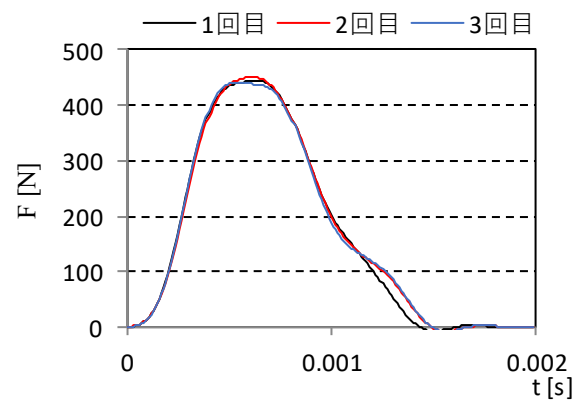
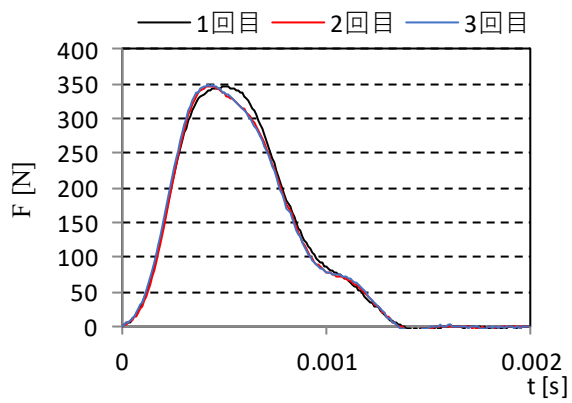
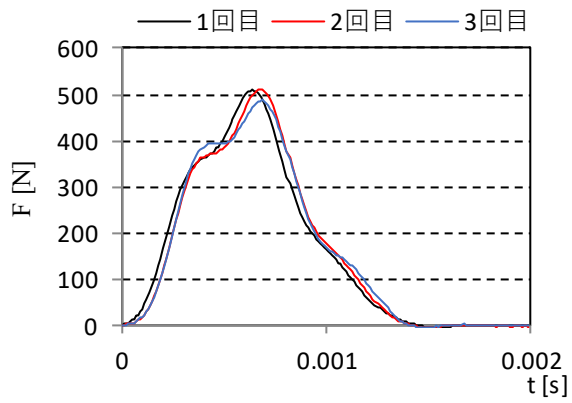
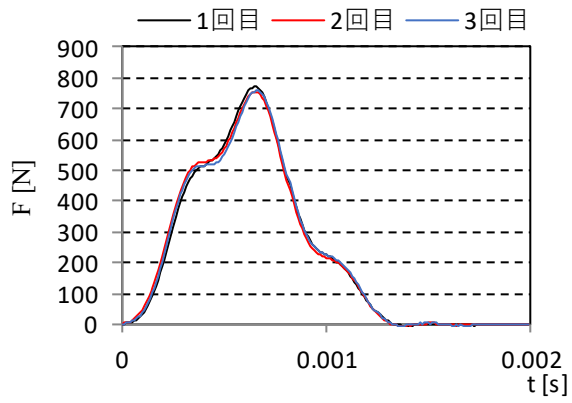
図- 4.38 衝突高さとエネルギー伝達率の関係 (TypeA (再掲) , TypeE~TypeG)

表- 4.2 衝突エネルギーの鉛直分布関数の係数一覧

	TypeA	TypeB	TypeC	TypeD	TypeE	TypeF	TypeG
n	1.1	1.2	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0
a	11.08	11.31	8.74	8.32	12.19	9.40	7.16

4.2. ロードセル計測による気中衝突試験

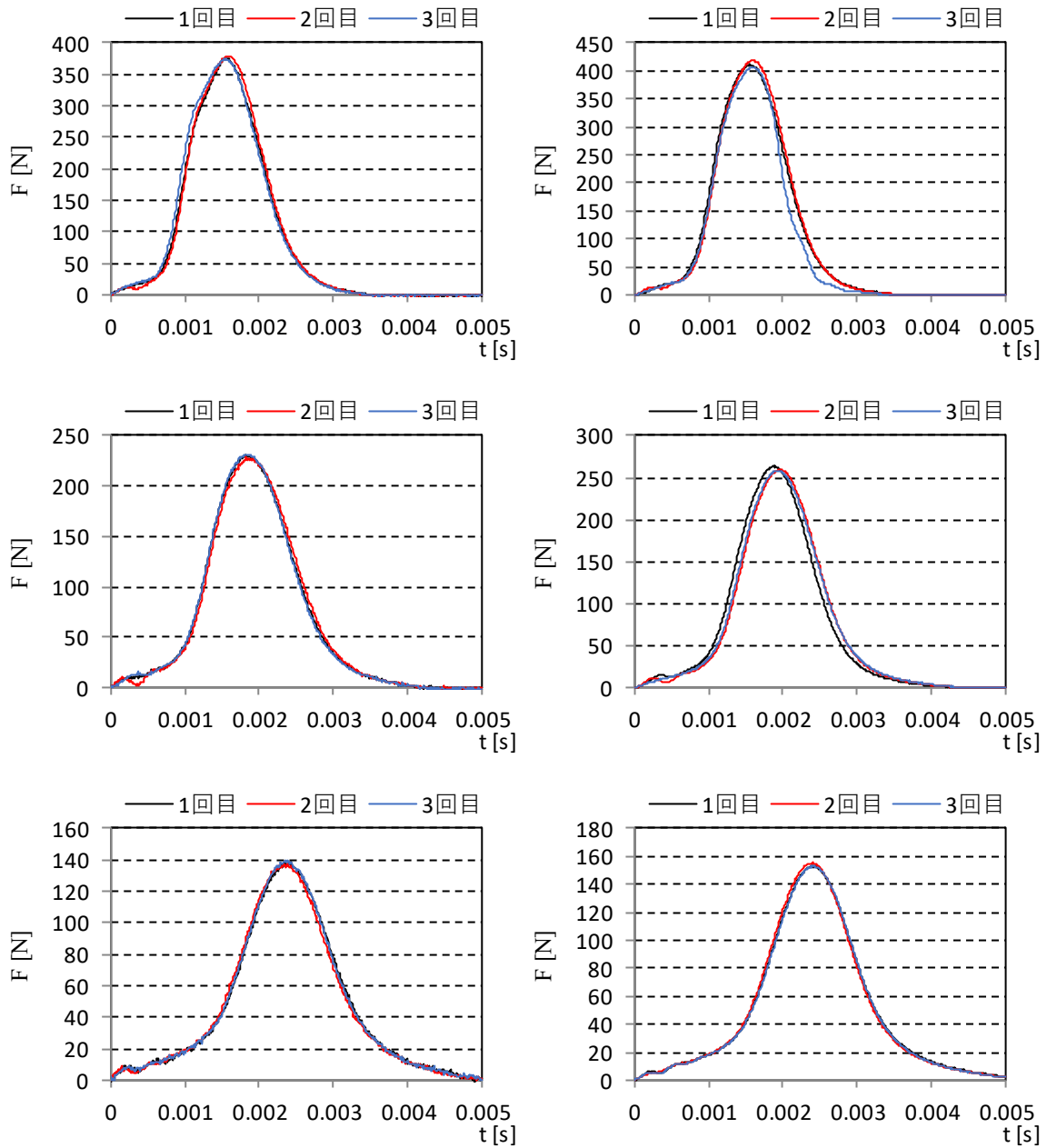
図- 4.39～図- 4.45 に、ロードセルにより計測した、衝突力時系列の計測結果を示す。なお、ロードセル容量 500N による計測では、一部のケースで衝突力がロードセルの容量をオーバーするため実施しておらず、結果の一部が空欄となっている。3 回実施した計測結果を同時に示しているが、3 回の計測でほぼ同じ結果が得られていることが確認できる。



(a) ロードセル容量 2kN

(b) ロードセル容量 500N

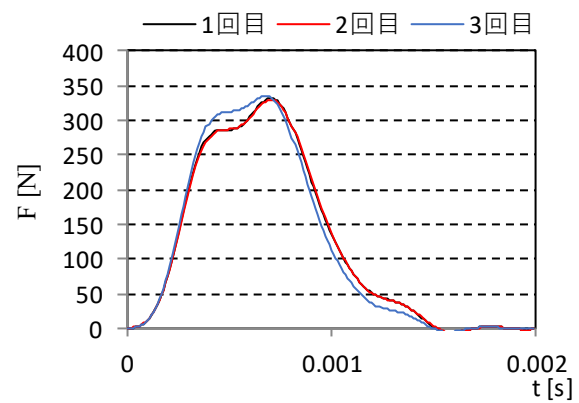
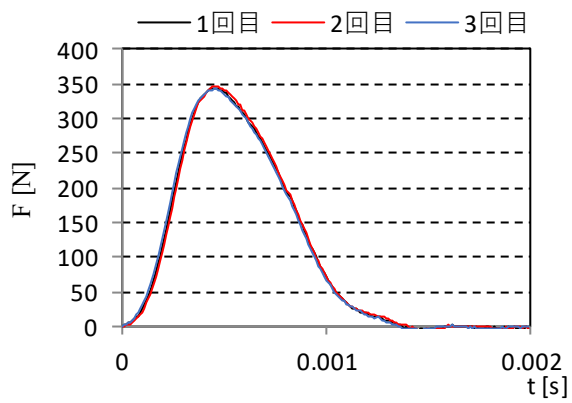
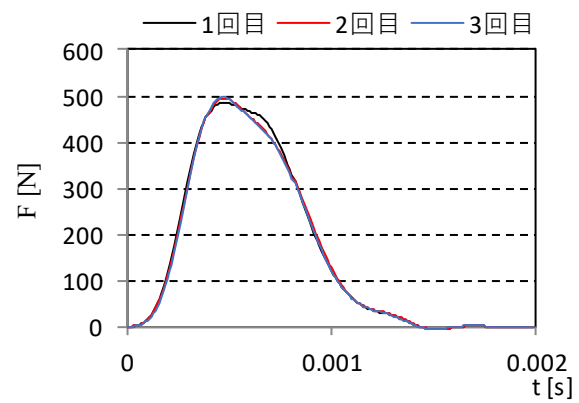
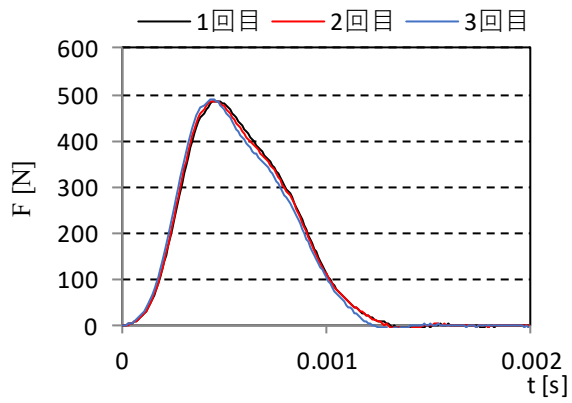
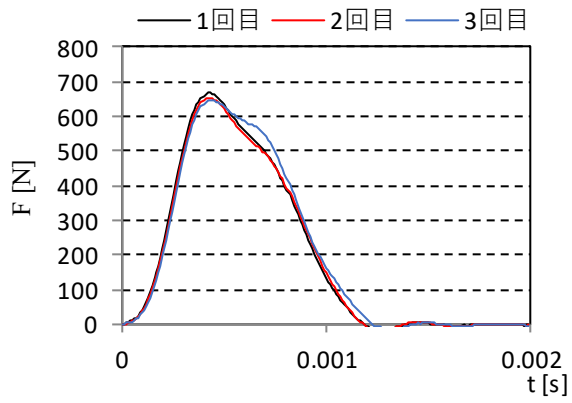
図- 4.39 ロードセルによる衝突力計測結果 (TypeA, 上段:1.9m/s, 中段:1.4m/s, 下段:1.0m/s)



(a) ロードセル容量 2kN

(b) ロードセル容量 500N

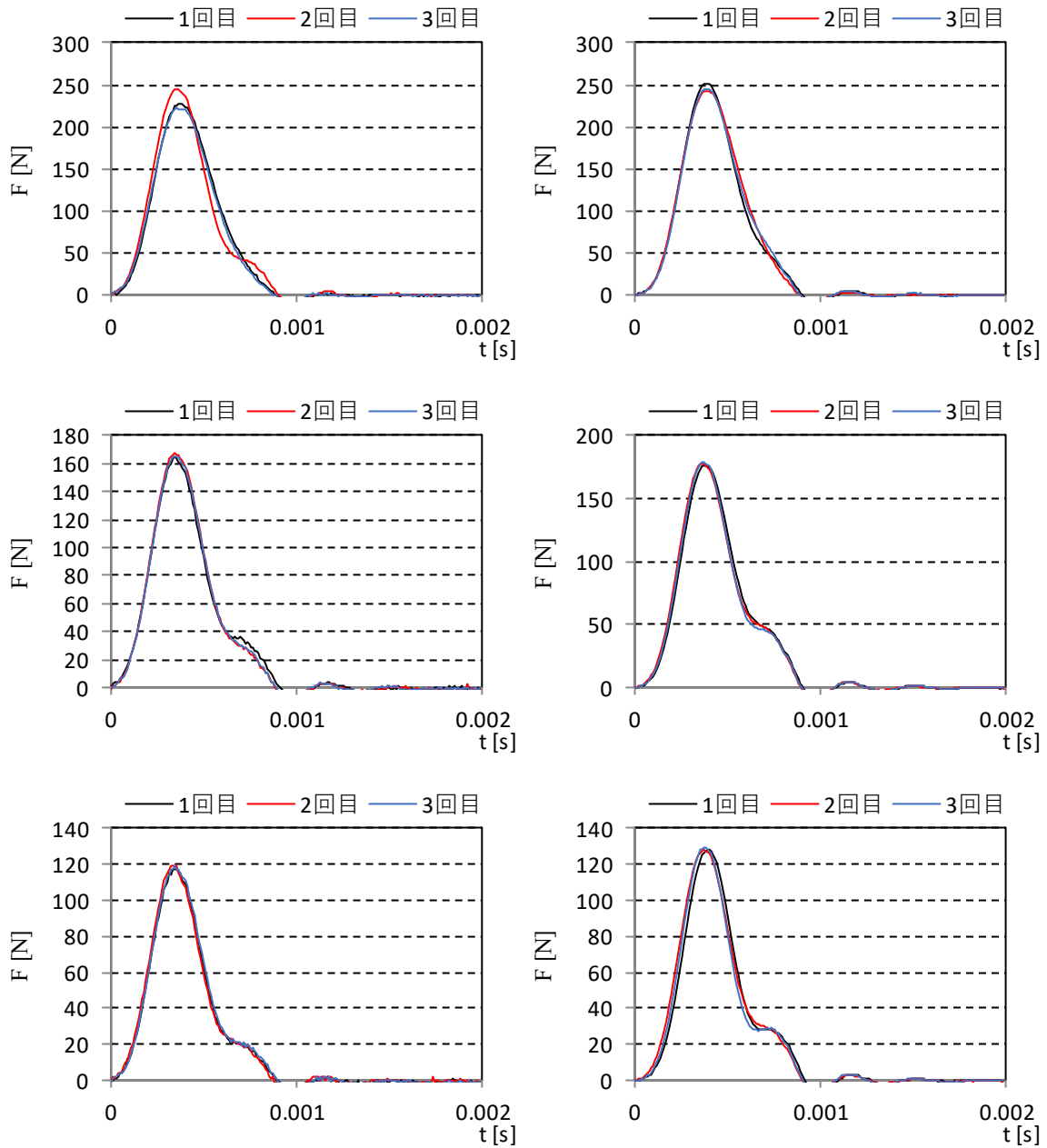
図- 4.40 ロードセルによる衝突力計測結果 (TypeB, 上段:1.9m/s, 中段:1.4m/s, 下段:1.0m/s)



(a) ロードセル容量 2kN

(b) ロードセル容量 500N

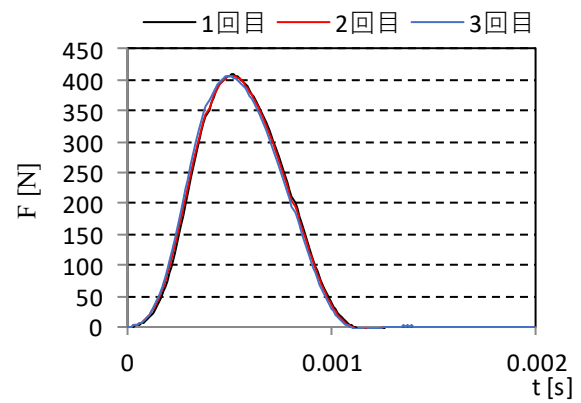
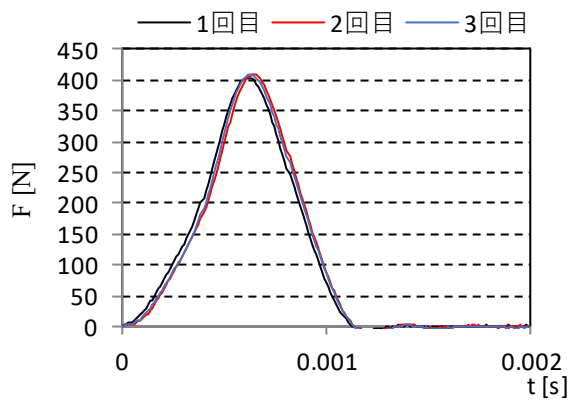
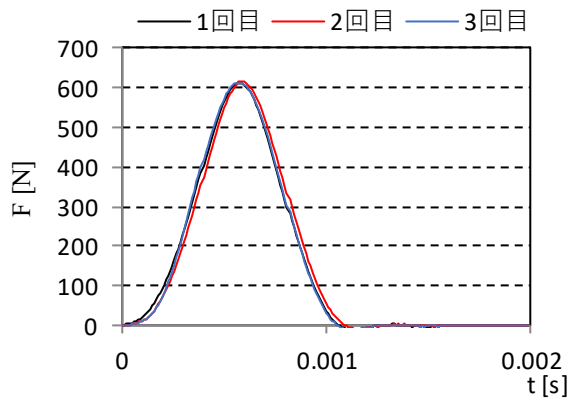
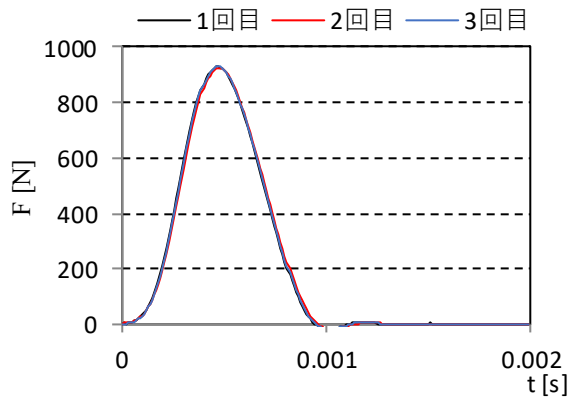
図- 4.41 ロードセルによる衝突力計測結果 (TypeC, 上段:1.9m/s, 中段:1.4m/s, 下段:1.0m/s)



(a) ロードセル容量 2kN

(b) ロードセル容量 500N

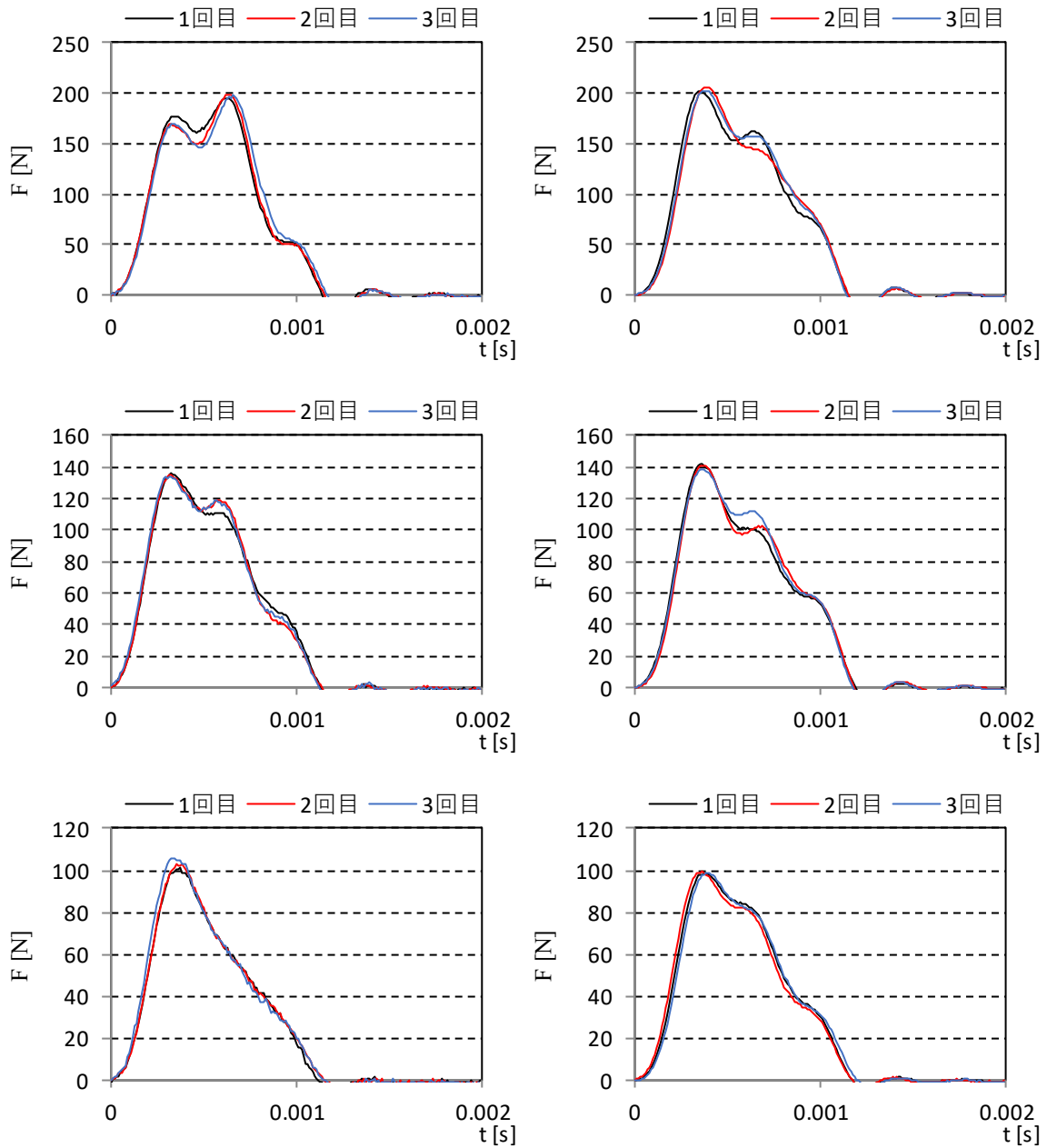
図- 4.42 ロードセルによる衝突力計測結果 (TypeD, 上段:1.9m/s, 中段:1.4m/s, 下段:1.0m/s)



(a) ロードセル容量 2kN

(b) ロードセル容量 500N

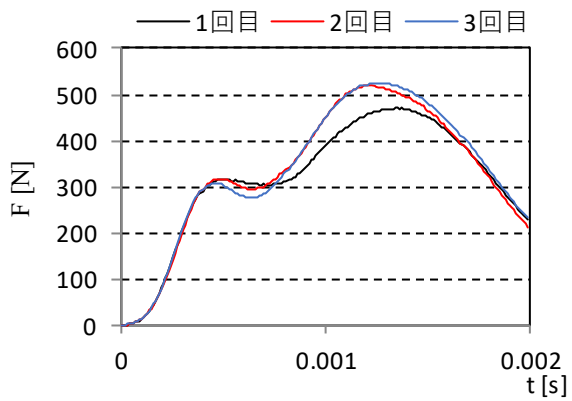
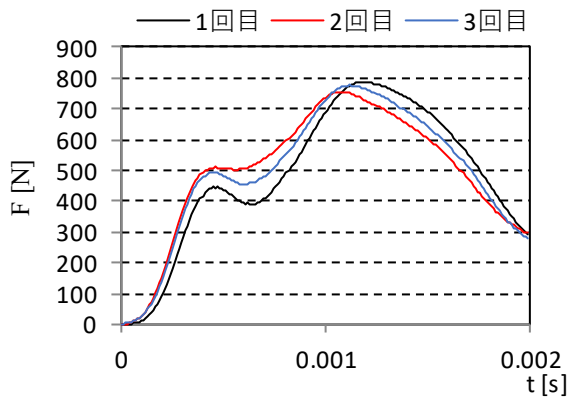
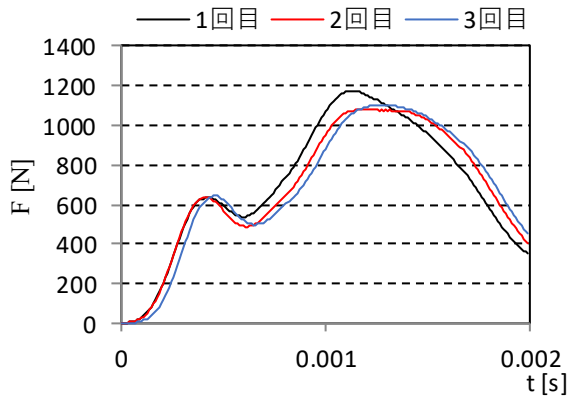
図- 4.43 ロードセルによる衝突力計測結果 (TypeE, 上段:1.9m/s, 中段:1.4m/s, 下段:1.0m/s)



(a) ロードセル容量 2kN

(b) ロードセル容量 500N

図- 4.44 ロードセルによる衝突力計測結果 (TypeF, 上段:1.9m/s, 中段:1.4m/s, 下段:1.0m/s)



(a) ロードセル容量 2kN

(b) ロードセル容量 500N

図- 4.45 ロードセルによる衝突力計測結果 (TypeG, 上段:1.9m/s, 中段:1.4m/s, 下段:1.0m/s)

表-4.3 ロードセルによる衝突力計測結果と運動量

		ロードセル容量			2KN			500N		
	質量 [kg]	速度 [m/s]	MV	F _{2kN} [N]	F _{2kN} /MV [1/s]	Δ t _{2kN} [N]	F _{500N} [N]	F _{500N} /MV[1/s]	Δ t _{500N} [N]	
TypeA	0.154	1.957	0.301	763	2531	0.00066	-	-	-	
		1.416	0.218	504	2310	0.00067	445	2042	0.00059	
		0.976	0.150	347	2307	0.00046	328	2184	0.00064	
		平均	/	/	2382	0.00060	/	2113	0.00061	
TypeB	0.153	1.888	0.289	376	1303	0.00155	412	1426	0.00158	
		1.335	0.204	230	1127	0.00183	260	1274	0.00191	
		0.941	0.144	112	778	0.00199	117	809	0.00199	
		平均	/	/	1069	0.00179	/	1170	0.00183	
TypeC	0.155	1.904	0.295	655	2221	0.00043	-	-	-	
		1.347	0.209	487	2333	0.00045	493	2360	0.00047	
		0.952	0.148	345	2338	0.00045	332	2253	0.00070	
		平均	/	/	2297	0.00044	/	2307	0.00059	
TypeD	0.031	1.869	0.058	232	4003	0.00037	247	4255	0.00039	
		1.318	0.041	166	4064	0.00035	178	4353	0.00038	
		0.940	0.029	119	4072	0.00034	129	4410	0.00039	
		平均	/	/	4047	0.00035	/	4339	0.00039	
TypeE	0.150	1.976	0.296	928	3132	0.00047	-	-	-	
		1.413	0.212	614	2895	0.00058	-	-	-	
		0.971	0.146	408	2800	0.00063	407	2795	0.00051	
		平均	/	/	2942	0.00056	/	2795	0.00051	
TypeF	0.044	1.857	0.082	197	2416	0.00064	203	2491	0.00038	
		1.318	0.058	135	2333	0.00032	141	2425	0.00037	
		0.921	0.041	104	2557	0.00036	99	2441	0.00038	
		平均	/	/	2435	0.00044	/	2452	0.00037	
TypeG	0.503	1.922	0.967	1118	1157	0.00120	-	-	-	
		1.394	0.701	774	1104	0.00112	-	-	-	
		0.970	0.488	522	1070	0.00122	-	-	-	
		平均	/	/	1110	0.00118	/	-	-	

4.3. 模型の剛性試験

模型の剛性を確認するため、載荷試験機により荷重-変位関係を求めた。図-4.46 は漂流物模型の軸剛性を、図-4.47 はロードセルの剛性を計測した結果である。試験は、漂流物模型は変位速度 0.1mm/min, ロードセルは 0.05mm/min の定ひずみ載荷で実施した。これらによると、TypeB の漂流物模型を除き、ほぼ線形剛性が成り立っていることが分かる。ただし、載荷開始直後は、載荷面と模型の当たりの影響等と考えられる非直線的な関係が見られるため、ここではある程度載荷が進んだ後の直線関係部分について、傾きを算出した。漂流物模型の軸剛性 k_d' とロードセルの剛性 k_d について、結果を表-4.4、図-4.48 に示す。なお、ロードセルについては気中衝突試験の全ケースを実施した容量 2kN のロードセルの結果を示した。

漂流物模型とロードセルの剛性を比較すると、ロードセルの方が 1 オーダー大きくなっている。固有周期に関わる振動の対象となる質量についても、ロードセルの方が小さいと考えられるため、固有周期はロードセルの方が十分に短いことが分かる。

各漂流物模型の剛性を比較すると、質量の同じ TypeA, TypeC, TypeE が同程度で、質量の小さい TypeD と TypeF および質量の大きい TypeG が相対的に小さい値となっている。TypeA, TypeC, TypeE の比較から、船体断面積当たりの部材断面積の比が小さくなるほど、軸剛性は小さくなる傾向が読み取れる。TypeD と TypeF の剛性が小さいのは、その他の模型よりも薄い板で製作しているためと考えられる。また、TypeG の剛性が低いのは、断面の部材面積が同じでも、船長が長くなると軸剛性 (N/m) は小さくなることと、部材の圧縮だけでなく構造的な変形も大きくなることが要因と考えられる。

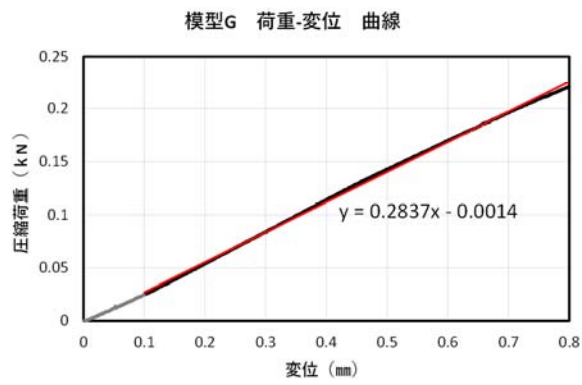
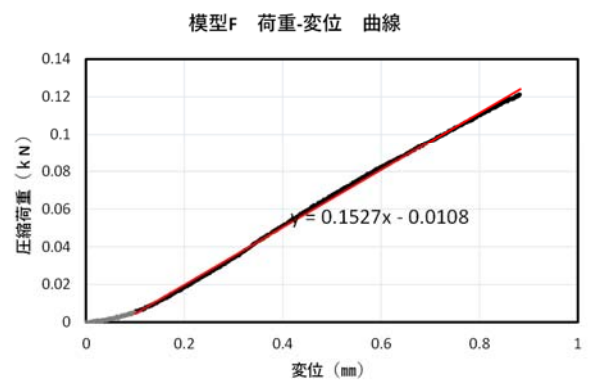
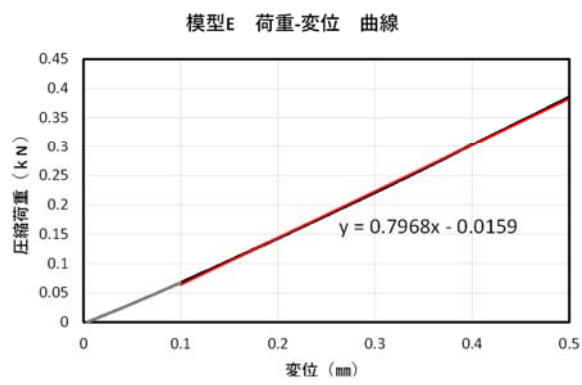
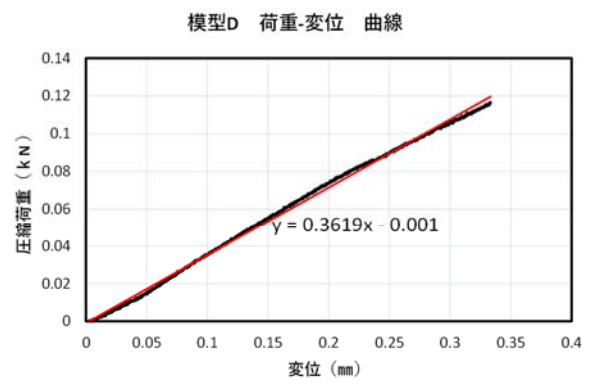
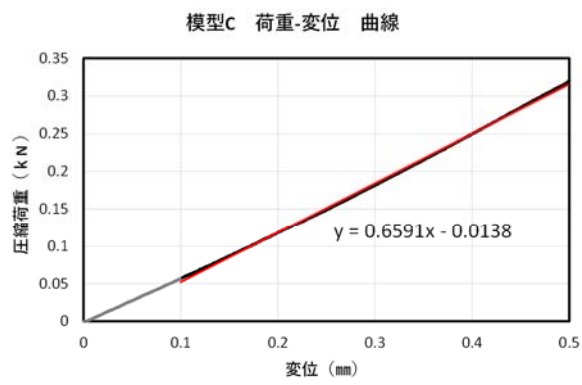
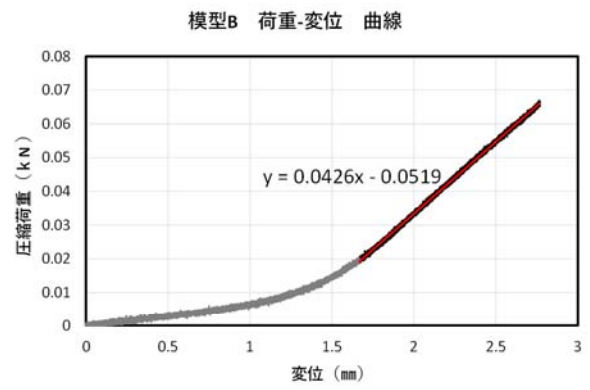
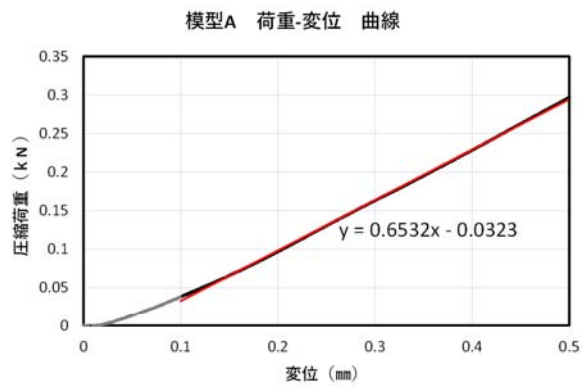


図- 4.46 載荷試験による漂流物模型の荷重-変位関係

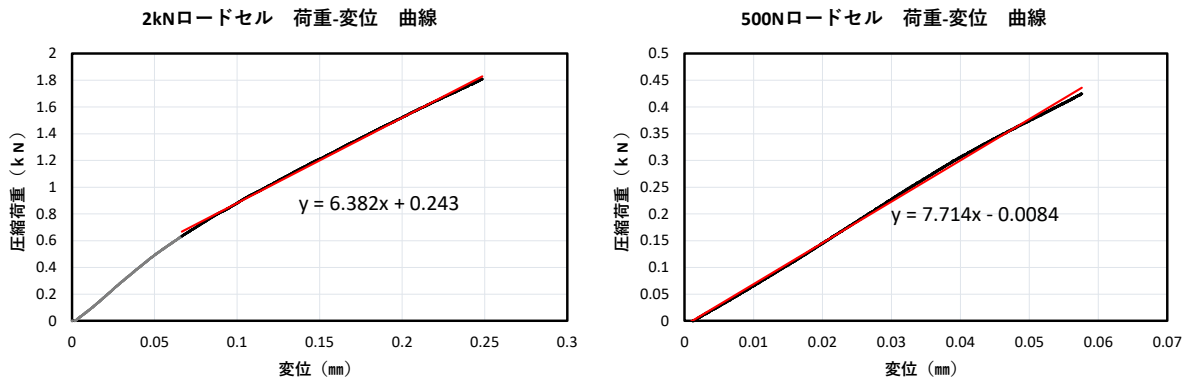


図- 4.47 载荷試験によるロードセルの荷重-変位関係

表- 4.4 漂流物模型の剛性（ばね定数）

	TypeA	TypeB	TypeC	TypeD	TypeE	TypeF	TypeG
M [kg]	0.154	0.153	0.155	0.031	0.150	0.044	0.503
k_d' [N/m]	6.53E+05	4.26E+04	6.59E+05	3.62E+05	7.97E+05	1.53E+05	2.84E+05
k_s [N/m]	6.38E+06						

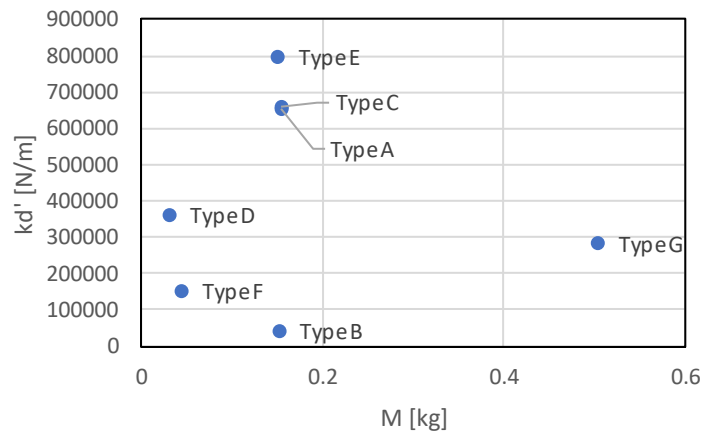


図- 4.48 質量と漂流物模型剛性の関係

5. 波検定結果

5.1. 水位時系列

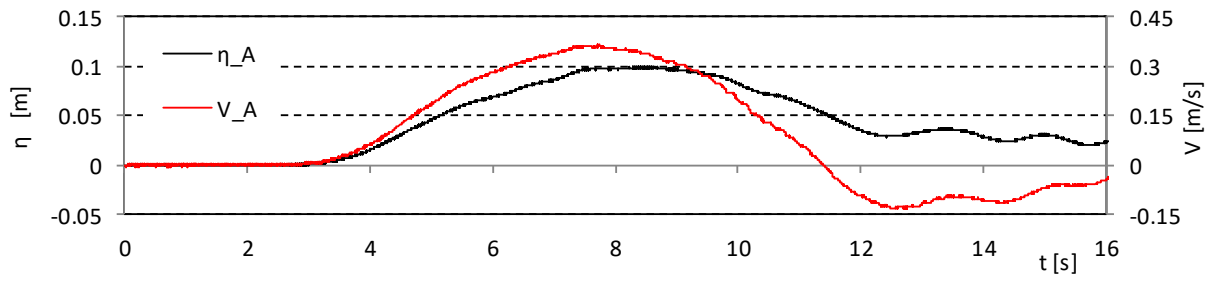
図- 5.1 に、計測点 A における沖波の水位・流速の計測時系列を示す。Wf20 と Wf30 は、水深 $h=0.15\text{m}$ において同じ周期特性で津波高を 0.20m と 0.10m としたものであり、Wf10 は Wf30 と類似の波形を水深 $h=0.10\text{m}$ で造波したものである。なお、ここに示した結果は、3 回の繰り返しでほぼ同じ結果が再現出来ていることを確認して、その平均を示したものである。Wf10 と Wf30 は、沖波では水深が若干異なる程度であるためほぼ同じ波形となっているが、後述するように水深が浅くなると、波形の変化状況に相違が生じてくる。水位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早期に低減し、負の値となっている。これは、海底地形からの反射波成分が到達したためと考えられる。図- 5.1 より、目標波形とほぼ同じ波形が造波出来ていることが確認された。

図- 5.2～図- 5.4 に、計測点 B1～B16 の水位および流速の計測時系列を示す。Wf10 では計測点 B4 から、Wf20 では計測点 B1 から徐々に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、それぞれ B7, B6 付近で砕波して、津波高が若干低下している状況が確認出来る。一方 Wf30 では、波高が小さいために計測点 B4 付近から徐々に分散性の影響が生じているものの、砕波は汀線近傍で生じている。

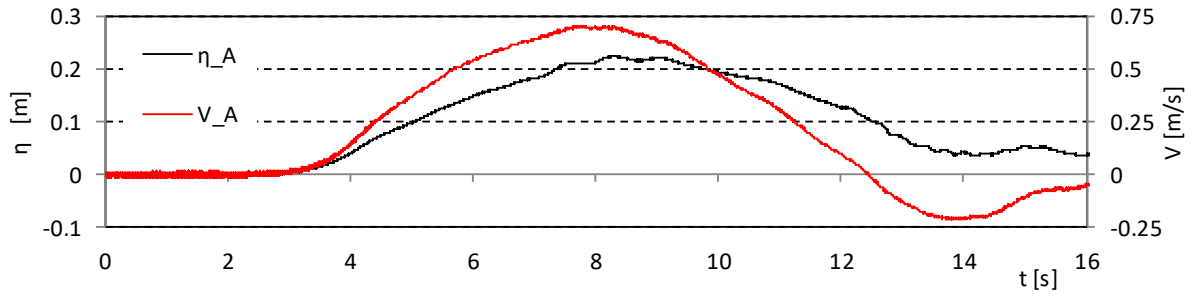
流速の計測結果は、計測点によって大きくは変わらず、水位変化と同様の時系列となっている。線形理論では、津波の流速は

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

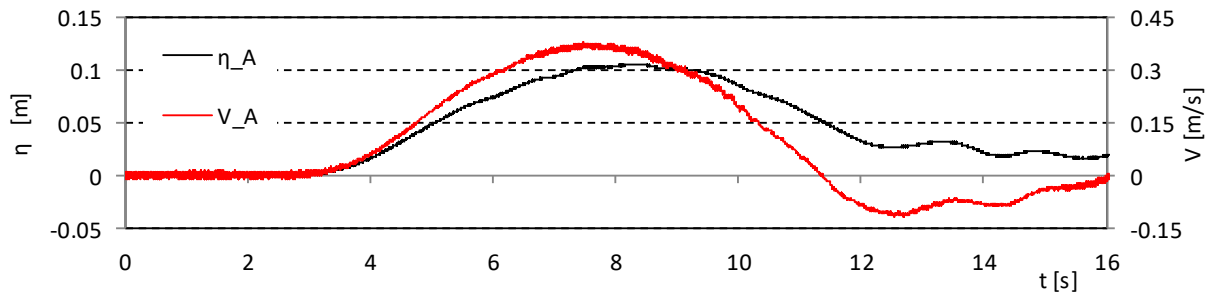
で表される。これによると流速の最大値はそれぞれ 1.0 m/s , 1.6 m/s , 0.8 m/s となるが、図- 5.2～図- 5.4 の流速はこれよりも若干小さく、非線形性の影響が表れていると考えられる。



(a) Wf10



(b) Wf20



(c) Wf30

図- 5.1 入射津波の計測結果 (計測点 A)

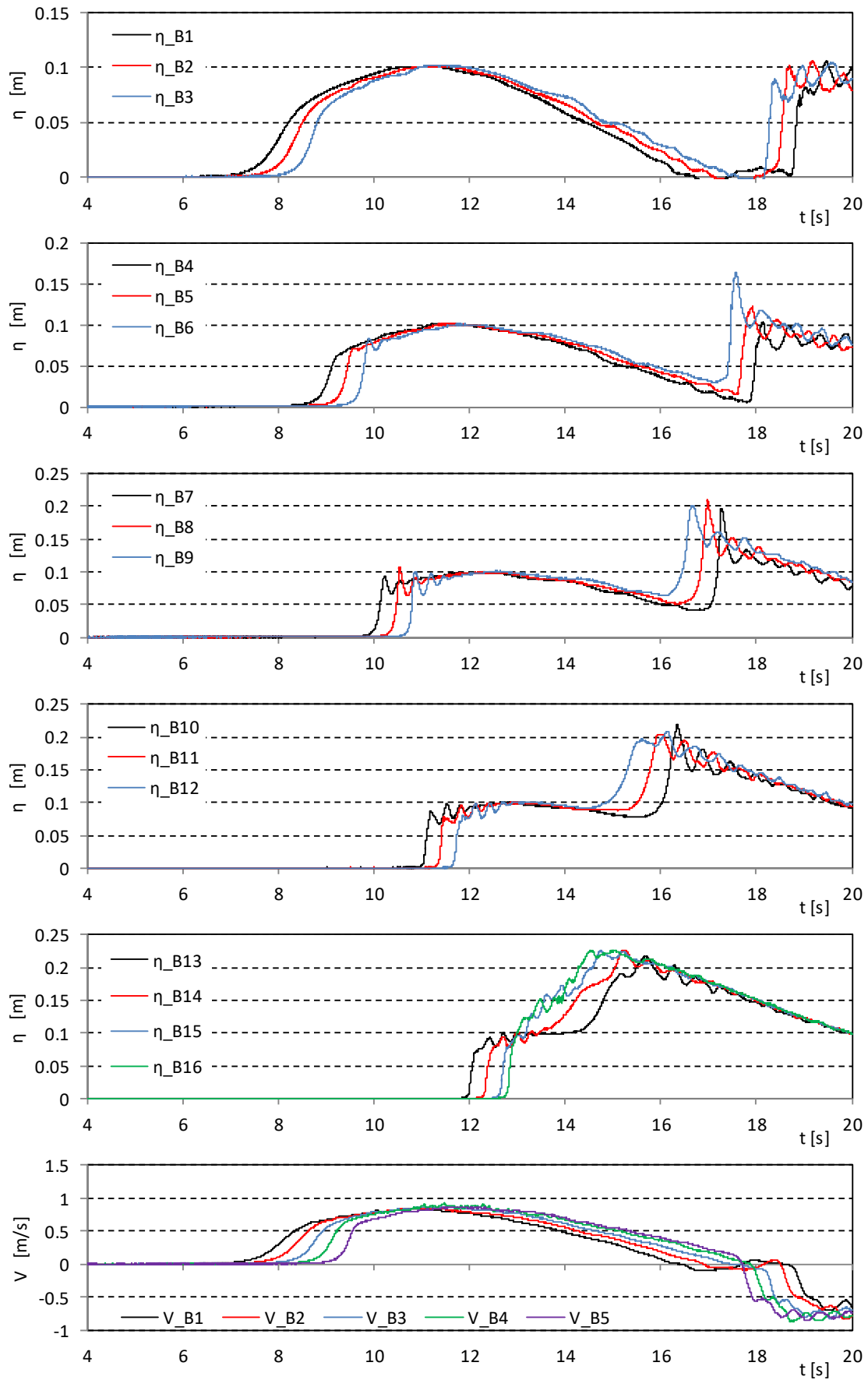


図-5.2 入射波の水位・流速時系列 (Wf10)

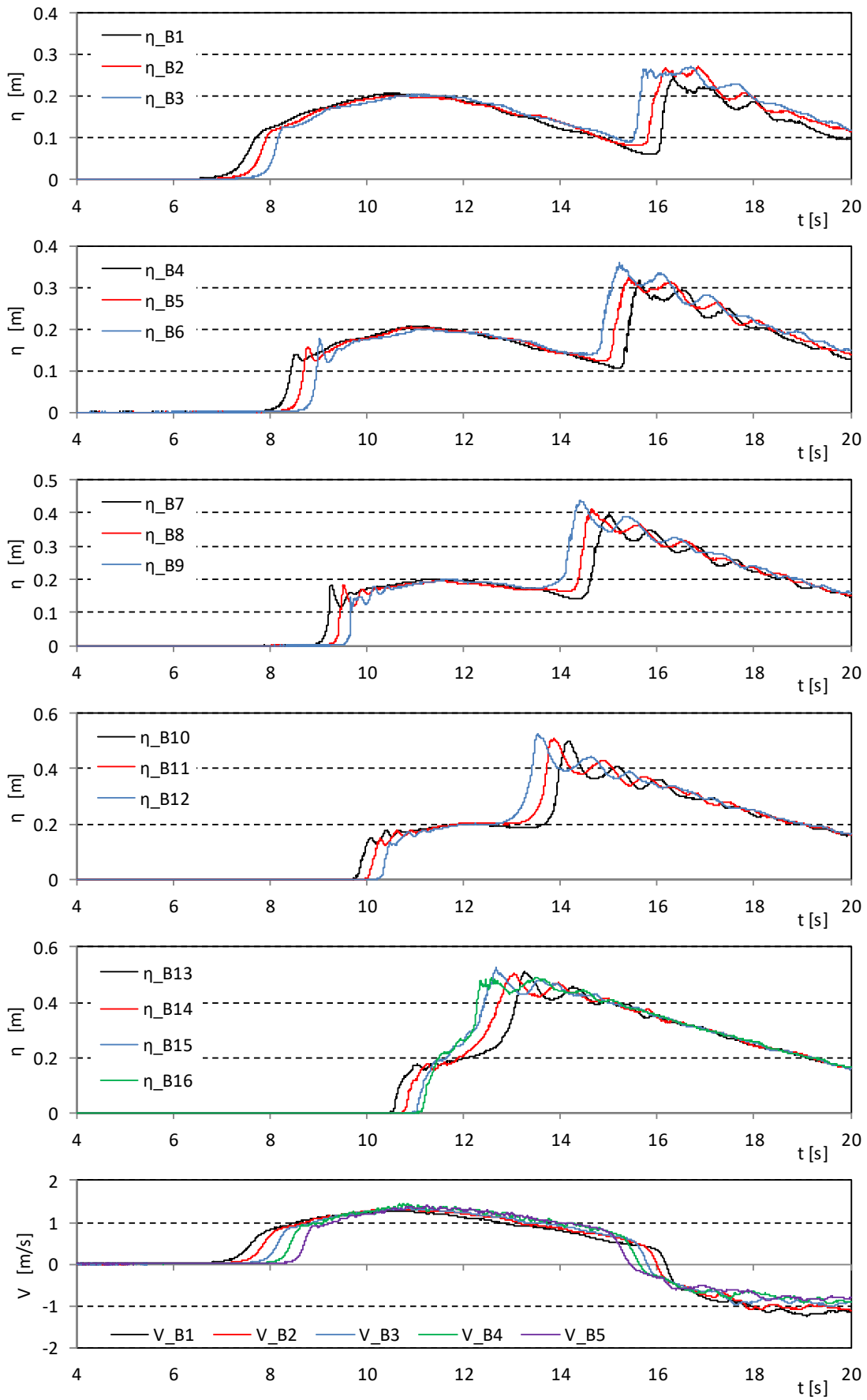


図- 5.3 入射波の水位・流速時系列 (Wf20)

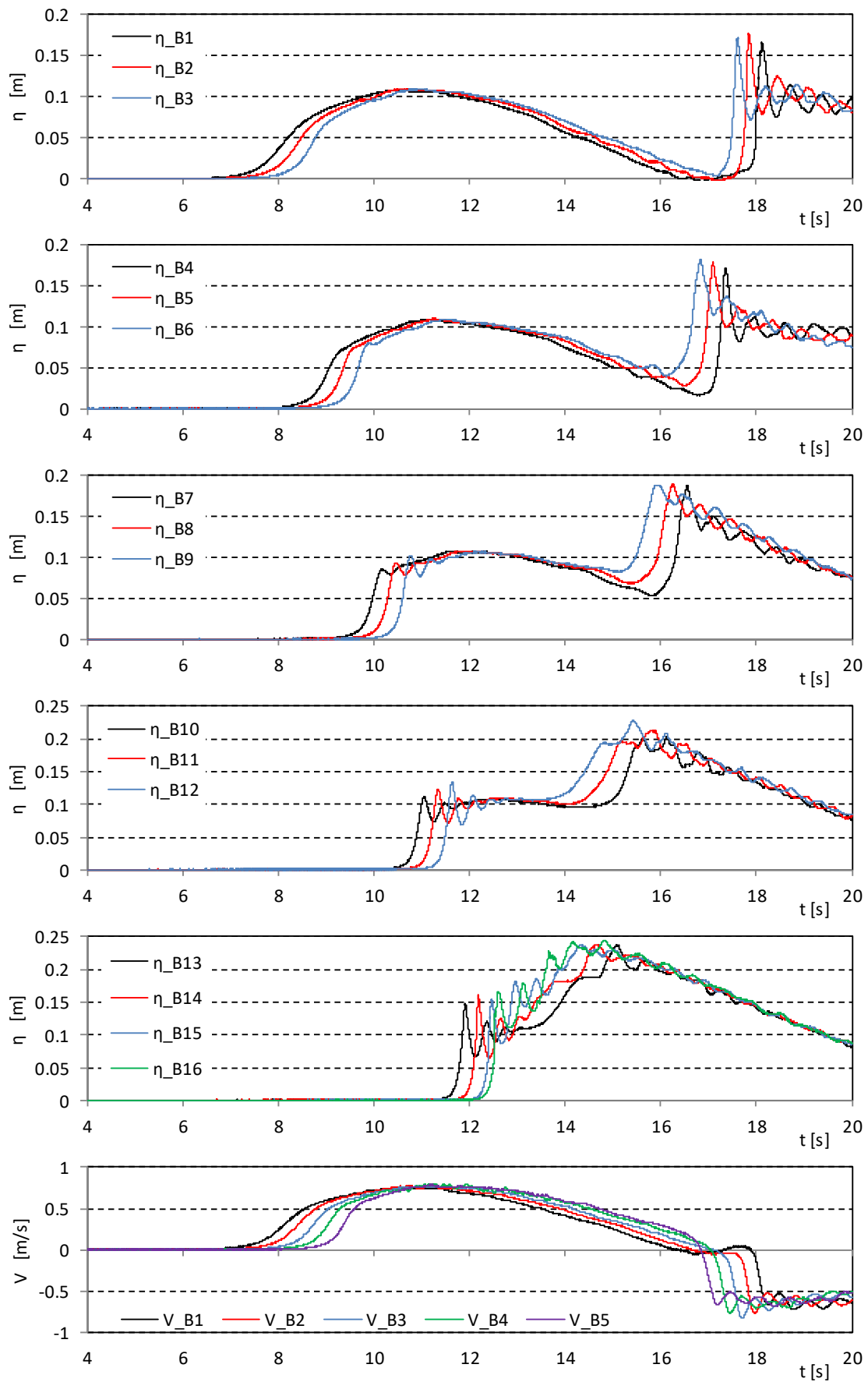


図-5.4 入射波の水位・流速時系列 (Wf30)

5.2. 波速と水面勾配

図-5.2～図-5.4の結果を用いて、波形立ち上がり部分の移動速度から波速を算出した。ここでは、各計測点で水位が津波高の1/3高さ（Wf20では0.067 m、Wf10とWf30では0.033m）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）を除いた値を波速とした。結果を図-5.5に示す。図中の“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0.1mの場合1.0 m/s、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、Wf10、Wf20、Wf30の波速はそれぞれ、1.4m/s、1.9m/s、1.6m/sとなる。

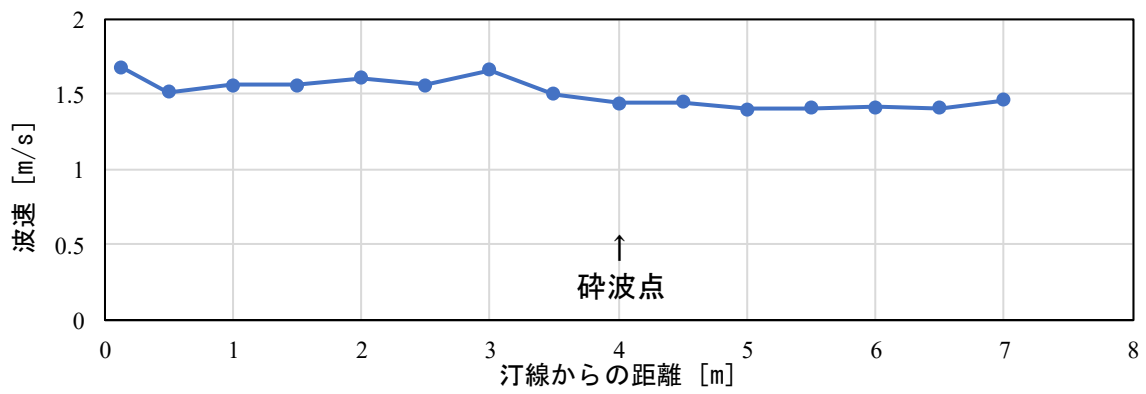
$$c = \sqrt{g(h + \eta)}$$

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。また、砕波点より岸側では、沖側よりも若干大きな値で概略一定となっている。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。

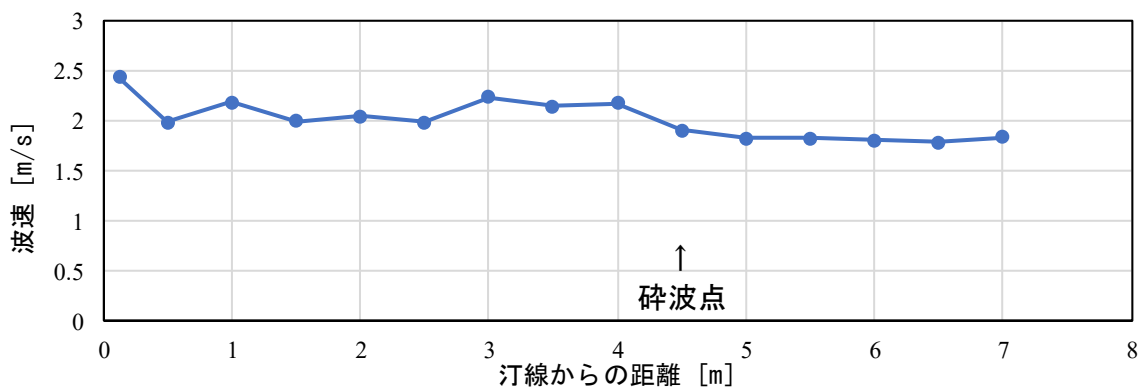
$$c = \sqrt{gh} \sqrt{\frac{1}{2} \frac{h + \eta}{h} \left(\frac{h + \eta}{h} + 1 \right)}$$

これによると、Wf10、Wf20、Wf30の波速はそれぞれ、1.7m/s、2.4m/s、1.8m/sとなるが、砕波後の波速はこれに近づく傾向にある。表-5.1には、汀線近傍における波速を示した。

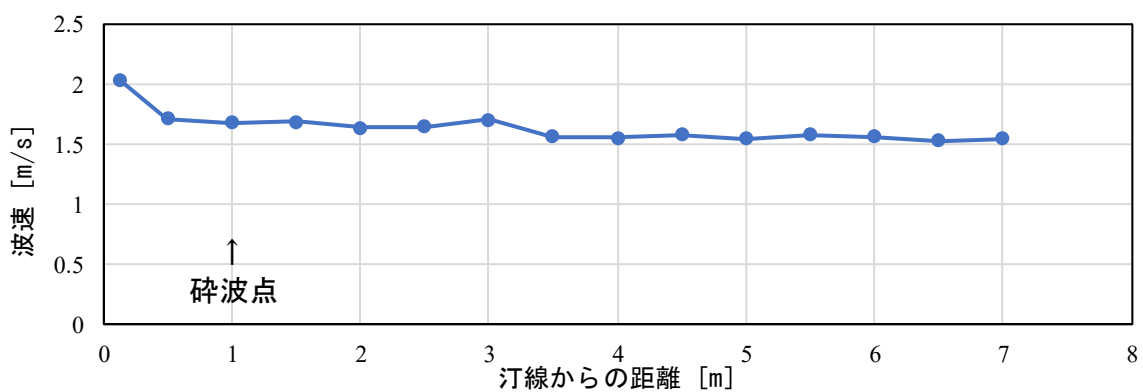
図-5.6は、各計測点における最大の水面勾配を算出した結果である。ここで水面勾配は、各計測点の水位時系列から $\partial\eta/\partial t$ の最大値を求め、これを同地点の波速で除することにより求めた。図-5.6では、いずれのケースも、水面勾配が波の伝播とともに徐々に大きくなり、砕波点で最大となっている。Wf10、Wf20は、短い距離で水面勾配が大きくなっているのに対し、Wf30は、4m程度の距離をかけて、0.25から1程度まで徐々に大きくなっていることが分かる。なお、砕波後の水面勾配については、砕波後の水面が乱れているため、泡の混入した概略の水面の勾配を示していることになる。また、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ため、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る。したがって、図-5.6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はない。



(a) Wf10



(b) Wf20



(c) Wf30

図- 5.5 波速の算出結果

表- 5.1 汀線近傍の波速

unit:m/s

波	汀線からの距離 [m]			平均
	1.5	1	0.5	
Wf10	1.56	1.56	1.52	1.54
Wf20	1.99	2.18	1.98	2.05
Wf30	1.68	1.67	1.71	1.69

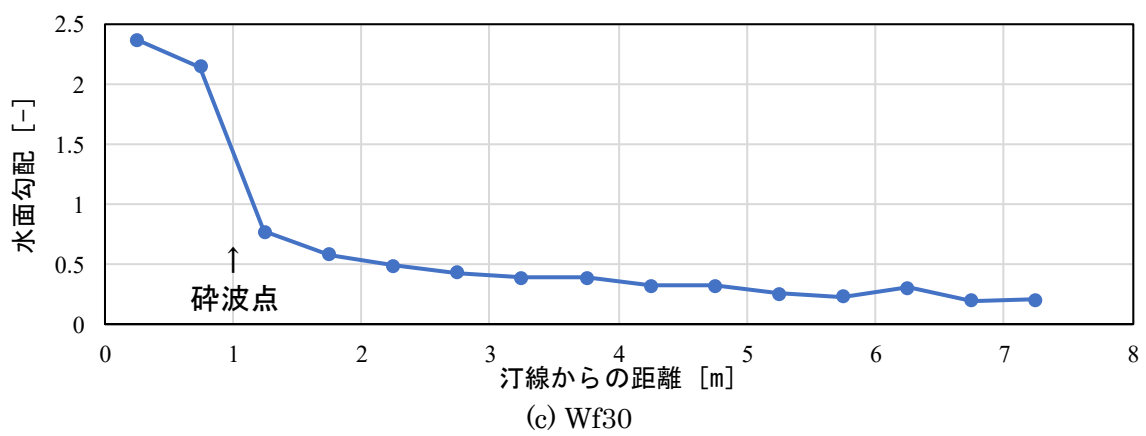
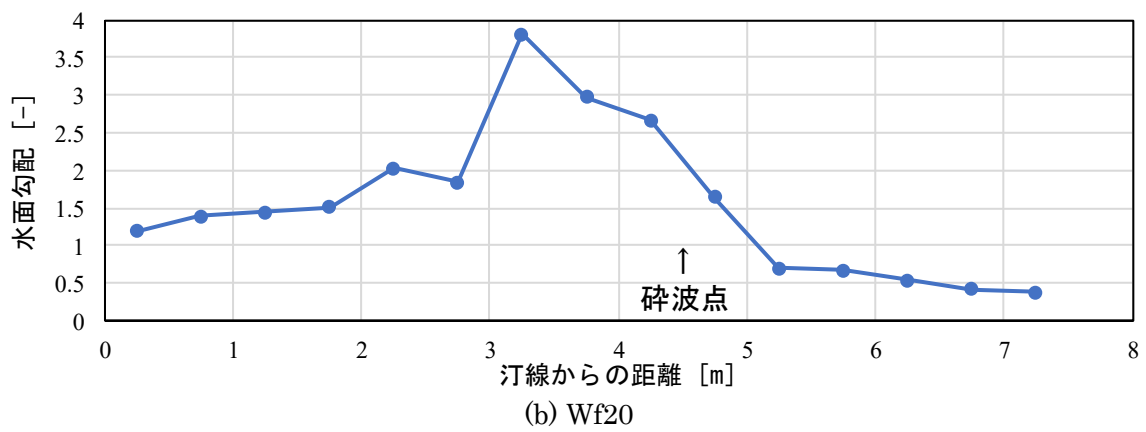
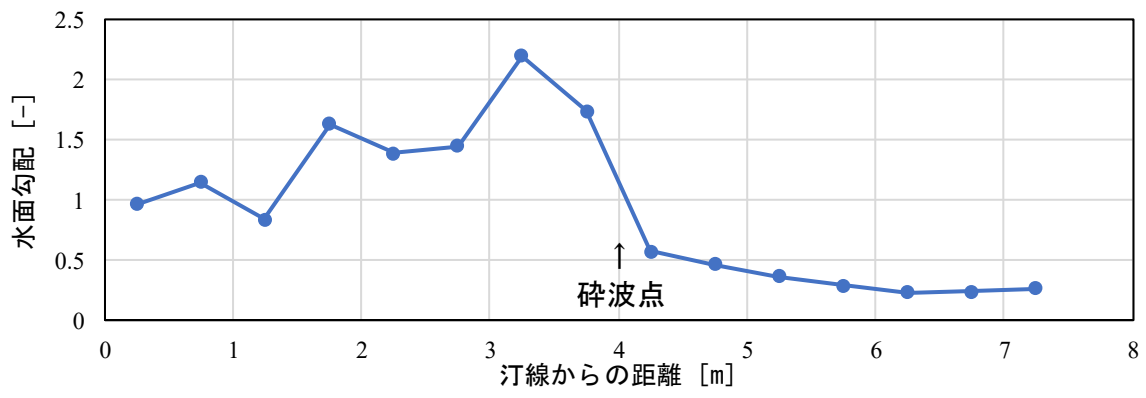


図-5.6 水面勾配の算出結果

6. 水中衝突試験結果

6.1. 水位と波圧の時系列

図- 6.1.1～図- 6.1.3 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。圧力は、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ため、漂流物衝突の影響を受けていないと考えられる。また、これらの値は、繰り返しを含めた各ケースで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 1m の結果のうち、1 回目の計測結果を示した。

Wf10 では、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。遡上した津波が堤体模型に到達すると、p1（底面から 0.25m）のみに衝撃的な圧力が生じている（ $t=13.2s$ ）。一方でその時の波力には、ピーク値は表れておらず、わずかに遅れて p1～p4 まで圧力が生じた際（ $t=13.7s$ ）に、衝撃的な波力が生じていることが分かる。その後は、各高さの水圧の時系列がほぼ等間隔で変化していることから、静水圧分布となっていることが確認出来る。

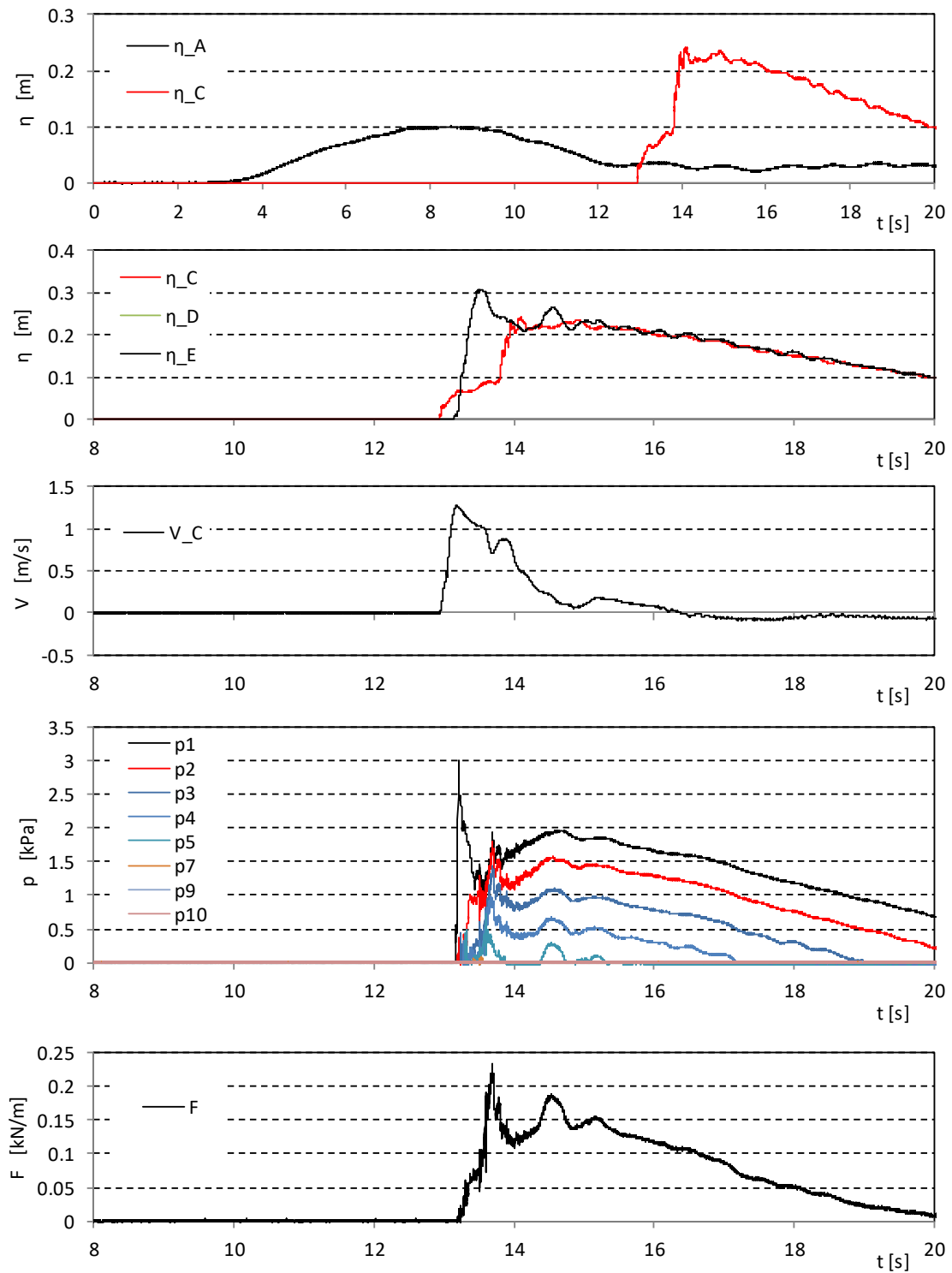


図-6.1.1 水位、流速と波圧の計測結果 (Wf10)

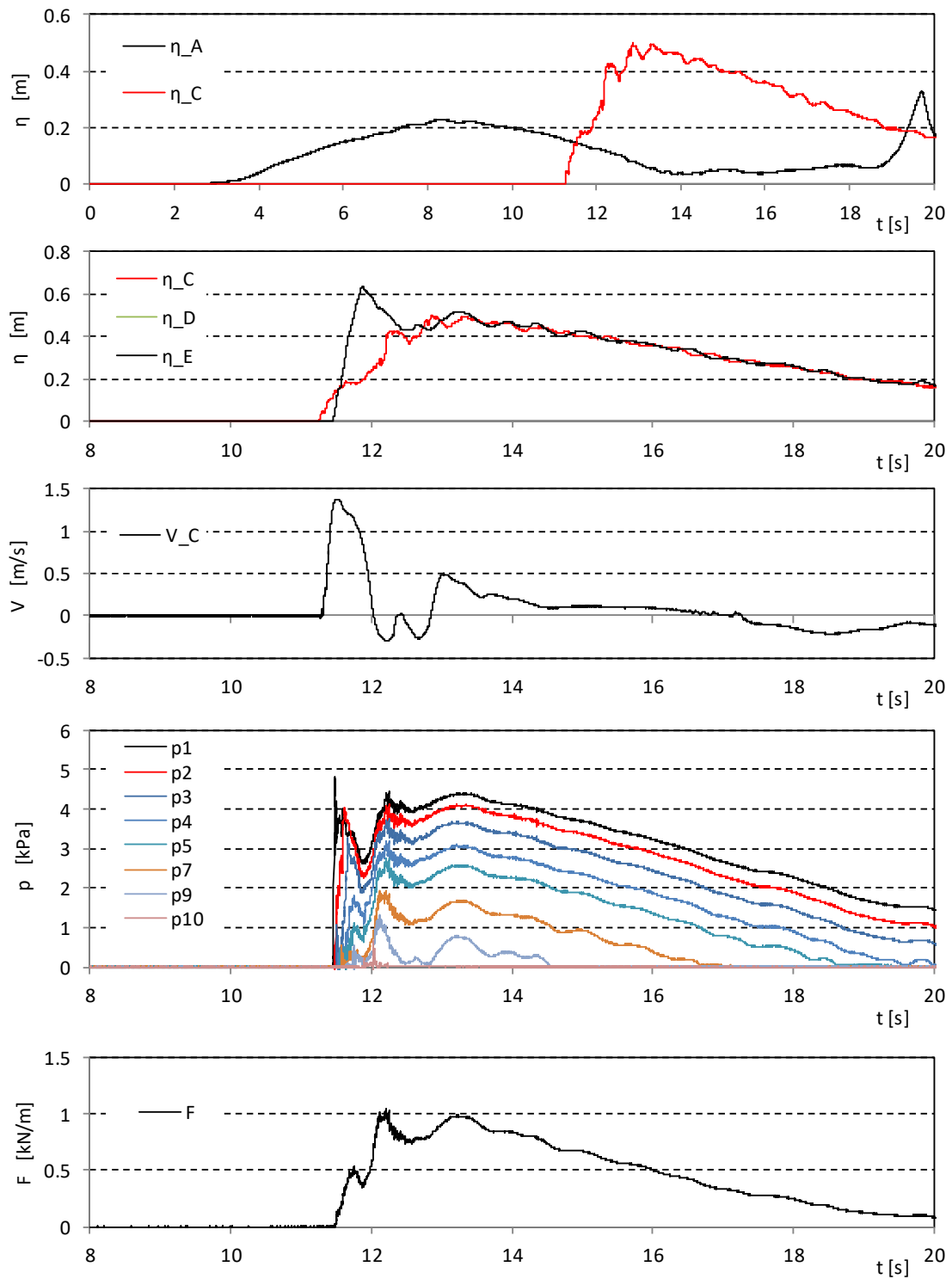


図- 6.1.2 水位，流速と波圧の計測結果 (Wf20)

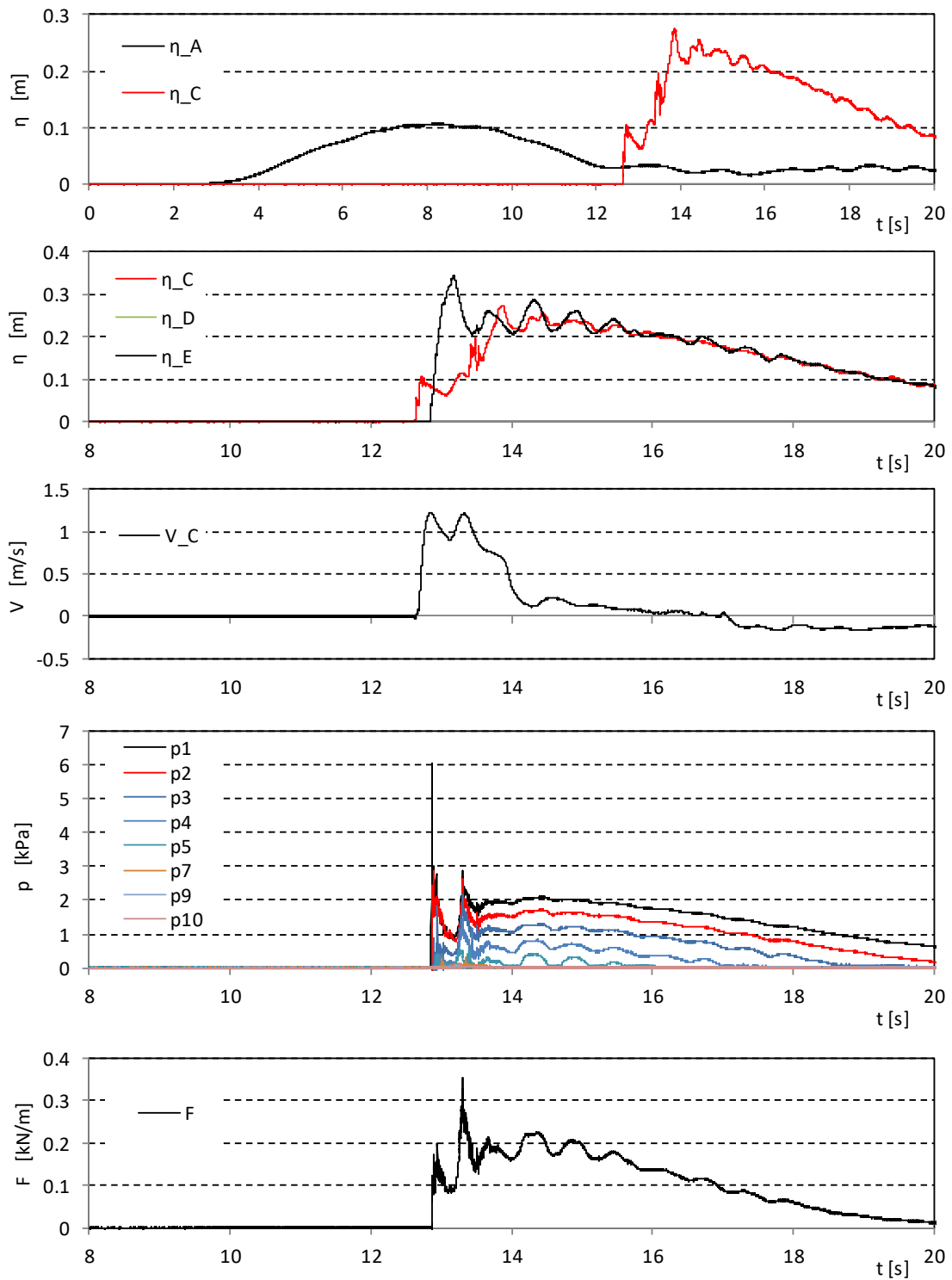


図- 6.1.3 水位，流速と波圧の計測結果 (Wf30)

6.2. 衝突頻度

6.2.1. 衝突確認試験

水中衝突試験に先立ち、初期位置を変えながら漂流試験を実施し、漂流状況および衝突の有無を確認した。結果を、表- 6.2.1 に示す。表中の○は、波に連行され堤体に衝突したケースを、△は、堤体近傍まで波に連行されるが、堤体からの反射波により堤体まで漂流せずに衝突しないケースを、×は、移動はするものの波に連行されず堤体方向に漂流して近付かない（波に乗らない）ケースを意味する。なお、試験は同条件で最大 3 回実施し、一度でも○の結果、あるいは△の結果が得られた場合には、その結果を示している。

表- 6.2.1 の結果を参考に、表中の網掛けケースを水中衝突試験の試験ケースとして決定した。

表- 6.2.1 衝突確認試験の結果

初期位置 [m]		0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	3.75	4.00	4.25	4.50	4.75	5.00	5.25	5.50	5.75	6.00
Wf10	水面勾配	1.05	1.14	0.99	0.84	1.23	1.62	1.5	1.38	1.41	1.44	1.82	2.19	1.96	1.73	1.15	0.57	0.52	0.46	0.41	0.37	0.33	0.29	0.26
	TypeA	○	○	○	△	△	×	×	×	×	×	△	△	△	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	TypeE	○	○	○	△	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	TypeF	△	△	○	△	△	△	×	×	△	△	△	△	○	△	△	×	×	×	×	×	×	×	×
Wf20	水面勾配	1.29	1.40	1.42	1.45	1.48	1.51	1.77	2.03	1.94	1.84	2.82	3.80	3.39	2.97	2.82	2.67	2.15	1.64	1.17	0.71	0.69	0.68	0.61
	TypeA	○	○	○	○	△	○	△	○	○	△	△	△	×	△	△	△	△	△	△	×	×	×	×
	TypeA(1.25)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△	△	△	△	△	△	○	×	△	△	×	×	×	×
	TypeE	○	○	○	○	○	○	△	○	○	△	△	×	×	△	△	△	△	×	×	×	×	×	×
	TypeF	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	△	○	△	○	△	△	△	△	△	○	×	×	×
TypeG	○	○	○	○	○	△	△	×	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	×	×	×	×	×	×
Wf30	水面勾配	2.25	2.14	1.45	0.77	0.67	0.58	0.53	0.49	0.46	0.43	0.4	0.38	0.39	0.39	0.36	0.322	0.322	0.322	0.289	0.257	0.242	0.227	0.265
	TypeA	△	△	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	TypeE	○	△	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
TypeF	○	○	△	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

水中衝突試験ケース

6.2.2. 水中衝突試験による衝突頻度の計測結果

表- 6.2.2 に、水中衝突試験における衝突の有無についての結果の一覧を示す。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場合、具体的には、短時間に 5μ 以上のひずみが発生している場合に衝突が生じたと判定した。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。

表- 6.2.2 漂流物の衝突頻度

(a) Wf10

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
Wf10	A	1.0m	○	○	×	×	×	×	○	×	×	○	○	○	×	×	×	6	40%
Wf10	A	1.5m	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	1	7%
Wf10	A	2.0m	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	1	7%
Wf10	E	1.0m	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14	93%
Wf10	E	1.5m	×	○	×	×	×	○	×	○	○	×	×	×	×	○	×	5	33%
Wf10	E	2.0m	×	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	2	13%

(b) Wf20

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
Wf20	A	2.0m	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	1	7%
Wf20	A	2.5m	×	×	○	○	×	○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	5	33%
Wf20	A	4.0m	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	0	0%
Wf20	A	5.0m	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	0	0%
Wf20(1.25)	A	2.0m	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	4	27%
Wf20(1.25)	A	4.0m	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	0	0%
Wf20(1.25)	A	5.0m	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	0	0%
Wf20	E	2.0m	×	○	×	×	○	×	○	×	×	×	×	○	○	×	×	5	33%
Wf20	E	4.0m	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	○	×	○	×	3	20%
Wf20	E	5.0m	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	0	0%
Wf20	F	2.0m	×	○	×	○	○	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	11	73%
Wf20	F	4.0m	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	0	0%
Wf20	F	5.0m	○	×	×	×	○	○	×	×	×	○	×	×	×	×	×	4	27%
Wf20	F	5.5m	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	0	0%
Wf20	G	2.0m	×	×	×	○	×	○	×	×	×	×	○	×	×	×	×	3	20%
Wf20	G	4.0m	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	1	7%
Wf20	G	5.0m	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	0	0%

(c) Wf30

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
Wf30	A	0.5m	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	13	87%
Wf30	A	0.75m	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	2	13%
Wf30	A	1.0m	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	0	0%
Wf30	E	0.5m	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15	100%
Wf30	E	0.75m	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	0	0%
Wf30	E	1.0m	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	0	0%
Wf30	F	0.75m	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14	93%
Wf30	F	1.0m	○	○	×	×	×	○	○	×	○	×	○	○	×	○	○	9	60%
Wf30	F	1.25m	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	0	0%

6.3. ひずみの時系列

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-6.3.3～図-6.3.34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。図によれば、波圧によるひずみの変動に加えて、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基本的に負の値となることから、正のひずみは主に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衝突した板から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、また衝突直後の衝突していない板に生じるひずみエネルギー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と考えられる。

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後に生じているケースがほとんどであるが、例えば図-6.3.5、図-6.3.8のように一部ケースでは、津波の到達から0.5s以上遅れて衝突によるひずみが発生している。漂流物の衝突は、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主に発生する。漂流物が津波先端部分に少し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。なお、津波先端部分に対し遅れて漂流する場合、津波到達時の峰を超えて遅れる場合には、堤体に衝突することはなかった。図-6.3.1、図-6.3.2はそれぞれ図-6.3.3、図-6.3.5に示したケースの衝突状況を示したものである。図-6.3.1では、津波の先端部に漂流物が連行されて堤体に衝突しているが、図-6.3.2では、図-6.3.1と同じ時間において漂流物はまだ堤体に到達しておらず、遅れて堤体に到達する。この際、既に堤体前面の水位は反射により高くなっており、漂流物は水中に潜水した状態で堤体に衝突していることが分かる。この時、後述するように、水塊の抵抗により堤体に衝突する直前の漂流速度は小さくなっていると考えられるため、衝突力は相対的に小さくなる。

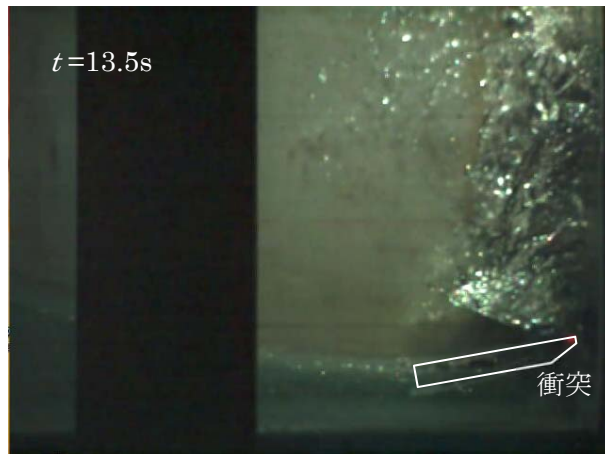


図- 6.3.1 衝突状況 (Wf10, TypeA, 初期位置 1.0m, 7 回目)

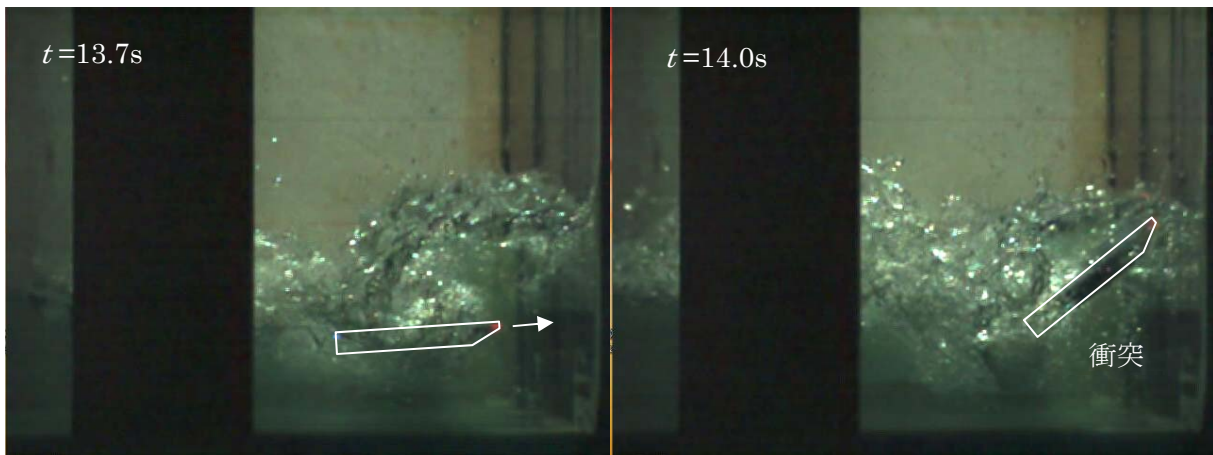
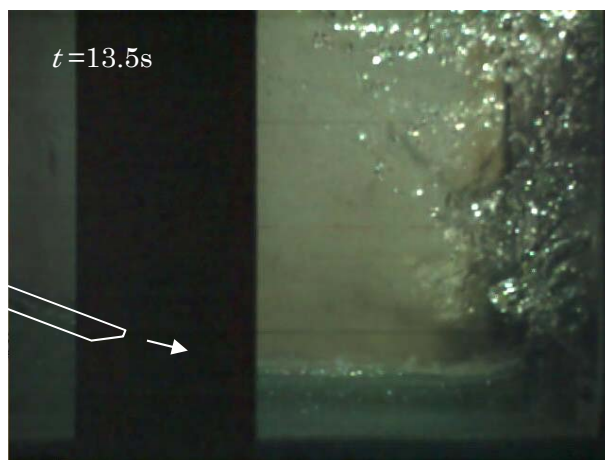


図- 6.3.2 衝突状況 (Wf10, TypeA, 初期位置 2.0m, 12 回目)

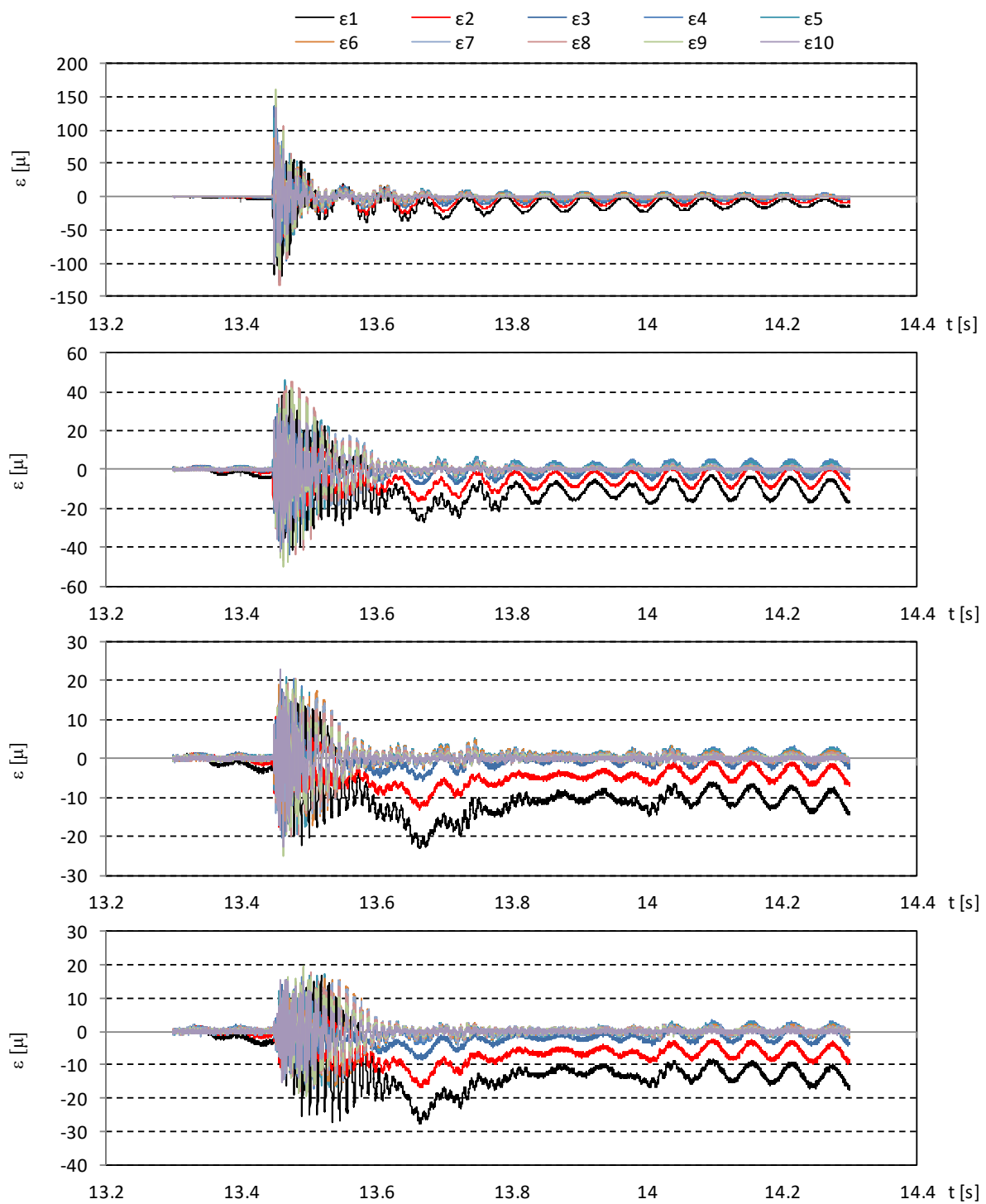


図- 6.3.3 ひずみの時系列 (Wf10, TypeA, 初期位置 1.0m, 7回目)

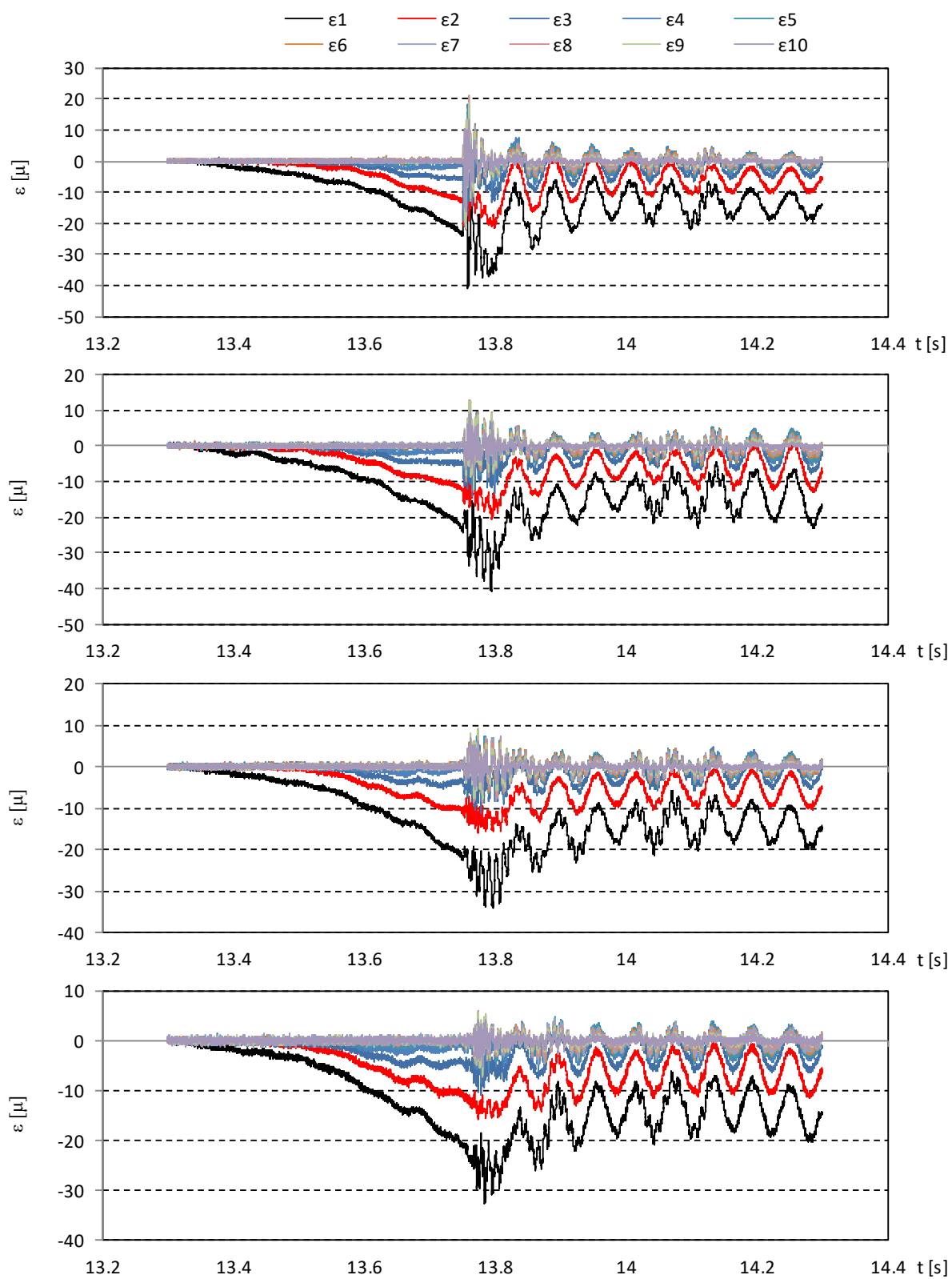


図- 6.3.4 ひずみの時系列 (Wf10, TypeA, 初期位置 1.5m, 9回目)

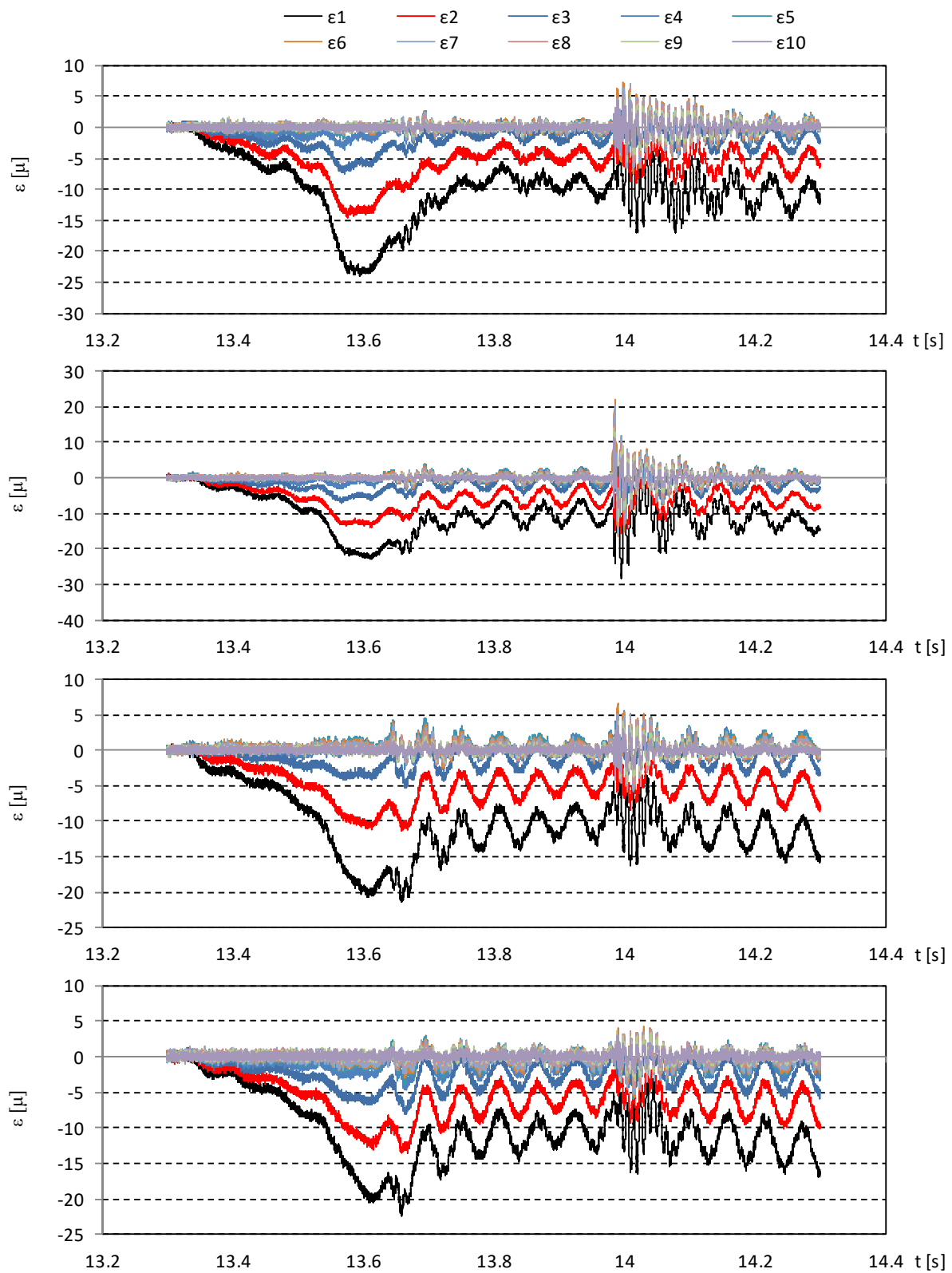


図-6.3.5 ひずみの時系列 (Wf10, TypeA, 初期位置 2.0m, 12回目)

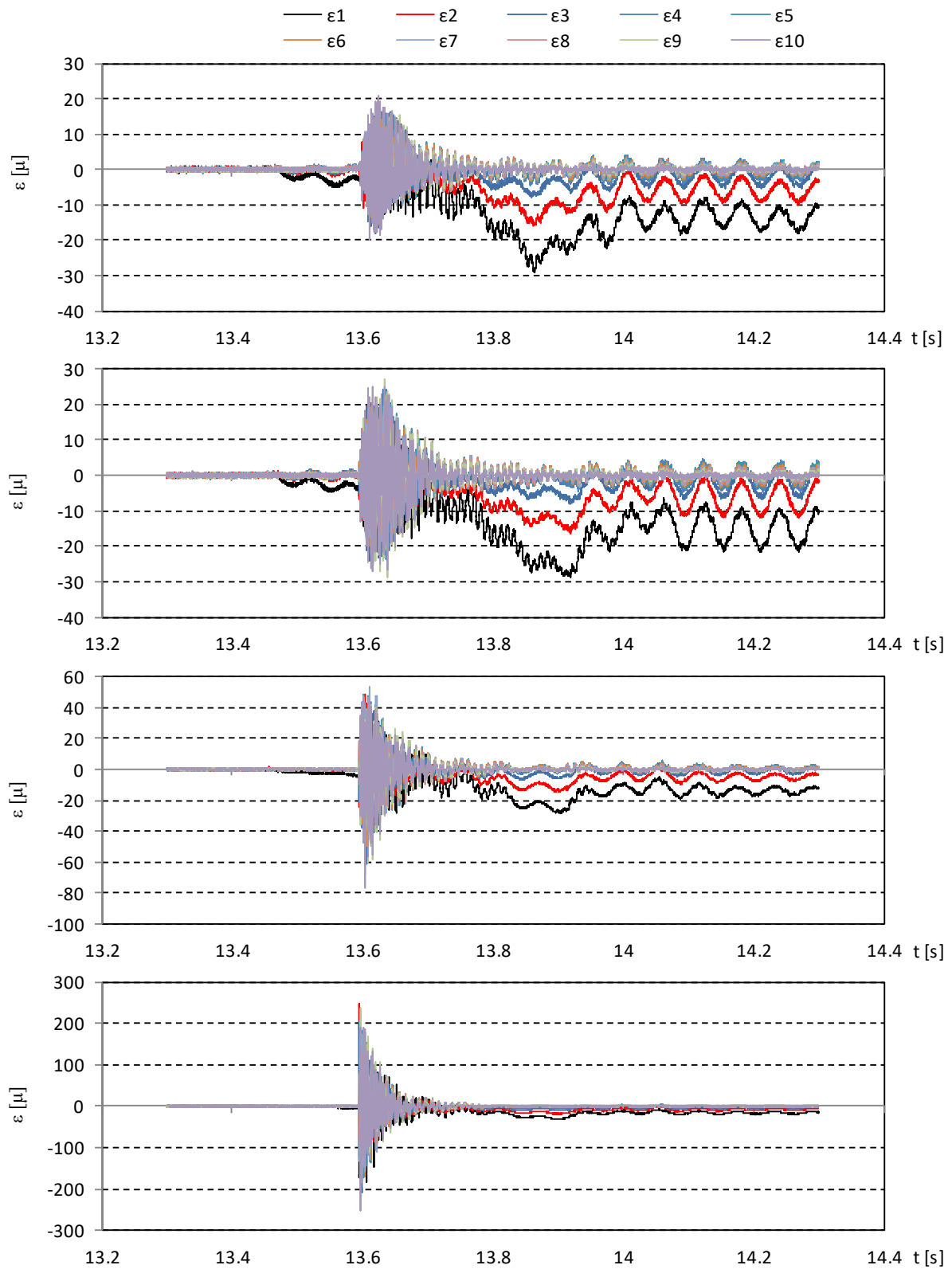


図-6.3.6 ひずみの時系列 (Wf10, TypeE, 初期位置 1.0m, 10回目)

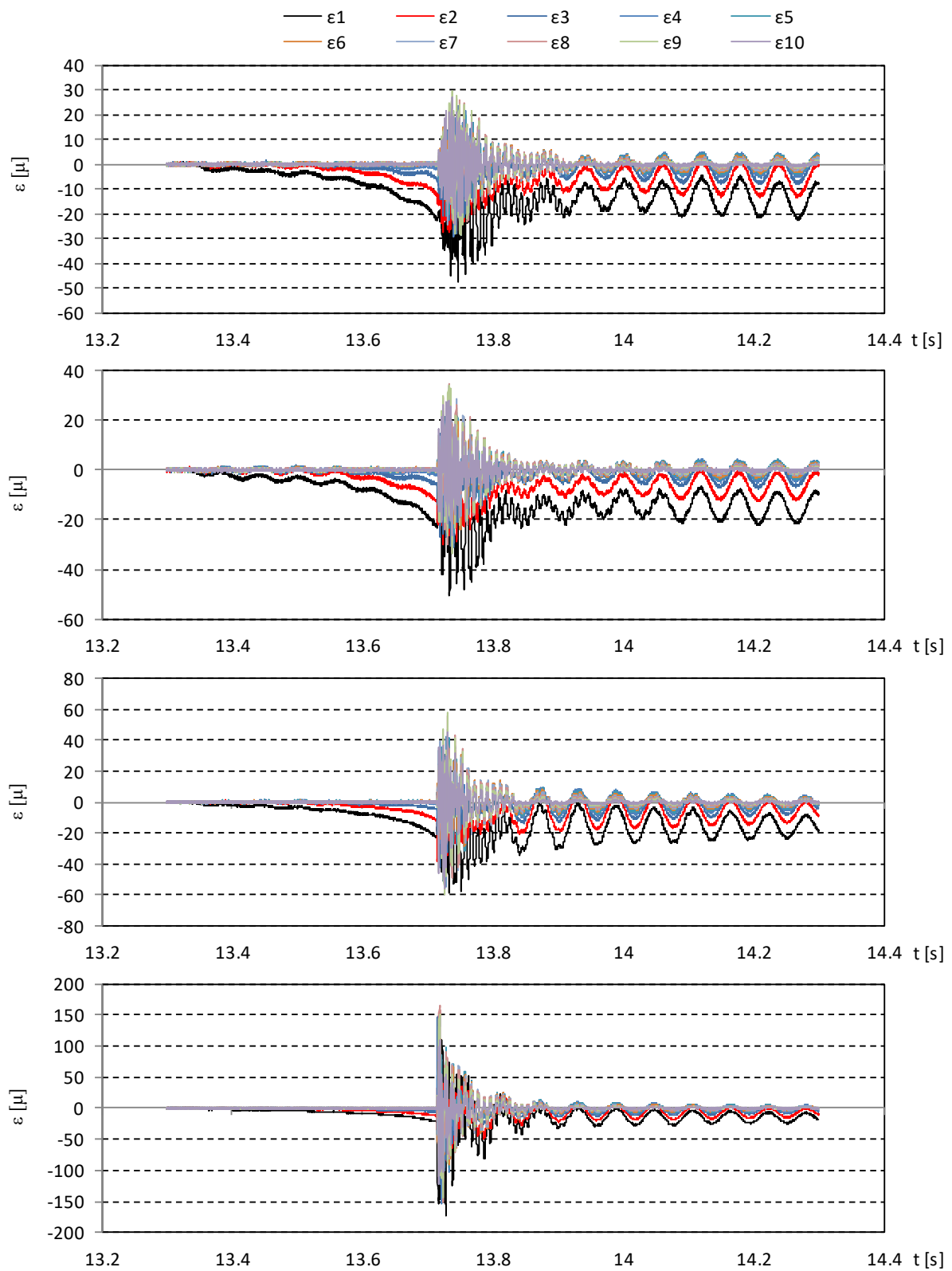


図- 6.3.7 ひずみの時系列 (Wf10, TypeE, 初期位置 1.5m, 2回目)

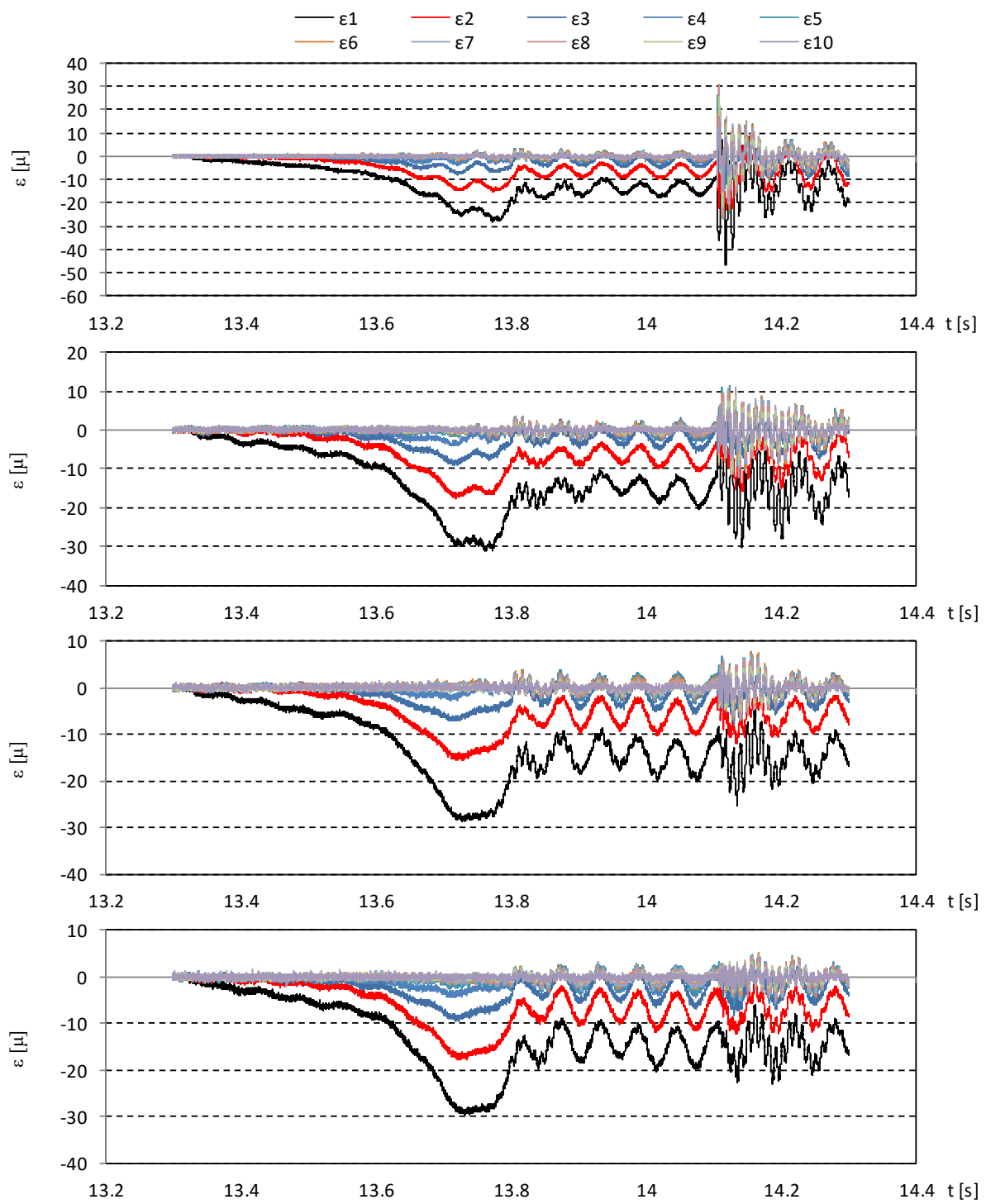


図- 6.3.8 ひずみの時系列 (Wf10, TypeE, 初期位置 2.0m, 2回目)

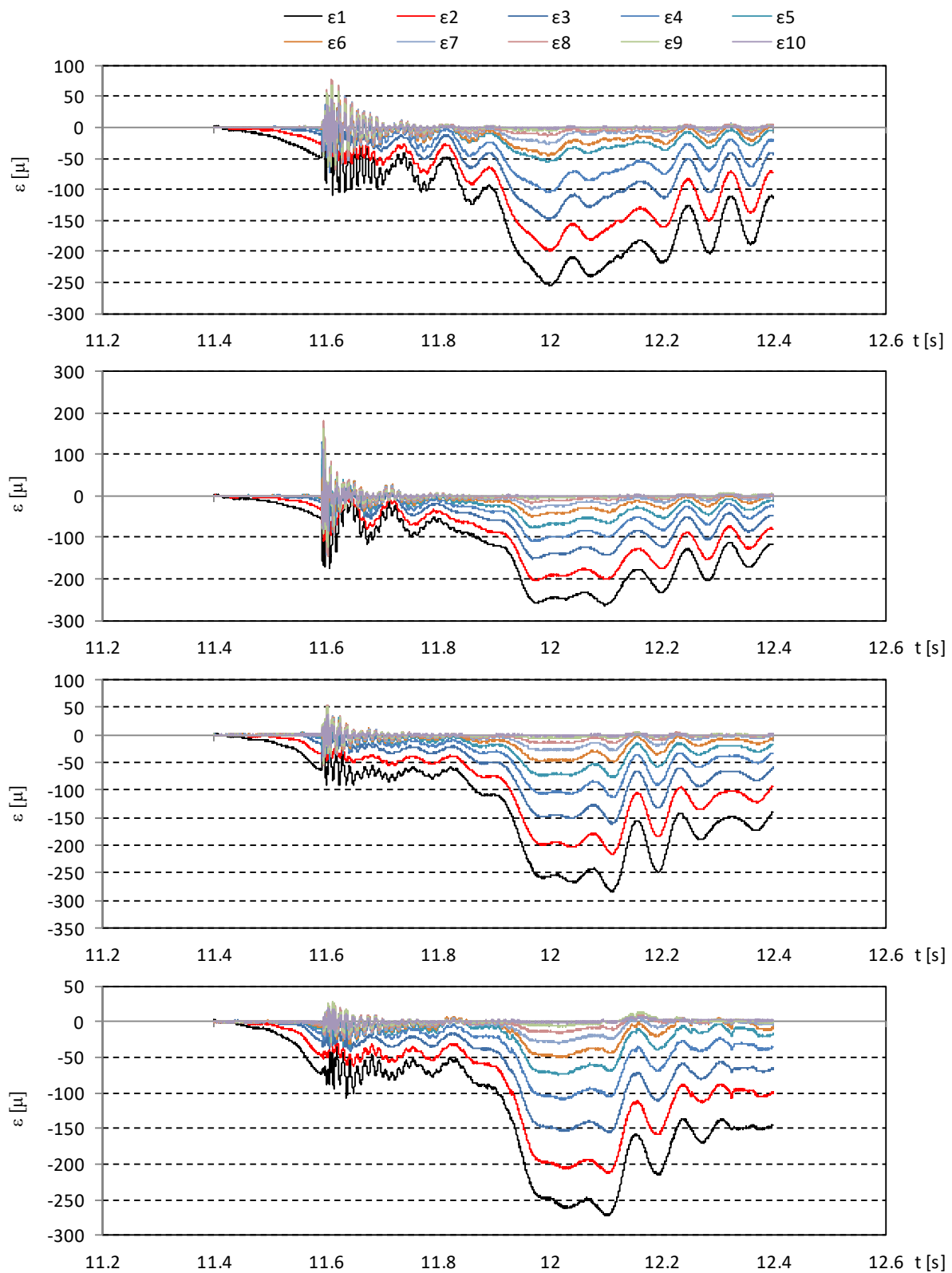


図- 6.3.9 ひずみの時系列 (Wf20, TypeA, 初期位置 2.0m, 11 回目)

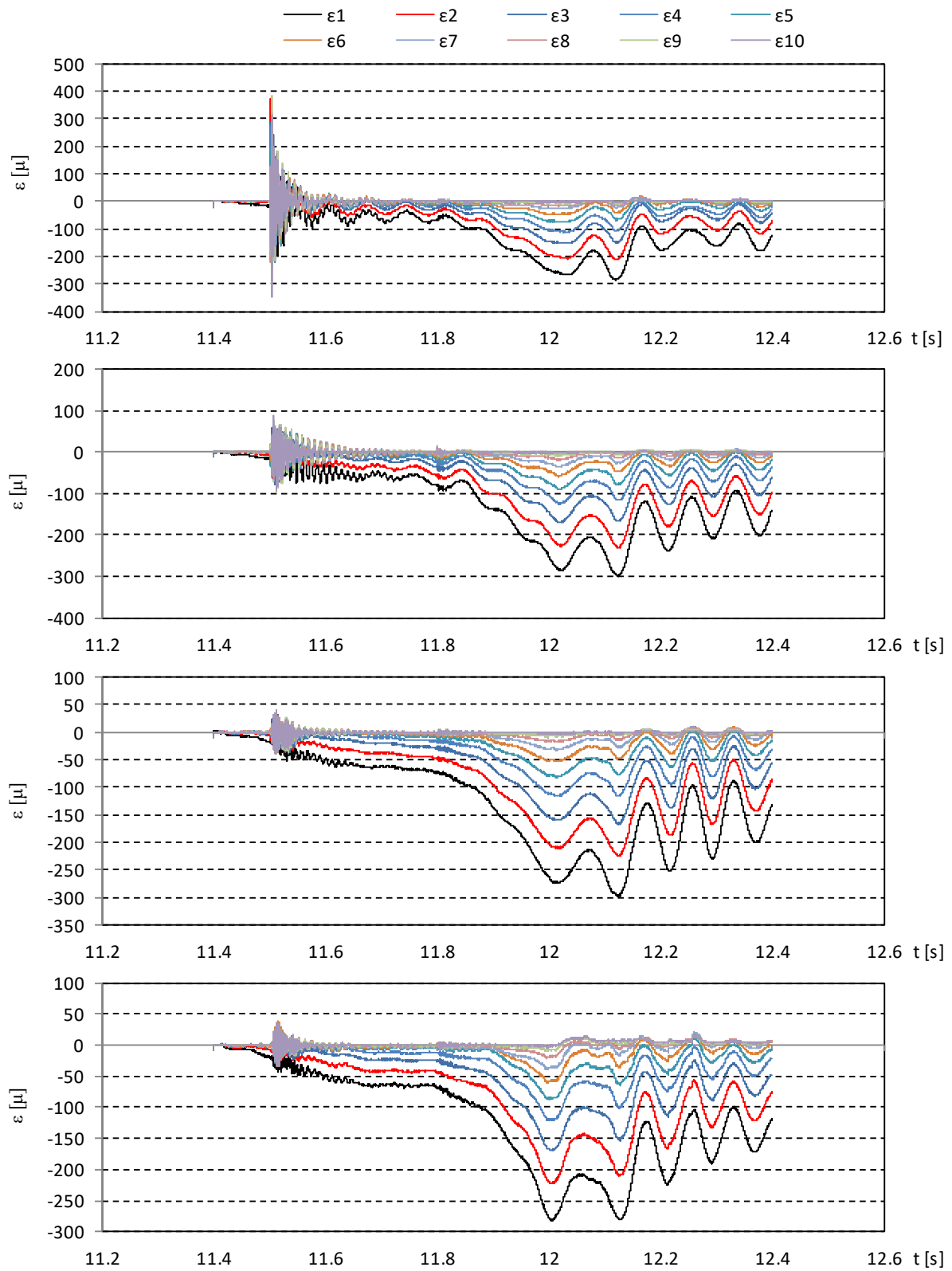


図- 6.3.10 ひずみの時系列 (Wf20, TypeA, 初期位置 2.5m, 6 回目)

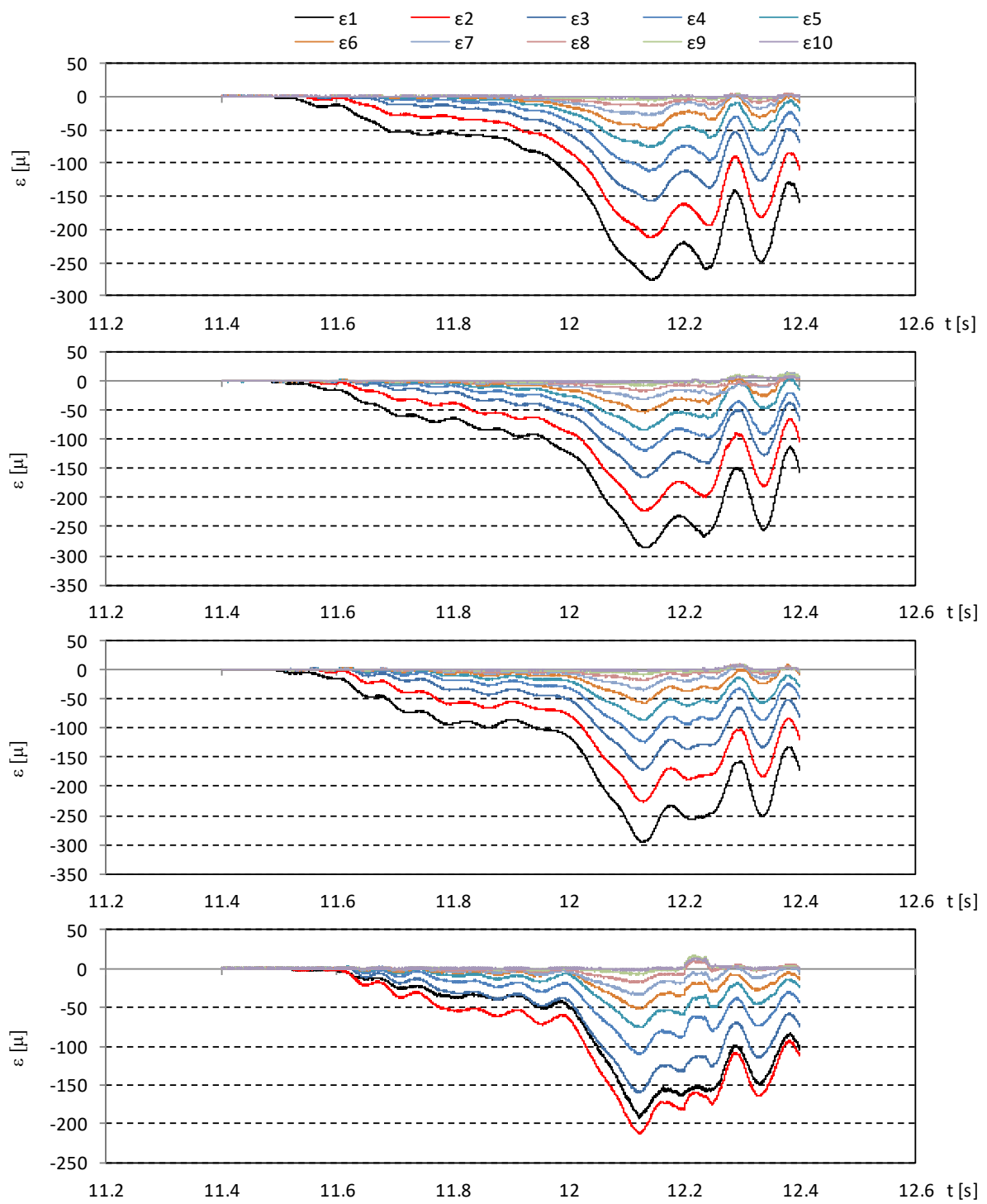


図- 6.3.11 ひずみの時系列 (Wf20, TypeA, 初期位置 4.0m, 1回目)

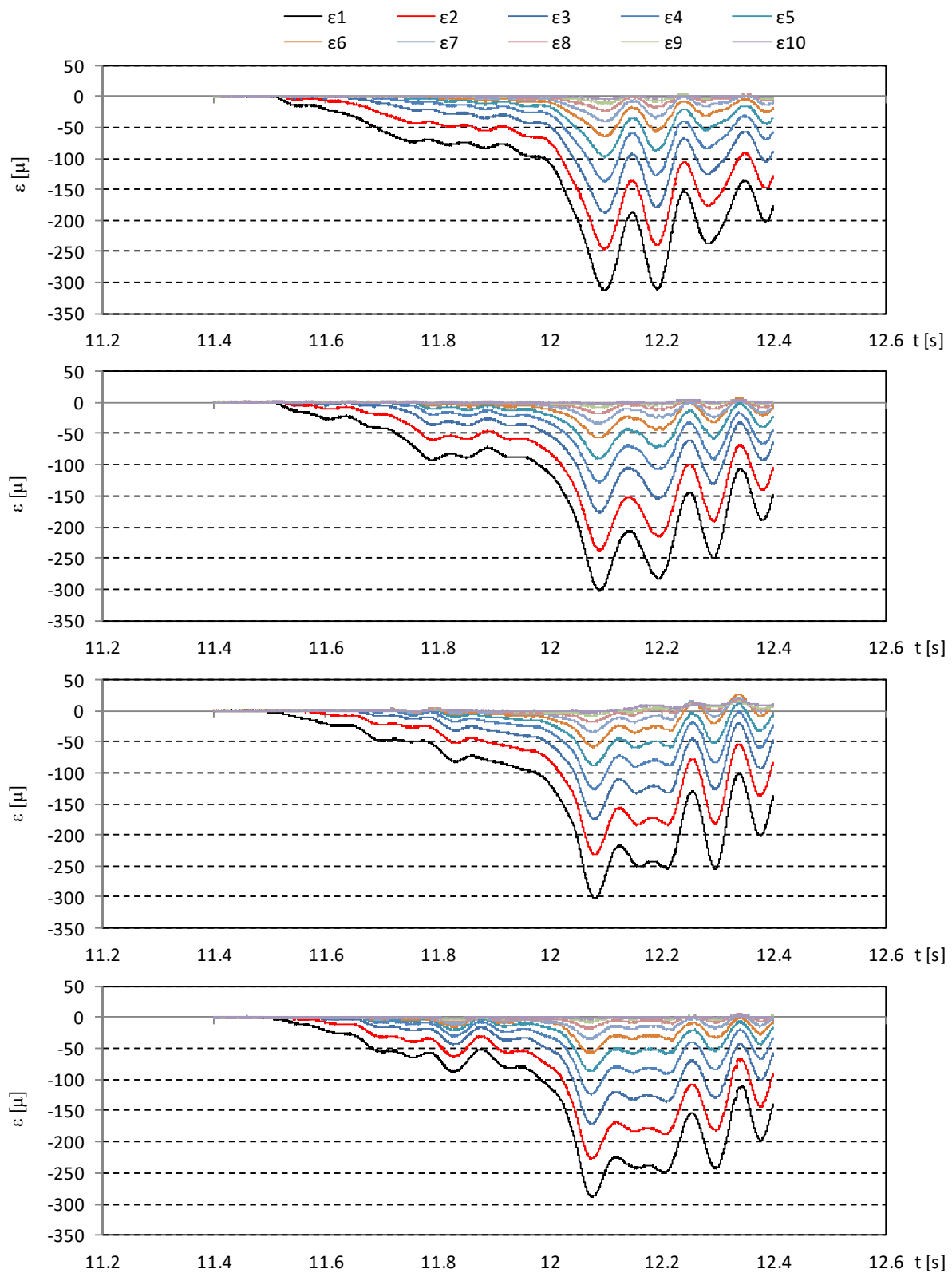


図- 6.3.12 ひずみの時系列 (Wf20, TypeA, 初期位置 5.0m, 1回目)

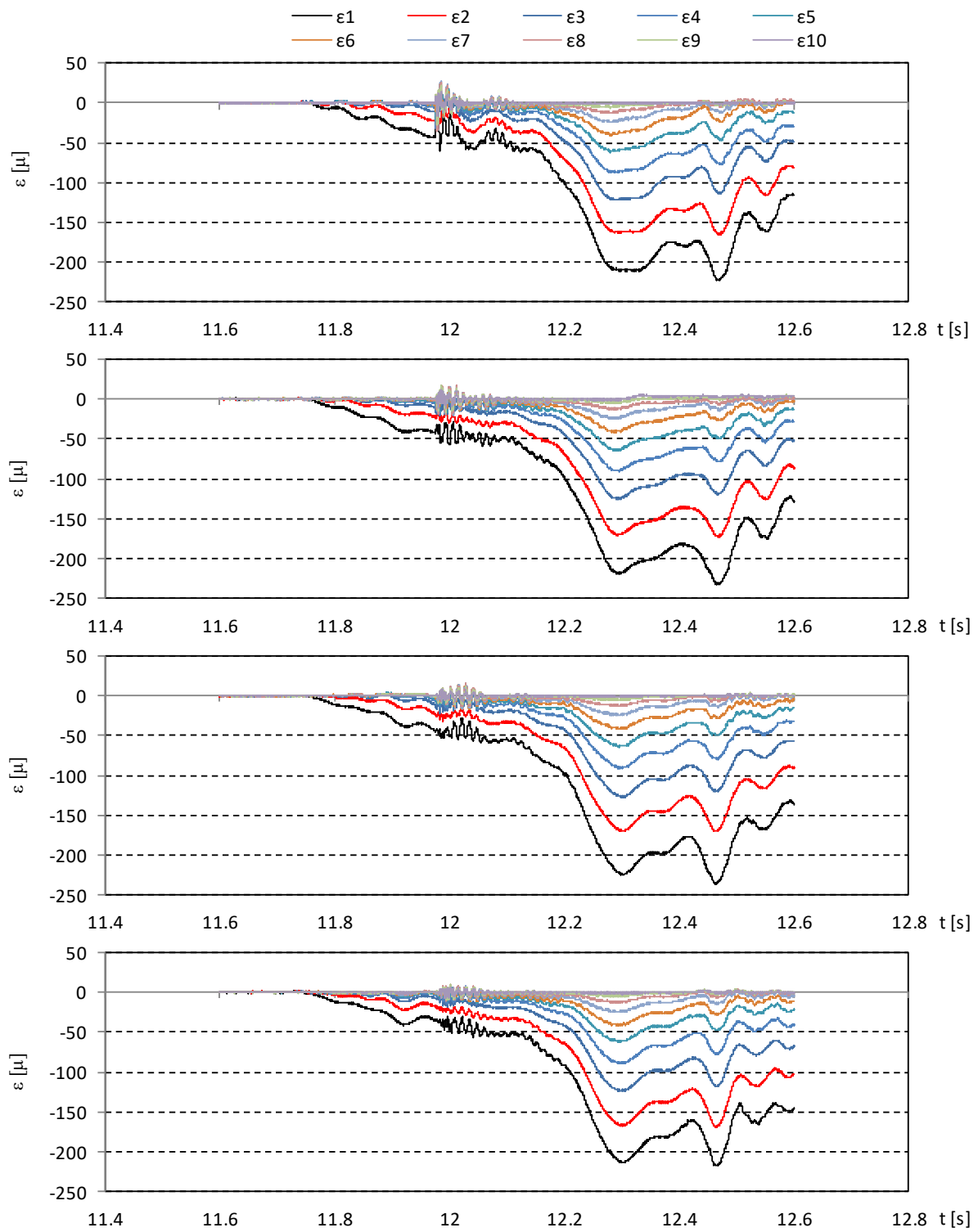


図- 6.3.13 ひずみの時系列 (Wf20, $l_d=1.25\text{m}$, TypeA, 初期位置 2.0m, 11 回目)

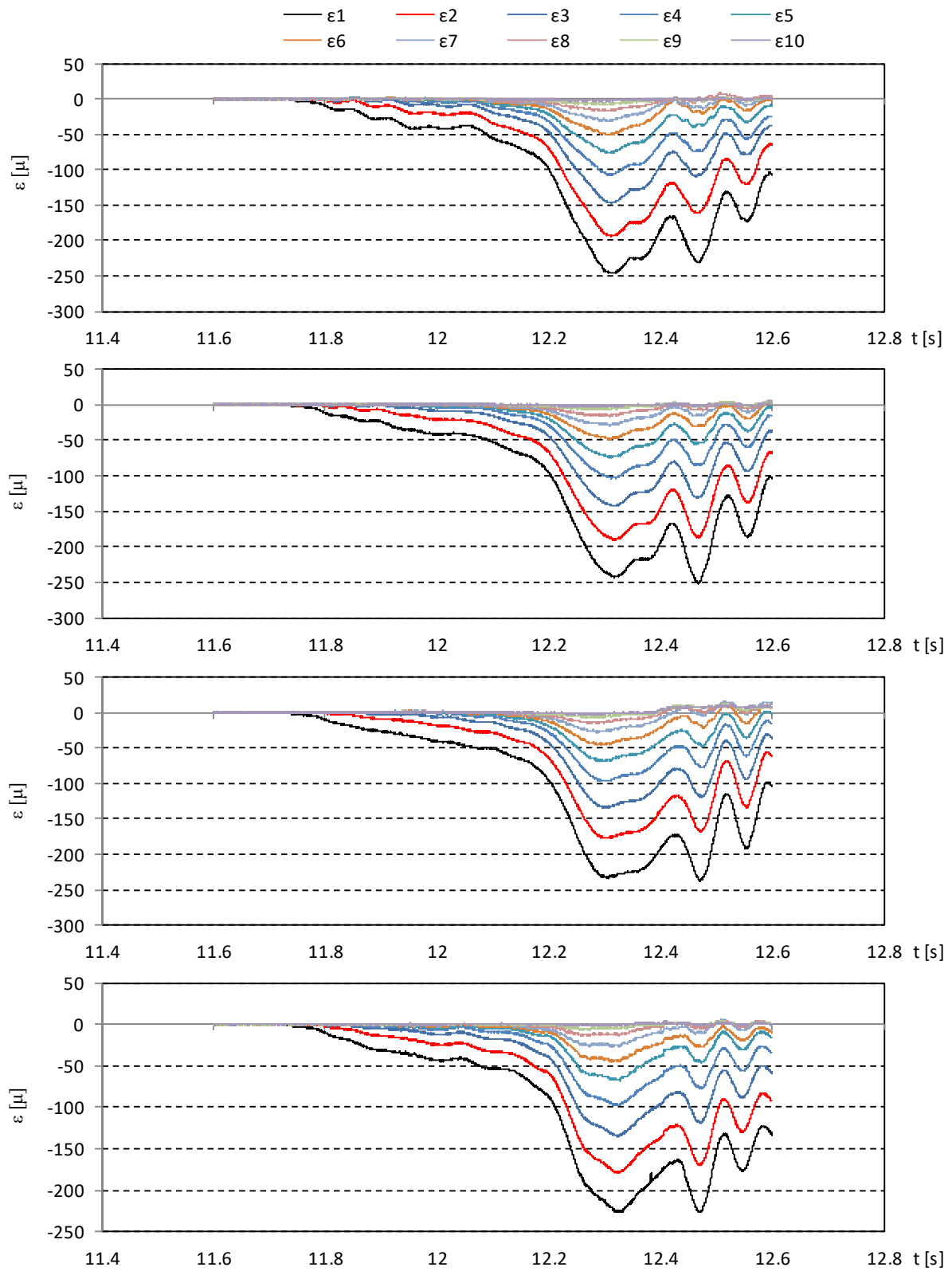


図- 6.3.14 ひずみの時系列 (Wf20, $l_i=1.25\text{m}$, TypeA, 初期位置 4.0m, 1回目)

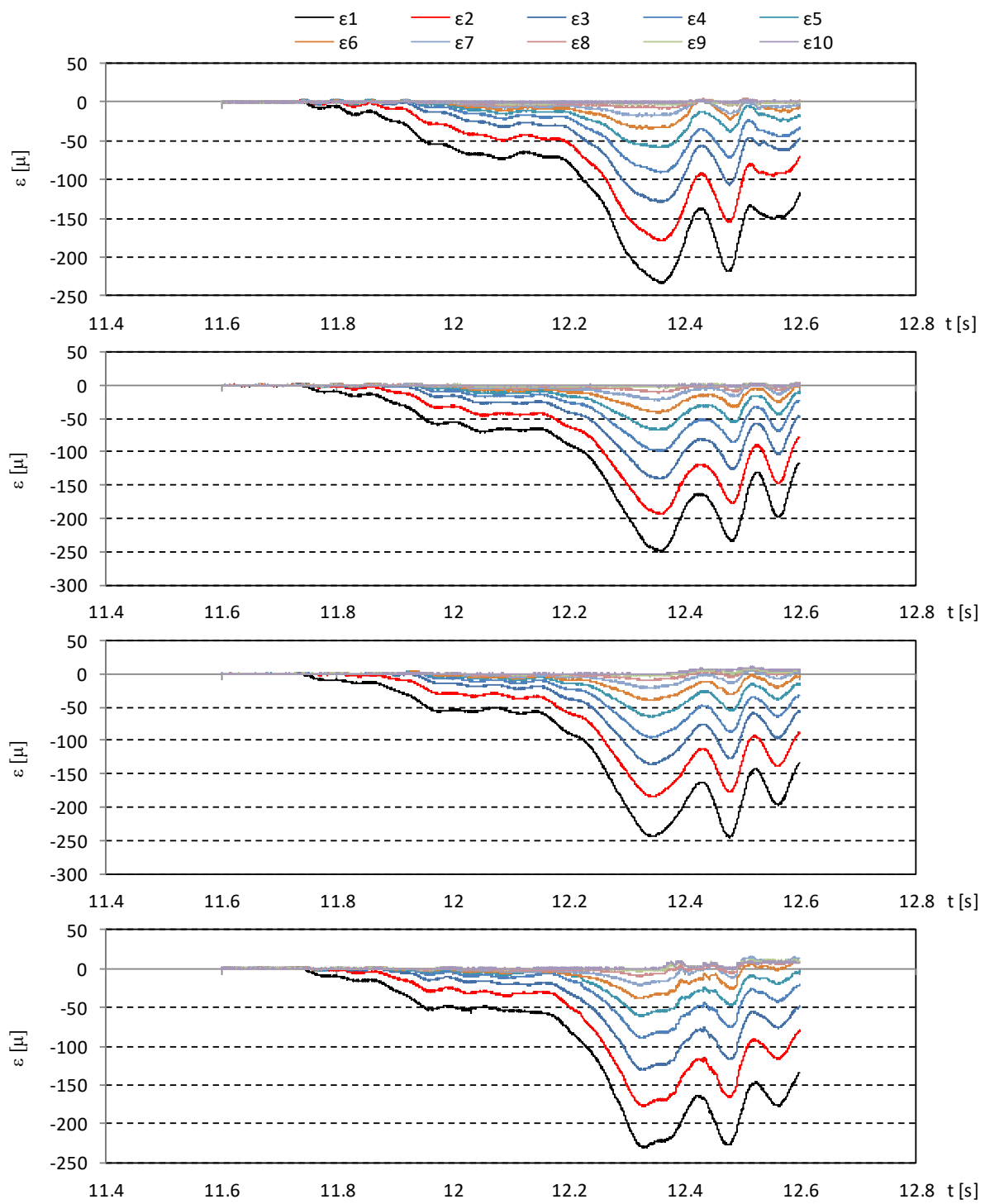


図- 6.3.15 ひずみの時系列 (Wf20, $l_d=1.25\text{m}$, TypeA, 初期位置 5.0m, 1回目)

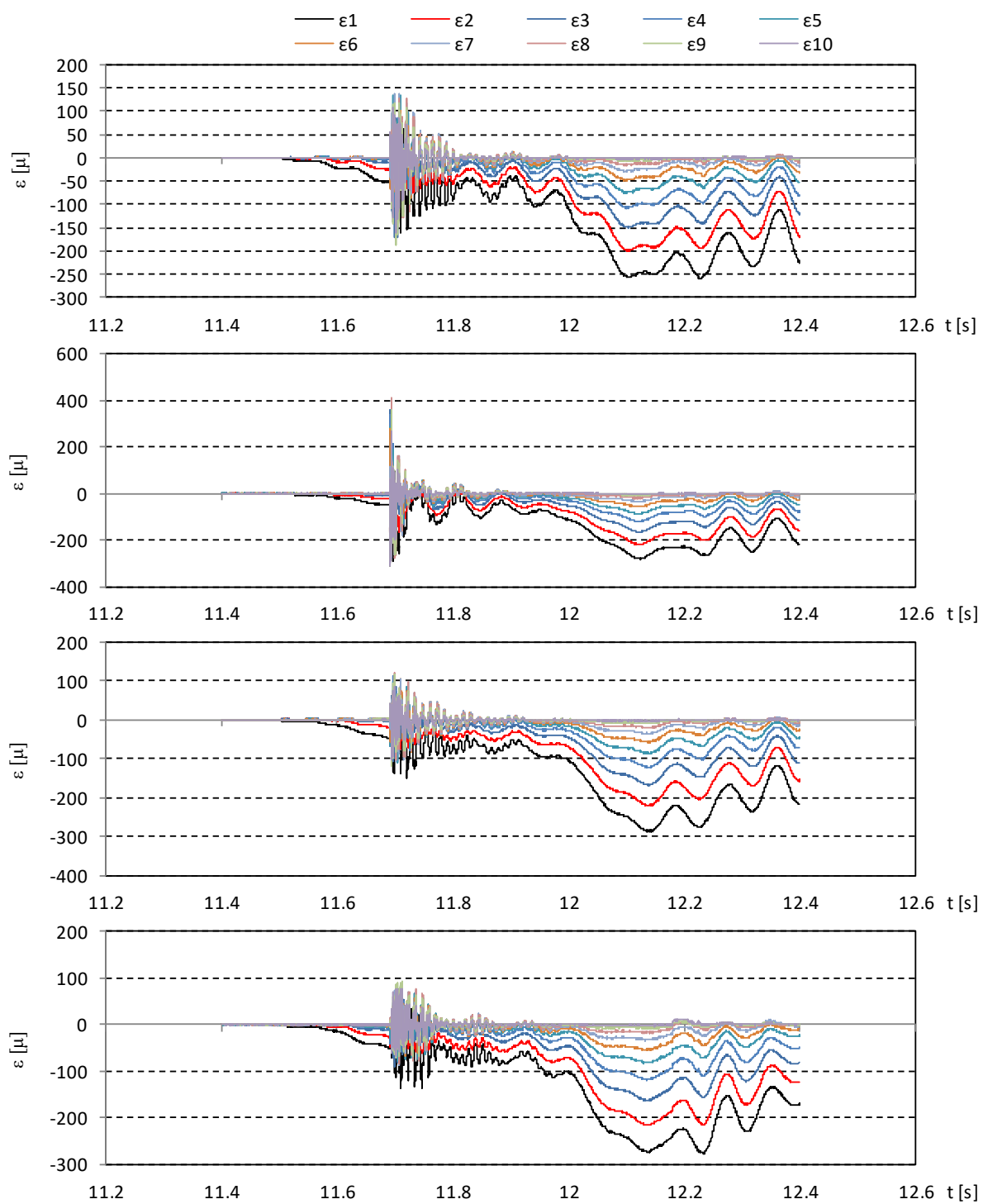


図- 6.3.16 ひずみの時系列 (Wf20, TypeE, 初期位置 2.0m, 7回目)

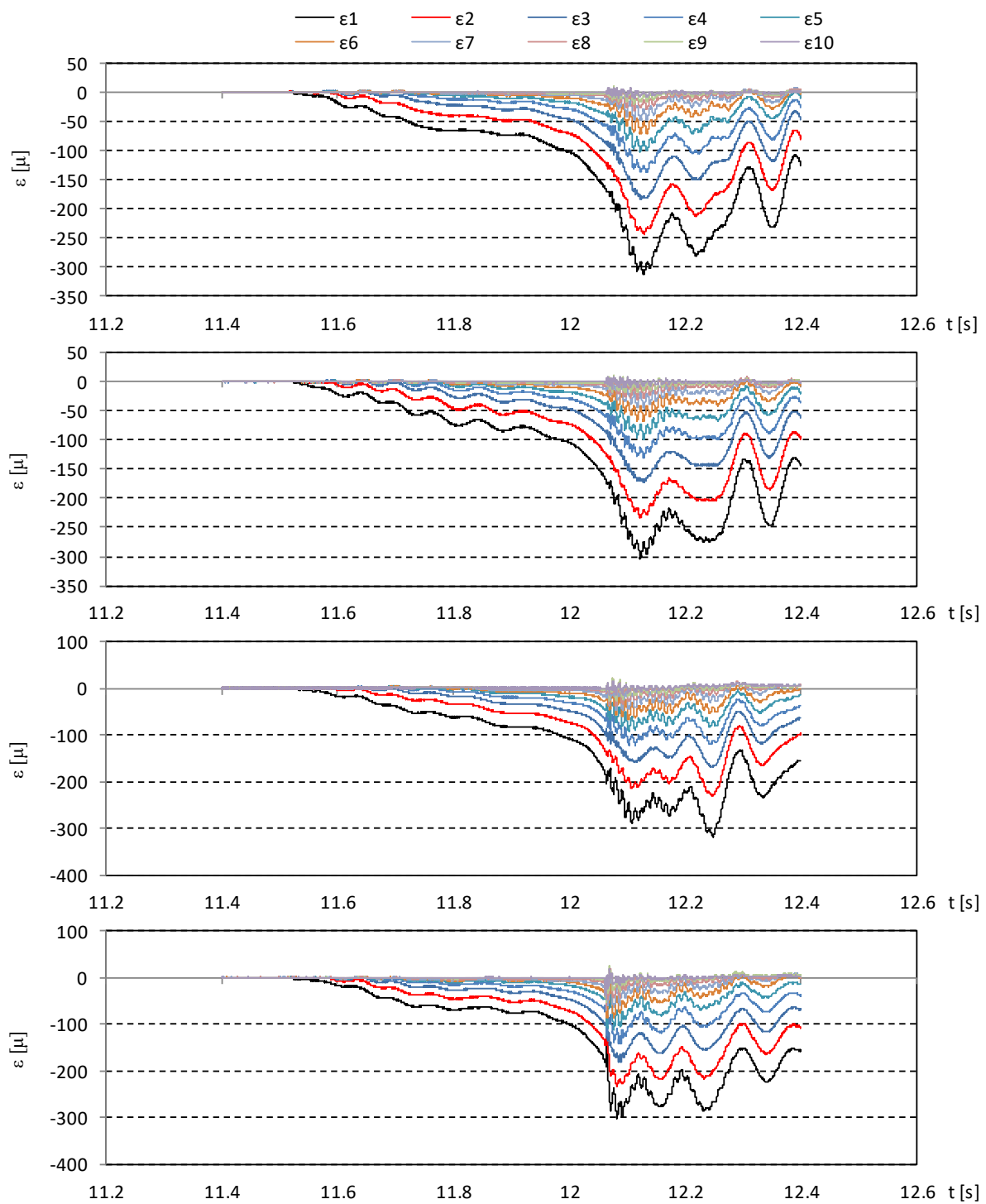


図- 6.3.17 ひずみの時系列 (Wf20, TypeE, 初期位置 4.0m, 14 回目)

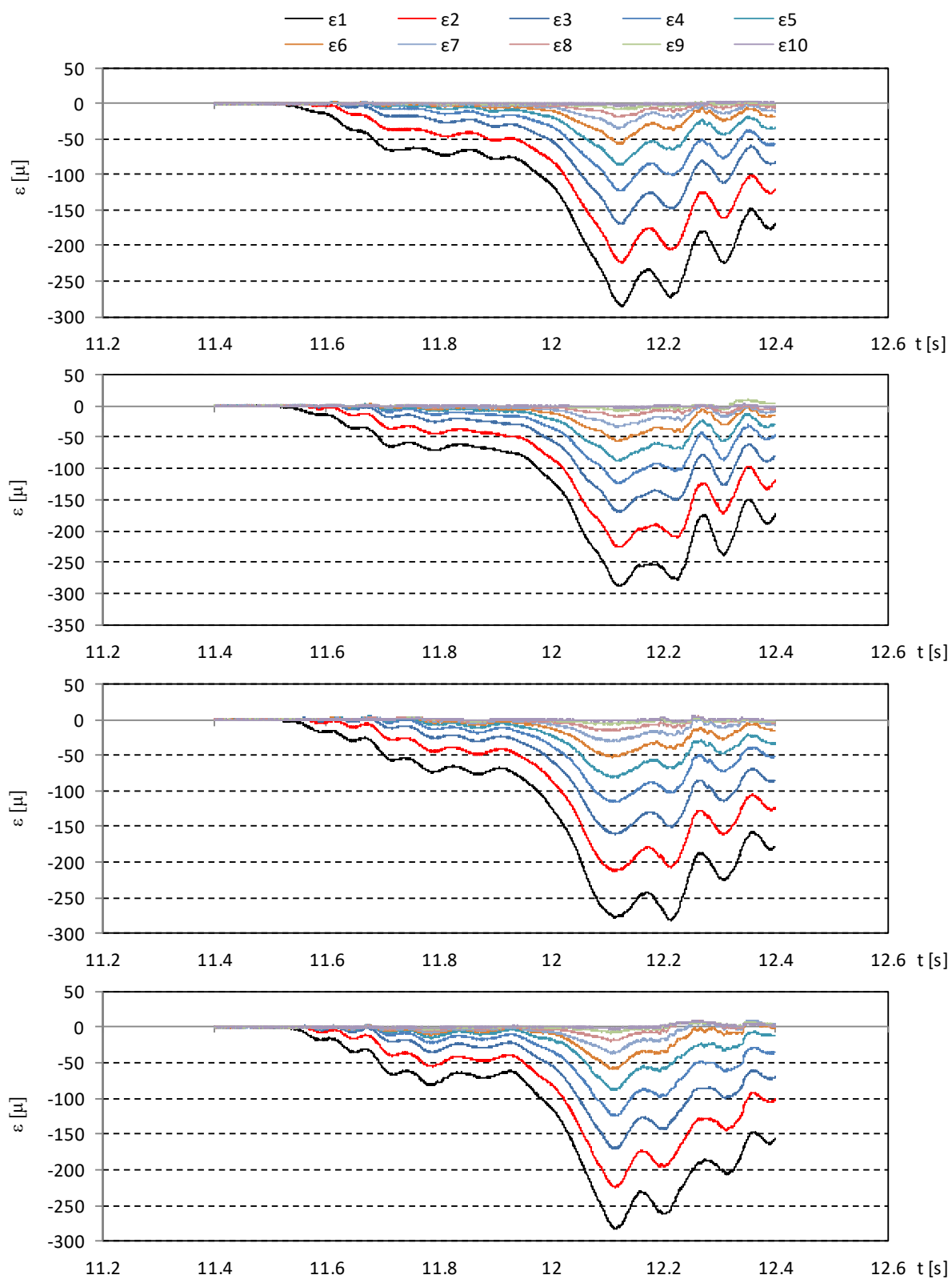


図- 6.3.18 ひずみの時系列 (Wf20, TypeE, 初期位置 5.0m, 1回目)

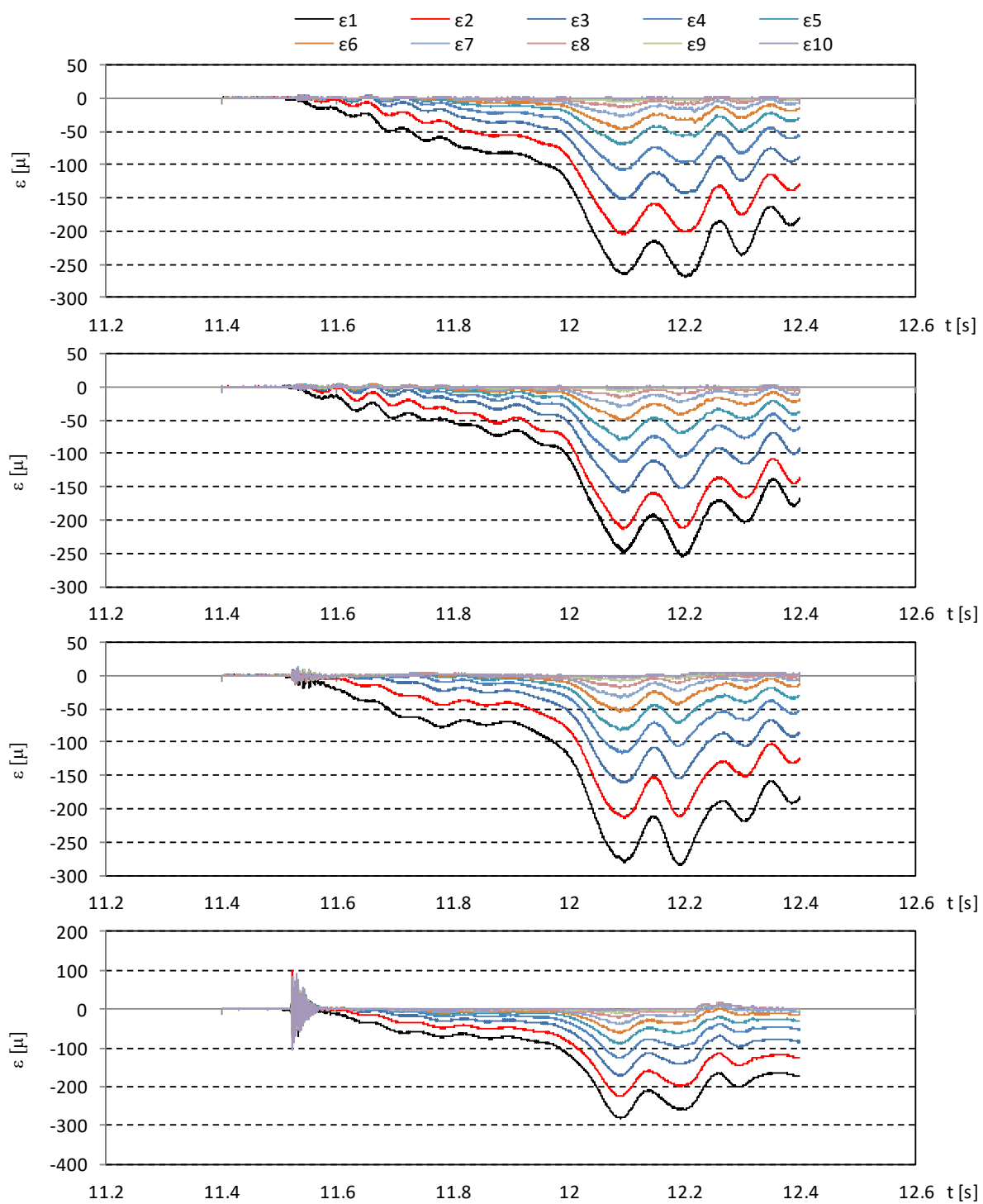


図- 6.3.19 ひずみの時系列 (Wf20, TypeF, 初期位置 2.0m, 14回目)

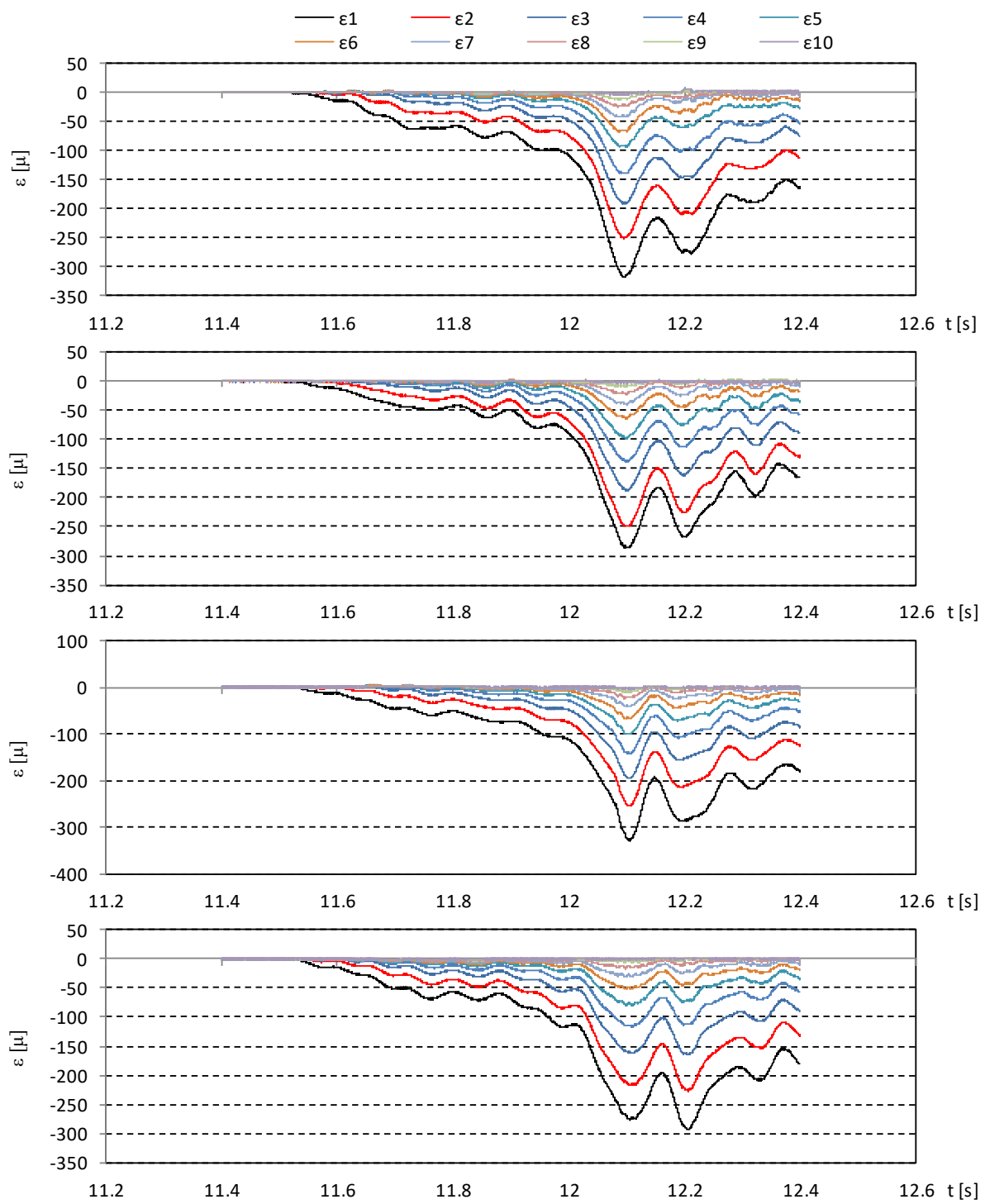


図- 6.3.20 ひずみの時系列 (Wf20, TypeF, 初期位置 4.0m, 1回目)

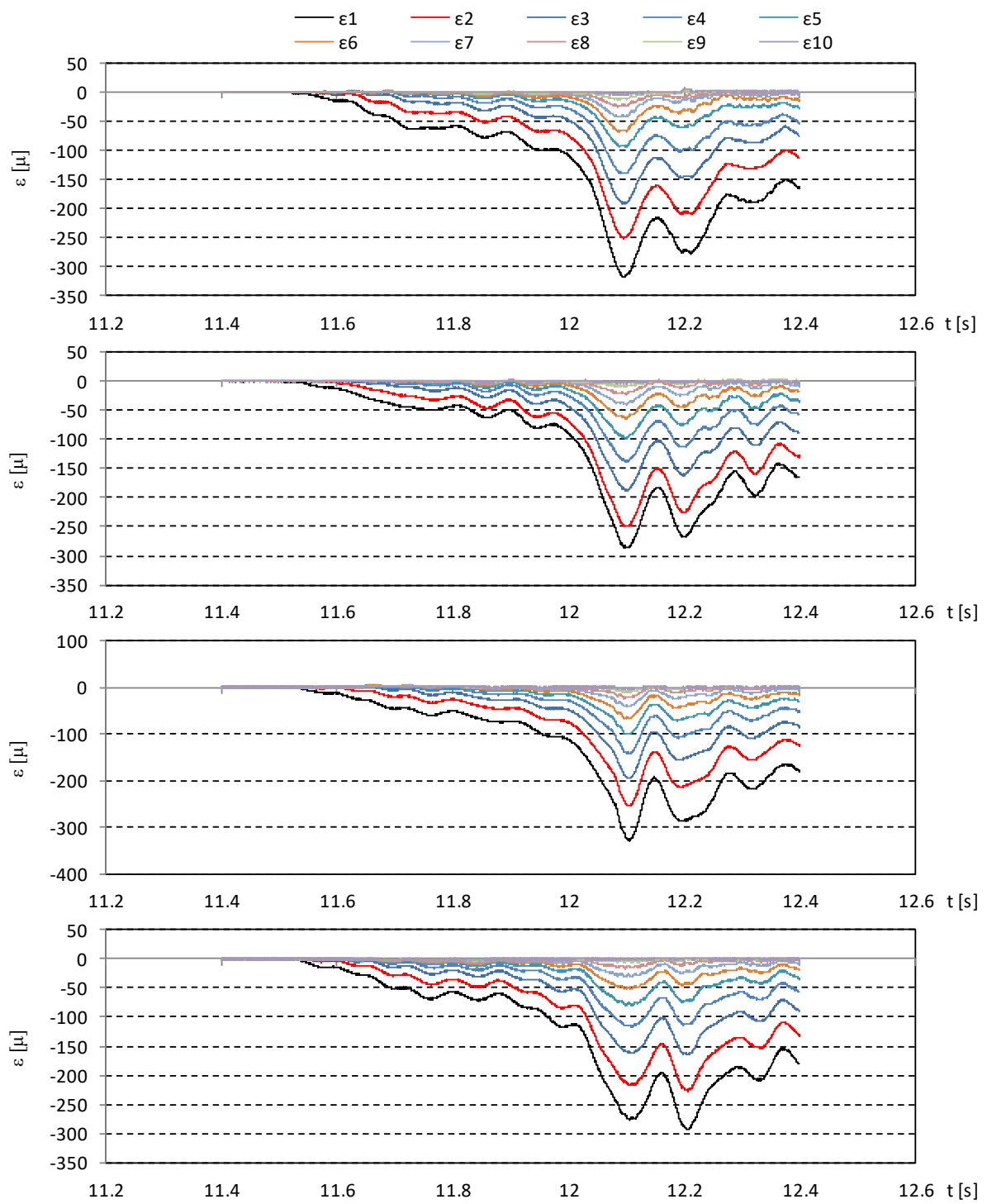


図- 6.3.21 ひずみの時系列 (Wf20, TypeF, 初期位置 5.0m, 6 回目)

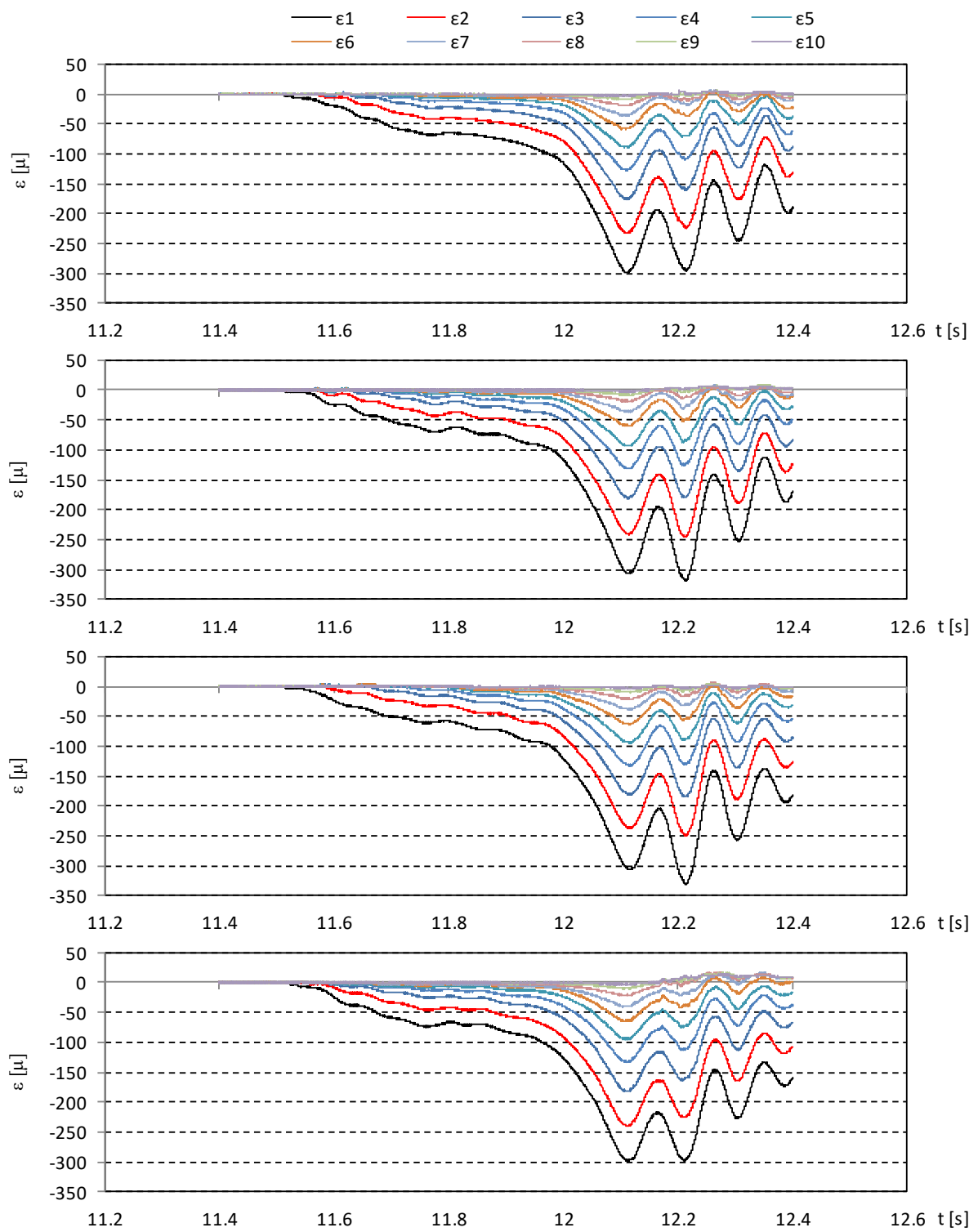


図- 6.3.22 ひずみの時系列 (Wf20, TypeF, 初期位置 5.5m, 1回目)

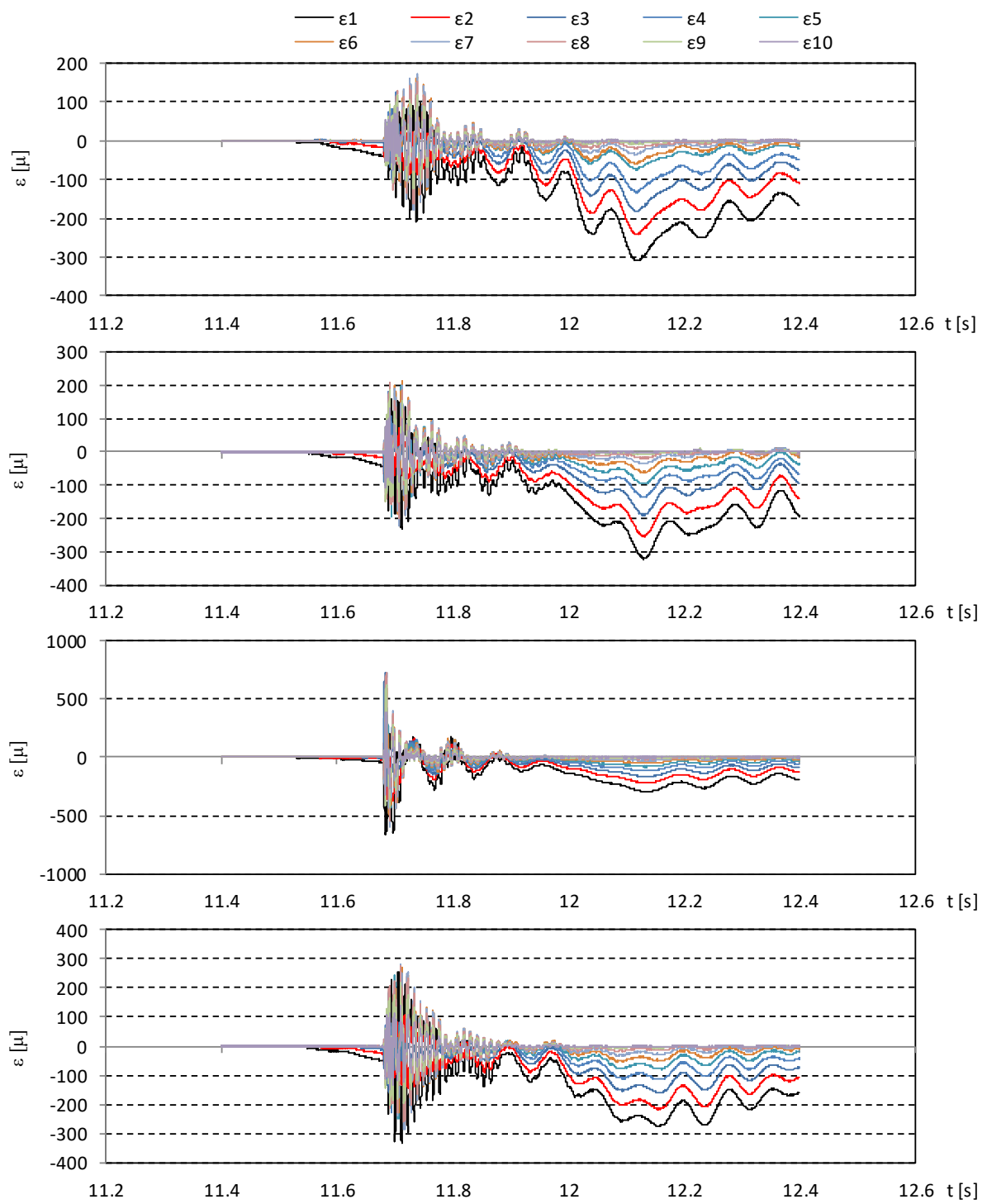


図- 6.3.23 ひずみの時系列 (Wf20, TypeG, 初期位置 2.0m, 4回目)

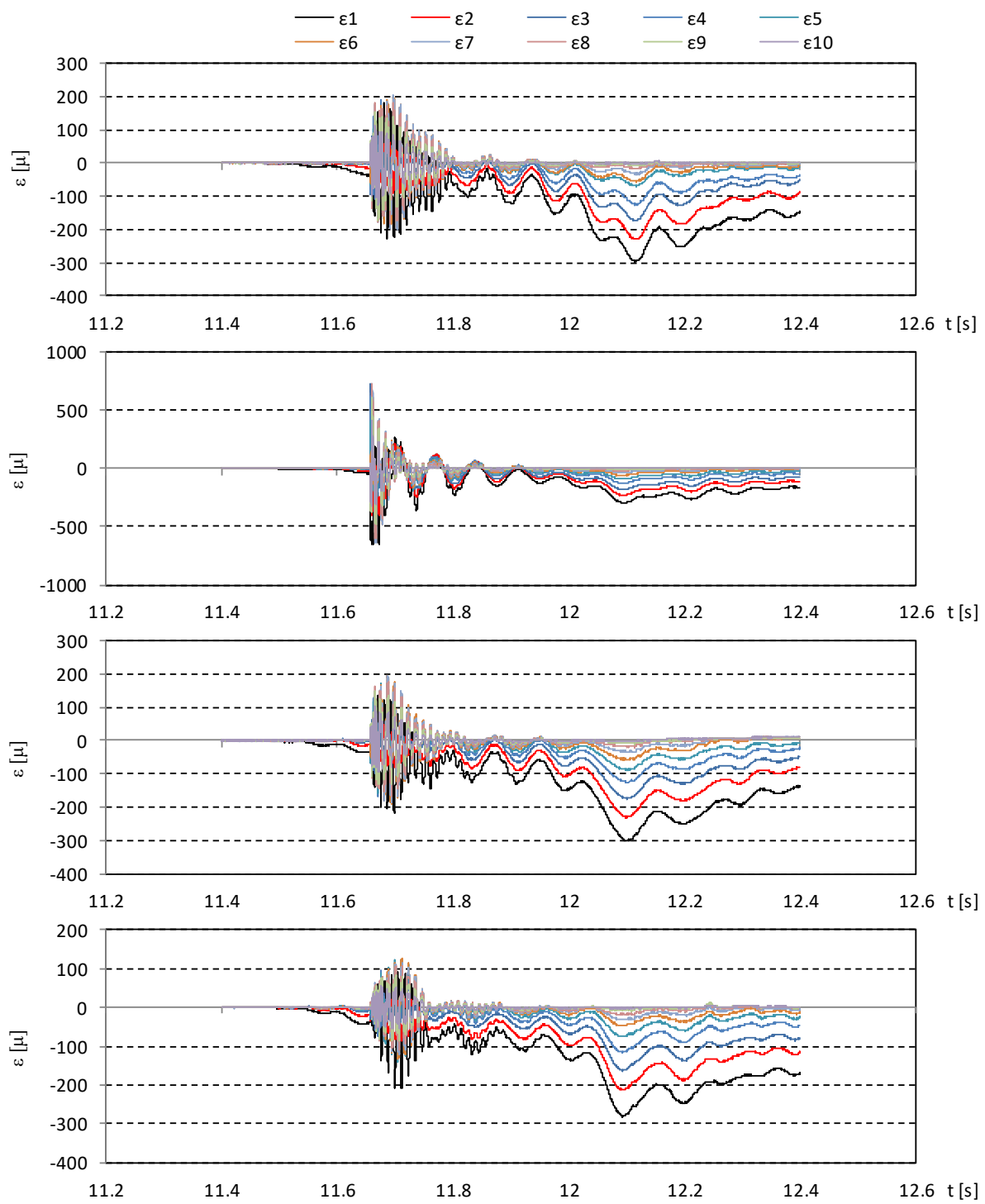


図- 6.3.24 ひずみの時系列 (Wf20, TypeG, 初期位置 4.0m, 8回目)

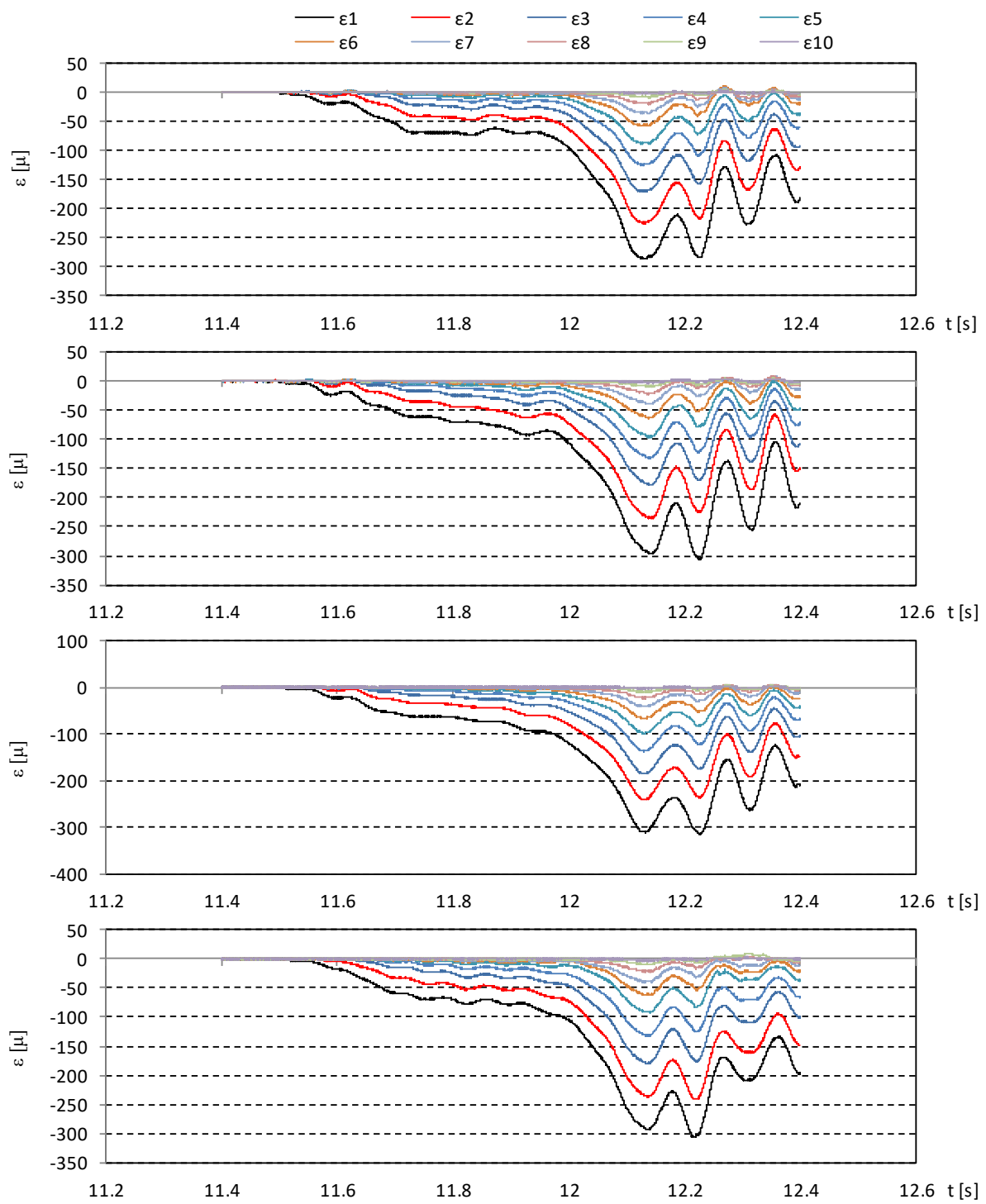


図- 6.3.25 ひずみの時系列 (Wf20, TypeG, 初期位置 5.0m, 1回目)

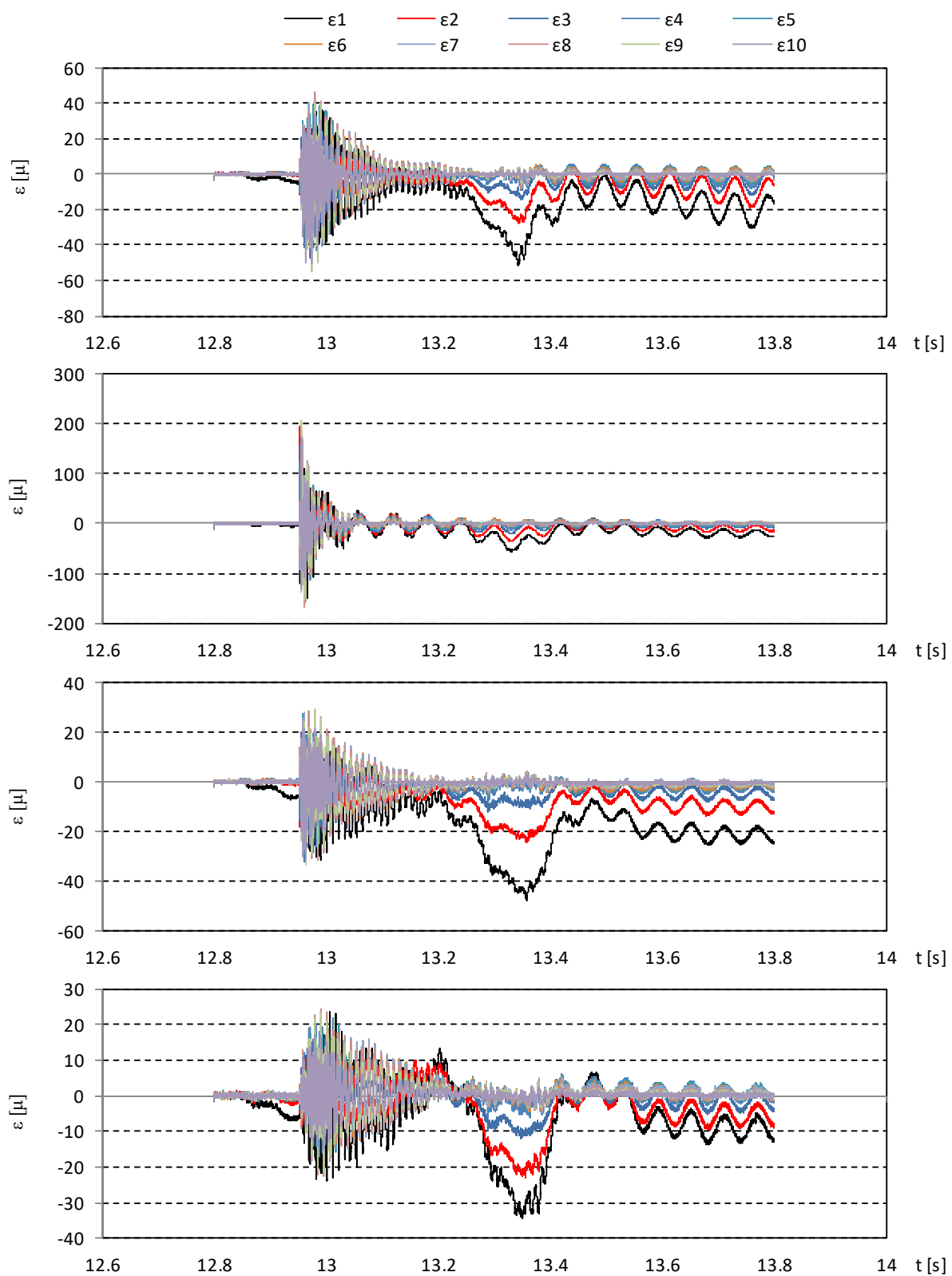


図- 6.3.26 ひずみの時系列 (Wf30, TypeA, 初期位置 0.5m, 2回目)

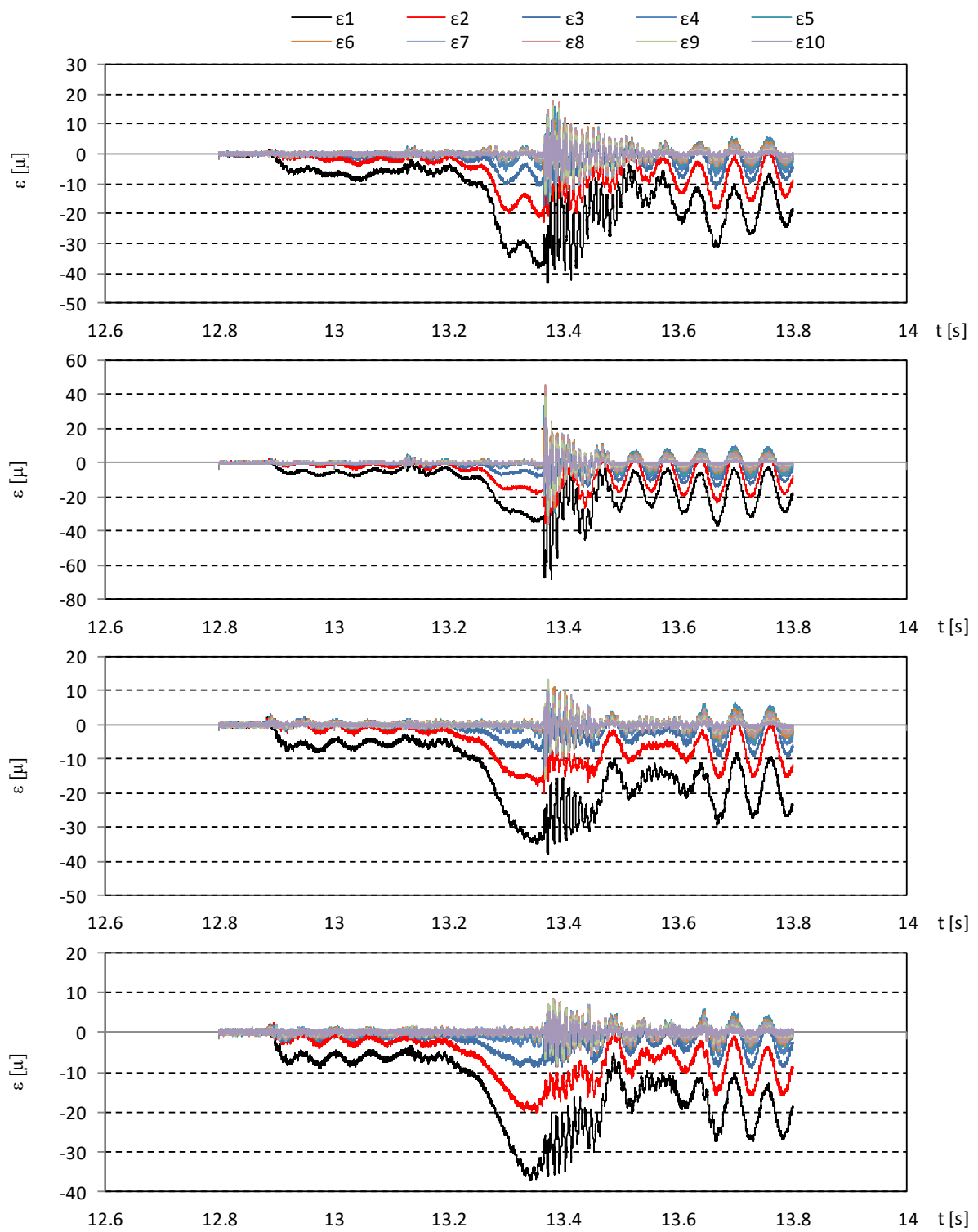


図- 6.3.27 ひずみの時系列 (Wf30, TypeA, 初期位置 0.75m, 2回目)

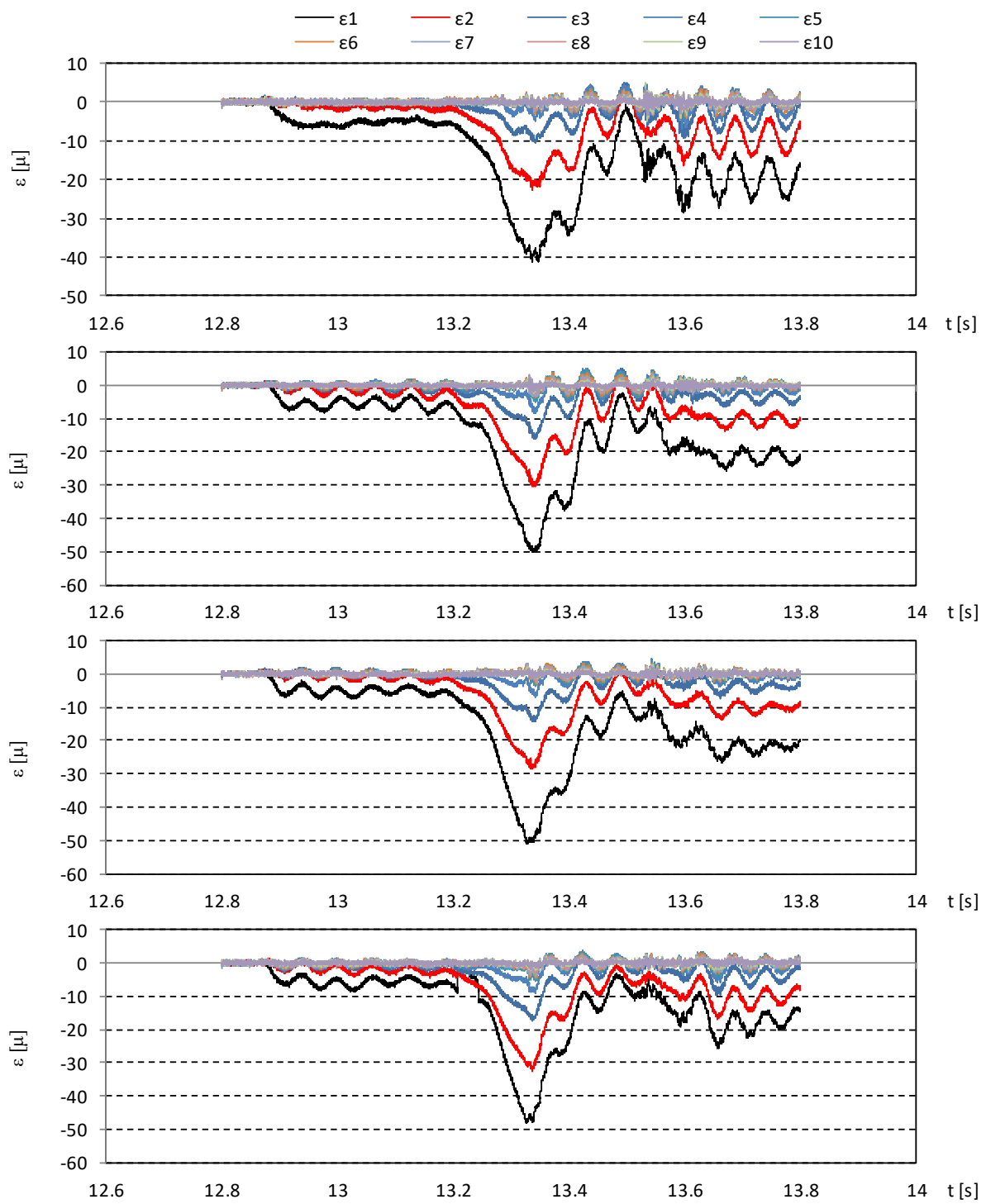


図- 6.3.28 ひずみの時系列 (Wf30, TypeA, 初期位置 1.0m, 1回目)

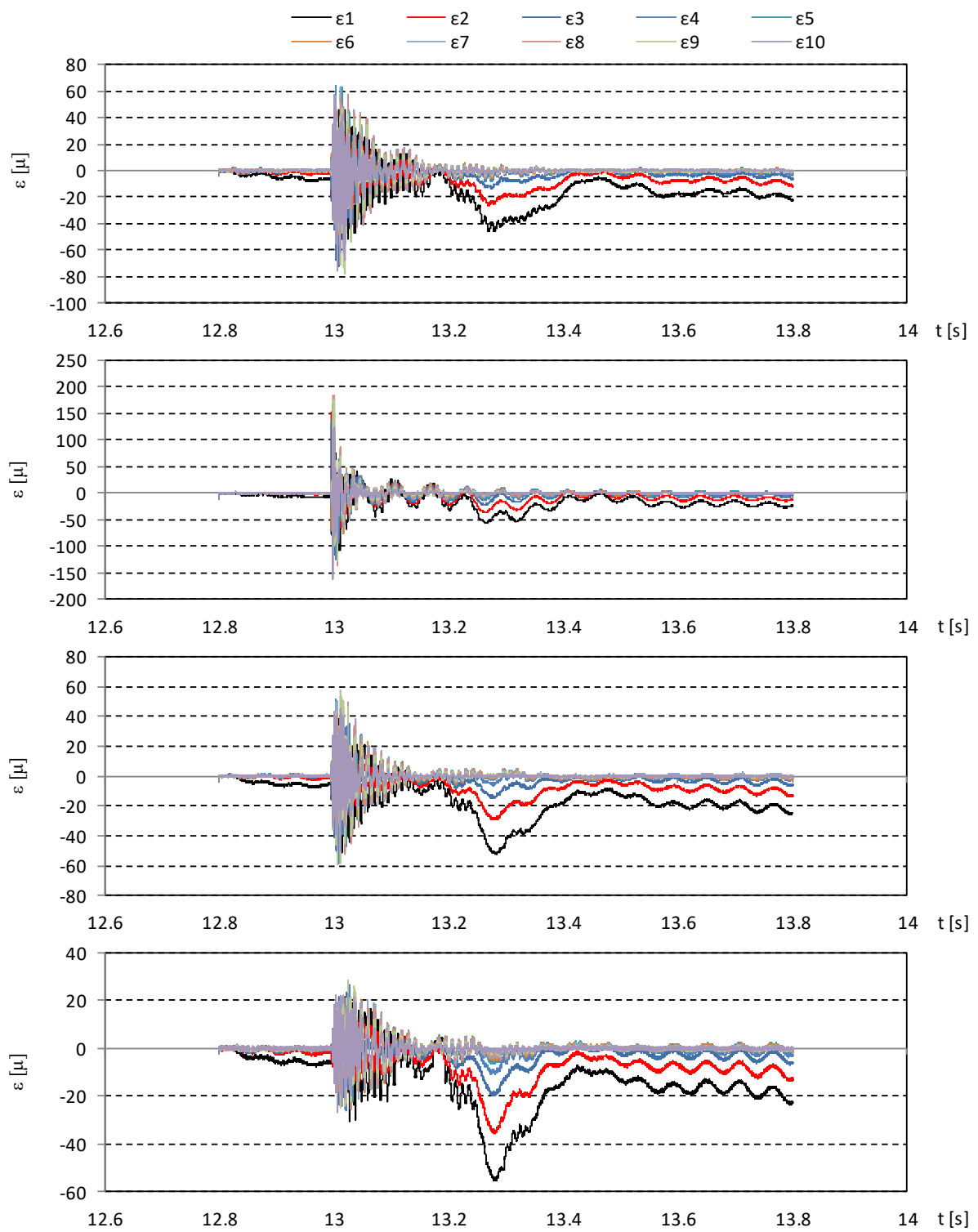


図- 6.3.29 ひずみの時系列 (Wf30, TypeE, 初期位置 0.5m, 12 回目)

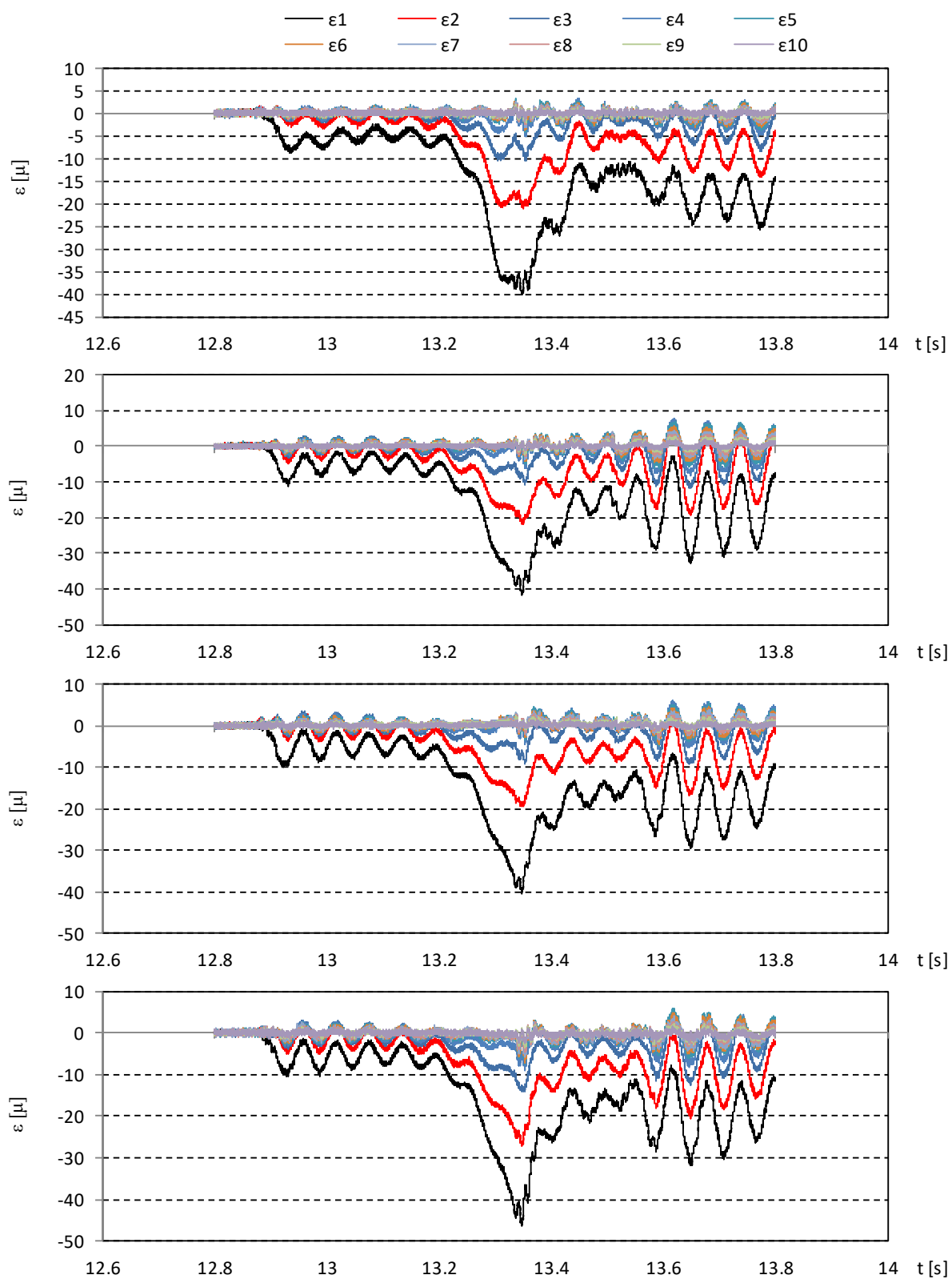


図- 6.3.30 ひずみの時系列 (Wf30, TypeE, 初期位置 0.75m, 1 回目)

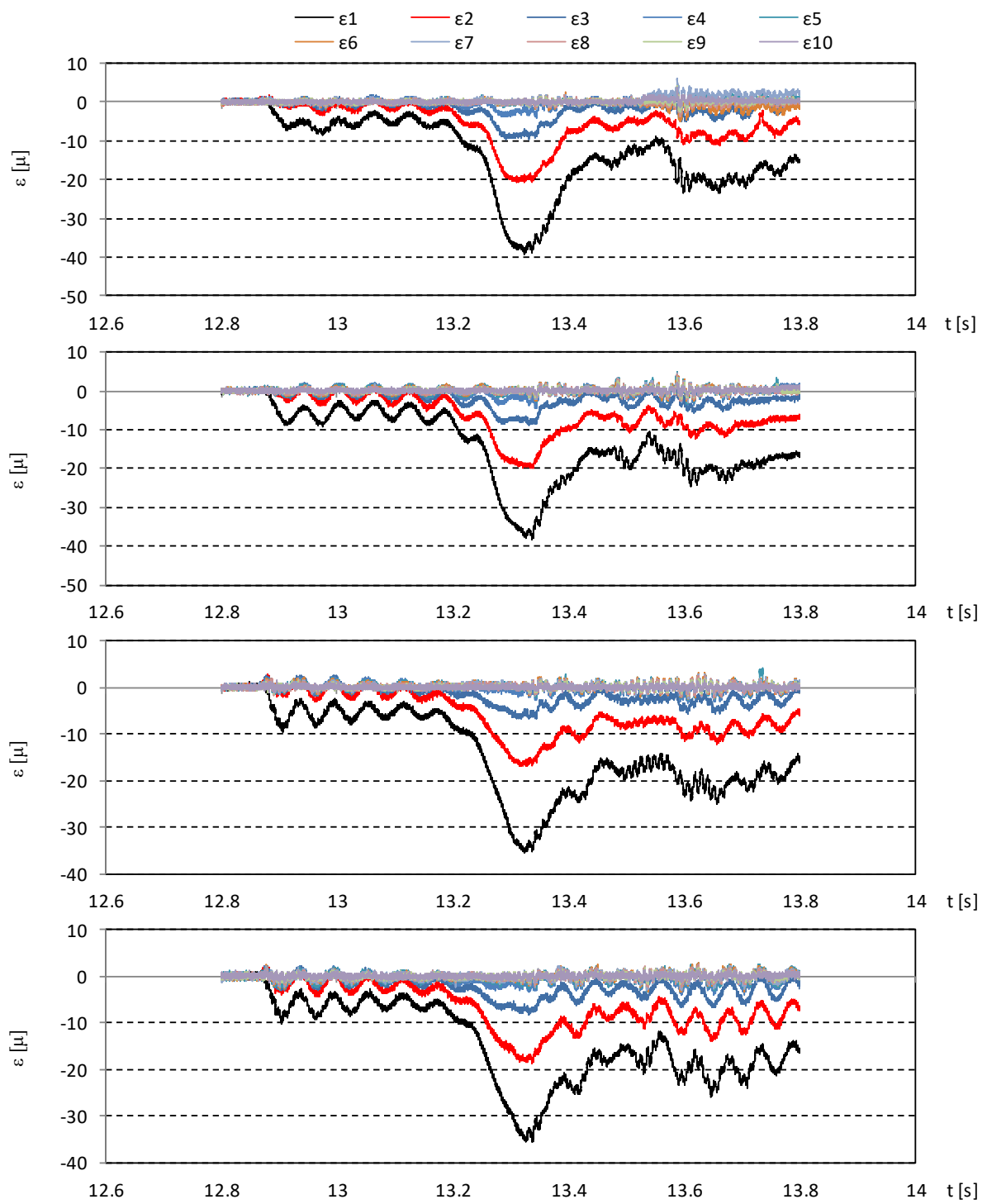


図- 6.3.31 ひずみの時系列 (Wf30, TypeE, 初期位置 1.0m, 1回目)

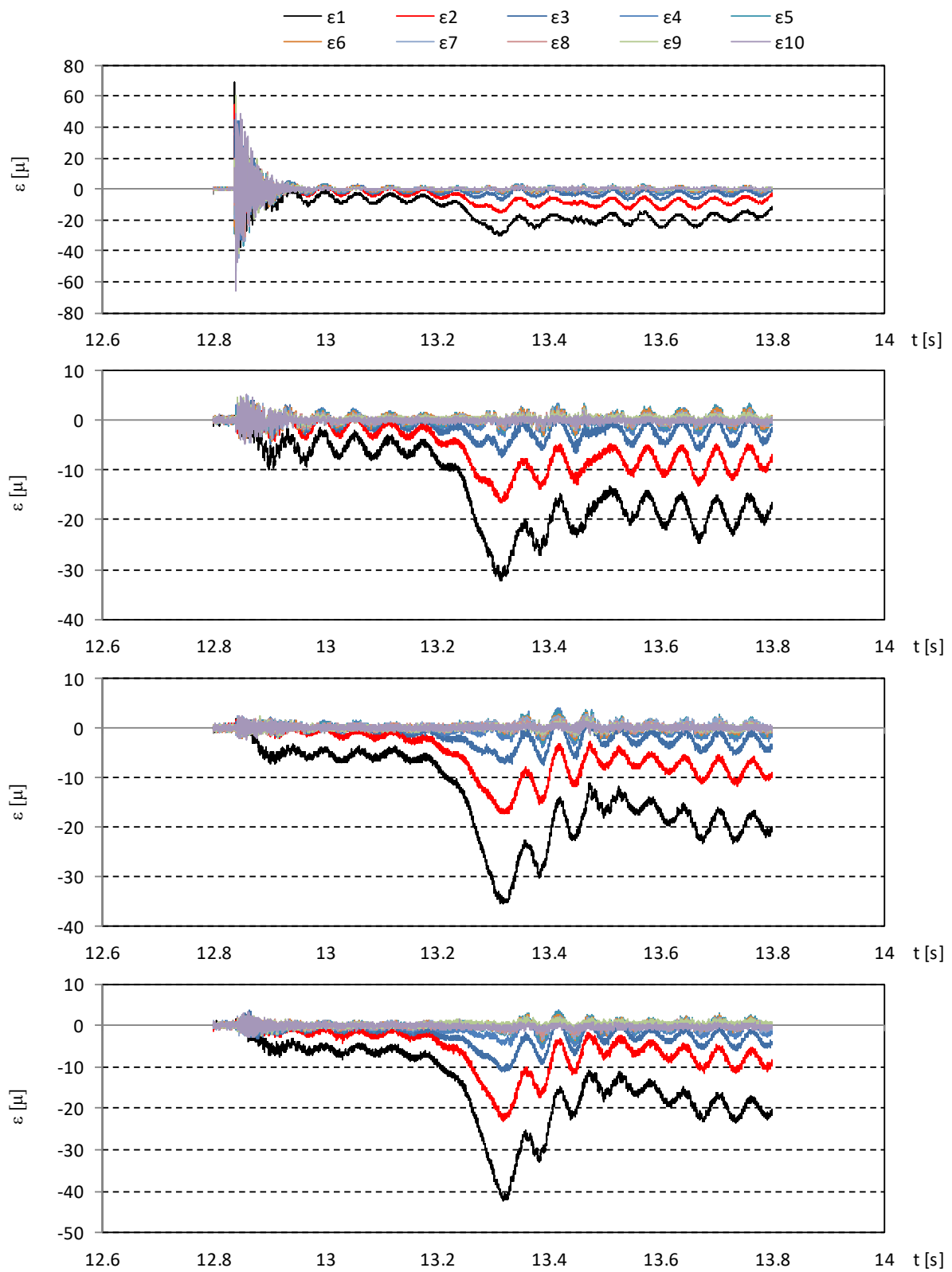


図- 6.3.32 ひずみの時系列 (Wf30, TypeF, 初期位置 0.75m, 5回目)

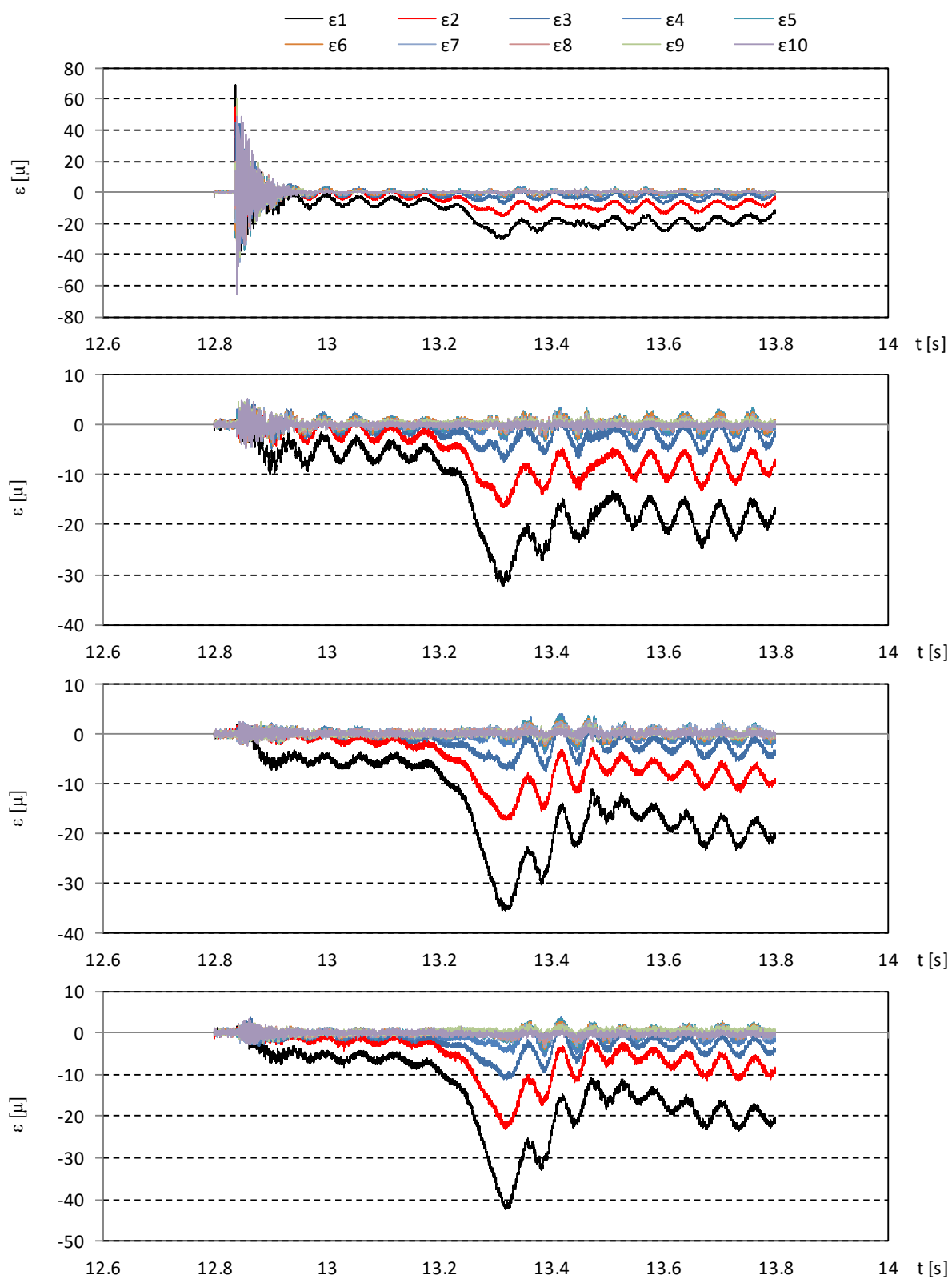


図- 6.3.33 ひずみの時系列 (Wf30, TypeF, 初期位置 1.0m, 1回目)

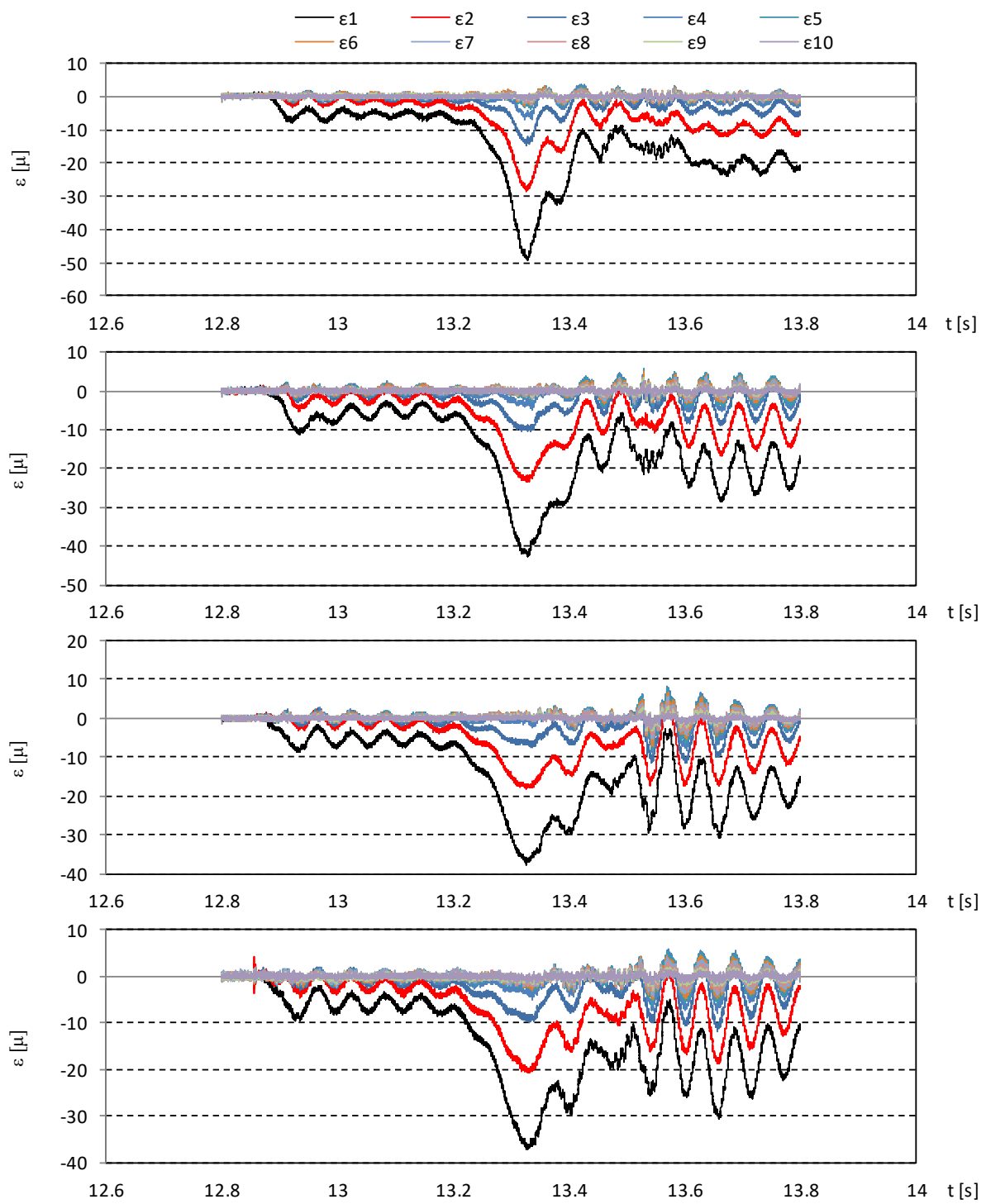


図- 6.3.34 ひずみの時系列 (Wf30, TypeF, 初期位置 1.25m, 1回目)

6.4. ひずみエネルギー

気中衝突試験と同様に、ひずみ鉛直分布分布の計測結果より、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-6.4.1～図-6.4.20に示す。ただし、各ケースにおいて最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。また、衝突しなかったケースについては示していない。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の時系列を示した。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、生じている衝突ひずみエネルギーが小さい場合を除き、顕著な衝突ひずみエネルギーが生じている場合には、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ことが分かる。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-6.4.1にまとめる。

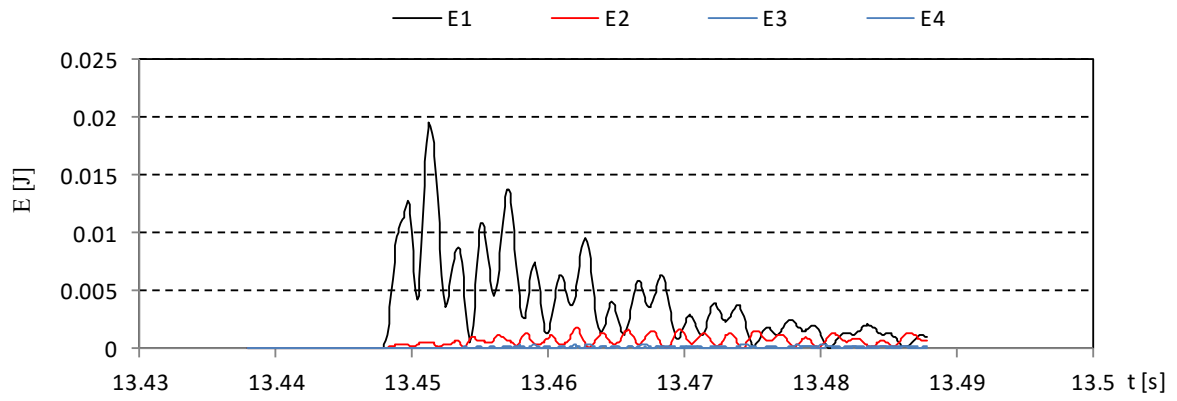


図-6.4.1 ひずみエネルギーの時系列 (Wf10, TypeA, 初期位置 1.0m, 7回目)

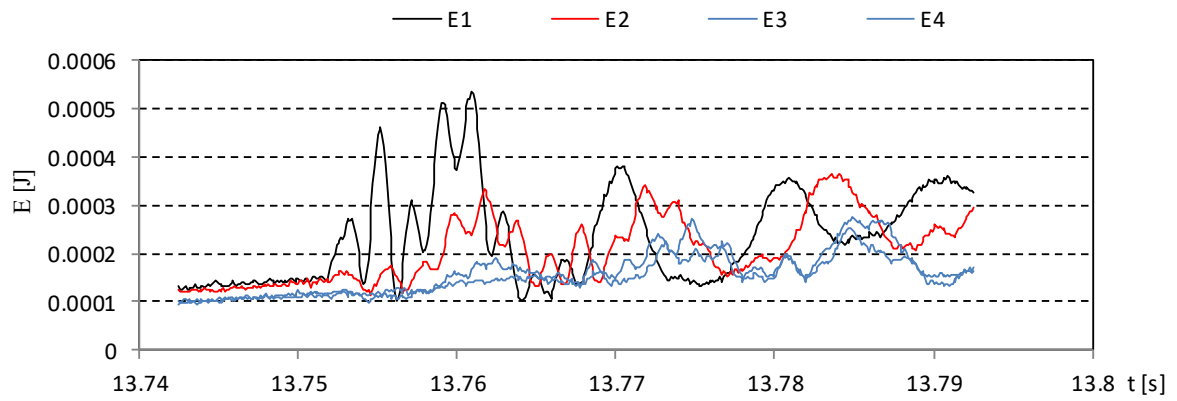


図-6.4.2 ひずみエネルギーの時系列 (Wf10, TypeA, 初期位置 1.5m, 9回目)

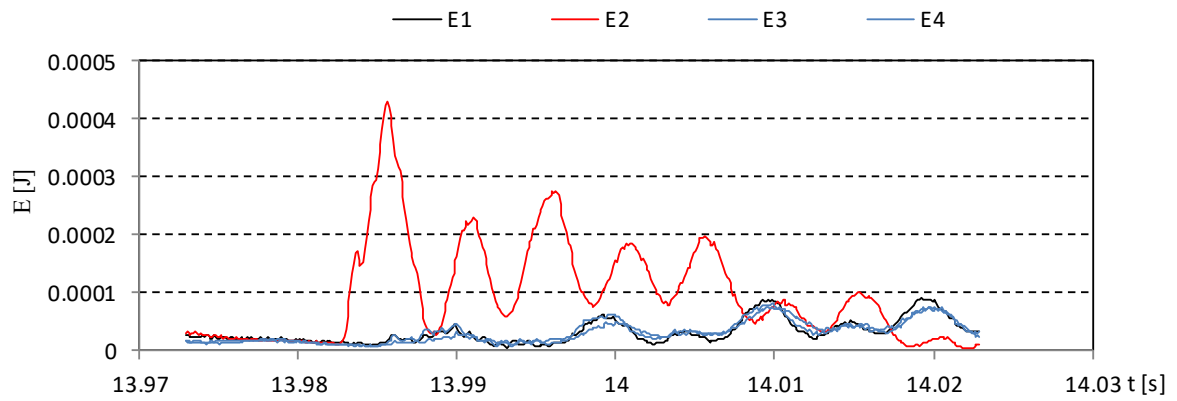


図-6.4.3 ひずみエネルギーの時系列 (Wf10, TypeA, 初期位置 2.0m, 12回目)

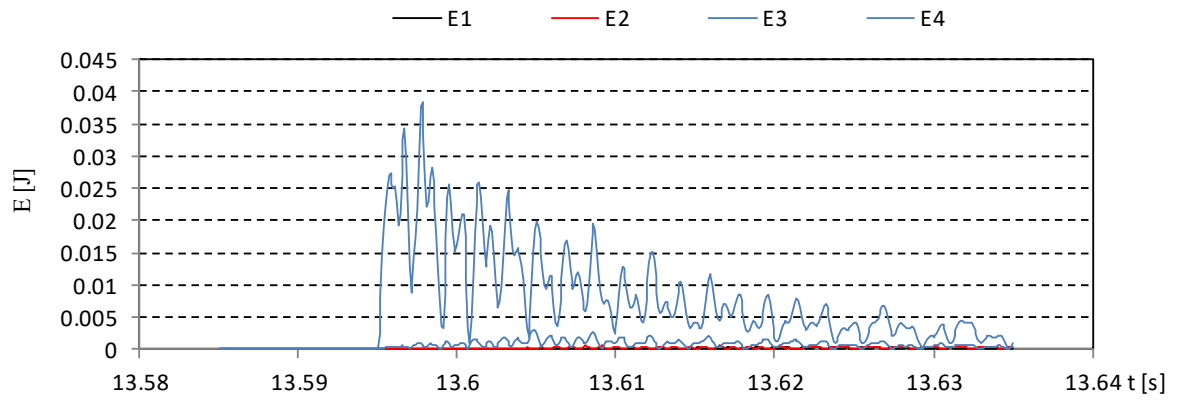


図- 6.4.4 ひずみエネルギーの時系列 (Wf10, TypeE, 初期位置 1.0m, 10回目)

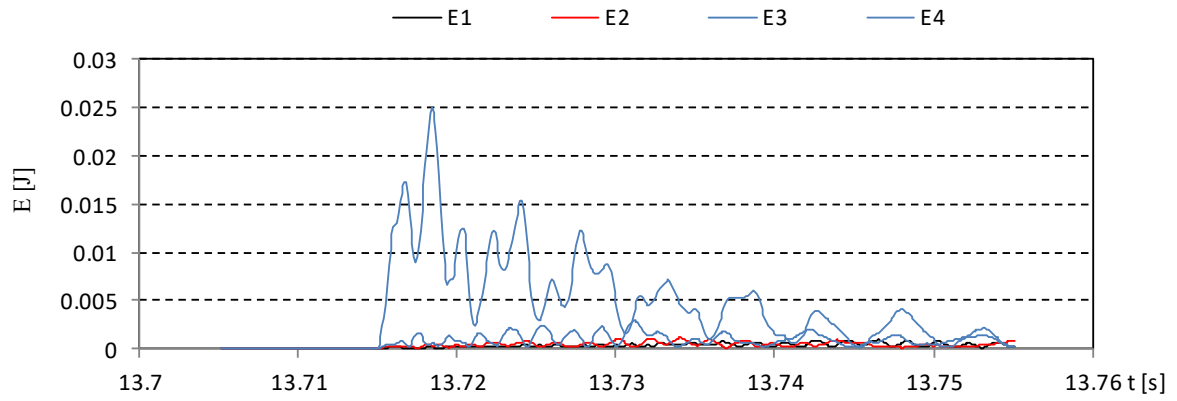


図- 6.4.5 ひずみエネルギーの時系列 (Wf10, TypeE, 初期位置 1.5m, 2回目)

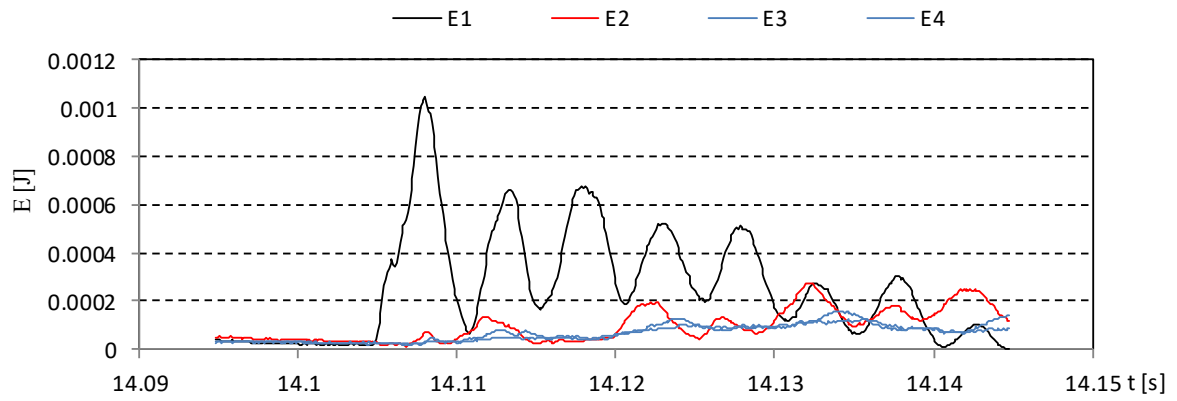


図- 6.4.6 ひずみエネルギーの時系列 (Wf10, TypeE, 初期位置 2.0m, 2回目)

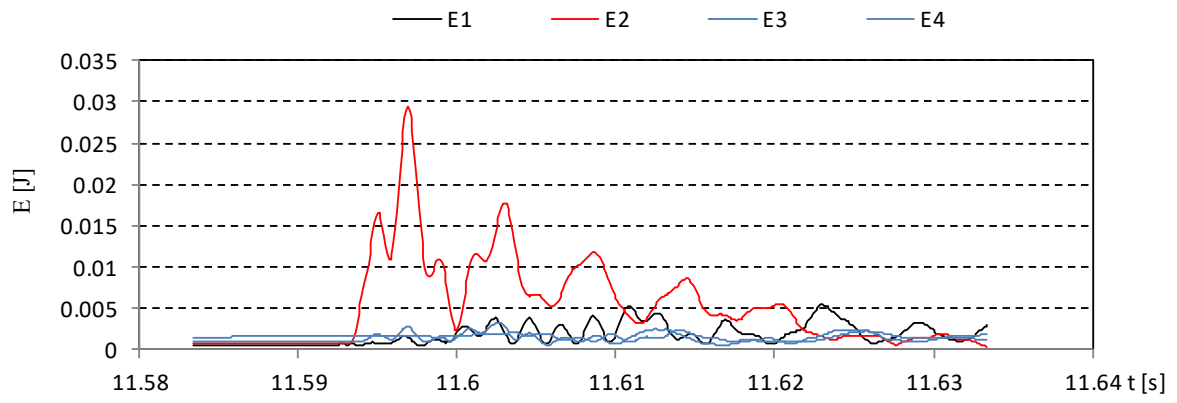


図- 6.4.7 ひずみエネルギーの時系列 (Wf20, TypeA, 初期位置 2.0m, 11 回目)

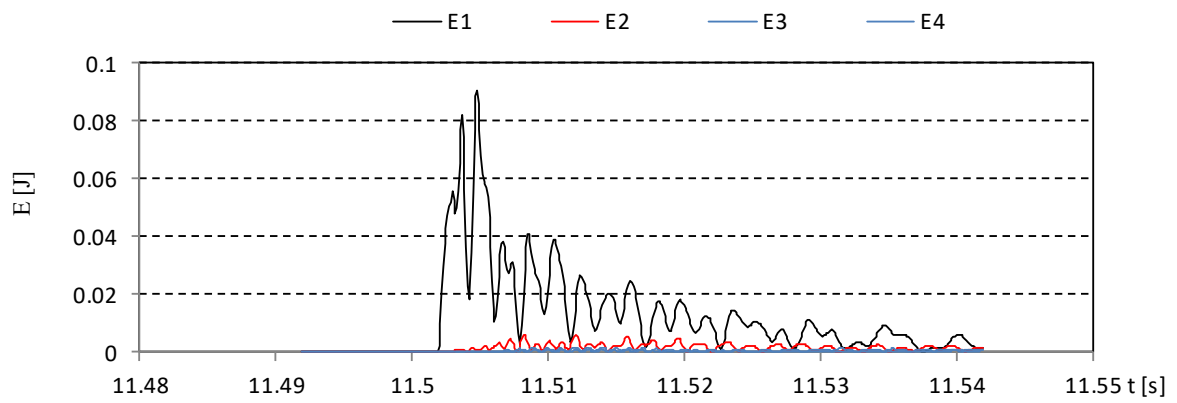


図- 6.4.8 ひずみエネルギーの時系列 (Wf20, TypeA, 初期位置 2.5m, 6 回目)

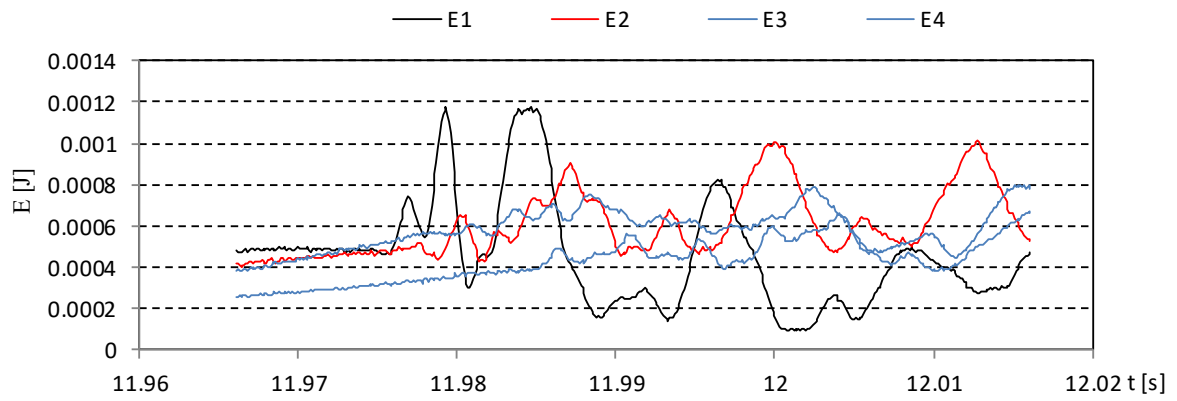


図- 6.4.9 ひずみエネルギーの時系列 (Wf20, $l_d=1.25\text{m}$, TypeA, 初期位置 2.0m, 11 回目)

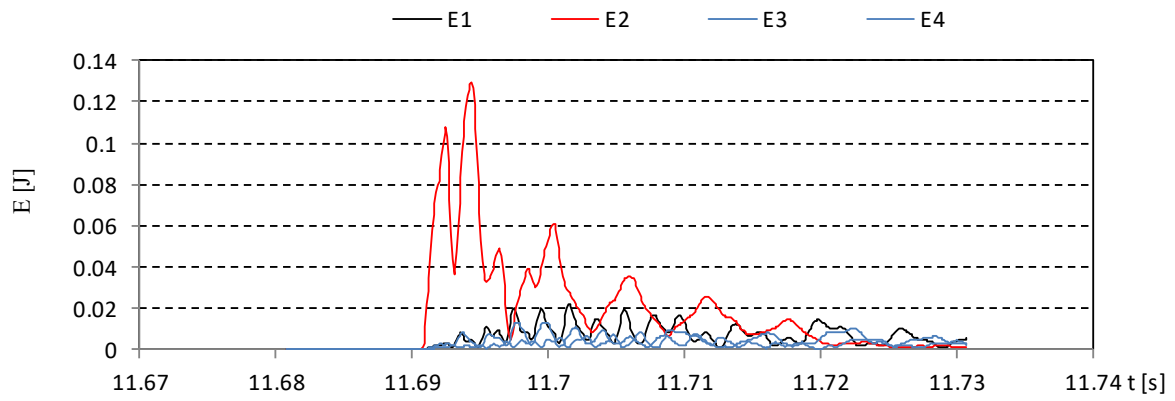


図- 6.4.10 ひずみエネルギーの時系列 (Wf20, TypeE, 初期位置 2.0m, 7回目)

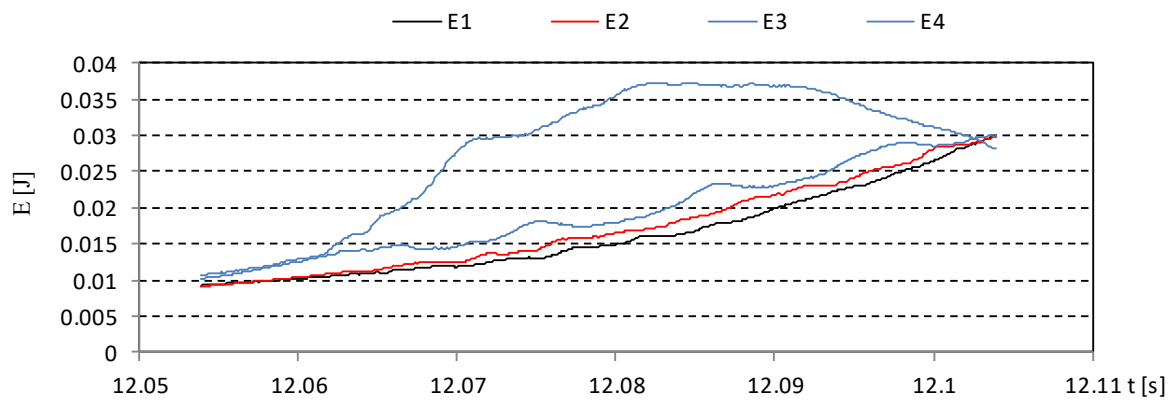


図- 6.4.11 ひずみエネルギーの時系列 (Wf20, TypeE, 初期位置 4.0m, 14回目)

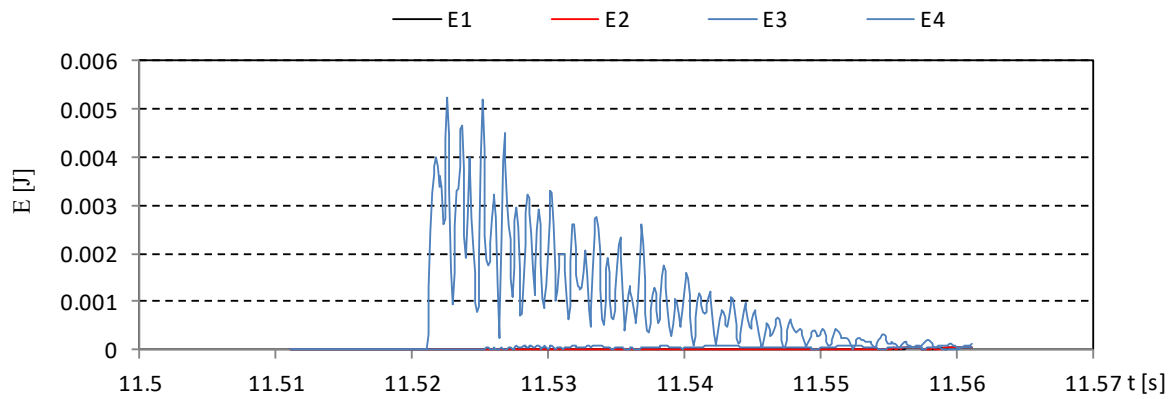


図- 6.4.12 ひずみエネルギーの時系列 (Wf20, TypeF, 初期位置 2.0m, 14回目)

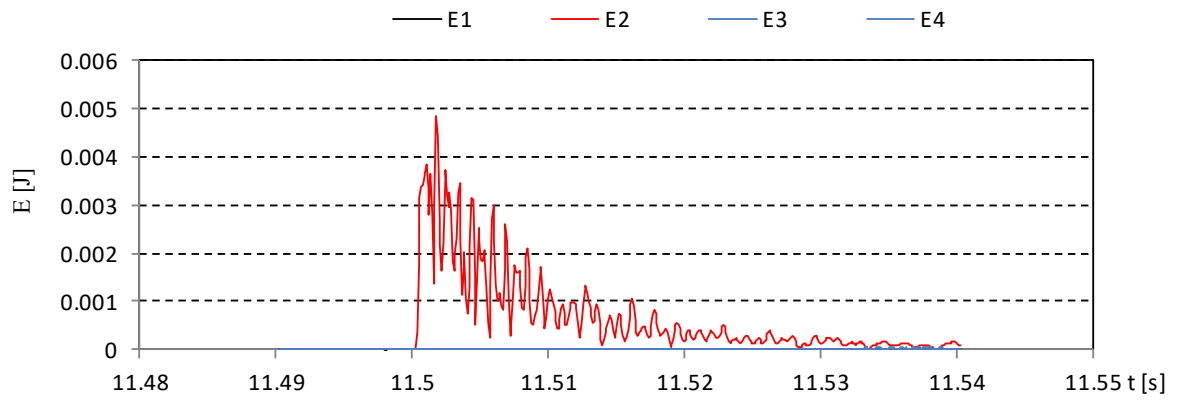


図- 6.4.13 ひずみエネルギーの時系列 (Wf20, TypeF, 初期位置 5.0m, 6 回目)

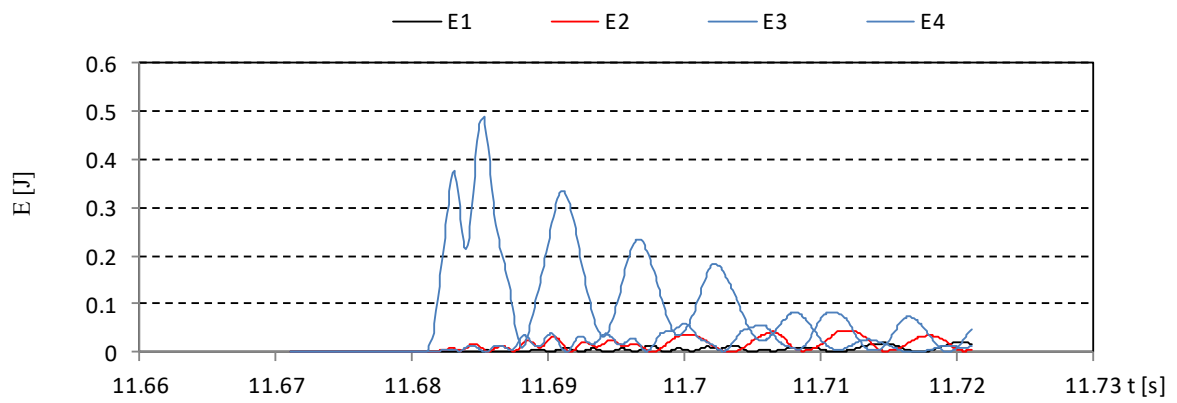


図- 6.4.14 ひずみエネルギーの時系列 (Wf20, TypeG, 初期位置 2.0m, 4 回目)

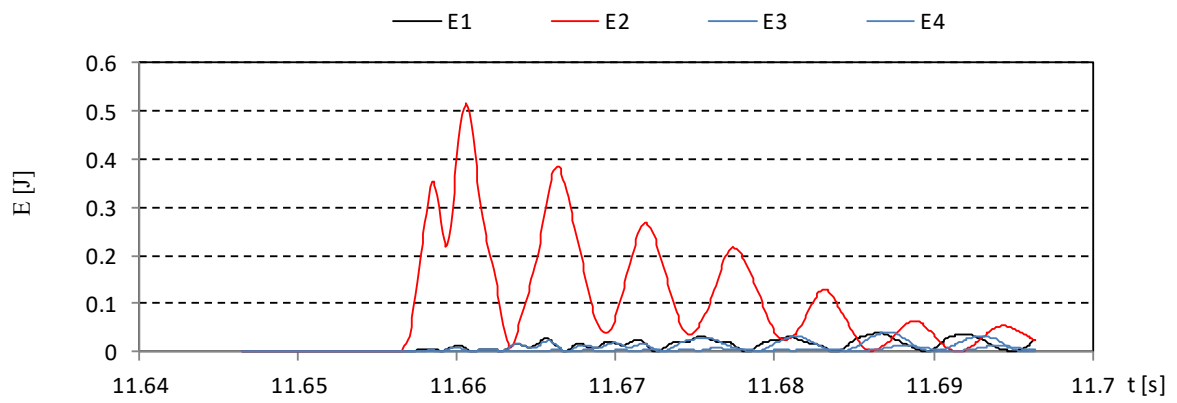


図- 6.4.15 ひずみエネルギーの時系列 (Wf20, TypeG, 初期位置 4.0m, 8 回目)

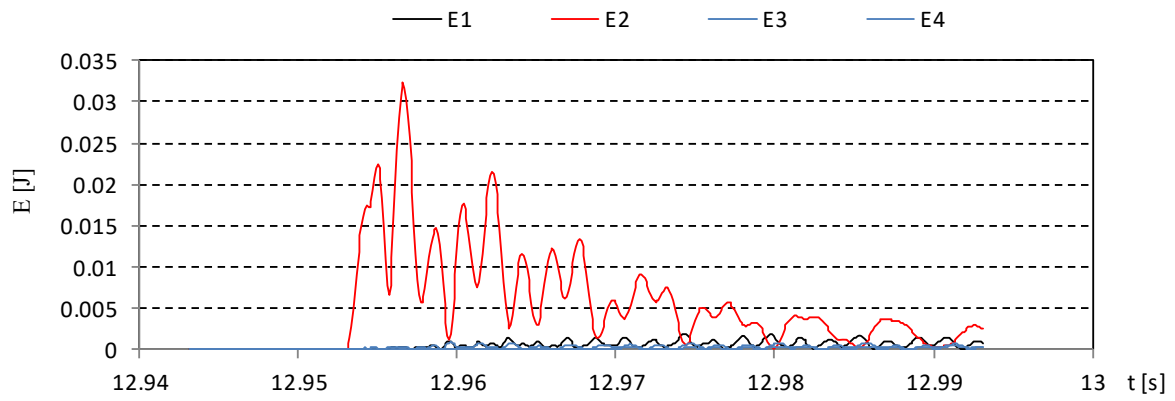


図- 6.4.16 ひずみエネルギーの時系列 (Wf30, TypeA, 初期位置 0.5m, 2回目)

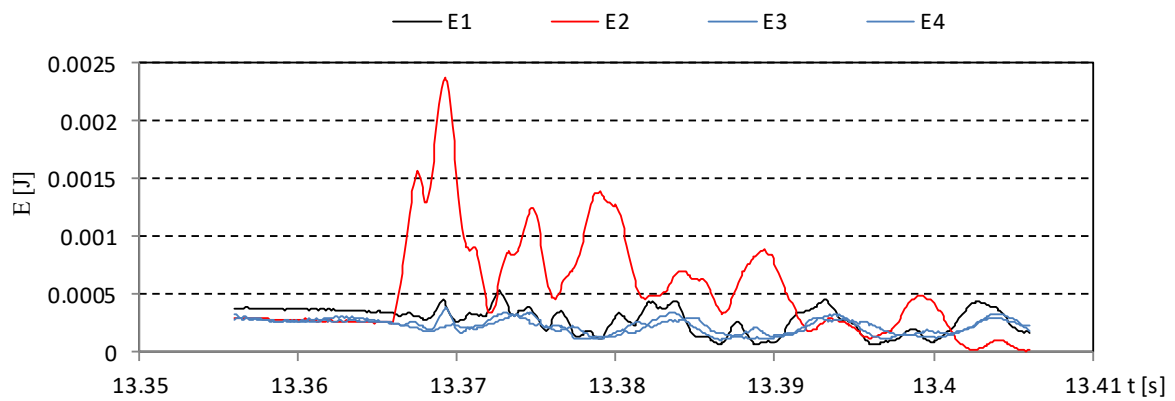


図- 6.4.17 ひずみエネルギーの時系列 (Wf30, TypeA, 初期位置 0.75m, 2回目)

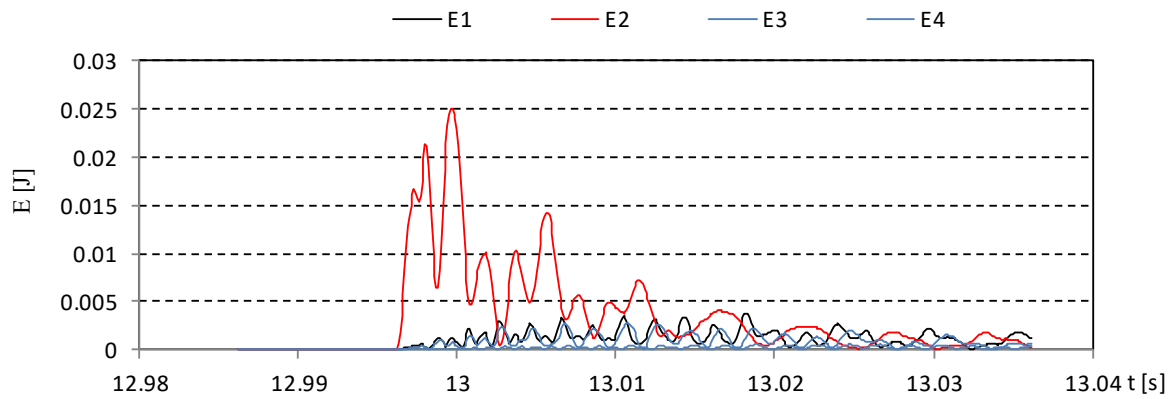


図- 6.4.18 ひずみエネルギーの時系列 (Wf30, TypeE, 初期位置 0.5m, 12回目)

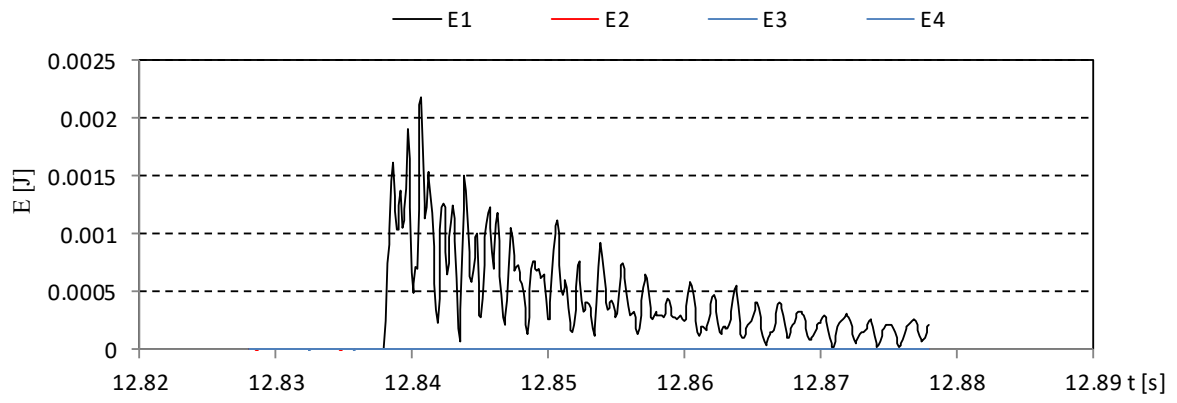


図- 6.4.19 ひずみエネルギーの時系列 (Wf30, TypeF, 初期位置 0.75m, 5回目)

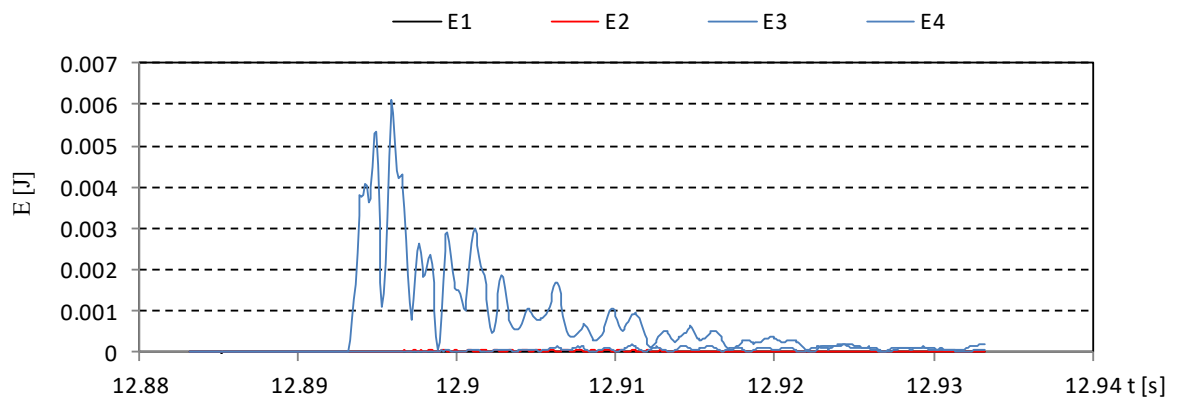


図- 6.4.20 ひずみエネルギーの時系列 (Wf30, TypeF, 初期位置 1.0m, 1回目)

表- 6.4.1 堤体に働く最大衝突ひずみエネルギー

(a) Wf10

($\times 10^{-2}$ 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
Wf10	A	1.0m	0.70	0.06					1.95			0.02	0.24	0.14				0.52	1.95	0.02
Wf10	A	1.5m									0.05							0.05	0.05	0.05
Wf10	A	2.0m												0.04				0.04	0.04	0.04
Wf10	E	1.0m	0.04	0.02		2.92	1.90	2.45	0.02	2.14	2.05	3.84	0.04	0.51	3.07	1.77	0.89	1.55	3.84	0.02
Wf10	E	1.5m		2.50					0.02	0.08	0.06				1.85			0.90	2.50	0.02
Wf10	E	2.0m		0.11							0.02							0.06	0.11	0.02

(b) Wf20

($\times 10^{-2}$ 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
Wf20	A	2.0m												2.94				2.94	2.94	2.94
Wf20	A	2.5m			0.18	3.93		9.07	0.71						0.22			2.82	9.07	0.18
Wf20	A	4.0m																0.00	0.00	0.00
Wf20	A	5.0m																0.00	0.00	0.00
Wf20(1.25)	A	2.0m	0.01	0.05		0.09							0.12					0.07	0.12	0.01
Wf20(1.25)	A	4.0m																0.00	0.00	0.00
Wf20(1.25)	A	5.0m																0.00	0.00	0.00
Wf20	E	2.0m		1.16			12.52		12.95					0.10	0.04			5.35	12.95	0.04
Wf20	E	4.0m								0.26				1.22		3.73		1.74	3.73	0.26
Wf20	E	5.0m																0.00	0.00	0.00
Wf20	F	2.0m		0.01		0.36	0.03		0.14	0.33	0.01	0.10	0.10		0.03	0.52	0.41	0.19	0.52	0.01
Wf20	F	4.0m																0.00	0.00	0.00
Wf20	F	5.0m	0.46				0.09	0.48				0.00						0.26	0.48	0.00
Wf20	F	5.5m																0.00	0.00	0.00
Wf20	G	2.0m				48.73		0.26					5.13					18.04	48.73	0.26
Wf20	G	4.0m								51.62								51.62	51.62	51.62
Wf20	G	5.0m																0.00	0.00	0.00

(c) Wf30

($\times 10^{-2}$ 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
Wf30	A	0.5m	0.00	3.24	0.54	0.75	0.33	0.55	1.01	0.56	1.46	0.37		3.02		0.63	2.35	1.14	3.24	0.00
Wf30	A	0.75m		0.24											0.16			0.20	0.24	0.16
Wf30	A	1.0m																0.00	0.00	0.00
Wf30	E	0.5m	0.74	1.23	2.40	0.00	1.62	1.72	1.71	1.72	0.00	1.59	1.66	2.49	2.16	1.60	2.47	1.54	2.49	0.00
Wf30	E	0.75m																0.00	0.00	0.00
Wf30	E	1.0m																0.00	0.00	0.00
Wf30	F	0.75m	0.04		0.13	0.01	0.22	0.13	0.21	0.03	0.02	0.08	0.19	0.18	0.00	0.17	0.02	0.10	0.22	0.00
Wf30	F	1.0m	0.61	0.33				0.13	0.05		0.37		0.11	0.52		0.04	0.08	0.25	0.61	0.04
Wf30	F	1.25m																0.00	0.00	0.00

6.5. 衝突高さと衝突速度

表- 6.5.1 に、各試行回の試験において漂流物が堤体模型に衝突した位置の高さを、また、表- 6.5.2 に、衝突直前の衝突速度を示す。衝突高さや衝突速度は、高速度カメラの画像より読み取った。なお、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、移動時間で移動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。

表- 6.5.1 衝突高さ

(a) Wf10 (m)

波形	Type	初期位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Wf10	A	1.0m	0.11	0.125					0.1			0.08	0.15	0.165			
Wf10	A	1.5m									0.145						
Wf10	A	2.0m												0.255			
Wf10	E	1.0m	0.1	0.06		0.095	0.13	0.125	0.065	0.09	0.1	0.065	0.215	0.18	0.085	0.09	0.13
Wf10	E	1.5m		0.125				0.21		0.22	0.33					0.125	
Wf10	E	2.0m		0.205							0.19						

(b) Wf20 (m)

波形	Type	初期位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Wf20	A	2.0m											0.165				
Wf20	A	2.5m			0.12	0.18		0.055	0.16						0.24		
Wf20	A	4.0m															
Wf20	A	5.0m															
Wf20(1.25)	A	2.0m	0.07	0.15		0.14							0.185				
Wf20(1.25)	A	4.0m															
Wf20(1.25)	A	5.0m															
Wf20	E	2.0m		0.01			0.07		0.13					0.04	0.045		
Wf20	E	4.0m								0.175				0.03		0.45	
Wf20	E	5.0m															
Wf20	F	2.0m		0.04		0.03	0.12		0.08	0.13	0.035	0.035	0.06		0.07	0.09	0.05
Wf20	F	4.0m															
Wf20	F	5.0m	0.06				0.04	0.025				0.04					
Wf20	F	5.5m															
Wf20	G	2.0m				0.14		0.26					0.23				
Wf20	G	4.0m								0.12							
Wf20	G	5.0m															

(c) Wf30 (m)

波形	Type	初期位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Wf30	A	0.5m	0.135	0.07	0.115	0.125	0.105	0.12	0.12	0.13	0.1	0.12		0.09		0.125	0.08
Wf30	A	0.75m		0.18											0.215		
Wf30	A	1.0m															
Wf30	E	0.5m	0.085	0.11	0.075	0.1	0.1	0.095	0.095	0.1	0.1	0.1	0.09	0.09	0.09	0.095	0.08
Wf30	E	0.75m															
Wf30	E	1.0m															
Wf30	F	0.75m	0.02		0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.02	0.05	0.025	0.03	0.025	0.025	0.025
Wf30	F	1.0m	0.05	0.035				0.025	0.07		0.03		0.06	0.03		0.025	0.03
Wf30	F	1.25m															

表- 6.5.2 衝突速度

(a) Wf10 (m/s)

波形	Type	初期位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Wf10	A	1.0m	1.59	1.39					1.67			1.75	1.41	1.27			
Wf10	A	1.5m									1.41						
Wf10	A	2.0m												0.68			
Wf10	E	1.0m	1.56	1.79		1.54	1.45	1.49	1.56	1.67	1.54	1.67	1.32	1.28	1.64	1.54	1.30
Wf10	E	1.5m		1.56				0.56		0.93	0.91					1.04	
Wf10	E	2.0m		0.92							0.54						

(b) Wf20 (m/s)

波形	Type	初期位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Wf20	A	2.0m											2.44				
Wf20	A	2.5m			2.38	1.96		2.44	2.33						2.17		
Wf20	A	4.0m															
Wf20	A	5.0m															
Wf20(1.25)	A	2.0m	2.38	2.38		2.78							2.44				
Wf20(1.25)	A	4.0m															
Wf20(1.25)	A	5.0m															
Wf20	E	2.0m		2.63			2.17		2.56					1.85	2.94		
Wf20	E	4.0m								2.33				1.41		1.52	
Wf20	E	5.0m															
Wf20	F	2.0m		2.70		1.96	2.70		2.63	2.44	2.33	2.63	2.22		1.82	2.44	2.70
Wf20	F	4.0m															
Wf20	F	5.0m	2.20				2.04	2.63				2.78					
Wf20	F	5.5m															
Wf20	G	2.0m				2.44		1.75					1.96				
Wf20	G	4.0m								2.56							
Wf20	G	5.0m															

(c) Wf30 (m/s)

波形	Type	初期位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Wf30	A	0.5m	1.64	1.96	1.54	1.52	1.43	1.47	1.69	1.69	1.72	1.43		1.69		1.75	1.67
Wf30	A	0.75m		1.08											0.98		
Wf30	A	1.0m															
Wf30	E	0.5m	1.37	1.20	1.25	1.16	1.11	1.06	1.15	1.06	1.11	1.04	1.28	1.52	1.47	1.20	1.45
Wf30	E	0.75m															
Wf30	E	1.0m															
Wf30	F	0.75m	2.22		2.08	2.27	2.27	2.13	2.38	2.44	2.44	2.44	2.27	2.17	2.38	2.27	2.27
Wf30	F	1.0m	2.22	2.00				2.17	2.13		2.33		1.96	2.33		2.22	2.04
Wf30	F	1.25m															

7. 漂流物衝突特性と衝突力評価

7.1. 気中衝突試験

7.1.1. ロードセル計測による衝突力の評価

図- 7.1 には衝突速度と最大衝突力の関係を、図- 7.3 には衝突速度と衝突時間の関係を、図- 7.4 にはロードセル容量による衝突力の違いを示した。ここで衝突時間は、衝突開始から最大衝突力が生じるまでの時間とした。

図- 7.1 によると、衝突力は衝突速度に対しほぼ比例関係にある。その傾きは質量の大きい TypeG が一番大きく、TypeA, C, E, および TypeD, F がそれぞれ同程度であることから、漂流物の質量が大きいほど傾きが大きくなるのが分かる。図- 7.2 には、衝突速度と、衝突力を衝突速度で除した F/V の関係を示した。これによると、若干右肩上がりの傾向があるものの、衝突速度によらずほぼ一定の値となっていることが分かる。

図- 7.3 に示した衝突時間に関しては、TypeB を除き、衝突速度によらずほぼ一定値を示しており、衝突時間は衝突速度によらず、それぞれの漂流物タイプで一定になると考えられる。これは、ひずみ計測による気中試験の結果と整合する。TypeB はウレタン素材により剛性が衝突力に対して一定でなく、荷重と変位の関係が線形でないために、衝突時間 Δt が衝突速度によって変動すると考えられる。

図- 7.4 のロードセル容量による衝突力の比較では、両者に明確な違いなく、被衝突構造物の剛性の影響が表れていないことが分かる。ただし、ロードセルの固有周期はいずれも衝突時間よりも短いことから剛性が十分に大きいと考えられる。被衝突構造物の剛性がこれよりも小さい場合には、剛性の影響が表れる可能性がある。

図- 7.5, 図- 7.6 は、質量と衝突力衝突速度比 F/V の関係および質量と衝突時間 Δt の関係を、両対数軸グラフで示したものである。ただし、TypeB の結果は除外している。同図には、傾き $1/2$ の直線を示した。質量の小さい TypeD, TypeF は F/V が若干小さく、 Δt が若干大きくなるものの、試験結果の傾きは、ほぼ $1/2$ となっている。これらのことから、衝突力および衝突時間は、質量の $1/2$ 乗に比例すると考えられる。

表- 7.1, 図- 7.7~図- 7.9 に、衝突力時系列を衝突開始から衝突力が最大となるまでの積分することにより求めた力積と衝突速度と漂流物質量から求めた衝突直前の運動量の関係、および力積と運動量の比を示す。図- 7.7, 図- 7.8 は、衝突速度および運動量と力積の関係を示したものであるが、力積は速度および運動量に対し比例関係にあることが分かる。また、図- 7.9 の力積と運動量の比に関しては、漂流物質量の小さな TypeF を除くと、衝突速度が大きい場合にはほぼ一定の値となることが分かる。なおここでは、衝突力が最大となった瞬間に漂流物の運動量が 0 になると考え、そこまでに働く力積と衝突直前の運動量を比較している。しかし、衝突力の時系列を見ると、上昇時と下降時で対称でないケースもあることから、漂流物と被衝突構造物の弾性挙動特性の違いにより、衝突力最大の瞬間にも厳密には速度が 0 になっていない可能性が考えられる。

以上のことから、衝突力は主に衝突速度に比例し、漂流物質量の $1/2$ 乗に比例すると考えられること、また、剛性により決まると考えられる衝突時間は、衝突速度によらずほぼ一定であり、また、質量の $1/2$ 乗に比例することが分かる。

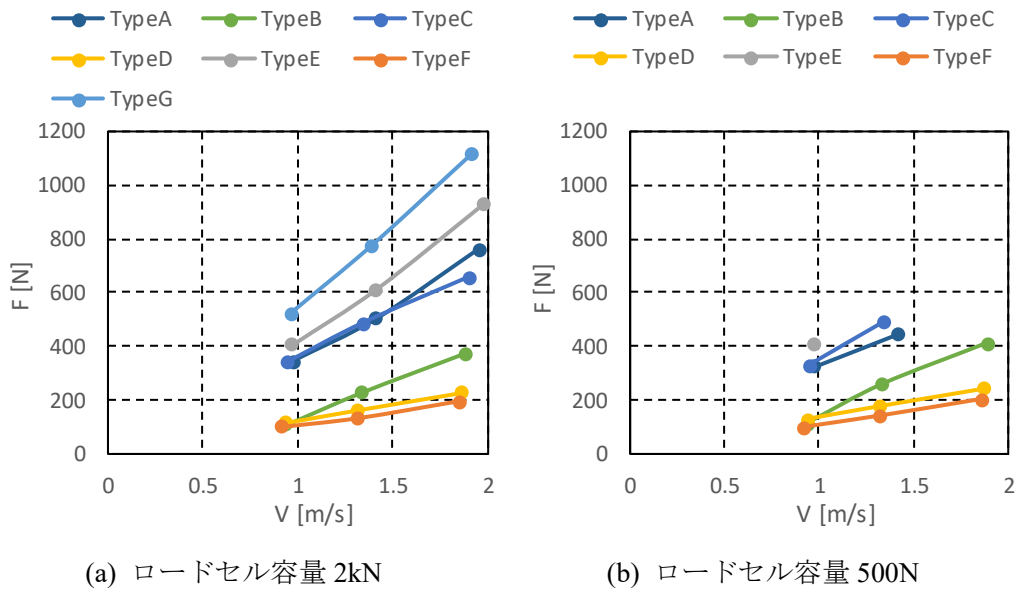


図-7.1 ロードセルによる最大衝突力の計測結果

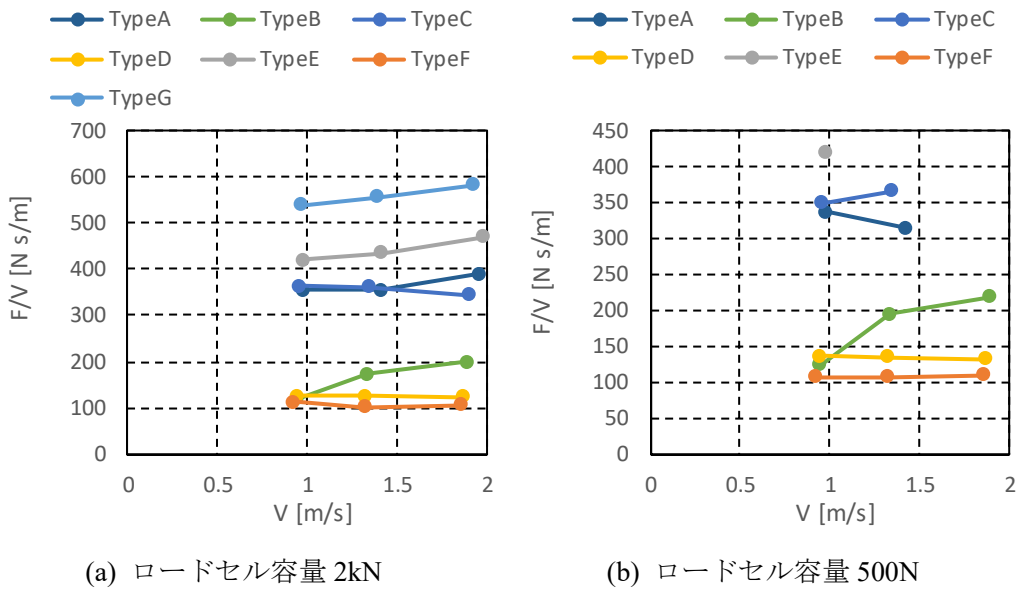
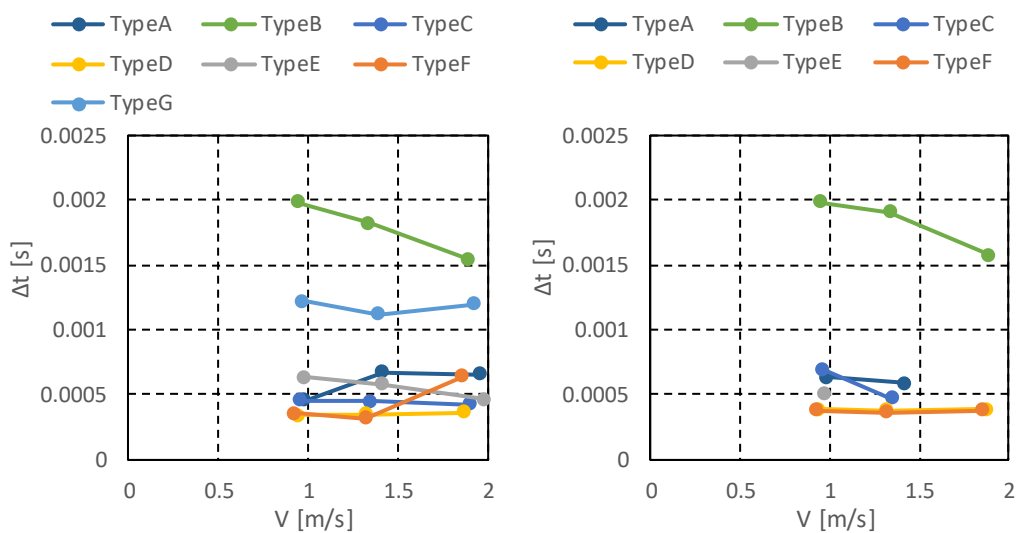


図-7.2 衝突力と衝突速度の比 F/V



(a) ロードセル容量 2kN

(b) ロードセル容量 500N

図-7.3 ロードセルによる衝突時間の計測結果

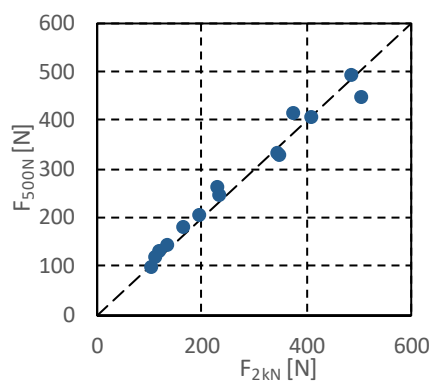


図-7.4 ロードセル容量による衝突力計測結果の比較

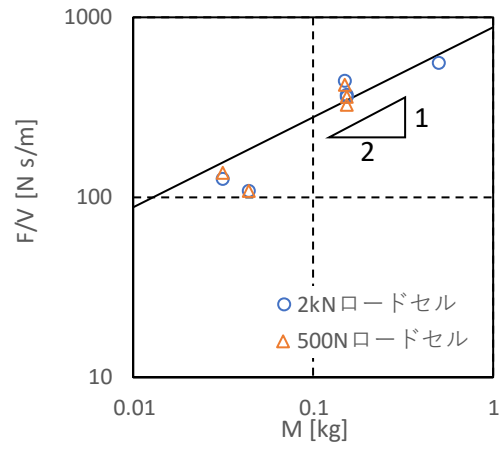


図-7.5 質量と衝突力衝突速度比の関係

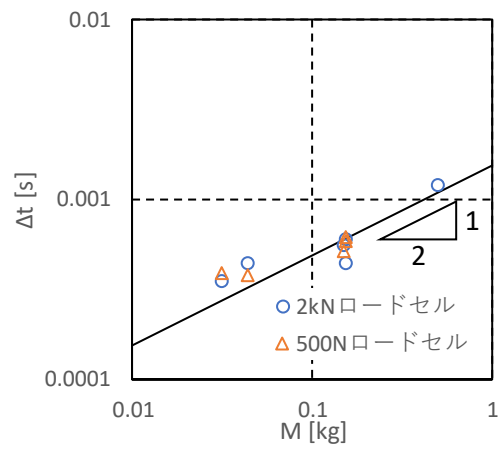


図-7.6 質量と衝突時間の関係

表-7.1 衝突による力積および力積と運動量の比

		ロードセル容量		2KN		500N	
	質量M [kg]	速度V [m/s]	MV	$\int Fdt$ [kg m/s]	$\int Fdt/MV$	$\int Fdt$ [kg m/s]	$\int Fdt/MV$
TypeA	0.154	1.957	0.301	0.258	855	-	-
		1.416	0.218	0.180	825	0.138	632
		0.976	0.150	0.084	558	0.111	736
		平均			746		684
TypeB	0.153	1.888	0.289	0.216	749	0.226	784
		1.335	0.204	0.139	682	0.158	774
		0.941	0.144	0.062	428	0.061	423
		平均			619		660
TypeC	0.155	1.904	0.295	0.125	423	-	-
		1.347	0.209	0.096	462	0.102	489
		0.952	0.148	0.075	510	0.135	918
		平均			465		703
TypeD	0.031	1.869	0.058	0.038	655	0.040	698
		1.318	0.041	0.025	620	0.028	696
		0.940	0.029	0.018	616	0.020	697
		平均			630		697
TypeE	0.150	1.976	0.296	0.185	624	-	-
		1.413	0.212	0.146	691	-	-
		0.971	0.146	0.106	727	0.093	641
		平均			681		641
TypeF	0.044	1.857	0.082	0.078	958	0.033	402
		1.318	0.058	0.021	354	0.022	386
		0.921	0.041	0.017	422	0.017	420
		平均			578		403
TypeG	0.503	1.922	0.967	0.698	722	-	-
		1.394	0.701	0.482	688	-	-
		0.970	0.488	0.365	748	-	-
		平均			720		-

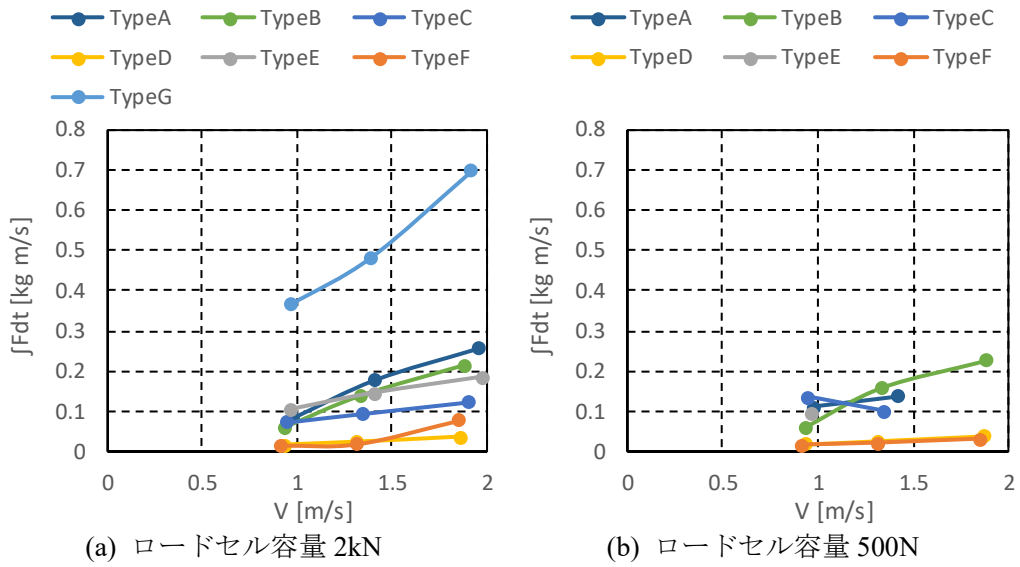


図-7.7 衝突速度と衝突により生ずる力積の関係

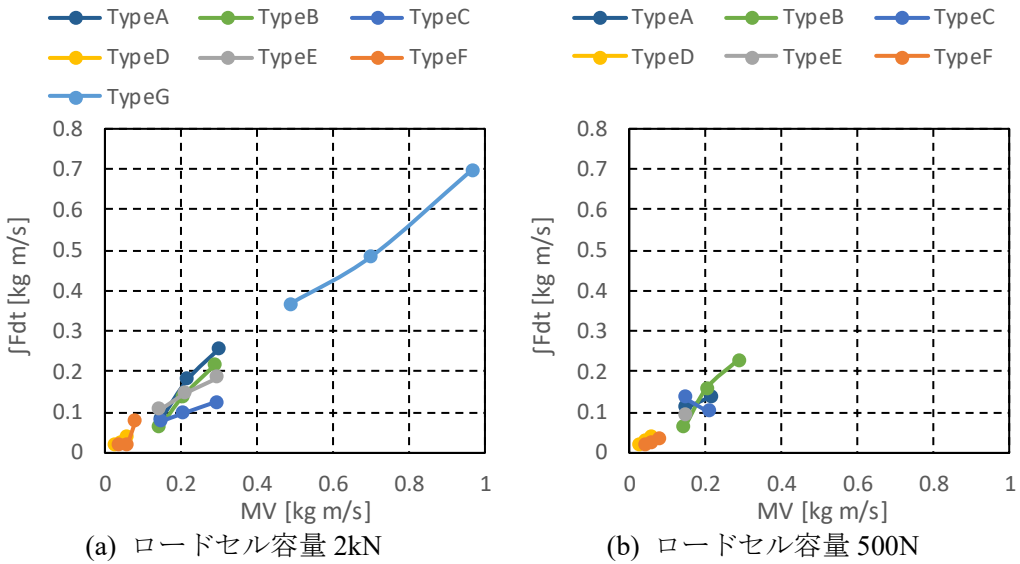


図-7.8 運動量と衝突により生ずる力積の関係

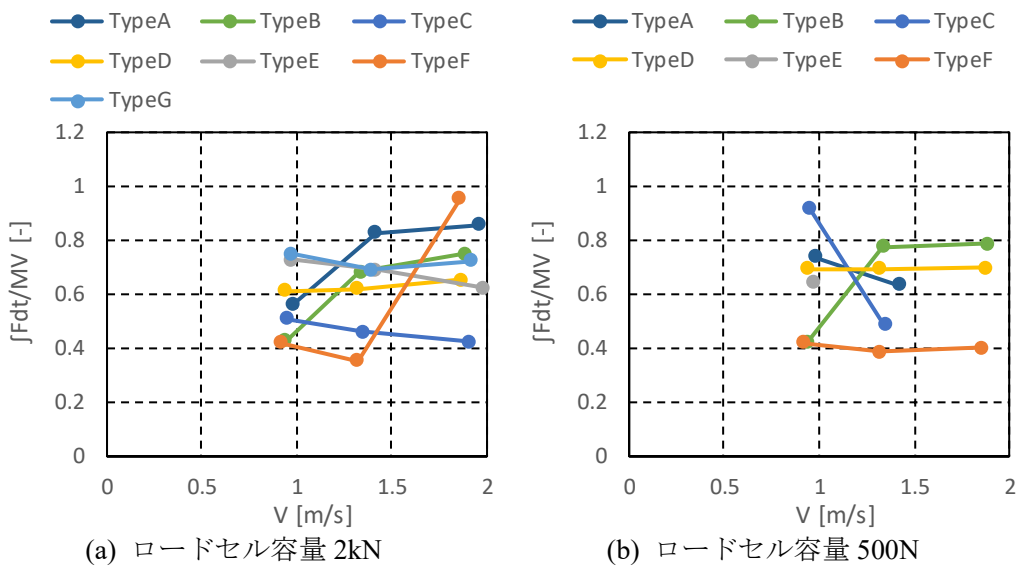


図-7.9 衝突による力積と運動量の比

7.1.2. ひずみ計測によるひずみエネルギーの評価

図-7.10に、衝突速度と最大ひずみエネルギーの関係を、図-7.12に、衝突速度と衝突時間の関係を示す。ここで衝突時間は、衝突開始から最大ひずみエネルギーが生じるまでの時間 Δt_E と、衝突位置のひずみが最大となるまでの時間 Δt_I の両者を示した。

図-7.10によると、ひずみエネルギーは衝突速度に対し右肩上がりの関係にあるが、原点を通るはずであることを考えると比例関係ではなく、衝突速度に対して1次よりも大きい次数で増加しているものと考えられる。衝突速度に対する増加率は、質量の大きいTypeGが一番大きく、TypeA, C, E, およびTypeD, Fがそれぞれ同程度であることから、漂流物の質量が大きいほど傾きが大きくなるのが分かる。図-7.11には、衝突速度と、ひずみエネルギー E を漂流物の衝突時運動エネルギー $W(=1/2MV^2)$ で除した 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。ただし、前述したように E は曲げひずみから算出したエネルギーであり、防潮堤模型に伝達されたエネルギーはせん断エネルギーや運動エネルギー、エネルギー減衰を含むことから、伝達された全エネルギーよりは小さいことに注意を要する。これによると、各漂流物タイプで、衝突速度によらずほぼ一定の値となっていることが分かる。質量の小さいTypeDとTypeFは、他のケースに対し伝達率が小さくなっている。これは、質量が小さくなると、相対的に曲げひずみエネルギーよりもせん断ひずみエネルギー（高周波数成分の振動）が大きくなるためと推察される。しかしながら、津波に対する安全性の検討において漂流物衝突力が問題となるのは、一般に漂流物が大きい場合であることから、エネルギー伝達率は質量によらないとすることが適当であると言える。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、図-7.11によれば、衝突速度が1.7 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。

図-7.12に示した衝突時間に関しては、TypeBを除き、衝突速度によらずほぼ一定値を示しており、衝突時間は衝突速度によらず、それぞれの漂流物タイプで一定になると考えられる。これは、ロードセル計測による気中試験の結果と整合する。TypeBはウレタン素材により剛性が衝突力に対して一定でなく、荷重と変位の関係が線形でないために、衝突時間 Δt が衝突速度によって変動すると考えられる。図-7.13は、衝突速度1.7m/sのケースについて、衝突時間と漂流物質量の関係を示したものであるが、TypeBを除き、衝突時間は漂流物質量との相関が高く、漂流物質量が大きいほど衝突時間が長くなるのが分かる。また、この傾向は、ひずみエネルギー最大までの時間 Δt_E の方が、ひずみ最大までの時間 Δt_I よりも顕著に現れている。

以上のことから、ひずみエネルギーは主に衝突時の漂流物の持つ運動エネルギーに比例し、漂流物の剛性が高いほどそのエネルギー伝達率は低くなる傾向にあること、また、質量が小さいときにエネルギー伝達率は低くなるが、これは曲げひずみエネルギー以外のエネルギーへの分配が影響していると推察されること、衝突時間は衝突速度によらずほぼ一定であり、質量が大きいほど長くなるのが分かる。

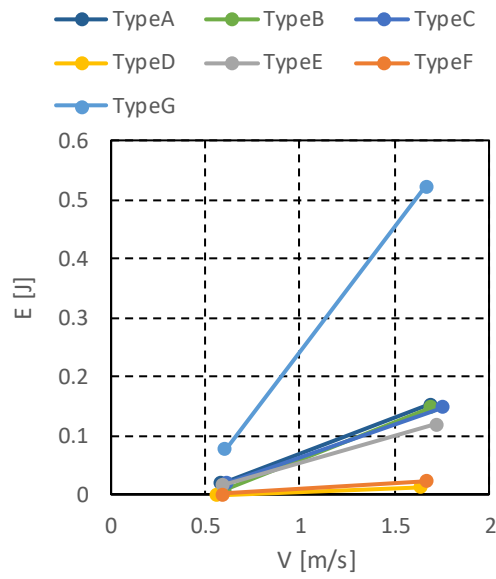


図-7.10 ひずみ計測によるひずみエネルギーの計測結果

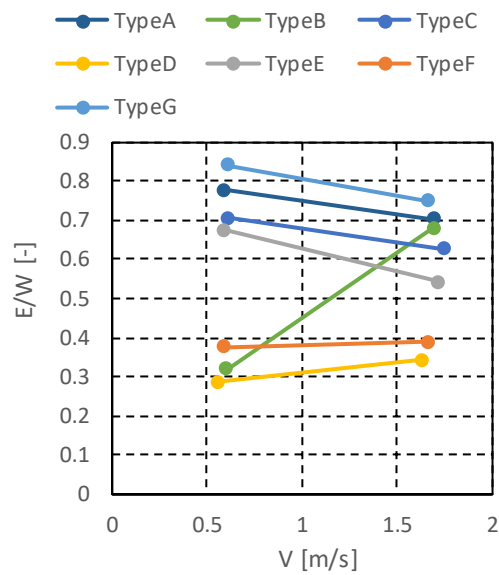
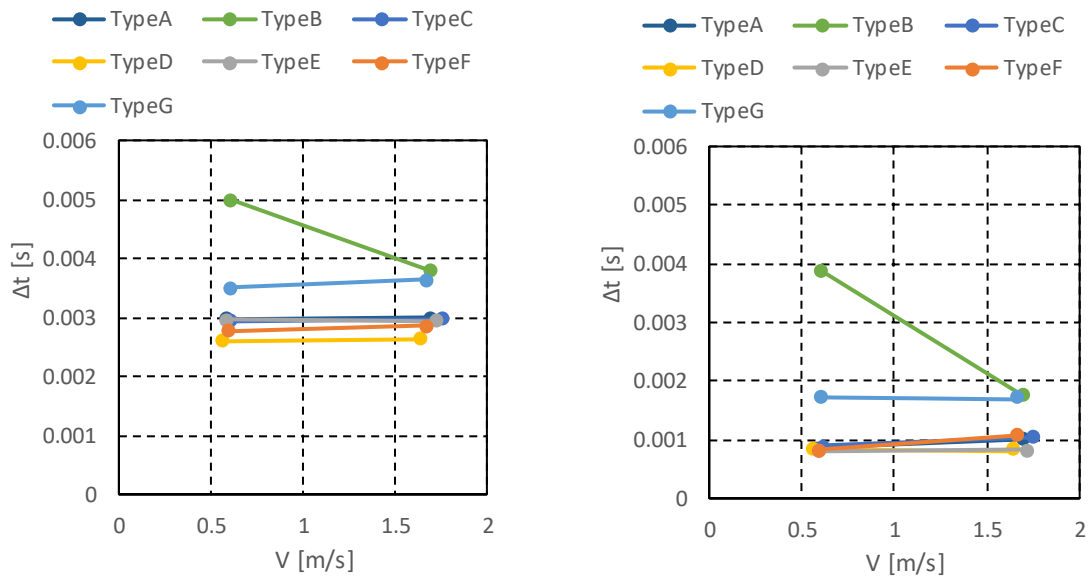
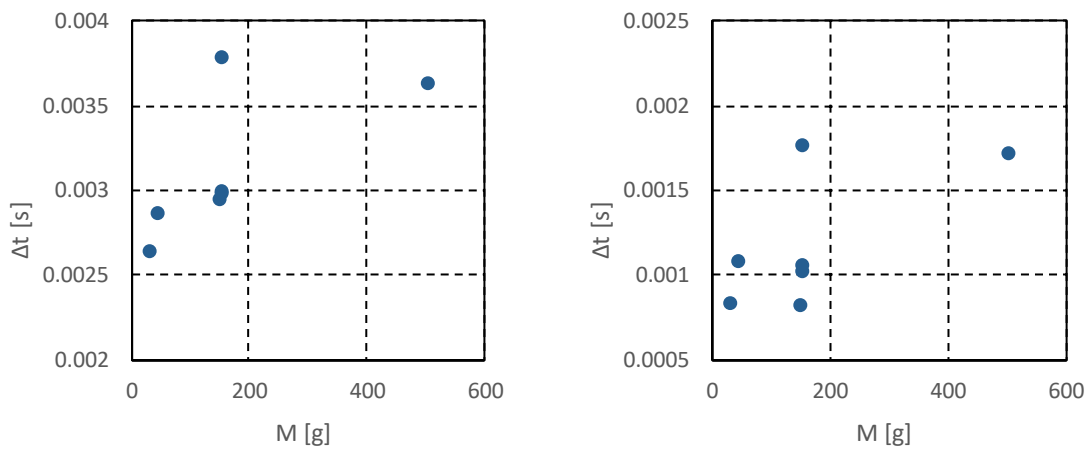


図-7.11 エネルギー伝達率 E/W



(a) ひずみエネルギー最大までの時間 Δt_E (b) ひずみ最大までの時間 Δt_I (ひずみ最大)

図-7.12 ひずみ計測による衝突時間の計測結果



(a) ひずみエネルギー最大までの時間 Δt_E (b) ひずみ最大までの時間 Δt_I (ひずみ最大)

図-7.13 ひずみ計測による衝突時間と漂流物質量の関係 (衝突速度 1.7m/s)

7.1.3. 線形剛性に基づく衝突力の評価

ここでは現象を単純化し、漂流物と被衝突構造物ともに、線形ばね定数（漂流物： k_d 、被衝突構造物 k_s ）で表される剛性でひずむとして一次元モデルによりモデル化する。ただし、防潮堤模型は複数の変形モードでの曲げやせん断が重なり合った変形をするため、実際の衝突現象はより複雑であるため、以下に示すモデル化は、等価な線形弾性構造を仮定したものとなる。

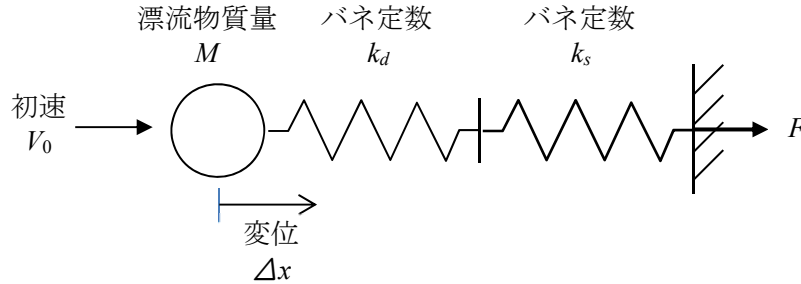


図- 7.14 衝突モデル

図- 7.14 に示すように、漂流物質量を M とし、漂流物の軸剛性を k_d 、被衝突構造物のばね定数を k_s とする。2つのばねの複合ばね定数 k は、

$$1/k = 1/k_d + 1/k_s \quad (7.1)$$

で表される。ばねによる反発力 F およびばねに蓄積するエネルギー W は、最大縮み量 Δx に対し、

$$F = k\Delta x \quad (7.2)$$

$$W = \frac{1}{2}k\Delta x^2 \quad (7.3)$$

であり、

$$W = \frac{F^2}{2k} \quad F = \sqrt{2kW} \quad (7.4)$$

の関係が得られる。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

$$\Delta x = \int_0^{\Delta t} V_0 \cos\left(\frac{\pi}{2\Delta t}t\right) dt = \frac{2\Delta t}{\pi} V_0 \quad (7.5)$$

で表される。したがって、

$$F = \frac{2\Delta t}{\pi} k V_0 \quad (7.6)$$

$$W = \frac{1}{2}k \left(\frac{2\Delta t}{\pi} V_0\right)^2 = 2k \left(\frac{\Delta t}{\pi} V_0\right)^2 \quad (7.7)$$

となり、両式を用いて k を消去すると、

$$k = \frac{W}{2 \left(\frac{\Delta t}{\pi} V_0\right)^2} \quad (7.8)$$

$$F = \frac{2\Delta t}{\pi} \frac{W}{2\left(\frac{\Delta t}{\pi}V_0\right)^2}V_0 = \frac{\pi W}{\Delta t V_0} \quad (7.9)$$

の関係が得られる。ここで、エネルギーが保存されるとすると、

$$W = \frac{1}{2}MV_0^2 \quad (7.10)$$

であるので、 F と W の関係および衝突時間とバネ定数の関係について、

$$F = \frac{\pi W}{\Delta t} \sqrt{\frac{M}{2W}} = \frac{\pi}{\Delta t} \sqrt{\frac{MW}{2}} = \frac{\pi}{2\Delta t}MV_0 \quad (7.11)$$

$$k = \frac{\frac{1}{2}MV_0^2}{2\left(\frac{\Delta t}{\pi}V_0\right)^2} = \frac{\pi^2 M}{4\Delta t^2} \quad \Delta t = \pi \sqrt{\frac{M}{4k}} \quad (7.12)$$

が得られる。式から分かるように、同じ運動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る。また、上式からは、

$$F = \sqrt{kMV_0} \quad (7.13)$$

の関係が得られる。なお、上述の衝突時間の式と衝突力の式は、FEMA に示された式と同一となる。

これらの式をロードセルによる気中衝突試験の結果と比較すると、試験結果から示された以下の特徴と整合することが分かる。

- ・ 衝突力は衝突速度に比例し、漂流物質量の 1/2 乗に比例する。
- ・ 剛性により決まる衝突時間は、衝突速度によらず一定であり、質量の 1/2 乗に比例する。
- ・ 複合剛性においては、漂流物と被衝突構造物の剛性のうち、より低い方の剛性が支配的となる。

表-7.2, 図-7.15 は, 上式によりひずみ剛性試験の結果から衝突時間を算定した結果と, ロードセル計測による気中衝突試験結果の衝突時間を比較したものである. なお, 漂流物の断面積と弾性係数が長さ方向に一様に分布しているとする, 軸剛性は漂流物の長さに反比例する. また, 漂流物模型の重量が模型中央に集中していると仮定すると, 有効なバネは漂流物長さの半分となる. そのためここでは, 漂流物の軸剛性 k_d を剛性試験の結果 k_d' の 2 倍とした. なお, ロードセルによる計測結果は, 容量 2kN ロードセルの平均値を用いた.

複合バネ定数 k は, 式から明らかなように漂流物と被衝突構造物の低い方の剛性の影響がより大きくなる. そのため, より剛性の低い漂流物の剛性に近い値となっている. 複合バネ定数 k から算定した衝突時間 Δt_{est} とロードセル計測による気中衝突試験の結果 Δt を比較すると, バネ定数から求めた衝突時間が少し長いものの, 概略両者は一致していることが分かる. このことから, ロードセルによる気中衝突試験では, 線形剛性がほぼ成り立っているものと考えられる.

表-7.2 ロードセルによる気中衝突試験で衝突時間の算定

	TypeA	TypeB	TypeC	TypeD	TypeE	TypeF	TypeG
M [kg]	0.154	0.153	0.155	0.031	0.150	0.044	0.503
k_d' [N/m]	6.53E+05	4.26E+04	6.59E+05	3.62E+05	7.97E+05	1.53E+05	2.84E+05
k_s [N/m]	6.38E+06						
k_d [N/m]	1.31E+06	8.52E+04	1.32E+06	7.24E+05	1.59E+06	3.05E+05	5.67E+05
k [N/m]	1.08E+06	8.41E+04	1.09E+06	6.50E+05	1.28E+06	2.91E+05	5.21E+05
Δt_{est} [s]	0.00059	0.00212	0.00059	0.00034	0.00054	0.00061	0.00154
気中試験結果							
Δt [s]	0.00060	0.00179	0.00044	0.00035	0.00056	0.00044	0.00118

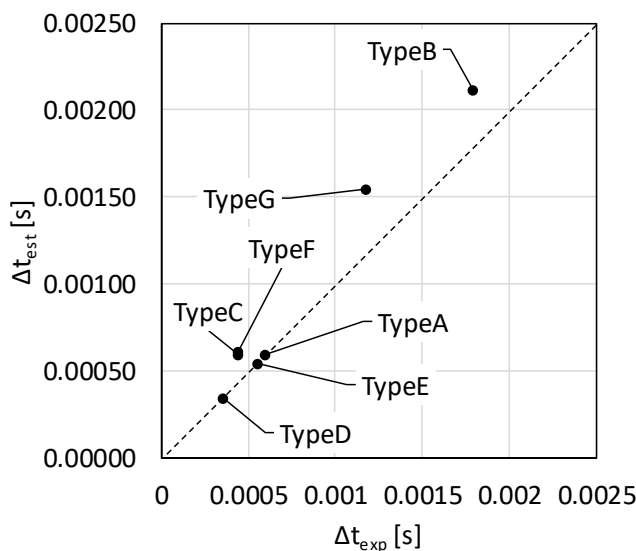


図-7.15 ロードセル気中衝突試験による衝突時間と剛性試験結果から算定した衝突時間の比較

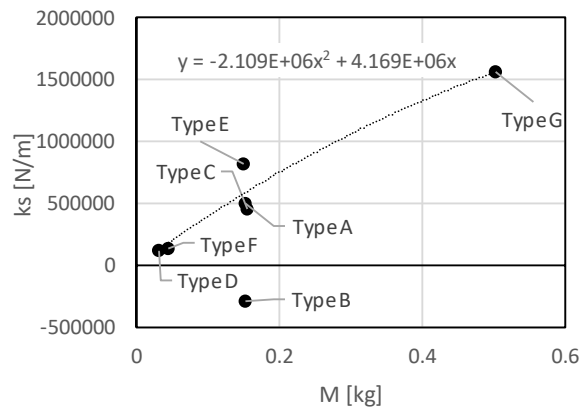
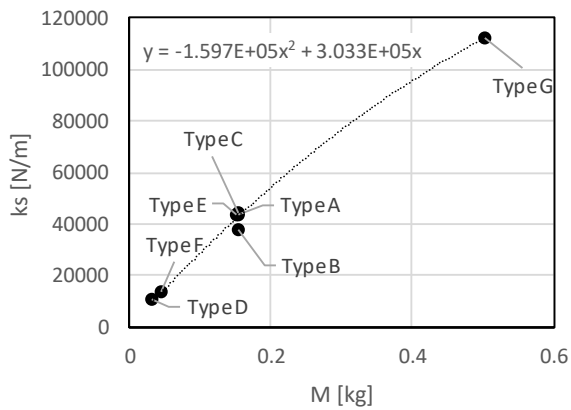
ここで、ひずみ計測による気中衝突試験結果の衝突時間から、次式により複合バネ定数を求める。

$$k = \frac{\pi^2 M}{4\Delta t^2} \quad (7.14)$$

これと剛性試験による漂流物の軸剛性から、ひずみ計測による気中衝突試験における防潮堤模型の見掛けの剛性を求めた結果を、表-7.3、図-7.16に示す。ただし、防潮堤模型は衝突直後から自由振動を開始するため、衝突時間を定義出来ない。ここでは Δt として、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 Δt_E と、衝突位置のひずみが最大となる Δt_I の2種類の衝突時間について見掛けの剛性を求めたが、厳密な衝突時間とは異なることに注意を要する。これらの結果から、複合バネ定数 k は、堤体の剛性に近い値となっており、漂流物模型よりも防潮堤模型の方が、剛性が低くなっていることが分かる。堤体の見掛けの剛性と漂流物質量の関係をみると、若干上に凸の曲線ではあるものの、概略線形関係にあることが分かる。これは、堤体の衝突時の変形モードが漂流物模型の質量に依存しているためと想定される。また、 Δt_E と Δt_I から求めた見掛けの剛性を比較すると、 Δt_E の方がより質量との相関が高くなっている。

表-7.3 ひずみによる気中衝突試験の衝突時間から算定した防潮堤模型の剛性

	TypeA	TypeB	TypeC	TypeD	TypeE	TypeF	TypeG
M [kg]	0.154	0.153	0.155	0.031	0.150	0.044	0.503
k_d' [N/m]	6.53E+05	4.26E+04	6.59E+05	3.62E+05	7.97E+05	1.53E+05	2.84E+05
k_d [N/m]	1.31E+06	8.52E+04	1.32E+06	7.24E+05	1.59E+06	3.05E+05	5.67E+05
気中試験結果							
Δt_E [s]	0.0030	0.0038	0.0030	0.0026	0.0029	0.0029	0.0036
k [N/m]	4.23E+04	2.62E+04	4.30E+04	1.10E+04	4.27E+04	1.33E+04	9.37E+04
k_s [N/m]	4.37E+04	3.78E+04	4.44E+04	1.11E+04	4.38E+04	1.39E+04	1.12E+05
α_E	0.968	0.692	0.967	0.985	0.973	0.957	0.835
Δt_l [s]	0.0010	0.0018	0.0011	0.0008	0.0008	0.0011	0.0017
k [N/m]	3.65E+05	1.21E+05	3.41E+05	1.09E+05	5.42E+05	9.35E+04	4.16E+05
k_s [N/m]	5.06E+05	-2.89E+05	4.60E+05	1.28E+05	8.21E+05	1.35E+05	1.56E+06
α_l	0.721	-0.418	0.741	0.850	0.660	0.694	0.266



(a) Δt_E (ひずみエネルギー最大) から算定した結果 (b) Δt_l (ひずみ最大) から算定した結果

図-7.16 ひずみによる気中衝突試験の衝突時間から算定した防潮堤模型の剛性

7.1.4. 線形剛性に基づくひずみエネルギーから衝突力への変換

ここで、被衝突構造物に伝達されるエネルギーを E' とし、 E' が全てバネ定数 k_s の弾性エネルギーに変換されるものと仮定する。エネルギー損失を無視すると、衝突エネルギーの伝達率 $\alpha = E'/W$ (運動エネルギーに対する被衝突構造物に蓄積されるエネルギーの比) は、

$$\alpha = \frac{E'}{W} = \frac{F^2/2k_s}{F^2/2k} = \frac{k}{k_s} = \frac{1}{1 + k_s/k_d} \quad (7.15)$$

となる。ひずみ計測による気中衝突試験の結果では、漂流物質量が同じ場合、漂流物の剛性が高いほど E/W は低くなった。図-7.17 は、防潮堤模型の見掛けの剛性を用いて衝突エネルギーの伝達率 α を求めた結果である。これによると、TypeB, TypeG を除き α は漂流物タイプによらず高い値を示している。図-7.18 は、伝達率 α を気中衝突試験から求められた E/W と比較したものであるが、TypeB, TypeG を除き、 α は E/W よりも大きく、1 に近い値であることが分かる。前述したように、ひずみエネルギー E は、堤体に伝達されたエネルギー全てを表していないことが、 α が E/W よりも大きくなっている主な要因と考えられる。

上述のモデルにおいて、堤体への衝突力を評価するには防潮堤模型の剛性を定める必要がある。ここでは、図-7.16 より、次式により本試験の防潮堤模型の見掛けの剛性が表されるものとする。

$$k_s = -159,700M^2 + 303,300M \quad [N/m, kg] \quad (7.16)$$

表-7.4, 図-7.19 は、上式で求めた見掛けの剛性から算出した α と、ひずみ計測による気中衝突試験による E/W の比を、 $\beta = (E/W)/\alpha$ として求めたものである。ここで β は、 E/E' すなわち衝突により堤体に伝達したエネルギーに対する最大ひずみエネルギーの比に等しい。

$$\beta = \frac{E}{E'} \quad (7.17)$$

これによると、漂流物質量の小さい TypeD, TypeF は伝達したエネルギーの 1/3 程度しかひずみエネルギーとして生じていないことが分かる。 α, β により衝突力 F とひずみエネルギーの関係として次式が得られる。

$$F = \frac{\pi}{\Delta t} \sqrt{\frac{ME'}{2\alpha}} = \sqrt{2k_s E'} = \sqrt{2k_s E/\beta} \quad (7.18)$$

本式を用いることにより、ひずみエネルギー E を衝突力 F に変換することが出来る。また、衝突力 F は、次式により評価することが出来る。

$$F = \sqrt{\alpha k_s} MV_0 \quad (7.19)$$

なお、ここに示す F は、実際に堤体に働いている衝突力ではなく、7.1.3 に示した線形剛性を仮定したモデルにより、堤体に伝達したエネルギーと同等のエネルギーの生じる衝突力に換算したものであり、また、堤体に生じたひずみエネルギーから全エネルギーを算定し、これと同等のエネルギーの生じる衝突力に換算したものである。

図-7.20 は、各漂流物タイプに対し、表-7.4 に示した α, β を用いて、ひずみエネルギー E と衝突力 F の関係を示したものである。また、図-7.20 の関係を用いて、ひずみ計測による気中衝突試験の結果から衝突力 F を算出した結果を表-7.5 に示す。表中には、衝突力が衝突速度に比例するとして、衝突力を衝突速度で除した F/V_0 の値を同時に示した。

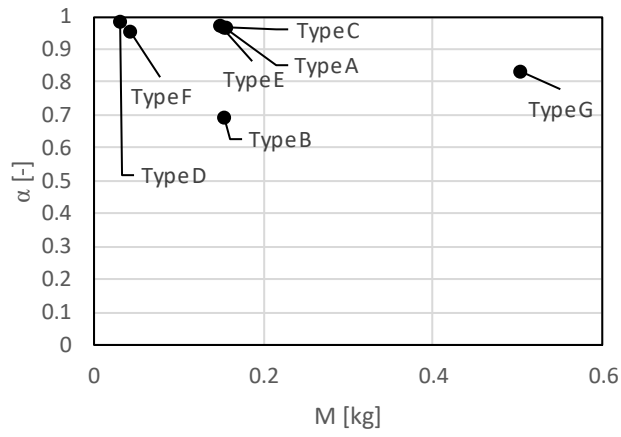


図-7.17 ひずみによる気中衝突試験の衝突時間から算定したエネルギー伝達率

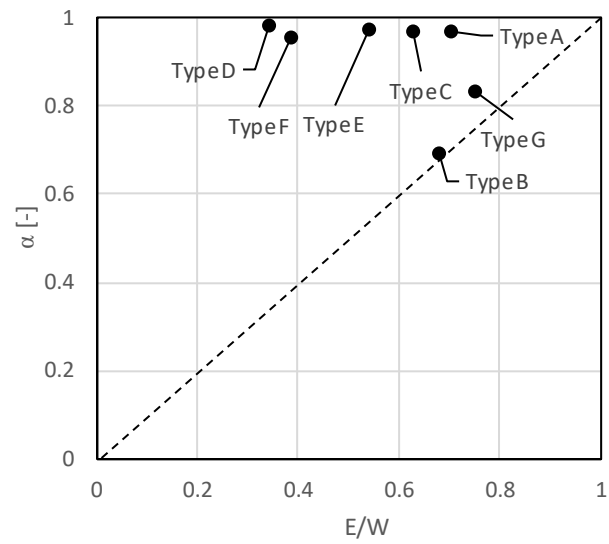


図-7.18 衝突時間から算定したエネルギー伝達率と気中衝突試験結果の比較 (Δt_E による)

表-7.4 見掛けの剛性の算定結果とエネルギー伝達率

	TypeA	TypeB	TypeC	TypeD	TypeE	TypeF	TypeG
M [kg]	0.154	0.153	0.155	0.031	0.150	0.044	0.503
k_s [N/m]	4.28E+04	4.26E+04	4.33E+04	9.28E+03	4.19E+04	1.31E+04	1.12E+05
k_d [N/m]	1.31E+06	8.52E+04	1.32E+06	7.24E+05	1.59E+06	3.05E+05	5.67E+05
k [N/m]	4.15E+04	2.84E+04	4.19E+04	9.16E+03	4.09E+04	1.26E+04	9.36E+04
α	0.968	0.667	0.968	0.987	0.974	0.959	0.835
E/W	0.702	0.680	0.627	0.343	0.541	0.388	0.749
β	0.725	1.021	0.648	0.347	0.556	0.405	0.897

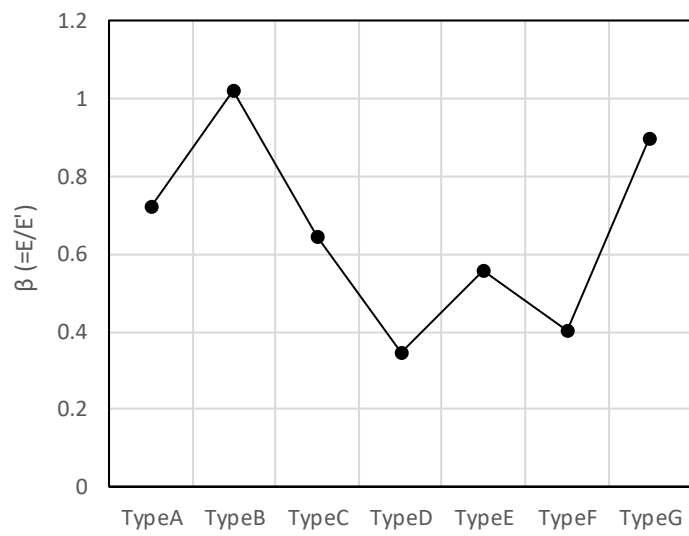


図-7.19 伝達エネルギーとひずみエネルギーの比

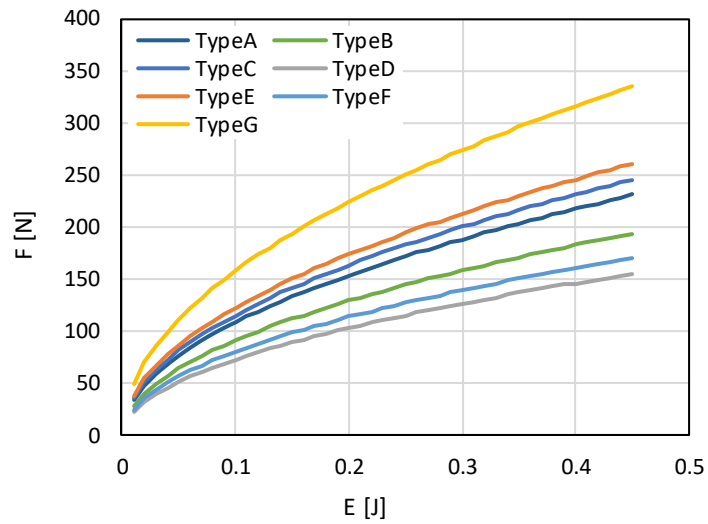


図- 7.20 ひずみエネルギーと衝突力の関係

表- 7.5 ひずみエネルギーから求めた衝突力

	速度 [m/s]	E [J]	F [N]	F/V ₀ [N s/m]
TypeA	1.658	0.155	135.3	81.6
	0.608	0.021	49.4	81.3
TypeB	1.790	0.149	111.7	62.4
	0.688	0.009	27.4	39.8
TypeC	1.853	0.150	141.5	76.3
	0.662	0.021	52.5	79.3
TypeD	1.712	0.014	27.7	16.2
	0.665	0.001	8.7	13.1
TypeE	1.790	0.121	135.0	75.4
	0.651	0.018	51.7	79.4
TypeF	1.770	0.024	39.3	22.2
	0.620	0.003	13.8	22.3
TypeG	1.790	0.523	361.7	202.1
	0.685	0.078	140.0	204.3

7.1.5. ひずみ計測とロードセル計測の衝突力比較

表-7.5 に示したひずみ計測による衝突力とロードセル計測による衝突力の計測結果を比較したものを、表-7.6, 図-7.21, 図-7.22 に示す. ここには、ひずみ計測による結果には表-7.5 のうち衝突速度 1.7 m/s の結果を、ロードセルによる結果は容量 2kN のロードセルによる平均の値を示した.

図-7.21 に示した計測方法の違いによる衝突力を比較すると、ロードセル計測による衝突力の方が大きく、およそ 3~6 倍となっている. この主な理由は、図-7.22 に示す衝突時間であり、TypeB を除くとロードセル計測による衝突時間の方がおよそ 1/3~1/6 に短くなっている. 衝突力は、衝突時間に反比例すると考えられるため、ロードセルによる計測では被衝突構造物の剛性が大きくなることにより、衝突時間が短くなり衝突力が大きくなっている. また、これに加え、エネルギーあるいは運動量の伝達率もロードセルによる計測の方が大きいと推察される.

ここで、質量 M の漂流物が衝突速度 V_0 で衝突した際のロードセル計測による衝突力を $F^{(L)}$ 、ひずみ計測による衝突力を $F^{(S)}$ とすると、それぞれの剛性を用いて衝突力は、

$$F^{(L)} = \sqrt{\left(\frac{1}{k_d} + \frac{1}{k_s^{(L)}}\right)^{-1}} MV_0 \quad F^{(S)} = \sqrt{\left(\frac{1}{k_d} + \frac{1}{k_s^{(S)}}\right)^{-1}} MV_0 \quad (7.20)$$

と表される. したがって、

$$\frac{F^{(L)}}{F^{(S)}} = \sqrt{\frac{1/k_d + 1/k_s^{(S)}}{1/k_d + 1/k_s^{(L)}}} = \sqrt{\frac{1 + k_d/k_s^{(S)}}{1 + k_d/k_s^{(L)}}} \quad (7.21)$$

となり、また $k_s^{(L)}$ は k_d に比較して十分に大きいと仮定すると、

$$\frac{F^{(L)}}{F^{(S)}} \cong \sqrt{1 + k_d/k_s^{(S)}} \quad (7.22)$$

となる. 表-7.7, 図-7.23 に、上式により求めたロードセル計測とひずみ計測から得られる衝突力の比を示す. 図-7.23 には、表-7.6 に示した試験結果を同時に示した. これによれば、上述の算定式は、試験結果を良く再現していると言える.

表-7.6 ひずみ計測とロードセル計測による衝突力

	F/V_0 [N s/m]			Δt [s]	
	ひずみ計測	ロードセル計測	比率	ひずみ計測	ロードセル計測
TypeA	81.6	366.9	4.49	0.0030	0.00060
TypeB	62.4	163.6	2.62	0.0038	0.00179
TypeC	76.3	356.1	4.66	0.0030	0.00044
TypeD	16.2	125.4	7.76	0.0026	0.00035
TypeE	75.4	441.3	5.85	0.0029	0.00056
TypeF	22.2	107.1	4.83	0.0029	0.00044
TypeG	202.1	558.4	2.76	0.0036	0.00118

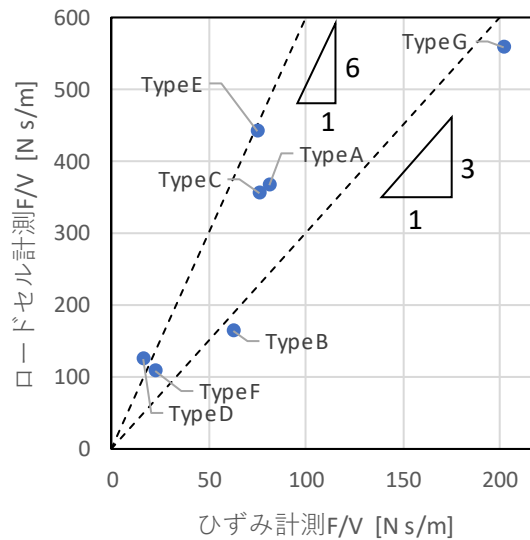


図-7.21 ひずみ計測による衝突力とロードセル計測による衝突力の比較

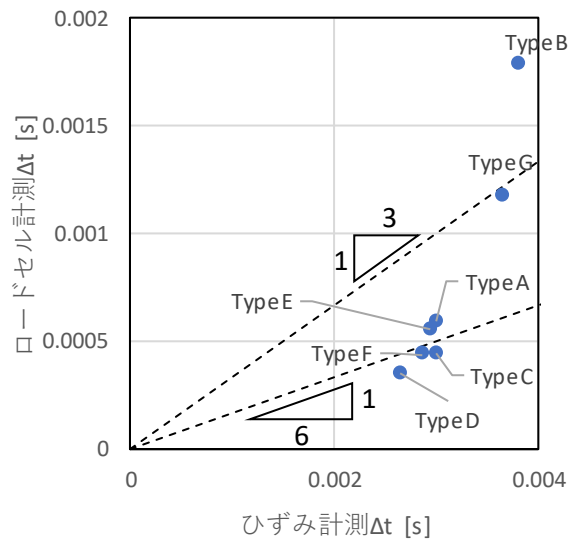


図-7.22 ひずみ計測による衝突時間とロードセル計測による衝突時間の比較

表-7.7 ひずみ計測とロードセル計測による衝突力の比

	k_d [N/m]	$k_s^{(L)}$ [N/m]	$k_s^{(S)}$ [N/m]	$F^{(L)}/F^{(S)}$	$F^{(L)}/F^{(S)}$ (近似)
TypeA	1.31E+06	6.38E+06	4.28E+04	5.11	5.61
TypeB	8.52E+04	6.38E+06	4.26E+04	1.72	1.73
TypeC	1.32E+06	6.38E+06	4.33E+04	5.11	5.61
TypeD	7.24E+05	6.38E+06	9.28E+03	8.42	8.89
TypeE	1.59E+06	6.38E+06	4.19E+04	5.59	6.25
TypeF	3.05E+05	6.38E+06	1.31E+04	4.82	4.93
TypeG	5.67E+05	6.38E+06	1.12E+05	2.36	2.46

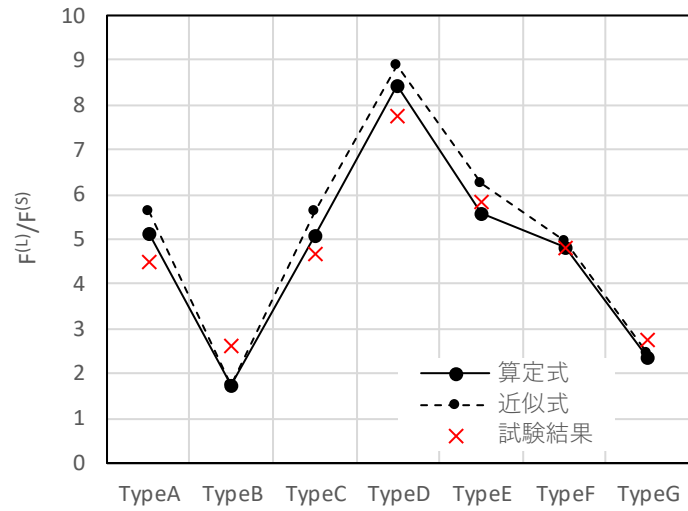


図-7.23 ひずみ計測とロードセル計測による衝突力の比

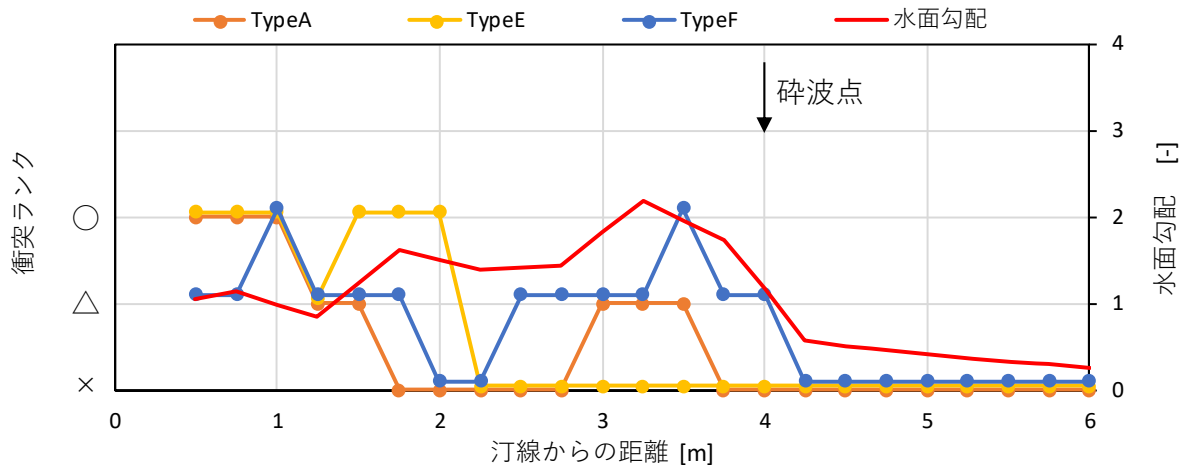
7.2. 水中衝突試験

7.2.1. 水面勾配と漂流特性の関係

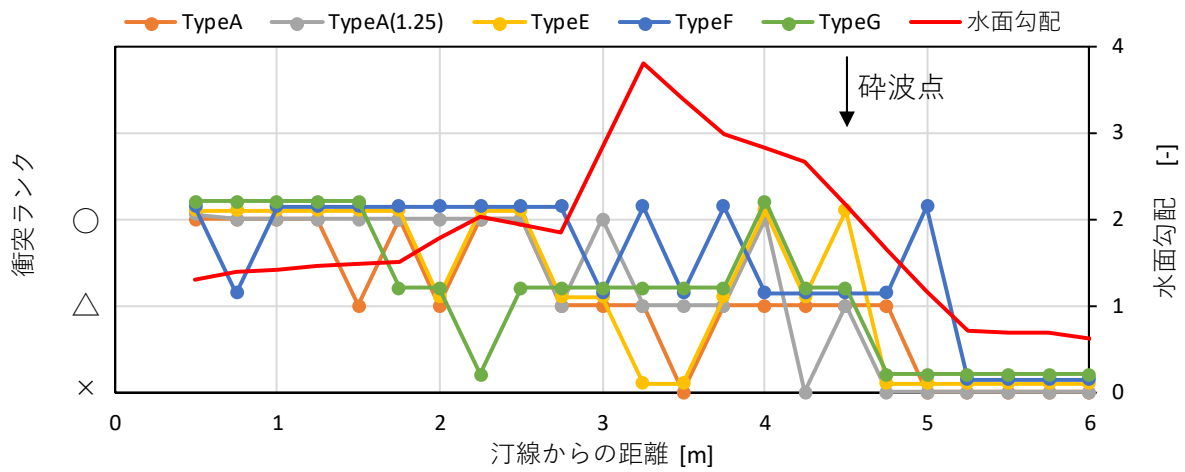
図-7.24 に、衝突確認試験で得られた衝突特性と汀線からの距離の関係を示す。縦軸の衝突ランクは、前章に示したように、○：衝突する、△：波に連行されるが波の反射により衝突しない、×：波に連行されないことを意味する。また同図には、波検定から得られた水面勾配を同時に示した。試行回数が最大で3回のためばらつきはあるものの、衝突は主に初期位置が砕波点より岸側の場合に生じていることが分かる。初期位置が砕波点より沖側の場合も衝突するケースがあるものの、砕波点よりも1m以上沖側では、波に連行されていない。水面勾配と比較すると、特にWf30では緩やかに水面勾配が岸に近づくに従い大きくなっているが、水面勾配1以下では波に連行する（波に乗る）ケースがないことが分かる。また、水面勾配が1よりも大きくなるのは、砕波の直前であるため、本試験で対象としている漂流物模型については、波に連行される範囲は砕波点近傍よりも岸側に限られるということが出来る。

漂流物タイプについて比較すると、TypeFがもっとも衝突しやすく、次にTypeE、TypeAの順に漂流・衝突しやすい傾向が読み取れる。TypeGについてはWf20のみを対象としたため明確な特性について言及出来ないが、TypeAと同程度の衝突のしやすさであると推察される。

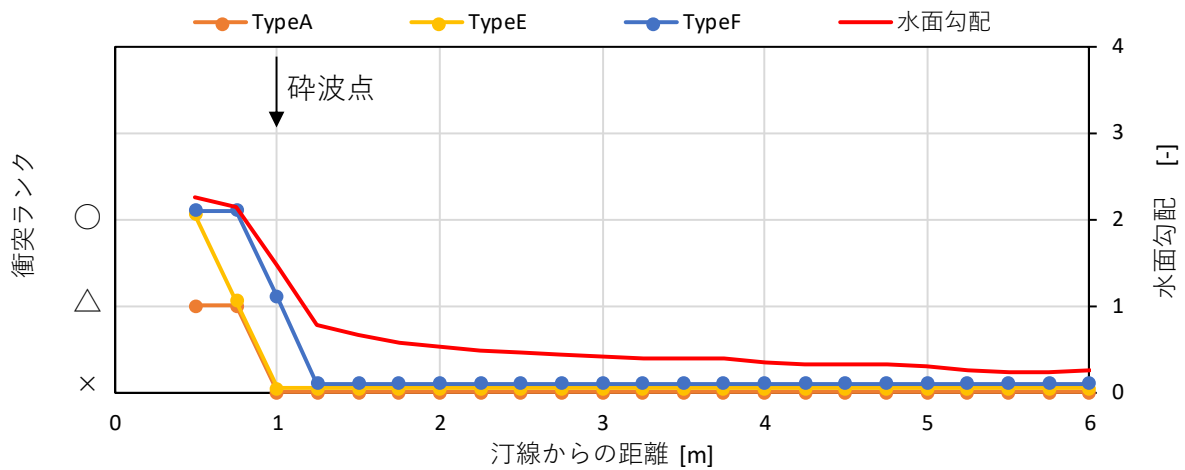
TypeFは、他の模型に比較して乾舷が大きく、船体の断面積が相対的に大きい。したがって、船尾に受ける水圧の受圧面積が大きいため、漂流しやすいと考えられる。TypeAとTypeEでは、TypeEの方が船長が長いことが、より漂流しやすくなっている要因と考えられる。相似形であるTypeAとTypeGでは、両者の漂流しやすさに明確な違いは確認出来ないことから、漂流物の重量が直接衝突頻度に影響を及ぼすことはないと考えられる。



(a)Wf10



(b)Wf20



(c)Wf30

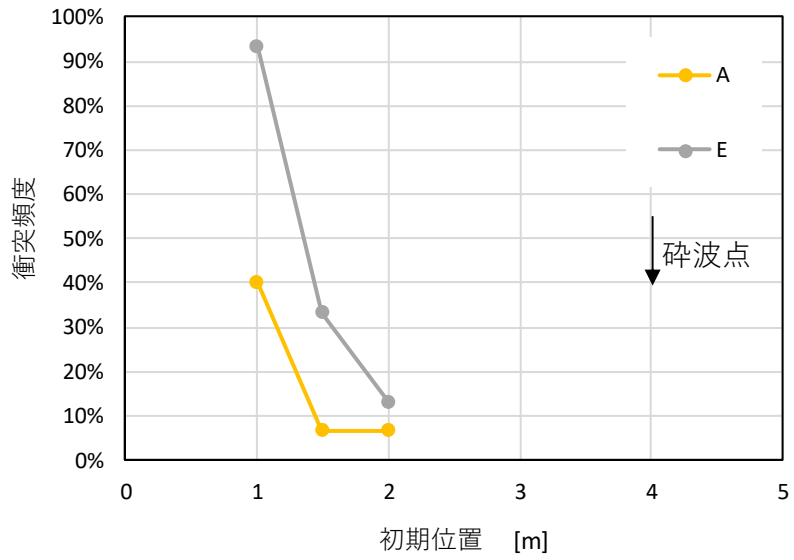
図-7.24 水面勾配と衝突特性の関係（衝突確認試験）

7.2.2. 衝突頻度

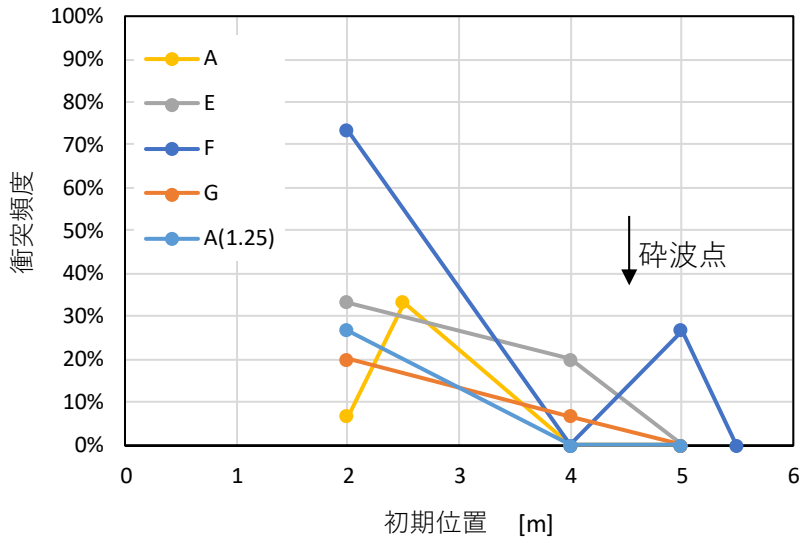
図- 7.25 に、15 回の繰り返し試験から得られた衝突頻度と漂流物の初期位置の関係を示す。波ケースごとに、漂流物の Type 別の衝突頻度を示した。

前節の結果と同様に、衝突頻度は初期位置が汀線から遠くなるほど低くなることが分かる。なお、Wf10 のケースは、衝突速度の違いによる衝突力の特性を明らかにすることを目的としたケースであるため、比較的衝突頻度の高い汀線近傍を初期位置としているが、TypeA と TypeE の衝突頻度を比較すると、TypeE の方が衝突頻度は高くなっている。このことから、相対的に船長が長い方が、衝突頻度は高くなることが分かる。

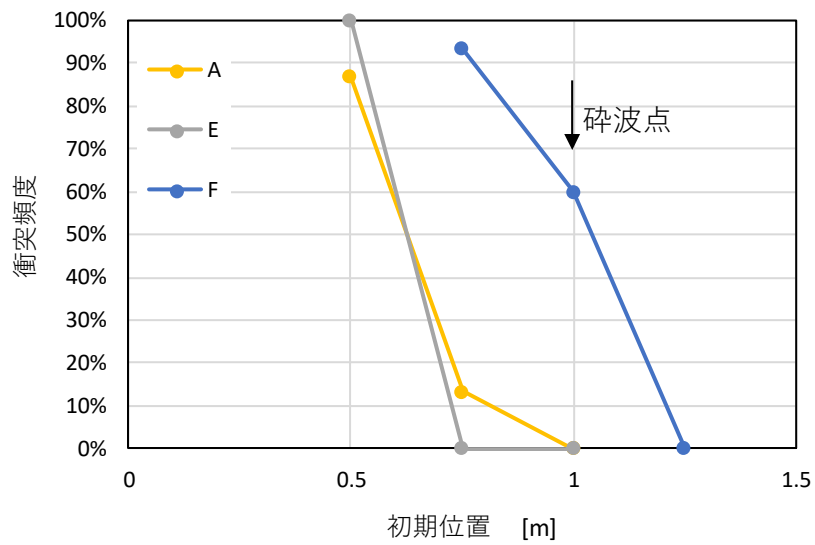
全体の傾向として衝突頻度は TypeF が高く、前節の結果と整合する。また TypeF のみ初期位置が砕波点よりも沖側でも衝突が生じている。ただし、前節の結果や類似事業の結果によれば、これ以外での漂流物でも衝突が生じる可能性がある。初期位置が砕波点より沖側で、津波に連行される場合、砕波点を通過する際に波に遅れて先端部に連行されない場合が多い。そのため、初期位置が砕波点より沖側の場合の衝突頻度は、砕波点の岸側のケースに比較して、低くなっていると考えられる。



(a) Wf10



(b) Wf20



(c) Wf30

図- 7.25 初期位置と衝突頻度の関係

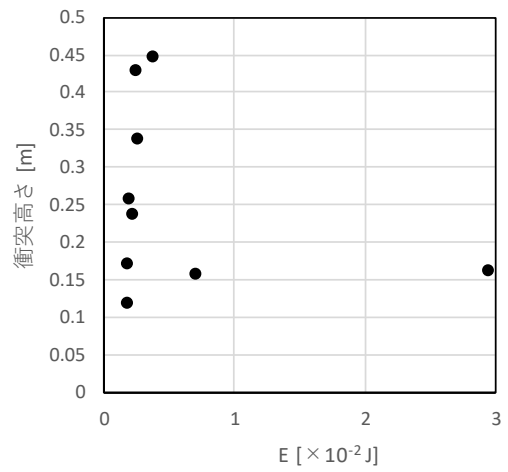
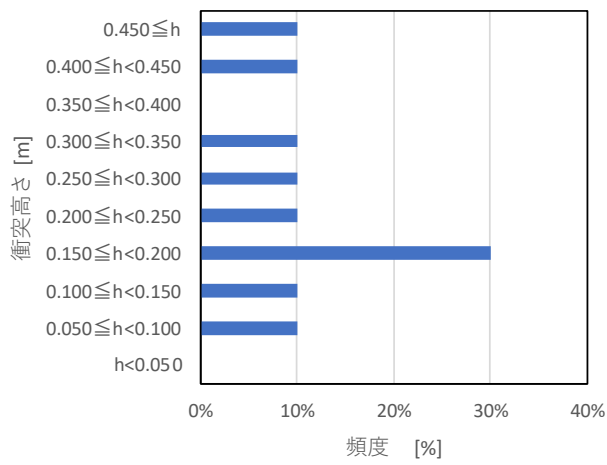
7.2.3. 衝突高さ と 衝突速度

衝突高さの分布および衝突ひずみエネルギーと衝突高さの関係を図-7.26～図-7.28に示す。図-7.26のWf10のケースでTypeAとTypeEを比較すると、衝突頻度の高い衝突高さは、TypeAでは0.125～0.15m、TypeEでは0.075～0.1mとなっており、TypeEの方が低くなっている。これは、TypeEの方が漂流しやすいため、より津波の先端部分に連行されているためと考えられる。また、衝突高さは、0.15m以下と0.15m以上で2山の分布となっていることが分かる。6.3のひずみの時系列で示したように、漂流物が津波の先端部分に連行されて衝突する場合と、津波の先端部分に若干遅れて堤体に接近し、水中に潜った状態で反射波を超えて衝突する場合の2種類の衝突形態が確認出来る。前者の場合は比較的低い位置に衝突し、後者の場合は高い位置に衝突しているために、このような2山の頻度分布になっていると考えられる。表-7.8には、衝突が確認されたケースを対象とした全衝突ケースのデータの衝突平均高さとして、0.15mよりも下に衝突したケースの平均高さを示した。衝突ひずみエネルギーと衝突高さの関係によれば、衝突ひずみエネルギーは、0.05～0.1mの低い位置に衝突した際に大きくなり、高い位置に衝突した際には大きなひずみエネルギーは生じていない。衝突位置が低いケースは、津波の先端部分に連行されている場合であり、一方で衝突位置が高いほど堤体による津波の反射の影響を受けて衝突直前の衝突速度が小さくなっていると考えられる。

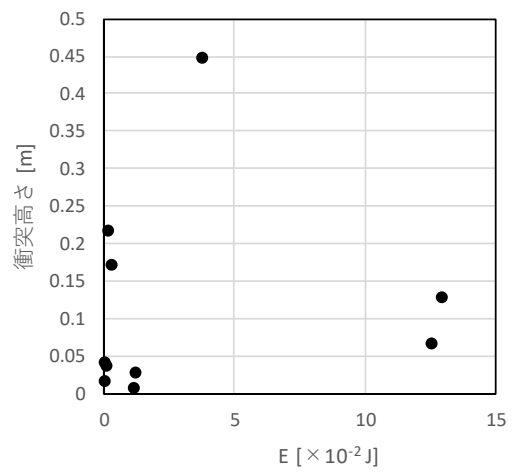
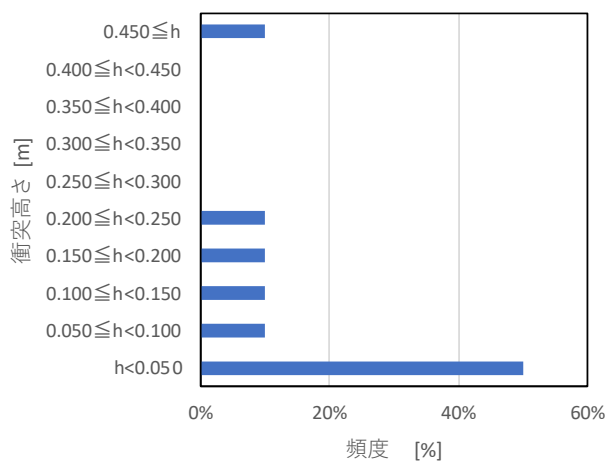
TypeAとTypeEを比較すると、総じてTypeEの方が衝突ひずみエネルギーが大きくなっている。両者の重量はほぼ同じであることから、上述したようにTypeEの方が波に連行されやすく、波の先端部分に連行されて衝突速度が大きくなっていることが要因と考えられる。

図-7.29～図-7.31に、衝突速度の頻度分布を示す。また、表-7.9には、衝突速度の平均値と波速の一覧を示した。Wf10では、もっとも頻度の高い衝突速度は、波検定による波速とほぼ一致する。一方Wf20のケースでは、波速よりも大きな衝突速度で衝突している。これは津波高が大きいため越流後の波の先端部分の加速が大きく、これに連行されることにより衝突速度が大きくなっていると考えられる。Wf30では、TypeA、TypeEは衝突速度が小さく、TypeFは衝突速度が大きい。Wf30では、試験ケースの初期位置が汀線近傍のみのため、TypeA、TypeEは十分な加速距離が確保できず、漂流物が津波の先端に対し遅れて衝突することにより、反射の影響で平均衝突速度が小さくなっていると考えられる。一方質量の小さいTypeFでは、短距離で加速してWf20と同程度の衝突速度になったことが推察される。ただし、前節の衝突頻度ではTypeFが全体に高かったが、漂流距離の比較的長いWf20のケースでは、衝突速度は漂流物タイプによらずほぼ同じになっている。漂流開始時の加速度は質量や断面積の違いの影響を受けるが、波に連行された後は質量による衝突速度の違いは小さいと考えられる。

図-7.32～図-7.34に、漂流物の衝突速度と衝突高さの関係、および漂流物の初期位置と衝突高さの関係を示した。0.2m以上の比較的高い位置に衝突しているケースでは、衝突速度に対し衝突高さが右下がりの関係、すなわち衝突位置が低いほど衝突速度が大きくなる関係にあることが分かる。上述したように、波の先端部分に対し漂流が遅れるほど衝突位置が高くなり、その場合には衝突速度が小さくなることが分かる。また、衝突速度と衝突高さの相関が高いケースでは、漂流物の初期位置が汀線から遠いほど衝突高さが高くなる傾向にあるが、初期位置の試験ケース数が限られているため、衝突速度と衝突高さの関係に比較するとその関係は明確ではない。

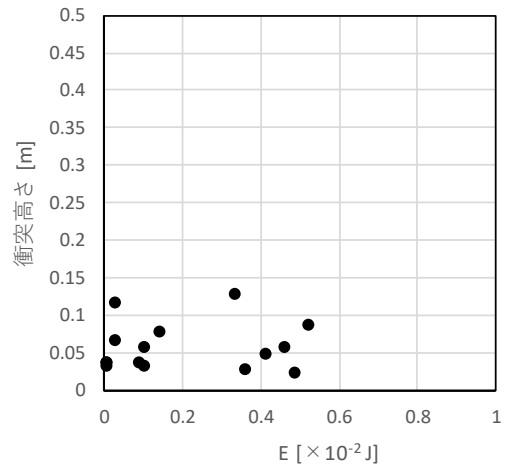
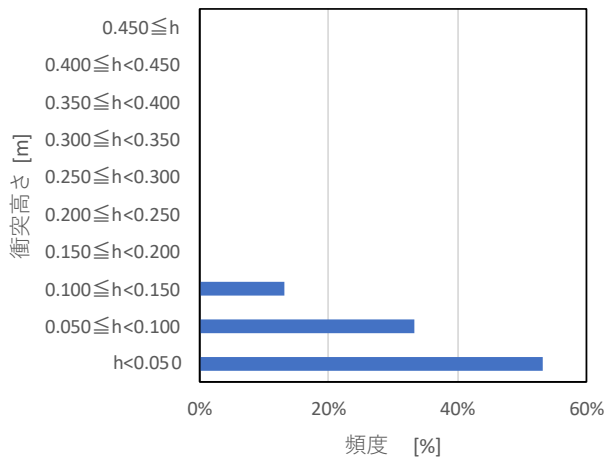


(a) TypeA

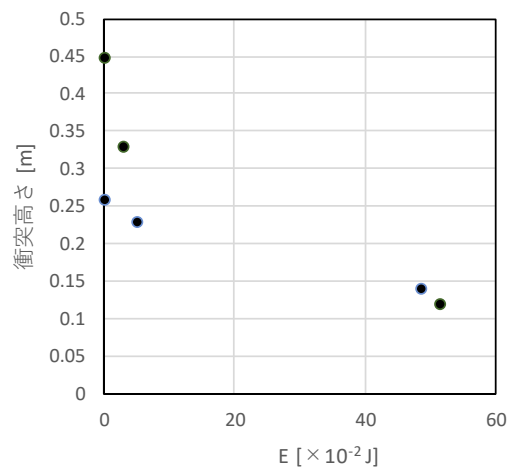
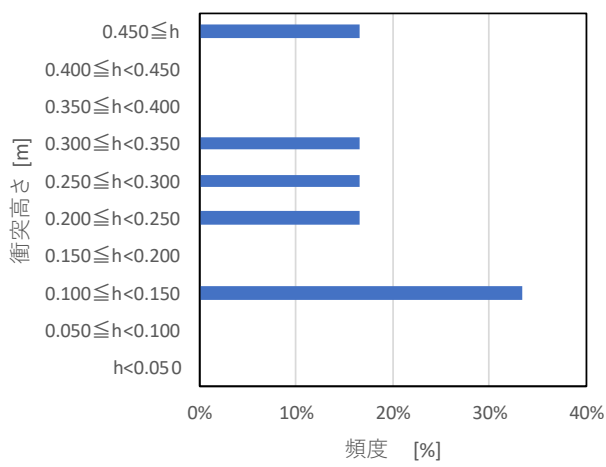


(b) TypeE

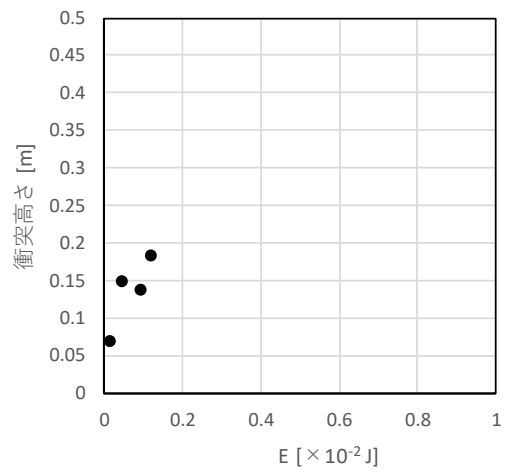
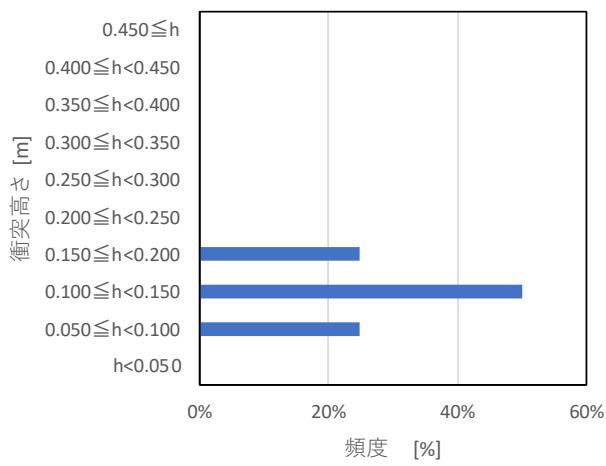
図- 7.27 衝突高さの分布とひずみエネルギーの関係 (Wf20)



(c) TypeF

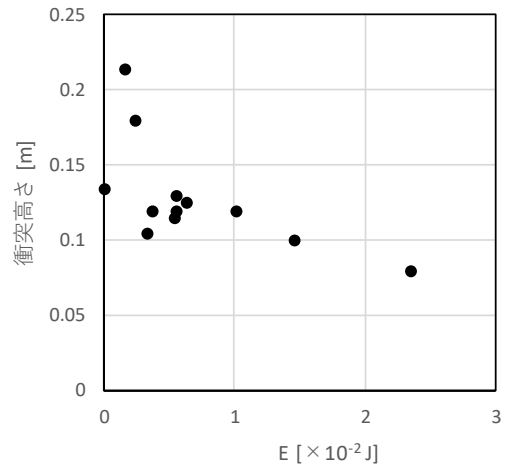
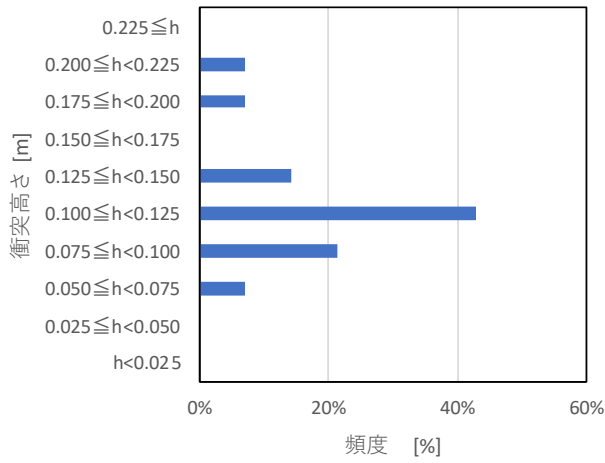


(d) TypeG

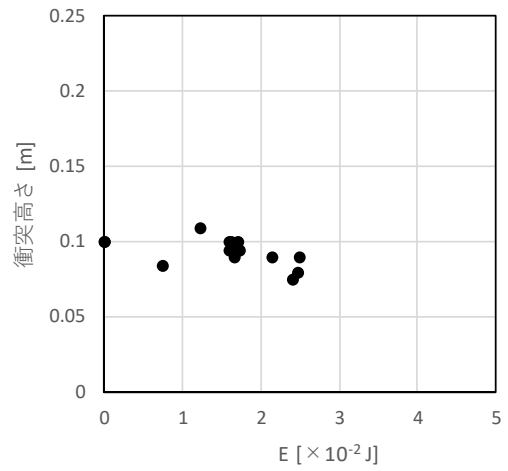
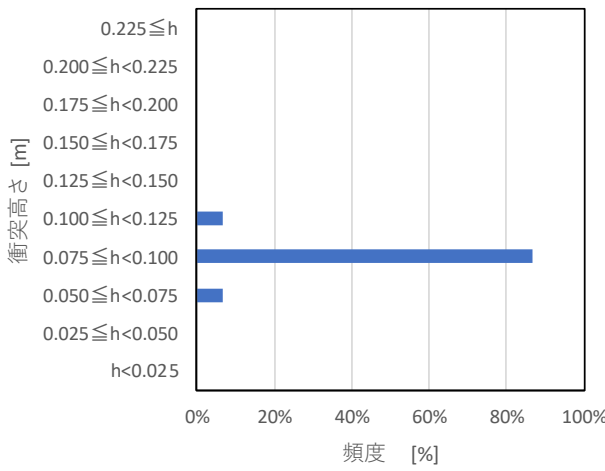


(e) TypeA(l=1.25m)

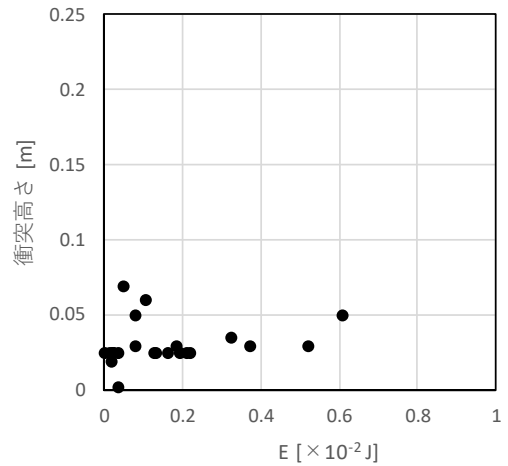
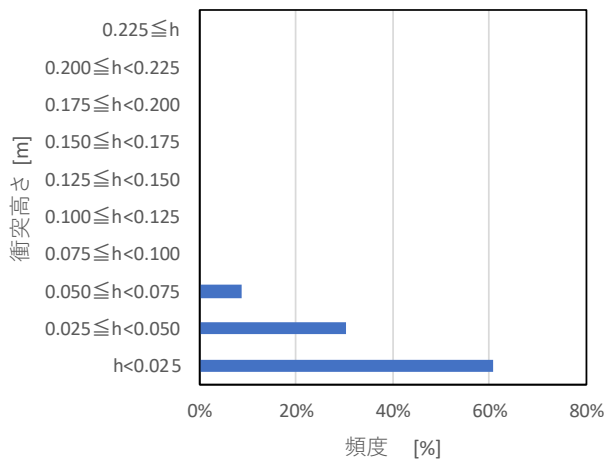
図- 7.27 衝突高さの分布とひずみエネルギーの関係 (Wf20) (つづき)



(a) TypeA



(b) TypeE

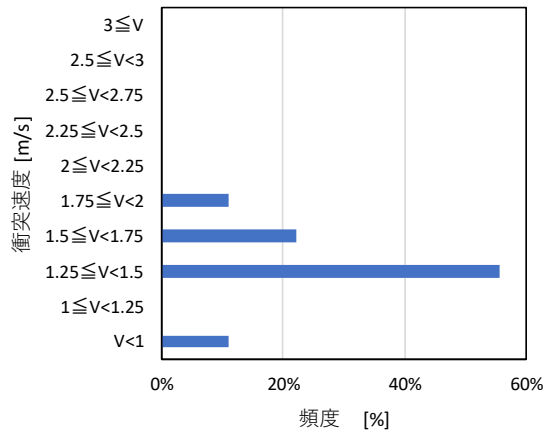


(c) TypeF

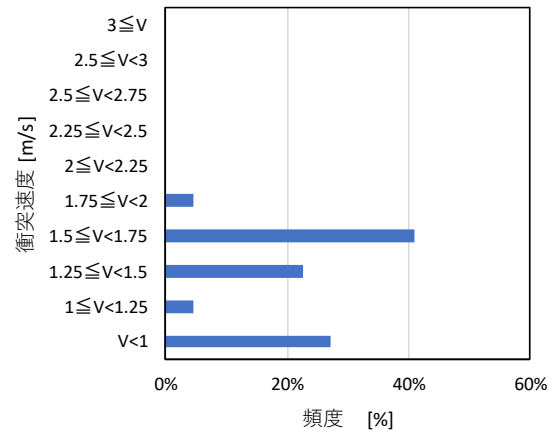
図- 7.28 衝突高さの分布とひずみエネルギーの関係 (Wf30)

表-7.8 衝突高さの平均値 (左 : 全データ平均, 右 : 衝突高 0.2m 以下の平均)
unit: m

	Wf10		Wf20		Wf30	
TypeA	0.142	0.128	0.240	0.088	0.122	0.115
TypeA(1.25)	—	—	0.136	0.136	—	—
TypeE	0.144	0.111	0.119	0.049	0.094	0.094
TypeF	—	—	0.06	0.06	0.032	0.032
TypeG	—	—	0.255	0.130	—	—

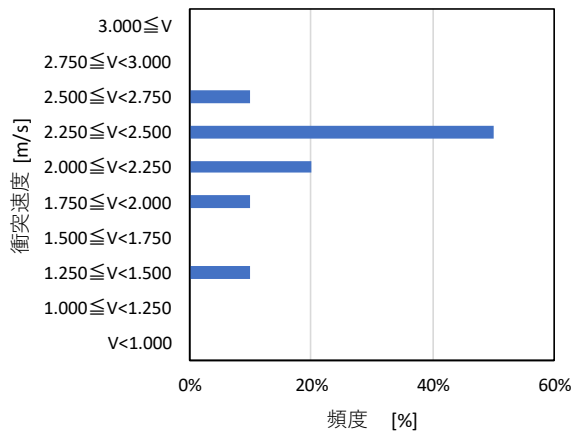


(a) TypeA

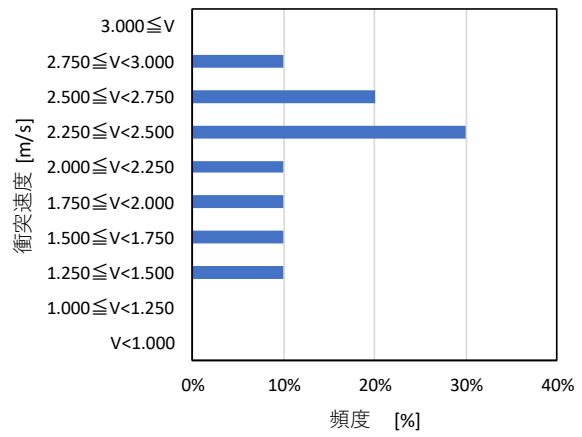


(b) TypeE

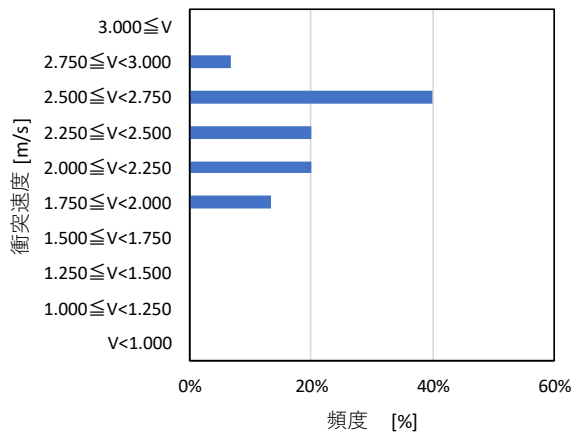
図- 7.29 漂流物の接近速度 (Wf10)



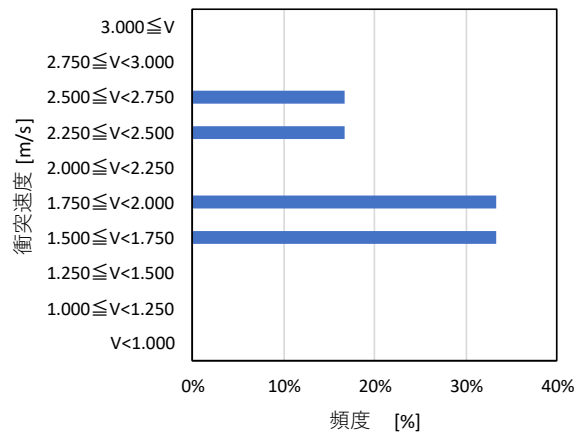
(a) TypeA



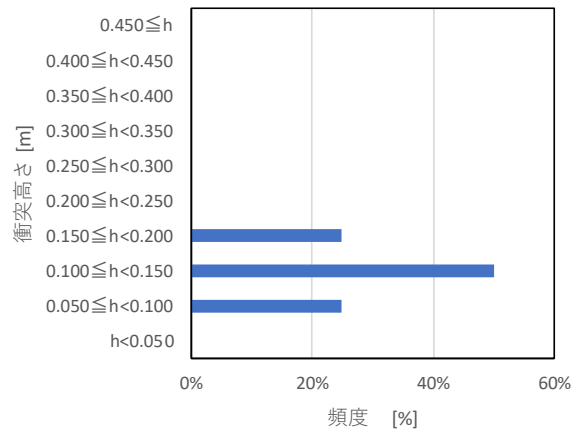
(b) TypeE



(c) TypeF



(d) TypeG



(e) TypeA(1.25)

図- 7.30 漂流物の接近速度 (Wf20)

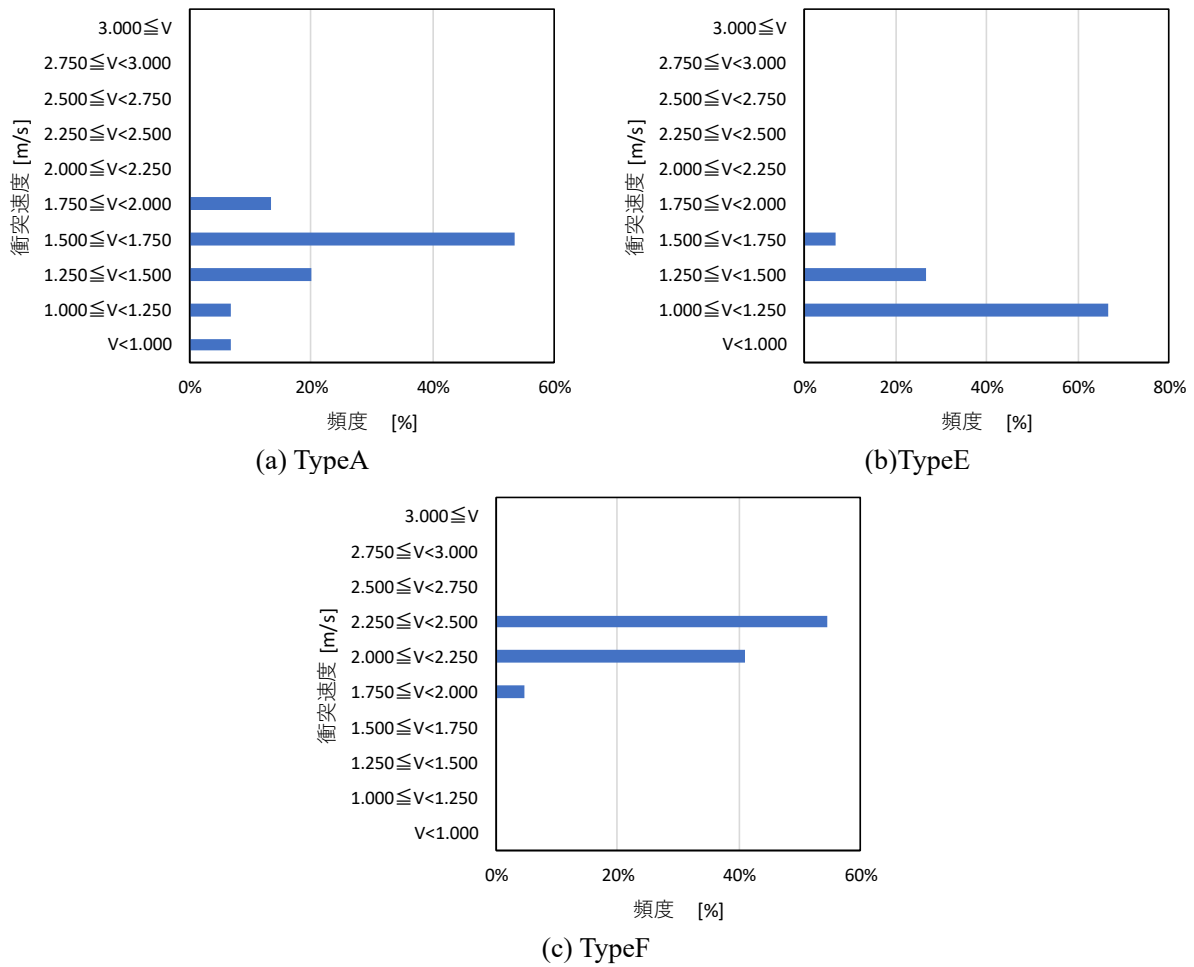
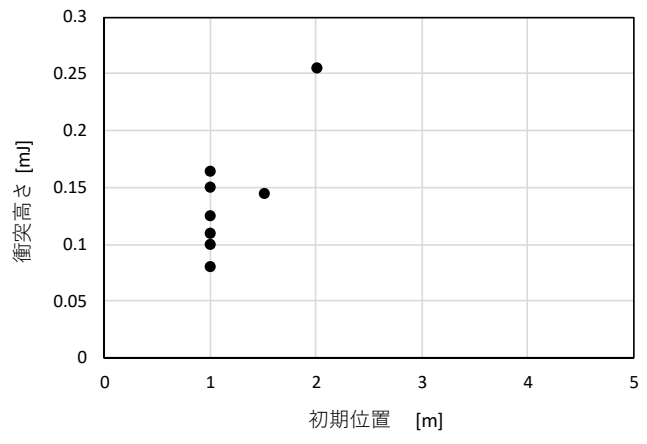
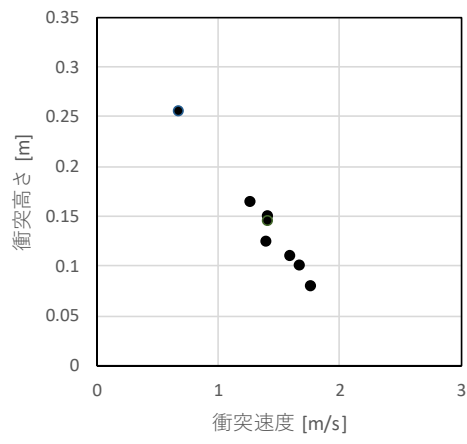


図- 7.31 漂流物の接近速度 (Wf30)

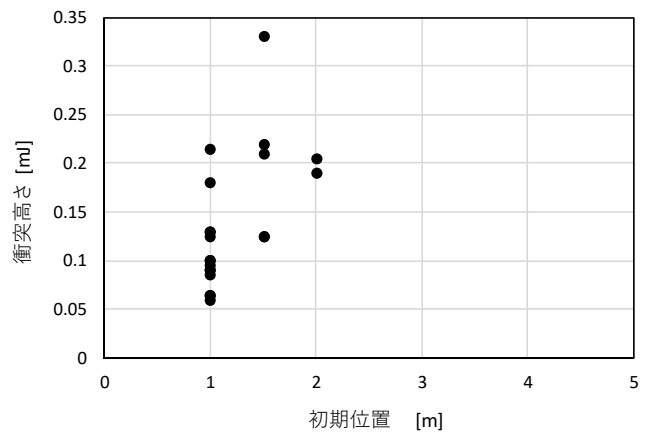
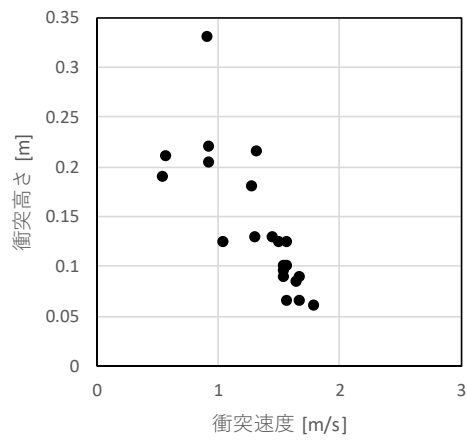
表- 7.9 衝突速度の平均値 (衝突高 0.2m 以下の平均)

	Wf10	Wf20	Wf30
TypeA	1.47	2.41	1.59
TypeA(1.25)	—	2.44	—
TypeE	1.50	2.29	1.23
TypeF	—	2.42	2.24
TypeG	—	2.50	—
波速	1.54	2.05	1.69

unit: m/s

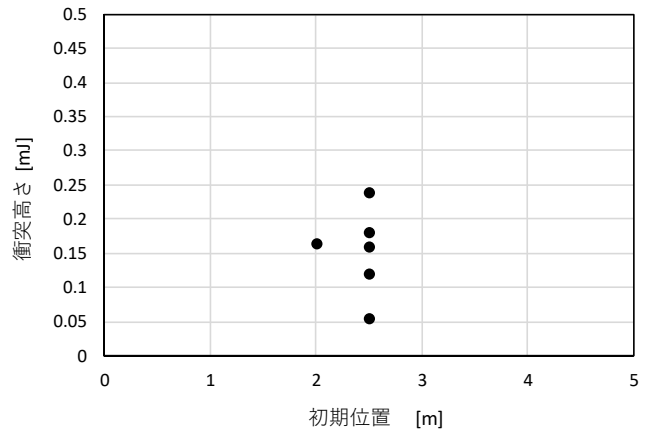
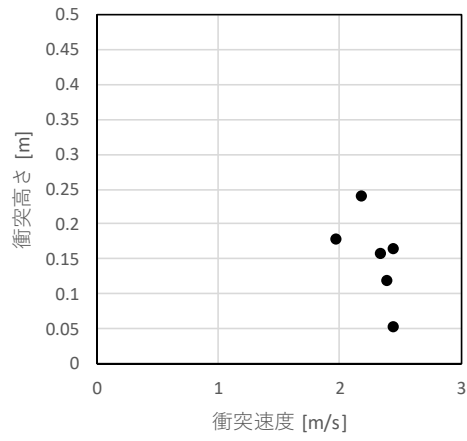


(a) TypeA

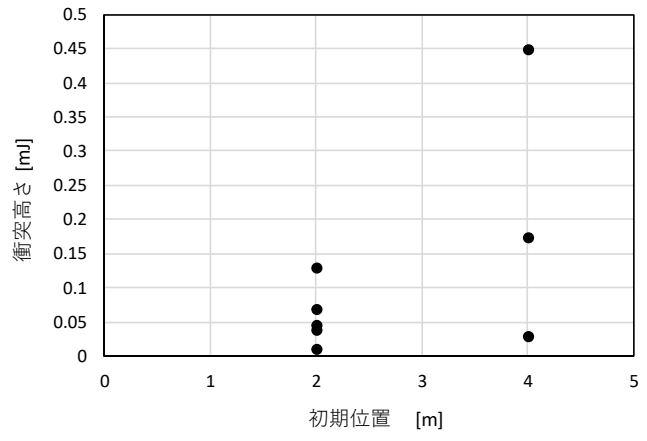
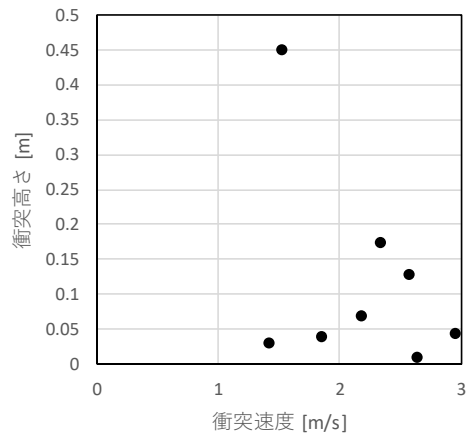


(b) TypeE

図- 7.32 漂流物の初期位置・衝突速度と衝突高さの関係 (Wf10)

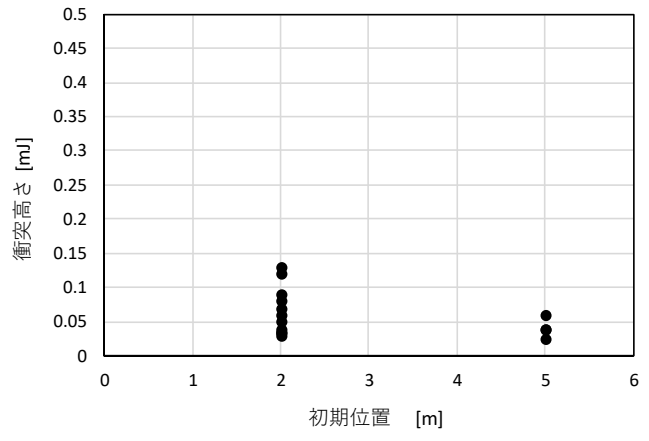
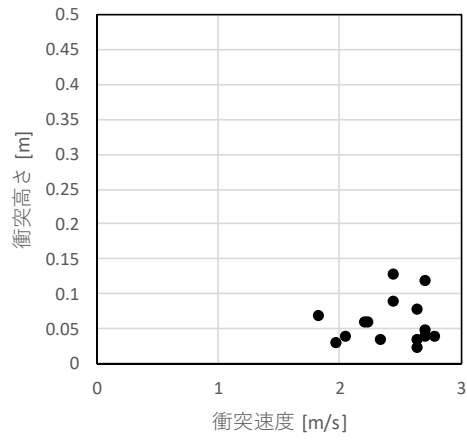


(a) TypeA

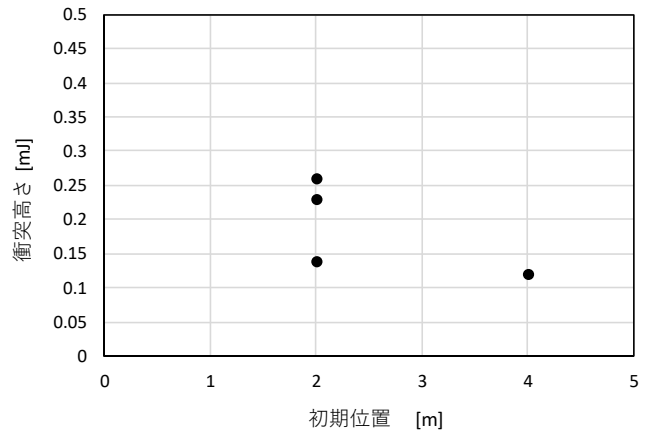
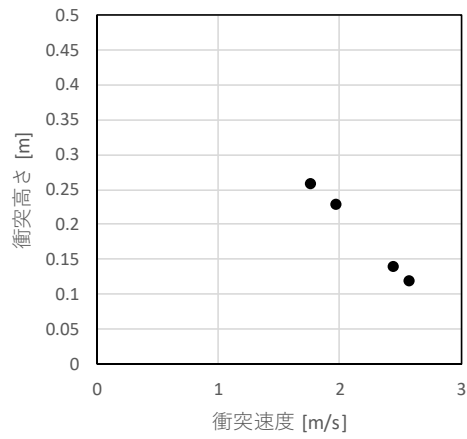


(b) TypeE

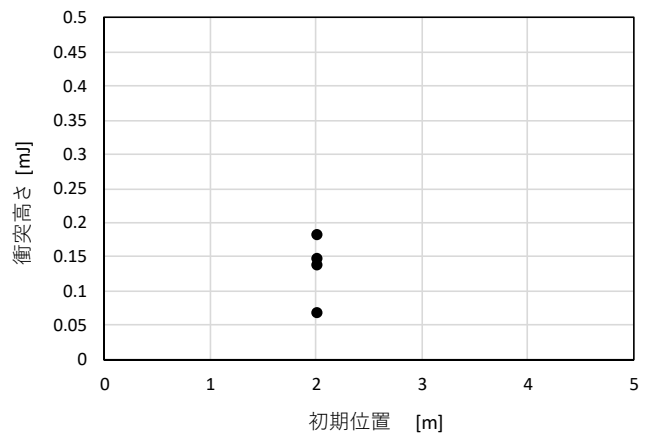
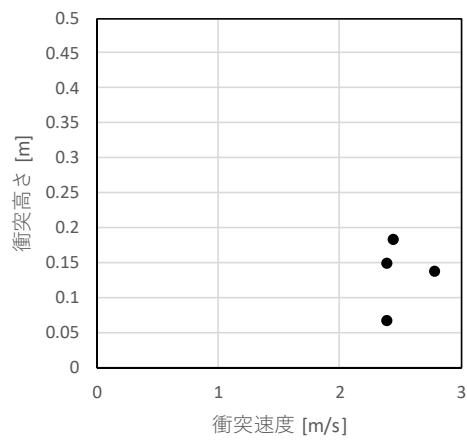
図- 7.33 漂流物の初期位置・衝突速度と衝突高さの関係 (Wf20)



(c) TypeF

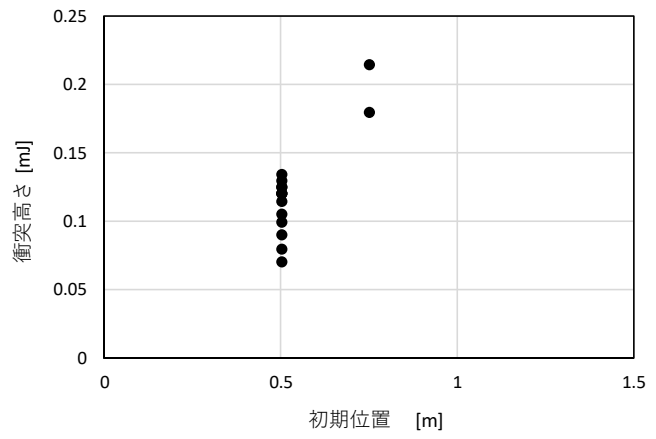
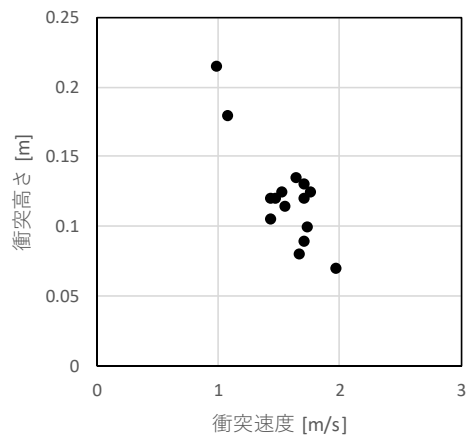


(d) TypeG

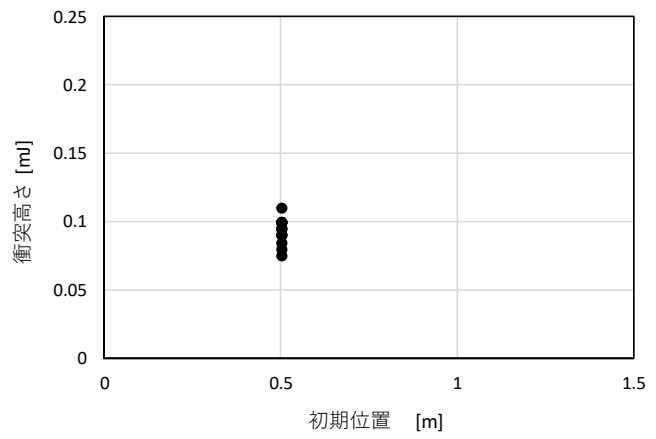
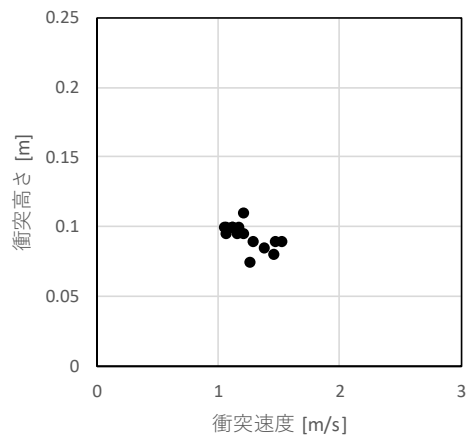


(e) TypeA(1.25)

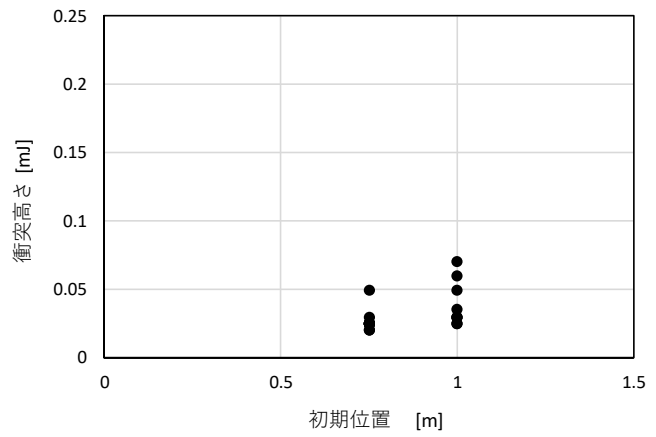
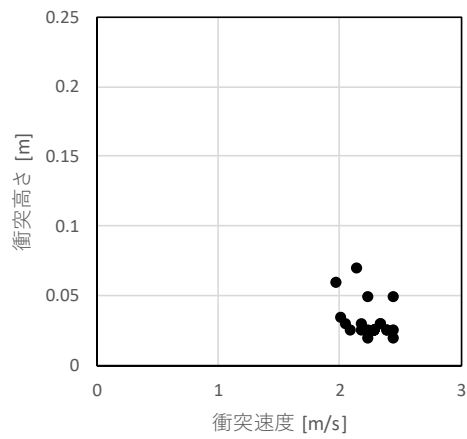
図-7.33 漂流物の初期位置・衝突速度と衝突高さの関係 (Wf20) (つづき)



(a) TypeA



(b) TypeE



(c) TypeF

図- 7.34 漂流物の初期位置・衝突速度と衝突高さの関係 (Wf30)

7.2.4. 衝突エネルギーの評価

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、水中衝突試験の結果を気中衝突試験の結果により補正する。気中衝突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（6章参照）。なお、補正前のひずみエネルギーを E_0 、補正後のひずみエネルギーを E とする。

$$E = \frac{E_0}{\xi}, \quad \xi = \min(ah^n, 1)$$

漂流物の初期位置と最大ひずみエネルギーの関係について、補正前の結果を図-7.35～図-7.37に、上式によりひずみエネルギーを補正した結果を、図-7.38～図-7.40に示す。なおここには、15回の試行結果のうち、最大と衝突した試行回の平均の2種類のひずみエネルギーを示している。図-7.35～図-7.37と図-7.38～図-7.40を比較すると、全体の傾向は変わっていないものの、ひずみエネルギーの値が補正により大きくなっていることが分かる。以降では、この補正後の E に基づき衝突ひずみエネルギーの特性について考察する。

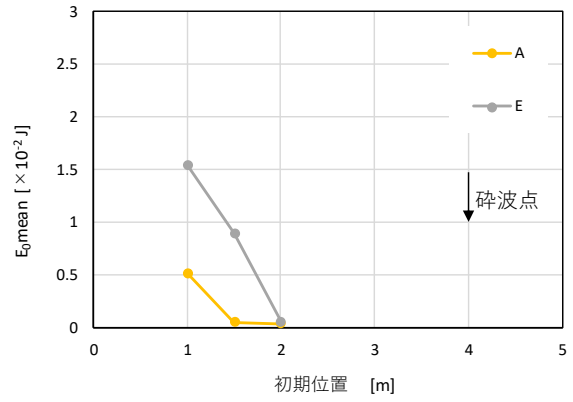
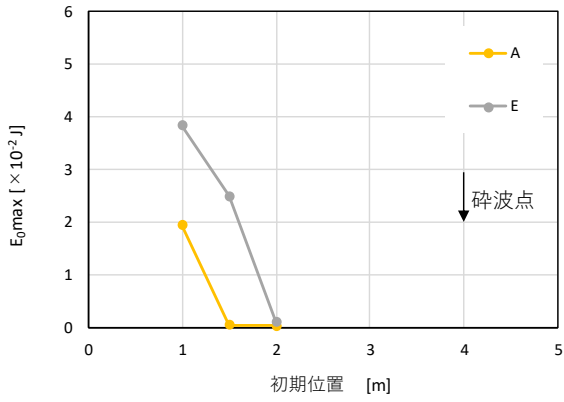
図-7.25に示した衝突頻度は、汀線から離れるにしたがって線形的に低下する傾向が確認された。図-7.38～図-7.40では、Wf10とWf30では、同様に汀線から離れるほどひずみエネルギーが小さくなる傾向が確認される。一方、Wf20では、試験ケースによるばらつきは大きいものの、汀線からの距離とひずみエネルギーの間に一定の相関を確認することが出来ない。これは、図-7.32～図-7.34において、衝突速度と衝突高さに負の相関が確認されたケースと整合する。津波高が比較的大きく、漂流物を押し出す力が大きい場合、漂流物は津波の先端部分に連行されて衝突し、その時の衝突速度は初期位置によらないため、初期位置とひずみエネルギーの関連性は小さいと言える。一方、津波高が比較的小さいと津波先端に遅れて衝突するケースがあるため、その場合、反射波の影響で衝突速度が小さく、衝突位置が高くなり、ひずみエネルギーは小さくなる。この傾向は初期位置が汀線から遠いほど顕著となるため、初期位置が汀線から遠いほどひずみエネルギーが低下する傾向が表れると考えられる。

本試験では、15回の繰り返し試験を実施しているが、特に初期位置が汀線近傍でない場合、このうち衝突した回数は限られており、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、衝突回数が少なけ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、衝突頻度が低い場合には、ひずみエネルギーは小さくなる傾向が確認出来る。安全側の評価を考えた場合、特にWf20のような大きな津波高の場合には、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、Wf20 のケースのひずみエネルギーが大きく、Wf10 と Wf30 が同程度に小さいことが分かる。これは、表- 7.9 に示した衝突速度の特徴と整合する。

TypeA と TypeE について比較すると、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 TypeE は重量や衝突速度がほぼ同じため、衝突する場合には衝突によるひずみエネルギーもほぼ同じになっていると考えられる。

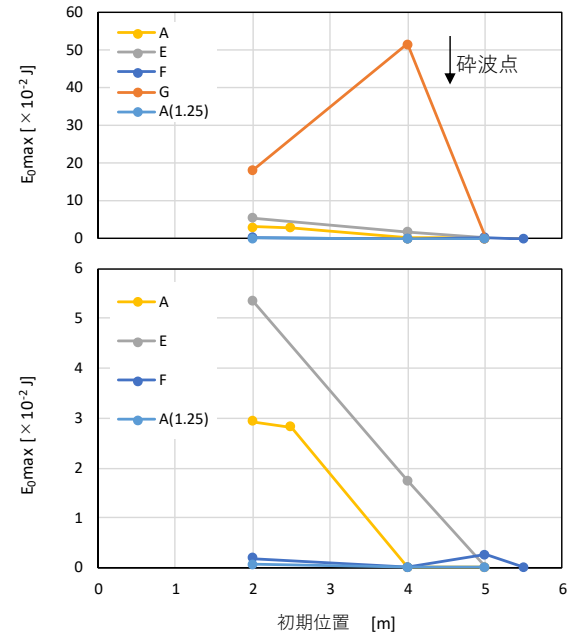
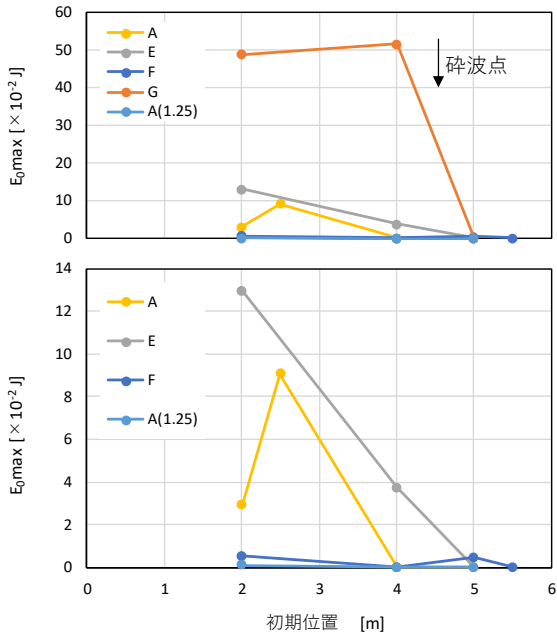
前述したように、衝突は主に初期位置が砕波点よりも岸側の場合に生じているが、初期位置が砕波点より沖側の場合でも衝突が確認されている。この場合のひずみエネルギーを見ると、すべてのケースでひずみエネルギーは小さくなっている。砕波点より初期位置が沖側の場合、漂流開始後、砕波点を通過する際に津波先端部分から遅れて連行されるため、衝突速度は小さく、ひずみエネルギーが総じて小さくなっていると考えられる。



(a) 最大値

(b) 平均値

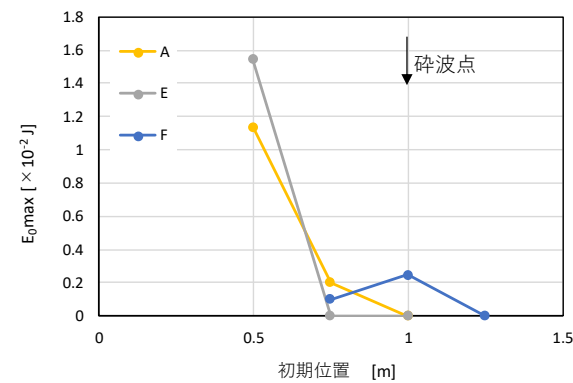
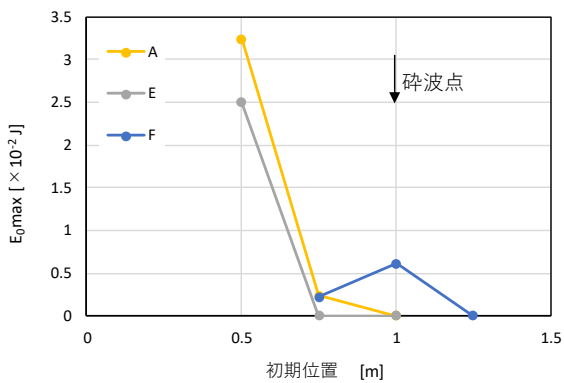
図-7.35 漂流物の初期位置とひずみエネルギーの関係 (Wf10)



(a) 最大値

(b) 平均値

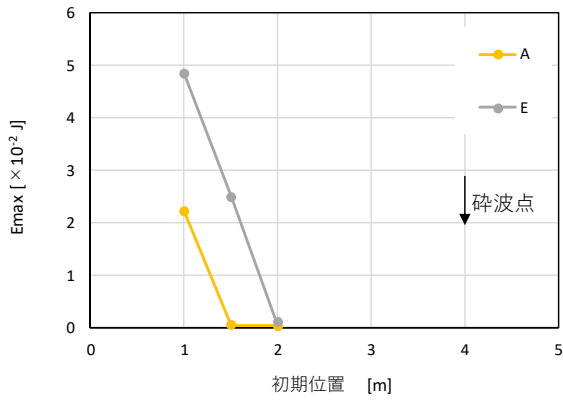
図-7.36 漂流物の初期位置とひずみエネルギーの関係 (Wf1020)



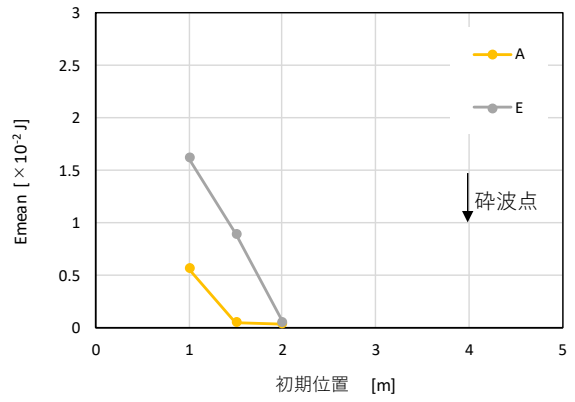
(a) 最大値

(b) 平均値

図-7.37 漂流物の初期位置とひずみエネルギーの関係 (Wf30)

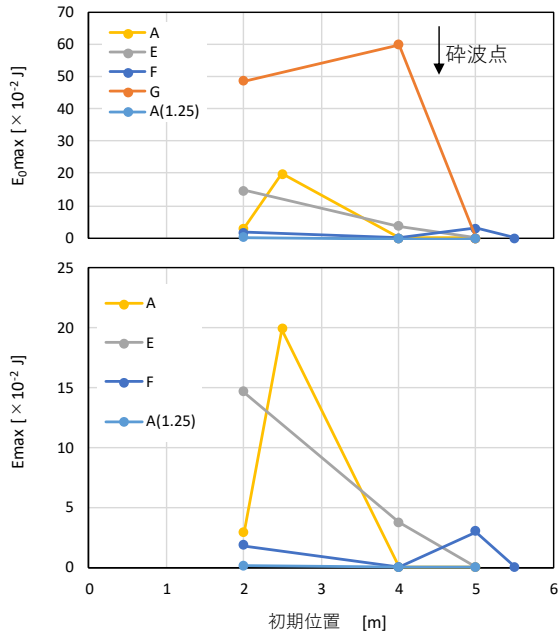


(a) 最大値

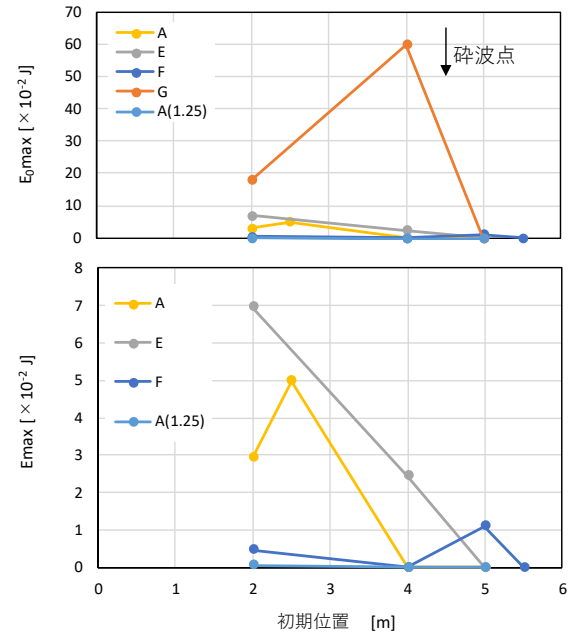


(b) 平均値

図-7.38 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 (Wf10)

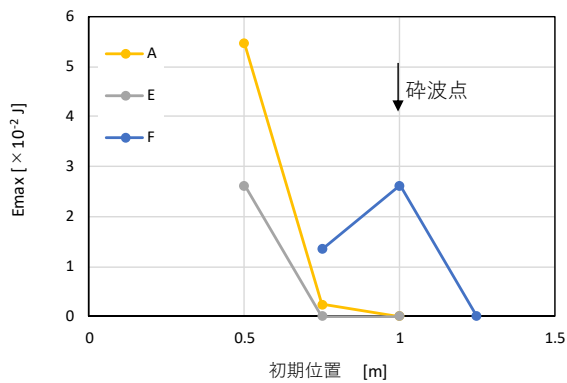


(a) 最大値

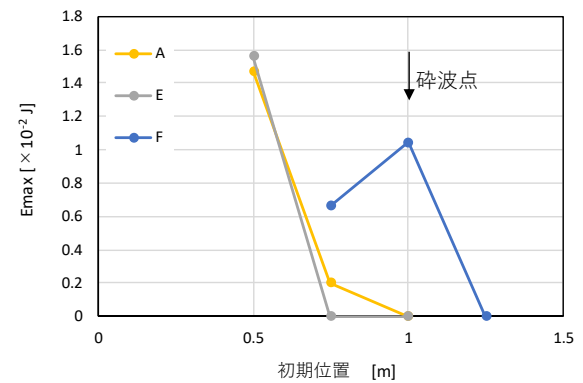


(b) 平均値

図-7.39 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 (Wf20)



(a) 最大値



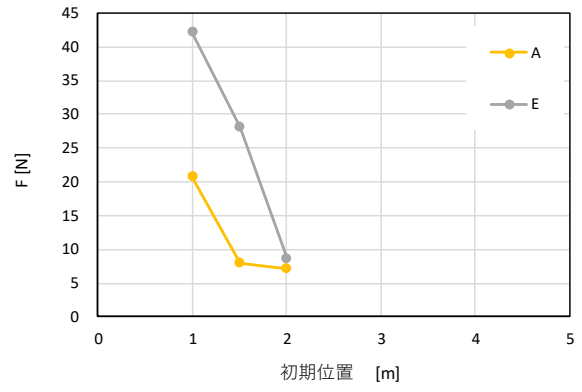
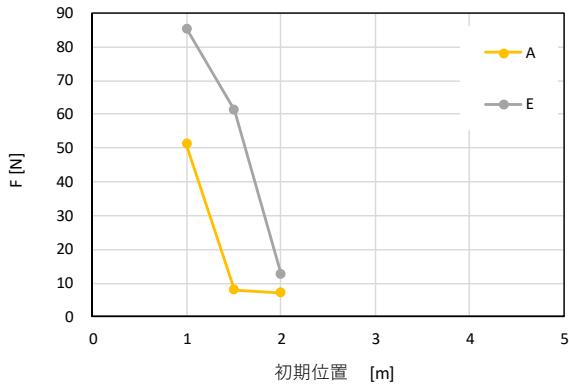
(b) 平均値

図-7.40 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 (Wf30)

7.2.5. 衝突力の算定

7.1.4 に示した衝突ひずみエネルギーと衝突力の関係を用いて、図- 7.38～図- 7.40 に示したひずみエネルギー E を衝突力 F に変換した結果を、図- 7.41～図- 7.43 に示す。また、表- 7.7, 図- 7.23 に示した、気中衝突試験におけるひずみ計測とロードセル計測による衝突力の比が水中衝突試験にも適用できると仮定して、ロードセル計測に相当する衝突力に換算した結果を、図- 7.44～図- 7.46 に示す。

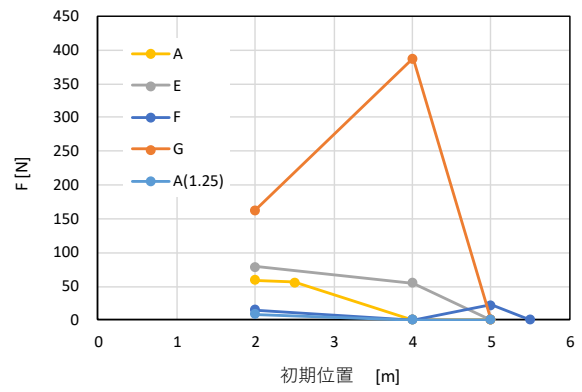
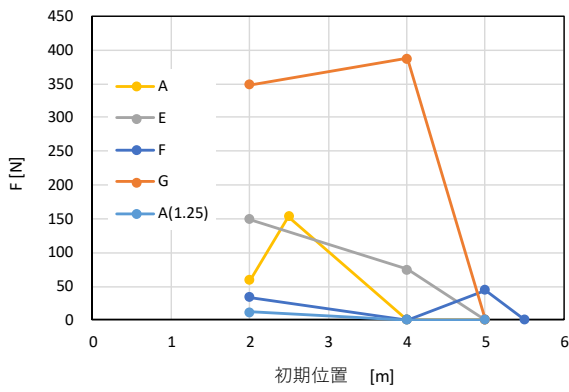
いずれも全体の傾向は、図- 7.38～図- 7.40 と類似しているが、ひずみエネルギーに比較して、小さな値が相対的に増大することが分かる。これは、衝突力が衝突エネルギーの $1/2$ 乗に比例する関係にあるためである。また、図- 7.41～図- 7.43 と図- 7.44～図- 7.46 を比較すると、TypeG のロードセルによる衝突力が相対的に低下している。これは、TypeG のひずみ計測とロード計測による衝突力の違いが小さいためであり、気中衝突試験で言及したように、TypeG の質量が大きいのに対し、相対的に剛性が低いことが要因と考えられる。



(a) 最大値

(b) 平均値

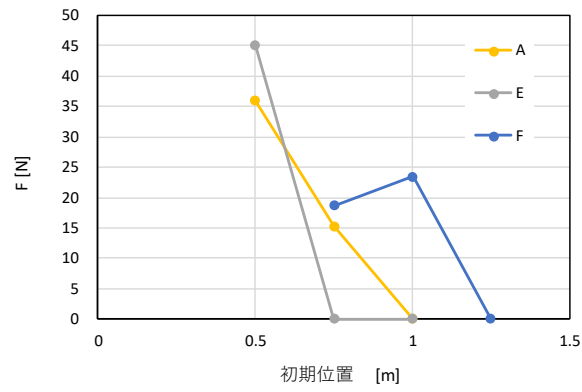
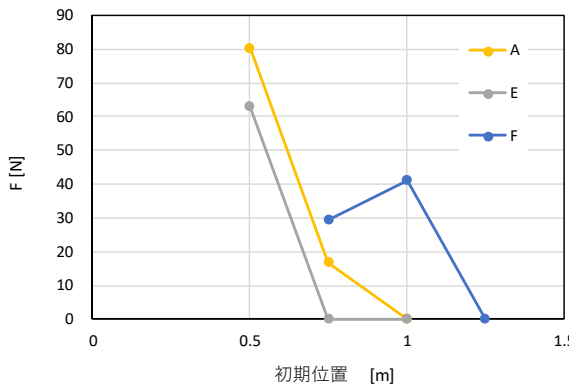
図- 7.41 漂流物衝突力の算定結果 (Wf10)



(a) 最大値

(b) 平均値

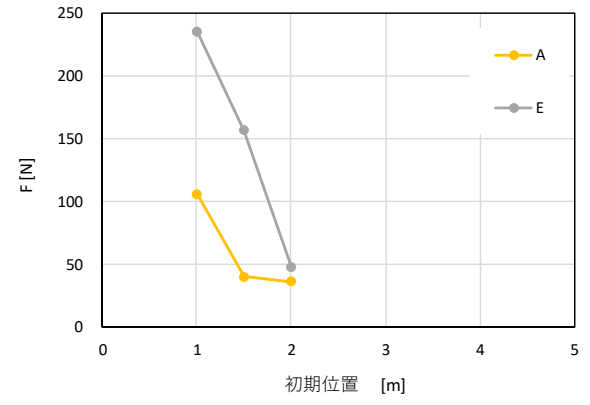
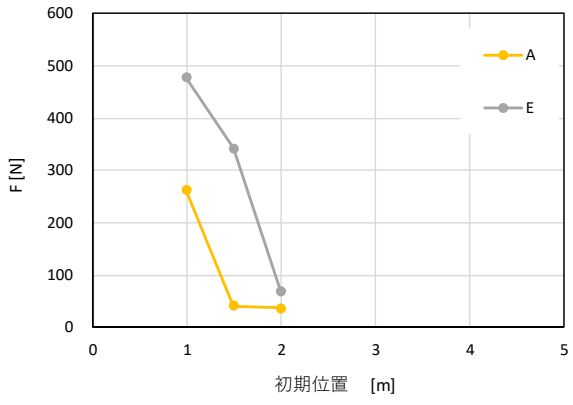
図- 7.42 漂流物衝突力の算定結果 (Wf20)



(a) 最大値

(b) 平均値

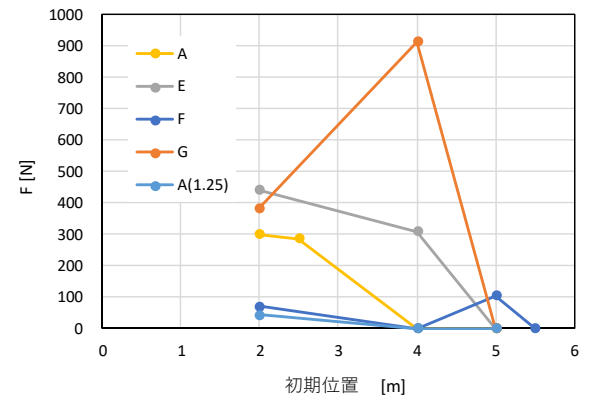
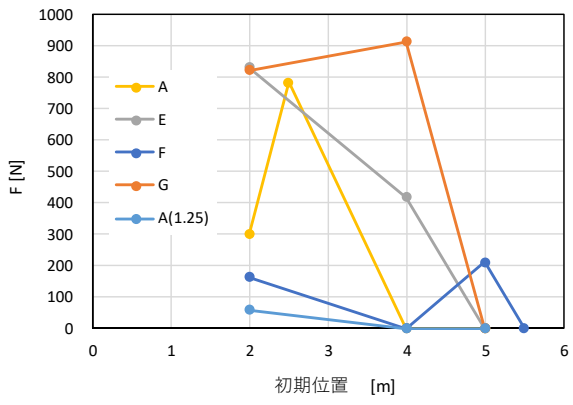
図- 7.43 漂流物衝突力の算定結果 (Wf30)



(a) 最大値

(b) 平均値

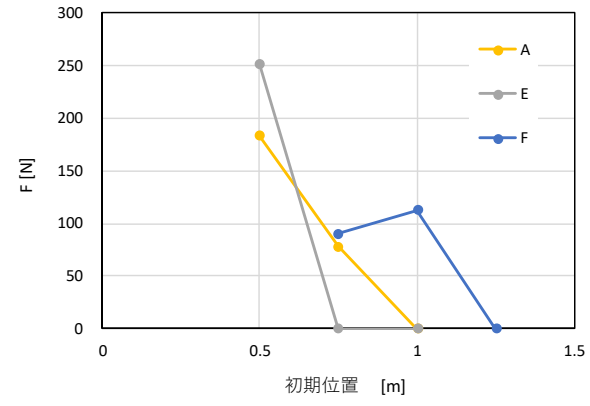
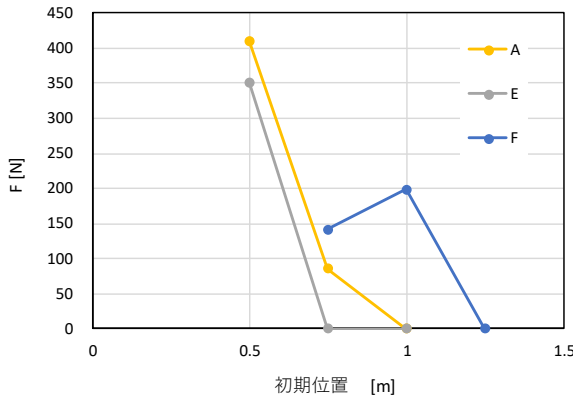
図-7.44 ロードセル計測に相当する漂流物衝突力 (Wf10)



(a) 最大値

(b) 平均値

図-7.45 ロードセル計測に相当する漂流物衝突力 (Wf20)



(a) 最大値

(b) 平均値

図-7.46 ロードセル計測に相当する漂流物衝突力 (Wf30)

7.2.6. 衝突力の評価

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。この場合、水中衝突の衝突時間を $\Delta t'$ とすると、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、

$$F = \frac{\pi}{2\Delta t'} C_{MA} M V_0 \quad (7.23)$$

$$F = \sqrt{k C_{MA} M} V_0 \quad (7.24)$$

と表すことが出来る。この時、 $\Delta t'$ は質量の 1/2 乗に比例すると考えると、 $\Delta t' = (C_{MA}M/M)^{1/2} \Delta t = C_{MA}^{1/2} \Delta t$ となり、気中の衝突時間を適用した場合は、

$$F = \frac{\pi \sqrt{C_{MA}}}{2\Delta t} M V_0 \quad (7.25)$$

となる。付加質量係数を考慮している既往の評価式 (2 章参照) では、FEMA(II) の式を除き C_{MA} について 1 次の式となっているのに対し、上式では 1/2 次の式となっている。ただし、上式においても、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 次となる。水中の衝突時間が質量係数の 1/2 乗に反比例するため、気中の衝突時間を考えると 1/2 乗の係数になることが分かる。

次に、試験結果に基づき C_{MA} の値について評価する。図-7.47 は、試験結果について、 $1/2\alpha\beta M V_0^2$ とひずみエネルギー E_{exp} を比較したものである。水中衝突試験では、堤体に対し漂流物が直角に衝突し気中衝突試験の $1/2\alpha\beta M V_0^2$ にあたるひずみエネルギーが生じることは稀ではあるものの、すべての試験結果で α は 1 以下となっている。2 章に示した既往の評価式では、松富や FEMA が、被衝突構造物が壁の場合は質量係数が 1 以下になることを指摘しており、本試験結果はこれに整合する。本試験の結果から、壁状構造物に対する水中衝突力の評価においては、質量係数を 1 とすることが保守的であると考えられる。

以上の結果に基づき、衝突力の評価方法について以下にまとめる。津波漂流物の衝突力 F は、

$$F = \sqrt{k C_{MA} M} V_0 \quad (7.26)$$

により評価され、この時、気中衝突の衝突時間 Δt 、水中衝突の衝突時間 $\Delta t'$ は、

$$\Delta t = \pi \sqrt{\frac{M}{4k}} \quad \Delta t' = \pi \sqrt{\frac{C_{MA} M}{4k}} \quad (7.27)$$

となる。この時、被衝突構造物が壁状構造物で不透過の場合、質量係数 $C_{MA}=1$ とすることで、保守的な評価が可能である。複合剛性 k は、漂流物の軸剛性 k_d と被衝突構造物のバネ定数 k_s を用いて、

$$1/k = 1/k_d + 1/k_s \quad (7.28)$$

と表される。なお、非衝突構造物が変形を伴う板状構造物の場合、 k_s は、漂流物の質量と剛性、および衝突時間から算定することが出来るが、試験結果によれば漂流物質量の関数になると考えられる。また、 k_d と k_s の違いが大きい場合、複合剛性は次式により近似出来る。

$$\begin{cases} k = k_d & \text{when } k_d \ll k_s \\ k = k_s & \text{when } k_d \gg k_s \end{cases} \quad (7.29)$$

図-7.48、図-7.49 は、以下の算定式により算出した漂流物衝突力の評価結果 $F_{est.}$ と、水中衝突試験の結果 $F_{exp.}$ を比較した結果である (それぞれ、7.2.6, 7.1.4 参照)。

$$F_{est.} = \sqrt{k C_{MA} M V_0} \quad 1/k = 1/k_d + 1/k_s \quad (7.30)$$

$$F_{exp.} = \sqrt{2k_s E/\beta} \quad (7.31)$$

ひずみ計測から求めた衝突力とロードセル計測相当の衝突力に変換したものの両者を示した。また、すべての試行試験のうち衝突が確認されたすべての試験結果を示した。ここで、 k_d は剛性試験の結果を、 k_s には、図-7.48 では試験結果から同定した質量との関係式（図-7.16 参照）を、図-7.49 では剛性試験の結果（表-7.2 参照）をそれぞれ適用した。また $C_{MA}=1$ とし、 β は表-7.4 に示した値を用いた。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、提案式は数 10 倍の過大評価になっているが、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見掛け上過大となる。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られる。

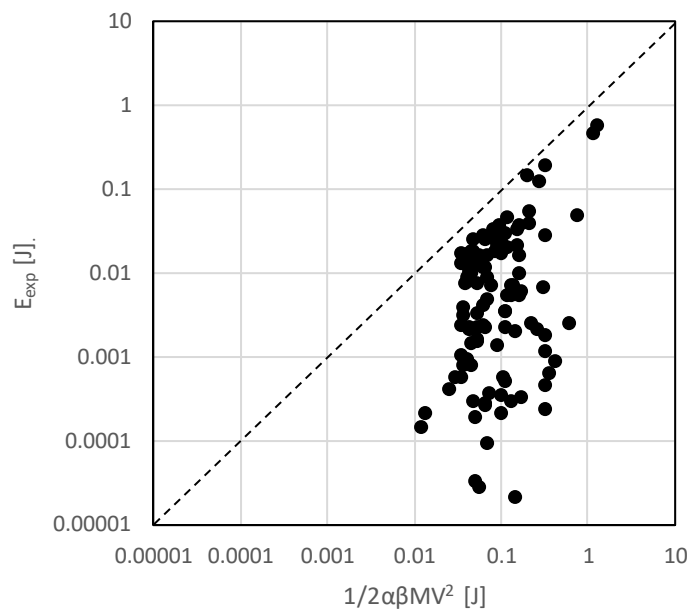


図-7.47 質量係数

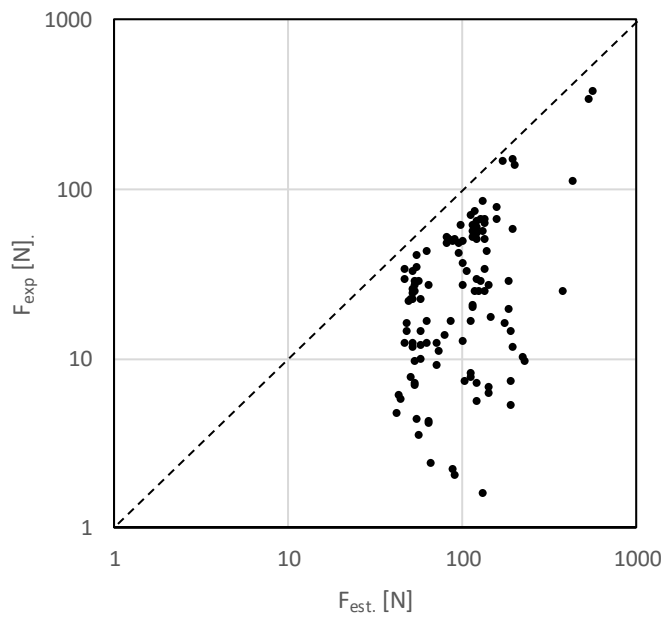


図- 7.48 評価式と試験結果の比較 (ひずみ計測試験)

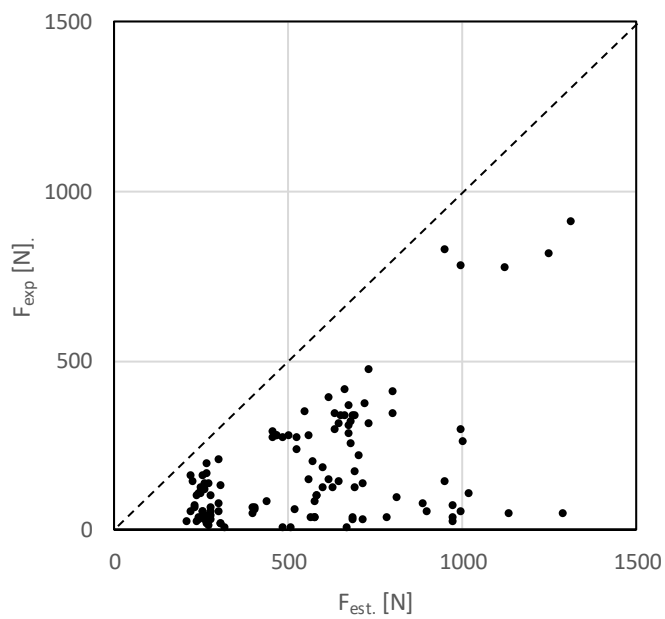


図- 7.49 評価式と試験結果の比較 (ロードセル計測試験相当)

8. 既往の評価式との比較

8.1. 既往の評価式との比較

2章に示した各既往の衝突力評価式と、提案式と前述の衝突力評価式を比較した結果を、図-8.1に示す。いずれもロードセル計測相当の衝突力に変換した結果を示した。また、評価式による算定に用いた各パラメータを表-8.1に示す。基本的に2章のモデルスケールに示したのと同じであるが、水谷の式の Δt には、ロードセルによる試験結果から得られた計測値を、FEMA式の k には、ロードセル計測による気中衝突試験の結果から同定した値を適用した。また図中には、本事業での試験結果に加え、類似事業で得られた試験結果を同時に示した。

2章によれば、各評価式による評価値は、有川らの式、FEMA(II)式、FEMA(III)式、水谷らの式、松富の式、池野らの式、道示書の順に小さくなるが、図-8.1に示した評価値も、ほぼ同じ順番となっている。また、提案式はFEMA式よりも少し小さく、水谷らの式より大きくなっている。

提案式は、剛性パラメータを試験結果に基づき設定していることもあり、類似事業の一部のケースで若干過小評価となっているもの、本事業および類似事業の試験ケースを適切に再現していると言える。

また、FEMA式は本事業における提案式と同形であるため、提案式と類似の傾向を示している。ただし、FEMA(II)式においては重要度係数として1.3を、FEMA(III)式においては1.25を乗じているため、この係数の分だけ保守的な評価となっている。

有川らの評価式は、全体を通してもっとも安全側の結果を示している。FEMA式と比較すると、2章では同程度の値であったのに対し、ここではFAMA式に対し0.5倍～0.75倍程度の評価値となっている。これは、2章においてはFEMA式の剛性をひずみ計測結果に基づき設定しているが、ここではロードセル計測の結果に基づく値としているためである。有川らの式は、全体に過大評価となっているが、特に点線で囲んだTypeGのケースで過大となっている。有川らの式は質量 M に対し0.6次の式（提案式では0.5次）となっているため、質量が大きい場合に過大評価となる傾向が示唆される。

松富の式と有川らの式は同形であるが、松富の式では質量係数 C_{MA} を0.5、有川らの式では1.7としているため、有川らの式に対し約1/3の小さな評価値となっている。ただし、被衝突構造物が壁体の場合は質量係数が小さくなるのがFEMAにおいても指摘されており、有川の式における $C_{MA}=1.7$ は過大と考えられる。松富の式および有川らの式の適用においては、漂流物の剛性を反映した諸係数の調整が必要であると言える。

水谷らの評価式は、若干の過小評価となっているものの、試験結果と整合した結果を与えている。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、これに試験結果の値を適用しているためと考えられる。衝突力を算定する際には、この衝突時間をどう評価するかが問題となる。また、水谷の式の第2項の Δt に、提案式における Δt の式を適用すると、第2項は提案式と同形式で $2/\pi$ 倍となり、提案式に対し概略0.6倍の評価値を与える。これに加え、第1項の影響により、提案式に近い値を評価値として与えていると考えられるが、第1項は、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ではないと言える。

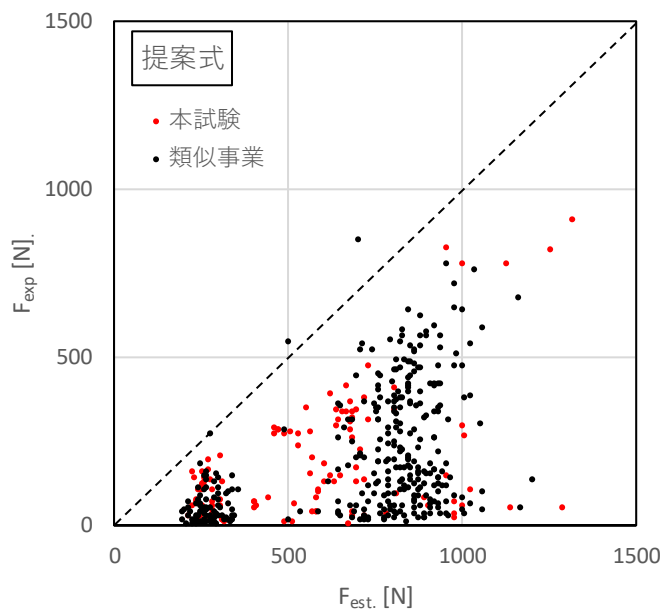
池野らの式の根拠となった水理実験では、浮遊状態からの漂流物の漂流を対象としているが、

衝突力が衝突速度の 2.5 乗に比例するため、衝突速度の影響を受けやすい。ここでは過小評価となっているが、衝突速度が大きい場合には過大評価になる可能性もある。また、剛性に関わるパラメタを含んでいないため、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。

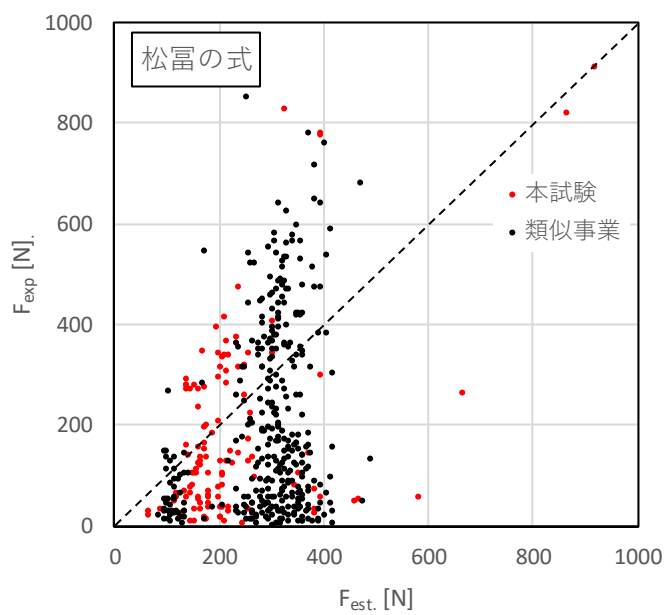
道示書の評価式は、2 章に示したように衝突時間を 1s として導出されたものと考えられる。試験における衝突時間は 1/1000~1/10000s オーダーであるため、過小評価となっている。また、縮尺によるスケール効果を考慮できないため、実機スケールでの衝突時間を考慮しても、衝突時間は 1s よりも短いと想定されるため、縮尺効果を考慮しても過小評価となる。

表-8.1 衝突力評価式の比較に用いたパラメター一覧

松富の式	C_{MA}	σ_f [N/m ²]			
	0.5	2.0.E+07			
池野らの式	C_{MA}	γ [N/m ³]			
	2.0	7,000			
水谷らの式	C_{MA}	η_m [m]	Δt [s]		
	-	1/2漂流物高	実験値		
有川らの式	C_{MA}	E_1 [N/m ²]	v_1	E_2 [N/m ²]	v_2
	1.7	7.00E+10	0.34	2.65E+09	0.39
FEMA(II)	C_{MA}	k [N/m]			
	1.0	実験値			
FEMA(III)	I_{tsu}	C_0	k [N/m]		
	1.25	1.0	実験値		

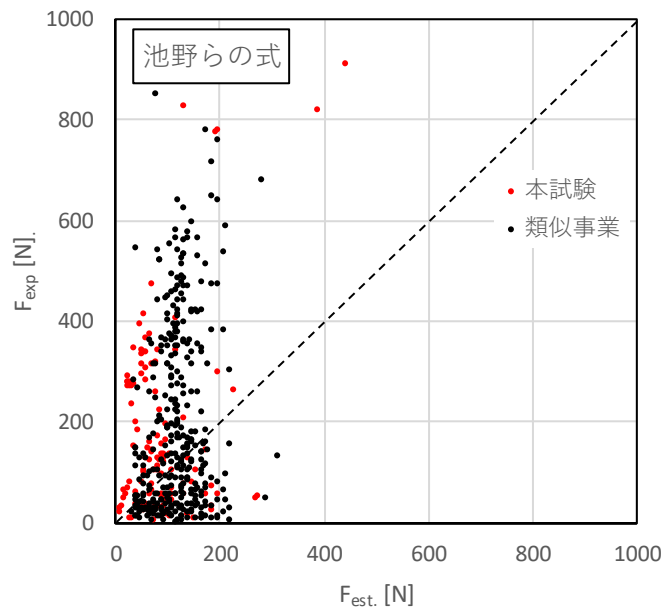


(a) 本事業における提案式

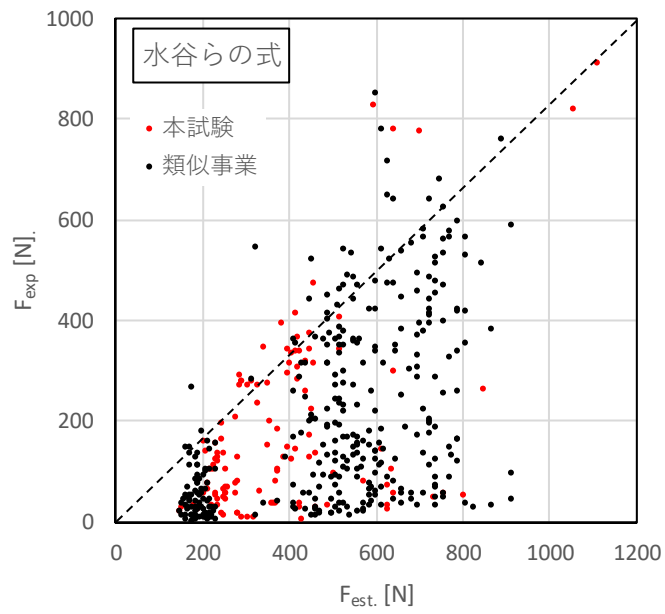


(b) 松富の式

図- 8.1 各漂流物衝突力評価式と本試験および類似事業結果の比較

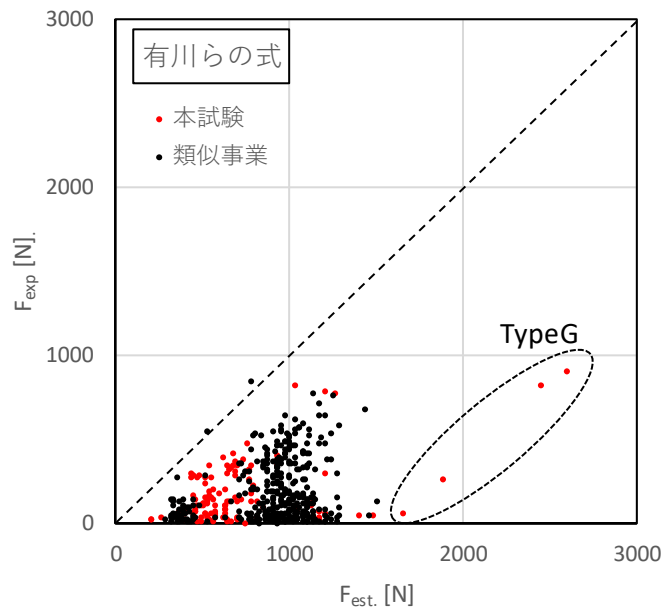


(c) 池野らの式

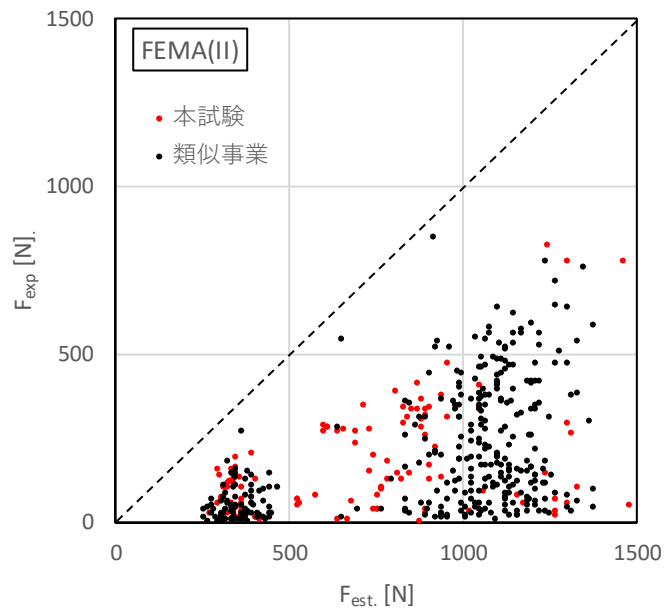


(d) 水谷らの式

図- 8.1 各漂流物衝突力評価式と本試験および類似事業結果の比較 (つづき)

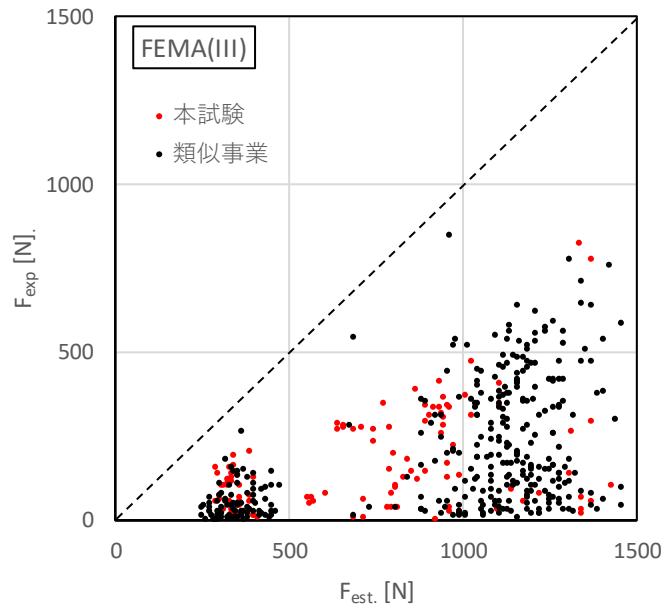


(e) 有川らの式

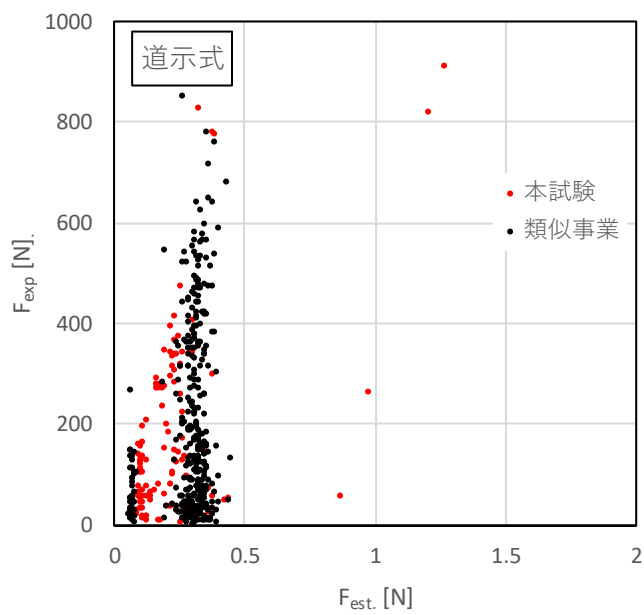


(f) FEMA(2nd edition)の式

図- 8.1 各漂流物衝突力評価式と本試験および類似事業結果の比較 (つづき)



(g) FEMA(3rd edition)の式



(h) 道路橋示方書の式

図- 8.1 各漂流物衝突力評価式と本試験および類似事業結果の比較 (つづき)

8.2. 漂流物衝突力評価に係る体系的な考え方の整理

津波による漂流物衝突力の評価を考える場合、流れによる漂流と水面変動による漂流に分けて考える必要がある。本事業による衝突力の評価は後者に対するものであるが、流れによる漂流について、以下に言及する。

一般に、海域での津波による水位変動は、時間に対して緩やかであり、津波波形の先端部などの一部を除いて水面勾配は小さく、船舶等を漂流させる力は極めて小さい。そのため、津波による浮遊物の漂流は主に流れによって生じる。漂流物に働く流れの力を、流速の 2 乗に比例する抗力によって評価することにより漂流物の軌跡を再現する解析手法が、既にいくつか提案されている¹。これらの方法では、津波シミュレーションにより流況場を再現解析し、漂流物の抗力係数を設定して相対流速から抗力を算定し、漂流物の運動方程式を解いて漂流物の動きを解析している。本事業における水理試験は鉛直 2 次元水槽を用いているが、鉛直 2 次元場では護岸に近付くと流速が小さくなり、護岸位置では流速 0 となるため、流れによる漂流を評価出来ない。実際は、平面的な流れ場が津波により生じるため、護岸に向かう流れによって漂流する漂流物は、護岸直角方向の流速が 0 であっても、慣性の影響で護岸に衝突する可能性がある。したがって、流れによる漂流物衝突を評価するためには、平面場での津波の解析が必要となる。

一方、津波の水位変動による浮遊物の漂流は、主に水面変動によって生じる水面勾配すなわち圧力勾配によって生じると考えられるため、津波波形の先端部分の水面勾配が大きくなる等の条件において生じると考えられる。その衝突力評価においては、衝突頻度と衝突力、また碎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-8.2 にまとめる。

本試験結果によれば、初期位置が碎波点より沖の場合、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。ただし、一般に、水面勾配が 1 を超えるのは碎波発生 of 過渡状態と考えるのが妥当である。また、初期位置が碎波点よりも沖で衝突が生じる場合、漂流物は碎波点を通る際に波の先端に対し遅れて漂流する。そのため、衝突する際には、反射波の影響を受けて衝突力は非常に小さくなる。

衝突した場合の漂流物衝突力は、基本的に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。ただし、初期位置が汀線から離れると津波波形の先端部分に遅れて連行されるため、反射波の影響により衝突力が小さくなる。そのため、波の条件にもよるが、汀線から離れるにしたがって衝突力が小さくなる場合がある。

既往の評価式のうち、FEMA の式が本試験を最も適切に再現できる。ただし、本事業においては試験結果に基づき剛性を評価しているが、実際の漂流物の衝突においては、この剛性をどう評価するかが課題となる。なお、剛性は、実物大実験や衝撃・構造解析等による衝突時間から算定することが可能である。また、松富の式や有川らの式においても、剛性を適切に設定することにより、衝突力の評価に適用できる可能性がある。ただし、FEMA や本事業における提案式は質量に対し 0.5 乗、衝突速度に対し 1.0 乗に比例する形式となっているのに対し、松富の式や有川らの式はそれぞれ質量に対し 0.6 乗、衝突速度に対し 1.2 乗となっているため、質量や衝突速度に対しより大きく変動する。これは剛性の評価方法の違いによるものであるが、線形剛性が仮定出来る

¹ 例えば、「高潮津波シミュレータ(STOC)による津波被害解析手法」、港湾空港技術研究所報告 第 55 巻第 2 号。

場合には、FEMAの方がより適切であると考えられる。

表-8.2 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可能性がある。ただし、砕波点を超える際に砕波に巻き込まれる形で津波の進行から遅れる場合が多いため、衝突頻度は低い。	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、初期位置が砕波点より岸側であれば、衝突の可能性があると考えるのが保守的である。
衝突力	砕波点を超える際に津波先端部に対し遅れて連行されるため、反射波の影響により衝突力は小さくなる。	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波速とほぼ等しいが、護岸越流する場合には、越流により加速した流速の影響を受け、それよりも大きくなる。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、衝突力を適切に評価出来る式はFEMAの式と考えられるが、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、質量係数は壁構造物を対象とした場合は、1とすることで保守的な評価が可能と考えられる。