

Study on simplified estimation method on bending deformation of beam with sand cushion

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2020-01-09 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/00056504

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



博 士 論 文

敷砂緩衝材を有するはりの曲げ変形簡易推定法に関する研究

Study on simplified estimation method on bending deformation of
beam with sand cushion

金沢大学大学院自然科学研究科

環境デザイン学専攻

学籍番号 : 1624052008

氏 名 : 中村 佐智夫

主任指導教員名 : 榊谷 浩 教授

提出年月 : 2019 年 6 月

敷砂緩衝材を有するはりの曲げ変形簡易推定法に関する研究

目 次

第 1 章 序 論	1
1.1 本研究の背景	1
1.2 既往の研究	3
1.3 本研究の目的	3
1.4 本論文の構成	4
参考文献	5
第 2 章 実 験	6
2.1 静的実験	6
2.2 重錘落下実験	8
2.2.1 剛基礎上実験	9
2.2.1.1 実験装置および実験条件	9
2.2.1.2 実験結果	10
2.2.2 H 鋼はり上実験	12
2.2.2.1 実験装置および実験条件	12
2.2.2.2 実験結果 (伝達衝撃力および載荷点変位)	14
2.2.2.3 実験結果 (エネルギー伝達率)	17
2.2.2.4 実験結果 (各加速度と各衝撃力)	18
2.2.2.5 実験結果 (H100 シリーズに関する補足)	23
2.2.2.6 実験結果 (重錘速度と H 鋼はり載荷点部速度)	25
2.2.2.7 実験結果 (H 鋼はり載荷点部加速度の推定)	28
第 3 章 曲げ変位の推定方法	34
3.1 推定方法	34
3.1.1 運動量保存則を用いた方法 (推定方法 1)	35
3.1.2 最大伝達衝撃力を用いた方法 (推定方法 2)	35
3.1.3 伝達衝撃波形を用いた方法 (推定方法 3)	35
3.2 推定結果	39
3.3 推定結果に関する考察	40
参考文献	43
第 4 章 結 論	44
謝 辞	46

第1章 序論

1.1 本研究の背景

日本は、国土の70%が山地であり、その地質は種類が多く、分布が複雑である。また、構造変形などのため脆く崩れやすいところが多い。

しかしながら、都市や集落は各地に存在し、それらを結ぶ道路は山間部を通らざるをえない。そのため旧来より落石対策が行われてきているが、危険箇所は多数残っており、近年でも落石対策は急を要する課題といえる。

落石対策は通行規制などのソフトな対策と、構造物によるハードな対策があり、ハードな対策は落石となりそうな浮石や転石を斜面から除去または斜面に固定する予防工と、防護対象の山側または上に設置する防護工に大別できる（図1-1）。

写真1-1～1-6に示すように、防護工には、ロックシェッド、落石防護柵、落石防護擁壁、落石防護土堤、落石防護柵、ポケット式落石防護網などがあり、近年、高エネルギー対応の落石防護柵やポケット式落石防護網などが開発されているが、ロックシェッドは落石防護工のなかでも安全性や耐久性に優れた構造物といえる。

従来、ロックシェッドの設計は、剛基礎における実験により得られた衝撃力の最大値を静的荷重に置き換え、許容応力度法により行われてきた。しかしながら、実際の対応可能な落石エネルギーと設計落石エネルギーでは20倍以上ともいわれる差があり、経済的で効果の高いロックシェッド設置のためには、精度が高く簡易な設計法の開発が望まれている。

また、既設のロックシェッドに関して、斜面の経時変化などにより設計条件より厳しい条件の落石予備物質が発見された場合、これまでは補強を行う必要があったが、簡便な方法で性能の余裕範囲内であることが確認できれば、場合によっては、補強を行う必要がなくなる。



図1-1 落石対策



写真 1-1 ロックシェッド



写真 1-2 落石防護柵



写真 1-3 落石防護擁壁（落石防護柵付）



写真 1-4 落石防護柵



写真 1-5 ポケット式落石防護網



写真 1-6 落石防護土堤（補強土壁）

1.2 既往の研究

平成元年7月、福井県越前町玉川の国道305号で大規模な岩盤崩落が発生し、ロックシェッドを破壊し走行中のマイクロバスを押し潰し15名が亡くなるという事故が発生した。これ以降、緩衝材を有するロックシェッドの性能を把握するために、様々な研究が行われている。

平成3年、日本サミコン(株)^{1,2)}研究所において、実物大PCロックシェッドに対し重錘落下実験が行われている。重錘重量1tf落下高5mの設計条件に対し、重錘重量5tf落下高20mの条件でも破壊せず、設計と実際で対応可能な落石エネルギーに大きな違いがあることが確認されている。

園田³⁾は、落石のロックシェッドへの衝突を完全塑性的であると仮定し、運動量保存則を用い落石の運動エネルギーの衝突によるロックシェッドのエネルギー分担率を算出する式を提案している。

また、園田⁴⁾は、エネルギー伝達率の簡易計算法としての3質点系モデルや、落石と敷砂のモデル化に個別要素、ロックシェッドのモデル化に剛体ばね要素を用いる衝撃応答解析を提案し、上記日本サミコン(株)の実験に適用を試みている。

橋ら⁵⁾は、長さの違う鉄筋コンクリートはりの上に敷砂の入った鋼製砂槽を設置し、重錘落下実験を行っている。その実験結果から中村ら⁶⁾は、鉄筋コンクリートはりのスパンが長く剛性が小さい場合には、上記運動量保存則を用いたエネルギー分担率の適合性は高いが、スパンが短く剛性の大きい場合は適合性が低いことを確認している。

また、中村ら⁷⁾は、鋼製砂槽を設置したH鋼はりに対し行った重錘落下実験結果に対し、剛基礎上の衝撃力波形を入力とした動的弾塑性解析の適用性について検討したが、塑性変形が小さい場合のみ適用可能であることを示した。

1.3 本研究の目的

ロックシェッドなど敷砂緩衝材を設置する落石防護構造物の材質は、主にRC製・PC製および鋼製の3種類、構造形式も箱形式・門形式・逆L形式・単純梁ばり形式などがあり、道路幅員により構造スパンも変化する。また現場によって、対応しようとする落石の大きさや衝突速度などの条件も幅がありその結果、構造物断面の大きさも様々である。

PC製を例にロックシェッドと構造の類似している落石防護棚を含めて考えると、その固有周期は数msから100ms以上まで幅広く、数十ms程度の剛基礎上の落石衝撃力作用時間と比較して、約10分の1~数倍までになる。固有周期の長いものと短いものでは、その振る舞いに大きい違いがあると思われる。

このように多様なロックシェッドに関し、全体を視野に入れた研究は少なく、特に塑性変形する場合の曲げ変形量に関し設計実務に有効な簡易推定方法を得るに至っていない。

本研究では、敷砂緩衝材を設置した構造部材の最大曲げ変形について設計に応用可能で簡便な照査方法を示すことを目的としており、いくつかの推定方法について検討している。推定方法検証のためのデータを得るため、まず剛基礎上で鋼製砂槽に入れた敷砂緩衝材に対し重錘落下実験を行い、その緩衝特性を明らかにした後、同様の緩衝材を設置したH鋼単純ばりへの重錘落下実験を行っている。

◆本研究で検討する推定方法のポイントは以下の通りである。

◇設計実務上は、落石衝突条件(落石質量、衝突速度)・緩衝材条件(敷砂厚)が定めれば、設計用の剛基礎上落石衝撃力の最大値や衝撃力波形を定められるものとし、設計の都度実験はしない。

注) 本研究は、モデル実験のため剛基礎上実験を行い衝撃力のデータを得ているが、設計実務上は過去に行

われている実物大剛基礎上実験結果を使用するか、あるいは不足分はあらかじめ実験を行っておき、設計の都度実験を行わないでよいようにする。

◇設計の簡便性のため、用いる解析法は Duhamel 積分等の弾性解析にとどめる。

◆本研究における実験条件の設定のポイントは以下の通りである。

◇様々な固有周期のロックシェッドを模擬した実験を行うため、実物実験ではなくスパン 1.5 m から 6 m（固有周期約 4.4 ms～71 ms）の単純ばりを使用したモデル実験とした。

◇推定方法の精度の検証を容易にするため、供試体はひび割れなどがなく弾性範囲の荷重変位関係が線形である H 鋼とした。

◇敷砂緩衝材は鋼製砂槽に入れることにし、その敷砂厚は、重錘衝突条件に対し余裕がない場合として 24 cm、余裕がある場合として 48 cm とした。

また、鋼製砂槽を用いることにより、構造物に伝わる伝達衝撃力を鋼製砂槽下のロードセルで直接測定することが可能となり、荷重の作用範囲も明確にできた。

1.4 本論文の構成

本論文は 4 つの章で構成され、各章の内容は以下の通りである。

第 1 章では、本研究の背景や既往の研究、本研究の目的と本論文の構成を示す。

第 2 章では、構造部材としての H 鋼はりの静的曲げ試験、緩衝材の性能を明らかにするための剛基礎上重錘落下実験、および緩衝材を設置した H 鋼はりに対し行った重錘落下実験の結果を示している。

H 鋼断面・スパン・敷砂緩衝材厚・重錘質量・衝突速度をパラメータとし、種々の衝突条件に対する曲げ変形推定方法のためのデータを得た。

第 3 章では、3 つの曲げ変形推定方法を用いて実験結果に対する適合状況を検討した。

3 つの推定方法は以下の通りである。

- (1) 園田²⁾の提案による運動量保存則から求まるエネルギー分担率による方法
- (2) 剛基礎上传達衝撃力の最大値とエネルギー一定則を用いる方法
- (3) 剛基礎上传達衝撃力波形とエネルギー一定則を用いる方法

第 4 章では、全体を総括した。

参考文献

- 1) 松葉美晴, 後藤吉晴, 佐藤彰, 音田奨, 岡畑博子, 井上理恵: 実物 PC 製シェッドの落石による破壊実験について (1), 第 2 回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp.241-246, 1993.6
- 2) 松葉美晴, 後藤吉晴, 佐藤彰, 音田奨, 岡畑博子, 井上理恵: 実物 PC 製シェッドの落石による破壊実験について (2), 第 2 回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp.247-253, 1993.6
- 3) 園田恵一郎: 落石覆工の設計方法についての一提案, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.1563-1572, 1993.3
- 4) 園田佳巨: エネルギー基準による落石覆工の安全性照査に関する研究, 学位論文, 1994.2
- 5) 橘紗代子, 榎谷浩, 中村佐智夫: 有限要素法を用いた RC はりの衝撃応答解析に関する一考察, 第 7 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム, pp.77-82, 2004.11
- 6) 中村佐智夫, 榎谷浩, 橘紗代子: 各種緩衝材を設置した RC はりの衝撃実験, 第 7 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム, pp.101-106, 2004.11
- 7) 中村佐智夫, 榎谷浩, 江野翔紀, 佐藤彰, 徐晨: 緩衝材を有する落石防護工の限界状態照査に関する一提案, 構造工学論文集, Vol.62A, pp.952-960, 2016.3

第2章 実験

2.1 静的実験

構造物としてのH鋼単純ばりの曲げ性能を確認するため静的曲げ試験を行った。

供試体の仕様一覧を表2-1に示す。パラメータはH鋼断面、材質、スパンである。

後述の重錘落下実験に合わせるため、載荷はスパン中央一点載荷とした。実験の様子を写真2-1に示す。

また、荷重変位曲線の実験値と計算値を図2-1に示す。計算値は降伏点で耐力が一定となるバイリニア型とした。弾性範囲において実験値と計算値はよく一致している。また、H鋼の塑性断面係数と断面係数の比である形状係数は1.1~1.2であるので、全体の結果も妥当といえる。

表2-1 H鋼供試体仕様一覧

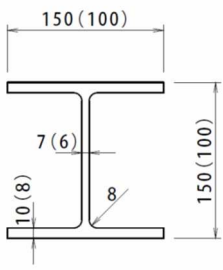
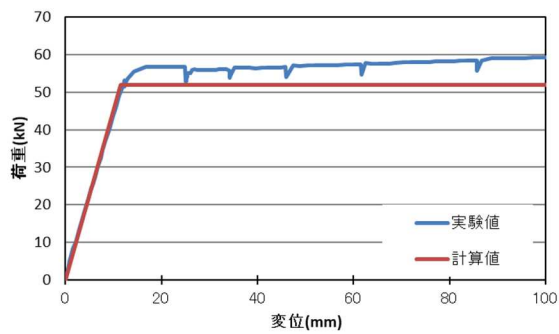
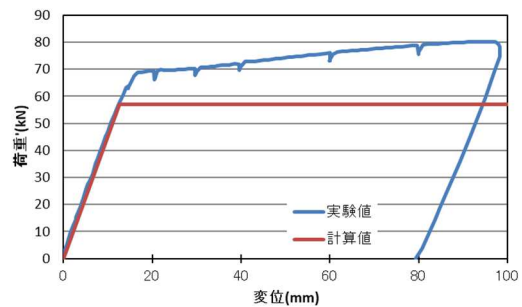
H鋼	H150	H100	
材質	SS400	SS400	SN490B
断面積(cm ²)	39.65	21.59	
断面2次モーメント(cm ⁴)	1620	378	
単位質量(kg/m)	31.1	16.9	
降伏応力度(N/mm ²)	306	344	378
スパン(m)	1.5,3,6	2	2
H鋼断面 ()内はH100の寸法を示す。 単位：(mm)			



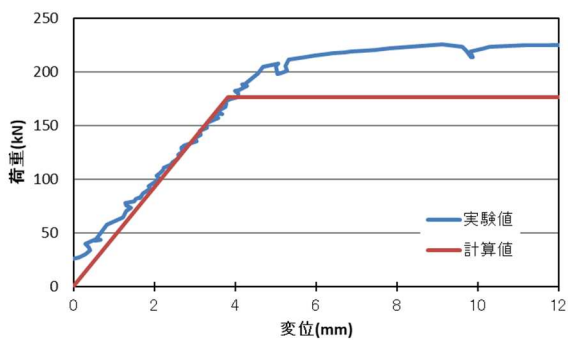
写真2-1 静的曲げ試験



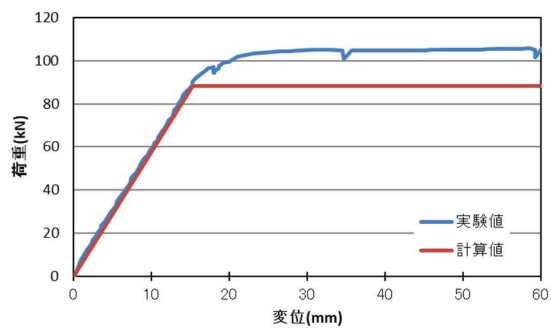
(a)H100-SS400-スパン 2m



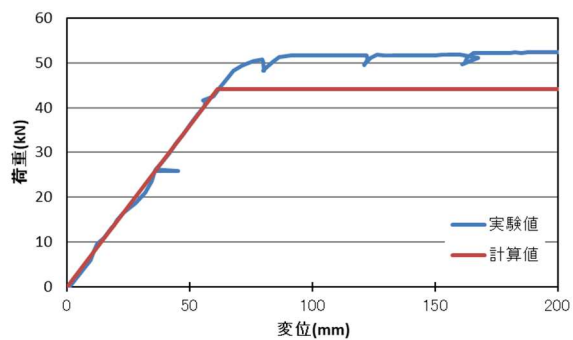
(b)H100-SN490B-スパン 2m



(c)H150-SS400-スパン 1.5m



(d)H150-SS400-スパン 3m



(e)H150-SS400-スパン 6m

図 2-1 荷重変位曲線 (静的)

2.2 重錘落下実験

本実験は自由落下式重錘衝突実験を採用し、重錘は質量 456.1kg と 157.0kg、どちらも曲率半径 565mm の衝突面を持つ直径 150mm の円筒形状の衝突部を設置している。衝突部先端から重錘本体までの突起部の長さは 600mm で、重錘本体が鋼製砂槽に衝突しないようにした。したがって、重錘質量によらず敷砂への貫入部の寸法形状は同じである。重錘全体の形状を写真 2-2 に示す。写真は 157.0kg 時で上に鋼製の付加質量を設置し 456.1kg とする。安全を考慮し、重錘はガイドレールにより誘導している。敷砂緩衝材は、平均粒径 0.403mm、均等係数 2.71、土粒子の密度 2.654g/cm³ の乾燥した川砂を、幅 30cm×奥行 40cm×深さ 30cm または 60cm の鋼製砂槽（写真 2-3 深さ 30cm 時）に層厚 24cm または 48cm となるように詰め、十分に締固めを行った。

敷砂緩衝材の粒径加積曲線を図 2-2 に示す。砂層厚 24cm は重錘貫入量に対し層厚に余裕が少ない場合、砂層厚 48cm は比較的余裕がある場合を想定した。敷砂緩衝材およびロードセルを含む砂槽の質量は、剛基礎上実験では層厚 24cm の場合は 113.7kg、層厚 48cm の場合は 197.5kg であった。また H 鋼単純ばり上実験では、転倒防止金具を含め層厚 24cm の場合は 153.9kg、層厚 48cm の場合は 237.7kg であった。

写真 2-4 には、落下装置を示す。落下装置は電磁石式で、不意の電源断に備え電源が入っていないと落下装置が開かないような安全装置が設置されている。



写真 2-2 重錘形状 (157.0kg 時)



写真 2-3 鋼製砂槽 (深さ 30cm)

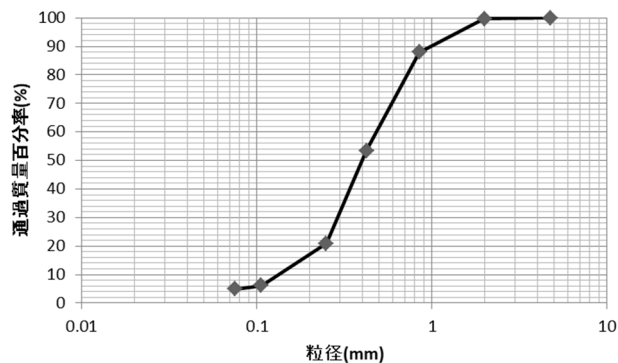


図 2-2 粒径加積曲線

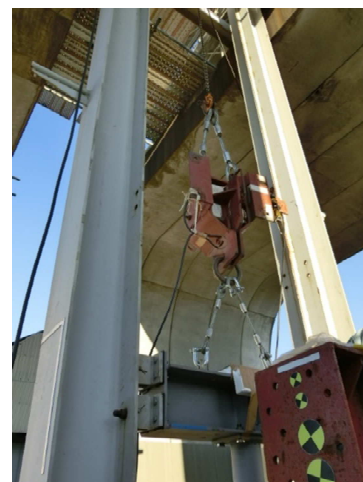


写真 2-4 落下装置

2.2.1 剛基礎上実験

2.2.1.1 実験装置および実験条件

剛基礎上に設置した敷砂緩衝材に重錘衝突実験を行い、衝撃力などの衝撃特性を調べた。実験の様子を図 2-3 および写真 2-5 に示す。重錘衝撃力は重錘に設置した加速度計、伝達衝撃力は土槽下に設置したロードセル、重錘の貫入量はレーザー変位計で測定した。使用機器の一覧を表 2-2 に示す。また、サンプリングタイムは 1ms で、重錘貫入量以外の測定項目には 120Hz のローパスフィルターを使用した。また、実験条件の一覧を表 2-3 に示す。以降、各実験を F-重錘質量(kg)-敷砂厚(cm)-衝突速度(m/s)で表す。衝突速度は自由落下するものとして計算した。

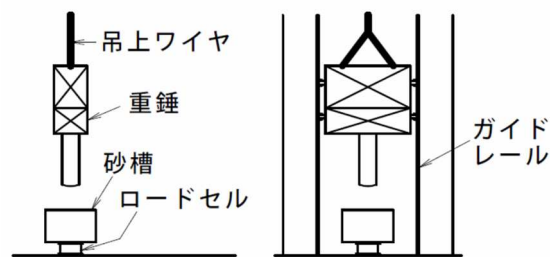


図 2-3 実験装置（剛基礎上）

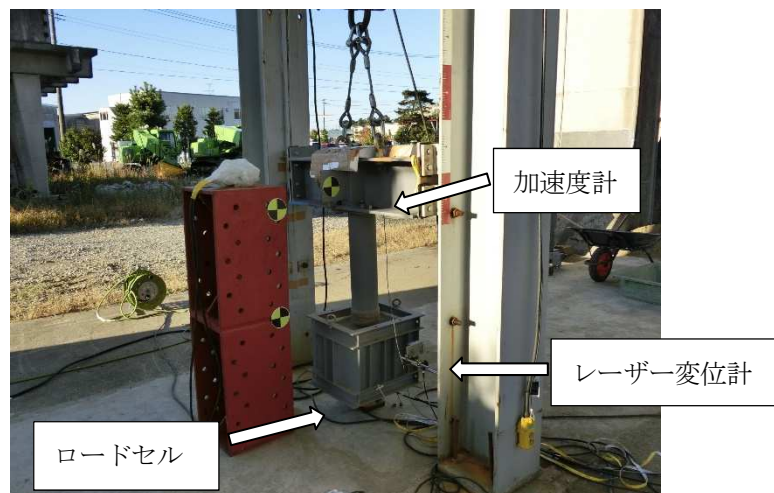


写真 2-5 剛基礎上実験

表 2-2 測定機器一覧（剛基礎上）

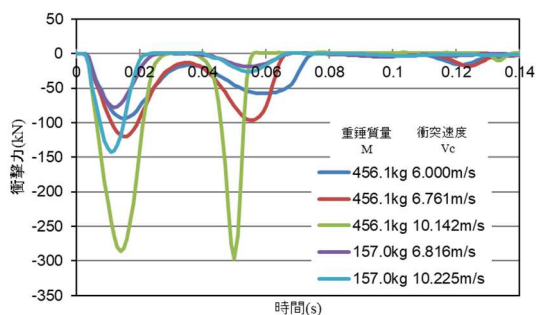
測定項目	測定機器
重錘加速度	(株) 共和電業製 加速度計 AS-50HB 50G, AS-100HA 100G
伝達衝撃力	(株) 東京測器研究所 ロードセル CLP-50CMP 490kN
重錘貫入量	(株) キーエンス レーザー変位センサ IL-600, IL-1000 600±400mm

表 2-3 実験条件一覧 (剛基礎上)

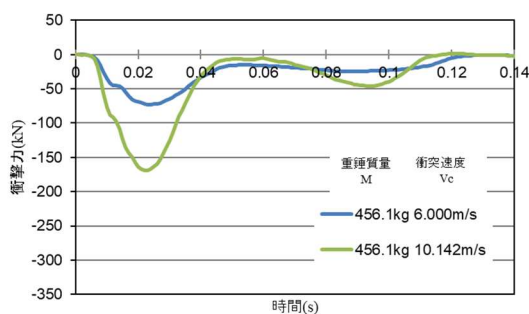
重錘質量 M (kg)	敷砂厚 t _s (cm)	衝突速度 V _c (m/s)	落下高 H (m)	エネルギー E (kJ)
456.1	24	6.000	1.835	8.21
		6.761	2.331	10.42
	10.142	5.244	23.46	
	48	6.000	1.835	8.21
10.142		5.244	23.46	
157.0	24	6.816	2.369	3.65
		10.225	5.331	8.21

2.2.1.2 実験結果

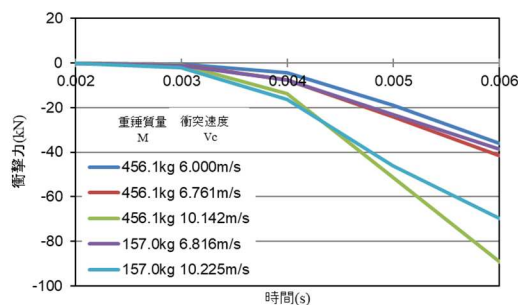
各実験条件での伝達衝撃力の結果を図 2-4 に、伝達衝撃力、重錘衝撃力と貫入量の関係を図 2-5 に示す。図 2-4 に示すように伝達衝撃力波形は 2 つのピークをもち、敷砂厚 24cm の場合は 0.03s 付近で、48cm の場合は 0.05s 付近でいったん衝撃力が小さくなっている。敷砂厚 24cm の実験結果を見ると衝突速度が大きいと伝達衝撃力の荷重増加速度も大きく、衝突初期の荷重増加速度は重錘質量によらず衝突速度に依存するようである。これは本実験における重錘衝突部が重錘質量によらず同じ形状であるためと思われる。また、図 2-5 に示すように、本実験においては伝達衝撃力波形と重錘衝撃力波形は大差ない。また、衝撃力が第 1 ピークを過ぎて小さくなっても重錘の貫入は進んでおり、第 2 ピーク辺りで最大貫入量となる。本実験において最大貫入量に達する時間は重錘質量や衝突速度にかかわらず、敷砂厚 24cm で 0.05~0.06s、敷砂厚 48cm で約 0.10s である。



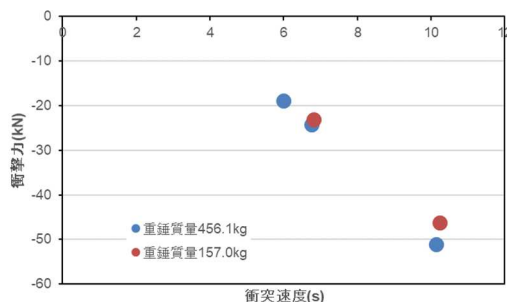
(a)敷砂厚 24cm



(b)敷砂厚 48cm

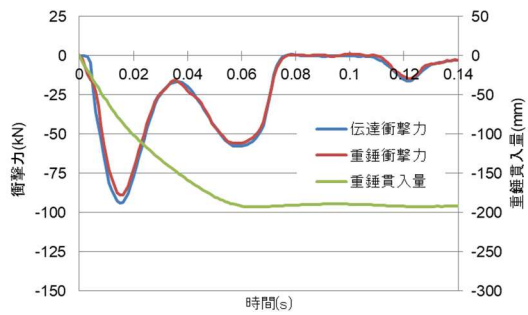


(c)敷砂厚 24cm 衝突初期部拡大

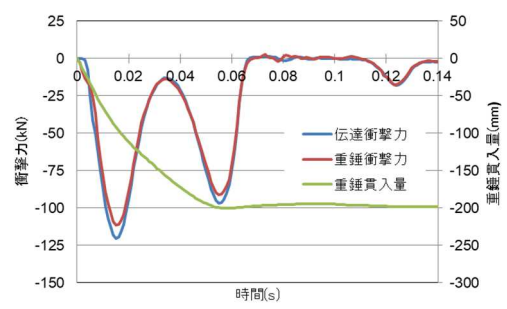


(d)敷砂厚 24cm 0.005s 時

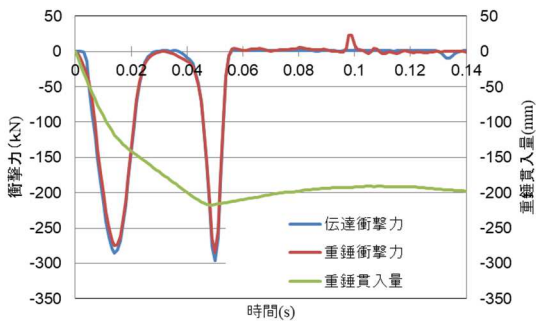
図 2-4 剛基礎上传達衝撃力



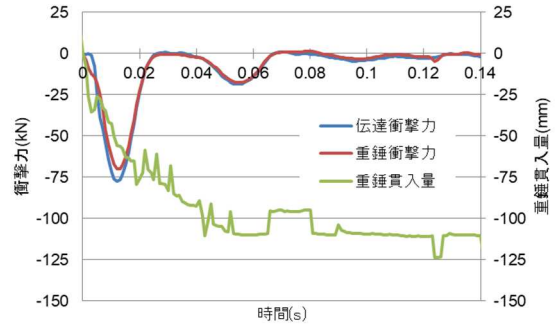
(a) F-456.1-24-6.000



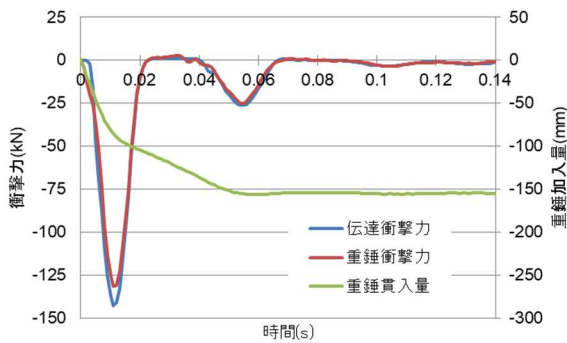
(b) F-456.1-24-6.761



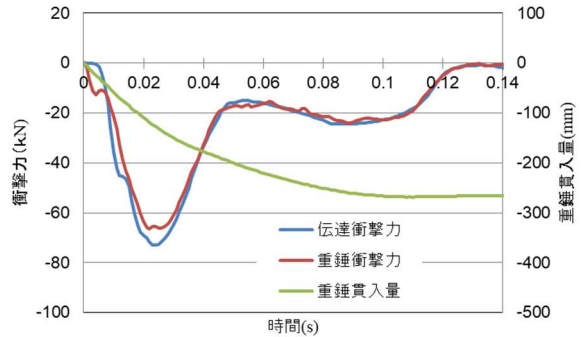
(c) F-456.1-24-10.142



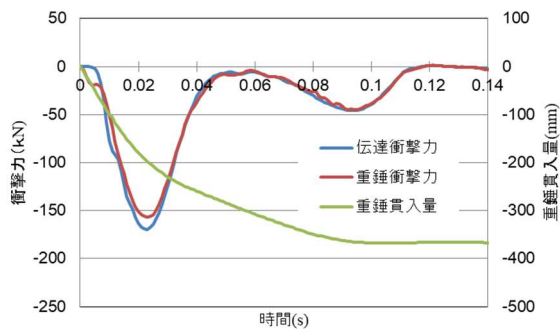
(d) F-157.0-24-6.816



(e) F-157.0-24-10.225



(f) F-456.1-48-6.000



(g) F-456.1-48-10.142

注) 実験名は,
F (剛基礎上への落下実験) -重錘質量
(kg) -敷砂厚 (cm) -衝突速度 (m/s)
と表現.

図 2-5 伝達衝撃力, 重錘衝撃力, 重錘貫入量

2.2.2 H鋼はり上実験

2.2.2.1 実験装置および実験条件

前節の緩衝材をH鋼単純ばりに設置し、重錘落下実験を行った。実験装置を図2-6および写真2-6に示す。支点には跳ね上がり防止装置を設置した。载荷点はスパン中央である。また、使用したH鋼の諸元は表2-1と同様であり、表2-4には実験条件の一覧を示す。以降、各実験を、B-H鋼材質強度-スパン(m)-重錘質量(kg)-敷砂厚(cm)-衝突速度(m/s)で表す。また、H150のH鋼を使用した実験をH150シリーズ、H100のH鋼を使用した実験をH100シリーズとする。

さらに表2-5には降伏荷重と固有周期の計算値を、表2-6には計測に使用した機器の一覧を示す。落石防護工には、材料・構造形式・スパン・落石条件により様々な固有周期を持つものがあるので、それを考慮できるようにH鋼はりの条件を決めた。また、衝突条件に関しては、過去の実験を参考に十分な変形が得られるように決めた。各データの測定は、サンプリングタイム1msで、レーザー変位センサによるはり中央変位以外のデータには120Hzのローパスフィルターを使用した。また、レーザー変位センサのデータには9点単純移動平均による平滑化を行った。

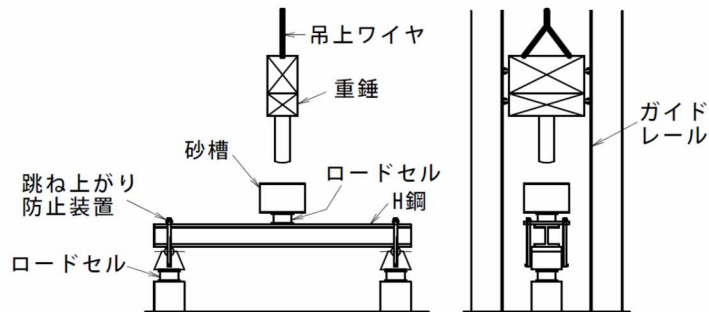


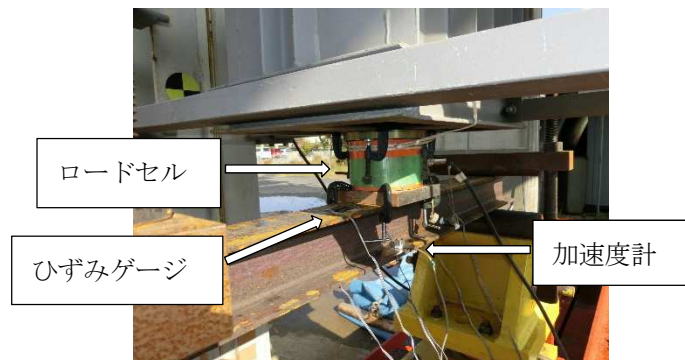
図2-6 実験装置 (H鋼単純ばり上重錘落下実験)



(a)実験装置全景



(b)供試体設置状況



(c)载荷点近傍

写真2-6 実験装置 (H鋼単純ばり上重錘落下実験)

表 2-4 実験条件一覧 (H 鋼単純ばり上重錘落下実験)

H 鋼	材質	スパン L (m)	重錘質量 M (kg)	敷砂厚 T _s (cm)	衝突速度 V _c (m/s)	落下高 H (m)	エネルギー E (kJ)
H150	SS400	1.5, 3.0, 6.0	456.1	24	6.761	2.331	10.42
					10.142	5.244	23.46
				48	10.142	5.244	23.46
H100	SS400	2.0	456.1	24	6.000	1.835	8.21
				48	6.000	1.835	8.21
	SN490B			24	6.000	1.835	8.21
	SS400		157.0	24	6.816	2.369	3.65
			10.225		5.331	8.21	

表 2-5 降伏荷重と固有周期 (計算値)

H 鋼	材質	スパン L(m)	降伏荷重 P _y (kN)	固有周期 (ms)
H150	SS400	1.5	176.27	4.406
		3.0	88.13	17.62
		6.0	44.07	70.50
H100	SS400	2.0	52.02	11.95
	SN490B		57.16	11.95

表 2-6 測定機器一覧 (H 鋼単純ばり上重錘落下実験)

測定項目	測定機器
重錘加速度	(株) 共和電業製 加速度計 AS-50HB 50G, AS-100HA 100G
重錘変位	カシオ計算機 (株) 高速度カメラ EXILIM EX-ZR800 240fps
はり載荷点 部加速度	(株) 共和電業製 加速度計 AS-50HB 50G
伝達衝撃力	(株) 東京測器研究所 ロードセル CLP-50CMP 490kN
支点反力	(株) 東京測器研究所 ロードセル KCE-500kNA 500kN
はり載荷点 部変位	(株) キーエンス レーザー変位センサ IL-600, IL-1000 600±400mm
はりひずみ	(株) 東京測器研究所 塑性域ひずみゲージ YEFLA-5

2.2.2.2 実験結果（伝達衝撃力および載荷点変位）

実験結果のうち、伝達衝撃力を図 2-7 に、載荷点下の H 鋼下部の変位を図 2-8 に示す。

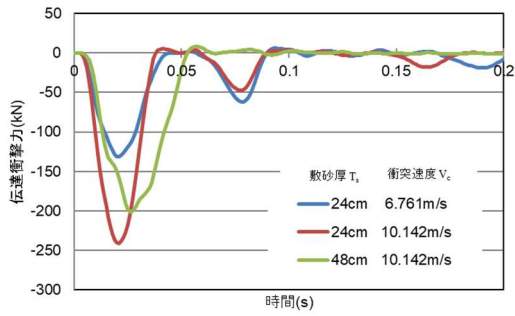
変位データからは、H150 シリーズのスパン 1.5m の 3 ケースとスパン 3.0 m ，敷砂厚 24 cm，衝突速度 6.761 m/s（B-H150-400-3.0-456.1-24-6.761）のケース，および H100 シリーズの重錘質量 157.0kg，敷砂厚 24cm，衝突速度 6.816m/s，材質 SS400（B-H100-400-2.0-157.0-24-6.816）のケースで残留変位がほとんどないことが解る。また，それ以外のケースは，塑性変形したため残留変位が大きい。

伝達衝撃力波形に関して，塑性変形したケースで細かい振動を無視して概略の様子を見ると，伝達衝撃力が増大しピークに達した後，ほぼ一定を保ちその後急激に小さくなっている。塑性変形する場合の伝達衝撃力がほぼ一定の間の伝達衝撃力は，細かい振動を無視すれば衝突条件によらず H 鋼供試体の仕様やスパンごとにほぼ同じ値なので，H 鋼が降伏し荷重が大きくなれない状態と推察される。各ケースを比較すると，敷砂厚が薄く，衝突速度が大きいほうが一定値になるまでの時間が短い。H100 シリーズの B-H100-400-2.0-157.0-24-6.816 と B-H100-400-2.0-456.1-24-6 および B-H100-490-2.0-456.1-24-6 の重錘質量は異なるが衝突速度に近いケースを比べると，衝突初期では伝達衝撃力波形は一致している。これは，本研究では重錘質量によらず重錘の衝突部の形状が一定であることによるものと推察される。

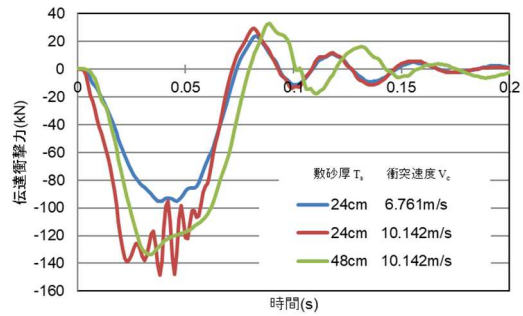
一方，変位波形に関して塑性変形したケースを見ると，伝達衝撃力がピークに達した時点では，変位は増大し続けており，伝達衝撃力がほぼ一定の間も変形は進行している。その後，伝達衝撃力が急速に減少を始めると変位も減少し始める。また，H150 シリーズのスパン 3 m 衝突速度 10.142 m/s において敷砂厚 24 cm と 48 cm を比較すると，衝撃力波形は大差ないのに砂厚 24 cm では最大変位は大きく 1.7 倍であった。一方，スパン 6.0 m では最大変位の違いはあまり大きくなく 1.2 倍であった。H100 シリーズの重錘質量 456.1kg，衝突速度 6m/s 材質 SS400 で敷砂厚 24 cm と 48 cm を比べると，最大変位の比は 1.2 倍であった。わずかな伝達衝撃力波形の違いで最大変位に大きい違いがでる場合があるということは，モデル化した衝撃力を入力とする解析を行う場合，荷重増加速度や最大荷重の設定には注意が必要であることが推測できる。

H100 シリーズの B-H100-400-2.0-157.0-24-6.816 と B-H100-400-2.0-456.1-24-6 および B-H100-490-2.0-456.1-24-6 の重錘質量は異なるが衝突速度に近いケースを比べると，衝突初期では伝達衝撃力波形と同様に変位波形は一致している。

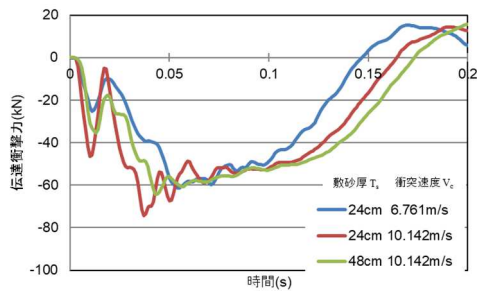
図 2-9 に荷重変位曲線を示す。H150 シリーズのスパン 6m の衝突初期のピークを除けば重錘落下実験の荷重変位曲線は概ね静的試験結果と一致するが，衝突初期の降伏点を越えたあたりでは，静的荷重より大きく，はりの速度が 0 になる最大変位の時点で静的試験の値にほぼ等しくなる。これは，H 鋼はりの慣性力やひずみ速度効果によるものと考えられる。



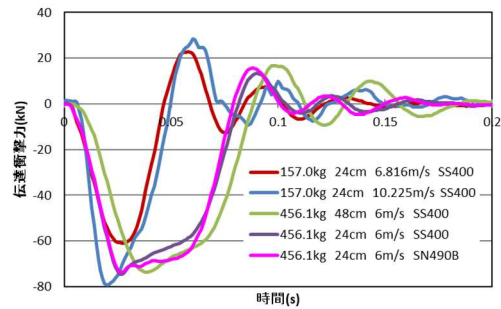
(a)H150 スパン 1.5m



(b)H150 スパン 3m

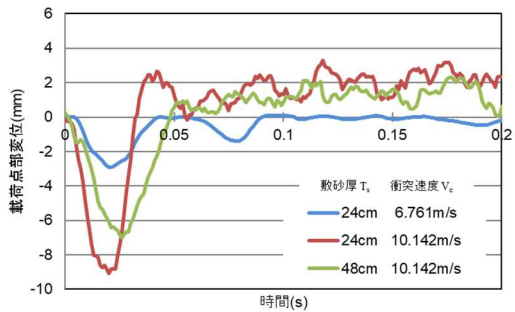


(c)H150 スパン 6m

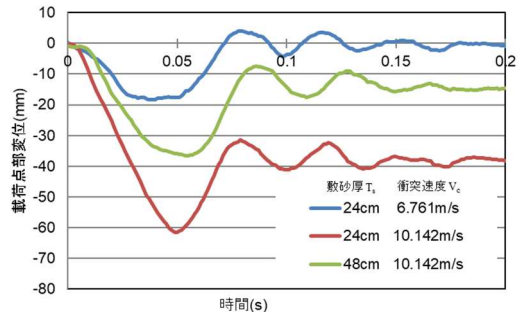


(d)H100 スパン 2m

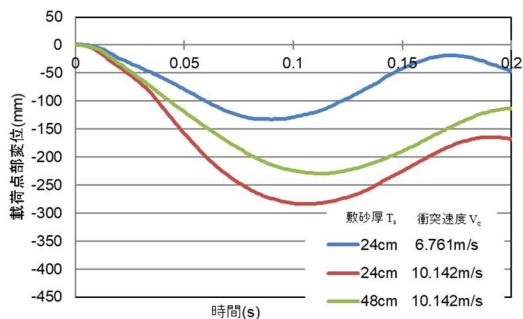
図 2-7 伝達衝撃力 (H 鋼単純ばり上重錘落下実験)



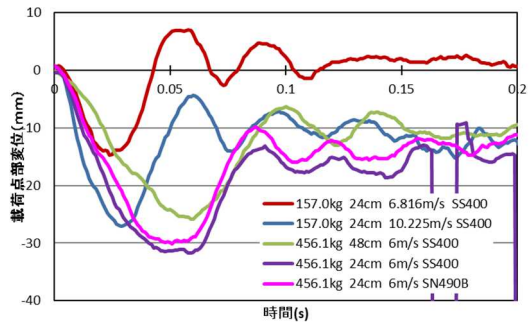
(a)H150 スパン 1.5m



(b)H150 スパン 3m



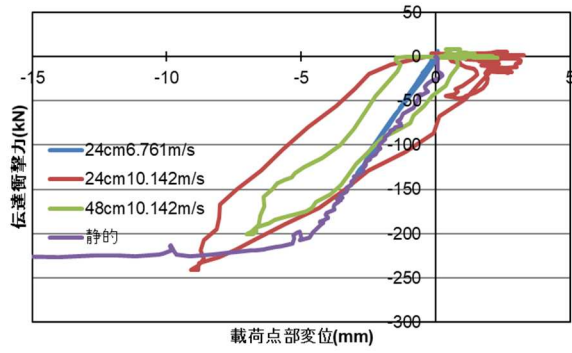
(c)H150 スパン 6m



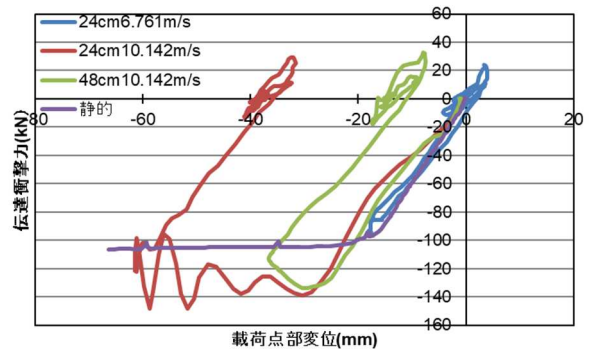
(d)H100 スパン 2m

図 2-8 載荷点部変位 (H 鋼単純ばり上重錘落下実験)

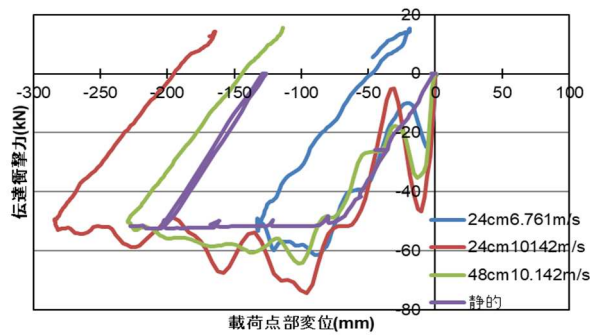
注) B-H150-400-1.5-456.1-24-6.761 のはり載荷点変位はひずみから計算した。B-H150-400-1.5-456.1-24-10.142, および B-H150-400-1.5-456.1-48-10.142 は最大変位後, レーザー変位計が傾いた可能性がある。



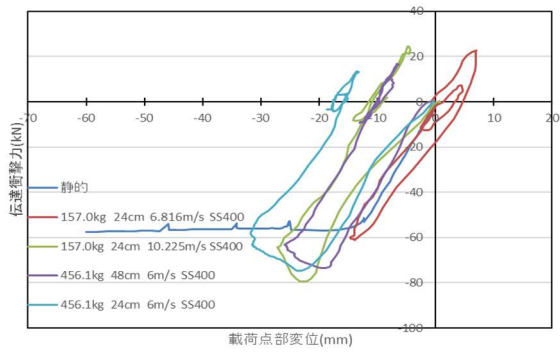
(a) H150 スパン 1.5m



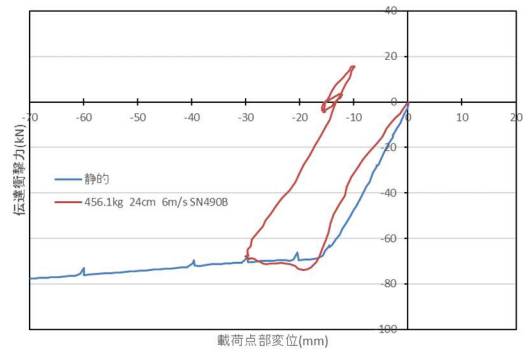
(b) H150 スパン 3m



(c) H150 スパン 6m



(d) H100 スパン 2 m SS400



(e) H100 スパン 2 m SN490B

図 2-9 荷重変位曲線

2.2.2.3 実験結果 (エネルギー伝達率)

入力エネルギーに対し、H150 シリーズの H 鋼に伝わったエネルギーの割合をエネルギー伝達率として図 2-10 に示す。入力エネルギーには、衝突時重錘運動エネルギーに加えて H 鋼はりの有効重量および砂槽重量×H 鋼はり載荷点部最大変位と重錘重量×衝突後の重錘最大変位を考慮した。また伝達エネルギーははりの荷重変位曲線を降伏後一定となるバイリニア曲線と仮定し、変位の最大値をもとに計算で求めた。伝達エネルギーの求め方を図 2-11 に示す。同じ敷砂厚・衝突速度で比較すると、スパンが長いほうがエネルギー伝達率が大きく、スパン 1.5m と 6.0 m では 8 から 20 倍の差がある。敷砂厚 24cm 衝突速度 10.142m/s を基準とすると、「砂厚が大きくなる」あるいは「衝突速度が小さくなる」とエネルギー伝達率は小さくなるのがわかる。

表 2-7 に示すように、H100 シリーズのエネルギー伝達率は 0.11 から 0.15 の範囲で、H150 シリーズのスパン 3m に近い値であった。「砂厚が大きくなる」あるいは「衝突速度が小さくなる」とエネルギー伝達率は小さくなるのが H100 シリーズでも確認できる。

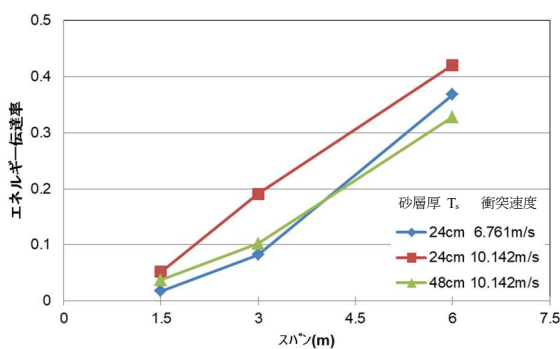


図 2-10 エネルギー伝達率実験結果 (H150 シリーズ)

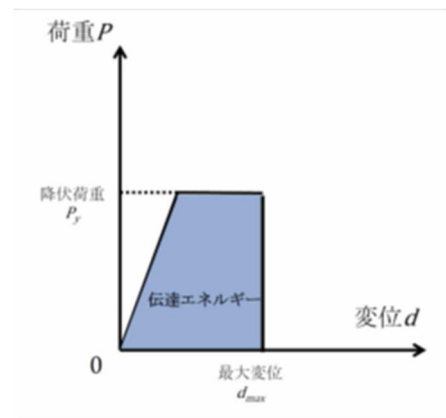


図 2-11 伝達エネルギーの求め方

表 2-7 エネルギー伝達率実験結果 (H100 シリーズ)

材質	スパン L(m)	重錘質量 M(kg)	敷砂厚 T _s (cm)	衝突速度 V _c (m/s)	エネルギー 伝達率
SS400	2.0	157.0	24	6.816	0.121
SS400	2.0	157.0	24	10.225	0.131
SS400	2.0	456.1	24	6.000	0.147
SN490B	2.0	456.1	24	6.000	0.148
SS400	2.0	456.1	48	6.000	0.114

2.2.2.4 実験結果 (各加速度と各衝撃力)

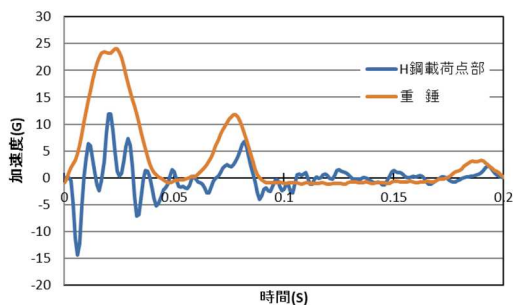
図 2-12 左側に各実験ケースの H 鋼の荷点部加速度波形と重錘加速度波形を示した。また、右側には、伝達衝撃力波形、合支点反力波形および重錘衝撃力波形を示す。加速度波形を見ると、H150 シリーズのスパン 3.0、6.0 m では、(i)B-H150-400-6-456.1-48-10.142 では明確ではないが、その他のケースでは衝突から 0.05 s から 0.07 s 後に H 鋼荷点部加速度と重錘加速度はほぼ等しくなる。これは、H100 シリーズのうち重錘質量が 456.1kg の場合も同様である。H100 シリーズの重錘質量が 157.0kg の場合は、衝突から 0.03s から 0.04s で両者はほぼ等しくなる。後述のようにこの時点で速度も等しくなることが分かっており、H 鋼荷点部と重錘が一体化するタイミングと言える。(この一体化は両方の加速度が 0 になるまで続きその後それぞれ別の運動となる。) H150 シリーズのスパン 1.5 m では両加速度が等しくなるのは 1 波目ではなく 2 波目の後半である。

また、H150 シリーズの H 鋼荷点部加速度に関して、各スパンとも衝突後すぐマイナス (下向き) の加速度が一旦作用しすぐ 0 まで戻るが、スパン 6.0 m ではそれに対応して逆向きの重錘加速度 (1 波目) が観測される。同様に、それに対応した波形が、伝達衝撃力や合支点反力にも表れている。一方、スパン 1.5 m では重錘加速度に H 鋼荷点部の加速度の 1 波目に対応した波形は見られない。スパン 3m では、それに対応した波形がわずかに確認できる。H 鋼荷点部加速度の 1 波目のあと H 鋼荷点部加速度と重錘加速度が等しくなる一体化まで振動が続くが、この振動はスパンが長く供試体の剛性が低い場合や、重錘質量や衝突速度が大きく衝突条件の厳しい場合は加速度のマイナス領域、そうでない場合はプラス領域でみられる。

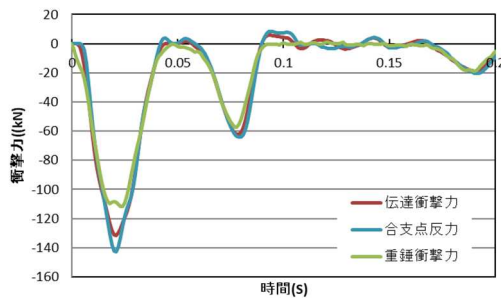
各実験ケースより、重錘加速度波形すなわち重錘衝撃力波形の振動が H 鋼はりの加速度の振動と関連したものであることが確認でき、これは H100 シリーズの重錘質量が 157.0 kg と軽い場合に顕著である。

また、H150 シリーズのスパン 6 m では、衝突初期に逆向きの合支点反力が確認された。

このように、H 鋼はりの剛性などにより、衝突の現象が様々であることが確認できた。

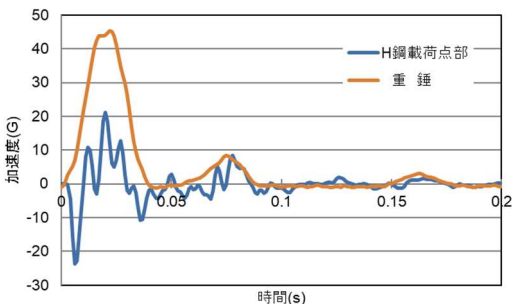


(加速度)

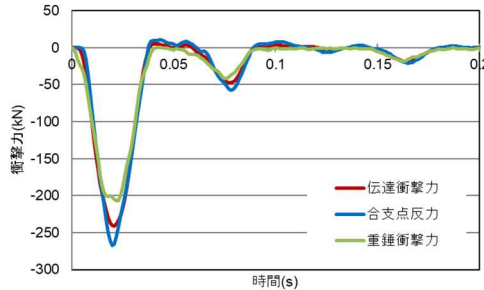


(衝撃力)

(a) B-H150-400-1.5-456.1-24-6.761



(加速度)



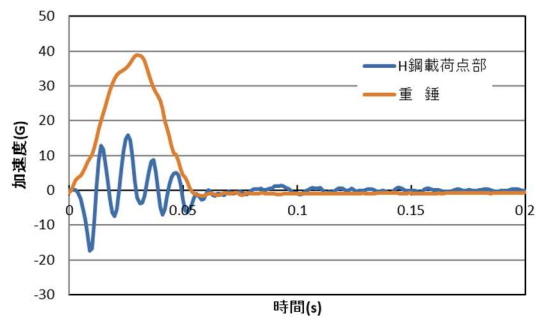
(衝撃力)

(b) B-H150-400-1.5-456.1-24-10.142

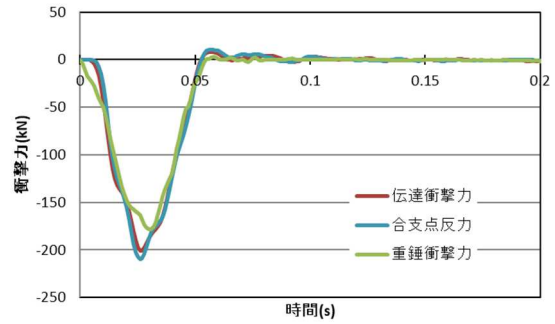
注) 実験記号 : B-H 鋼-材質強度-スパン(m)-重錘質量(kg)-敷砂厚(cm)-衝突速度(m/s)

図 2-12 加速度及び衝撃力

次ページに続く

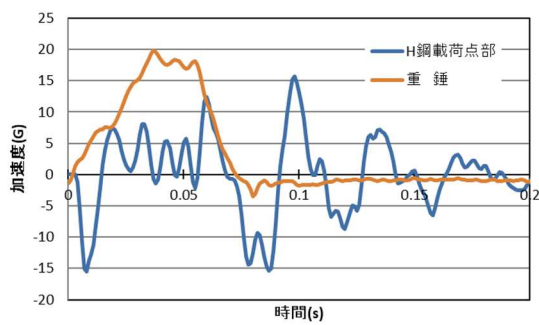


(加速度)

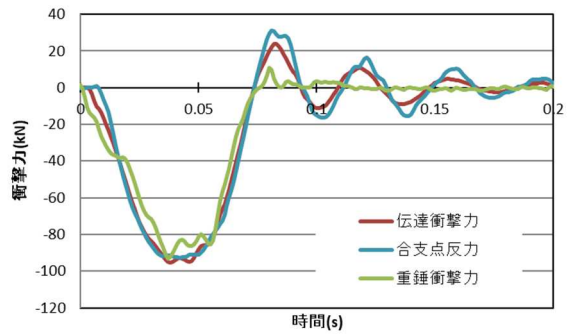


(衝撃力)

(c) B-H150-400-1.5-456.1-48-10.142

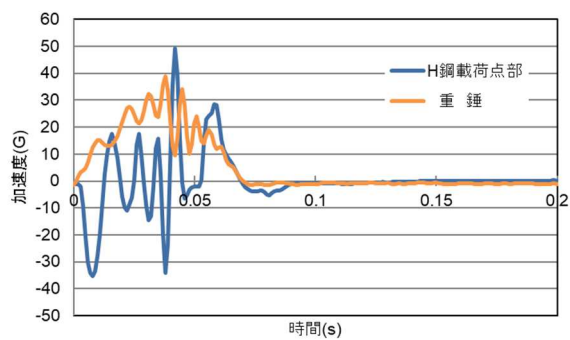


(加速度)

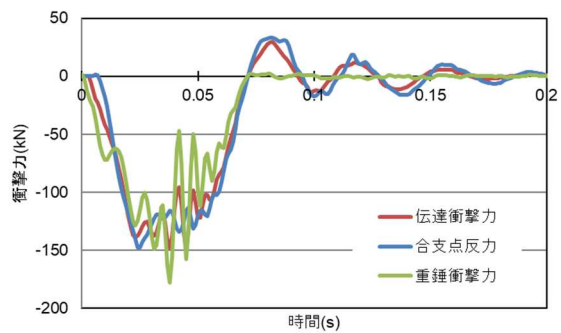


(衝撃力)

(d) B-H150-400-3-456.1-24-6.761



(加速度)



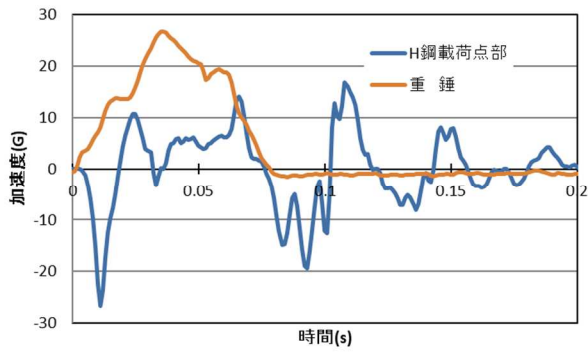
(衝撃力)

(e) B-H150-400-3-456.1-24-10.142

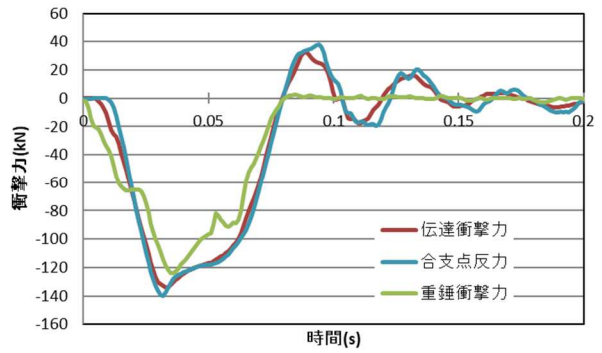
注) 実験記号 : B-H 鋼-材質強度-スパン(m)-重錘質量(kg)-敷砂厚(cm)-衝突速度(m/s)

図 2-12 加速度及び衝撃力

次ページに続く

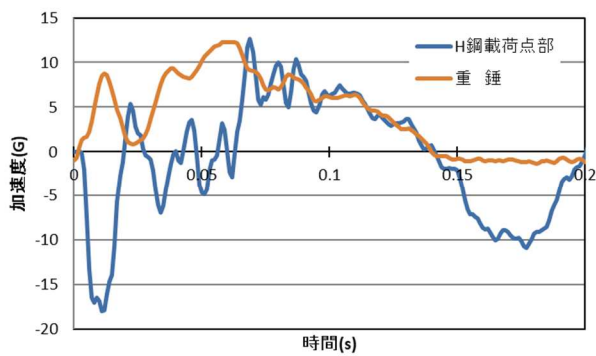


(加速度)

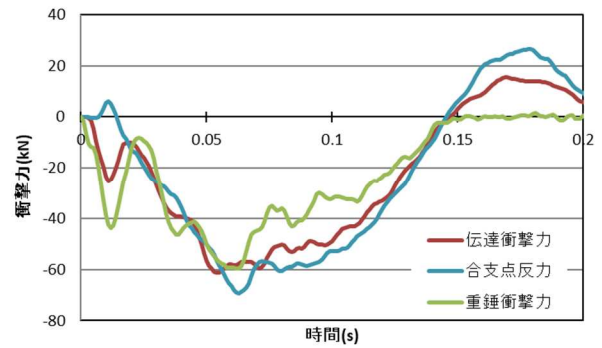


(衝撃力)

(f) B-H150-400-3-456.1-48-10.142

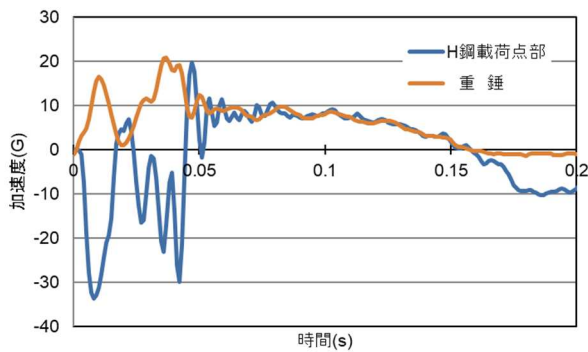


(加速度)

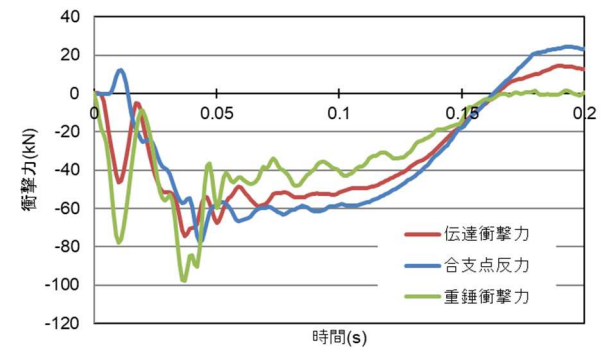


(衝撃力)

(g) B-H150-400-6-456.1-24-6.761



(加速度)



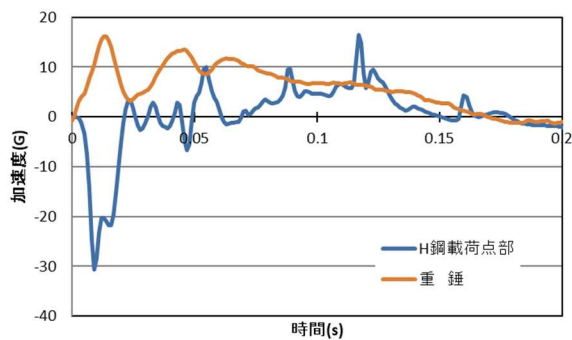
(衝撃力)

(h) B-H150-400-6-456.1-24-10.142

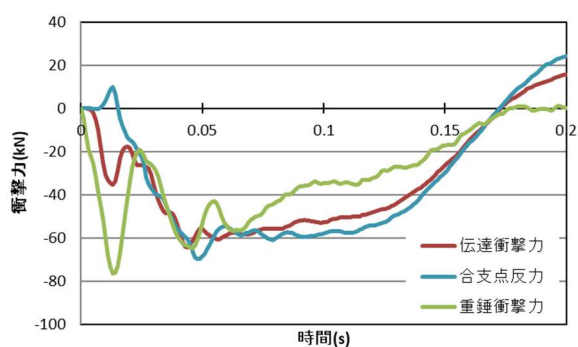
注) 実験記号: B-H 鋼-材質強度-スパン(m)-重錘質量(kg)-敷砂厚(cm)-衝突速度(m/s)

図 2-12 加速度及び衝撃力

次ページに続く

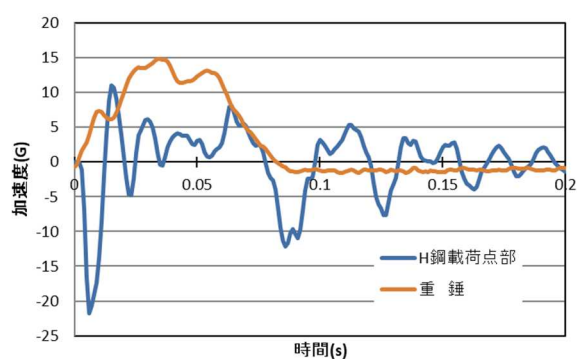


(加速度)

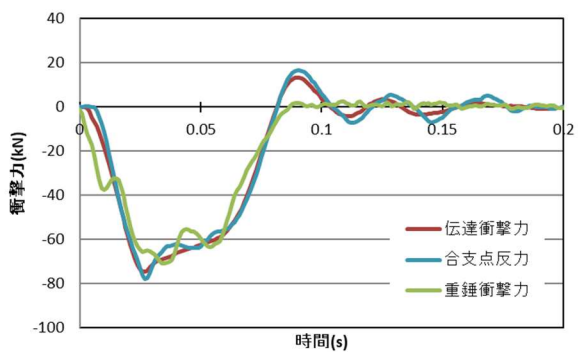


(衝撃力)

(i) B-H150-400-6-456.1-48-10.142

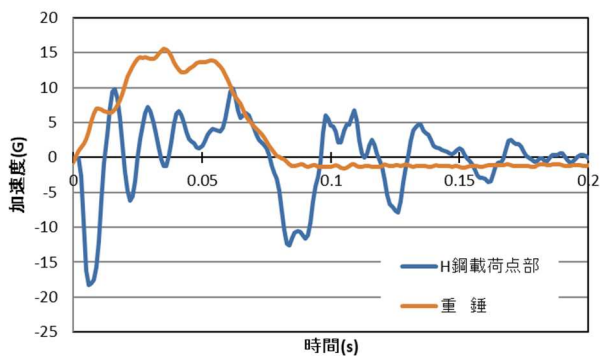


(加速度)

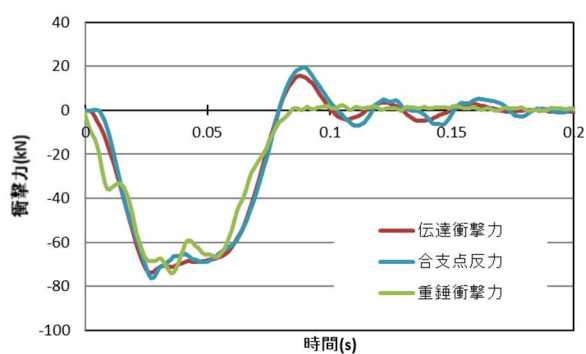


(衝撃力)

(j) B-H100-400-2-456.1-24-6



(加速度)



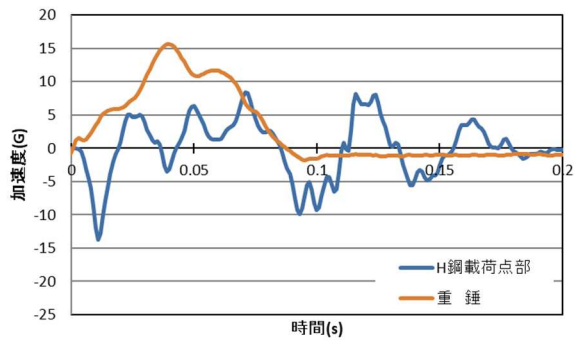
(衝撃力)

(k) B-H100-490-2-456.1-24-6

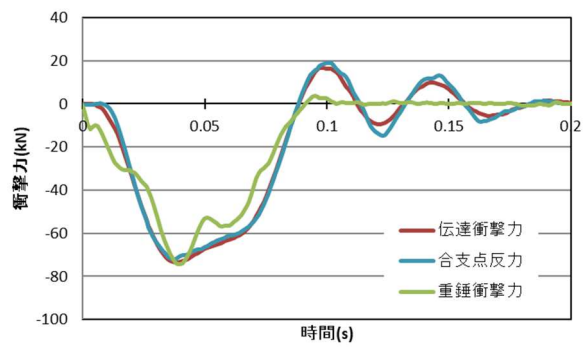
注) 実験記号 : B-H 鋼-材質強度-スパン(m)-重錘質量(kg)-敷砂厚(cm)-衝突速度(m/s)

図 2-12 加速度及び衝撃力

次ページに続く

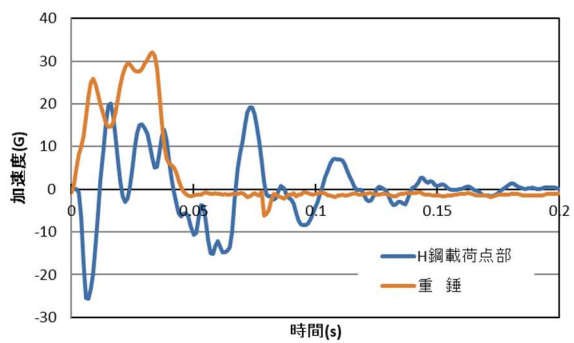


(加速度)

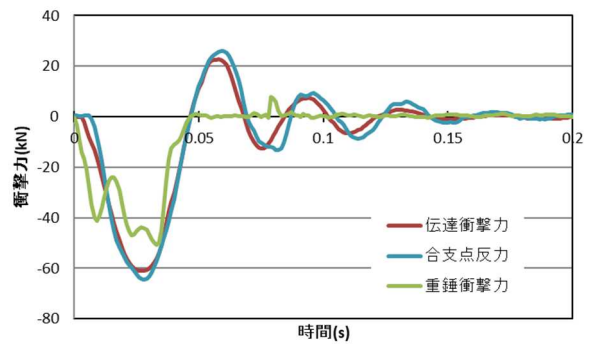


(衝撃力)

(l) B-H100-400-2-456.1-48-6

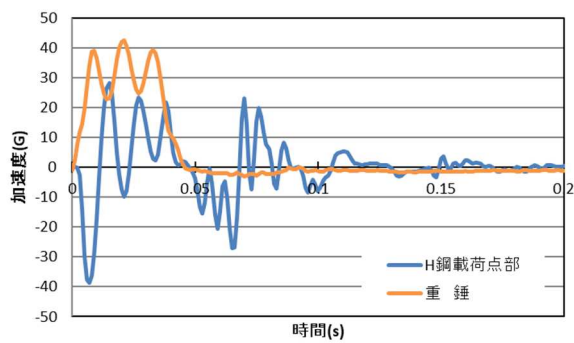


(加速度)

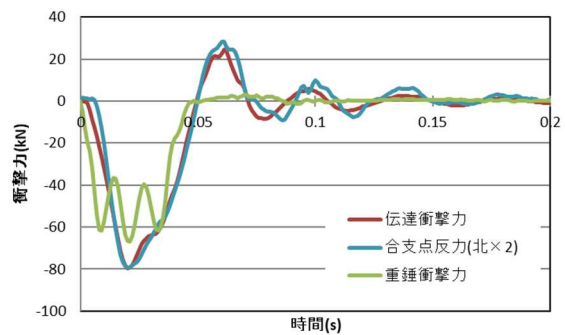


(衝撃力)

(m) B-H100-400-2-157.0-24-6.816



(加速度)



(衝撃力)

注) 合支点反力は南側が測定不調のため、
北側を2倍した。

(n) B-H100-400-2-157.0-24-10.225

注) 実験記号：B-H 鋼-材質強度-スパン(m)-重錘質量(kg)-敷砂厚(cm)-衝突速度(m/s)

図 2-12 加速度及び衝撃力

2.2.2.5 実験結果 (H100 シリーズに関する補足)

H100 シリーズに関し、データ種別ごとに各実験ケースを比較したものを図 2-13 に示す。

伝達衝撃力と H 鋼はり载荷点部変位は図 2-7(d)と図 2-8(d)の再掲である。

重錘加速度波形と重錘衝撃力波形から、以下のことが言える。

- (1) 重錘質量及び敷砂厚が同じであれば振動のタイミングは同じである。
- (2) 衝突初期の重錘衝撃力は、重錘質量によらず衝突速度に依存する。

これは本研究においては、重錘質量によらず重錘の衝突部形状が変わらないからであると思われる。

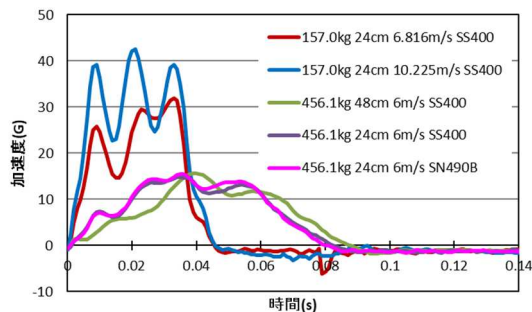
- (3) 敷砂厚が厚いと衝突初期の重錘衝撃力の増加する速度が小さくなる。

H 鋼はり载荷点部の加速度に関しては以下のことが言える。

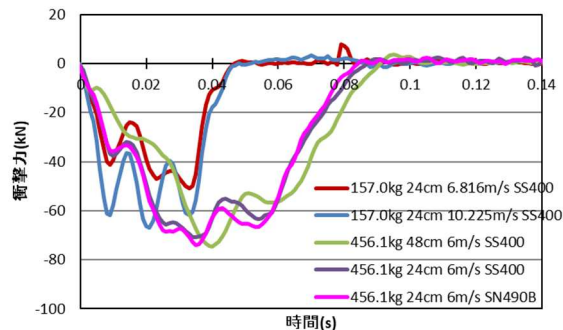
- (4) 敷砂厚が同じであれば振動のタイミングは同じである。
- (5) 敷砂厚 24cm で比較すると、衝突直後のマイナス方向 (H 鋼はりが下向きに加速される方向) の第 1 波は重錘質量によらず衝突速度が大きい方が絶対値の最大値が大きく、0 に戻るタイミングはほぼ同じである。
- (6) 敷砂厚が 48cm と厚くなると、H 鋼はりの加速度の絶対値の最大値および増加速度は小さくなる。全体の振動の周期も長くなる。

実験ケースのうち、B-H100-400-2-157.0-24-10.225 と B-H100-400-2-456.1-24-6 は衝突エネルギーが約 8210J で等しい。この両ケースを比較すると

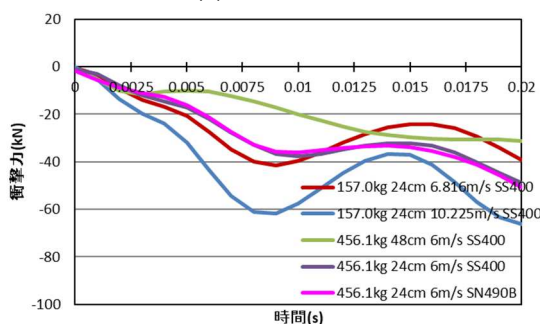
- (7) 図 2-4(a)に示すように剛基礎上では最大伝達衝撃力は小さいが、運動量の大きい B-H100-400-2-456.1-24-6 のほうが、最大変位及び残留変位が大きい。



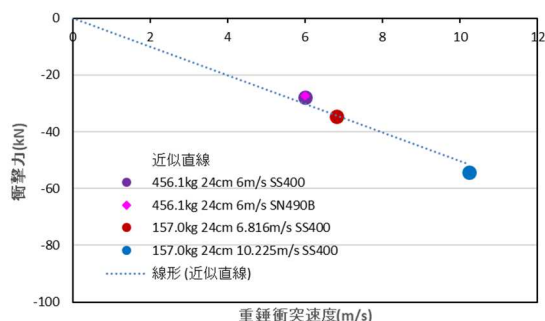
(a)重錘加速度



(b)重錘衝撃力



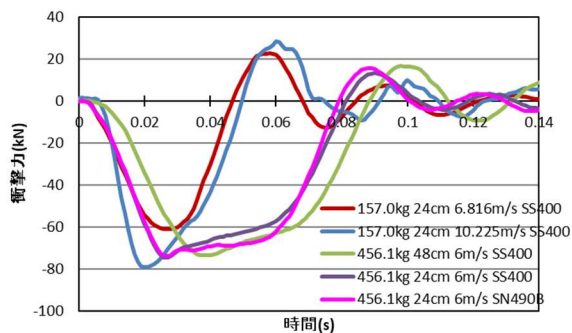
(c)重錘衝撃力衝突初期部拡大



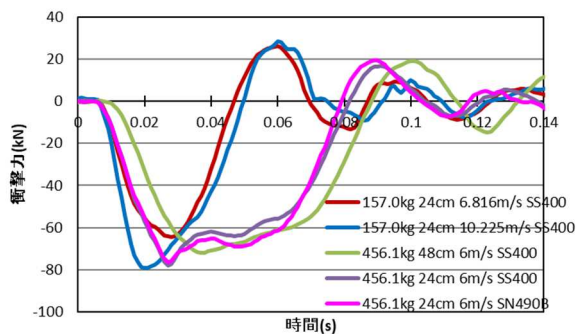
(d)0.007s 時の重錘衝撃力 (敷砂厚 24cm)

図 2-13 H 鋼はり上重錘衝突実験結果 (H100 シリーズ)

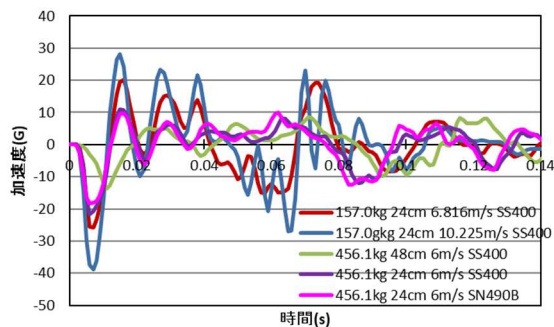
次ページに続く



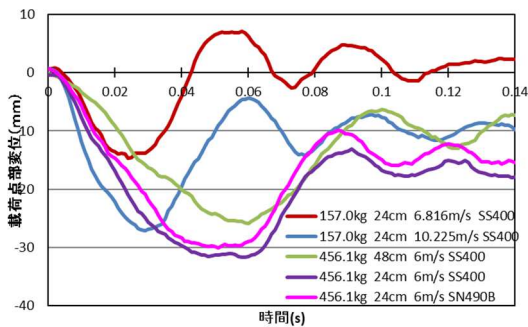
(e)伝達衝撃力



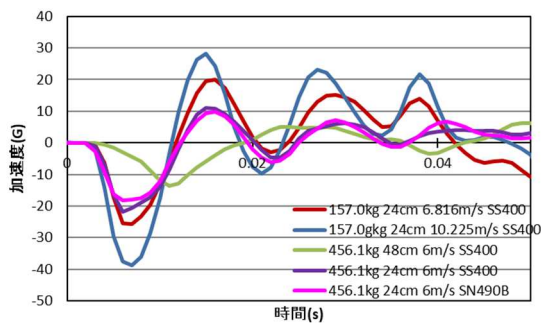
(f)合支点反力



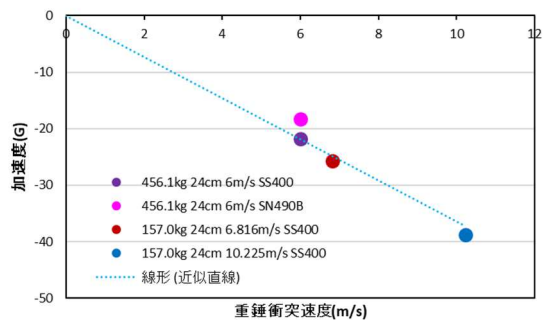
(g)H鋼はり 載荷点部加速度



(h)H鋼はり 載荷点部変位



(i)H鋼はり 載荷点部加速度衝突初期部拡大



(j)H鋼はり 載荷点部加速度第1波最小加速度

注) 敷砂厚 24cm のみ

図 2-13 H鋼はり上重錘衝突実験結果 (H100 シリーズ)

2.2.2.6 実験結果（重錘速度と H 鋼はり載荷点部速度）

図 2-14 に H150 シリーズの H 鋼はり載荷点部速度を、敷砂厚及び重錘衝突速度毎に、図 2-15 には H100 シリーズを含めて、スパン毎に示した。

図 2-14 より、敷砂厚および重錘衝突速度が同じであれば、スパンによらず衝突初期のはり速度が近似していることが解る。

また、図 2-14 及び図 2-15 より、図 2-12 の H 鋼はり載荷点部の加速度波形で見られた衝突直後の下方向への第 1 波で加速し下方向の速度の絶対値が最大になった後、

(1) 速度の絶対値が増え続けるかほぼ一定を保つ場合

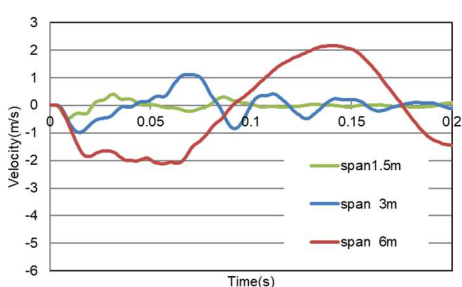
- ・ H150 シリーズ スパン 6 m 及び スパン 3 m の敷砂厚 24 cm 重錘衝突速度 10.142 m/s

(2) 速度の絶対値がすぐに減少を始める場合

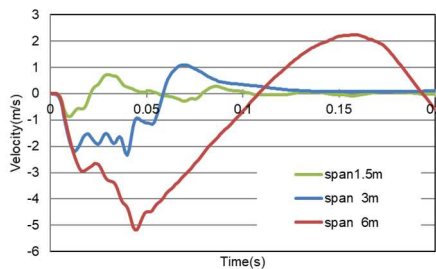
- ・ H150 シリーズ スパン 1.5 m, スパン 3 m の敷砂厚 24 cm 重錘衝突速度 6.761 m/s,
敷砂厚 48cm 重錘衝突速度 10.142 m/s 及び H100 シリーズ

に大別できる。(1)の場合は H 鋼はりが塑性変形しているが、(2)の場合は塑性変形している場合としていない場合が混在し、はりの載荷点部速度波形から塑性変形しているかどうかを判別するのは困難である。

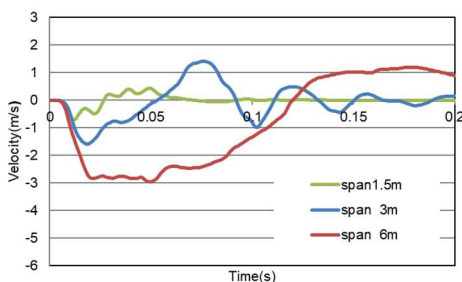
図 2-15(d)で B-H100-400-2-157.0-24-6.816 と B-H100-400-2-456.1-24-6 を比較すると、後者のエネルギーは前者の 2.3 倍であるが、はりの載荷点部速度の絶対値の最大値は大差なく、衝突速度の影響が大きい。ただし、減速が速いので変位は約半分である。(図 2-13(h))



(a) 敷砂厚 24 cm, 衝突速度 6.761 m/s

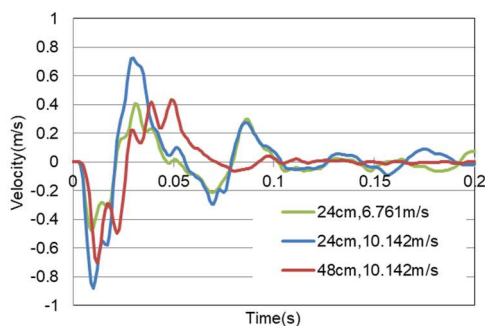


(b) 敷砂厚 24 cm, 衝突速度 10.142 m/s

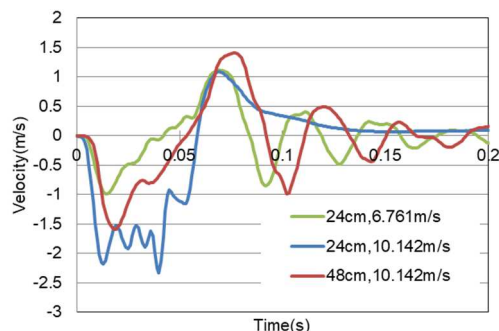


(c) 敷砂厚 48 cm, 衝突速度 10.142 m/s

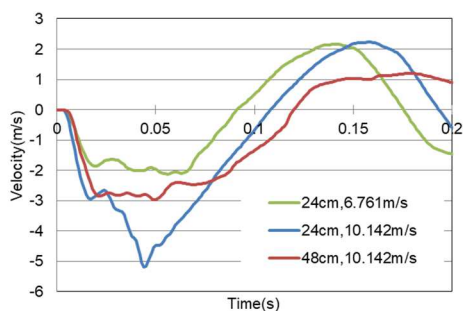
図 2-14 H 鋼はり載荷点部速度（H150 シリーズ 敷砂層厚・衝突速度毎）



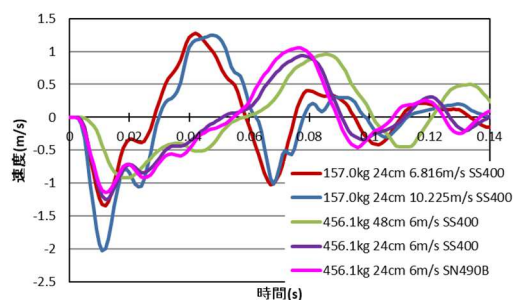
(a) H150 スパン 1.5 m



(b) H150 スパン 3 m



(c) H150 スパン 6 m



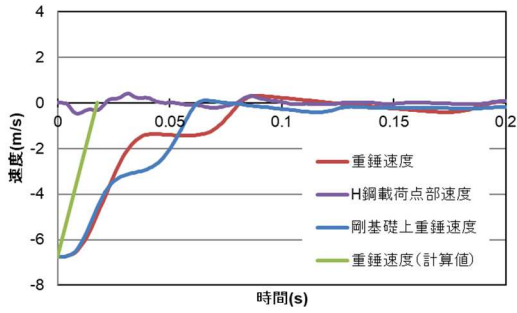
(d) H100 スパン 2 m

図 2-15 H 鋼はり载荷点部速度 (スパン毎)

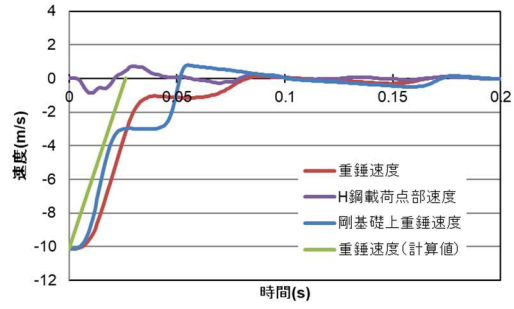
図 2-16 は、H150 シリーズの各スパンの重錘速度（重錘加速度を時間積分して算出）と H 鋼载荷点部速度を比較したもので、参考として剛基礎上実験時の加速度データから算出した重錘速度と、衝突後重錘に H 鋼梁の降伏耐力に等しい力が作用し続けると仮定した場合の重錘速度の計算値（速度の減少勾配＝降伏耐力／重錘質量，初期値＝衝突速度）も記してある．図より，スパン 3 m と 6 m の場合の一体化の様子がよくわかる．ただし，スパン 3 m のうち，敷砂層厚 24 cm 重錘衝突速度 6.761m/s の場合と敷砂層厚 48 cm 重錘衝突速度 10.142 m/s の場合は，H 鋼はりの速度が 0 m/s すなわち最大変位以降に一体化している．

スパン 1.5m の場合，衝突初期において重錘速度は剛基礎上実験時と H 鋼はり上実験時で近似しているが，スパン 3m 及び 6m の場合は H 鋼はり上実験時の場合の勾配が緩い．これは H 鋼はりの剛性の影響と思われる．XY 軸及び速度時間曲線で囲まれる面積は変位である．従って図より重錘速度曲線の面積から，H 鋼はり载荷点部速度曲線の面積を差し引いたものは敷砂への重錘の貫入量で視覚的にわかりやすい．図 2-16 の(h)と(i)をくらべると，重錘の挙動は両者ほぼ等しいが，前者のほうが H 鋼はりの変位が大きく，その分重錘の敷砂への貫入量が少ないことが確認できる．

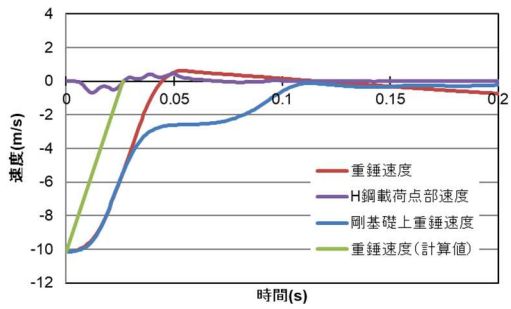
また，大きく塑性変形する場合は，重錘の挙動を簡単な計算で予測することも確認できる．



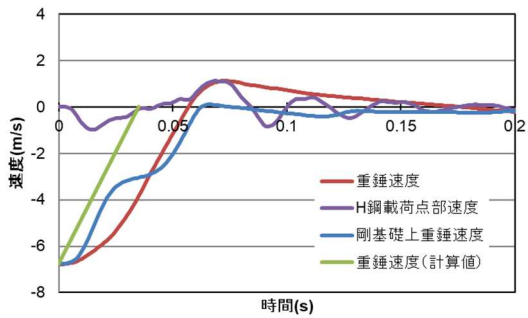
(a) B-H150-400-1.5-456.1-24-6.761



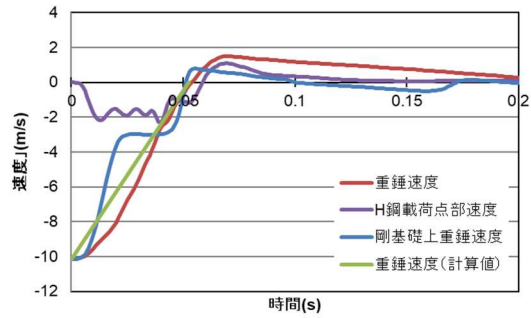
(b) B-H150-400-1.5-456.1-24-10.142



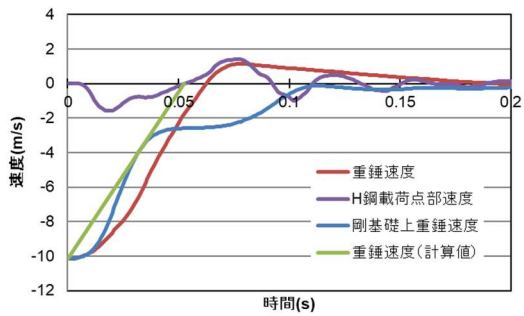
(c) B-H150-400-1.5-456.1-48-10.142



(d) B-H150-400-3-456.1-24-6.761



(e) B-H150-400-3-456.1-24-10.142

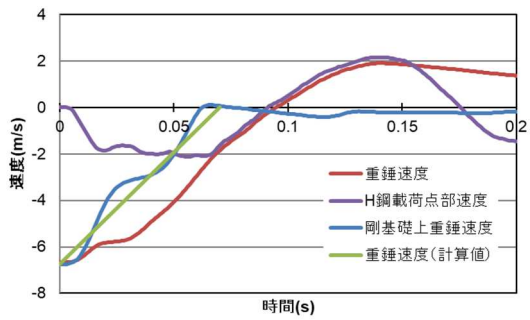


(f) B-H150-400-3-456.1-48-10.142

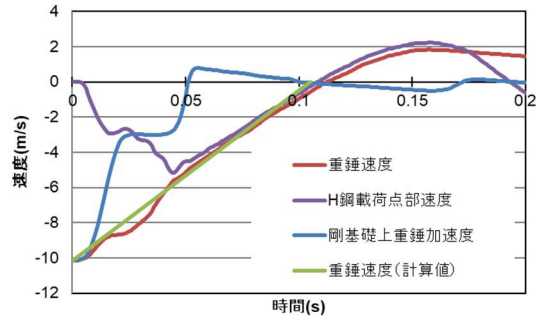
注) 実験記号: B-H 鋼-材質強度-スパン(m)-重錘質量(kg)-敷砂厚(cm)-衝突速度(m/s)

図 2-16 重錘速度と H 鋼載荷点部速度 (H150 シリーズ)

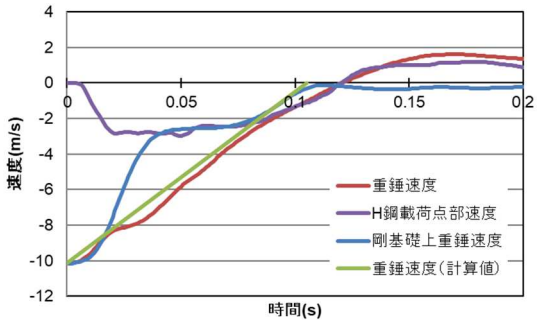
次ページに続く



(g) B-H150-400-6-456.1-24-6.761



(h) B-H150-400-6-456.1-24-10.142



(i) B-H150-400-6-456.1-48-10.142

注) 実験記号: B-H 鋼-材質強度-スパン(m)-重錘質量(kg)-敷砂厚(cm)-衝突速度(m/s)

図 2-16 重錘速度と H 鋼載荷点部速度 (H150 シリーズ)

2.2.2.7 実験結果 (H 鋼はり載荷点部加速度の推定)

図 2-17 に、H 鋼はり載荷点部加速度の測定値と、伝達衝撃力、合支点反力、重錘衝撃力から推定した載荷点の加速度を比較したものを示す。推定には以下の式を用いた。なお、本実験では、敷砂槽と H 鋼梁を固定しているため、H 鋼はり載荷点部加速度と敷砂槽加速度は等しいとしている。

伝達衝撃力 $P_{transmitted}$ は H 鋼梁の有効質量の慣性力 $F_{beam}^{inertial}$ と合支点反力 $F_{reaction}$ の和で表すことができると仮定すると、H 鋼はりの有効質量の加速度 A_{beam} (G) は(2.1)式の様になる。

$$A_{beam} = \frac{(P_{transmitted} - F_{reaction})}{g \cdot m_{beam}^{eff}} \quad (2.1)$$

m_{beam}^{eff} : H 鋼はりの有効質量
 g : 重力加速度

伝達衝撃力 $P_{transmitted}$ は重錘衝撃力 P_{impact} から砂槽慣性力 $F_{sand\ tank}^{inertia}$ を差し引いたものであると仮定すると、H 鋼はりの有効質量の加速度 A_{beam} (G) は(2.2)式の様になる。

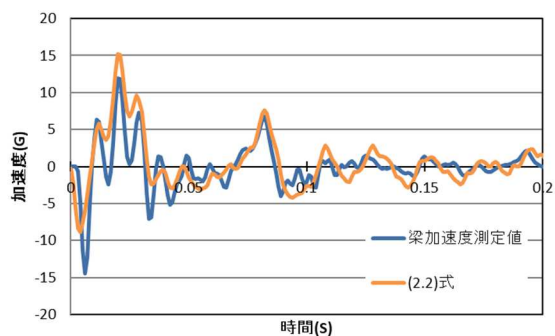
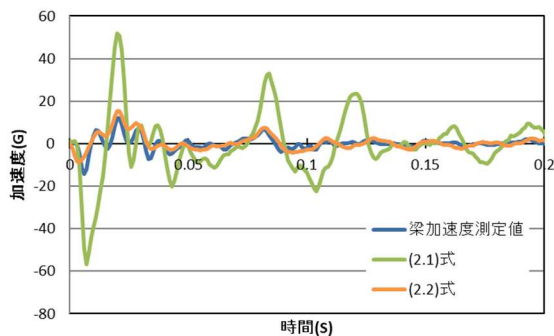
$$A_{beam} = A_{sand\ tank} = \frac{(P_{impact} - P_{transmitted})}{g \cdot m_{sand\ tank}} \quad (2.2)$$

$m_{sand\ tank}$: 砂槽質量

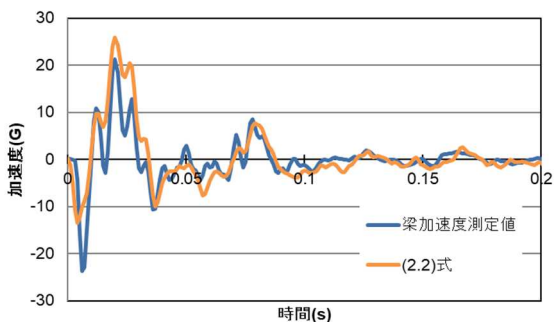
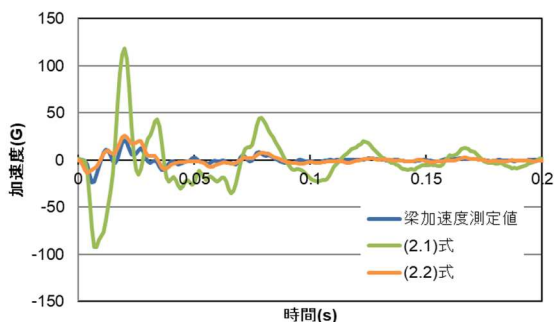
図 2-17 から、衝突直後のマイナス方向への第 1 波の絶対値は小さめではあるが、(2.2)式の値が加速度計による測定値とよく一致している。

つまり、本研究においては、H 鋼はり上実験の重錘衝撃力と伝達衝撃力の差は、砂槽慣性力によるものが大きいと言える。また、H150 シリーズ スパン 6m の衝突後 0.06s 以降は(2.1)式も測定値と良い一致を示す。

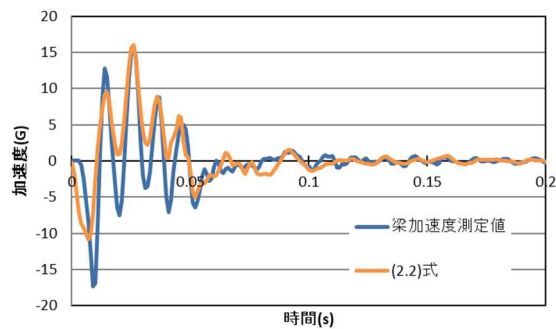
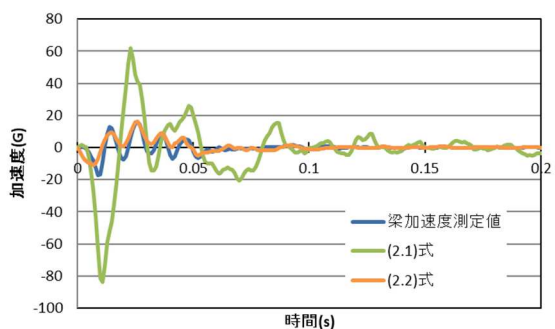
この領域では、伝達衝撃力と合支点反力の差は、H 鋼はり有効質量の慣性力によるものと言える。



(a) B-H150-400-1.5-456.1-24-6.761



(b) B-H150-400-1.5-456.1-24-10.142

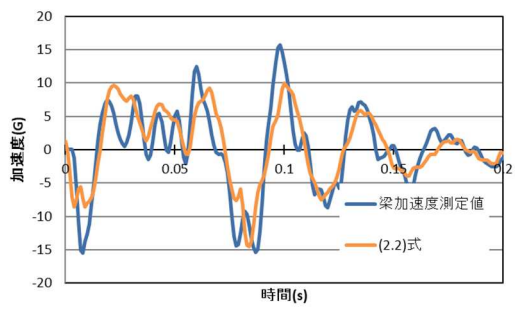
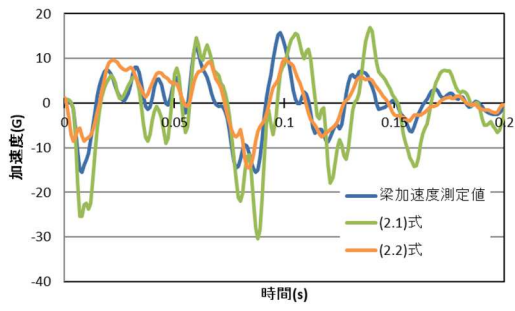


(c) B-H150-400-1.5-456.1-48-10.142

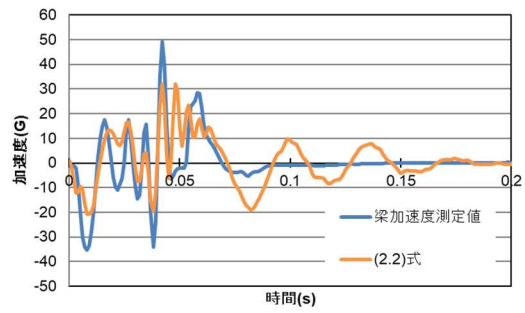
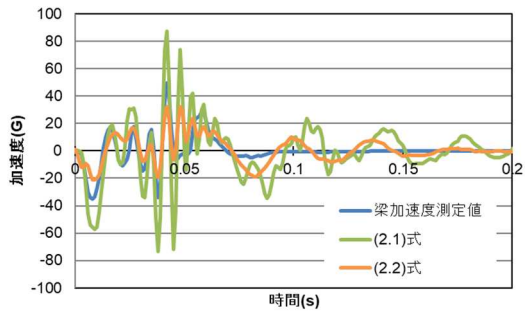
注) 実験記号 : B-H 鋼-材質強度-スパン(m)-重錘質量(kg)-敷砂厚(cm)-衝突速度(m/s)

図 2-17 H 鋼はり载荷点部加速度

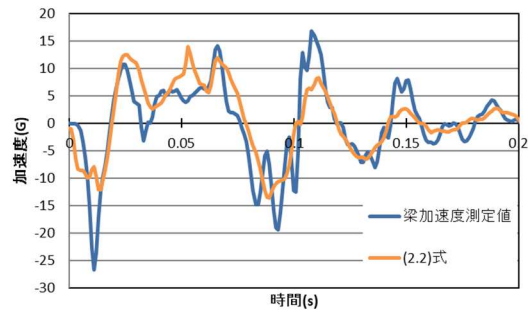
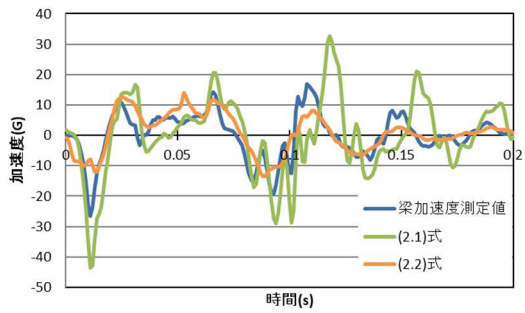
次ページに続く



(d) B-H150-400-3-456.1-24-6.761



(e) B-H150-400-3-456.1-24-10.142

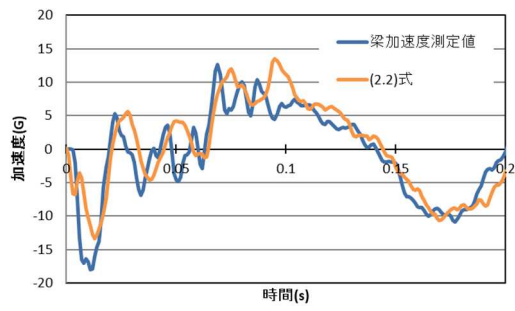
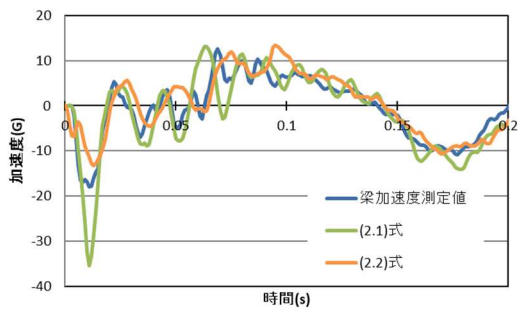


(f) B-H150-400-3-456.1-48-10.142

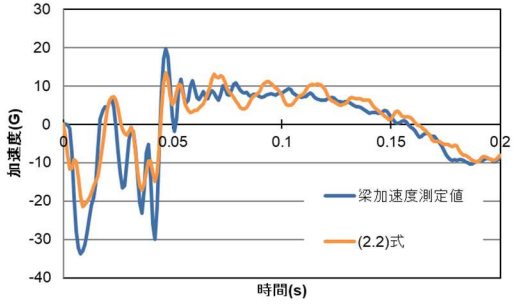
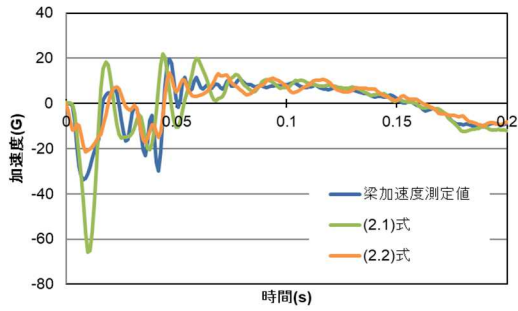
注) 実験記号 : B-H 鋼-材質強度-スパン(m)-重錘質量(kg)-敷砂厚(cm)-衝突速度(m/s)

図 2-17 H 鋼はり 荷点部 加速度

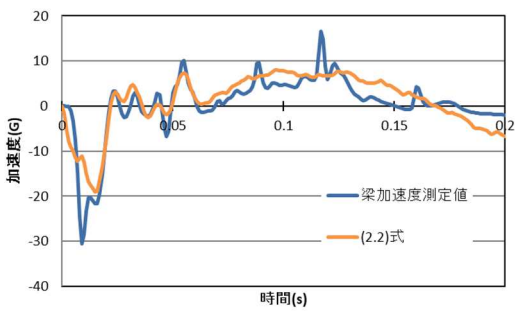
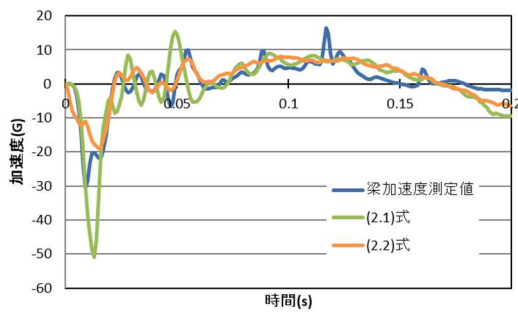
次ページに続く



(g) B-H150-400-6-456.1-24-6.761



(h) B-H150-400-6-456.1-24-10.142

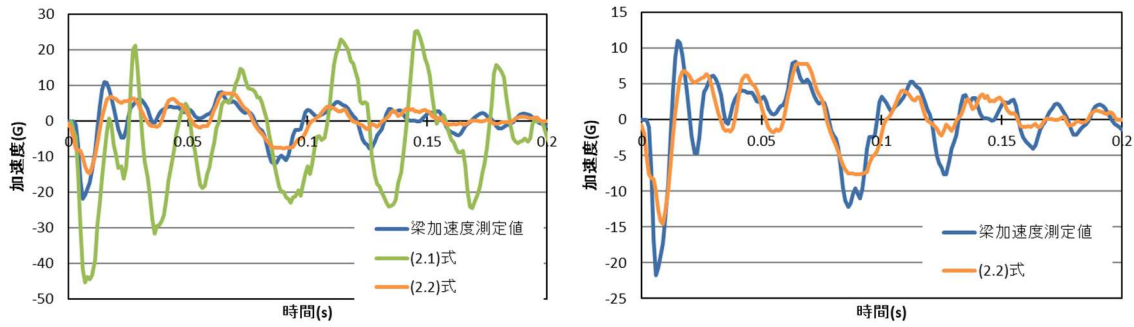


(i) B-H150-400-6-456.1-48-10.142

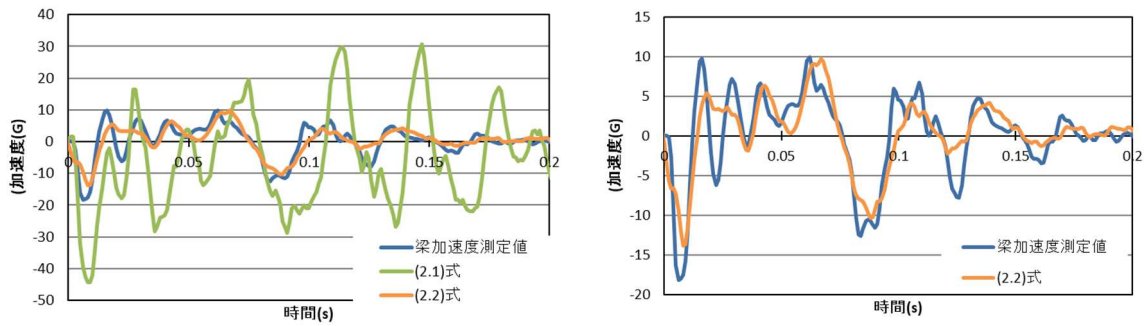
注) 実験記号 : B-H 鋼-材質強度-スパン(m)-重錘質量(kg)-敷砂厚(cm)-衝突速度(m/s)

図 2-17 H 鋼はり 載荷点部 加速度

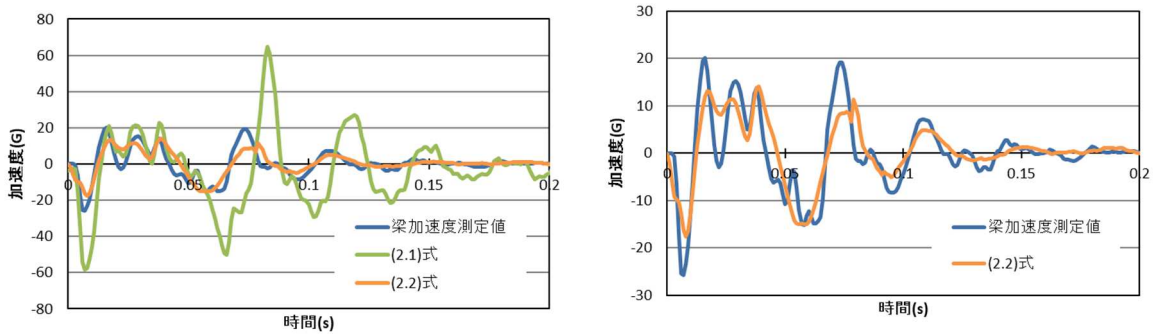
次ページに続く



(j) B-H100-400-2-456.1-24-6



(k) B-H100-490-2-456.1-24-6

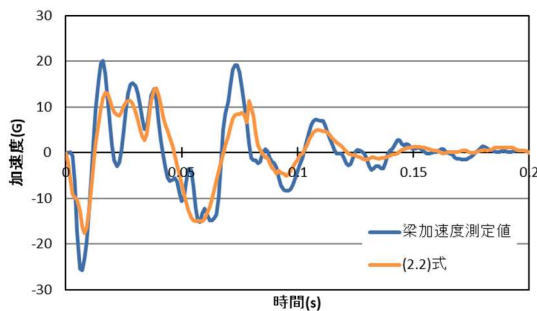
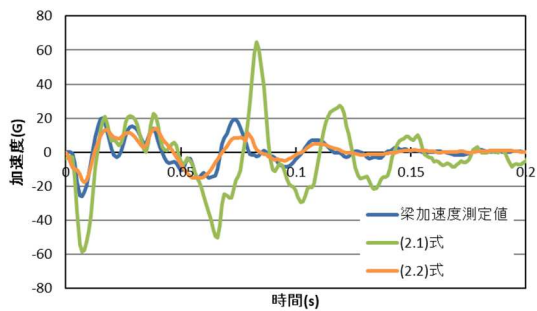


(l) B-H100-400-2-456.1-48-6

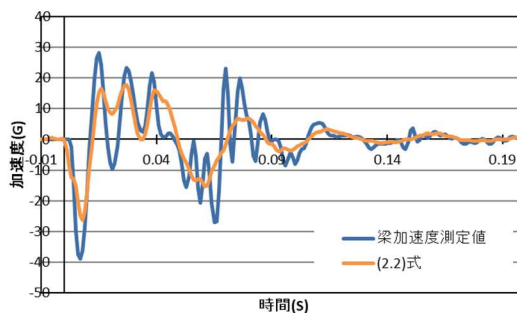
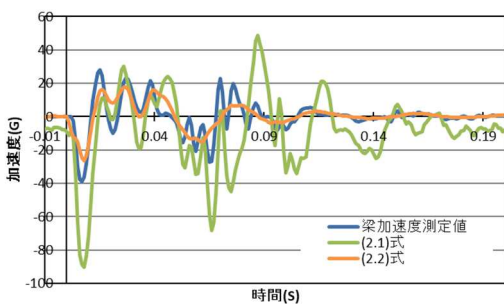
注) 実験記号: B-H 鋼-材質強度-スパン(m)-重錘質量(kg)-敷砂厚(cm)-衝突速度(m/s)

図 2-17 H 鋼はり 荷点部加速度

次ページに続く



(m) B-H100-400-2-157.0-24-6.816



注) 合支点反力に若干のバイアスがあり、それが (2.1) 式のバイアスになっている。

(n) B-H100-400-2-157.0-24-10.225

注) 実験記号 : B-H 鋼-材質強度-スパン(m)-重錘質量(kg)-敷砂厚(cm)-衝突速度(m/s)

図 2-17 H 鋼はり載荷点部加速度

第3章 曲げ変位の推定方法

3.1 推定方法

前章の重錘落下実験より得られる緩衝材の衝撃応答特性を生かした簡易推定方法について運動量保存則およびエネルギー等価の観点から以下に3つの手法^{1,2)}を示し検討する。これらの照査は最大応答値を推定する手法であり、**図3-1**に各推定方法の概念図を示す。ここで、 P_y は降伏荷重、 d_e は弾性変位、 d_p は等価塑性変位である。

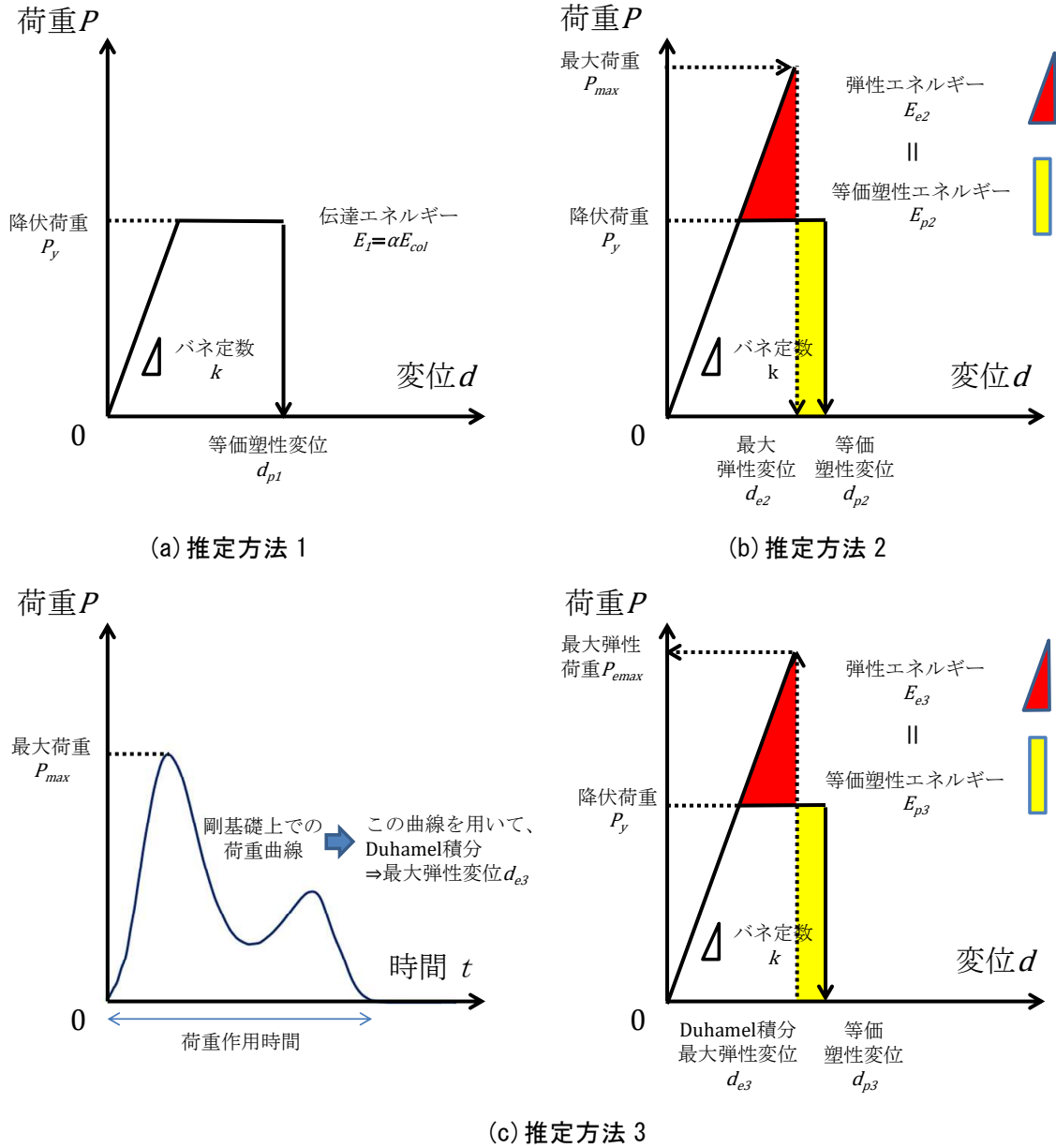


図3-1 最大変位応答の推定方法概念図

3.1.1 運動量保存則を用いた方法（推定方法 1）

推定方法 1 は園田により提案された方法³⁾である。

質量 M_{col} の衝突体が、有効質量 $m_{beam+sand tank}^{eff}$ の構造体へ及ぼす衝突伝達エネルギーを、完全塑性衝突を仮定し衝突エネルギー E_{col} に運動量保存による低減率 α を乗じたものとし、これが構造体の変形エネルギーと等価になるとの仮定に基づく手法である。ここで、低減率 α は系の運動量保存則より導かれ、(3.1)式で示される。

$$\alpha = \frac{1}{\left(1 + \frac{m_{beam+sand tank}^{eff}}{M_{col}}\right)} \quad (3.1)$$

3.1.2 最大伝達衝撃力を用いた方法（推定方法 2）

推定方法 2 は緩衝材下の伝達衝撃力を実験等により予め得ておき、その最大伝達衝撃力を利用し、構造体を質点系に置換したときの弾性変位を算出する。エネルギー一定則より構造体の弾性変形エネルギー E_{e2} と塑性変形エネルギー E_{p2} は等しいと仮定し、等価塑性変位 d_{p2} を推定するものである。本手法においては時間的な影響は考慮しないため従来の許容応力度設計に近い手法であるが、エネルギー一定則を用いて塑性変位を推定するところが異なる。本検討では、剛基礎上传達衝撃力の第 1 ピークの値を用いる。

3.1.3 伝達衝撃波形を用いた方法（推定方法 3）

推定方法 3 は実験により得た緩衝材下の伝達衝撃力波形を使用し、弾性質点系に置換した構造体を Duhamel 積分式^{4)など}(3.2)により最大弾性変位 d_{e3} を算出する。次に算出した弾性変位から推定方法 2 と同様にエネルギー一定則を満たすように最大塑性変位 d_{p3} を推定する。この方法では推定方法 2 と違い伝達衝撃力の時間的変動を考慮できる。

$$x(t) = \frac{1}{m_{beam}^{eff}\omega_d} \int_0^t P_t(\tau) \sin \omega_d(t - \tau) d\tau \quad (3.2)$$

ここで、 ω_d は単純ばりの角振動数、 m_{beam}^{eff} は単純ばりの有効質量、 $P_t(\tau)$ は剛基礎上緩衝材への落下実験の伝達衝撃力である。

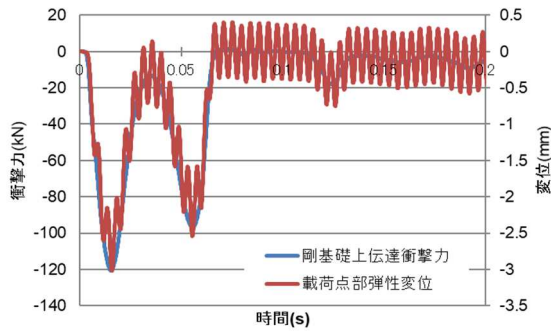
今回行った Duhamel 積分の結果を図 3-2 に示す。入力データは剛基礎上実験のサンプリングタイム 1ms のデータを 10 分割直線補間して 0.1ms 間隔のデータにし用いた。H150 シリーズ各スパンの固有周期は、スパン 1.5m は 4.406ms、スパン 3m は 17.62ms、スパン 6m は 70.50ms である。H100 シリーズ（スパン 2m）の固有周期は、11.95ms で比較的 H150 シリーズのスパン 3m に近い。

H150 シリーズに関して、図 3-2(a)(b)(c)スパン 1.5m の結果より固有周期が短い場合は、応答変位の高周波成分を除けば衝撃力と応答変位の波形は近似している。スパン 3m の(e)と(d)(f)を比較すると、(e)では衝撃力が作用したあとも大きな振動が続くが、衝突速度の遅い(b)や敷砂厚の厚い(h)では比較的小さな振動で治まっている。またスパン 6m の(h)と(i)を比較すると敷砂厚の厚い(i)のほうが衝撃力作用後の振動が大きい。衝撃力の波形の微妙な違いで結果が大きく違ってくるようである。

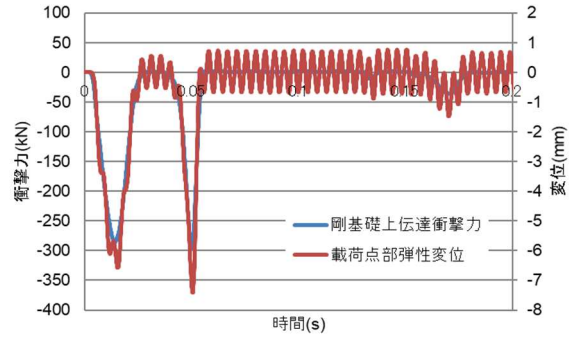
H100 シリーズも、衝撃力と応答変位の波形を比べると、H 鋼はりの固有周期で振動する成分を除けば、

両者の波形は近似している。

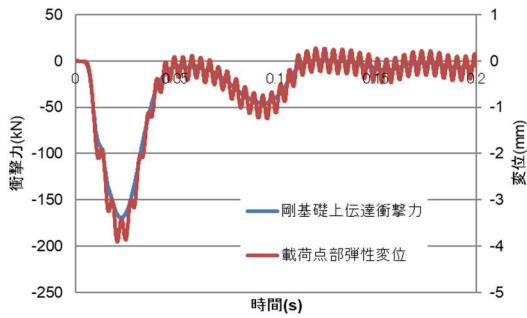
本検討では、実際のはりの応答には、第1ピークの影響が大きいと考え、Duhamel積分の応答の第1ピークの値を推定に用いる。



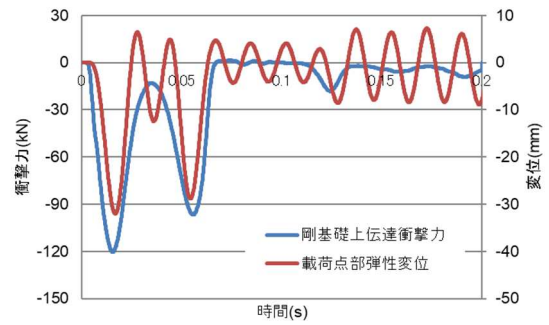
(a) B-H150-400-1.5-456.1-24-6.761



(b) B-H150-400-1.5-456.1-24-10.142



(c) B-H150-400-1.5-456.1-48-10.142

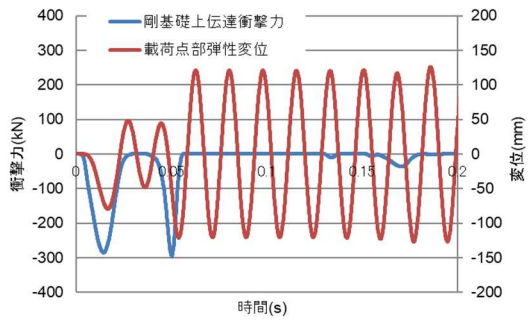


(d) B-H150-400-3-456.1-24-6.761

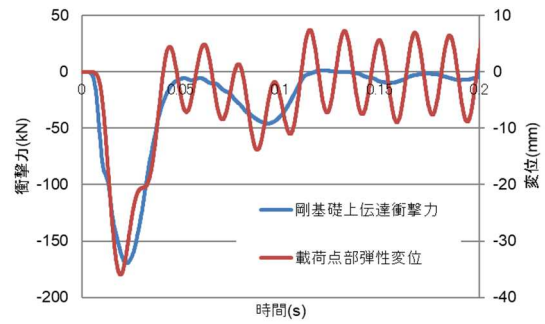
注) 実験記号 : B-H 鋼-材質強度-スパン(m)-重錘質量(kg)-敷砂厚(cm)-衝突速度

図 3-2 Duhamel 積分結果

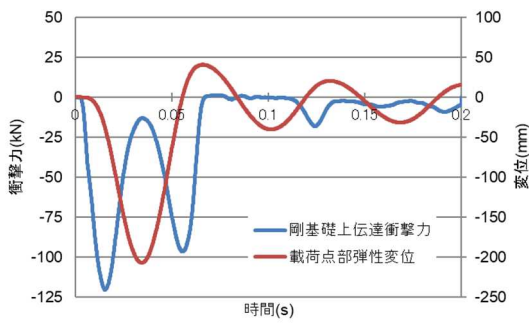
次ページに続く



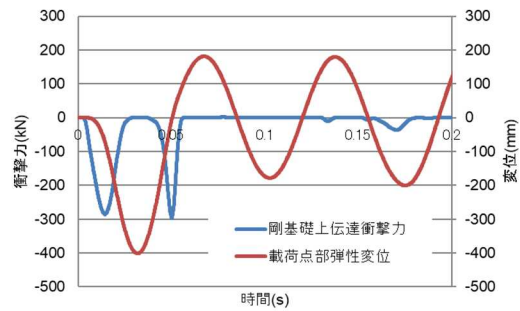
(e) B-H150-400-3-456.1-24-10.142



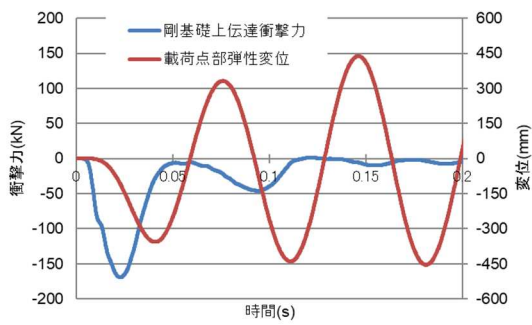
(f) B-H150-400-3-456.1-48-10.142



(g) B-H150-400-6-456.1-24-6.761



(h) B-H150-400-6-456.1-24-10.142

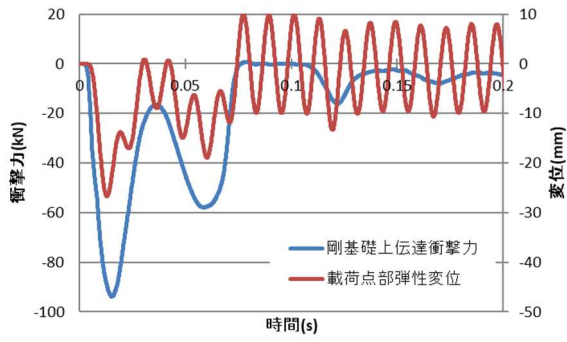


(i) B-H150-400-6-456.1-48-10.142

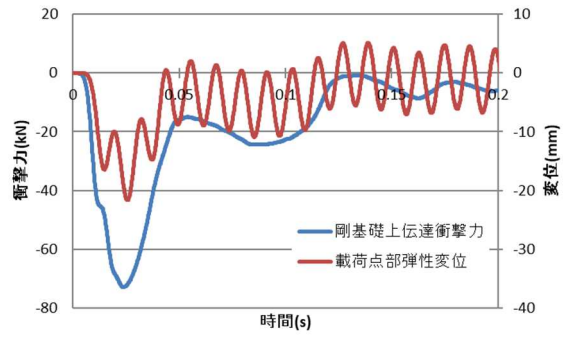
注) 実験記号 : B-H 鋼-材質強度-スパン(m)-重錘質量(kg)-敷砂厚(cm)-衝突速度

図 3-2 Duhamel 積分結果

次ページに続く



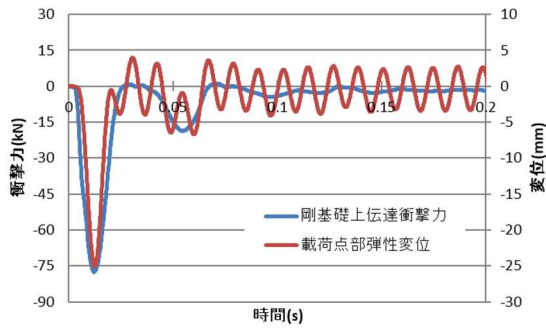
(j) B-H100-400-2-456.1-24-6



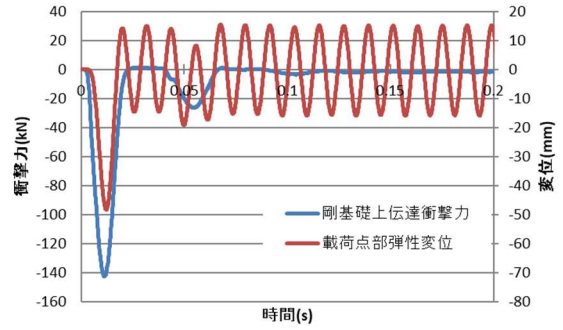
(l) B-H100-400-2-456.1-48-6

(k) B-H100-490-2-456.1-24-6

注) 弾性解析なので(j)と同じ



(m) B-H100-400-2-157.0-24-6.816



(n) B-H100-400-2-157.0-24-10.225

注) 実験記号 : B-H 鋼-材質強度-スパン(m)-重錘質量(kg)-敷砂厚(cm)-衝突速度

図 3-2 Duhamel 積分結果

3.2 推定結果

表 3-1 各推定方法の推定結果と実験値の比較

H 鋼	材質	スパン L(m)	重錘 質量 M(kg)	敷砂厚 T _s (cm)	衝突 速度 V _c (m/s)	各推定法の推定精度 (推定値/実験値)						
						最大伝達エネルギー			最大変位			
						推定 方法 1	推定 方法 2	推定 方法 3	推定 方法 1	推定 方法 2	推定 方法 3	
H150	SS400	1.5	456.1	24	6.761	41.939	0.806	1.073	16.625	0.898	1.036	
					10.142	13.982	0.701	0.790	11.248	0.764	0.835	
				48	10.142	17.279	0.346	0.390	12.845	0.524	0.556	
		3.0		24	6.761	8.481	1.339	3.150	5.358	1.198	2.252	
					10.142	3.646	1.493	3.798	3.317	1.432	3.449	
				48	10.142	6.065	0.978	1.460	5.005	0.983	1.364	
		6.0		24	6.761	1.771	2.242	3.437	1.593	1.956	2.875	
					10.142	1.547	5.078	5.187	1.488	4.638	4.736	
				48	10.142	1.769	2.277	5.227	1.667	2.106	4.664	
H100	SS400	2.0	456.1	24	6.000	4.957	0.720	1.197	4.242	0.770	1.161	
				48	6.000	5.647	0.559	1.014	4.619	0.657	1.011	
	SN490B			24	6.000	4.930	0.716	1.190	4.107	0.775	1.151	
				SS400	157.0	24	6.816	3.965	1.425	3.067	2.807	1.259
	10.225						3.670	2.010	4.726	3.106	1.797	3.938

各推定方法の最大伝達エネルギーおよび最大変位の推定結果と実験結果の比を表 3-1 に示す。

B-H150-400-1.5-456.1-48-10.142 のケースでは、図 2-4(b)および図 2-7(a)に示すように、剛基礎上传達衝撃力の最大値が 169.5kN、H 鋼単純ばり上重錘落下実験の伝達衝撃力の最大値が 201.1kN と H 鋼単純ばり上重錘落下実験の伝達衝撃力のほうが大きかった。これは、H 鋼単純ばり上重錘落下実験の敷砂が締め固まっていたためと思われるが、このため剛基礎実験のデータを用いる推定方法 2 および推定方法 3 の推定値が実験値より小さくなったと考えられるので、考察の対象とはしないこととする。

今回の実験の範囲では、推定方法 1 は H150 シリーズのスパン 6m で比較的良好な推定結果であったが、そのほかの実験条件では推定精度が悪かった。H150 シリーズ スパン 6m の場合、図 2-12(g)(h)(i)に示すように、完全塑性衝突が短時間で終了し残存エネルギーで重錘と敷砂槽および H 鋼はりが変位するという推定方法 1 の前提条件に近いが、そのほかの条件では、その前提条件を満足しないからだと思われる。

推定方法 2 に関して、今回の実験では、作用時間が短く値の大きいノイズのような荷重がなかったため、H150 シリーズのスパン 6m を除けば、比較的实验値に近い推定結果となった。しかし推定結果が実験結果を下回る危険側の推定となるケースが多かった。

推定方法 3 に関して、今回の実験では、固有周期の短い H150 シリーズ スパン 1.5m で考察の対象とする 2 ケースの実験結果に対し良好な推定結果を与えた。H150 シリーズ スパン 3m と H100 シリーズ スパン 2m ではほとんど実験結果以上の安全側の推定結果であるが、条件によって推定精度が悪いケース

もあった。H150 シリーズ スパン 6m に対する推定精度は良くなかった。

3.3 推定結果に関する考察

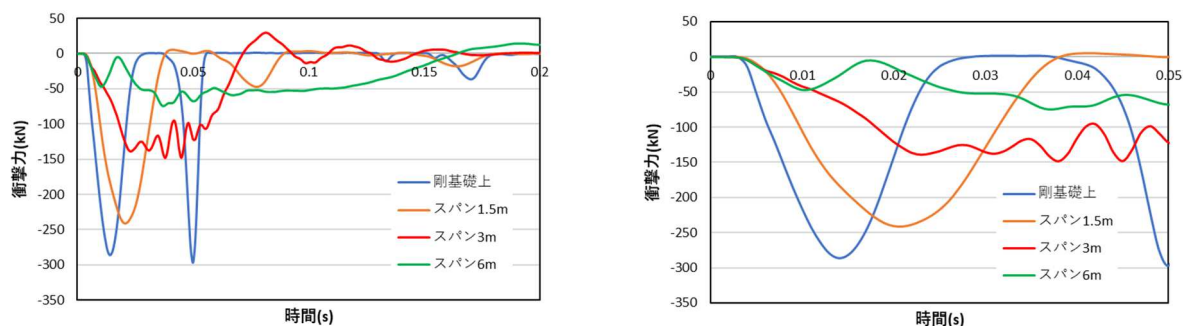
図 3-3 に、H150 シリーズ、材質 SS400、重錘質量 456.1kg、敷砂厚 24cm、衝突速度 10.142m/s の場合の伝達衝撃力波形を剛基礎上実験のデータと共に示す。弾性範囲であっても H 鋼はりの剛性により衝突初期の荷重増加速度が大きく変化することが確認できる。

また、図 2-7 に示すように、H 鋼が大きく塑性変形する場合、伝達衝撃力の平坦部の値は H 鋼はりによって決まり敷砂厚や重錘衝突条件の影響は小さいが、平坦部に達するまでの荷重増加速度は敷砂厚や重錘衝突条件により変化する。さらに、H 鋼はり断面とスパンが同じであれば前記荷重増加速度が大きければ変位の増加速度も大きくなる。そこで、荷重増加速度に着目することにする。

本研究において、荷重増加速度は、図 3-4 に示すように伝達衝撃力の第 1 ピーク値の 1/3 および 2/3 の荷重になる点を結ぶ勾配として定義した。荷重増加速度比 β は(3.3)式で定義される。

$$\beta = \frac{V_L^B}{V_L^F} \tag{3.3}$$

ここに、 V_L^B と V_L^F は、各々H 鋼単純はり上での伝達衝撃力の荷重増加速度と剛基礎上传達衝撃力の荷重増加速度である。



(a) 全体

(b) 衝突初期部拡大

H150 シリーズ SS400 重錘質量 456.1kg 敷砂厚 24cm 衝突速度 10.142m/s

図 3-3 H 鋼はりの違いによる伝達衝撃力

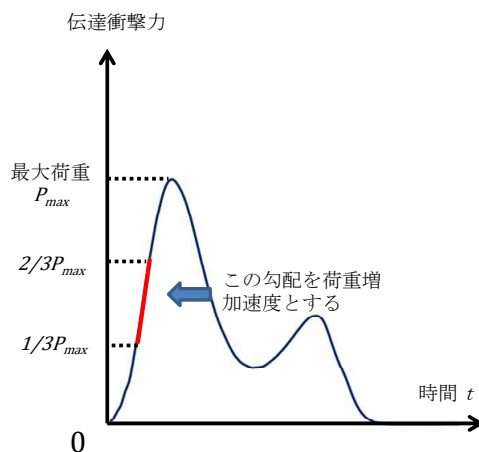


図 3-4 荷重増加速度の定義

表 3-2 に荷重増加速度、荷重増加速度の比及び剛基礎上传達衝撃力の最大値と降伏耐力の比などを示す。また、剛基礎上実験時と H 鋼単純ばり上重錘落下実験時の荷重増加速度の比 β と推定方法 3 の推定精度（最大伝達エネルギー基準）の関係を図 3-5 に示す。

本実験の範囲では荷重増加速度の比が 0.4 以下になると推定方法 3 の推定精度が悪くなるようである。すなわち、荷重増加速度の比が 40%程度以上では推定方法 3 の精度はよいといえるが、はりの変形のため、荷重増加速度が低下し剛基礎上での荷重増加速度の 40%程度以下になると推定精度が低下しかなり安全側の評価になることがわかる。

また、表 3-2 より以下のことが言える。

- (1) スパンが短く剛性が大きい方が β は大きい。
- (2) 敷砂厚が厚い方が β は大きい。
- (3) 衝突速度が小さいほうが β は大きい。

表 3-2 荷重増加速度及び剛基礎上传達衝撃力の最大値と降伏耐力の比

H 鋼	材質	スパン L(m)	重錘 質量 M(kg)	敷砂厚 T _s (cm)	衝突 速度 V _i (m/s)	推定方法 3 の推定精度	荷重増加速度 (kN/s)			剛基礎上传 達衝撃力の 最大値と降 伏耐力の比
							はり上 V _L ^B	剛基礎 上V _L ^F	比 β	
H150	SS400	1.5	456.1	24	6.761	1.073	11448	11921	0.960	0.684
					10.142	0.790	22253	32024	0.695	1.621
				48	10.142	0.390	12671	10603	1.195	0.961
		3.0		24	6.761	3.150	4045	11921	0.339	1.367
					10.142	3.798	7712	32024	0.241	3.242
				48	10.142	1.460	6796	10603	0.641	1.923
		6.0		24	6.761	3.437	588	11921	0.049	2.734
					10.142	5.187	1203	32024	0.038	6.483
				48	10.142	5.227	909	10603	0.086	3.845
H100	SS400	2.0	456.1	24	6.000	1.197	4114	9899	0.416	1.806
	48			6.000	1.014	3440	4106	0.838	1.403	
	24			6.000	1.190	3983	9899	0.402	1.643	
	SN490B	157.0	24	6.816	3.067	3687	10254	0.360	1.491	
	SS400			10.225	4.726	5532	20875	0.265	2.738	

H 鋼単純ばりの降伏耐力と剛基礎上传達衝撃力第 1 ピーク値の比と**推定方法 3** の推定精度（最大伝達エネルギー基準）の関係を図 3-6 に示す。正の相関があるようだが、ばらつきも大きい。

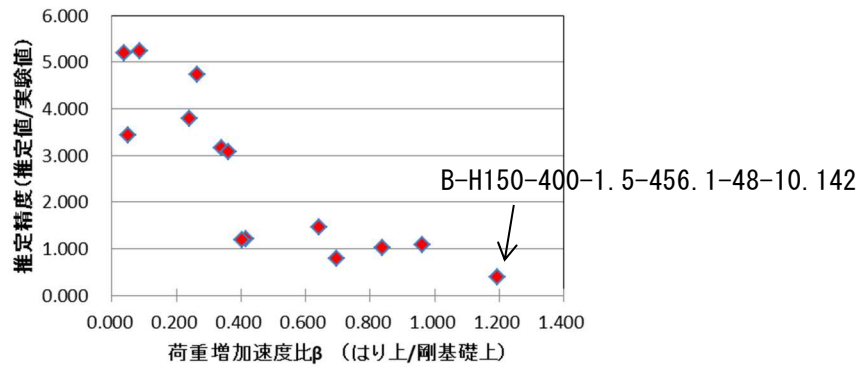


図 3-5 剛基礎上と H 鋼単純ばり上重錘落下実験時の荷重増加速度の比 β と**推定方法 3** の推定精度（推定値/実験値）の関係（最大伝達エネルギー基準）

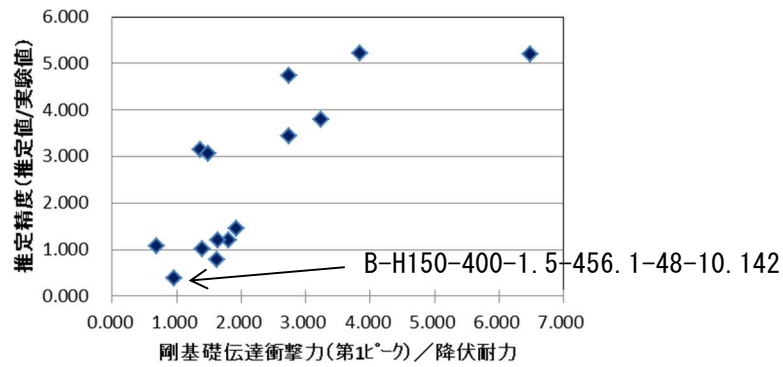


図 3-6 降伏耐力に対する剛基礎上传達衝撃力の最大値（第 1 ピーク）の比と**推定方法 3** の推定精度（推定値/実験値）の関係（最大伝達エネルギー基準）

参考文献

- 1) 江野翔紀, 榎谷浩, 佐藤彰, 中村佐智夫: 衝撃作用を受ける緩衝材を有する構造部材の限界状態照査に関する一提案, 第 11 回 構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, 2014.10
- 2) 中村佐智夫, 榎谷浩, 江野翔紀, 佐藤彰, 徐晨: 緩衝材を有する落石防護工の限界状態照査に関する一提案, 構造工学論文集, Vol.62A, pp.952-960, 2016.3
- 3) 園田恵一郎: 落石覆工の設計方法についての一提案, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.1563-1572, 1993.3
- 4) 石川信隆, 大野友則, 藤掛一典, 別府万寿博: 基礎からの衝撃工学, p.46, 森北出版社, 2008.3

第4章 結論

本研究ではH鋼はりの静的曲げ試験、敷砂緩衝材への重錘落下実験、同様の緩衝材を設置したH鋼単純ばりへの重錘落下実験を行った。その結果に対して衝撃力載荷での構造物の最大塑性変位の推定方法3つを示し、その推定結果について検討した。本研究で得られた結果は以下のようにまとめられる。

(1)剛基礎上重錘落下実験

- ・本研究においては伝達衝撃力波形と重錘衝撃力波形は大差なかった。また、衝撃力が第1ピークを過ぎて小さくなっても重錘の貫入は進んでおり、第2ピーク辺りで最大貫入量となる。

(2)H鋼はり上重錘落下実験

- ・条件によっては、わずかな伝達衝撃力波形の違いで最大変位に大きい違いが出る場合があることを示した。モデル化した衝撃力を入力とする解析を行う場合、荷重増加速度や最大荷重の設定には注意が必要であることが推測できる。
- ・スパン6mの最初の第1波を除けば、重錘落下実験の荷重変位曲線は概ね静的試験結果と一致するが、衝突初期の降伏点を越えたあたりでは、静的荷重より大きく、はりの速度が0になる最大変位の時点で静的試験の値にほぼ等しくなる。これは、H鋼はりの慣性力やひずみ速度効果によるものと考えられる。
- ・エネルギー伝達率に関し、同じ敷砂厚・衝突速度で比較すると、スパンが長いほうがエネルギー伝達率が大きく、「砂厚が大きくなる」あるいは「衝突速度が小さくなる」とエネルギー伝達率は小さくなることを示した。
- ・各実験ケースより、重錘加速度波形すなわち重錘衝撃力波形の振動がH鋼はりの加速度の振動と関連したものであることが確認でき、これは重錘質量が軽い場合に顕著である。
- ・大きく塑性変形する場合は、重錘の挙動を簡単な計算で予測できることが確認できた。
- ・衝突直後のマイナス方向への第1波の絶対値は小さめではあるが、(2.2)式の値が加速度計による測定値とよく一致することを示した。つまり、本研究においては、重錘衝撃力と伝達衝撃力の差は、砂槽慣性力によるものが大きいと言える。

(3)曲げ変位推定方法

- 1)推定方法1は、完全塑性衝突が衝突時間に対し短時間で終了し残存エネルギーで重錘と敷砂槽およびH鋼はりを変位するという前提条件を満足する場合に良い推定精度を与える。
- 2)推定方法2は、推定方法1が適用できない領域において比較的良い推定結果を与えるが、条件によっては、実験結果を下回る場合があった。
- 3)推定方法3は、H鋼単純ばり上重錘衝突実験時の荷重増加速度の剛基礎上の荷重増加速度に対する比 β が0.4以下では安全側の評価となるが、0.4以上の場合に推定精度が良いことが明らかとなった。また、 β に関し以下のことが言える。

- (1) スパンが短く剛性が大きい方が β は大きい。
- (2) 敷砂厚が厚い方が β は大きい。
- (3) 衝突速度が小さいほうが β は大きい。

これらは今後、**推定方法 3** の適用範囲をさらに明らかにしていく上で重要であると考えられる。

推定方法全体をまとめると、**推定方法 1** は、変形が小さく重錘とはりが一体となる前に衝突が終わる場合には推定精度が悪く、**推定方法 3** は、塑性変形が非常に大きな範囲ではかなり安全側の評価になる。

図 4-1 のイメージ図に示すように、**推定方法 1** と **推定方法 3** は補完しあう関係にあり、本実験において、**推定方法 1** と **推定方法 3** の推定値の小さいほうを推定値とすれば、最大伝達エネルギー基準で、実験値の 0.8 ~ 4 倍となる (B-H150-400-1.5-456.1-48-10.142 のケースは除く) (表 4-1 参照)。

推定方法 1 と **推定方法 3** それぞれの使用範囲の境界を明確にすることは今後の課題であるが、現時点では、**推定方法 1** と **推定方法 3** の両方で推定し、推定値の小さい方を採用すればよい。

実際のロックシェッドにおいて、曲げ破壊するエネルギーは許容応力度設計法の設計条件の 20 倍以上ともいわれているので簡易な推定方法で大幅な改善が期待できる。

また、さらなる推定精度向上のためには相互作用を考慮した検討が必要と考えている。

例としては、**推定方法 3** において Duhamel 積分の前に、剛基礎上传達上传達衝撃力波形に、落石防護構造物の 1/固有周期の周波数のローパスフィルターをかけることなどが考えられ今後の検討課題としたい。

表 4-1 推定方法 1 と推定方法 3 の組み合わせによる推定精度

H 鋼	材質	スパン L(m)	重錘質量 M(kg)	敷砂厚 T _s (cm)	衝突速度 V _c (m/s)	各推定法の推定精度 (推定値/実験値)			
						最大伝達エネルギー			
						推定方法 1	推定方法 2	推定方法 3	推定方法 1 と 3 の小さい方
H150	SS400	1.5	456.1	24	6.761	41.939	0.806	1.073	1.073
					10.142	13.982	0.701	0.790	0.790
				48	10.142	17.279	0.346	0.390	---
		3.0		24	6.761	8.481	1.339	3.150	3.150
					10.142	3.646	1.493	3.798	3.646
				48	10.142	6.065	0.978	1.460	1.460
6.0	24	6.761	1.771	2.242	3.437	1.771			
		10.142	1.547	5.078	5.187	1.547			
48	10.142	1.769	2.277	5.227	1.769				
H100	SS400	2.0	456.1	24	6.000	4.957	0.720	1.197	1.197
	48			6.000	5.647	0.559	1.014	1.014	
	24			6.000	4.930	0.716	1.190	1.190	
	SN490B	157.0	24	6.816	3.965	1.425	3.067	3.067	
	SS400			10.225	3.670	2.010	4.726	3.670	

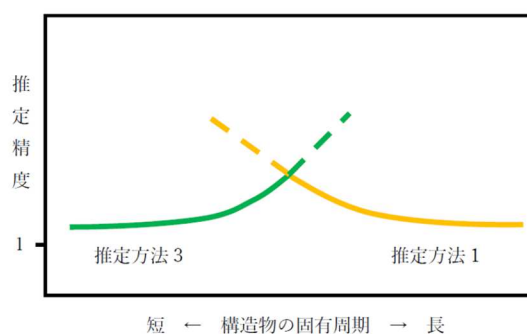


図 4-1 推定方法 1 と推定方法 3 の補完関係 (イメージ図)

謝 辞

本論文の取りまとめにあたり，金沢大学の榊谷浩教授には丁寧なご指導を賜りました．深く感謝申し上げます．

日本サミコン（株）の渡辺康夫社長には，金沢大学大学院にて研究を行う機会をいただきました．深く感謝申し上げます．

また，日本サミコン（株）の佐藤彰氏，高野芳弘氏そして宮本大介氏には，実験を行うにあたり協力をいただきました．ここに記して感謝の意を表します．

最後に，著者の研究活動を支えてくれた家族に感謝します．