

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/2297/00056503

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



学位論文要旨

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

Abstract

A sand layer often empirically is installed as a buffer material in the protection structure with high bending rigidity as like rock shed. However, the method for estimating the amount of the plastic bending deformation has not been established, when a rock fall collides with the structure.

In this study, H shape steel beams were used for a protection structure on which a sand tank containing river sand was installed. The series of impact experiment by free drop of steel weight as a model of rock fall were achieved under the various conditions. The applicable range of various bending displacement estimation methods was examined. Experimental parameters were beam section, beam span, mass of weight, collision velocity of weight, thickness of sand cushion. In the estimation method, the method of obtaining the energy transfer rate from the mass of the weight, the mass of the structure using the momentum conservation law, furthermore the method of estimating the transfer energy using the impact force obtained the experiment of only sand tank on the rigid foundation and the equal-energy approach in plastic deformation were examined. The accuracy and application notes of each of them to design were shown concretely.

1. 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。

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。

1.2 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、その固有周期は数ミリ秒から 100 ミリ秒以上までと幅広く、数十ミリ秒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実験は、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 1.5m から 6m（固有周期約 4.4msec～71msec）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 24cm、余裕がある場合として 48cm 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。

2. 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。

供試体は、スパン 1.5m・3m および 6m の H150×150 の H 鋼とスパン 2m の H100×100 の H 鋼である。

重錘落下実験に合わせるため、荷重はスパン中央一点荷重とした。

実験結果は計算値とよく一致した。

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。敷砂緩衝材は、乾燥した川砂を、幅 30cm×奥行 40cm×深さ 30cm または 60cm の鋼製砂槽に層厚 24cm または 48cm となるように詰め、十分に締固めを行った。

2.2.1 剛基礎上実験

2.2.1.1 実験装置および実験条件

図1に示す装置で、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。

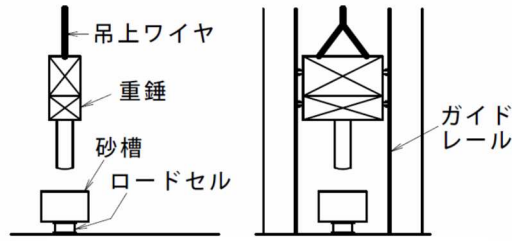


図1 実験装置 (剛基礎上)

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に、伝達衝撃力、重錘衝撃力と貫入量の関係について、重錘質量456.1kg 敷砂厚24cm 衝突速度10.142 m/sの例を図3に示す。図2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3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。

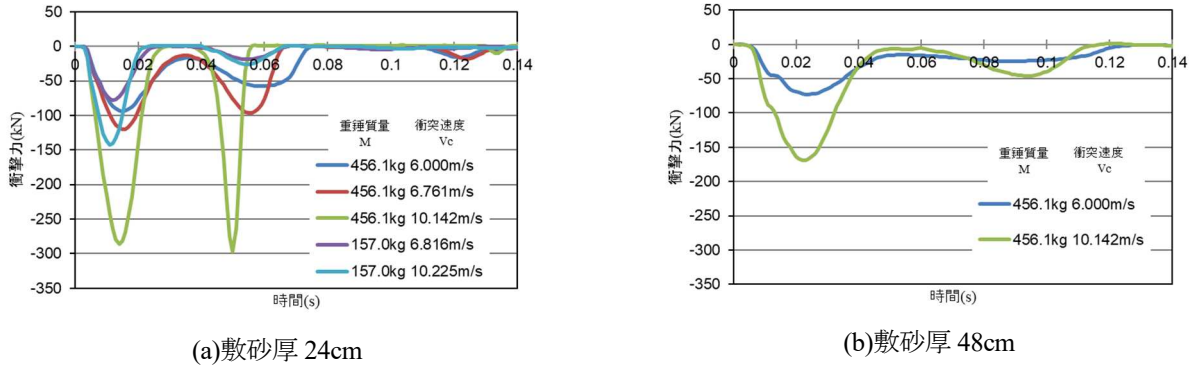


図2 剛基礎上传達衝撃力

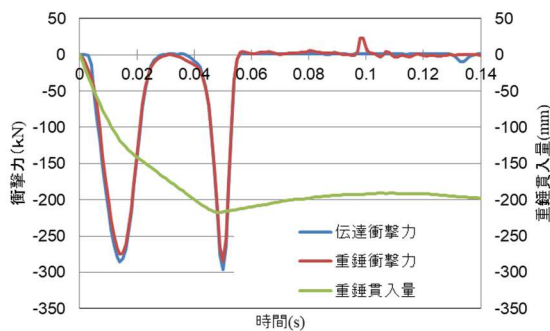


図3 伝達衝撃力、重錘衝撃力、重錘貫入量
(重錘質量456.1kg 敷砂厚24cm 衝突速度10.142 m/s)

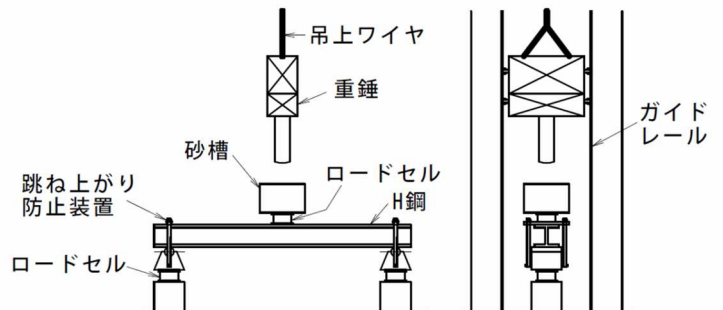


図4 実験装置 (H鋼はり上実験)

2.2.2 H 鋼はり上実験

2.2.2.1 実験装置

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 4 に示す。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。

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 5 に、載荷点下の H 鋼下部の変位を図 6 に示す。

変位データからは、H150 シリーズのスパン 1.5 m 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 157.0 kg、敷砂厚 24 cm、衝突速度 6.816 m/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 24cm と 48cm 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。

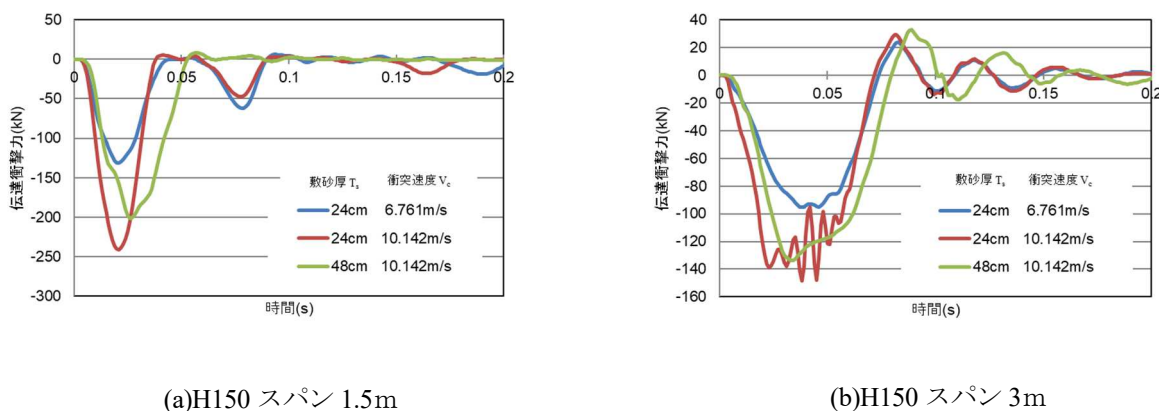
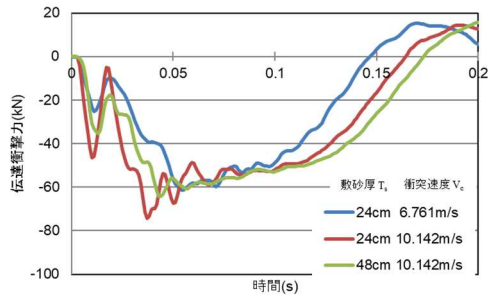
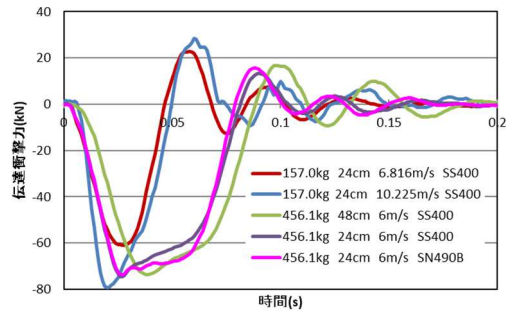


図 5 伝達衝撃力（H 鋼単純ばり上重錘落下実験）

次ページに続く

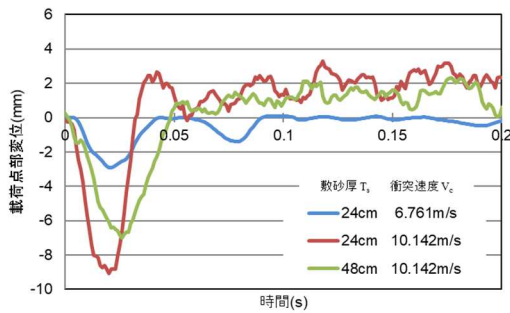


(c)H150 スパン 6m

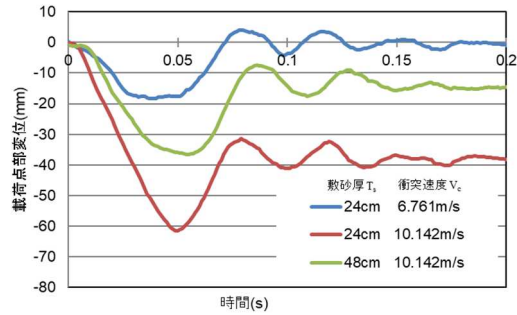


(d)H100 スパン 2m

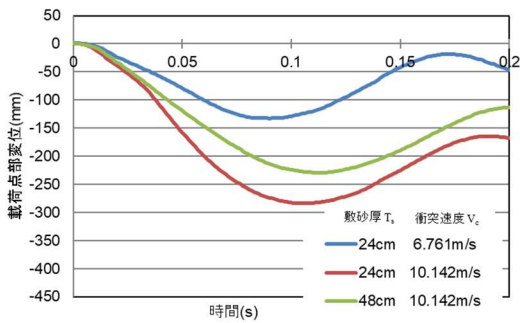
図 5 伝達衝撃力 (H 鋼単純ばり上重錘落下実験)



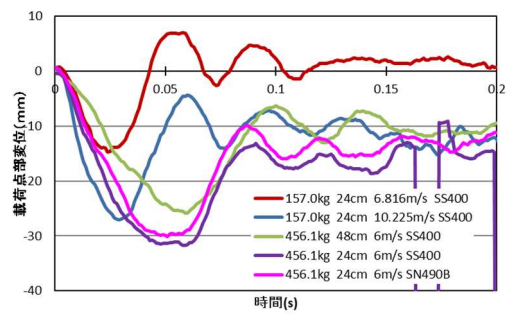
(a)H150 スパン 1.5m



(b)H150 スパン 3m



(c)H150 スパン 6m



(d)H100 スパン 2m

図 6 載荷点部変位 (H 鋼単純ばり上重錘落下実験)

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 7 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 1.5 m と 6.0 m では 8 から 20 倍の差がある。敷砂厚 24 cm 衝突速度 10.142 m/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ことわかる。

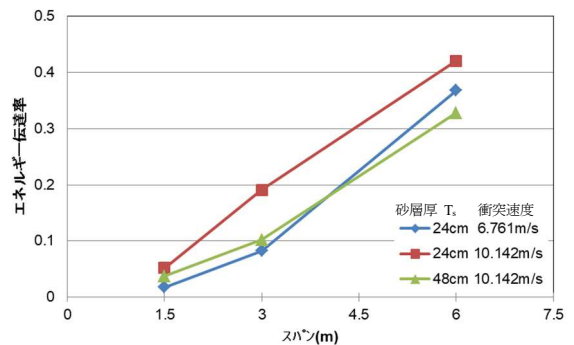


図 7 エネルギー伝達率実験結果 (H150 シリーズ)

3. 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8**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。

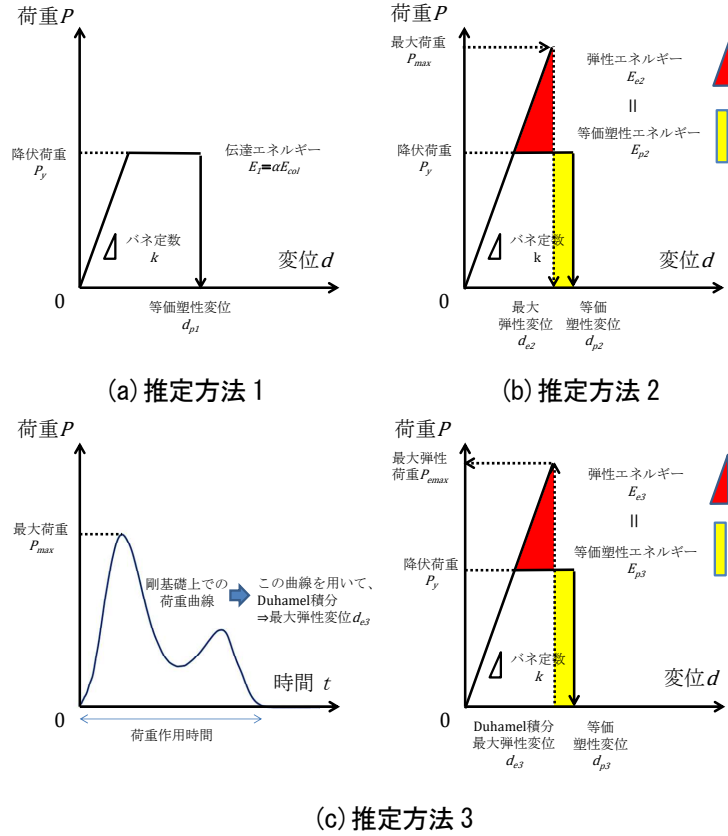


図8 最大変位応答の推定方法概念図

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、式(1)で示される。

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

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、剛基礎上伝達衝撃力の第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(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.

$$x(t) = \frac{1}{m_{beam}^{eff} \omega_d} \int_0^t P_t(\tau) \sin \omega_d(t - \tau) d\tau \quad (2)$$

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. 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.

3.2 推定結果

表 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	
				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 1 に示す. なお, B-H150-400-1.5-456.1-48-10.142 のケースは, H 鋼はり上衝撃力の方が, 剛基礎上衝撃力より大きく砂の締固めが一定ではないと考えられるため, 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 で比較的良い推定結果であったが, そのほかの実験条件では推定精度は悪かった. H150 シリーズ スパン 6m の場合, 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 鋼はりを変位するという**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 6 m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 1.5 m で考察の対象とする 2 ケースの実験結果に対し良い推定結果を与えた。H150 シリーズ スパン 3 m と H100 シリーズ スパン 2 m 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 6 m 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 5 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。また、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。

荷重増加速度は、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。また荷重増加速度比 β は、H 鋼単純はり上での伝達衝撃力の荷重増加速度 V_L^B の剛基礎上伝達衝撃力の荷重増加速度 V_L^F に対する比として定義する。

表 2 荷重増加速度及び剛基礎上伝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_c (m/s)	推定方法 3 の 推定精度	荷重増加速度 (kN/s)			剛基礎上伝 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	
	SS400			24	6.816	3.067	3687	10254	0.360	1.491
				10.225	4.726	5532	20875	0.265	2.738	

表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9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。

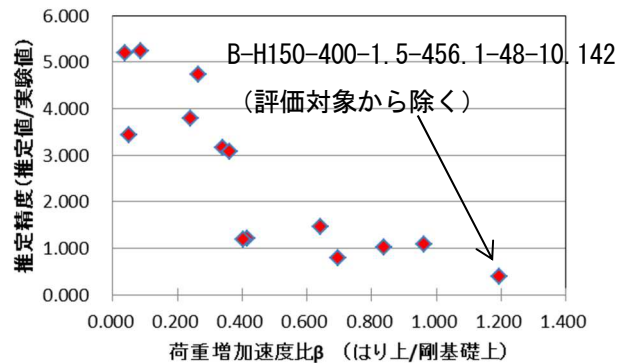


図9 β と推定方法3の推定精度（推定値/実験値）の関係（最大伝達エネルギー基準）

4. 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)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鋼はりが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。

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

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。

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

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

2. 論文提出者 (1) 所 属 環境デザイン学専攻

(2) 氏 名 ^な中村 ^ま佐智夫

3. 審査結果の要旨（600～650字）

本申請論文に対して、学位論文審査員による口頭試問を行い、論文の内容について精査した。また、令和元年8月5日に開催した口頭発表および同日に開催した審査委員会において協議した結果、次のとおり判定した。敷砂緩衝材を設置した落石防護工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目的の研究であり、最初に、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と緩衝材を設置したH鋼単純はりへの重錘落下実験を行い、各種衝撃特性、エネルギー伝達率などを明らかにしている。次に、運動量保存則により求まるエネルギー分担率や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について検討し、前者は構造の固有周期が長い場合に適用可能であり、後者は塑性変形が小さい場合に適用可能であると明らかとしている。引き続き衝撃を受ける防護物の曲げ変形の推定方法として「運動量保存則により求まるエネルギー分担率による方法」（方法1）、「剛基礎上 伝達衝撃力の最大値とエネルギー一定則を組み合わせた方法」（方法2）さらに「剛基礎上 伝達 衝撃力波形とエネルギー一定則を組み合わせた方法」（方法3）を検討し、方法1と方法3は補完しあう関係にあり、組み合わせることで構造物に伝達するエネルギーの推定値を与え、その成果の利用は現状設計法に大幅な改善を与えることを明らかにしている。また方法3の精度に関し構造物上の荷重増加速度の剛基礎上に対する比が0.4以上の場合に推定精度がよいことを明らかにした。以上より、本学位申請者（中村佐智夫氏）は博士（工学）に値するものと判定した。

4. 審査結果 (1) 判 定（いずれかに○印）合格・不合格

(2) 授与学位 博士（工学）

5. 学位論文及び参考論文に不適切な引用や剽窃が無いことの確認

確認済み（確認方法：審査員全員で学位論文および参考論文・副論文を精査し、iThenticateプログラムを用いた盗用および剽窃の確認を行った。）

未確認（理 由： ）