

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

A proposal concerning verification of limit state of structural member with sand cushion under impact action

江野翔紀*, 榎谷浩**, 佐藤彰***, 中村佐智夫***
Shoki Eno, Hiroshi Masuya, Akira Sato, Sachio Nakamura

*修(工), 日本工営(株), 交通運輸事業部 (〒102-0083 東京都千代田区麴町4丁目)
** 工博, 金沢大学教授, 自然科学研究科環境デザイン専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間)
*** 日本サミコン(株), 技術本部 (〒950-0925 新潟県新潟市中央区弁天橋通1丁目8番23号)

Key Words: Performance based design, Falling weight test, Cushioning performance
キーワード: 性能照査, 重錘落下実験, 緩衝性能

1. 研究背景・目的

落石防護構造物は、一般に作用の発生確率が低く作用位置も特定できない場合が多いが、落石が発生した場合作用時間の極めて短い衝撃的な作用を受ける。落石防護構造物の構造形式および使用材料はさまざまであるが、一般に敷砂を用いた衝撃緩衝材を設置していることが多い。近年、衝撃荷重の作用する構造物においても性能照査型設計への移行が求められているが、限界状態が明確でない場合もあり、各種限界状態の設定法についても議論があるため、現在でも衝撃荷重を静的荷重に置き換えた許容応力度設計を採用しているのが現状である。一方、緩衝材を使用した場合の構造物の衝撃応答特性に関して種々の既往研究がなされているが、各研究機関において緩衝材の特性や部材寸法が異なるため、衝撃挙動について統一的な解釈を得ていないことも問題としてあげられる。

本論文は上記の問題に対して、敷砂緩衝材に重錘落下実験を行うことで、その緩衝特性を明らかとし、同様の緩衝材を設置したH鋼単純ばりと固定門型ラーメンへの重錘落下実験から構造部材の最大変位について実験的な照査方法の提案を行うことを目的とする。

2. 重錘落下実験

本章では、金沢大学で行った重錘落下実験について概要と結果を示す。本実験は自由落下式重錘落下実験を採用し、重錘は質量450kg、曲率半径565mm、直径150mmの円筒形状を有している。安全面を考慮し、重錘はガイドレールにより誘導し、試験体は跳ね上がり防止措置を

設置した。実験は剛体上の敷砂緩衝材、緩衝材を有するH鋼単純ばり、緩衝材を有する固定門型ラーメンについて行った。敷砂緩衝材は、胎内川産の川砂を用い、30×40×30cmの鋼製土槽に層厚24cmとなるよう詰め、十分な締固めを行った。敷砂緩衝材の粒径加積曲線および諸元を表-1、図-1にそれぞれ示す。

H鋼単純ばりに関しては、スパン長 $L=2\text{m}$ の100×100×6×8mm断面を用い、断面量及び降伏応力等の諸元を表-2に示す。固定門型ラーメンについては、断面量はH鋼単純ばりと同様とし、実験室の制限からスパン長2m、柱長1.5m、衝突速度5m/sとした。脚部は板厚2cmの鋼板が溶接され4本のボルトにより固定している。降伏応力および構造諸元を表-2に示す。

2.1 剛体上の緩衝材の重錘落下実験

写真-1に示すように剛体上に設置した緩衝材に重錘落下実験を行い、緩衝特性および緩衝材下の伝達衝撃力波形を得る。衝突速度は1m/sきざみに1m/sから5m/sとした。短スパン大断面係数のH鋼上に土槽を設置することで剛体上と仮定している。なお、実験は各3回ずつ行い、移動平均によるスムージングを行っている。図-2に衝突速度5m/sの時の重錘衝撃力、伝達衝撃力、重錘変位を示している。重錘衝撃波形と伝達衝撃波形がほぼ等しいことから衝突前後で運動量保存則を満たしていることが分かる。図-3には各衝突速度においての土槽下の伝達衝撃力波形を示す。衝突速度が上がるにつれ、第1ピークの最大値が大きくなるが、第2ピークの値は衝突速度を上げて顕著な変化が見られないことが分かる。

表-1 敷砂緩衝材の物理量

最大密度 ρ_{dmax}	g/cm ³	1.747
最小密度 ρ_{dmin}	g/cm ³	1.457
最大間隙比 e_{max}	-	0.784
最小間隙比 e_{min}	-	0.488
質量(川砂+鋼製土槽)	kg	104.19

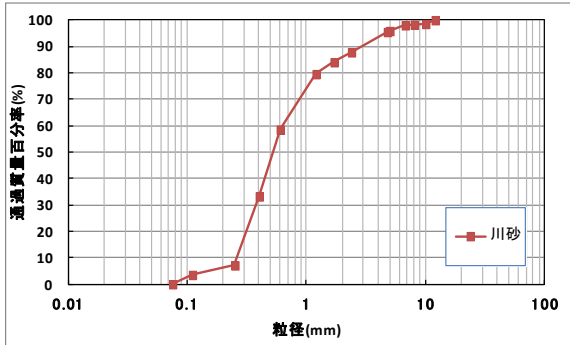


図-1 粒径加積曲線

表-2 H鋼断面寸法

断面諸元	単位	
断面積	mm ²	2104
断面二次モーメント	mm ⁴	3690485
降伏応力	N/mm ²	320



写真-1 緩衝材への重錘落下実験

2.2 緩衝材を有するH鋼単純ばりの重錘落下実験

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う衝突速度は1m/s きざみに1m/sから5m/sとした。

図-4 から図-6 に各衝突速度の重錘衝撃力, 伝達衝撃力, H鋼単純ばり中心たわみの実験波形を示す。図-6 からは, 衝突速度3m/s以上でははりの塑性化が確認できる。図-5は伝達衝撃力を示しているが, 塑性化の確認される3m/s以上では衝撃力の最大値は大きく変化せず作用時間が増大していることが確認される。図-4の重錘衝撃力では, 衝突速度が増大するに従い, 波形に振動が見られるので, 重錘は土槽中を振動しながら貫入していると考えられる。

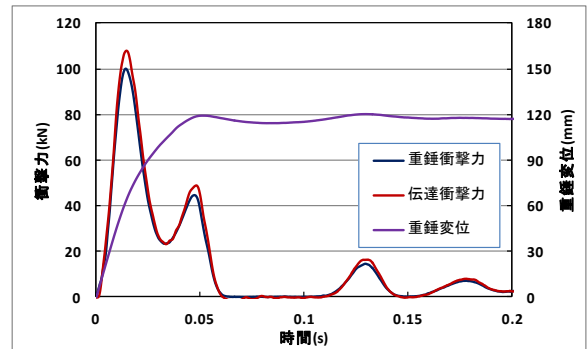


図-2 衝突速度5m/sの時の衝撃挙動

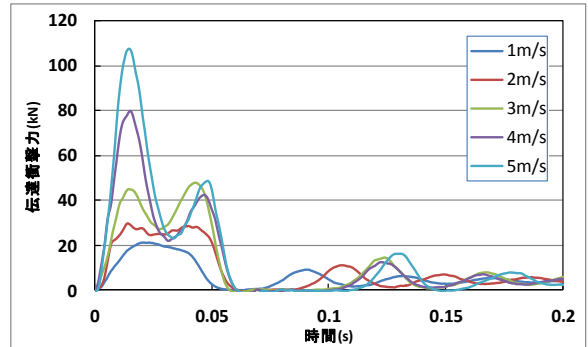


図-3 各衝突速度の伝達衝撃力

2.3 緩衝材を有する固定門型ラーメンの重錘落下実験

前節と同様に緩衝材を設置した固定門型ラーメンに重錘落下実験を行う。図-7に実験波形を示す。重錘衝撃力の波形は単純ばりの時と同様の挙動を示していることが分かる。しかし, 作用時間が短くなっており, これは不静定構造によるはりの剛性の増大によるものと考えられる。はり部分の残留たわみが僅かに確認されることから塑性化したことが分かる。本実験の範囲においては, 固定門形ラーメンの破壊モードは, はり中心および剛節点での塑性化が確認され3点崩壊となった。

3. 実験的照査方法

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実験的照査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, 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, de は弾性変位, dp は等価塑性変位を示している。

3.1 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¹⁾。質量 M の衝突体が, 有効質量 m の構造体へ及ぼす衝突伝達エネルギーを, 衝突エネルギー E_s 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

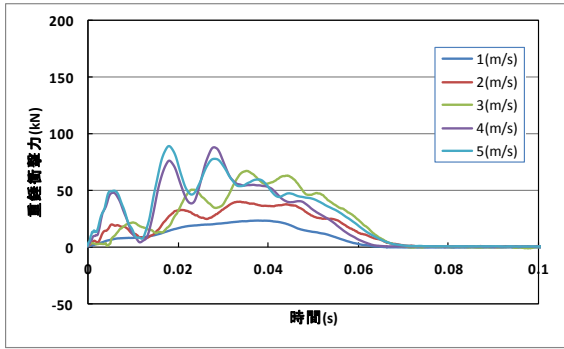


図-4 各衝突速度の H 鋼への重錘衝撃力

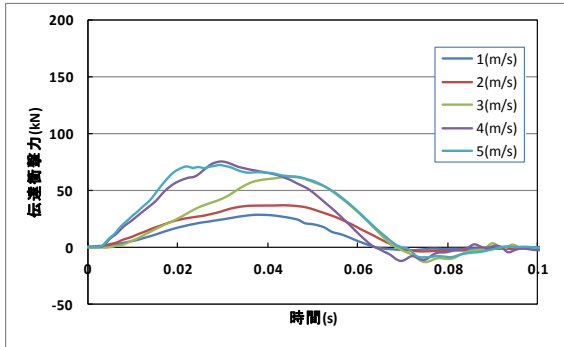


図-5 各衝突速度の H 鋼への伝達衝撃力

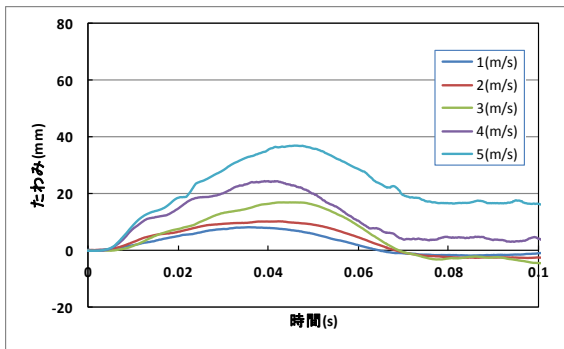


図-6 各衝突速度の H 鋼のたわみ

る。

$$\alpha = 1/(1 + m/M) \quad (1)$$

3.2 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剛基礎上実験により得られる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。エネルギー保存則より構造体の弾性変形エネルギーと塑性変形エネルギーは等しいと仮定し、等価塑性変位 dp_2 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塑性変形を推定するところが異なる。

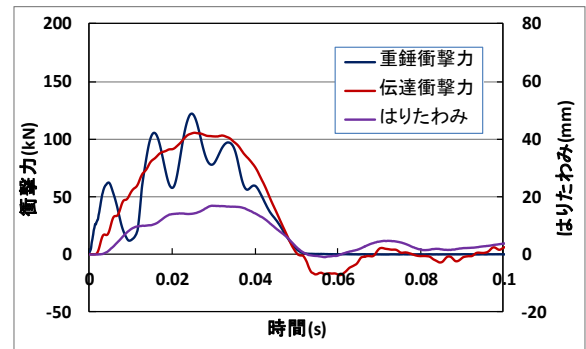


図-7 衝突速度 5m/s での
固定門形ラーメンの衝撃挙動

3.3 伝達衝撃波形を用いた方法(推定方法 3)

推定方法 3 は剛基礎上実験により得た緩衝材下の伝達衝撃波形を使用し、弾性質点系に置換した構造体を式(2)に示す Duhamel 積分により最大弾性変位 de_3 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保存則を満たすように最大塑性変位 dp_3 を推定する。

$$x(t) = \frac{1}{\omega_d} \int_0^t P(\tau) e^{-h\omega_0(t-\tau)} \sin \omega_d(t-\tau) d\tau \quad (2)$$

ここに、 ω_d は単純ばりの角振動数、 P は剛基礎上緩衝材への重錘落下実験の伝達衝撃力である。

4. 照査結果

本章では、H 鋼単純ばりの最大変位について、実験結果と実験の照査での推定結果の比較、考察を行う。図-9 は推定方法 3 での Duhamel 積分の結果を示している。ここで使用した荷重は図-3 に示した緩衝材の重錘落下実験での伝達衝撃力波形である。図-10 に各推定方法の推定結果と実験値の比を示している。

推定方法 1 については衝突速度が増すにつれ、推定値と実験値の比が大きくなっていくことがわかる。弾性構造物の衝撃応答倍率は、衝撃力の作用時間が構造物の固有周期に対して大きくなるにつれ、急激に増加し最大値に達した後緩やかに減少することが分かっている。本推定方法では構造材の固有周期に対しての衝撃力の作用時間が増大するほど応答倍率が線形的に増大していくことため、このような結果になったと考えられる。

推定方法 2 は推定方法 1 に比べ比較的良好的な推定結果をと見ることができる。本実験の範囲内においてはエネルギー保存則が有効に働き、衝突エネルギーは構造体の塑性エネルギーに変換されていることが分かる。

推定方法 3 は推定方法 2 に近い結果となっているが、衝突速度 5m/s のときにおいて実験結果により近い推定を行っている。推定方法 2 に比べ緩衝材下の伝達衝撃力の作用時間の影響を考慮することができるためと考えられる。衝突速度が小さい領域で推定方法 2, 3 の精度が悪

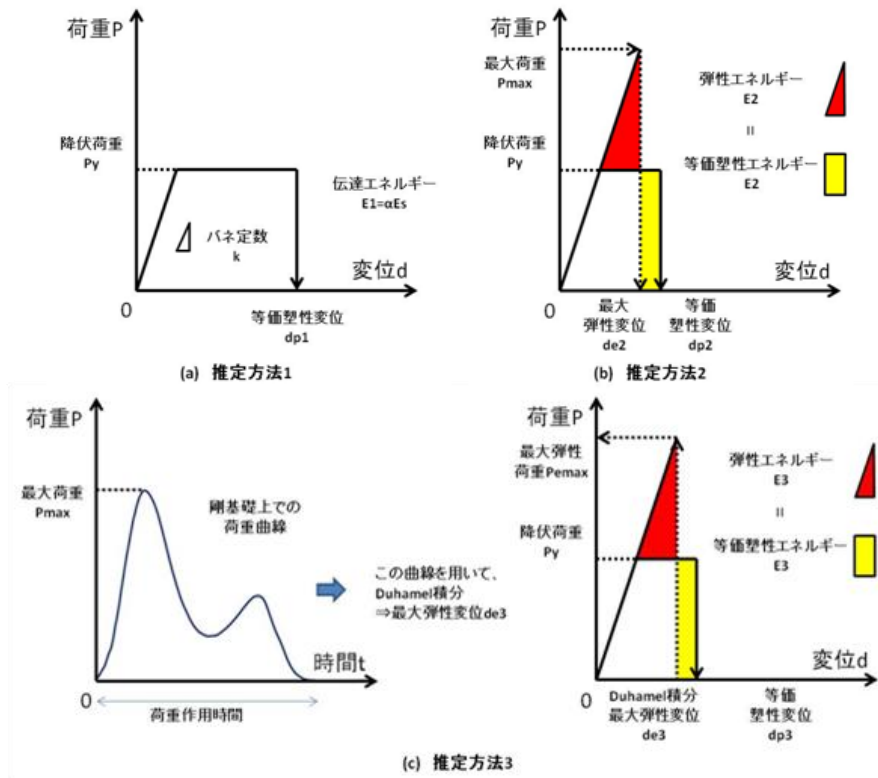


図-8 推定方法概念図

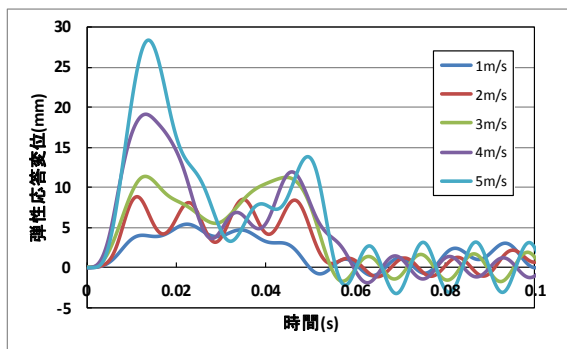


図-9 推定方法3における Duhamel 積分結果

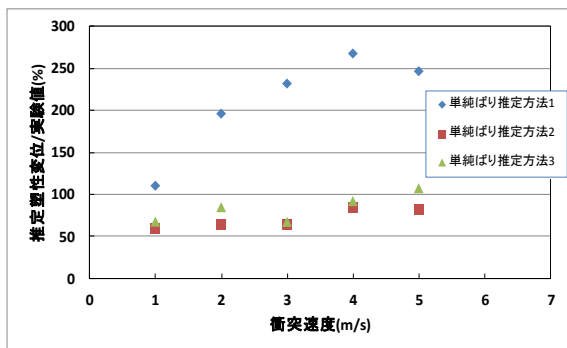


図-10 推定結果

いのは、落下させる際の実験が影響していることや砂への貫入やH鋼の変位を無視しているためと考えられる。

本推定方法により質点系への置換とエネルギー保存則の活用により最大塑性変位の有意な推定が確認できた。固定門形ラーメンにおいても質点系への置換を適切に行

うことで構造全体としての剛性を考慮した推定が可能になると考えられる。

5. まとめ

本研究では、剛基礎上敷砂緩衝材に重錘落下実験、緩衝材を設置したH鋼単純ばりと固定門型ラーメンへの重錘落下実験を行い、これらの結果を用いて構造部材の最大変位照査方法について検討した。得られた結果は以下のようにまとめられる。

- 1) 衝撃作用を受ける構造物の最大塑性変位の推定方法を3つ具体的に示した。
- 2) 運動量保存則を利用した方法(推定方法1)は初期運動量が大きくなるほど精度は低下することが明らかとなった。実験による最大伝達衝撃力を利用した方法(推定方法2)は推定方法1に比べ、推定精度は高い。
- 3) 実験による伝達衝撃波形を利用して Duhamel 積分を行う方法(推定方法3)は今回の実験範囲内では推定精度は良好と見られる。

今後、さらに推定方法について実験的ならびに解析的検討し一般化することにより、防護工の性能設計に役立てたいと考えている。

参考文献

- 1) 園田恵一郎：落石覆工の設計法についての一提案，構造工学論文集 Vol.39A, pp1563-1572, 1973.