

論文 敷砂を設置した大型 RC 梁の重錘落下衝撃挙動における重錘質量の影響に関する数値解析的検討

今野 久志^{*1}・岸 徳光^{*2}・岡田 慎哉^{*3}・三上 浩^{*4}

要旨： 道路防災構造物の性能照査型耐衝撃設計法を確立するための基礎的な研究として、敷砂を設置した大型 RC 梁に対して、落石質量が一定で落下高さが異なる場合や入力落石エネルギーが一定の条件下で重錘質量が異なる場合の耐衝撃挙動に与える影響を数値解析により検討した。その結果、敷砂を設置する場合には、その緩衝効果により質量比が極端に小さい場合を除いて、入力エネルギーが同じであれば最大変位量や残留変位量には大きな違いが現れないことが明らかとなった。

キーワード： 性能照査型耐衝撃設計, 数値解析, 大型 RC 梁, 質量比, 静的曲げ耐力

1. はじめに

落石防護施設等の衝撃作用を受ける鉄筋コンクリート (RC) 製構造物の断面設計は、許容応力度法の下に設計が行われている。しかし、許容応力度法により設計された落石防護構造物では、耐力終局状態に至らしめる入力エネルギーに対して非常に大きな安全余裕度を有していることが明らかになっている¹⁾。昨今、建設コストの縮減が叫ばれている中、また、近年様々な構造物の設計が許容応力度設計法から性能照査型設計法へ移行してきていることから、落石防護構造物においてもより合理的な断面設計を行うことが要求されるようになってきている。落石防護構造物に対して性能照査型耐衝撃設計法を確立するためには、要求される各性能に対して断面設計を可能にしなければならない。しかしながら、構造物の主要な構成要素である梁部材でさえも、合理的な性能規定型の耐衝撃設計法が確立されていないのが現状である²⁾。このような背景により、筆者らは落石防護構造物の性能照査型耐衝撃設計法を確立するための基礎的な研究として、RC 梁部材に着目した研究³⁾を進めてきており、過去に実施した断面寸法、主鉄筋量、純スパン長を変化させた曲げ破壊が卓越する 36 体の RC 梁の単一衝撃荷重載荷実験結果を統一的に整理している。その結果から、残留変位と入力エネルギーにはほぼ線形の関係があり、その直線勾配は静的曲げ耐力の逆数と高い相関関係にあることに着目し、以下のような提案式を示すに至っている⁴⁾。

$$P_u = 0.42 \cdot E / \delta \quad (1)$$

ここで、 P_u (kN) は静的曲げ耐力、 E (kN・m) は入力

エネルギー、 δ (m) は残留変位である。

このような提案式は、実験室レベルでの多様な RC 梁の比較的広範囲な入力エネルギーに対応可能であり、性能照査型耐衝撃設計法の確立に資する設計式と考えられる。ここで、式 (1) を誘導するために使用した室内実験結果は、重錘質量と試験体 RC 梁の質量が比較的近い範囲での実験により得られたものである。実規模の大型 RC 梁まで上記提案式の適用範囲を拡大するためには、RC 梁の重錘落下挙動、特に残留変位に対する重錘質量の影響について検討することが必要である。そこで、筆者らは、近年の目覚ましい数値解析法の発達により RC 構造物等の耐衝撃挙動を精度よくシミュレート可能⁵⁾となっていることに着目し、数値解析的に重錘質量の影響について検討を行った。その結果、質量比 (W/B : 梁の支点間質量 B に対する重錘質量 W の比) に対する残留変位の補正係数として、以下の式を提案している⁶⁾。

$$\beta = 0.288 \ln(W/B) + 0.9605 \quad (2)$$

今後、落石防護構造物、特にロックシェッド等の耐衝撃設計法に上記提案式を拡張検討していくためには、緩衝材を設置した大型 RC 梁に対する耐衝撃挙動についても検討することが必要であるものと考えられる。

このような観点から、本研究では、敷砂緩衝材を設置した小型から大型 RC 梁まで適用可能な性能照査型耐衝撃設計法の確立に資する設計法を提案することを最終目的に、大型 RC 梁に敷砂緩衝材を設置した場合に関する各種数値解析を実施し、重錘質量の違いが大型 RC 梁の耐衝撃挙動に与える影響について検討を行った。なお、本数値解析には、三次元有限要素法に基づいた衝撃応答

*1 土木研究所寒地土木研究所 寒地構造チーム 主任研究員 博(工) (正会員)

*2 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科 教授 工博 (正会員)

*3 土木研究所寒地土木研究所 寒地構造チーム 研究員 修(工) (正会員)

*4 三井住友建設(株) 技術研究所 主席研究員 博(工) (正会員)

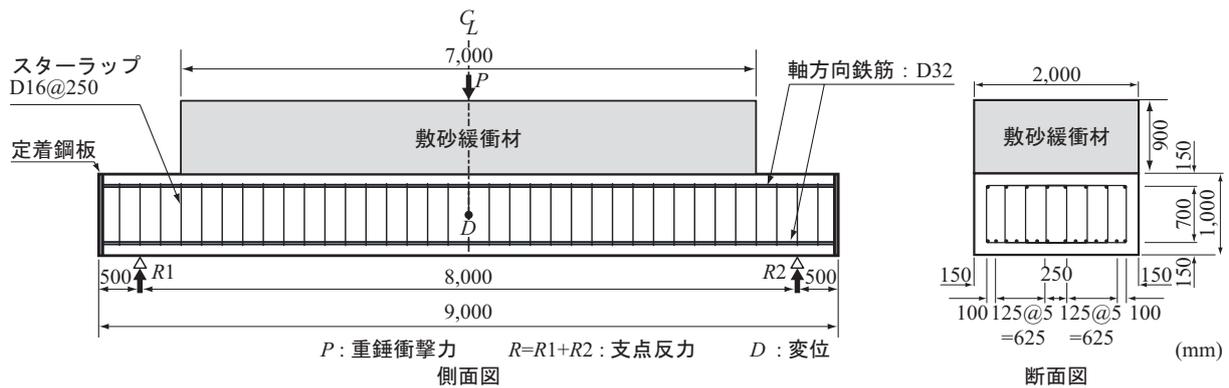


図-1 数値解析用大型 RC 梁の形状寸法および配筋状況

表-1 解析ケース一覧

重錘 質量 W (t)	RC 梁 質量 B (t)	敷砂 質量 S (t)	質量比 $W/(B+S)$	落下高 H (m)	入力 エネルギー E (kJ)
2	40	20	0.03	25	490
5			5, 10, 15	245, 490, 735	
10			20, 25	980, 1,225	
20			5	490	
20			0.33	2.5	490

解析用汎用コード LS-DYNA (ver.970)⁷⁾ を用いている。

2. 数値解析概要

2.1 大型 RC 梁の数値解析断面および解析ケース

図-1 には、本数値解析で検討した敷砂緩衝材を設置した大型 RC 梁の形状寸法および配筋状況を示している。数値解析用大型 RC 梁の形状寸法は、過去に実施した大型 RC 梁の衝撃載荷実験および数値解析に使用した 1 断面の梁幅を敷砂緩衝材の設置を考慮して 2 倍の長さとしたものである。すなわち、梁高 1 m、梁幅 2 m の矩形断面で純スパン長は 8 m としている。敷砂緩衝材は、幅を 2 m、梁の軸方向に 7 m、敷砂厚を実構造物と同様に 90 cm としている。コンクリート標準示方書に基づいて算定した静的曲げ耐力は $P_{usc} = 1,811$ kN、静的せん断耐力は $V_{usc} = 5,574$ kN、せん断余裕度 α_{sc} ($= V_{usc} / P_{usc}$) は、 $\alpha_{sc} = 3.08 > 1.0$ であり、設計的には静載荷時に曲げ破壊で終局に至る断面設計となっている。

表-1 には、解析ケースの一覧を示している。表には、重錘質量 W 、支点間の梁の質量 B 、敷砂緩衝材の質量 S 、質量比 $W/(B+S)$ 、落下高さ H 、入力エネルギー E を示している。数値解析は、重錘質量を $W = 5$ t とし、落下高さを $H = 5$ m から 5 m ピッチで 25 m まで増加させた 5 ケースを基本として、さらに質量比の影響を検討するために入力エネルギーを $E = 490$ kJ に固定して、重錘質量を $W = 2, 5, 10, 20$ t に変化させた 4 ケースについて実施した。なお、本研究では重錘質量

の影響についてのみ検討を行うことから、重錘の形状寸法は質量によらず全て同一とした。すなわち、筆者らが衝撃載荷実験において使用している質量 5 t の重錘 (直径 1 m、高さ 97 cm、底部が半径 80 cm の球状) と同一の形状寸法であり、密度を調整することにより所定の重錘質量としている。

2.2 数値解析モデルおよび解析条件

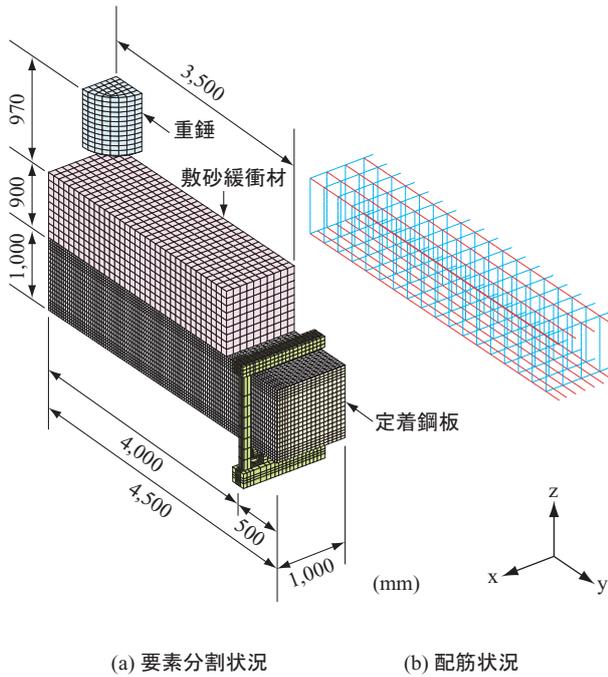
図-2 には、本数値解析で用いた大型 RC 梁の要素分割状況および配筋状況を示している。

解析モデルは、構造および荷重条件の対称性を考慮してスパン方向および断面幅方向にそれぞれ 2 等分した 1/4 モデルとし、面对称を設定している。境界条件として、重錘-敷砂間、敷砂-コンクリート間、支点治具-コンクリート間には面と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義している。敷砂緩衝材の外縁部は、その面に対する法線方向の変位のみを拘束している。また、コンクリート-鉄筋要素間には完全付着を仮定している。各要素において、コンクリート、敷砂、重錘および支点治具には 8 節点固体要素、軸方向鉄筋およびスターラップには 2 節点梁要素を用いてモデル化している。各要素の積分点数に関しては、固体要素、梁要素の場合でそれぞれ 1 点積分、4 点積分としている。また、減衰定数は質量比例分のみを考慮するものとし、鉛直方向最低次固有振動数 (19.5 Hz) に対して 0.5 % と設定している。なお、本数値解析では自重を考慮している。これは、自重を考慮しないことによるリバウンド時の敷砂緩衝材の浮き上がりを防止することや、徐荷後においても実情に即して敷砂の質量を考慮した RC 梁の動的応答特性を評価するためである。

2.3 材料物性モデル

図-3 には、本数値解析で用いたコンクリート、鉄筋および敷砂緩衝材の相当応力-相当ひずみ関係を、表-2 には物性値一覧を示している。

図-3(a) には、コンクリートに関する相当応力-相



(a) 要素分割状況 (b) 配筋状況

図-2 要素分割状況および配筋状況

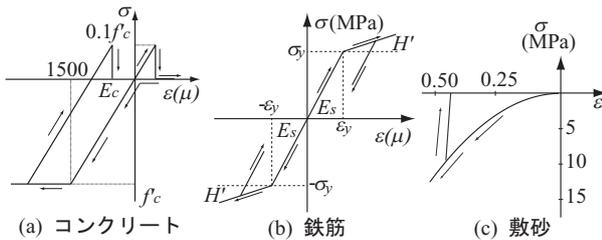


図-3 材料構成則モデル

表-2 物性値一覧

材料	密度 ρ (ton/m ³)	強度 (MPa)	弾性係数 E (GPa)	ポアソン比 ν
コンクリート	2.35	30	20	0.167
軸方向鉄筋	7.85	400	206	0.3
スターラップ		390		
敷砂緩衝材	1.60	-	10 (除荷)	0.06
重錘, 支点治具 定着鋼板	7.85	-	206	0.3

当ひずみ関係を示している。圧縮側に関しては、相当ひずみが 1,500 μ に達した状態でコンクリートが降伏するものと仮定し、完全弾塑性体のバイリニア型にモデル化した。引張強度は圧縮強度の 1/10 を仮定している。降伏の判定には Drucker - Prager の降伏条件式を採用している。

図-3(b)には、鉄筋に関する相当応力-相当ひずみ関係を示している。構成則には、降伏後の塑性硬化係数 H' を考慮した等方弾塑性体モデルを採用している。降伏の判定は、von Mises の降伏条件に従うこととした。塑性

硬化係数 H' は、弾性係数 E_s の 1% を仮定している。

図-3(c)には、敷砂の緩衝特性を評価するための応力-ひずみ関係を示している。本研究で適用した敷砂の材料構成則モデルは、筆者らが過去に実施した敷砂緩衝材に対する衝撃载荷実験結果 ($W = 3$ t, $H = 5 \sim 30$ m) と数値解析結果の比較検討により適用の妥当性を検証したものであり⁸⁾、次式のように示される。

$$\sigma_{sand} = 50 \varepsilon_{sand}^2 \quad (3)$$

ここで、 σ_{sand} は相当応力 (MPa)、 ε_{sand} は体積ひずみである。荷重の除荷勾配は $E_{ul} = 10$ GPa と仮定した。

重錘、支点治具および定着鋼板に関しては、類似の実験においても塑性変形が生じていないことを確認していることより、弾性体と仮定した。また、密度、弾性係数およびポアソン比は、表-2 に示されている値を採用している。

3. 数値解析結果

3.1 各種応答波形

図-4には、入力エネルギーを $E = 490$ kJ に統一し、重錘質量を $W = 2, 5, 10, 20$ t と変化した場合の各種応答波形を最大値と共に示している。

ここで、重錘衝撃力は重錘が敷砂緩衝材に衝突することによって発生する衝撃力であり、伝達衝撃力は敷砂緩衝材を介して RC 梁上面に直接作用する衝撃力である。本数値解析では、重錘衝撃力、伝達衝撃力および支点反力は、それぞれの接触面に作用する合力を用いて評価することとしている。

重錘衝撃力波形は、何れの解析ケースにおいても振幅の大きい三角形の半波とその後に続く振幅の小さい波形に高周波成分の波形が合成された性状を示している。重錘質量が 2 t の場合には、波形の立ち上がりが鋭くピーク値発生までの時間が短い三角形の半波を示しており、波形の継続時間は 90 ms 程度である。重錘質量の増加とともに波形の立ち上がりは緩やかとなり、最大重錘衝撃力が減少し、波形の継続時間が増加している。

伝達衝撃力波形は、何れの解析ケースにおいても重錘衝突時より若干遅れて励起している。これは重錘が敷砂に衝突した後の衝撃力の波動伝播時間に起因するものと考えられる。重錘衝突初期の伝達衝撃力波形の分布性状は、落下高さの低い場合には 2 つのピークを有する主波動と、それに続く振幅の小さい半波波形より構成されている。また、波形の継続時間は重錘衝撃力の継続時間とほぼ対応しており、また重錘質量の増加とともに主波動に続く正弦波の振幅も大きくなる傾向を示している。

支点反力波形についても、伝達衝撃力波形と同様に重錘衝突時よりも若干遅れて励起している。支点反力波形

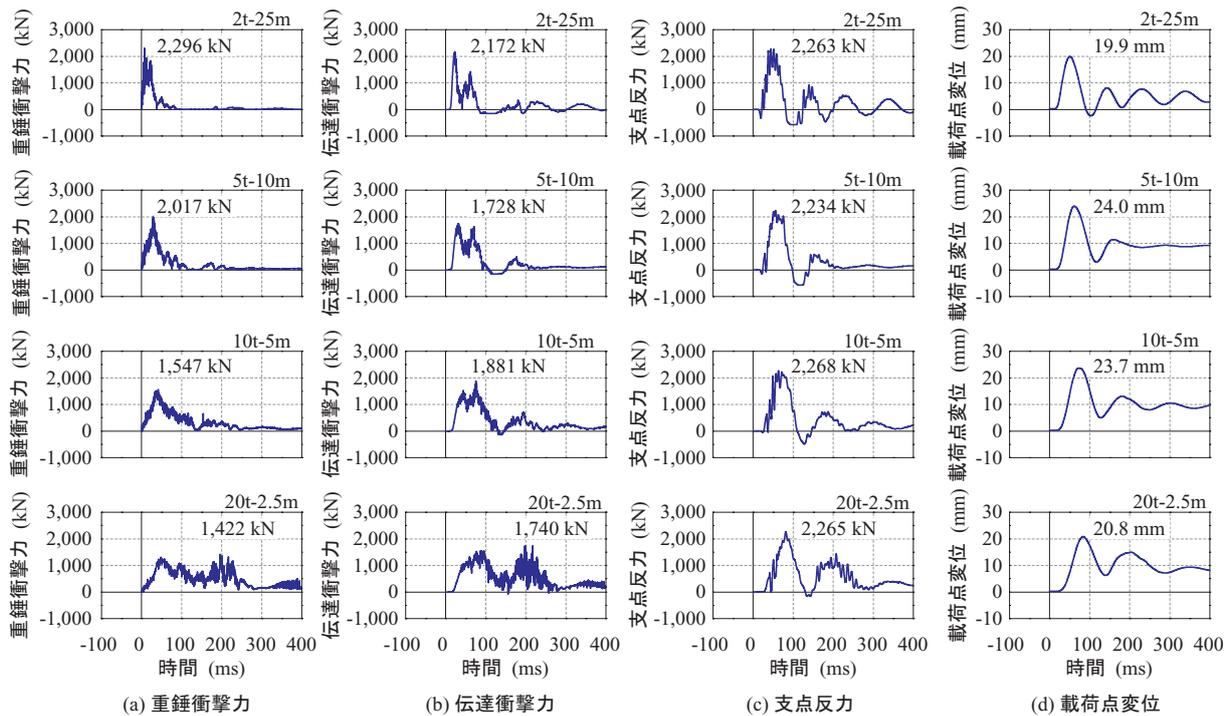


図-4 各種応答波形 ($E = 490 \text{ kJ}$)

は、三角形の波動に高周波成分が合成された波形性状を示しており、周期は重錘質量の増加とともに長くなる傾向が示されている。支点反力の最大値については重錘質量によらず、いずれの解析ケースについても 2,300 kN 程度の大きさとなっている。

載荷点変位波形は、支点反力波形と同様に重錘衝突時より若干遅れて励起しており、いずれも正弦半波状の主波動とそれに続く減衰振動波形から構成されている。また、重錘質量の増加に伴い、変位波形が励起されるまでの継続時間やピーク値発生時間は延びる傾向にあり、同時に主波動の周期も長くなる傾向にある。

3.2 敷砂緩衝材への重錘貫入量

図-5 には、入力エネルギーを $E = 490 \text{ kJ}$ に固定し、重錘質量を $W = 2, 5, 10, 20 \text{ t}$ と変化させた場合における敷砂緩衝材への重錘貫入量の経時変化を示している。敷砂への最大重錘貫入量は、重錘質量の増加とともに大きくなる傾向を示し、重錘質量が 2t の場合には 56 cm、20t の場合には 84 cm となっている。

一方、重錘の貫入速度については、重錘質量が小さく落下高さの大きい場合が、重錘質量が大きく落下高さの小さい場合に比較して速くなっていることが分かる。また、重錘質量の増加に対応して最大貫入量に達するまでの経過時間が長くなっている。この重錘貫入速度や最大貫入量の違いが重錘衝撃力の最大値や波形の立ち上がり勾配、波形継続時間等の違いに対応しているものと推察される。

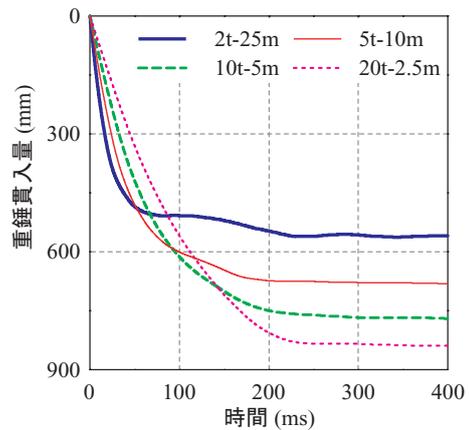


図-5 重錘貫入量の経時変化

3.3 重錘衝撃力と伝達衝撃力

表-3 には、本数値解析結果による重錘衝撃力 P 、伝達衝撃力 P_t 、重錘衝撃力 P に対する伝達衝撃力 P_t の比およびラーメの定数 λ の一覧を示している。ここで、ラーメの定数 λ は、ロックシェッドの設計参考図書である落石対策便覧⁹⁾における衝撃力の算出式より逆算的に求めたものである。

衝撃力の算出式は、以下のとおりである。

$$P = 2.108(m \cdot g)^{2/3} \cdot \lambda^{2/5} \cdot H^{3/5} \cdot \alpha \quad (4)$$

ここに、 P : 落石の衝撃力 (kN)
 m : 落石の質量 (t)
 g : 重力加速度 (m/s^2)

表-3 数値解析結果一覧

重錘質量 W (t)	落下高 H (m)	重錘衝撃力 P (kN)	伝達衝撃力 P_t (kN)	P_t / P	ラーメの定数 λ (kN/m ²)
2	25	2,296	2,172	0.95	1,927
5	5	1,207	1,146	0.95	937
	10	2,017	1,728	0.86	1,196
	15	2,987	2,297	0.77	1,738
	20	3,031	2,787	0.92	1,171
	25	3,372	3,421	1.01	1,094
10	5	1,547	1,881	1.22	549
20	2.5	1,422	1,740	1.22	396

λ : ラーメの定数 (kN/m²)

H : 落石の落下高 (m)

α : 砂層厚と落石直径の比から決定される
割り増し係数

表より、重錘衝撃力 P に対する伝達衝撃力 P_t の比を見ると、重錘質量を $W = 5$ t に固定し落下高さを増加させた解析ケースでは、 P_t / P の値が 0.8 ~ 1.0 程度の値を示しており、重錘衝撃力と伝達衝撃力はほぼ同程度の値となっている。重錘質量が 10 t および 20 t の場合には、 P_t / P は 1.2 となり、伝達衝撃力が重錘衝撃力と比較して 20 % 程度大きな値となっている。過去の研究事例¹⁰⁾においても、両者の大きさがほぼ同程度であるとする報告や伝達衝撃力が大きくなるとする報告があり、本解析結果もそれらの実験結果と同様の傾向を示す結果となっている。

ラーメの定数 λ について言及すると、重錘質量を $W = 5$ t に固定し落下高さを増加させた解析ケースでは、落下高さ $H = 15$ m の場合を除き、ラーメの定数 λ は 1,000 ~ 1,200 kN/m² 程度の値を示しており、過去に実施された敷砂緩衝材に関する実験結果と同程度の値となっている。なお、落下高さ $H = 15$ m の場合において、ラーメの定数が大きく評価されたのは、図-4 の重錘衝撃力波形に示されるように高周波成分の影響によるものと推察される。一方、重錘質量 $W = 10$ t および 20 t の解析ケースでは、 λ が 500 kN/m² 程度と他の解析ケースと比較して 1/2 程度の値を示し、敷砂緩衝材は柔らかめに評価されていることが分かる。これは重錘の敷砂への貫入速度や貫入量の違いによるものと考えられる。

3.4 最大変位および残留変位と入力エネルギーの関係

図-6(a) には、最大変位と入力エネルギーの関係を示している。最大変位は、入力エネルギーの増加に対応してほぼ線形に増加する傾向を示している。また、入力エネルギー $E = 490$ kJ において、重錘質量を変化させた場合においても最大変位の大きさに大差はなく、ほぼ同程度の値を示していることが分かる。

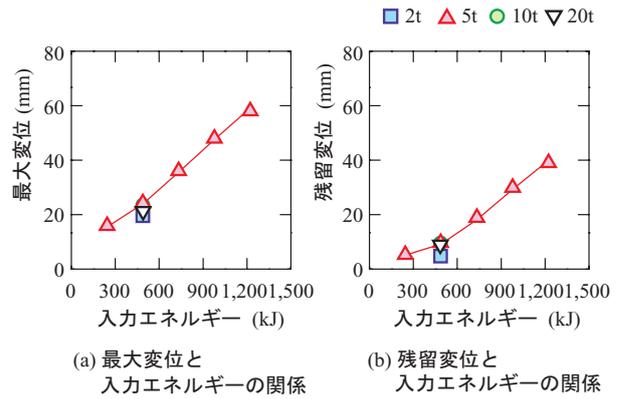


図-6 最大変位および残留変位と入力エネルギーの関係

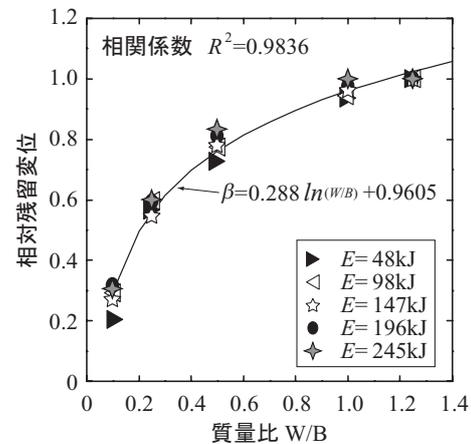


図-7 相対残留変位と質量比の関係

図-6(b) には、残留変位と入力エネルギーの関係を示している。最大変位に対する残留変位の割合は、入力エネルギーの増加に対応して大きくなっており、 $E = 245$ kJ で 33 %、 $E = 1,225$ kJ で 67 % となっている。これは、入力エネルギーの増加とともに RC 梁の塑性化が進行するためと考えられる。また、入力エネルギー $E = 490$ kJ において、重錘質量を変化させた場合には、重錘質量が $W = 2$ t において残留変位が他の解析ケースに対して 50 % 程度と小さいものの、それ以外の解析ケースでは残留変位の大きさに大差はなくほぼ同程度の値を示していることが分かる。

4. 重錘質量の影響に関する検討

図-7 には、前述の式 (2) の誘導に使用した敷砂緩衝材を設置しない場合における相対残留変位と質量比の関係を示している⁶⁾。ここで、相対残留変位とは質量比が 1.25 の場合の残留変位を 1.0 としたときの各解析ケースにおける残留変位を示したものである。図より、敷砂緩衝材を設置しない場合の大型 RC 梁において、残留変位に対する質量比の影響が非常に大きく、質量比によ

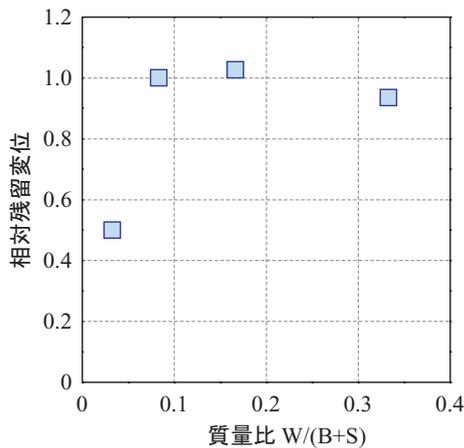


図-8 相対残留変位と質量比の関係

る残留変位の補正係数は非常に有用なものであることが分かる。

一方、図-8には、入力エネルギーを $E = 490 \text{ kJ}$ に固定し重錘質量を変化させた解析ケースにおいて、重錘質量 $W = 5 \text{ t}$ 、落下高さ $H = 10 \text{ m}$ の解析ケース (質量比 0.08) における残留変位を 1.0 とした場合の相対残留変位と質量比の関係を示している。図より、相対残留変位は質量比との間に明確な相関関係が見られず、質量比が 0.03 と非常に小さい場合を除き、質量比に関わらずほぼ同程度の残留変位を示すことが分かる。これは、敷砂緩衝材を設置することによって、衝撃力が強度的、時間的に緩和されることや、系の固有振動数が低減することの効果によるものと推察される。なお、質量比が 0.03 程度と非常に小さい場合には、質量比を大きく設定することにより安全側で設計が可能になる。

5. まとめ

敷砂緩衝材を設置した大型 RC 梁の重錘落下衝撃挙動における重錘質量の影響について検討することを目的に、90 cm 厚の敷砂緩衝材を設置した桁高 1 m、梁幅 2 m、純スパン長 8 m の大型 RC 梁に対して、重錘形状を同一として重錘質量や落下高さを変化させた場合の数値解析を実施した。本研究により得られた結論を整理すると、以下のとおりである。

- (1) 実験結果との比較検討により妥当性が検証されている解析手法および解析モデルを用いて、数値解析によるパラメータスタディを実施し、敷砂緩衝材を設置した大型 RC 梁の耐衝撃挙動や重錘質量の影響を把握することができた。
- (2) 敷砂緩衝材を設置する場合には、重錘質量 W と梁質量 B および敷砂質量 S との比である質量比 $W/(B+S)$ は、その値が 0.03 程度と非常に小さい場

合を除き、重錘衝撃を受ける大型 RC 梁の残留変位に与える影響は小さく、入力エネルギーが同一であれば質量比に関わらずほぼ同程度の残留変位を示すことが明らかになった。

今後は、重錘形状や敷砂厚の影響に関する数値解析的検討、入力エネルギーが過度に大きい場合における敷砂材の構成則モデルの適用性に関する検討を行い、敷砂緩衝材を設置した大型 RC 梁の性能照査型耐衝撃設計法に資する設計式の確立に向けた検討を進めていきたいと考えている。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、室蘭工業大学博士前期課程の可知典久君には数値解析を実施して頂き、多大なるご支援を頂きました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 熊谷守晃：ルランベツ覆道における落石災害に関する報告，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.286-290，1993.6
- 2) 土木学会：構造工学シリーズ 15 衝撃実験・解析の基礎と応用，2004.1
- 3) 岸 徳光，三上 浩，松岡健一，安藤智啓：静載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の耐衝撃設計法に関する一提案，土木学会論文集，No.647/I-51，pp.177-190，2000.4
- 4) 岸 徳光，三上 浩：衝撃荷重載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の性能照査型耐衝撃設計法に関する一提案，構造工学論文集，Vol.53A，pp.1251-1260，2007.3
- 5) 岸 徳光，三上 浩，松岡健一，安藤智啓：静載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の弾塑性衝撃応答解析，土木学会論文集，No.619/I-47，pp.215-233，1999.4
- 6) 今野 久志，三上 浩，岡田 慎哉，岸 徳光：大型 RC 梁の重錘落下挙動における重錘質量の影響に関する数値解析的検討，土木学会北海道支部論文報告集，第 64 号，2008.1
- 7) John O.Hallquist：LS-DYNA User's Manual，Livermore Software Technology Corporation,2000.6
- 8) 岸 徳光，岡田慎哉，今野久志，池田憲二：敷砂材の緩衝特性評価のための数値解析モデルに関する一考察，構造工学論文集，Vol.49A，pp.1323-1332，2003.3
- 9) 日本道路協会：落石対策便覧，2000.6
- 10) 構造工学シリーズ 8 ロックシェットの耐衝撃設計，1998.11