

敷砂緩衝材を設置した大型 RC 梁の性能曲線に関する数値解析的検討

Numerical analysis on performance curve of large scale RC girders with sand cushion

室蘭工業大学	フェロー	岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
寒地土木研究所	正会員	今野 久志 (Hisashi Konno)
寒地土木研究所	正会員	岡田 慎哉 (Shin-ya Okada)
室蘭工業大学大学院	学生会員	BHATTI Abdul Qadir
室蘭工業大学大学院	○学生会員	可知 典久 (Norihisa Kachi)

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。昨今、建設コストの縮減が叫ばれている中、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。このためには、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。

以上の背景より、筆者らは RC 部材の性能照査型耐衝撃設計法を確立するための研究¹⁾を進め、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 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た。その結果、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。

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

ここで、静的曲げ耐力を P_u (kN)、入力エネルギーを E (kN・m)、残留変位を δ (m) としている。上記提案式は、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

ゾーンに対応可能であり、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。今後は、より大きな実大規模の RC 梁への適用性を検討し、さらなる適用範囲の拡大に努めることが肝要であると考えられる。実大規模 RC 梁まで提案式の適用範囲を拡大するためには、小型 RC 梁における検討手法と同様に静的曲げ耐力の異なる各種大型 RC 梁に対する衝撃荷重載荷実験を実施する方法が考えられる。しかしながら、大型 RC 梁の衝撃荷重載荷実験を数多く実施するためには莫大な実験費用が必要となり現実的ではない。一方、近年数値解析技術が向上し RC 構造物等の耐衝撃挙動を精度よくシミュレート可能²⁾となっている。

本研究では、実構造物を想定し、敷砂緩衝材を設置した実大規模の RC 梁までが適用可能な性能照査型耐衝撃設計法の確立に資することを目的に、静的曲げ耐力の異なる全 5 種類の大型 RC 梁に敷砂緩衝材を設置した場合に関する数値解析を実施し、既往の研究と同様の検討手法が本数値解析においても適用可能であるか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解析用汎用コード LS-DYNA(ver.970)³⁾を用いている。

2. 数値解析概要

2.1 試験体概要および解析ケース

図-1には、本数値解析で検討した敷砂緩衝材を設置した RC 梁の形状寸法および配筋状況を示している。解析

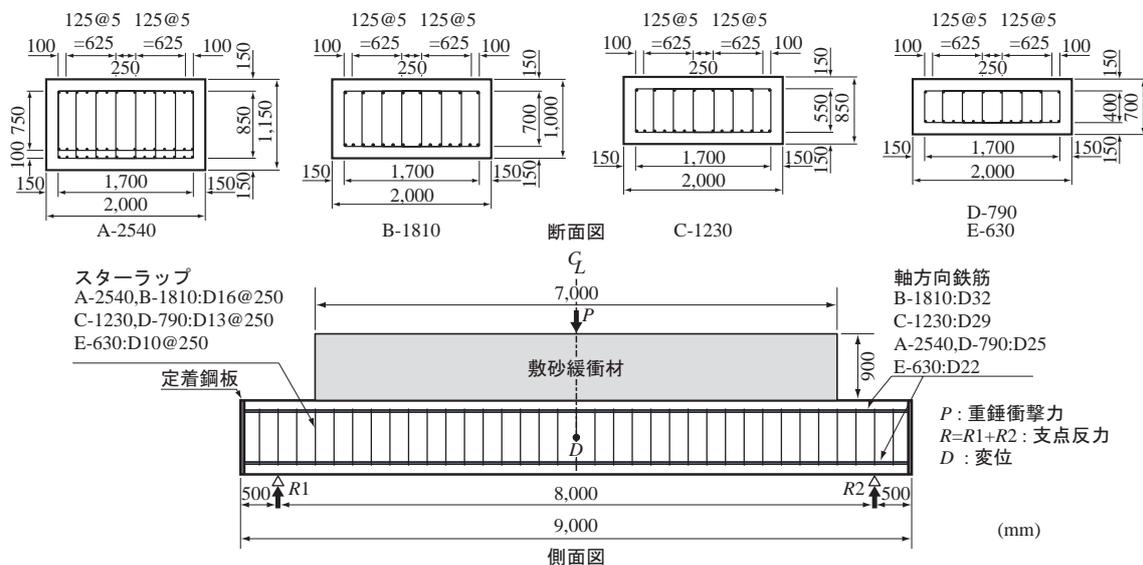


図-1 形状寸法および配筋状況

表-1 解析ケース一覧

解析ケース名	主鉄筋比 Pt (%)	静的曲げ耐力 Pusc (kN)	静的せん断耐力 Vusc (kN)	せん断余裕度 α	重錘質量 W (ton)	落下高さ H (m)	入力エネルギー E (kJ)
A-2540	0.71	2,537	6,527	2.57	5	10, 15, 20, 25	490, 735, 980, 1225
B-1810	0.65	1,811	5,574	3.08			
C-1230	0.64	1,231	3,566	2.90			
D-790	0.64	794	2,884	3.63		4, 6, 8, 10	196, 294, 392, 490
E-630	0.49	631	2,105	3.34		3, 4, 5, 6	147, 196, 245, 294

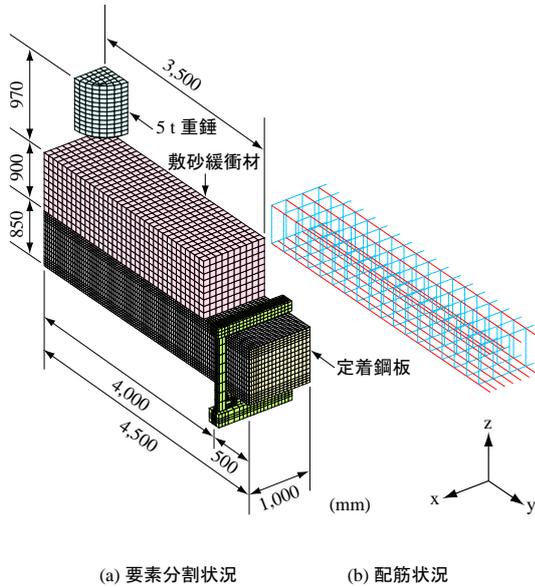


図-2 要素分割状況および配筋状況 (C-1230)

ケース名は断面の種類、ハイフンの後ろに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の概略値を表示している。RC梁の形状寸法は梁幅を2,000 mm、純スパン長8,000 mmを固定とし、静的曲げ耐力が異なるように梁高および軸方向鉄筋量を調整し、断面設計を行っている。コンクリートのかぶり厚は150 mmとし、スターラップの配置間隔は、梁の有効高さの1/2以下となるように250 mm間隔で配置した。敷砂緩衝材は幅を2,000 mm、梁の軸方向に7,000 mm、敷砂厚を実構造物と同様に900 mmとしている。また、重錘は全ての解析ケースにおいて5 ton重錘を使用している。

表-1には、解析ケースの一覧を示している。表には、主鉄筋比 P_t 、静的曲げ耐力 P_{usc} 、静的せん断耐力 V_{usc} 、せん断余裕度 $\alpha (=V_{usc}/P_{usc})$ 、重錘質量 W 、落下高さ H 、入力エネルギー E を示している。なお、静的曲げ耐力 P_{usc} および静的せん断耐力 V_{usc} は前述の示方書に基づいて算定している。表より、せん断余裕度はいずれも $\alpha > 1.0$ であり、設計的には静載荷時に曲げ破壊型で終局に至ることが想定される。

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

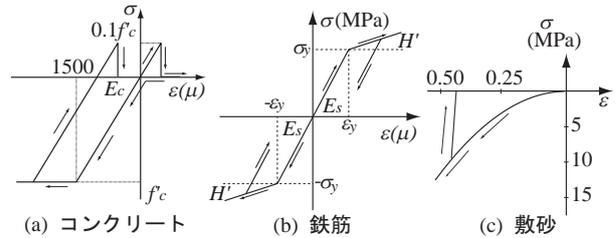


図-3 各材料の応力-ひずみ関係

表-2 コンクリートおよび鉄筋の物性値一覧

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

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-鉄筋要素間は、完全付着を仮定している。

各要素に関しては、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。積分点は固体要素については1点積分、梁要素については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。

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応力-ひずみ関係を示している。

図-3(a)には、コンクリートに関する応力-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と仮定している。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、鉄筋に関する応力-ひずみ関係を示している。鉄筋要素に用いた物性モデルは、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である。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%と仮定している。

図-3(c)図には、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モデ

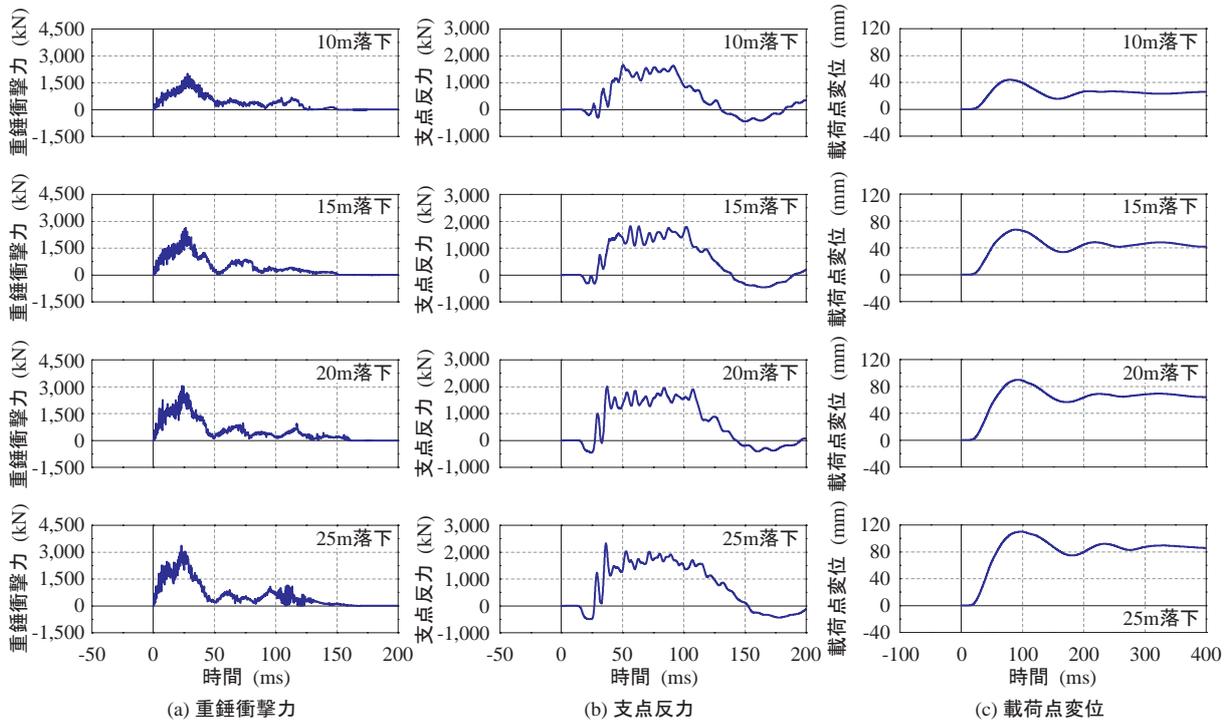


図-4 C-1230 における各種応答波形分布

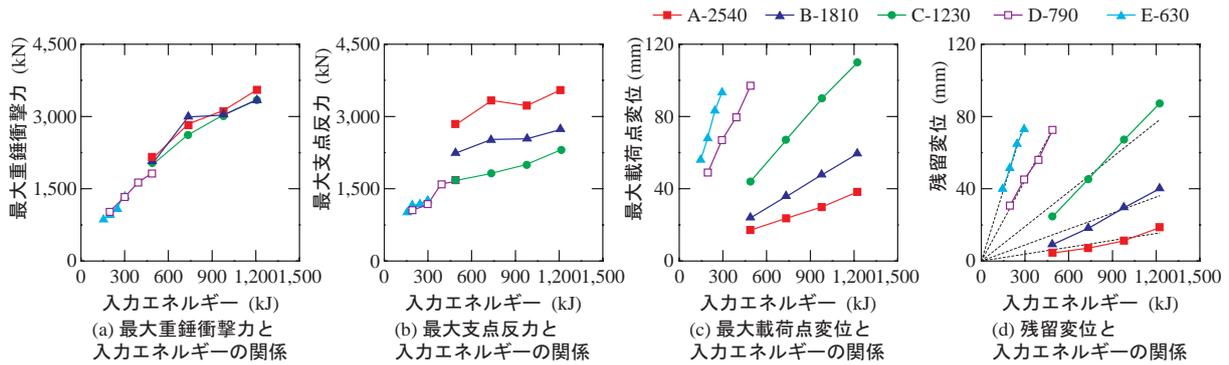


図-5 各種応答値と入力エネルギーの関係

ルの材料構成則モデルは、次式のように示される。

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

ここで、 σ_{sand} は応力 (MPa)、 ε_{sand} は体積ひずみである。荷重の除荷勾配は $E_{ul} = 10 \text{ GPa}$ と仮定している。

重錘、支点治具および定着鋼板に関する全要素に関しては、弾性体モデルを適用している。また、密度、強度、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、C-1230 における落下高さ $H = 10, 15, 20, 25 \text{ m}$ の各種応答波形分布を示している。

重錘衝撃力波形は何れの解析ケースにおいても 150 ~ 170 ms 程度の波動継続時間を有し、落下高さに対応して波動継続時間と重錘衝撃力が増加する傾向にあることが分かる。

支点反力波形は、何れの解析ケースにおいても重錘衝突時より 20 ms 程度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。また、落下高さに対応して波動継続時間と支点反力が増加する傾向にあることが分かる。

载荷点変位波形は、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いる。また、落下高さの増加に伴い波形の初期勾配、最大変位および残留変位が増加していることが分かる。

以上の波形性状は、他の断面形状においても同様の解析結果が確認できた。

3.2 各種応答値と入力エネルギーの関係

(1) 最大重錘衝撃力と入力エネルギーの関係

図-5(a) には、全 RC 梁の最大重錘衝撃力と入力エネルギーの関係を示している。最大重錘衝撃力は何れの試験体においても入力エネルギーが大きくなるほど増加する傾向が示されている。同一の入力エネルギーに対しては静的曲げ耐力の大きい方が最大重錘衝撃力も大きく示されている。

(2) 最大支点反力と入力エネルギーの関係

図-5(b) には、全 RC 梁の最大支点反力と入力エネルギーの関係を示している。最大支点反力は静的曲げ耐力が大きい RC 梁ほど増加する傾向が示されている。しかしな

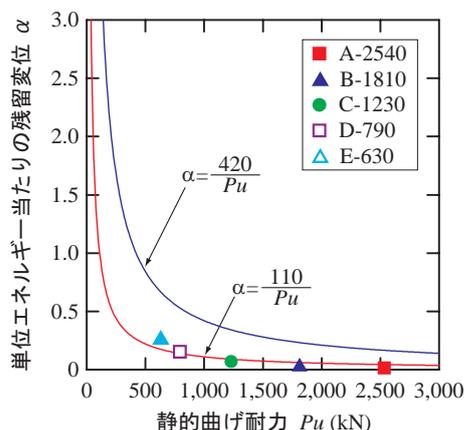


図-6 RC梁の静的曲げ耐力と α の関係

がら、各RC梁の最大支点反力と入力エネルギーとの関係に、明らかな相関性は見られない。

(3) 最大載荷点変位と入力エネルギーの関係

図-5(c)には、全RC梁の最大載荷点変位と入力エネルギーの関係を示している。各RC梁ともに入力エネルギーが増加すると最大載荷点変位はほぼ線形に増加する傾向を示している。また、同一の入力エネルギーに対しては静的曲げ耐力の大きいRC梁ほど最大載荷点変位が小さくなる傾向が示されている。以上より、最大載荷点変位と入力エネルギーの関係には、高い相関が確認できる。

(4) 残留変位と入力エネルギーの関係

図-5(d)には、全RC梁の残留変位と入力エネルギーの関係を示している。残留変位と入力エネルギーの関係は、最大載荷点変位と入力エネルギーの関係と同様の傾向を示している。従って、入力エネルギーと残留変位の間には極めて高い相関があり、RC梁の種類や入力エネルギーの大小に関わらず、極めて普遍性の高い関係であることが数値解析結果から明らかとなった。

なお、図-5(d)の図中に示した直線は、各RC梁の残留変位と入力エネルギーの関係を直線近似した結果である。以後、この近似直線の直線勾配を α とする。

4. 大型RC梁の設計式に関する検討

既往の研究¹⁾より、残留変位 δ は近似直線の直線勾配 α と入力エネルギー E を用いると式(3)で与えられる。

$$\delta = \alpha \cdot E \tag{3}$$

ここで、 δ :残留変位 (mm)、 E :入力エネルギー (kN・m)であり、勾配 α は単位エネルギー当たりの残留変位に関与する N^{-1} の単位を有する指標となっている。また、直線勾配 α は全般的に静的曲げ耐力が大きな試験体ほど小さい傾向にあることが実験結果から示唆される。静的曲げ耐力と残留変位-入力エネルギー関係のなす直線勾配 α の関係から、その性能曲線を求めると直線勾配 α は静的曲げ耐力 P_u (kN)の逆数に比例し、既往の研究より以下の式で示される。

$$\alpha = 420/P_u \tag{4}$$

図-6は、大型RC梁の数値解析結果より求めた図-5(d)の近似直線の直線勾配 α を示したものである。図より、既往の性能曲線では大型RC梁の α と整合していないことが

わかる。これは既往の研究では小型RC梁を対象としているのに対して、本数値解析では大型RC梁を対象としていること、および敷砂緩衝材による緩衝性能が影響していることにより、既往の性能曲線と整合しなかったものと推察される。しかしながら、既往の性能曲線と同様の相関が解析結果から確認できる。

そこで、本数値解析結果における性能曲線を求めると直線勾配 α は静的曲げ耐力 P_u (kN)の逆数に比例し、以下の式で表すことができる。

$$\alpha = 110/P_u \tag{5}$$

式(3)と式(5)を用いて整理すると、式(6)が得られる。

$$P_u = 0.11 \cdot E/\delta \tag{6}$$

ここで、 P_u :静的曲げ耐力 (kN)、 E :入力エネルギー (kN・m)、 δ :残留変位 (m)である。

以上より、RC梁の大きさ、敷砂緩衝材の有無による影響が推察されるものの、既往の研究における検討手法が本数値解析に対しても適用可能であることが明らかとなった。

5. まとめ

衝撃載荷時に曲げ破壊が卓越する大型RC梁の性能照査型耐衝撃設計法に資することを目的に、実構造物を想定し、敷砂緩衝材を設置した静的曲げ耐力の異なる5断面の大型RC梁に対して、全20ケースの数値解析を実施し、既往の研究における検討手法の適用性を検討した。本研究により得られた結論を以下に要約する。

- 1) 全解析ケースで残留変位と入力エネルギーは線形関係にあり、高い相関が認められた。また、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が確認できた。
- 2) 大型RC梁を対象としていること、および敷砂緩衝材の影響が推察され、解析結果は既往の性能曲線と整合しないものの、同様の相関が確認できる。
- 3) 上記関係より、本数値解析結果における性能曲線を求めると、静的曲げ耐力を P_u (kN)、入力エネルギーを E (kN・m)、残留変位を δ (m)とすると、以下のように示される。

$$P_u = 0.11 \cdot E/\delta \tag{7}$$

- 4) 以上より、既往の研究と同様の検討手法は大型RC梁の数値解析に対しても適用可能であるものと判断できる。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) John O.Hallquist: LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2000.6.