

RC 梁の繰り返し重錘落下衝撃挙動に関する数値解析的検討

Numerical analysis of RC beams under consecutive falling-weight impact loading

室蘭工業大学
寒地土木研究所
室蘭工業大学大学院

フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
正会員 今野 久志 (Hisashi Konno)
○ 学生会員 可知 典久 (Norihisa Kachi)

1. はじめに

道路の安全対策用施設構造物の1つにロックシェッドを代表とする落石防護構造物がある。我が国における土木構造物に関する設計法は、許容応力度設計法から限界状態設計法を経て、性能照査型設計法に移行しつつある。このような状況下においては、耐衝撃構造物の設計に関しても性能照査型設計に移行していくことが肝要であると考えられる。そのためは、実験的検討は勿論のこと精度の高い数値解析結果も併用して効率的に検討する必要があるものと考えられる。著者らは過去にRC部材の衝撃挙動解析に関して、小型部材を対象に一回のみの衝撃荷重载荷に対する各種解析手法の妥当性の検討等を実施しており、境界条件や減衰定数に留意することによって信頼性の高い解析を実施することが可能であることを示した¹⁾。

一回のみの落石だけではなく、繰り返し落石衝撃荷重を受けることも想定される落石防護構造物に対しては、衝撃荷重载荷によって使用限界状態に至らずとも鉄筋の降伏やひび割れの発生によって残留変位が生ずる、繰り返し衝撃荷重载荷時における損傷の累積および残存耐力も評価しなければならない。しかしながら、この種の評価法に関する検討事例は少ないのが現状である。

このような観点から、本研究では耐衝撃用途RC構造部材の性能照査型耐衝撃設計法の確立に向けた検討の一環として、梁部材を対象として繰り返し衝撃荷重载荷時の累積損傷や残存耐力評価法を確立することを目的に、三次元弾塑性有限要素法に基づいた解析法を提案し、実験結果との比較によってその妥当性に関する検討を行った。

なお、本数値解析には、陽解法に基づく非線形動的応答解析用汎用コードLS-DYNA (ver. 971)²⁾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、本実験に用いたRC梁の断面寸法および配筋状況を示している。RC梁の形状寸法（梁幅×梁高×純スパン長）は150×350×2,900mmである。軸方向鉄筋はD19を上下端に2本ずつとする複鉄筋配置、せん断補強筋にはD10を150mm間隔で配筋している。また、軸方向鉄筋は梁端面に設置した厚さ9mmの定着鋼板に溶接し、その定着長を節約している。支点部は上下方向への変位を抑え回転を許容する単純支持に近い支持状態となっている。重錘落下衝撃実験は、質量が300kg、载荷点部の直径が150mmの円柱状鋼製重錘をRC梁のスパン中央部に所定の高さから自由落下させることにより行っている。

本数値解析では、RC梁が終局に至る衝突速度を確認す

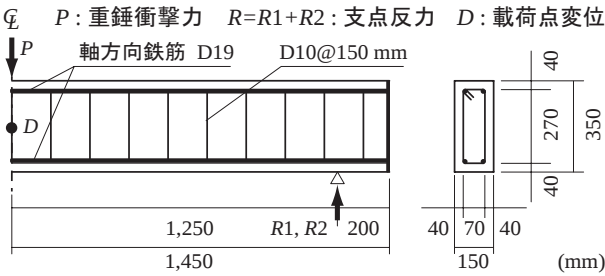


図-1 形状寸法および配筋状況

表-1 試験体の静的設計値

衝突速度 V (m/s)	計算 曲げ耐力 P_{usc} (kN)	計算 せん断耐力 V_{usc} (kN)	せん断 余裕度 $\alpha (=V_{usc}/P_{usc})$
1~6	47.2	155.8	3.30

表-2 コンクリートおよび鉄筋の力学的特性値

材料	密度 ρ (kg/m ³)	強度 (MPa)	弾性係数 E (GPa)	ポアソン比 ν
コンクリート	2.35×10^3	59.7	40.9	0.167
軸方向鉄筋	7.85×10^3	370	206	0.3
スタラップ		410		

るために実施した、初期および増分衝突速度を1m/sとする漸増繰り返し衝撃荷重载荷実験を対象としている。なお、本試験体における終局衝突速度はV=6m/sであった。

表-1には、RC梁の静的設計値一覧を示している。表中の静的曲げ耐力 P_{usc} および静的せん断耐力 V_{usc} は、コンクリート標準示方書に基づき算定している。RC梁は、せん断余裕度が $\alpha (=V_{usc}/P_{usc}) > 1.0$ であることより、静载荷時には曲げ破壊型で終局に至ることが想定される。表-2には、コンクリートおよび鉄筋の力学的特性値を示している。

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RC梁の要素分割状況を示している。

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-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。また、コンクリート-鉄筋要素間、完全付着を仮定している。適用した要素タイプは、せん断補強筋要素には剛性、断面積、質量を等価とした梁要素を用い、その他の要素には全て8節点の三次元固体要素を用いている。要

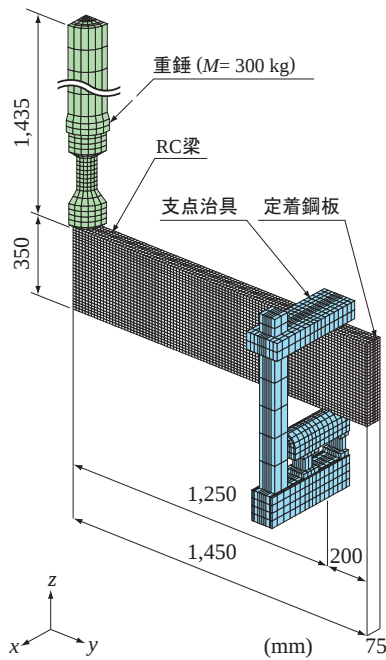


図-2 要素分割状況

素の積分点は1点積分を基本としているが、軸方向鉄筋に関しては断面方向に1要素でモデル化しているため、解析精度を考慮して8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。

2.3 繰り返し衝撃荷重載荷時の解析概要

本数値解析では、繰り返し衝撃荷重載荷実験を適切に再現するために、以下の手順で数値解析を実施している。

- 1) 重錘要素を繰り返し載荷回数分だけ、予めRC梁上に重複して設置する。
- 2) 一次載荷時に衝突させる重錘要素の全節点に所定の衝突速度を付加し数値解析を実施する。数値解析時間は、重錘がRC梁に衝突した時点からRC梁がほぼ定常状態に至るまでの200msとする。なお、減衰定数は、前項で述べているように、鉛直方向最低次固有振動数に対して0.5%とする。
- 3) 一次載荷時の数値解析終了後、鉛直方向最低次固有振動数に対する臨界減衰定数を入力して200ms間の数値解析を実施し、RC梁を数値解析的に静止させる。同時に一次載荷時に使用した重錘要素を除去する。
- 4) 二次載荷時に衝突させる重錘要素の全節点に所定の衝突速度を付加し数値解析を実施する。数値解析時間は一次載荷時と同様に200msとする。なお、減衰定数は、一次載荷時と同様の値を入力する。
- 5) 以降 n 次載荷終了まで3)、4)の手順を繰り返す。

以上により、数値解析を実施している。

2.4 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および鉄筋の応力-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 $1,500\mu$ 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

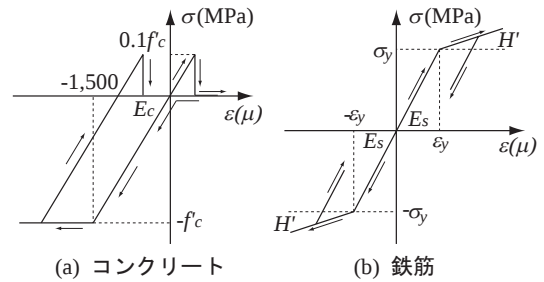


図-3 各材料の応力-ひずみ関係

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。

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、塑性硬化係数 H' を弾性係数 E_s の1%とするバイリニア型の等硬化則を適用している。

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。要素の弾性係数 E_s 、ポアソン比 ν_s 、単位体積質量 ρ_s には公称値を用いることとし、全部材で等しく、それぞれ $E_s = 206\text{ GPa}$ 、 $\nu_s = 0.3$ 、 $\rho_s = 7.85 \times 10^3\text{ kg/m}^3$ と仮定している。なお、各材料の降伏の判定には von Mises の降伏条件を採用している。

3. 数値解析結果

3.1 重錘衝撃力

図-4には、実験結果および解析結果の重錘衝撃力、支点反力、載荷点変位に関する各応答波形を示している。

図-4(a)より、実験結果の重錘衝撃力波形は衝突速度によらず、衝撃荷重初期に励起する高周波で振幅の大きい第1波とその後励起する継続時間が長く振幅の小さい第2波で構成されていることが分かる。これらの波形の振幅、最大重錘衝撃力および継続時間は、衝突速度が増加するほど大きく示されている。

実験結果と解析結果を比較すると、解析結果は載荷初期に励起する高周波で振幅の大きい第1波とその後励起する継続時間が長く振幅の小さい第2波で構成されている実験結果の波形性状をよく再現していることが分かる。

最大重錘衝撃力に関しては、解析結果は $V = 1 \sim 4\text{ m/s}$ までは衝突速度の増加とともに最大値も増加する傾向にあるが、 $V = 5, 6\text{ m/s}$ では減少傾向を示している。いずれの場合においても、重錘衝撃力の最大値は実験結果と比較して小さい値を示している。これは、実験結果の場合には、載荷点近傍コンクリート表面が繰り返し載荷によって密実化する傾向にあることやひずみ速度効果等により、剛性が向上したような性状を示すことによるものと推察される。一方、数値解析の場合には、コンクリートの応力-ひずみ特性を圧縮強度で降伏に至るバイリニア型にモデル化していることや、ひずみ速度効果を考慮していないこと等により、衝突速度の増加に対応した最大重錘衝撃力の増加傾向を再現するに至っていないことによるものと推察される。

3.2 支点反力

図-4(b)より、支点反力波形は実験結果、解析結果ともに重錘衝突時点より遅れて励起しており、低周波の正弦減衰振動成分と高周波成分が合成された応答波形を示しており、両者類似した性状を示していることが分かる。

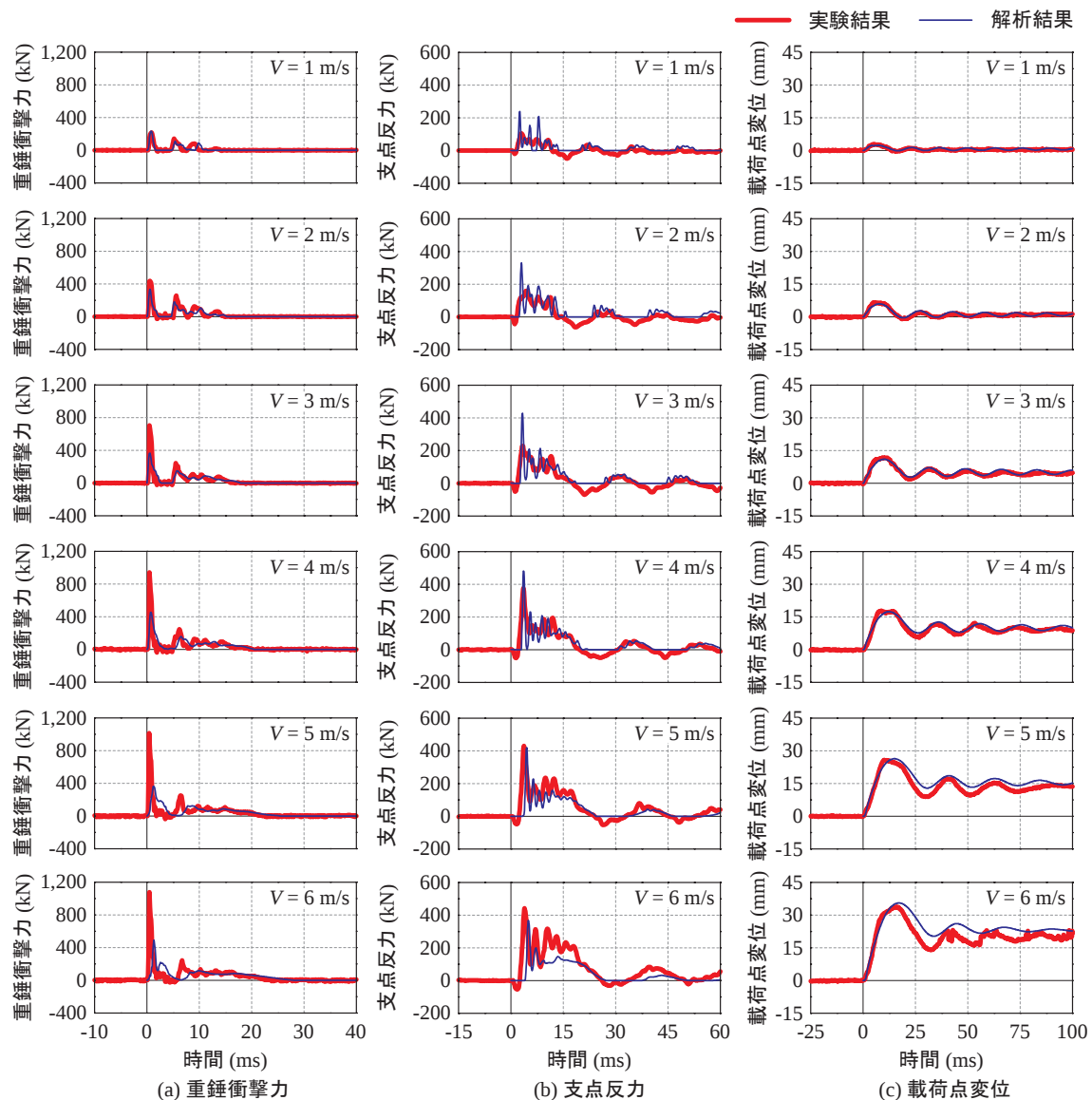


図-4 各種応答波形

詳細に見ると、解析結果は、実験結果に比較して、衝突速度が小さい段階では高周波成分の振幅が大きく、衝突速度の大きい領域では低周波成分の振幅が若干小さい傾向にある。しかしながら、解析結果は、衝突速度の増加に対応して損傷が蓄積し、低周波成分の周期が延びていく実験結果の傾向をよく再現している。

3.3 載荷点変位

図-4(c)より、実験結果は、いずれの衝突速度の場合も衝撃荷重載荷初期に正弦半波状の第1波が励起した後、減衰自由振動を呈していることが分かる。また、衝突速度の増加に伴って最大振幅、残留変位成分および第1波の継続時間が増加する傾向を示している。

解析結果を見ると、 $V = 6$ m/sの残留変位成分が実験結果と比較して若干大きく示されているものの、いずれの場合も、重錘衝突後に最大変位を示す第1波の正弦半波から除荷後の自由振動波形に至るまで、最大応答値から残留変位量、周期ともに実験結果をよく再現していることが分かる。

3.4 最大応答値に関する実験結果と解析結果の比較

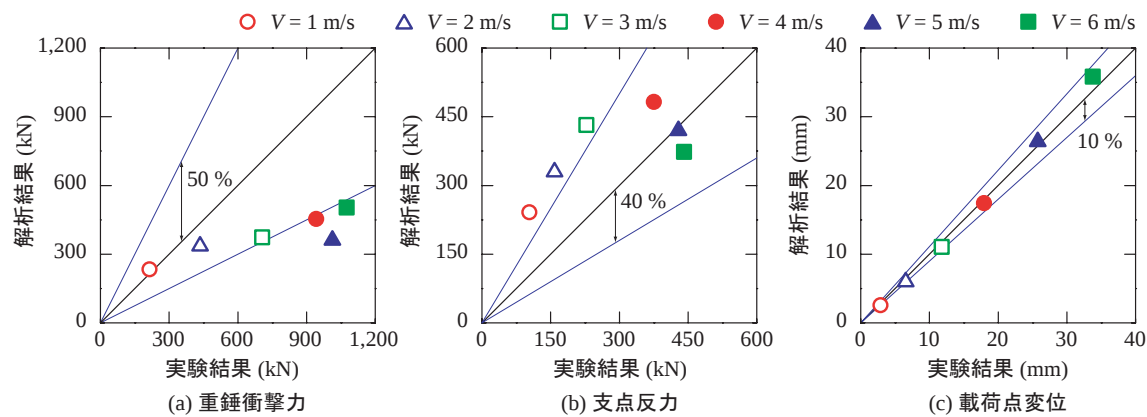
図-5には、各最大応答値に関して、実験結果を横軸に

取り、かつ解析結果を縦軸に取って整理している。図中の45°勾配を有する実直線は、解析結果と実験結果が一致していることを、青線はそれに対する誤差幅を意味している。すなわち、実直線より下側の領域は実験結果が大きいことを、上側の領域は解析結果が大きいことを示している。

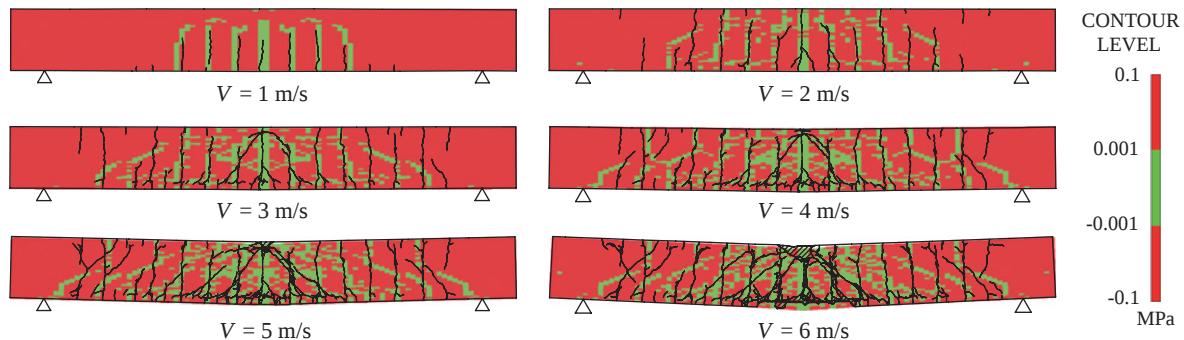
図-5(a)の重錘衝撃力に関する実験結果と解析結果の関係を見ると、解析結果は増加傾向にあるもののその勾配も小さく、実験結果と解析結果との誤差は $V = 5$ m/sを除き50%程度と大きく、解析結果は実験結果に対して小さく評価する傾向にあることが分かる。

図-5(b)の支点反力に関する実験結果と解析結果の関係図を見ると、解析結果は衝突速度が大きくなるほど誤差が小さくなる傾向にあるが、 $V = 1 \sim 3$ m/sでは誤差が40%以上となり、実験結果を再現できていないことが分かる。この要因は、解析結果の高周波成分に関する振幅が大きいことによるものであることは、前述の通りである。

次に、図-5(c)の変位に関する実験結果と解析結果の比較図を見ると、解析結果と実験結果との誤差は、衝突速度の大きさに関わらず10%以下であり、両者の値が非常



図－5 各最大応答値に関する実験結果と解析結果の関係



図－6 ひび割れ分布性状

によく対応していることが分かる。

3.5 ひび割れ分布性状

図－6には、実験終了後のひび割れ分布図および数値解析結果の最大変位時における第一主応力図を示している。なお、数値解析結果は、図中緑色で示された要素がひび割れと等価と判断される要素である。

図より、実験結果を見ると、衝突速度の増加とともにスパン全域に渡って梁の上下縁から鉛直方向に進展する曲げひび割れや、荷重点部から梁下縁に約45°の角度で進展する斜めひび割れが確認できる。V=4 m/s以降では、曲げひび割れの進展とともに荷重点近傍にひび割れが集中しており、終局衝突速度のV=6 m/sでは圧壊による上縁かぶりコンクリートの剥落が確認できる。また、下縁かぶりコンクリートも剥落しており、曲げ破壊により終局に至った状況が確認できる。

一方、解析結果を見ると、V=1 m/sおよびV=2 m/sの場合には、解析結果は実験結果よりも損傷は大きいものの、下縁からの曲げひび割れの発生も確認できる。V=3 m/sの場合には斜めひび割れの発生も確認でき、実験結果とよく対応していることが分かる。また、V=4 m/s以降の場合に関しても、コンクリートの剥落は再現されていないものの、衝突速度の増加とともに曲げひび割れが進展し、荷重点近傍における損傷状況も実験結果とよく対応していることが分かる。

4. まとめ

本研究では、耐衝撃用途RC構造部材の性能照査型耐衝撃設計法の確立に向けた検討の一環として、梁部材を対象

として繰り返し衝撃荷重載荷時の残存耐力評価法を確立することを目的に、三次元弾塑性有限要素法に基づいた解析手法を提案し、実験結果と比較することにより、その妥当性を検討した。本研究の範囲内で得られた結果を整理すると、以下のとおりである。

- 1) 提案の解析手法を用いることにより、各荷重時の最大重錘衝撃力や最大支点反力値に関しては、実験結果に対応しないものの、重錘衝撃力波形や支点反力波形の分布性状は大略再現可能である。
- 2) 荷重点変位波形に関しては、各荷重時の最大応答変位や、除荷後の減衰自由振動特性、残留変位を精度よく評価可能である。
- 3) 梁側面に生じた各荷重時点における累積のひび割れ分布に関しても、実験結果を大略再現可能である。
- 4) したがって、提案の手法を用い、RC梁の繰り返し衝撃荷重載荷時の累積損傷の程度や残存耐力評価は大略評価可能となるものと推察される。

参考文献

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