

# 論文 低速度衝撃荷重を受ける四辺単純支持 RC 版の耐衝撃能力評価に関する数値解析研究

鄭 丹丹<sup>\*1</sup>・小室 雅人<sup>\*2</sup>・岸 徳光<sup>\*3</sup>・瓦井 智貴<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本論文では、低速度衝撃荷重を受ける RC 版の終局状態を推定可能な数値解析手法の確立を目的とし、四辺単純支持矩形 RC 版を対象に、三次元弾塑性衝撃応答解析を実施し、実験結果との比較によって解析手法の適用性を検討した。その結果、1) 実験結果における押抜きせん断破壊裏面の円形状や対角線状のひび割れ、および曲げひび割れを再現できること、2) RC 版が構造的に終局に至っていない場合には、実験結果の重錘衝撃力、支点反力、載荷点変位波形を概ね再現可能であること、3) 提案手法を用いることにより、衝撃荷重を受ける RC 版の耐衝撃能力に相当する最大入力エネルギーを安全側に評価できること、等が明らかになった。

**キーワード:** RC 版, 耐衝撃能力, 終局状態, 弾塑性衝撃応答解析, 低速度衝撃載荷

## 1. はじめに

現在まで、我が国の山間部や海岸線では落石などの自然災害への対策として落石防護構造物が多く建設され、安全・安心な国土の形成に大きく貢献してきた。しかしながら、近年の異常気象により岩盤斜面の崩落などの自然災害が発生し、既設の落石防護構造物は、設計時に想定した以上の落石荷重が作用する場合も想定される。したがって、落石防護構造物を適切に維持管理するためには、その耐荷能力や耐衝撃性能を適切に評価することが重要である。このような背景により、著者らは既往の研究において、実物大のロックシェッド(落石覆工)を対象に、その耐衝撃性能に関する研究<sup>1)4)</sup>を実施してきた。一方、ロックシェッドなどの頂版部には RC 版が用いられていることから、RC 版単体の耐衝撃性能を適切に評価することも重要である。

RC 版に関する既往の研究に関しては、低速度衝撃を対象とした研究<sup>5)10)</sup>が実施されており、版厚、配筋、コンクリート強度、支持条件などが耐衝撃性能に与える影響について検討がなされている。Xiao ら<sup>9)</sup>は、実験結果と数値解析結果に基づき、終局状態の入力エネルギーを安全側で評価するための 2 つの無次元経験式を提案している。しかしながら、実験データが不足しておりその妥当性については十分に検証がなされていない。また、著者らも高速度衝撃を受ける RC 版の数値解析的検討で適用されているエロージョン機能<sup>11)</sup>に着目し、低速度衝撃を受ける四辺単純支持 RC 版への適用性について検討<sup>10)</sup>を行ってきた。その結果、エロージョン値を適切に設定することにより、各種応答波形の再現は可能になるものの、実験結果のひび割れ状況を過小に評価することや、エロー

ジョン値の設定方法など課題も残されており、RC 版の終局状態を予測できるまでには至っていない。

このような背景より、本研究では、低速度衝撃を受ける RC 版の終局状態を予測可能な数値解析手法の確立を目的として、四辺単純支持された矩形 RC 版を対象に、三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。ここでは、既往のエロージョン機能を適用しない手法について検討を行うものとし、別途実施した実験結果<sup>8)</sup>との比較によってその妥当性を検討するとともに、提案の解析手法を用いて RC 版の終局状態における最大入力エネルギー(荷重条件)の推定を試みた。なお、本数値解析には、陽解法に基づく非線形動的構造解析用汎用コード LS-DYNA を使用した。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

図-1には、本実験に用いた四辺単純支持矩形 RC 版の形状寸法および配筋状況<sup>8)</sup>を示している。RC 版の形状寸法(幅×長さ×版厚)は、2,000×2,000×210 mm であり、有効高さ 170 mm、かぶり 40 mm の位置に下端鉄筋のみを配置している。下端鉄筋には D16 を用い、版中央部より 150 mm の間隔で格子状に配置しており、4 辺に設置した厚さ 7 mm の定着鋼板に溶接して定着を確保している。試験体の鉄筋比は 0.9 % 程度である。表-1、表-2には、材料試験から得られたコンクリートおよび鉄筋の材料物性値を示している。

### 2.2 実験方法

写真-1には、重錘落下衝撃載荷実験の状況を示している。重錘落下衝撃実験は、質量 300 kg、衝突部直径 90 mm の鋼製重錘を所定の高さから RC 版中央部に一回のみ自

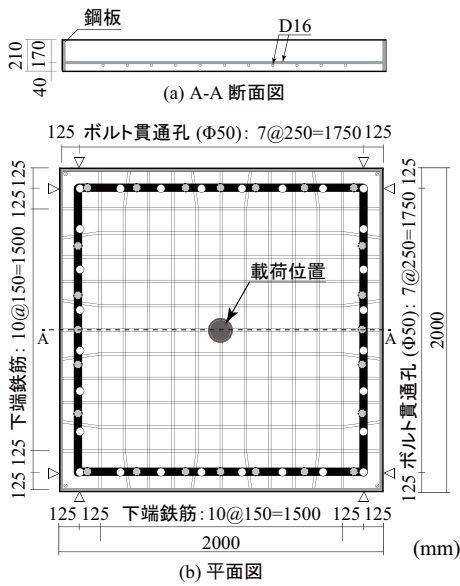
\*1 室蘭工業大学 大学院工学研究科 博士後期課程 工学専攻 (学生会員)

\*2 室蘭工業大学 大学院工学研究科 もの創造系領域 社会基盤ユニット 教授 博(工) (正会員)

\*3 室蘭工業大学 大学院工学研究科 もの創造系領域 社会基盤ユニット 特任教授 工博 (正会員)

\*4 室蘭工業大学 大学院工学研究科 もの創造系領域 社会基盤ユニット 助教 博(工) (正会員)

○ ボルト貫通孔 ◎ 支点ロードセル設置位置 〓 支持辺



図－1 試験体概要

表－1 コンクリートの材料物性値

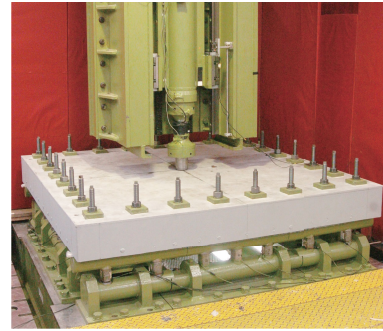
材料	圧縮強度 $f'_c$ (MPa)	弾性係数 $E_c$ (GPa)	ポアソン比 $\nu_c$
コンクリート	28.9	19.27	0.167

表－2 鉄筋の材料物性値

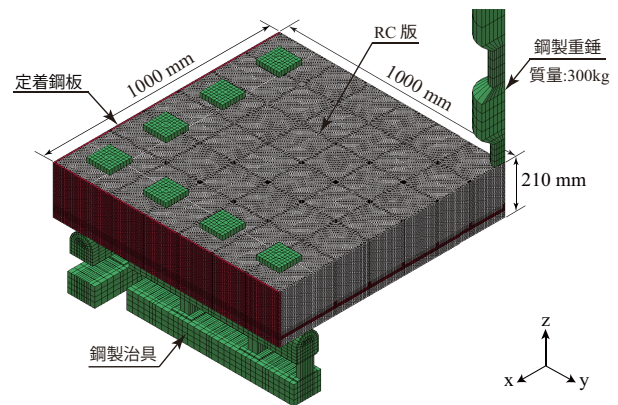
呼び径	鉄筋種類	降伏強度 $f_y$ (MPa)	弾性係数 $E_s$ (GPa)	ポアソン比 $\nu_s$
D16	SD345	389	206	0.3

由落下させる単一衝撃荷重載荷方式を採用している。なお、落下高さは事前に重錘の衝突時速度の検定を行い、所定の衝突速度になる落下高さに換算している。実験ケースは、衝突速度  $V$  の異なる4種類 ( $V = 5, 5.5, 6, 6.5$  m/s) である。支持条件では、RC版支点部におけるの浮き上がりを貫通ボルトとナットを用いて拘束するものの、支持底部の回転を許容するピン支持に近い状態となっている。なお、重錘底部は、片当たりを防止するために2mmのテーパを有する球面状となっている。

本実験の測定項目は、(1) 重錘に内蔵されたロードセルから得られた重錘衝撃力  $P$ 、(2) 支点治具に設置されたロードセルから得られた支点反力の合計値  $R$  (以後、単に支点反力) および(3) レーザ式非接触型変位計によるRC版底部中央の載荷点変位  $\delta$  (以後、載荷点変位) である。支点反力  $R$  は合計24個のロードセルから得られた波形を合算したものである。なお、各ロードセルの反力波形は、ロードセルの設置位置の影響を受けるために必ずしも同様とはならないものの、載荷点に関して対称な位置にお



写真－1 試験体の設置状況



図－2 数値解析モデル

るロードセルの波形はほぼ同様であることを確認している。また、実験終了後にはRC版の裏面ひび割れ分布を観察している。

### 3. 数値解析概要

#### 3.1 有限要素モデル

図－2には、本数値解析に用いた四辺単純支持矩形RC版の要素分割状況を示している。モデルは構造および荷重条件の対称性を考慮し1/4モデルを採用した。本解析では、RC版、重錘および支点治具も実形状を極力再現する形で詳細にモデル化した。モデルには、全て1点積分の8節点の三次元個体要素を用いてモデル化している。RC版の要素に関しては5mmの立方体を基本としている。また、軸方向鉄筋D16は公称断面積と等価な断面積になるように正方形断面に簡略化している。総節点数および総要素数は、それぞれ197万4千、190万5千程度である。

境界条件は、RC版の対称切断面において法線方向変位成分を拘束している。また、実験条件と同様に各辺の支持部は、回転のみ許容したピン支持条件となっている。コンクリートと鉄筋および定着鋼板には完全付着を、コンクリートと重錘、貫通ボルト、ナットおよび支点治具間には面と面の接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義した。なお、摩擦係数は、事前解析結果に基づき0.2と仮定した。

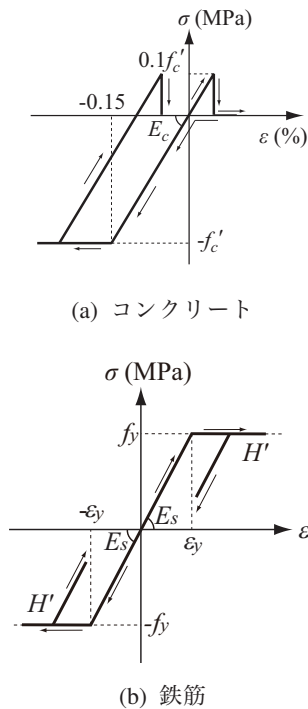


図-3 材料構成則

衝撃荷重は、重錘モデルをRC版に接触する形で配置し、その全節点に衝突速度を付加することにより作用させている。また、減衰定数は質量比例分のみを考慮するものとし、予備解析により鉛直方向最低次固有振動数に対して5%と設定した。なお、重力の影響は考慮している。

### 3.2 材料構成則

図-3には、本数値解析で用いたコンクリートと鉄筋の応力-ひずみ関係を示している。なお、本数値解析では重錘の衝突速度 $V$ が最大でも $V = 6.5 \text{ m/s}$ 程度と比較的小さいことから、コンクリートおよび鉄筋に関してひずみ速度効果は考慮していない。以下に、各材料物性モデルの概要を述べる。

#### (1) コンクリート

図-3(a)には、コンクリート要素の応力-ひずみ関係を示している。コンクリート要素には、圧縮側は圧縮強度に到達した段階で完全降伏するバイリニア型、引張側は引張強度に到達した段階で引張応力を伝達しないモデルを採用した。圧縮強度 $f'_c$ には、表-1に示す材料試験結果から得られた圧縮強度を採用し、引張強度に関しては既往の研究を参考に圧縮強度の1/10を仮定した。コンクリート降伏の判定には、Drucker-Pragerの降伏条件式を採用している。なお、コンクリートの内部摩擦角は $30^\circ$ と設定した。また、単位体積質量 $\rho_c$ 、弾性係数 $E_c$ およびポアソン比 $\nu_c$ はそれぞれ公称値を用い、 $\rho_c = 2.35 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $E_c = 18.27 \text{ GPa}$ 、 $\nu_c = 0.167$ とした。

#### (2) 鉄筋

図-3(b)には、鉄筋要素に用いた応力-ひずみ関係を

示している。ここでは、降伏後の塑性硬化を考慮しない等方弾塑性モデルを採用した。鉄筋の降伏応力 $f_y$ は材料試験より得られた値( $f_y = 389 \text{ MPa}$ )を採用し、降伏の判定はvon Misesの降伏条件に従うこととした。また、単位体積質量 $\rho_s$ 、弾性係数 $E_s$ およびポアソン比 $\nu_s$ はそれぞれ公称値を用い、 $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $E_s = 206 \text{ GPa}$ 、 $\nu_s = 0.3$ とした。

#### (3) 重錘、支点治具および定着鋼板

重錘、支点治具および定着鋼板に関しては、実験時に塑性変形が確認されていないことより、弾性体モデルを適用している。弾性係数 $E_s$ およびポアソン比 $\nu_s$ はそれぞれ公称値を用いた。単位体積質量 $\rho_s$ に関しては、支点治具および定着鋼板には公称値を用い、鋼製重錘に関しては質量 $300 \text{ kg}$ となるように解析モデルにおける重錘の全体積で除した値を使用した。

## 4. 数値解析結果および考察

### 4.1 ひび割れ分布

図-4には、実験終了後におけるRC版の裏面のひび割れ分布と各解析ケースから評価されるひび割れを比較して示している。図-4(ii)には、既往の解析結果<sup>10)</sup>を、図-4(iii)には、本数値解析結果から得られたひび割れ分布を示している。なお、既往の解析結果は、コンクリート材料にWinfrith Concrete modelを適用し、衝撃速度 $V = 6.5 \text{ m/s}$ の実験結果における最大変位をもとに、コンクリート要素の第1主ひずみが $0.03$ に到達すると要素が削除されるエロージョン機能を適用した場合の結果<sup>10)</sup>を示している。また、本数値解析結果に関しては、図-3(a)に示すコンクリートの材料構成則に基づき、カットオフ状態に到達した要素はひび割れが発生したものと評価した。すなわち、第1主応力が零近傍応力( $\pm 0.001 \text{ MPa}$ )状態を示す要素をひび割れと判定し赤色で示している。

まず、実験結果に着目すると、衝突速度 $V = 5 \text{ m/s}$ の場合には、裏面のひび割れ分布は押抜きせん断による円形状のひび割れと四辺単純支持特有の対角線に向かう $45^\circ$ のひび割れが発生している。衝突速度 $V = 5.5 \text{ m/s}$ の場合では、円形状のひび割れや対角線状のひび割れが若干増えているものの、明確な押し抜きせん断破壊には至っていないことから、RC版は未だ終局には至っていないものと推察される。さらに衝突速度が増大した衝突速度 $V = 6 \text{ m/s}$ の場合には、円形状のひび割れが明瞭化するとともに、コンクリート表面に剥離が観察されることから、RC版には押し抜きせん断断面が形成され終局状態に至っていると推察される。なお、衝突速度 $V = 6.5 \text{ m/s}$ の場合には、かぶりコンクリートが円形状に剥落しかつ鉄筋が露出しており、壊滅的な押し抜きせん断破壊に至っていることが分かる。

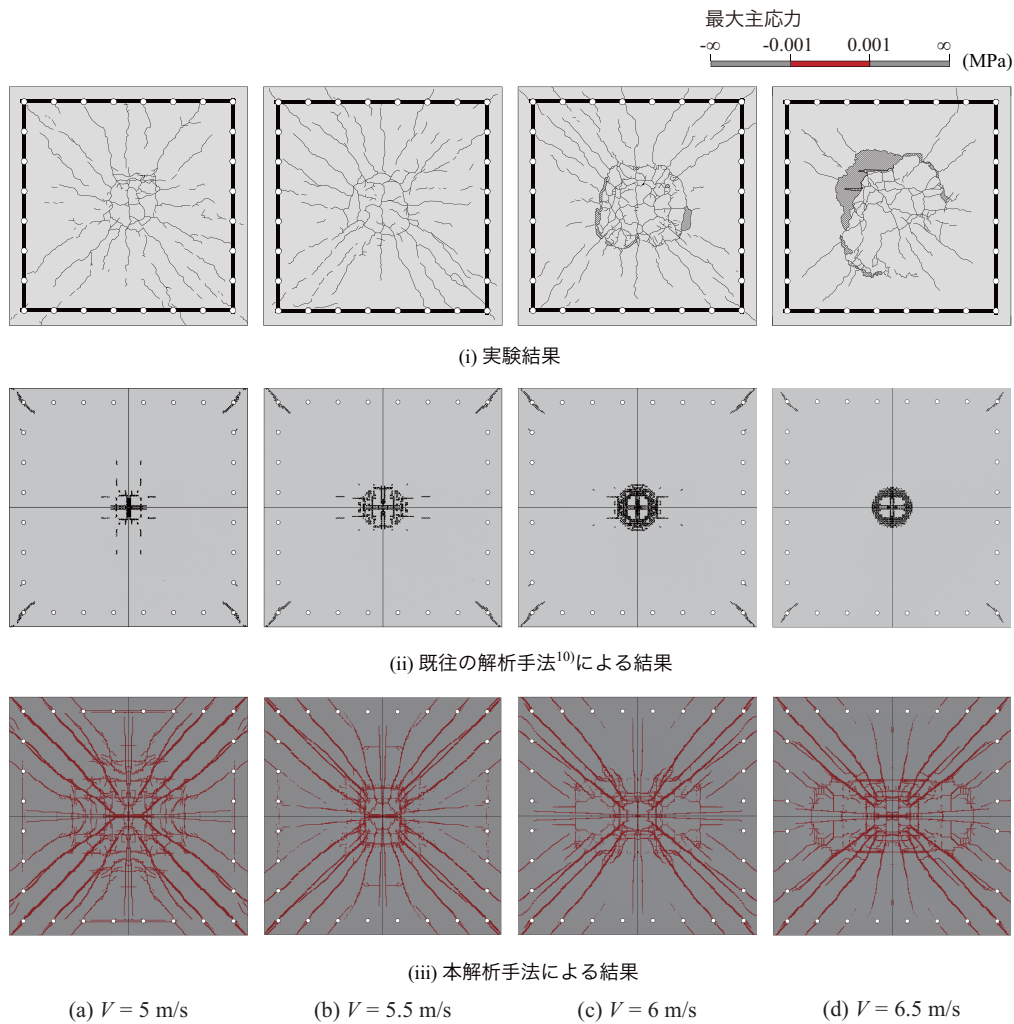


図-4 裏面におけるひび割れ分布比較

数値解析結果に着目すると、既往の解析手法<sup>10)</sup>の場合には、いずれの衝突速度においても底面における押し抜きせん断破壊による円形状のひび割れは再現してものの、実験結果に見られる対角線状のひび割れが少なく、全体的にはひび割れ分布を過小に評価する傾向にあることが分かる。一方、本研究で提案した解析手法の場合には、押し抜きせん断破壊特有の円形状ひび割れのほか、対角線状のひび割れや曲げひび割れが発生しており、実験結果のひび割れ分布を適切に再現していることが分かる。

#### 4.2 各種時刻応答波形

図-5には、すべての解析ケースにおける各種時刻歴応答波形を実験結果と比較して示している。なお、横軸は重錘がRC版に衝突した時刻を零としている。

まず、図-5(a)に示す重錘衝撃力波形に着目する。実験結果では、衝突速度  $V = 5, 5.5 \text{ m/s}$  において、振幅が大きく継続時間が  $2 \text{ ms}$  程度の第1波と振幅が小さい第2波から構成される波形性状を示していることが分かる。衝突速度が増加した衝突速度  $V = 6 \text{ m/s}$  の場合には、 $V = 5, 5.5 \text{ m/s}$  の場合と比較して振幅の大きな第1波は確認されるものの、その後続く第2波においてピークが存在せ

ず、平坦な波形性状に移行している。さらに、衝突速度  $V = 6.5 \text{ m/s}$  の場合には、第2波目の波形が完全に消失するとともに、その継続時間も長くなっていることが分かる。これは、RC版に押し抜きせん断断面が形成されたことにより、RC版の塑性化が進行し重錘を押し戻す耐力が消失したことによるものと推察される。

一方、数値解析結果に着目すると、衝突速度  $V = 5 \text{ m/s}$  の場合には、第1波の最大値を小さく評価しているものの、第2波が明確に励起しており、実験結果の波形性状を定性的には再現しているものと考えられる。衝突速度  $V = 5.5 \text{ m/s}$  の場合には、 $V = 5 \text{ m/s}$  時に確認された第2波目が励起されず継続時間も長くなっていることが分かる。さらに衝突速度が増大した衝突速度  $V = 6, 6.5 \text{ m/s}$  の場合には、第2波は確認されず、平坦な波形性状を示している。

これより、RC版が終局に至っていない場合においては、衝撃力波形における第2波目が励起されるものの、押し抜きせん断破壊によって終局に至った場合には第2波目が励起されない傾向にあることが分かる。

次に、図-5(b)の支点反力波形に着目すると、実験結果では継続時間  $8 \text{ ms}$  程度正弦半波形と後続の自由振動

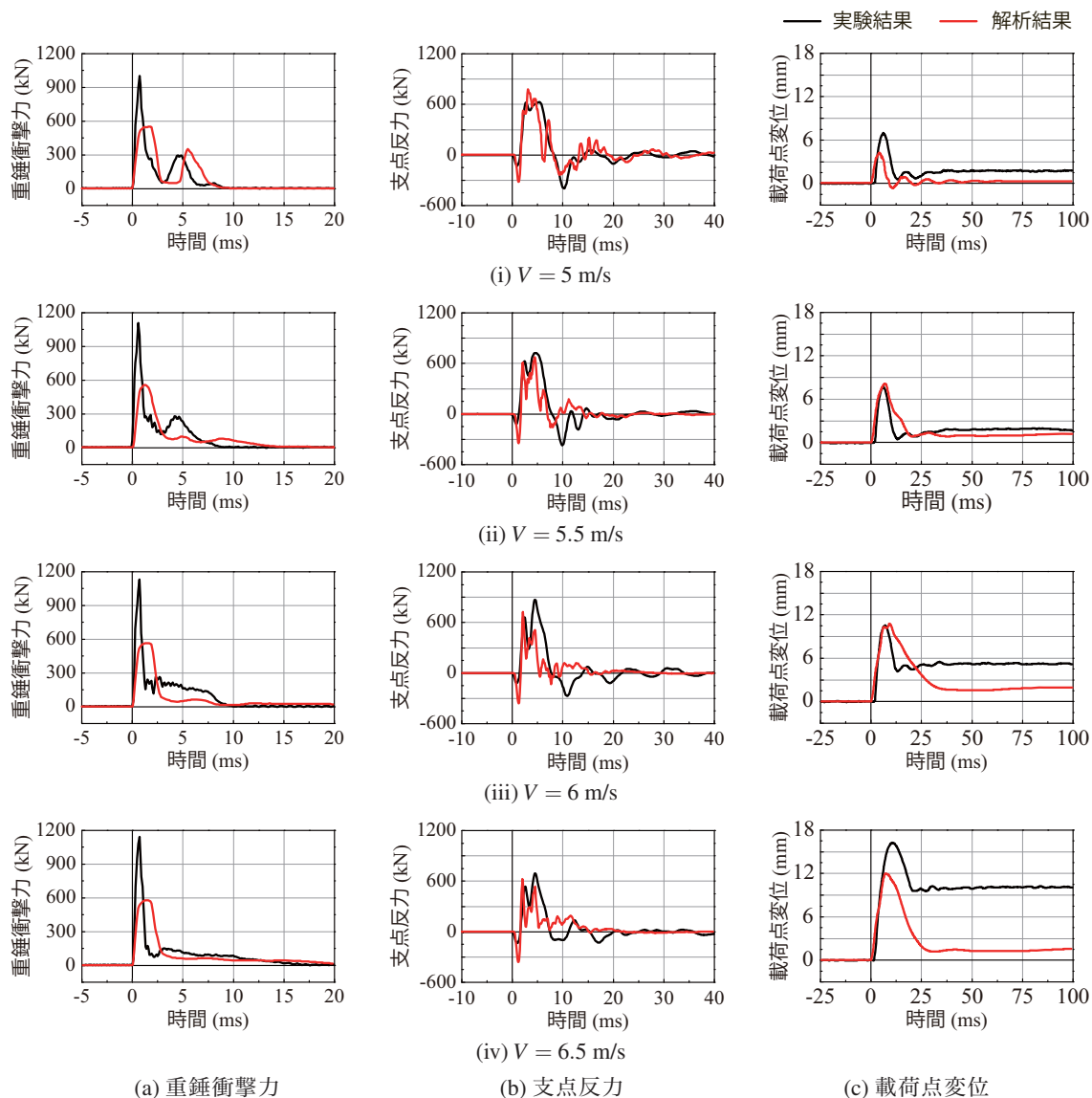


図-5 各種時刻応答波形

波形から構成されていることが分かる。また、最大支点反力は衝突速度  $V$  の増加に伴い、増大する傾向が確認される。ただし、最大衝突速度である  $V = 6.5 \text{ m/s}$  の場合には、 $V = 6 \text{ m/s}$  と比較して最大支点反力が小さくなるともに、その後の自由振動波形が消失している。

数値解析結果に着目すると、衝突速度  $V = 5 \text{ m/s}$  の場合において、実験結果の主波形と自由振動性状を大略再現していることが分かる。しかしながら、衝突速度が増加した  $V \geq 5.5 \text{ m/s}$  の場合には、実験結果における主波形は定性的に再現しているものの、実験結果に見られるその後の自由振動波形は生じていない。したがって、RC版が終局に至っていない場合には、支点反力において自由振動波形が励起されるものの、終局状態では励起されない傾向にあることが分かる。

最後に、図-5 (c)の載荷点変位波形に着目すると、実験結果では衝突速度  $V = 5, 5.5 \text{ m/s}$  の場合において、継

続時間が  $10 \text{ ms}$  程度の正弦半波状の主波動が励起した後、減衰自由振動状態に移している。なお、残留変位は数  $\text{mm}$  程度と小さい。一方、衝突速度  $V = 6, 6.5 \text{ m/s}$  の場合には、最大変位が大きくなるとともに、それぞれ  $6 \text{ mm}$  および  $10 \text{ mm}$  程度の残留変位が確認される。これより、前述のひび割れ分布も踏まえて総合的に判断すると、 $V = 6 \text{ m/s}$  において、押し抜きせん断破壊に至ったものと推察される。

数値解析結果に着目すると、衝突速度  $V = 5 \text{ m/s}$  の場合には実験結果の最大値を過小に評価しているものの、衝突速度  $V = 5.5 \text{ m/s}$  の場合には実験結果の最大変位や残留変位を適切に再現していることが分かる。衝突速度  $V = 6 \text{ m/s}$  の場合には残留変位は過小に評価されているものの、最大変位は適切に評価している。また、衝突速度  $V = 6.5 \text{ m/s}$  の場合には実験結果の最大変位と残留変位を過小に評価している。これは、本数値解析では、分布ひび割れ

モデルを適用していることより、実験結果と対応してコンクリートが完全に分離する押し抜きせん断破壊現象の忠実な再現は難しいことを示唆している。

以上より、提案の解析手法を用いて各種応答波形を分析することによって、RC版が終局に至っていない状態から押し抜きせん断破壊に至るまでを定性的に評価可能であるものと考えられる。すなわち、RC版が構造的に終局に至っていない場合には、重錘衝撃力の第2波および除荷後における支点反力の自由振動性状が励起される。しかしながら、それらの応答が励起しない場合には、RC版に押し抜きせん断破壊が発生し、終局状態に至っているものと評価することができるものと判断される。これより、本数値解析結果に基づくと、衝撃速度 $V = 5.5 \text{ m/s}$ 時にRC版が終局状態に至ったものと判断される。なお、実験結果に基づくと、RC版の終局状態は $V = 6 \text{ m/s}$ と判断されることから、本研究で提案する推定手法を用いることにより、RC版の耐衝撃能力に相当する最大入力エネルギーを安全側で評価できるものと考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、低速度衝撃を受ける矩形RC版の終局状態を推定する手法を確立することを目的に、四辺単純支持された矩形RC版を対象に、三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。また、数値解析結果と実験結果の各種応答波形を比較することにより、RC版の終局状態に至る最大入力エネルギーを推定する手法を提案した。本研究の範囲内で得られた結果を整理すると、以下のように示される。

- 1) 提案の解析手法より、実験結果における終局に至る前の裏面の押し抜きせん断破壊による円形状や対角線状のひび割れ、および曲げひび割れを再現できる。
- 2) RC版が構造的に終局に至っていない場合には、実験結果の重錘衝撃力、支点反力、載荷点変位を概ね再現可能である。
- 3) RC版が構造的に終局に至っていない場合には、重錘衝撃力の第2波、および除荷後における支点反力の自由振動状態が励起される。一方、押し抜きせん断破壊によって終局状態に至る場合には、これらの性状は生じない。この傾向は、数値解析結果によっても確認されることから、上記の波形特性を用いることにより、RC版の終局状態を推定可能であるものと推察される。
- 4) 3)の推定手法に基づくと、本研究で使用したRC版の終局状態は $V = 5.5 \text{ m/s}$ と評価され、実験結果に基づく $V = 6 \text{ m/s}$ と比較して、耐衝撃能力に相当する最大入力エネルギーを数値的に安全側で評価可能であるものと推察される。

## 参考文献

- 1) 山口 悟, 岸 徳光, 今野 久志, 西 弘明: 敷砂緩衝材を有するRC製ロックシェッド模型に関する衝撃載荷実験, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.1149-1159, 2010.
- 2) 山口 悟, 岸 徳光, 西 弘明, 今野 久志: 緩衝材の有無によるRC製ロックシェッド模型の衝撃載荷実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.823-828, 2011.
- 3) 小室 雅人, 山口 悟, 今野 久志, 平田 健朗, 岸 徳光: 敷砂緩衝材を設置した実規模ロックシェッドの耐衝撃挙動に関する数値解析的検討, 構造工学論文集, Vol. 61A, pp.935-944, 2015.
- 4) 岸 徳光, 山口 悟, 川瀬 良司, 栗橋 祐介, 佐伯 侑亮: ロックシェッドの衝撃荷重載荷時における設計断面力の安全余裕度に関する一検討, 構造工学論文集, Vol. 61A, pp. 1034-1043, 2015.
- 5) Said, A.I. and Mouwainea, E.M.: Experimental investigation on reinforced concrete slabs under high-mass low velocity repeated impact loads, Structures, Vol. 35, pp. 314-324, 2022.
- 6) Anas, S.M., Alam, M. and Umair, M.: Effect of design strength parameters of conventional two-way singly reinforced concrete slab under concentric impact loading, Materials Today: Proceedings, Vol. 93, pp. 2038-2045, 2022.
- 7) Anil, O., Kantar, E., and Yilmaz, M.C.: Low velocity impact behavior of RC slabs with different support types, Construction and Building Materials, Vol.93, pp.1078-1088, 2015.
- 8) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋 祐介: 支持条件と版厚を変化させたRC版の重錘落下衝撃実験と耐衝撃設計法の提案, 構造工学論文集, Vol. 59A, pp. 1025-1036, 2013.
- 9) Xiao, Y., Li, B., and Fujikake, K.: Behavior of reinforced concrete slabs under low velocity impact, ACI Structural Journal, Vol. 114, No. 3, pp. 643-658, 2017.
- 10) Zheng, D., Komuro, M., Kishi, N., and Kawarai, T.: Dynamic response analysis of four-side supported RC slabs under impact loading, Proc. of the JCI, Vol. 41, No. 2, pp. 709-714, 2019.
- 11) Genadijs, S., Nebojsa, O., and Andrei, B.: Sensitivity studies of reinforced concrete slabs under impact loading, Transactions, SMiRT 21, 6-11 November, 2011, New Delhi, India.