

論文 砕石緩衝材を設置した実規模落石覆道の耐衝撃挙動に関する数値シミュレーション

平田 健朗^{*1}・小室 雅人^{*2}・山口 悟^{*3}・岸 徳光^{*4}

要旨: 本論文では、緩衝材として砕石を用いた実規模 RC 製ロックシェッドの重錘落下衝撃実験を対象に、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妥当性を検討した。その結果、提案の数値解析モデルを用いることにより、1) 入力エネルギーが小さい弾性範囲内の場合には重錘衝撃力を大きく評価するものの、ロックシェッドの動的応答性状をほぼ適切に再現可能であること、2) 一方、入力エネルギーが大きく弾塑性応答を示す場合には、載荷履歴の影響を考慮していないことから、変位を過小評価する傾向にあるものの、頂版のひび割れ分布に関してはほぼ適切に評価可能であることが明らかとなった。

キーワード: ロックシェッド, 砕石緩衝材, 衝撃応答解析, 有限要素法

1. はじめに

我が国の山岳部や海岸線の道路には、落石から通行車両や人命を保護するために落石覆道が建設されている。現在、落石覆道の設計は、落石対策便覧¹⁾等に基づき許容応力度法に準拠して設計が行われており、より合理的な設計が可能となる性能照査型設計法の確立が望まれている。

このような背景の下、著者らはこれまで RC 製落石覆道に関する性能照査型耐衝撃設計法の確立を目的に、RC 梁や RC 版等の部材単位での衝撃荷重載荷実験²⁾や数値解析³⁾を行うと共に、2/5 および 1/2 縮尺の RC 製落石覆道模型を製作して重錘落下衝撃実験⁴⁾や数値解析^{5), 6)}を実施してきた。しかしながら、1) これらの検討はすべて縮小模型によるものであること、また、2) 落石覆道の弾塑性衝撃挙動は、衝撃荷重継続時間も含む衝撃力の大きさと落石覆道の固有振動数の関係に影響を受けることが予想されること等より、性能照査型設計法を確立するためには、実規模模型を用いた衝撃実験による実挙動の把握や上記解析手法の適用性検証を行うことが重要であるものと考えられる。

このような観点から、著者らは性能照査型耐衝撃設計法の確立に向けた実構造物の各種耐衝撃挙動データの取得や合理的な数値解析手法の提案を目的に、実規模 RC 製落石覆道を製作し重錘落下衝撃実験を実施した。本プロジェクトでは、緩衝材、重錘落下位置および入力エネルギーを変化させた数多くの実証実験を実施している^{7)~9)}。

本論文では、それらの実験ケースの中で、緩衝材として砕石を用いた衝撃実験を対象に、三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。ここでは、砕石緩衝材の新しい構成則モデルを提案し、実験結果との比較によってその妥当

性を検討している。なお、本落石覆道模型は、現行設計法に則して約 100 kJ の落石入力エネルギーに対応して設計されたものである。また、本数値解析には非線形衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA¹⁰⁾を用いている。

2. 数値解析概要

2.1 試験体概要

図-1には、実験に使用した RC 製落石覆道の形状寸法を示している。試験体は、道路軸方向長さが 12 m、外幅 9.4 m、壁高さ 6.4 m の箱型構造である。内空断面は幅 8 m、高さ 5 m であり、内空の四隅にはハンチを設けている。柱の道路軸方向幅は 1.5 m であり、部材厚さは、頂版、底盤、柱および側壁共に 0.7 m である。なお、コンクリートの設計基準強度は 24 MPa であり、実験時の底盤、柱/側壁、および頂版コンクリートの圧縮強度はそれぞれ 30.7 MPa, 30.2 MPa, および 37.9 MPa であった。

図-2には試験体の配筋状況を、表-1には本実験で使

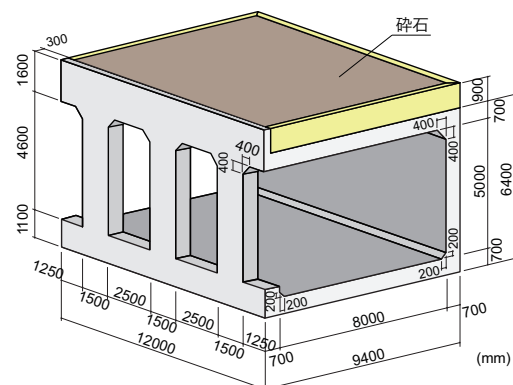


図-1 試験体の形状寸法

*1 北海道開発局 留萌開発建設部 修(工) (正会員)

*2 室蘭工業大学大学院 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 准教授 博(工) (正会員)

*3 (独)土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム 研究員 (正会員)

*4 (独)国立高等専門学校機構 釧路工業高等専門学校 校長 工博 (正会員)

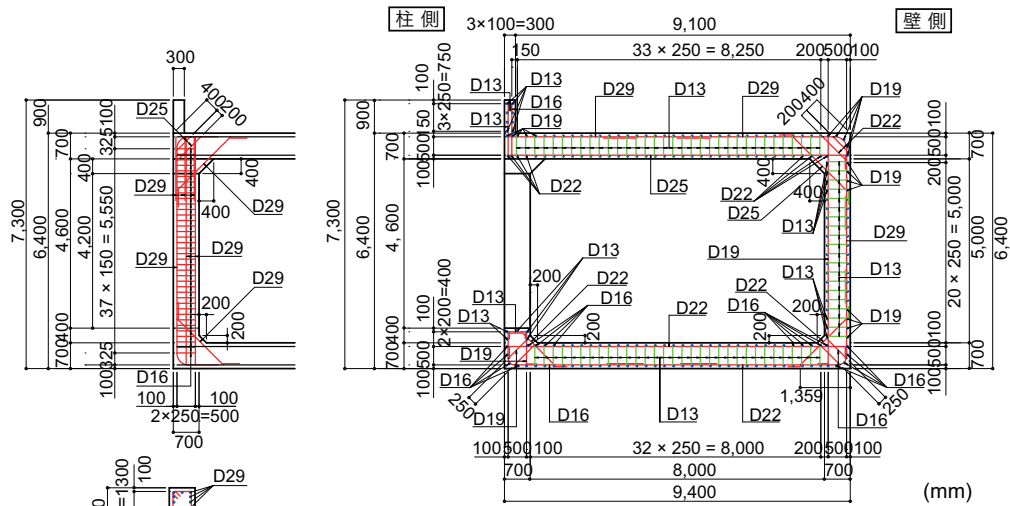


図-2 配筋図

表-1 鉄筋の力学的特性値一覧

材質	呼び径	降伏強度 f_y (MPa)	引張強度 f_u (MPa)
SD345	D29	391	555
	D25	399	563
	D22	390	543
	D19	397	598
	D16	396	587
	D13	396	556

用した各鉄筋の力学的特性値の一覧を示している。鉄筋比は一般的なロックシェッドと同程度とし、頂版下面および上面の軸方向鉄筋はそれぞれD25を125mm間隔およびD29を250mm間隔(鉄筋比0.68%)とした。また、頂版の配力筋は、現行設計法に準じて鉄筋量を軸方向鉄筋の50%程度とした。側壁の断面方向鉄筋は外側がD29、内側がD19であり、いずれも250mm間隔、また配力筋は外側がD19、内側D13とし、いずれも250mm間隔で配置した。

実験は、重錘をトラッククレーンにより所定の高さに吊り上げ、着脱装置により所定の位置に自由落下衝突させることにより行っている。本研究では、同一の実規模RC製ロックシェッドに対して、緩衝材の種類(敷砂、碎石、三層緩衝構造)、載荷位置、入力エネルギーを変化させた実験を全23ケース行い、弾性領域から終局に近い塑性領域までの耐衝撃挙動データを取得している。

本実験における計測項目は、1) 加速度計による重錘衝撃力、2) レーザ式非接触型変位計による試験体各部の法線方向変位、3) ひずみゲージによる鉄筋ひずみ、4) 高速度カメラによる重錘貫入量である。また、各実験終了後にはひび割れ分布状況を記録している。なお、各実験終

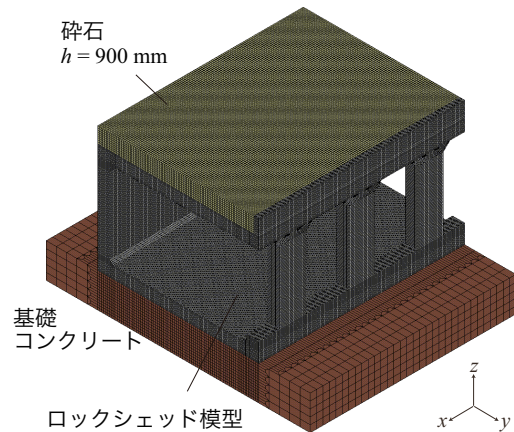


図-3 有限要素モデル

了後に覆道本体に発生したひび割れ等の損傷に対しては、一切の補修等の修復は施していない。

2.2 有限要素モデル

図-3には、本数値解析で用いた覆道模型および鉄筋の要素分割状況を示している。本解析モデルは、コンクリートの要素長を62.5mmを基本に分割しており、総節点数および総要素数は、それぞれ約1,360,000、約1,380,000である。要素のモデル化に関しては、鉄筋には2節点の梁要素を用い、その他の要素には8節点の固体要素を用いている。

境界条件に関しては、基礎コンクリート底面を完全固定としている。また、緩衝材の碎石側面に関しては面外変形を拘束している。これは、実験では頂版上に木製型枠を設置し、碎石の側方流動を拘束していることを模擬したものである。

本解析では、重錘-碎石間および試験体底面-基礎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(摩擦係数:0)を定義している。また、碎

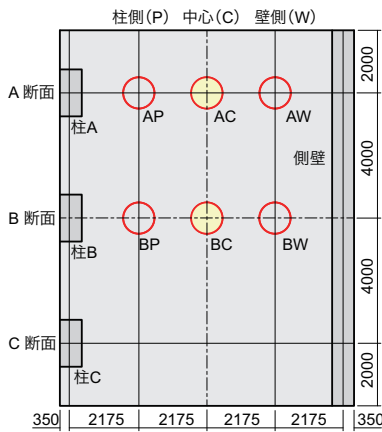


図-4 荷重位置

表-2 解析ケースの一覧

ケース名	荷重位置*	質量 m (t)	落下高さ H (m)
E40	AC	2	2
C40	BC	2	2
E1500	AC	10	15
C1500	BC	10	15

* 図-4 参照

石下面-頂版上面間、コンクリート-鉄筋要素間に対しては完全付着を仮定している。

本解析では、全要素に対して重力を考慮している。また、減衰定数は質量比例分のみを考慮するものとし、予備解析を実施して鉛直方向最低次固有振動数に対して1%と設定した。

図-4には重錘による荷重位置を、表-2には解析ケースの一覧を示している。解析ケース名は、図-4に示す荷重位置(E:AC, C:BC)と入力エネルギーの組み合わせで示している。なお、本数値解析では計算の煩雑さを避けるために、全解析ケースにおいて無損傷のロックシェッドに一度だけ重錘を衝突させている。すなわち、実験における荷重履歴の影響は考慮していない。これは、以下の考え方に基づいている。すなわち、入力エネルギーが小さい場合にはほぼ弾性範囲であることにより単一荷重と類似の挙動を示すものと考えられる。一方、入力エネルギーが大きい場合には鉄筋も降伏して塑性状態に至るものと推察されるが、落下終了時には残留ひずみが発生するものの、繰り返し荷重時にはその都度計測器の零バランスをとって計測を行うため、あたかも単一荷重時と類似した測定値が得られる。なお、既存ひび割れは応答解析結果に多少なりとも影響を与えることは勿論である。

2.3 材料構成則

図-5には、本数値解析で用いたコンクリート、鉄筋および碎石の応力-ひずみ関係を示している。

図-5(a)には、コンクリートに関して示している。圧

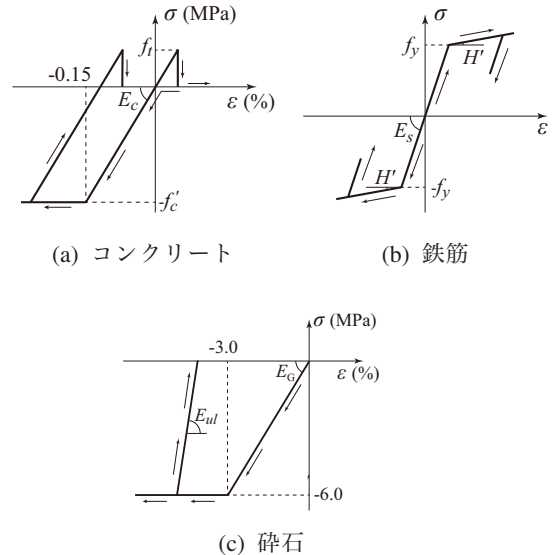


図-5 材料物性モデル

縮側に関しては、相当ひずみが $1,500 \mu$ に達した時点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。また、引張側に関しては、引張強度に達した段階で、応力を完全に解放するものと仮定している。なお、引張強度はRC梁に関する衝撃応答解析時³⁾と同様に圧縮強度の1/10と仮定した。降伏の判定にはDrucker-Pragerの降伏条件式を採用し、内部摩擦角を 30° と仮定している。また、圧縮強度 f'_c は前述(2.1節)のとおりであり、ポアソン比は $\nu_c = 0.167$ とした。

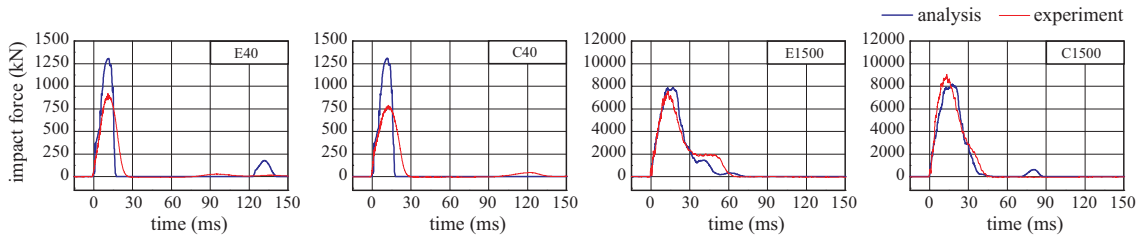
図-5(b)には、鉄筋に関して示している。材料構成則には、塑性硬化係数 H' を弾性係数の1%とするバイリニア型の等硬化則を適用した。なお、降伏の判定にはvon Misesの降伏条件式を採用している。各物性値は、弾性係数 $E_s = 200 \text{ GPa}$ 、ポアソン比 $\nu_s = 0.3$ と仮定した。なお、降伏応力 f_y に関しては、静的材料試験結果に基づき表-1に示す値を用いた。

図-5(c)には、碎石に関する相当応力-体積ひずみ関係を示している。碎石の応力-ひずみ関係は、荷重速度に大きく影響を受けるものと推察される。本数値解析では、圧縮強度や弾性係数を変化させた数多くの事前解析結果を踏まえて、図に示すような弾塑性体モデルを適用した。なお、各物性値は、体積弾性係数 $E_G = 200 \text{ MPa}$ 、圧縮強度 $\sigma_c = 6.0 \text{ MPa}$ 、除荷勾配 $E_{ul} = 10 \text{ GPa}$ 、ポアソン比 $\nu_s = 0.25$ である。

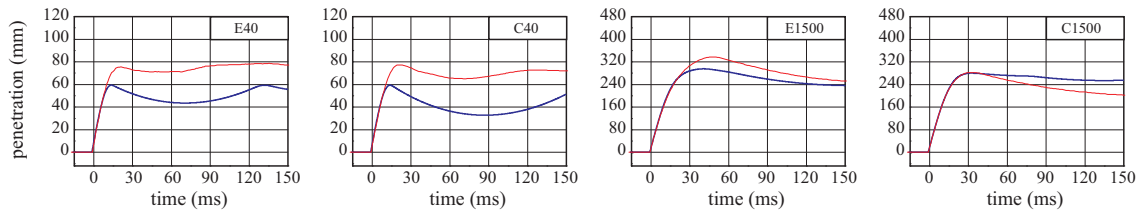
重錘は鋼材(弾性体)と仮定し、その質量を重錘モデルの体積で除すことにより、所定の単位体積質量を与えている。

3. 数値解析結果および考察

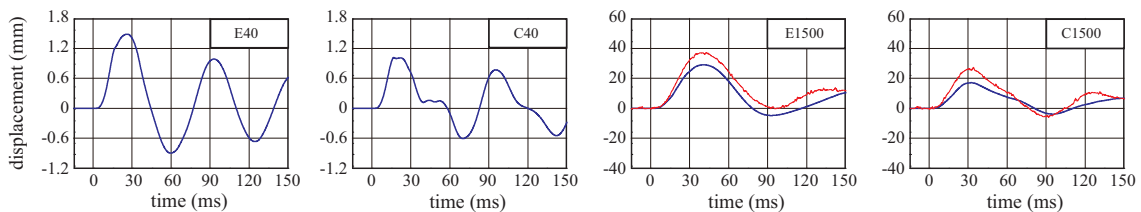
図-6には、数値解析結果から得られた重錘衝撃力、重錘貫入量および荷重点直下の頂版下面応答変位(以後、荷重点変位)を実験結果と比較して示している。なお、入力



(a) 重錘衝撃力



(b) 重錘貫入量



(c) 載荷点変位

図-6 各種応答波形

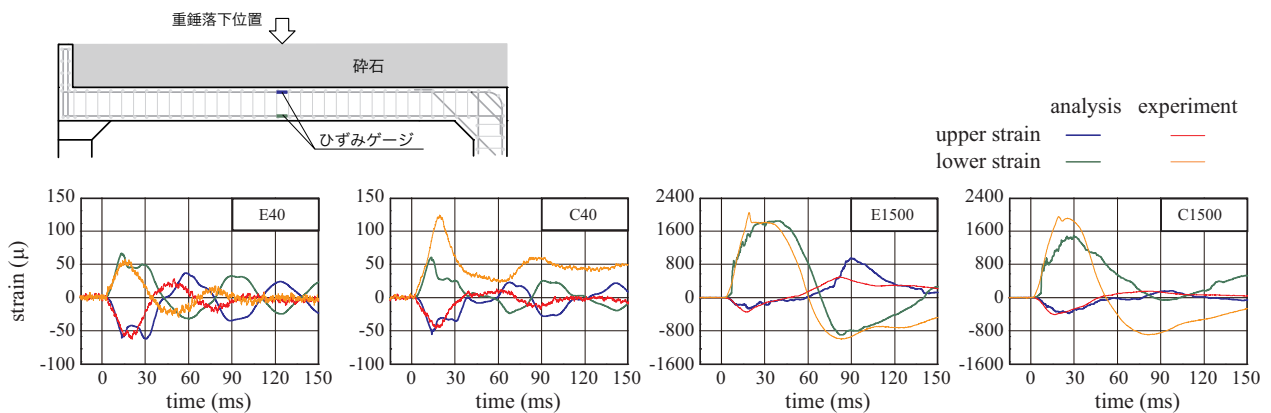


図-7 鉄筋ひずみの時刻歴応答波形

エネルギーの小さい E40 および C40 の場合には、変位応答が小さく計測結果の評価が困難であったため、数値解析結果のみを示している。

図-6(a) に示す重錘衝撃力波形に着目すると、実験結果の重錘衝撃力は、正弦半波状の波で構成されている。一方、数値解析結果を見ると、入力エネルギーの小さい E40 および C40 の場合には、波形の立ち上がりは大略再現しているものの、最大値は実験結果よりも大きく評価している。それに対して、入力エネルギーの大きい E1500 および C1500 に関しては、実験結果を良く再現していることが分かる。

(b) 図に示す重錘貫入量において、数値解析結果の立ち

上がりは実験結果と非常によく対応している。最大貫入量に関しては、数値解析結果は実験結果に比較して小さく評価する傾向にあることが分かる。

(c) 図に示す載荷点変位に着目すると、数値解析結果は、入力エネルギーの大きい E1500 および C1500 の場合には、最大値を若干小さく評価しているものの、波形性状等は実験結果をほぼ適切に再現しているものと判断される。一方、入力エネルギーの小さい C40 および E40 に対しては、最大変位が 1 mm 程度と弾性的な挙動を示していることが確認される。

図-7 には、載荷点直下における上端および下端鉄筋ひずみについて、数値解析結果と実験結果を比較して示

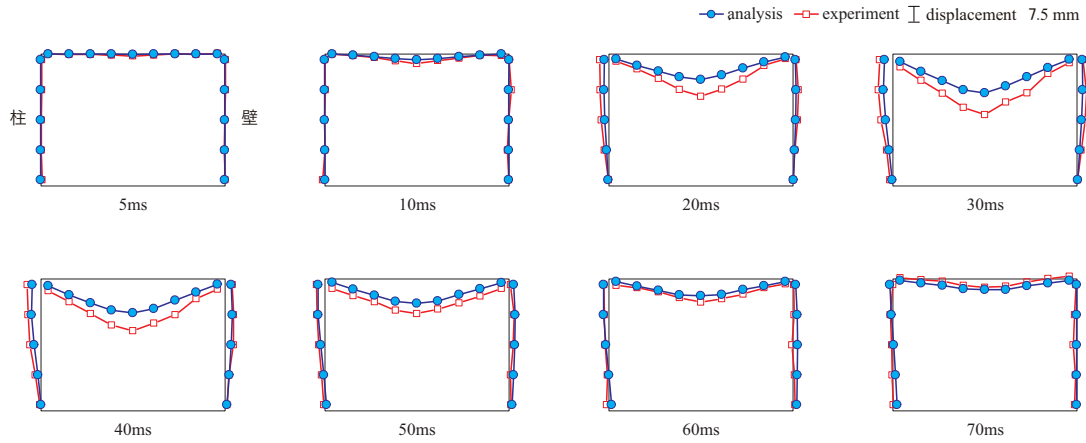


図-8 載荷断面における道路横断方向の変位分布 (C1500)

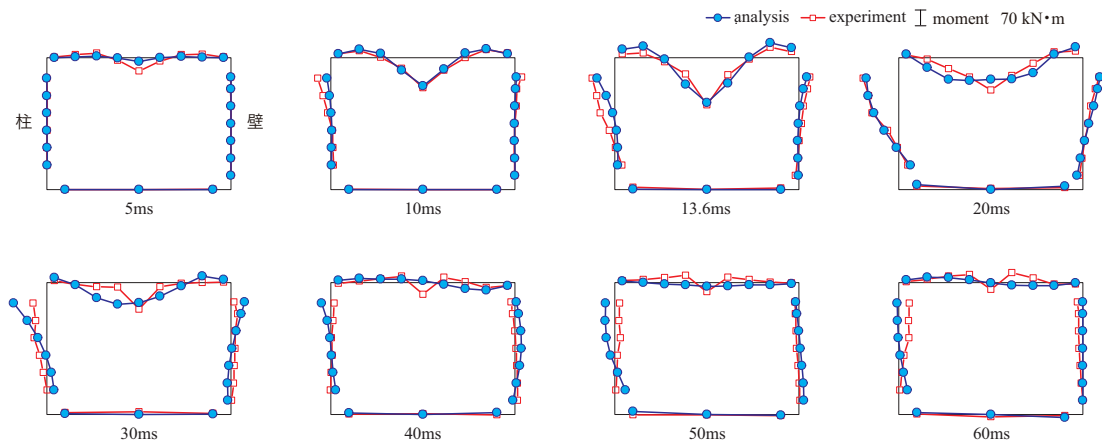


図-9 載荷断面における道路横断方向のモーメント分布 (C40)

している。図より、入力エネルギーの小さいE40/C40の場合には、C40の下端鉄筋ひずみを除き、数値解析結果の最大ひずみは実験結果とよく対応していることが分かる。なお、C40下端鉄筋ひずみに関する両者の差は、実験時に発生した頂版下縁のひび割れの影響によるものと推察される。また、入力エネルギーの大きいE1500およびC1500の場合に着目すると、C1500の下端鉄筋ひずみは、実験結果を若干小さく評価しているものの、両者は非常に良く一致している。

以上より、提案の構成則を用いることにより、数値解析結果は、C40およびE40の場合において重錘衝撃力を過大に評価しているものの、実験結果の弾性および弾塑性応答をほぼ適切に再現可能であることが明らかになった。

図-8には、ロックシェッド内壁部における法線方向の変位分布について、実験結果と数値解析結果を時系列で比較して示している。ここでは、入力エネルギーの大きいC1500に関する結果を示している。

図より、数値解析結果と実験結果の変位分布を比較すると、図-6(c)に示すように、解析結果は最大値を若干過小に評価しているものの、全体的な変位分布は実験結

果と概ね対応していることが分かる。この両者の差異は、前述したように本数値解析において載荷履歴の影響を考慮していないことによるものと推察される。

図-9には、C40の載荷断面における道路横断方向の曲げモーメント分布について、数値解析結果と実験結果を時系列で比較して示している。頂版および側壁部断面力は有効幅を1mとし、柱部に関しては1本あたりの断面力で評価している。また、曲げモーメント分布(断面内側：正、外側：負)に関しては、ロックシェッド内に埋設されている鉄筋ひずみを用い、断面内におけるひずみの線形変化を仮定した断面分割法を援用して算出している。図より、実験結果に着目すると、重錘衝突後 $t=5\text{ms}$ 以降より載荷点直下の頂版部曲げモーメントが増加し始め、若干遅れて柱上部および側壁上部の曲げモーメントが励起している。頂版部曲げモーメントは、 $t=13.6\text{ms}$ で最大値を示し、その後減衰自由振動状態に移行している。柱部の曲げモーメントに着目すると、上端が大きく下端に向かってほぼ直線的な分布性状を示しており、最大断面力発生時には下端において若干負の曲げが発生している。側壁部については上部1/2程度の範囲にモーメント

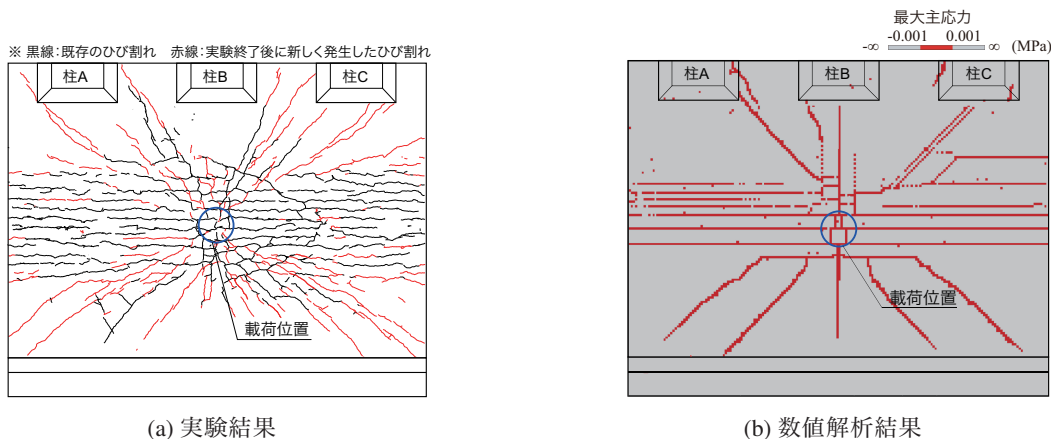


図-10 ひび割れ分布 (C1500)

が発生しているが、その値は柱部と比較して小さい。これは、柱部は柱3本でモーメントを分担するのに対して、側壁部は壁全体で分担することによるものと判断される。数値解析結果は、リバウンド後の自由振動状態を除き最大モーメントに達するまでの実験結果の分布性状を大略評価していることが分かる。

図-10には、実験終了後および解析結果から評価されるひび割れ分布を比較して示している。ここでは、C1500の結果を示している。なお、実験結果には、C1500の実験終了後に発生したひび割れ(赤線)と載荷履歴によって発生した既存のひび割れ(黒線)を区別して示している。また、数値解析結果において、赤色で示された要素は、応力が解放されひび割れ発生状態であると推察される要素である。

図より、数値解析結果は実験結果に見られる側壁に平行に発生した曲げひび割れの他、載荷点から放射状に広がるひび割れの一部も再現しており、実験結果のひび割れ状況を大略評価可能であることが明らかになった。

4. まとめ

本論文では、緩衝材として碎石を用いた実規模 RC 製ロックシェッドの重錘落下衝撃実験を対象に、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妥当性を検討した。本研究で得られた結果を整理すると、以下のようなものである。

- 1) 入力エネルギーが小さくロックシェッドの応答が弾性範囲内の場合には、重錘衝撃力を大きく評価しているものの、提案の緩衝モデルおよび解析手法を用いることによって動的応答性状を大略再現可能である。
- 2) 一方、入力エネルギーが大きくロックシェッドが弾塑性応答を示す場合には、載荷履歴の影響を考慮していないことから実験結果の変位を過小評価する傾向にあるが、頂版のひび割れ分布に関しては大略評価可能である。

なお、本研究では解析時間の都合上、載荷履歴の影響を考慮した数値解析を実施していないが、今後は載荷履歴を考慮した数値解析を行い、解析手法のさらなる精度向上を図りたいと考えている。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：落石対策便覧, 2000.6
- 2) 岸 徳光, 西 弘明, 今野久志, 牛渡裕二, 保木和弘：2 辺支持大型 RC スラブに関する重錘落下衝撃実験, 構造工学論文集, Vol. 57A, pp. 1181-1193, 2011.3
- 3) 岸 徳光, 今野久志, 三上 浩：RC 梁の繰返し重錘落下衝撃挙動に関する数値シミュレーション, 構造工学論文集, Vol. 55A, pp. 1225-1237, 2009.3
- 4) 西 弘明, 岸 徳光, 牛渡裕二, 今野久志, 川瀬良司：敷砂緩衝材を設置した 1/2 縮尺 RC 製ロックシェッド模型の重錘落下衝撃実験, 構造工学論文集, Vol. 57A, pp. 1173-1180, 2011.3
- 5) 花岡健治, 岸 徳光, 今野久志, 牛渡裕二：重錘落下衝撃荷重時の 1/2 RC 製覆道模型に関する数値解析手法の妥当性検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 2, pp. 757-762, 2011.7
- 6) 今野久志, 岸 徳光, 山口 悟, 牛渡裕二：載荷位置を変化させた 1/2 縮尺 RC 製ロックシェッド模型の耐衝撃挙動に関する数値解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.673-678, 2012.6
- 7) 岡田慎哉, 今野久志, 山口 悟, 栗橋祐介, 岸 徳光：緩衝材として碎石を設置した実規模 RC 製ロックシェッドの重錘落下衝撃実験に基づいた弾性衝撃挙動, 構造工学論文集, Vol. 60A, pp. 1007-1018, 2014.3
- 8) 佐伯侑亮, 今野久志, 栗橋祐介, 岸 徳光：緩衝材として碎石を設置した実規模 RC 製ロックシェッドの耐衝撃挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No. 2, pp. 547-552, 2014.6
- 9) 今野久志, 山口 悟, 栗橋祐介, 岸 徳光：三層緩衝構造を設置した実規模 RC 製ロックシェッドの耐衝撃挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No. 2, pp. 535-540, 2014.6
- 10) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version 971 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2007.