

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解析的検討

Numerical study on impact resistant behavior of full-scale RC rock protection gallery with gravel cushion

室蘭工業大学大学院 ○学生員 平田 健朗 (Takero Hirata)
 室蘭工業大学 正 員 小室 雅人 (Masato Komuro)
 (独) 寒地土木研究所 正 員 山口 悟 (Satoru Yamaguchi)
 (独) 寒地土木研究所 正 員 今野 久志 (Hisashi Konno)
 釧路工業高等専門学校 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

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⁾等に基づいた許容応力度法に準拠している。一方、近年、様々な土木構造物の設計法は、許容応力度法による仕様規定型設計法から性能規定型設計法に移行してきており、落石覆道等の耐衝撃構造物においても、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。

このような背景のもと、著者らは性能照査型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^{2)~4)}。

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た。ここでは、砕石緩衝材の新しい構成則モデルを提案し、その妥当性について実験結果との比較によって検討している。なお、本落石覆道模型は現行設計法に従えば、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-DYNA⁵⁾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。柱の道路軸方向長さは 1.5 m、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/壁、および頂板の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 125 mm 間隔および D29 を 250 mm 間隔 (鉄筋比 0.68) とした。また、頂版の配筋は現行設計と同様に鉄筋量が軸方向鉄筋の 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 250 mm 間隔、また配筋筋は外側が D19、内側 D13 とし、いずれも 250 mm 間隔で配置した。なお、鋼材に関しては SD345 を採用した。

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、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、各実験終了後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。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た。

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、砕石側面の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、砕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-砕石間および試験体底面-基礎コ

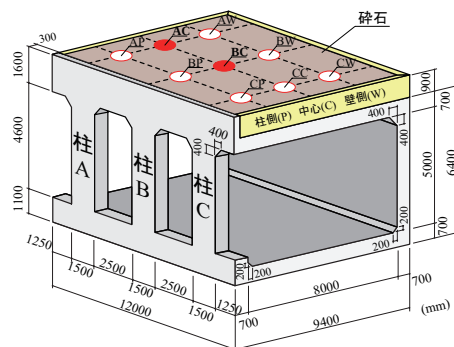


図-1 試験体の形状寸法

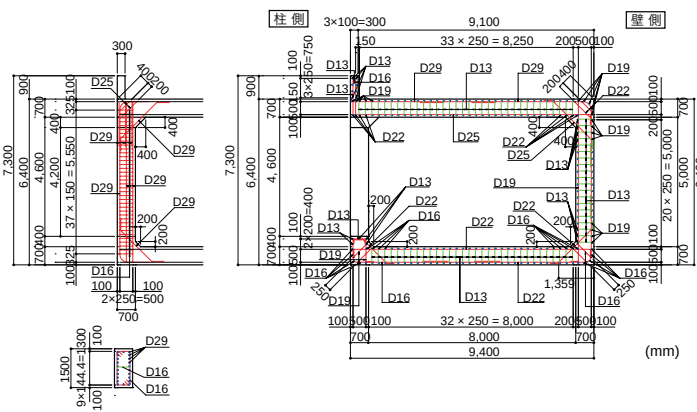


図-2 配筋図

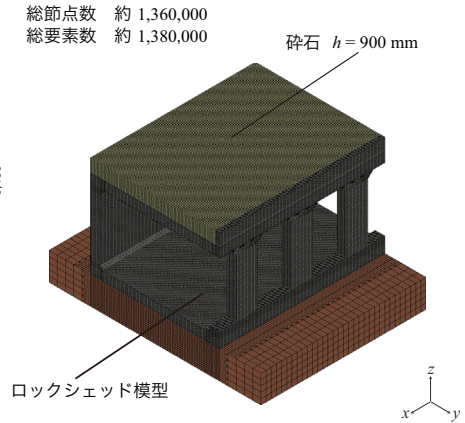


図-3 有限要素モデル

表-1 解析ケースの一覧

ケース名	载荷位置*	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-1 参照

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

本解析では、全部材に対して重力を考慮しており、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。

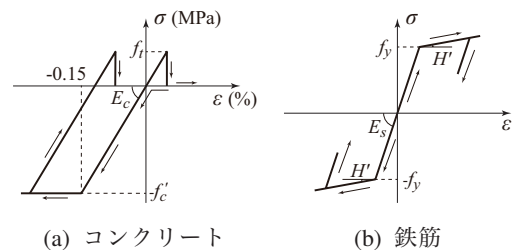
表-1には、解析ケースの一覧を示している。解析ケース名は、図-1に示す载荷位置(E:AC, C:BC)と入力エネルギーの組み合わせで示している。なお、本数値解析では、計算の煩雑さを避けるために、全解析ケースにおいて無損傷のロックシェッドに一度だけ重錘を衝突させている。すなわち、本解析では実験における载荷履歴の影響は考慮していない。

2.3 材料構成則

図-4には、本数値解析で用いたコンクリート、鉄筋および砕石の応力-ひずみ関係を示している。

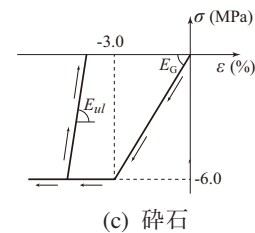
図-4 (a)には、コンクリートに関する応力-ひずみ関係を示している。圧縮側に関しては、相当ひずみが1,500 μ に達した時点でコンクリートが降伏するものと仮定し、完全弾塑性体のバイリニア型にモデル化した。また、引張側に関しては、引張強度に達した段階で、応力を完全に解放するものとしている。なお、引張強度はRC梁に関する重錘落下衝撃応答解析時と同様に圧縮強度の1/10と仮定した。降伏の判定にはDrucker-Pragerの降伏条件式を採用し、内部摩擦角を30°としている。

図-4 (b)には、鉄筋に関する応力-ひずみ関係を示している。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方硬化則を適用した。なお、降伏の判定にはvon Misesの降伏条件式を採用している。



(a) コンクリート

(b) 鉄筋



(c) 砕石

図-4 材料物性モデル

図-4 (c)には、砕石に関する相当応力-体積ひずみ関係を示している。ここでは、事前解析に基づき、バイリニア型の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 $E_G = 200$ MPa, 圧縮強度 $\sigma_c = 6.0$ MPa, 除荷勾配 $E_{ul} = 10$ GPa, ポアソン比 $\nu_s = 0.25$ である。

重錘に関しては鋼材(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-5には、数値解析結果から得られた重錘衝撃力、重錘貫入量および载荷点直下の頂版下面応答変位(以後、载荷点変位)を実験結果と比較して示している。なお、入力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-5(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適切に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ことが分かる。しかしながら、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

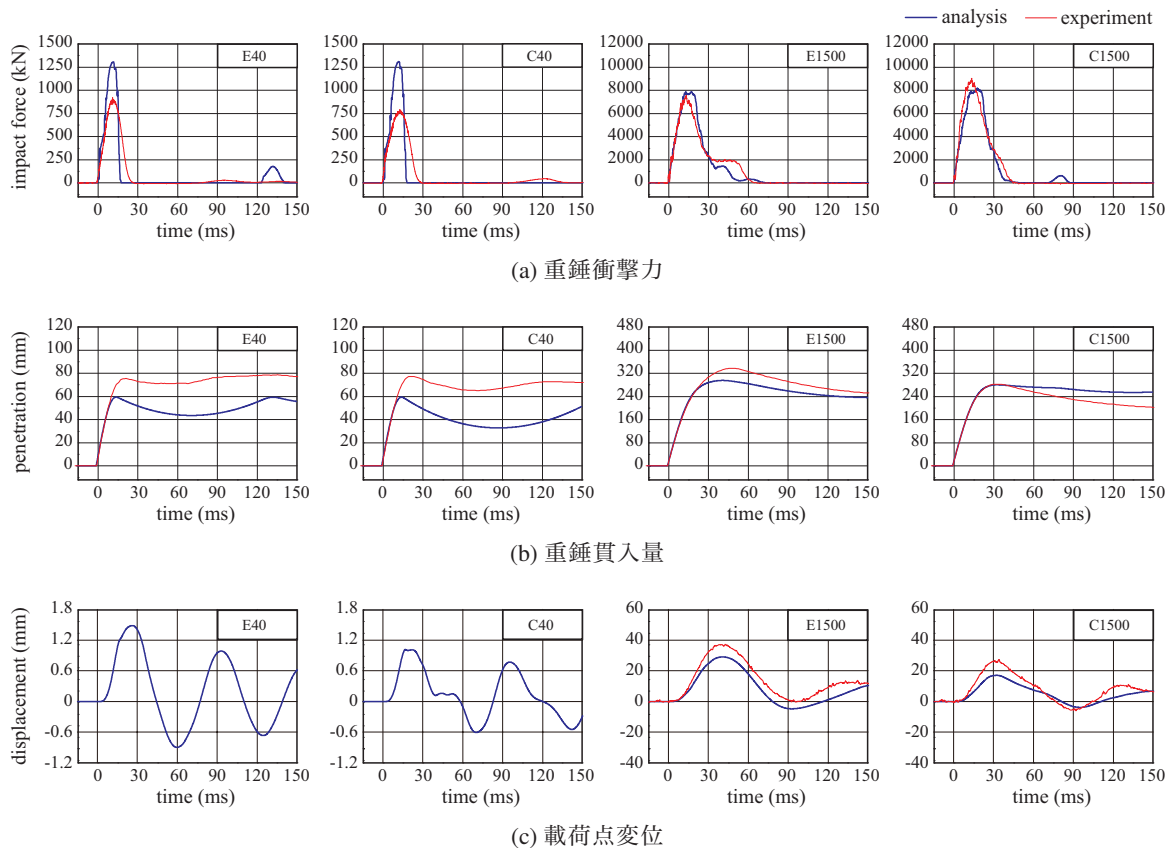


図-5 各種応答波形

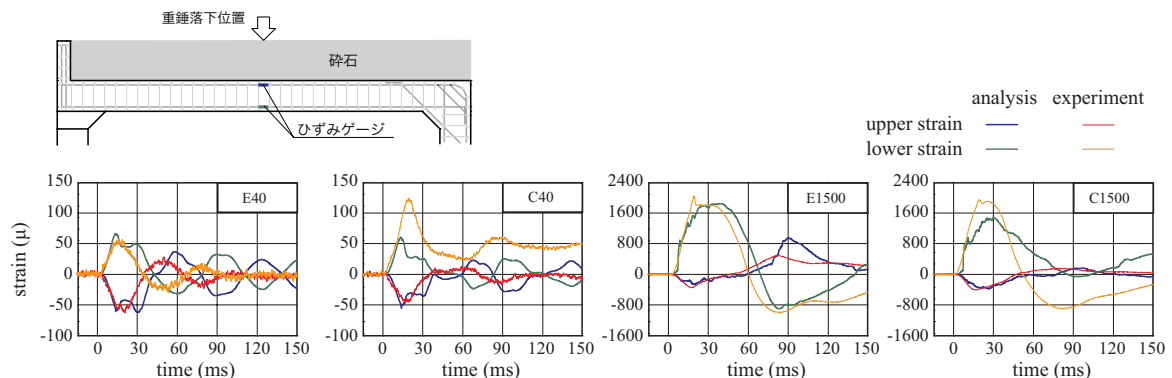


図-6 鉄筋ひずみの時刻歴応答波形

再現できていることが分かる。(b)図に示す重錘貫入量に関しては、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。一方、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では、最大値を若干小さく評価しているものの、波形性状などは実験結果をほぼ適切に再現しているものと考えられる。一方、入力エネルギーの小さいC40およびE40においては最大変位が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-6には、荷点直下における上端、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一致している。なお、C40下端鉄筋ひずみの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の上端鉄筋ひずみは、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の場合には重錘衝撃力を大きく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分かる。

図-7には、ロックシェッド内縁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。

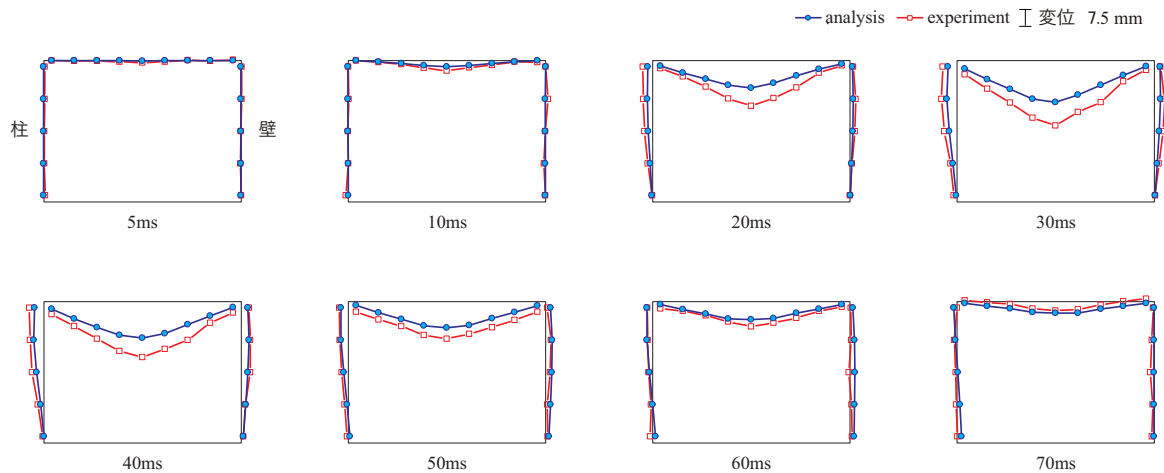
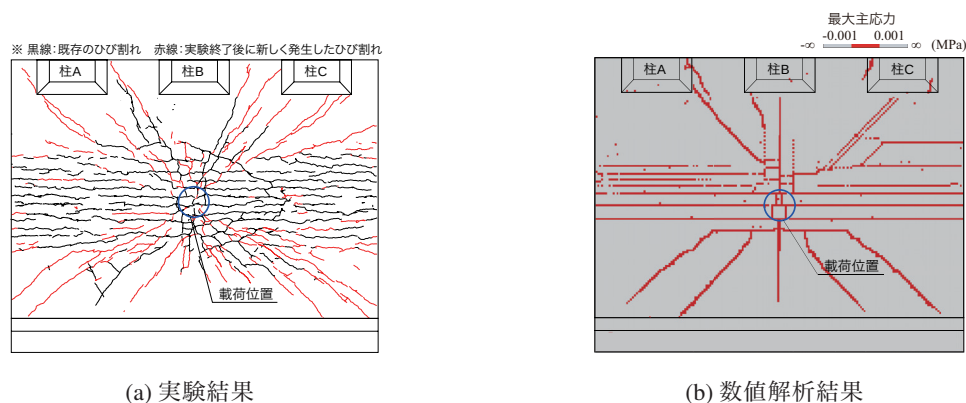


図-7 载荷断面における道路横断方向の変位分布 (C1500)



(a) 実験結果

(b) 数値解析結果

図-8 ひび割れ分布 (C1500)

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-5(c)に示すように解析結果は最大値を若干小さく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では载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-8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)と载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、ひび割れと等価な状態であると判断される要素である。

図より、数値解析結果は実験結果に見られる壁側に並行した発生した曲げひび割れの他、载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、ひび割れ状況を大略評価可能であることが分かる。

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製ロックシェット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である。

- 1) 入力エネルギーが小さくロックシェット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、動的応答性状をほぼ適切に再現可能である。
- 2) 一方、入力エネルギーが大きくロックシェットが弾塑性応答を示す場合には、载荷履歴の影響を考慮していないことから、実験結果における変位を過小評価する傾向にある。また、ロックシェット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。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：落石対策便覧, 2000.6
- 2) 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製ロックシェット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
- 3) 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製ロックシェットの耐衝撃挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No. 2, pp. 547-552, 2014.6
- 4) 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製ロックシェットの耐衝撃挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No. 2, pp. 535-540, 2014.6
- 5) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version 971 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2007.