

鋼・コンクリート合成構造を用いた落石覆工の解析手法の検討

Make a Study of Analysis Method of Rock-Shed with Steel-Concrete Composite Structure

北海道開発土木研究所	○ 正 員	岡田 慎哉	(Shin-ya Okada)
北海道開発土木研究所	正 員	池田 憲二	(Kenji Ikeda)
北海道開発局札幌開発建設部	正 員	佐藤 昌志	(Masashi Satoh)
室蘭工業大学	フェロー	岸 徳光	(Norimitsu Kishi)

1. はじめに

近年、コンピューターの進歩・発展は著しく、その適用範囲も非常に多岐に渡っている。土木・建設の分野においても、コンピューターを用いた設計や照査が実際に行われており、その可能性はまだまだ計り知れない。また、コンピューターを用いた数値解析的研究も、各研究機関において盛んに実施されている。

また、昨今の公共事業の縮小化による建設費用の削減等のため、コスト縮減を求めた新しい構造形式も各研究機関によって研究、開発されている¹⁾。これらの新型構造物は合理的な設計手法が確立されておらず、その検討が求められている。

このような観点から、本研究では合理的な設計手法の検討のための解析手法の確立を目的として、鋼・コンクリート合成構造を用いた落石覆工を対象に衝撃応答解析を実施し、実験結果と比較・検討することで、その解析手法の妥当性を検討している。なお、本数値解析は三次元弾塑性衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA Ver.960 を使用している。

2. 実験概要

本研究では、屏風岩覆道にて平成13年10月に行われた性能照査実験を対象に数値解析を実施している。屏風岩覆道は国道39号の上川郡層雲峡に設置された、鋼・コンクリート合成構造形式の落石覆工である。図-1に屏風岩覆道の概略形状図を示す。

同覆道は、1ブロックが12000mmの長さであり、12ブロックで形成されている。各ブロック間は目地で区切られている。同覆道は頂版部および柱部に鋼・コンクリート合成構造が用いられており、側壁部および底版部は従来同様RC構造となっている。

頂版部に用いられた合成構造は、200～300mm間隔で配された長さ300mm、φ80mmの鋼管を、全長約2000mm、全幅15300mm、厚さ9mmの2枚の鋼板で挟みこみ、M22高力ボルトで強く固定し、その間に高流動コンクリートを充填したものである。これを6個つなぎ合わせて1ブロック分としている。

また柱部に用いられた合成構造は、1辺400mmの正方形断面を有する板厚16mmの角型鋼管柱に高流動コンクリートを充填したものである。鋼管柱は1ブロックに6本配置されている。頂版上には緩衝材として敷厚900mmの敷砂緩衝材が設置されている。

実験は同覆道の頂版上に重量2tfの鋼製重錘を大型

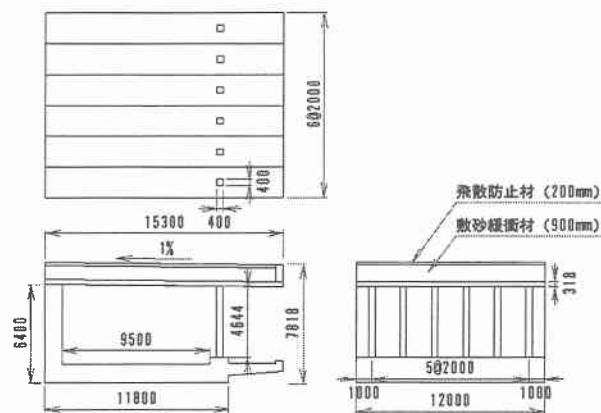


図-1 屏風岩覆道概略形状図

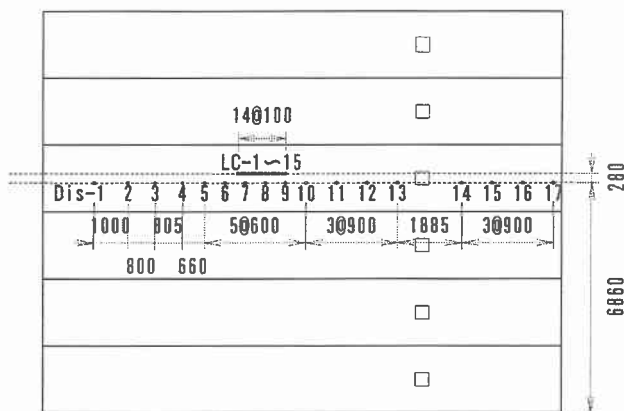


図-2 計測点位置詳細

クレーンで吊り上げ、所定の高さから落下・衝突させることで実施している。本解析は、覆工頂版中央に10mの高さから重錘を落下させたケースについて解析を実施した。

本実験の測定項目は、ひずみゲージ式加速度計による重錘加速度、ロードセルによる伝達衝撃力および、レーザ式変位計による頂版各点の変位である。図-2に各計測点位置を示す。

3. 数値解析仮定

本研究では、屏風岩覆道に対して衝撃応答解析を実施した。本解析では、覆工本体、覆工背面土、重錘および敷砂緩衝材を一部簡素化してモデル化し、解析に用いることとした。図-3に解析に用いた解析モデルを示す。

解析モデルの総節点数，総要素数はそれぞれ 38359，47558 である。

3. 1. 覆工の解析モデル化

モデル化の際には基礎地盤は考慮していないが，背面土については側壁の拘束効果を持つことが考えられるためモデル化している。合成構造の鋼管，ボルトおよびナットは，その大きさが構造全体に比べて小さいため，詳細なモデル化が困難である。そのため，ボルトおよびナットについては簡素化し梁要素でモデル化した。同様に合成構造の鋼板はその厚さが構造全体に比べ小さいため，板要素を用いてモデル化している。

上記以外の部位については，実際に則した立体要素を用いてモデル化している。底版部，側壁部の RC 部材については計算時間の短縮のため鉄筋はモデル化せず，コンクリートの弾性係数および重量密度を増すことで対処している。境界条件は，覆工下部の一面および背面土下面をすべて完全固定条件として設定している。

また，鋼・コンクリート合成構造を採用したことで，頂版の構造自体の重量が小さくなり，相対的に緩衝材の重量の影響が大きくなると考えられる。この緩衝材の影響は無視できないものであると考えられるので，敷砂緩衝材もモデル化した。

本研究では実現象を忠実に再現するため重錘をモデル化し，それに実験の衝突速度を初速度として入力することで頂版上の敷砂緩衝材に衝突させ，解析を実施している。その際，重錘のリバウンド等を考慮するため重錘と敷砂との間に接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義している。また，本解析では自重の影響も無視できないと考えられるため，これを考慮している。

3. 2. 物性モデル

本数値解析では，鋼・コンクリート剛性構造および敷砂緩衝材は弾塑性体とし，弾塑性体に適用するモデルは簡素化のため LS-DYNA に組み込まれている物性モデルを使用した。図-4 に数値解析に用いた各材料の応力-ひずみ曲線を，表-1 に解析に用いた材料物性値の一覧を示す。

(a)図には充填コンクリートの応力-ひずみ曲線を示す。充填コンクリートは，実構造の材料試験結果より，ひずみが 0.15% に達した状態で降伏し，降伏後は応力一定とするパイリニア型にモデル化した。また，要素の負圧力が圧縮強度の 1/10 に達した段階で，引張応力を伝達しなくなるカットオフを考慮することで，コンクリートのひび割れをモデル化している。

(b)図には鋼板およびボルトの応力-ひずみ曲線を示す。鋼板およびボルトは降伏後の塑性硬化を考慮したモデルである。なお，降伏応力は規格で定められた値を用いることとした。本解析では既往の研究成果に基づき，塑性硬化係数 H' は弾性係数の 1/100 とした。

(c)図には敷砂緩衝材として用いた砂質土の応力-ひずみ曲線を示す。敷砂緩衝材は，重錘衝突時に複雑な挙動を示すため，2 次放物線状の応力-ひずみ曲線を基本に試行錯誤的に物性値を設定して予備解析を実施し決定

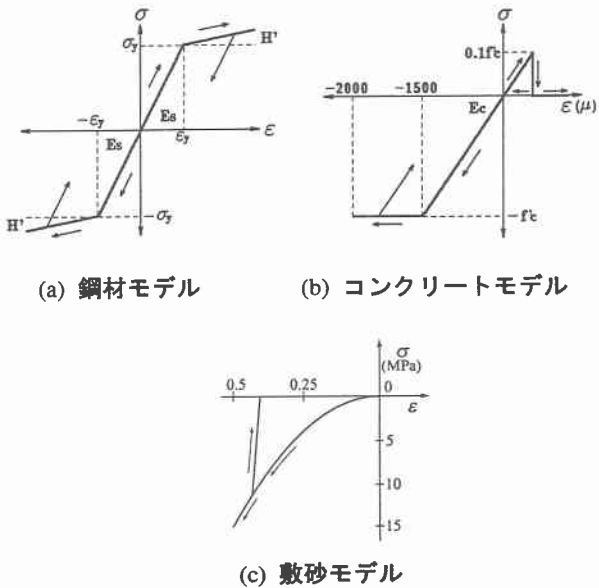


図-4 各材料応力-ひずみ曲線

表-1 解析に用いた物性値一覧

物性	弾性係数 E (GPa)	ポアソン比 ν	密度 ρ (kg/m ³)	材料強度 (MPa)
砂	—	0.06	1,600	—
充填コンクリート	20.0	0.20	2,350	5.4 / -54
RC コンクリート	20.0	0.20	2,450	—
鋼材	206.0	0.30	7,850	350 / -350
背面土	1.0	0.35	1,800	—
ボルト	206.0	0.20	7,850	1103 / -1103
重錘	206.0	0.30	3,121	—

している。敷砂モデルの応力-ひずみ関係は，次式のよう

$$\sigma_{sand} = 50 \varepsilon_{sand}^2 \tag{1}$$

ここで， σ_{sand} は応力 (MPa)， ε_{sand} は体積ひずみである。荷重除荷勾配は $E_{ul} = 10$ GPa と設定している。

なお，コンクリート，鋼材，砂質土ともに降伏条件は von Mises の降伏条件に従うものとした。

側壁，底版部の RC 部材，重錘および背面土については完全弾性体とし，計算時間の短縮を図っている。

4. 実験結果と数値解析結果に関する考察

ここでは，各項目に関して実験結果と数値解析結果を比較して示している。

4. 1. 重錘衝撃力および伝達衝撃応力

図-5 には，重錘衝撃力を実験結果と解析結果を比較する形で示している。

図より，まず重錘衝撃力は，実験結果では重錘衝突から重錘安定まではほぼ正弦半波状の波形を描き，その最大値は 18 ms 時で 1200 kN 程度である。また，50 ms で

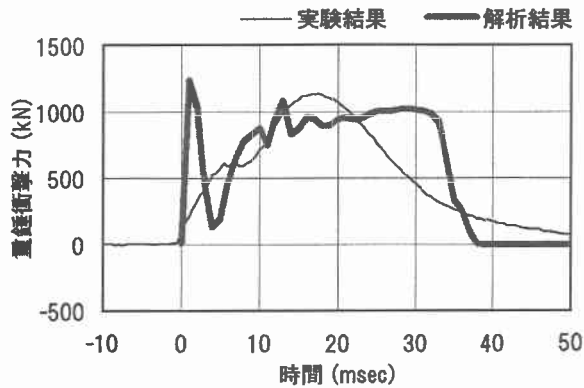
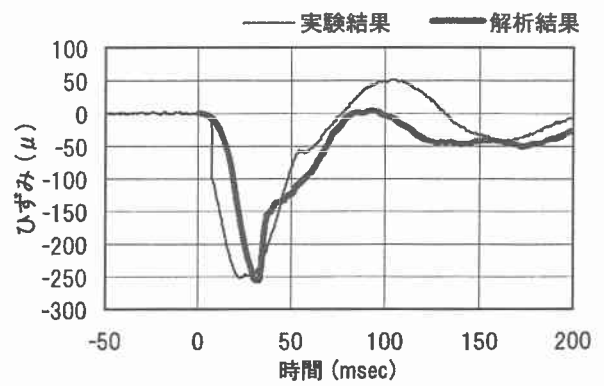


図-5 重錘衝撃力波形



(a) 上側鋼板ひずみ波形

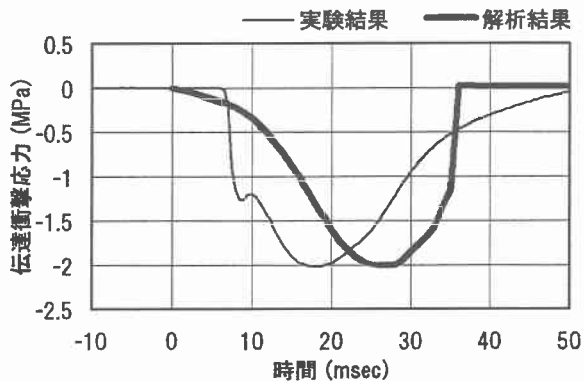
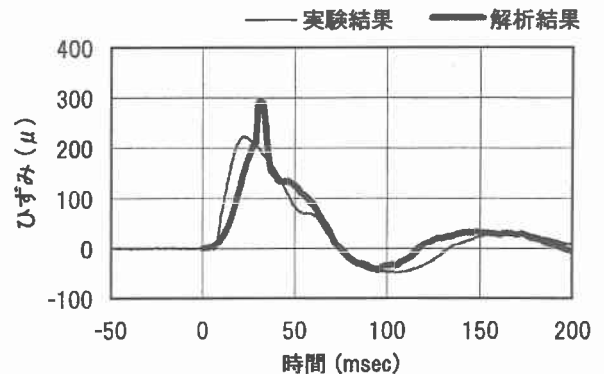


図-6 伝達衝撃応力波形



(b) 下側鋼板ひずみ波形

図-8 重錘直下ひずみ波形

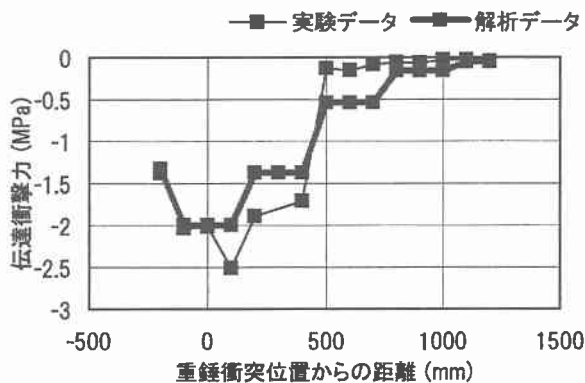


図-7 伝達衝撃応力分布

零レベルの応答となる。それに対し、数値解析結果では周期の短い第1波が発生し、その最大値は1 ms 時で1300 kN に達している。その後、周期の長い第2波が発生しその最大値は1000 kN 程度であり30 ms まで持続する。その後、急激に除荷され40 ms には零レベルの応答となっている。

図-6には重錘衝突部直下の伝達衝撃応力を実験結果と解析結果を比較する形で示す。

図より伝達衝撃応力は、実験結果では重錘衝突から若干遅れ、8 ms より波動が励起され、18 ~ 20 ms で最大となり、2.0MPa の応答を示す。その後は急速に小さくなり、50 ms でほぼ零レベルとなっている。これに対し、

数値解析結果では比較的初期の段階から徐々に立ち上がり、25 ms で実験結果とほぼ等しい最大応答となる。最大応答後は急激に落ち込み、35ms で零レベルとなっている。その互いの応答性状は若干の違いが見られるものの、その最大値はほぼ等しい。

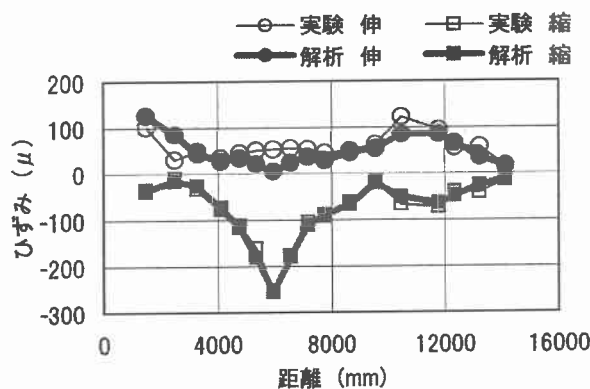
これより、重錘衝撃力については詳細な検討は難しいものと判断されるが、伝達衝撃力の性状は今回の解析手法で大略評価可能であるといえる。

図-7には伝達衝撃力最大値分布を示す。伝達衝撃力の分布範囲は実験結果、数値解析結果ともに重錘直下となる500 mm の範囲内の分布が大きくなっており、これ以上の距離ではその応答は小さい。これより、分布範囲および分布性状については数値解析で詳細に評価可能であることがわかる。

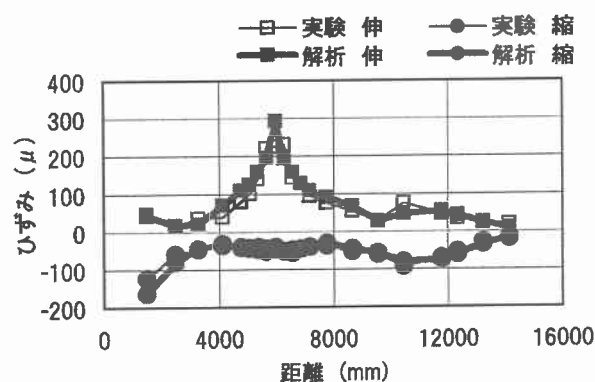
4. 2. ひずみ波形およびひずみ分布

図-8には、重錘直下の頂版合成構造の鋼板のひずみ波形を、実験と解析を比較する形で示している。

図より、実験結果では、上鋼板、下鋼板ともに重錘衝突より10ms ほど遅れて波動が急激に励起し、衝突後25ms ほどで最大応答に達している。その後、自由減衰振動状態に移行している。解析結果では、上鋼板では解析結果のリバウンドの応答が実験結果に比較して小さい値となっており、また、下鋼板では性状はほぼ等しいものの解析における最大応答が実験と比較して大きい応答と



(a) 上側鋼板ひずみ分布図



(b) 下側鋼板ひずみ分布

図-9 ひずみ分布波形

なっているものの、その応答性状をよく再現しているものと考えられる。

図-9には頂版の最大ひずみ分布を実験解析を比較して示している。図より、解析結果は実験結果とほぼ等しく、本数値解析はよく実験を再現しているものと判断される。

4. 3. 変位波形および変位分布

図-10には、重錘直下の変位波形を実験と解析を比較する形で示している。

図より、実験結果と数値解析結果とで波形の立ち上がるタイミング、最大値ともほぼ同様の応答を示していることがわかる。また、リバウンド応答についても解析結果が実験結果に比べ小さいものの、ほぼ同一の応答性状になっていることがわかる。

図-11には各計測点変位の最大値分布を示す。図より、変位分布についても、リバウンド側で解析結果が小さい値となっているが、実験結果と数値解析結果は大略一致している。

これより、変位については本解析手法によってほぼ再現されており、詳細な検討も可能であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、鋼・コンクリート合成構造を用いた落石覆工に対する衝撃応答解析の適用性、またその解析手法の確立を目的として、屏風岩覆道性能実証実験結果をも

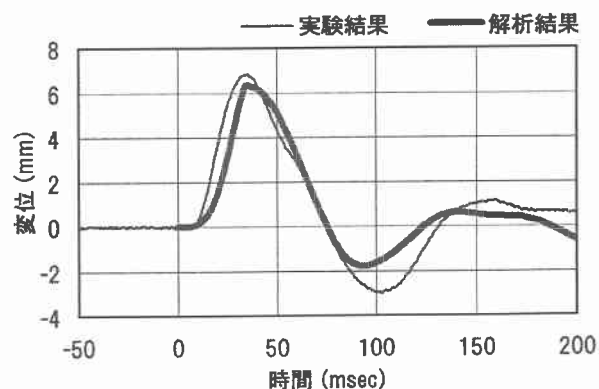


図-10 重錘直下鉛直変位波形

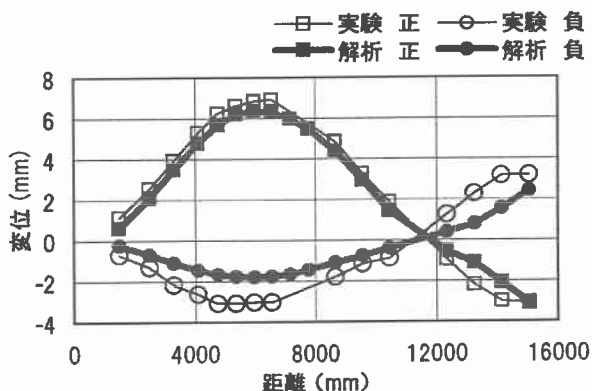


図-11 鉛直変位分布波形

とにした3次元衝撃応答解析を実施し、その適用性を検討した。本研究で得られた結果を整理すると、以下のとおりである。

- 1) 重錘衝撃力については、実験結果と数値解析結果で差異が見られ、数値解析による単純な評価は難しいものと思われる。
- 2) 伝達衝撃応力については、その波形性状において実験結果と数値解析結果で若干の差異が見られるものの、その最大値、分布性状は両者ともほぼ等しく、数値解析によって大略評価可能である。
- 3) ひずみについては、数値解析結果は実験結果をよく再現しており、数値解析による評価は十分に可能であると考えられる。
- 4) 変位についても、数値解析結果はよく実験結果を再現しており、数値解析による評価は十分に可能であるものと思われる。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 今野久志, 近藤悦郎, 安藤智啓: 鋼・コンクリートサンドイッチ梁の対衝撃挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.1633-1644, 2001
- 2) 岸 徳光, 佐藤昌志, 池田憲二, 今野久志, 岡田慎哉: 鋼・コンクリート合成構造を用いた落石覆工に対する衝撃応答解析の適用性, 土木学会北海道支部, 第58号, pp.244-247, 2002