

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

An Applicability of Impact Response Analysis Method for Concrete-Steel Composite Type Rock-Sheds

室蘭工業大学	正員	岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
北海道開発局	正員	佐藤 昌志 (Masashi Sato)
北海道開発土木研究所	正員	池田 憲二 (Kenji Ikeda)
北海道開発土木研究所	正員	今野 久志 (Hisashi Kon-no)
室蘭工業大学	○学生員	岡田 慎哉 (Shin-ya Okada)

1. はじめに

北海道の山間部等、急峻な地形に隣接した道路には道路防災工の一つとして落石覆工が多く設置されている。北海道上川郡国道 39 号線の層雲峡に設置された屏風岩覆道は、鋼・コンクリート合成構造を頂版に採用した新構造形式による落石覆工である。鋼・コンクリート合成構造は従来の RC 部材に比べ、1) 靱性に富んでいること、2) 施工省力化や工期短縮に伴う経費削減、3) 断面の小型化が可能であることによる死荷重の低減、4) 死荷重の低減に伴う耐震性の向上等、多くのメリットが期待される構造形式であり、近年、道路橋や鉄道橋等の土木構造物で多く採用されている^{1)~3)}。北海道開発局では、この構造形式の落石覆工への応用を想定し、数年来実規模模型を用いた重錘落下衝撃実験を実施⁴⁾してきた。屏風岩覆道はこれらの研究成果の基に設計施工されたものである。今後は、この種の構造形式を用いた落石覆工の合理的な耐衝撃設計手法の確立に向けた検討が必要であるものと判断される。

このような観点から、本研究では数砂緩衝材を設置した鋼・コンクリート合成構造形式の落石覆工に関する衝撃応答解析手法の研究に向けた検討を行うことを目的として、屏風岩覆道の耐衝撃性能照査実験結果に関する動的応答解析を試み、実験結果との比較を行うことによって、その妥当性を検討した。なお、数値解析には 3 次元衝撃応答解析汎用コード LS-DYNA Ver.950⁵⁾ を用いている。

2. 実験概要

性能照査実験は、上川郡層雲峡の国道 39 号に施工中である屏風岩覆道の層雲峡側端で実施された。屏風岩覆道は頂版部に鋼・コンクリート合成構造を、柱部にコンクリート充填角型鋼管柱を用いた柱式落石覆工である。写真-1 には屏風岩覆道の写真を掲載している。また、図-1 に屏風岩覆道の概略形状図を示す。

同覆道は、道路軸方向に 18 連の 12,000 mm のブロックから形成されている。その頂版の鋼・コンクリート合成構造は、200 ~ 300 mm 間隔で配置された長さ 300 mm、外径 ϕ 80 mm の鋼管を、幅約 2,000 mm、全長 15,300 mm、厚さ 9 mm 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 枚連続させることで、



写真-1 屏風岩覆道

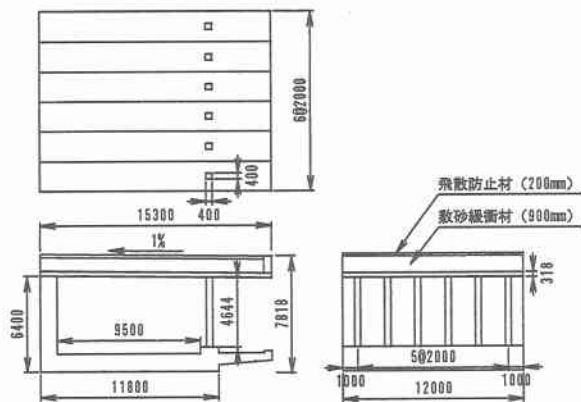


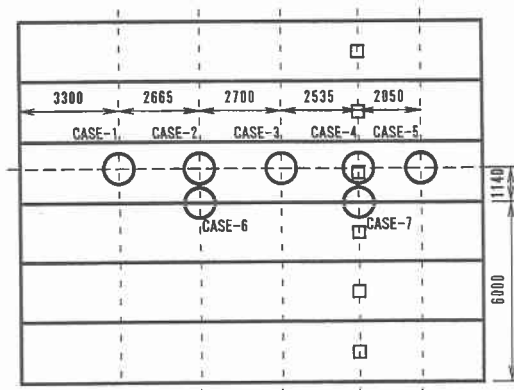
図-1 屏風岩覆道概略形状図

幅 12,000 mm の 1 ブロックを構成している。また、柱部の鋼・コンクリート合成構造は、1 辺 400 mm の正方形断面を有する板厚 16 mm 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り、2,000 mm 間隔、1 ブロックに 6 本配置されている。なお、側壁部および底版部は従来と同様 RC 構造となっており、ブロックごとに目地で区切られている。

本実験は同覆道の頂版上に 2,000 kg の鋼製重錘を大型クレーンで吊り上げ、所定の位置に所定の高さから落下・衝突させることで実施している。本実験では、供用中であることより事前に簡易な解析を実施し、各部材の応力が弾性範囲内に収まる範囲での落下高さを設定した。表-1、図-2 にそれぞれ実験ケース一覧および重錘落下位置を示す。

表－1 実験ケース一覧

ケース名	重錘重量(kN)	落下高さ(m)
Case-1	19.8	10
Case-2		10
Case-3		6
Case-4		8
Case-5		4
Case-6		7
Case-7		8



図－2 各実験ケースにおける重錘落下位置

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－3に各計測点位置を示す。

3. 数値解析仮定

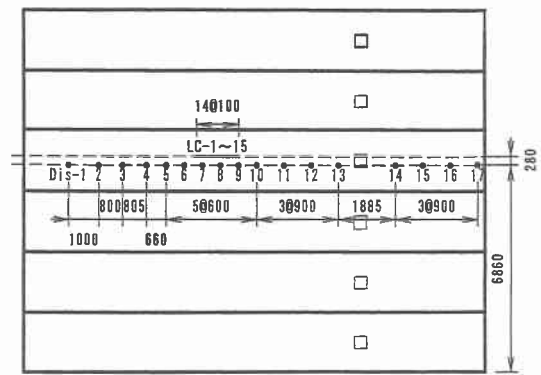
本解析では、覆工本体、重錘および敷砂緩衝材を一部簡素化してモデル化し、解析に用いることとした。図－4に解析に用いた解析モデルを示す。

3.1. 覆工のモデル化

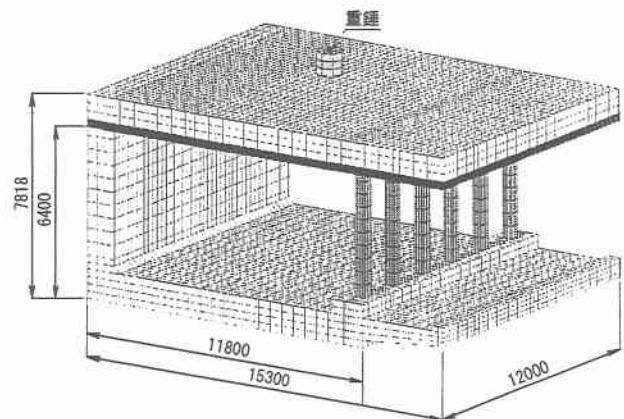
モデル化に際して、基礎地盤や背面土等、周辺地盤は簡略化して考慮していない。また、合成構造の鋼管、ボルトおよびナットは、その大きさが構造全体に比べて小さいことより、詳細なモデル化が困難である。そのため、鋼管、ボルトおよびナットは簡素化し梁要素でモデル化した。なお、鋼管、ボルトおよびナットの簡略化によって失われた重量分は、頂版の充填コンクリートに均等に分配することで重量を等価とした。同様に合成構造の鋼板は厚さが全体に比べ小さいため、板要素を用いることとした。ここで、鋼板はボルト孔が多数あり強度の低減が考えられるため、モデル化の際にその強度低下を考慮し板厚を薄くすることで対処している。

それ以外の部位については、実際に則して固体要素を用いてモデル化している。また、底版部、側壁部の RC 部材に関しては計算時間の短縮を図る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た。なお、境界条件は覆工下部の一面を全て完全固定条件として設定している。

なお、本研究では、重錘の敷砂緩衝材への衝突現象を



図－3 計測点位置図



図－4 解析モデル

含めた構造全体の応答解析の妥当性を検討することとしていることより、敷砂緩衝材も固体要素を用いてモデル化することとした。

解析に用いた汎用コード LS-DYNA は、衝突体に衝突時の速度を初速度として入力することにより衝突体と被衝突体の一体解析が可能である。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し、頂版上の敷砂緩衝材に衝突させている。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は、接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義している。

解析モデルの総節点数、総要素数は全ケースについて同一であり、それぞれ 35226、44966 である。要素積分は梁要素、板要素では 2×2 Gauss 積分、固体要素では 1 点積分としている。なお、数値解析で検討した時間は重錘衝突より 200 ms までとした。解析 1 ケースの所要計算時間は、AlphaStation/DS20E (633MHz) で 1 時間強である。

3.2. 物性モデル

本数値解析では、鋼・コンクリート合成構造および敷砂緩衝材は弾塑性体とし、その構成材料であるコンクリート、鋼材および砂質土に適用するモデルは、LS-DYNA に組み込まれている物性モデルを使用した。図－5には数値解析に用いた各材料の応力－ひずみ曲線を示している。

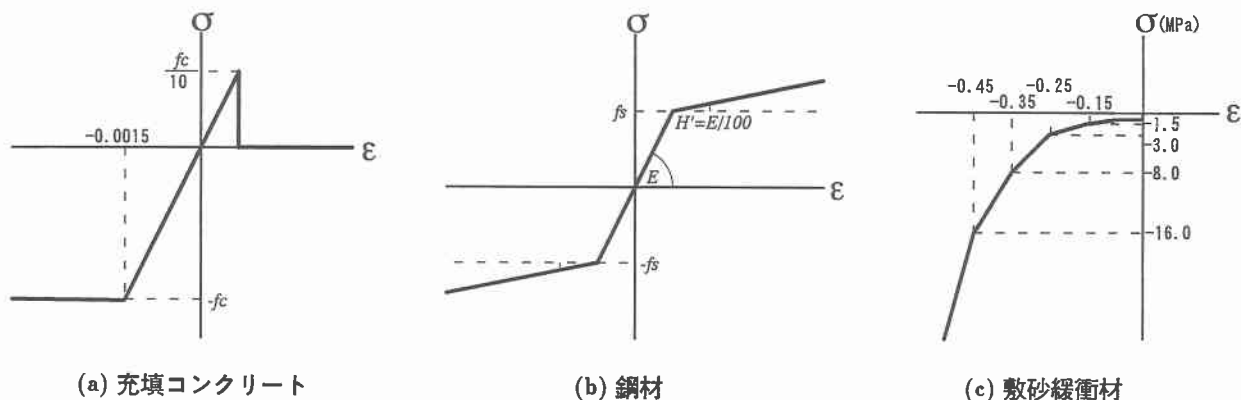


図-5 各材料の応力-ひずみ曲線

表-2 物性値一覧

材料名	弾性係数 (GPa)	材料強度 (MPa)	ポアソン 比	密度 (g/cm ³)
RCコンクリート	30.0	-	0.2	2.45
鋼板	206.0	350	0.3	7.85
ボルト	206.0	700	0.3	7.85
充填コンクリート	36.2	54.3	0.2	3.00
砂	0.6	0.9	0.45	2.30

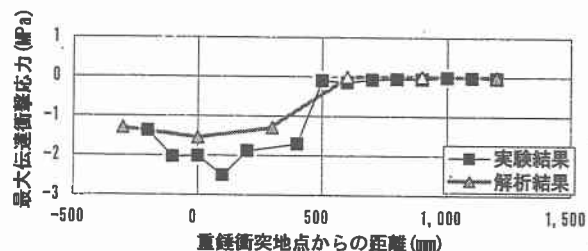


図-7 最大伝達衝撃応力分布

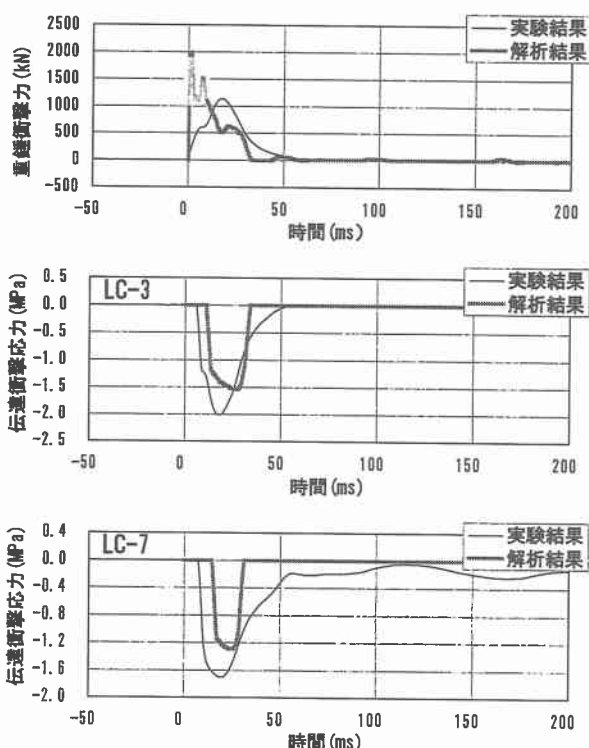


図-6 重錘衝撃力、伝達衝撃応力波形

(a) 図には充填コンクリートの応力-ひずみ曲線を示している。充填コンクリートは、材料試験結果よりひずみが 0.15 % に達した時点で降伏し、降伏後は応力一定とするバイリニア型にモデル化した。なお、ひび割れは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いとするカットオフモデルを用いることにより考慮している。

(b) 図には鋼板およびボルトの応力-ひずみ曲線を示している。鋼板およびボルトは降伏後の塑性硬化を考慮

したモデルを採用した。本解析では既往の研究成果に基づき、塑性硬化係数 H' を弾性係数の 1/100 とした。

(c) 図には砂質土の応力-ひずみ曲線を示している。砂質土に関してもコンクリート要素と同様に、引張応力に関するカットオフを考慮している。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。

また、側壁、底版部の RC 部材および重錘は完全弾性体と仮定することにより、計算時間の短縮を図っている。表-2 には解析で用いた物性値を一覧にして示している。

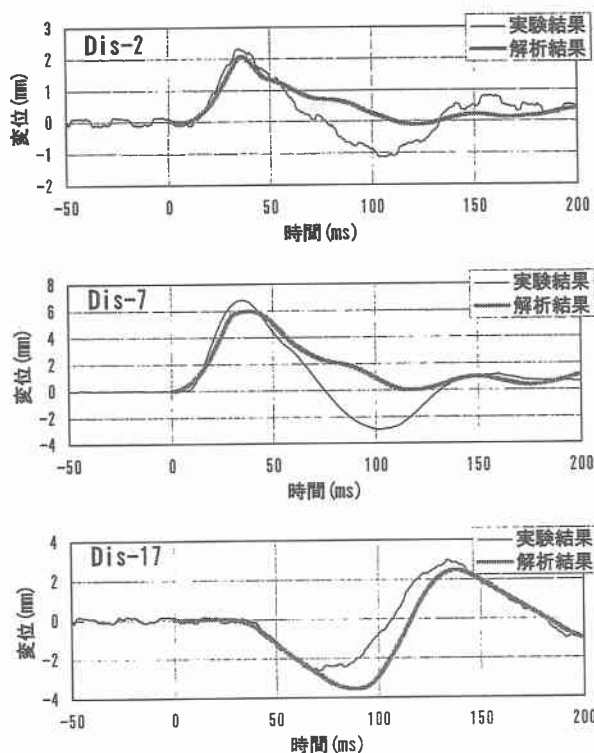
4. 実験結果と数値解析結果に関する考察

実験結果と数値解析結果の比較において、実験結果に関してはノイズ処理を目的として、また解析結果は実験結果との整合性を取るために、いずれの波形に対しても数値的に 2.5 ms の矩形移動平均処理を施している。なお、今回は紙面の都合上、Case-2 についてのみ論ずるものとする。

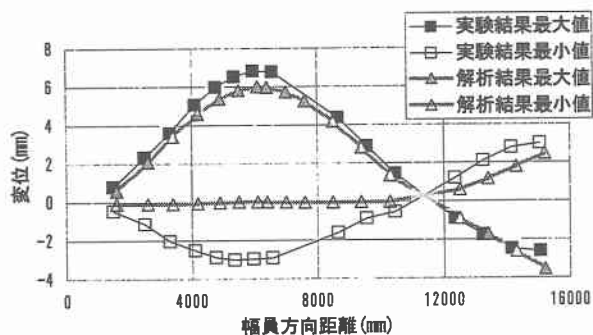
4.1. 重錘衝撃力、伝達衝撃応力

図-6 には、Case-2 における重錘衝撃力および伝達衝撃応力を比較して示している。図より、重錘衝撃力は、実験結果では重錘衝突から重錘安定まで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 以降はほぼ零レベルの応答を示している。それに対し、数値解析結果では衝突初期に大きな衝撃力が発生し、その最大値は 1 ms 時で 2000 kN に達している。その後も最大値の大きな波形が発生しており、零レベルに低減する時間も 34 ms と早い。その性状は実験結果と大きく異なっており、本数値解析手法では再現できていないことがわかる。

次に伝達衝撃応力は、重錘直下から応答が周辺に伝播して行く傾向を示しており、実験結果では 7 ~ 9 ms 時



図－8 各計測点変位波形



図－9 最大変位分布

から大きく立ち上がり、18～20 ms の時点で最大応答値を示している。その後は急速に減衰し、50 ms で零レベルとなっている。数値解析結果では12～16 ms 時から立ち上がり、33 ms で零レベルまで急激に減衰している。しかし、時間的な推移状況が若干異なっているもののその性状は類似の傾向を示しており、伝達衝撃応力の分布性状は本解析手法により大略の評価が可能であるものと推察される。

図－7には伝達衝撃応力の最大値の分布を示している。伝達衝撃応力の分布範囲は実験結果、数値解析結果ともに重錘直下である500 mmの範囲内の分布となっており、数値解析は実験結果に対応していることがわかる。

4.2. 各計測点変位波形

図－8には、Case-2における各計測点の変位波形を一部抜粋して示している。図より、数値解析結果は波形の立ち上がりから最大値に至るまでほぼ実験結果に対応していることがわかる。しかしながら、最大値以後の応

答は、数値解析結果が零レベルに単調減衰しているのに対して、実験結果は減衰自由振動の傾向を示しており、両者で差異が見られる。

図－9には各計測点変位の最大値分布を示している。図より、変位分布に関しても数値解析結果は実験結果と正載荷状態で大略一致している。しかしながら、リバウンド時の分布性状は両者で異なっている。

以上より、変位に関しては正載荷時には提案の解析手法で十分に評価可能であるが、負載荷状態であるリバウンドの応答に関しては評価が不可能であることが明らかとなった。

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基にした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) 数値解析による重錘衝撃力の評価は本解析手法では難しい。
- 2) 伝達衝撃力は、その応答性状、最大値、分布性状とも実験結果と数値解析結果は比較的類似の傾向を示し、その挙動性状は数値解析によってある程度評価可能である。
- 3) 変位波形評価に関しては、数値解析は正載荷時の最大応答時近傍までは非常に良く再現しており、数値解析による最大応答変位の評価は十分可能である。
- 4) しかしながら、変位のリバウンドの応答は実験結果と解析結果で一致せず、評価は難しい。

今後、数値解析で同様の構造物を正当に評価するためには、重錘衝撃力やリバウンドの応答の評価も可能である新たな解析手法の確立が課題である。

参考文献

- 1) 上田多門，塩屋俊幸：鋼コンクリート系サンドイッチ構造，コンクリート工学，第30巻5号，pp.5～20，1992。
- 2) 太田貞次，清宮 理，清水功男：オープンサンドイッチ梁の耐荷力に及ぼすスターラップと主桁間隔の影響に関する静的載荷実験，構造工学論文集，Vol.42A，pp.1147～1156，1996。
- 3) 佐々木保隆，平井 卓，明橋克良：鋼・コンクリート複合ラーメン橋の剛結部に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.44A，pp.1447～1457，1999。
- 4) 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耐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。
- 5) John O.Hallquist：LS-DYNA User's Manual, Version 950, Livermore Software Technology Corporation, 2000.6。