

実規模ロックシェッド模型の三次元動的骨組解析 に関する落石荷重モデルの一検討

Input load model of full-scale RC rock protection gallery using 3D frame analysis.

(株) 構研エンジニアリング	○ 正会員	鈴木健太郎 (Kentaro Suzuki)
(株) 構研エンジニアリング	正会員	牛渡 裕二 (Yuji Ushiwatari)
(株) 構研エンジニアリング	正会員	高橋 浩司 (Koji Takahashi)
(独) 寒地土木研究所	正会員	山口 悟 (Satoru Yamaguchi)
室蘭工業大学大学院	正会員	小室 雅人 (Masato Komuro)
釧路工業高等専門学校	フェロー	岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

急峻な地形を有する我が国の山岳部や海岸線の道路には、様々な落石対策構造物が数多く建設されている。その中で比較的規模の大きな落石に対応可能なものとしてロックシェッドがある。許容応力度法に基づいて設計されているロックシェッドは、過去の被災事例やこれまでの研究成果から、終局限界耐力に対して大きな安全余裕度を有していることが明らかとなっている。これより、衝撃荷重を受けるこの種の構造物に対しても性能照査型設計法への移行は急務であるものと考えられる。

以上の背景により、筆者らは鉄筋コンクリート (RC) 製ロックシェッドに関する性能照査型耐衝撃設計法の確立を目的に、三次元弾塑性有限要素法や三次元動的骨組解析法の適用を提案し、これらの手法が実験結果を大略適切に評価可能であることを明らかにしている¹⁾。しかしながら、実ロックシェッドを対象とする場合には、重錘 (落石) 規模に対するロックシェッド模型の寸法効果や衝撃荷重継続時間と最低次固有振動との関係等が、ロックシェッドの弾性挙動や塑性挙動に複雑に影響するものと推察される。従って、性能照査型耐衝撃設計法の確立に向けて実挙動の把握や上記解析手法の適用性を検証するためには、実現象を再現する実験を実施することが肝要である。

このような観点から、著者らは実構造物の各種耐衝撃挙動データを取得することを目的に、実規模 RC 製ロックシェッドを製作し重錘落下衝撃実験を実施した^{2),3)}。実験に使用した緩衝材は、我が国で一般的に使用されている敷砂と三層緩衝構造 (以後、TLAS)、スイス連邦で一般的に使用されている碎石の3種類である。本研究では、三次元動的骨組解析法を用いた設計手法の妥当性を検証することを目的に、実規模ロックシェッドに関する重錘落下衝撃実験結果との比較検討を行った。なお、本研究はスイス連邦工科大学チューリッヒ校との共同研究プロジェクトとして実施したものであり、緩衝材や重錘落下位置、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. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1には、落石衝撃力 $P = 1,466 \text{ kN}$ に対して許容応力度を満足するように設計した RC 製ロックシェッド試験体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

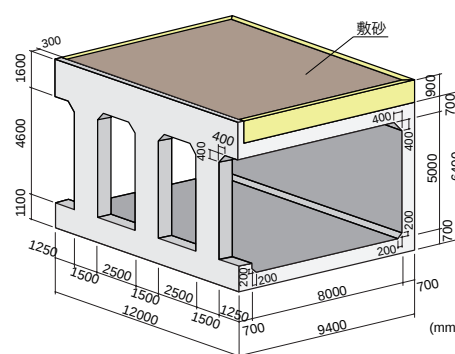


図-1 試験体の形状寸法

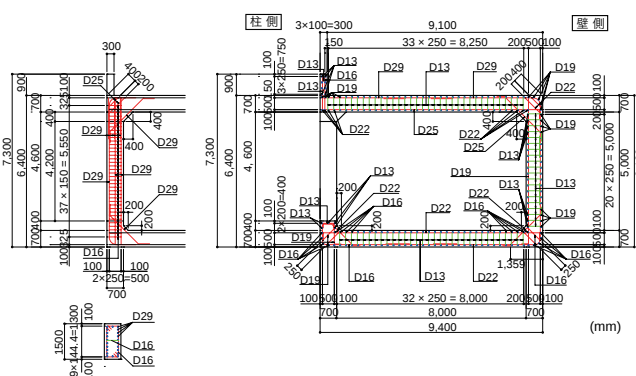


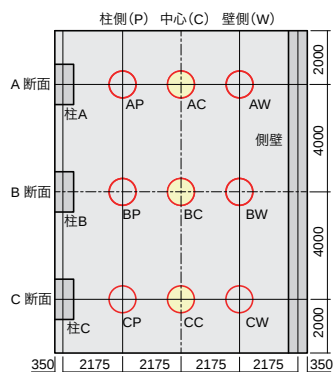
図-2 試験体の配筋状況

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、底版、柱および壁共に 0.7 m である。

図-2には、試験体の配筋状況を示している。鉄筋比については一般的なロックシェッドと同程度としており、頂版下面および上面の軸方向鉄筋としてはそれぞれ D25 を 125 mm 間隔および D29 を 250 mm 間隔 (鉄筋比 0.68 %) で配置している。頂版の配力筋については、現行設計と同様に鉄筋量が軸方向鉄筋の 50 % 程度を目安に、上面が D19、下面が D22 をいずれも 250 mm 間隔で配置している。壁の断面方向鉄筋は、外側が D29、内側が D19 をいずれも 250 mm 間隔、また配力筋は外側が D19、内側が D13 をいずれも 250 mm 間隔で配置している。底版の断面方向鉄筋は、上面が D22、下面が D16 をいずれも 250 mm 間隔で配置しており、配力筋は上面、下面共に D16 を 250 mm 間隔で配置している。柱の軸方向鉄筋は、外側、内側共に D29 を 144 mm 間隔で 10 本、道路軸方向の両面は D29 を 250 mm 間隔

表－1 実験ケース一覧

実験 No.	実験ケース名	緩衝材	载荷位置	重錘質量 (t)	落下高 (m)	入力エネルギー (kJ)
1	S-BC-E20	敷砂	BC	2	1	20
2～7	S-BW-E40～ S-AP-E40	敷砂	BW, BP, BC AC, AW, AP	2	2	40
8, 9	G-AW/AC-E20	砕石	AW, AC	2	1	20
10～15	G-AP-E40～ G-CW-E40	砕石	AP, AC, BC, BW, BP, CW	2	2	40
16	G-CC-E250	砕石	CC	5	5	250
17	T-BC-E3000	TLAS	BC	10	30	3,000
18	T-CC-E3000	TLAS	CC	10	30	3,000
19	S-AC-E250	敷砂	AC	5	5	250
20	S-BC-E1500	敷砂	BC	10	15	1,500
21	G-BC-E1500	砕石	BC	10	15	1,500
22	G-AC-E1500	砕石	AC	10	15	1,500
23	G-CC-E3000	砕石	CC	10	30	3,000



図－3 载荷位置

で配置している。帯鉄筋は、D16 を中間拘束鉄筋を含め、高さ方向に 150 mm 間隔で配置している。コンクリートのかぶり厚は、いずれの部材も鉄筋からの芯かぶり厚で 100 mm としている。鉄筋の材質は全て SD 345 である。また、コンクリートの設計基準強度は 24 N/mm² であり、実験時の底版、柱/壁、頂版の圧縮強度はそれぞれ、30.68 N/mm²、30.19 N/mm²、37.87 N/mm² であった。

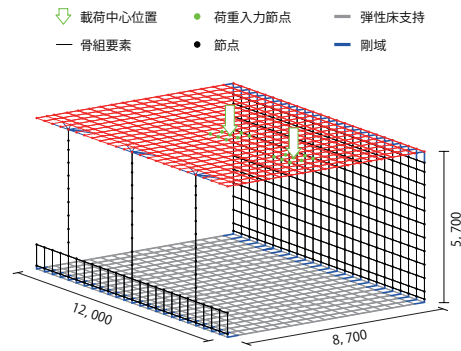
2.2 実験ケースおよび解析ケース

表－1 に実験ケースの一覧を、図－3 に载荷位置を示す。なお、数値解析では実験結果の重錘衝撃力波形を簡略化して入力することによって、実験結果との比較検討を行うこととする。比較検討を行ったケースは、実験 No.20 (S-BC-E1500)、No.21 (G-BC-E1500) および No.23 (G-CC-E3000) の 3 ケースである。

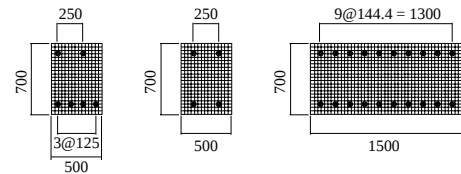
3. 数値解析概要

3.1 解析モデル

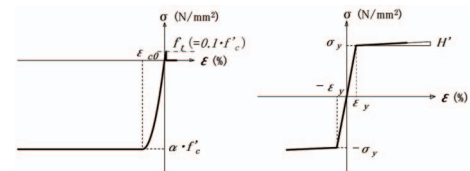
図－4 に本数値解析に用いた三次元的骨組解析モデルを示す。要素分割は 1 要素長を各部材の有効厚程度とし、最小でも有効高の 0.5 倍程度になるように設定している。また、隅角部には道路橋示方書に準拠し剛域を設定している。柱と頂版の接合部には頂版の道路軸方向の変位やねじりを適切に柱に分担するように柱頂部より放射状に剛域を設定している。骨組モデルには断面寸法や各材料定数を考慮したファイバー要素を使用した。ファイバー要素のセルの分割は、図－5 に示すように各セルの中心近傍に軸方向



図－4 三次元骨組モデル



図－5 ファイバーモデルのセル分割状況



図－6 材料物性モデル

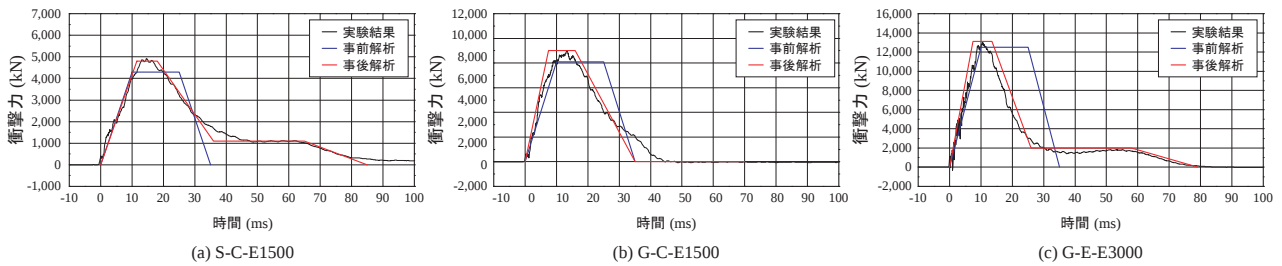
鉄筋が配置されるように設定した。なお、底面には二次元静的骨組解析の場合と同一のパネ定数を設定した。頂版上の敷砂緩衝工の質量は要素に付加することで考慮している。減衰定数は質量比例分のみを考慮し、事前に固有振動解析を行い、鉛直方向最低次曲げ振動モードに対応した固有振動数に対して、 $h = 2.5\%$ に設定した。なお、骨組の総節点数は 1,327、総要素数は 2,553 である。また、本数値解析には Engineer's Studio (Ver.1.07.00) を使用している。

3.2 材料構成則モデル

図－6 には、解析に用いた各材料物性モデルを示している。(a), (b) 図には、それぞれコンクリートおよび鉄筋要素に用いた応力－ひずみ関係を示している。本研究では道路橋示方書に則して設定している。なお、コンクリートの圧縮領域に関しては、三次元弾塑性有限要素解析と同様に相当ひずみが $\epsilon_{c0} = -0.15\%$ に達した状態でコンクリートが降伏するものと仮定している。この際のコンクリートの降伏強度は一軸圧縮強度とした。鉄筋要素に用いた物性モデルは、塑性硬化係数 H' を弾性係数 E_s の 1% とするバイリニア型の等方便化則を適用している。

3.3 入力荷重モデル

図－7 には、実験ケース S-BC-E1500、G-BC-E1500 および G-CC-E3000 の 3 ケースについて、実験結果から得られた重錘衝撃力、事前解析および事後解析に用いた入力荷重を併せて示している。なお、事前解析で用いた入力荷重はロックシェッドの耐衝撃設計を参考に敷砂および砕石ともに荷重作用時間が 35 ms の台形分布状とした。最大衝撃力値は振動便覧式を用いて評価することとし、敷砂の場合



図－7 入力荷重

にはラーメの定数を $\lambda = 1,000 \text{ kN/m}^2$ 、砕石の場合には $\lambda = 5,000 \text{ kN/m}^2$ を代入して算定した。また、事後解析では実験結果を簡略化して入力することとした。荷重範囲は重錘が敷砂に衝突する点を中心に重錘径で作用するものと仮定し、載荷面積比を考慮して各部材に入力している。

(a), (b) 図より、最大値に着目すると、事前解析の入力値は敷砂の場合が $4,300 \text{ kN}$ 、砕石の場合が $8,100 \text{ kN}$ であるのに対し、実験結果はそれぞれ約 $4,900 \text{ kN}$ 、 $8,400 \text{ kN}$ と事前解析より僅かに大きな値となっている。荷重の作用時間についてみると、最大値近傍の継続時間は実験値の方が短く、事前解析における総継続時間は実験値の第1波とほぼ等しいことが分かる。第1波目の力積を求めてみると、実験結果の場合の敷砂、砕石緩衝材でそれぞれ $110 \text{ kN}\cdot\text{s}$ 、 $191 \text{ kN}\cdot\text{s}$ であるのに対し、事前解析の場合には $108 \text{ kN}\cdot\text{s}$ 、 $203 \text{ kN}\cdot\text{s}$ と実験結果の入力波と同程度であることが分かった。一方、(c) 図より、最大値に関しては、事前解析時には $12,500 \text{ kN}$ であったのに対し、実験結果は $13,000 \text{ kN}$ となっており、実験結果が事前解析の値より僅かに大きな値であった。事前解析で仮定した最大値近傍までの継続時間および総継続時間は、いずれも実験値より長くなっているのが分かる。力積を求めてみると、実験結果が $264 \text{ kN}\cdot\text{s}$ であるのに対し、事前解析時の値は $313 \text{ kN}\cdot\text{s}$ と2割程度大きな値であることが明らかになった。

以上より、事前解析における入力荷重の設定において、最大値はいずれの実験ケースに対しても実験結果と類似であるが、荷重継続時間は実験ケースによって若干長く設定した形となっている。これより、事前解析や設計解析において信頼性の高い応答値を得るためには、入力波形を適切に評価決定しなければならず、今後更なる検討が必要であるものと判断される。

4. 実験結果と数値解析結果の比較

図－8 には、実験ケース S-BC-E1,500、G-BC-E1,500 および G-CC-E3,000 の3ケースに対して、載荷点変位波形、道路軸直角方向変位分布および道路軸方向変位分布に関する実験結果と事前解析および事後解析結果の比較図を示している。

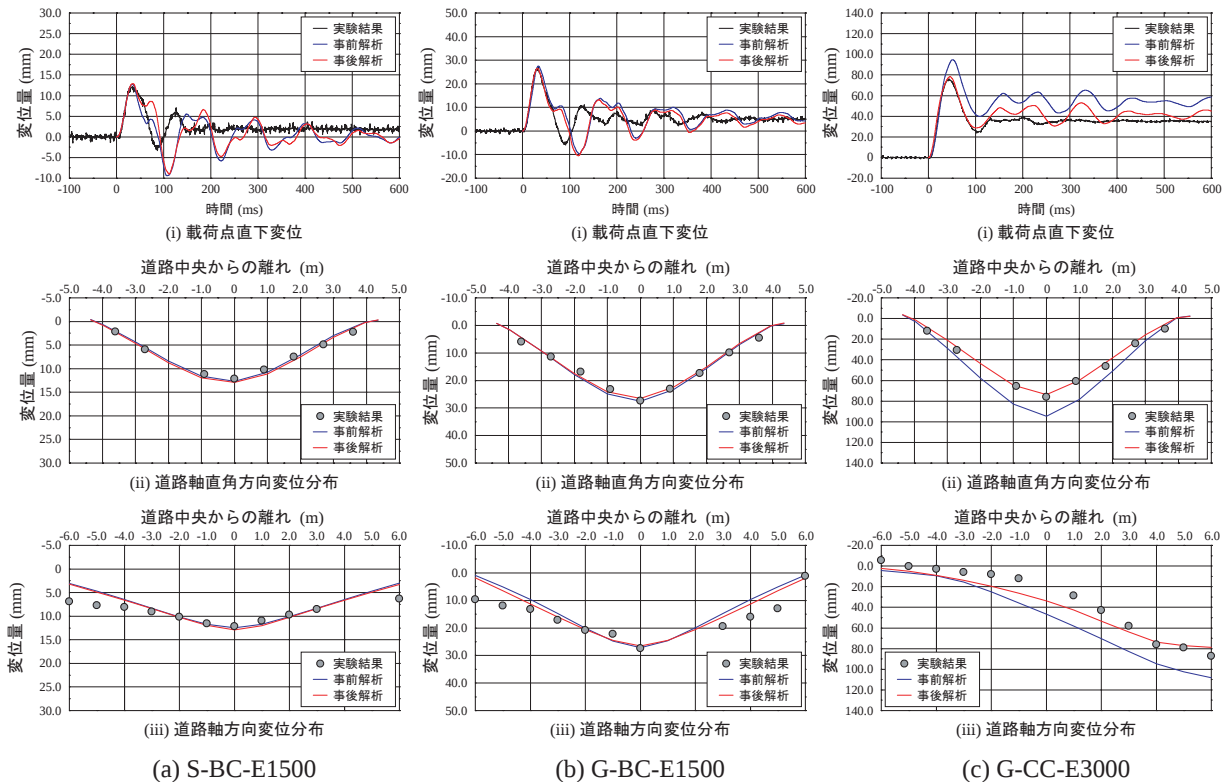
(a) 図より、S-BC-E1,500 における載荷点直下の応答変位波形に着目すると、事前および事後解析結果は、立ち上がり時刻から増加勾配、第1波の最大値まで精度良く実験結果を再現している。最大変位発生以降は、実験結果は早期に振動が収束する傾向を示すのに対して、解析結果は振動が収束していない。しかしながら、大略的にはほぼ再現されているものと判断される。最大変位に関しては、いずれの数値解析結果も実験結果と同程度の値を示している。残

留変位に関しては、いずれの解析結果も実験結果より若干小さな値となっている。変位分布に着目すると、道路軸直角方向分布はいずれの解析結果も実験結果を精度良く再現している。これに対して、道路軸方向分布に関しては、ブロック中央部の変位分布は精度良く実験を再現しているものの、ブロック端部に近づくにつれて実験値との差が拡大する傾向にある。

(b) 図より、G-BC-E1,500 に着目すると、実験ケース S-BC-E1,500 と同様に載荷点直下における変位応答波形は、事前および事後解析結果共に、実験結果を大略再現していることが分かる。最大変位および残留変位は、いずれの数値解析結果も実験結果と同程度の値を示している。変位分布に着目すると、道路軸直角方向分布はいずれの解析結果も実験結果を精度良く再現している。これに対して、道路軸方向分布は、ブロック中央部は精度良く実験結果を再現しているが、ブロック端部に近づくにつれて実験結果との差が拡大する傾向にある。

(c) 図より、G-CC-E3,000 に着目すると、実験ケース S-BC-E1,500 および G-BC-E1,500 と同様に載荷点直下変位応答波形に関しては、事前および事後解析結果は共に実験結果を概ね再現していることが分かる。最大変位および残留変位に関しては、事後解析では両者ともに実験結果と同程度の値となっている。一方、事前解析の場合には、前述のとおり入力荷重の力積で2割程度大きかったことから、最大変位が実験結果より3割程度、残留変位は6割程度大きな値となった。次に変位分布に着目すると、載荷点直下変位応答波形と同様に、事後解析において道路軸直角方向分布は、実験結果を精度良く再現していることが分かる。一方、道路軸方向分布については、実験結果がブロック中央部柱位置から載荷点に向かって急激に変位量が増加しているのに対し、解析では載荷点と逆のブロック端部より載荷点に向かって徐々に変位量が大きくなっており、やや再現性は低い。これは、頂版をモデル化した際の道路軸方向の曲げ剛性がやや大きく評価されたためと推察される。ただし、載荷点近傍の変位量は実験結果と同程度の値を示しており、最大応答値が再現されていることから、実務設計の観点からは十分適用可能であるものと判断される。

以上、実験ケース S-BC-E1,500、G-BC-E1,500、G-CC-E3,000 の3ケースの検証によれば、提案の骨組解析手法は、実験で得られた重錘衝撃力波形を簡略化して入力することにより、敷砂緩衝材を有する実規模 RC 製ロックシェッド模型の衝撃実験結果を概ね再現可能であることが明らかになった。また、入力荷重と解析結果との相関をみると、入力荷重の最大値に多少の差がある場合においても、力積が同程度であることにより解析結果に生じる差は小さく、実験結



図－8 各種応答波形

果を精度良く再現可能であることが明らかとなった。一方、最大衝撃力値がほぼ等しい場合においても入力力積が異なる場合には、応答値が異なることが明らかになった。従って、動的骨組解析に当たっては、入力荷重の作用時間あるいは入力力積の設定が重要である。ただし、本検証は、頂版部のみに着目して行っていることより、今後は柱や側壁、底版の応答変位性状や変位分布性状、作用断面力についても詳細に検証する必要がある。

5. まとめ

本節では、実規模 RC 製ロックシェッド実験の結果を基に、実験結果の入力波形を用いて三次元動的骨組解析を実施し、実験結果と比較することで本解析手法の実規模 RC 製ロックシェッドへの適応性を検証した。本研究で得られた結果をまとめると、以下の通りである。

- 1) 提案の骨組解析法を用いた数値解析結果は、実験で得られた重錘衝撃力波形を簡略化して入力することにより、敷砂緩衝材を有する場合には実規模 RC 製ロックシェッド模型の衝撃実験結果を概ね再現可能である。
- 2) 道路軸直角方向の変位分布は実験結果を精度良く再現可能であるが、道路軸方向に関しては载荷点近傍の再現性は高いが载荷点から離れるほど実験結果との差が大きくなり再現性はやや低くなる。
- 3) 本解析手法を用いることで最大応答値は精度良く実験結果を再現可能なことから、実務設計への適用性は高いものと判断される。
- 4) ただし、提案の骨組解析手法を用いる場合には、入力荷重は最大値に多少の差がある場合でも、入力力積が

同程度であれば解析結果に生じる差は小さく、実験結果を精度良く再現可能である。また、最大値がほぼ等しい場合においても入力力積が異なる場合には解析結果が敏感に変化するため、入力荷重の作用時間あるいは入力力積の設定は適切に評価しなければならない。

以上のことから、提案の骨組解析法は入力荷重の精度が確保されることにより実験結果を比較的精度良く再現可能であることから、コンクリート構造物の耐衝撃問題に十分適用可能であるものと判断される。

参考文献

- 1) 牛渡裕二, 小室雅人, 今野久志, 岸徳光: 衝撃荷重を受ける RC 製ロックシェッドに関する三次元骨組動的応答解析法の適応性検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.703-708, 2013
- 2) 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
- 3) 山口悟, 木幡行宏, 小室雅人, 岸徳光: 敷砂緩衝材を設置した RC 製実規模ロックシェッド模型の衝撃载荷実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.553-558