

実規模ロックシェッド模型の三次元動的骨組解析における要素分割の影響

Influence of element size on 3D frame analysis for full-scale rock protection gallery.

(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	フェロー	川瀬 良司 (Ryoji Kawase)
(株) 構研エンジニアリング	非会員	岡 宣克 (Nobukatsu Oka)
(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	栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)
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。現在、ロックシェッドの設計は落石対策便覧等に基づき許容応力度法¹⁾によって行われている。一方、構造物の設計法は、仕様規定を基本とする許容応力度法からより合理的な性能規定型の設計法への移行が進められている。この様な状況下において、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。このことから、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、RC 梁や RC スラブなどの部材単位での実験や数値解析から研究を開始し、さらには 2/5 および 1/2 スケール RC 製ロックシェッド模型を製作して重錘落下衝撃実験や数値解析を実施している。その結果、RC 梁に関しては、小型から大型に至る数多くの実験結果を基に、入力エネルギー、残留変位あるいは最大変位、静的耐力から構成される性能照査式に対応した設計式を提案している。

また、ロックシェッド模型を対象とした研究では、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も提案し、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²⁾。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ロックシェッド模型の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^{3),4)}。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、実務設計を視野に入れ比較的簡便な三次元

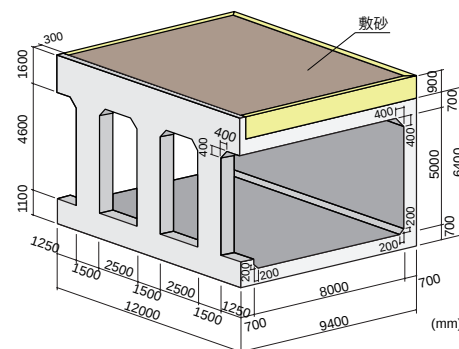


図-1 試験体の形状寸法

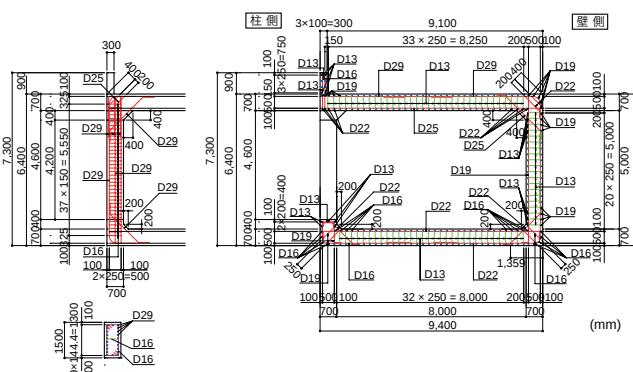


図-2 試験体の配筋状況

動的骨組解析を実規模 RC 製ロックシェッドに適用するためには、要素長や減衰定数が結果に及ぼす影響が大きいと考え、適切な要素長および減衰定数を把握することを目的に要素長、減衰定数を変化させた数値解析を実施し、実験結果と比較検討を行った。

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。

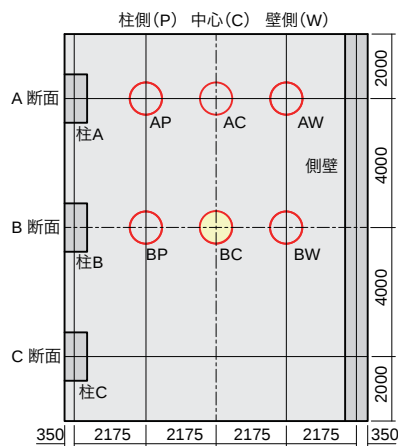
2. 実験概要

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

表－2 実験ケース一覧

実験番号	実験ケース名	緩衝材	载荷位置	重錘質量 m (t)	落下高 H (m)	入力エネルギー E_i (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	碎石	AW, AC	2	1	20
10～15	G-AP-E40～ G-CW-E40	碎石	AP, AC, BC, BW, BP, CW	2	2	40
16	G-CC-E250	碎石	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	碎石	BC	10	15	1,500
22	G-AC-E1500	碎石	AC	10	15	1,500
23	G-CC-E3000	碎石	CC	10	30	3,000



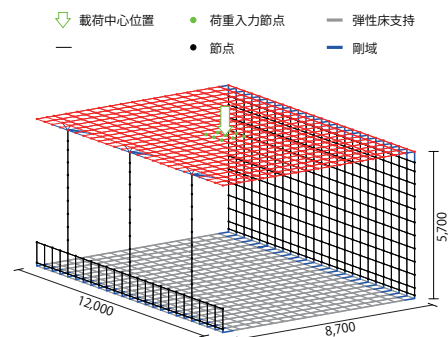
図－3 载荷位置

表－1 解析ケース一覧

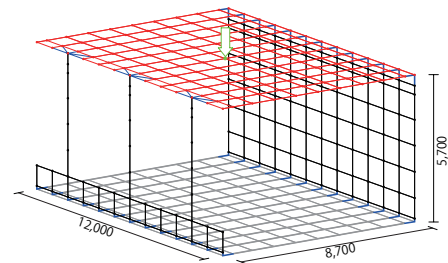
ケース名	要素長 (m)	減衰定数 (%)
L0.5-H1.0～10.0	0.5	1.0～10.0
L1.0-H1.0～10.0	1.0	1.0～10.0
L2.0-H1.0～10.0	2.0	1.0～10.0

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の箱型ラーメン構造である。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。

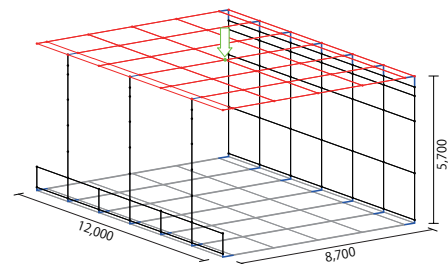
図－2には、試験体の配筋状況を示している。鉄筋比については一般的なロックシェッドと同程度としており、頂版下面および上面の軸方向鉄筋としてはそれぞれD25を125 mm間隔およびD29を250 mm間隔(鉄筋比0.68%)で配置している。頂版の配力筋については、現行設計と同様に鉄筋量が軸方向鉄筋の50%程度を目安に、上面がD19、下面がD22をいずれも250 mm間隔で配置している。壁の断面方向鉄筋は、外側がD29、内側がD19をいずれも250 mm間隔、また配力筋は外側がD19、内側がD13をいずれも250 mm間隔で配置している。底版の断面方向鉄筋は、上



(a) 要素長 0.5 m



(b) 要素長 1.0 m



(c) 要素長 2.0 m

図－4 三次元骨組モデル

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

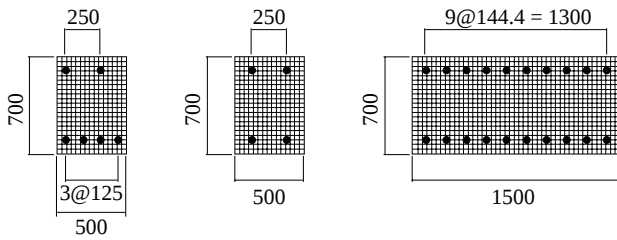
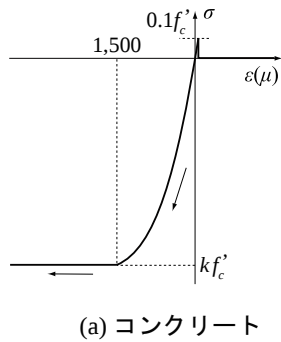
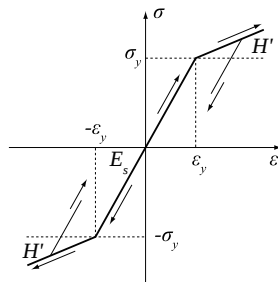


図-5 ファイバーモデルのセル分割状況



(a) コンクリート



(b) 鉄筋

図-6 材料物性モデル

かぶりは、いずれの部材も鉄筋からの芯かぶりで 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-2 に実験ケースの一覧を、図-3 には載荷位置を示す。比較検討対象とした実験ケースは No.20 である S-BC-E1500 (緩衝材：敷砂、載荷位置：中央 (BC)、入力エネルギー：10 tf × 15 m = 1,500 kJ) である。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。既往研究より RC 梁の衝撃問題にファイバーモデルを用いる場合にはその要素分割長は部材厚に対して 0.5~1.0 倍程度に設定することで精度が得られるとの報告がある⁵⁾。したがって、表-1 に示すとおり標準要素長を 0.5 m、1.0 m、2.0 m の 3 種類に変化させたそれぞれのモデルに対して、減衰定数を $h=1.0\%$ 、 2.5% 、 5.0% 、 10.0% に変化させた計 12 ケースを実施した。

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 3 種類の三次

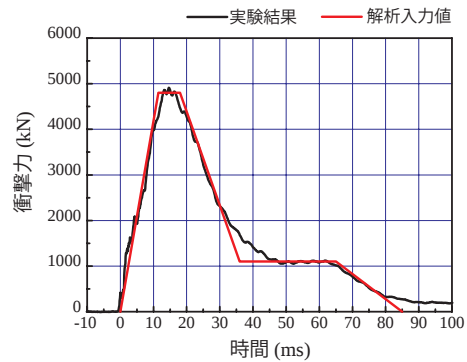


図-7 入力荷重

元動的骨組解析モデルを示す。要素分割は前述したとおり、標準要素長は部材厚を D とした場合、0.5m (0.7D)、1.0m (1.4D)、2.0m (2.8D) の 3 種類とした。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、既往研究と同様に $h=1.0\%$ 、 2.5% 、 5.0% 、 10.0% に変化させた。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。また、引張領域に関しては、コンクリートの引張強度 f_t に達した段階で応力を解放するモデルとし、引張強度 f_t は圧縮強度 f'_c の 1/10 と仮定した。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。

図-7 には、実験ケース S-C-E1500 にて得られた重錘衝撃力および解析にて使用した入力荷重を併せて示している。

4. 実験結果と数値解析結果の比較

図-8 ~ 図-10 には、各要素長における載荷点直下の頂版変位波形を示している。

図-8 に示す標準要素長 0.5 m の波形比較に着目すると、波形の立ち上がりから最大値に至るまでの波形は全ての減衰定数の場合でほぼ同様の性状を示していることが分かる。最大値は減衰定数が大きいくほど小さくなる傾向を示しており、減衰定数 $h=10.0\%$ の場合においては実験結果の最大値を過小評価する傾向であった。最大値以降は実験値と異

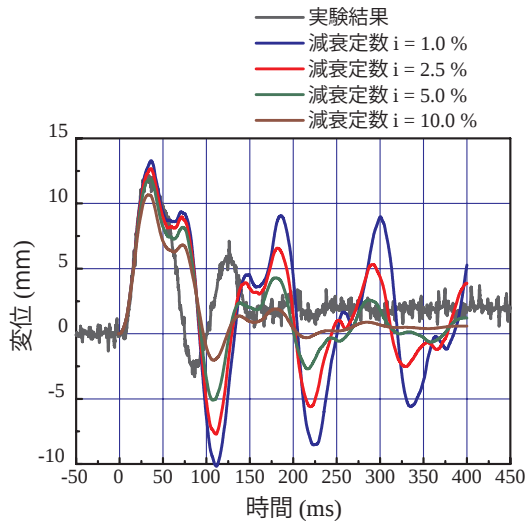


図-8 要素長 0.5 m

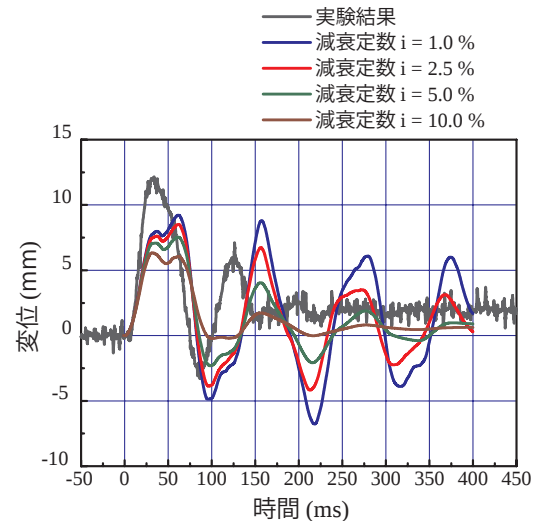


図-10 要素長 2.0 m

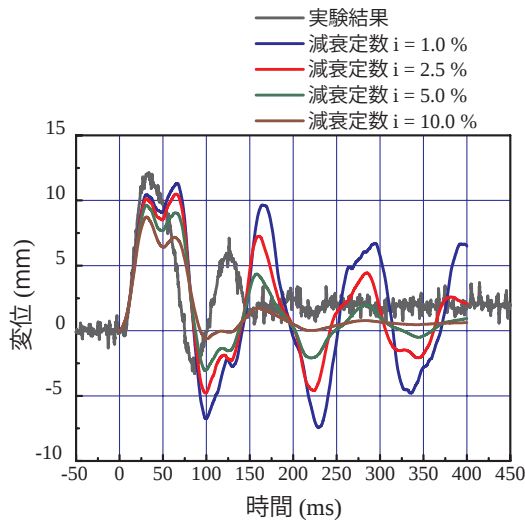


図-9 要素長 1.0 m

なる性状を示しており、実験値が $t = 150$ ms 以降で残留変位付近において微動しているのに対し、解析結果は大きく振動している。特に減衰定数 $h = 1.0\%$ の場合には収束性の悪い結果となった。

図-9 に示す標準要素長 1.0 m の波形比較に着目すると、波形の立ち上がりは概ね一致しているものの、全ての減衰定数において実験結果の最大値には至っていない。収束性については、標準要素長 0.5 m の場合と同様であった。図-10 に示す標準要素長 2.0 m の場合においてはさらに実験結果を過小評価する結果であった。

以上より、標準要素長を 0.5 m、減衰定数 $h = 2.5 \sim 5.0\%$ と設定することで、実験結果を最も良く再現可能であることが分かった。なお、最大応答値以降の波形性状については、いずれのケースにおいても再現出来ていないが、標準要素長を 0.5 m、減衰定数 $h = 2.5 \sim 5.0\%$ と設定することで実験結果を安全側に評価していることから実務設計における解析ツールとして十分適用可能であるものと判断される。

5. まとめ

本論文では、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標準要素長および減衰定数を変化させた三次元動的骨組解析を実施した。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) 標準要素長を 0.5 m、減衰定数 $h = 2.5 \sim 5.0\%$ と設定することで、実験結果を最も良く再現可能である。
- 2) 最大応答値以降の波形性状については、いずれのケースにおいても再現出来ていないが、標準要素長を 0.5 m、減衰定数 $h = 2.5 \sim 5.0\%$ と設定することで、最大応答値は実験結果を安全側に評価していることから実務設計の観点から RC 製ロックシェッドの性能照査型耐衝撃設計のための解析ツールとして十分適用可能であるものと判断される。

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) (社)日本道路協会：落石対策便覧, 2000.6
- 2) 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
- 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
- 4) 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載荷実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.553-558
- 5) 小室雅人, 牛渡裕二, 武田雅弘, 岸徳光：衝撃荷重を受ける RC はりの動的応答性状に関するファイバー要素解析法の適用性, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.529-534