

# 論文 実規模 RC 製ロックシェッドの三次元動的骨組解析における各種解析パラメータの影響に関する一検討

今野 久志\*1・山口 悟\*2・牛渡 裕二\*3・岸 徳光\*4

**要旨:** 本研究では、実務設計を視野に入れ比較的簡便な三次元動的骨組解析を実規模 RC 製ロックシェッドの性能照査型設計に適用することを目的として、各種解析パラメータの影響を実験結果との比較により検討した。その結果、入力荷重を重錘衝撃力波形とした場合の数値解析結果は、標準要素長を部材厚の 0.7 倍 (0.5 m)、減衰定数を  $h = 2.5 \sim 5.0\%$  と設定することで、実験結果の最大変位や道路軸直角方向変位分布および道路軸方向の載荷点近傍における変位分布を概ね再現出来ていることから、実務設計における解析ツールの一つとして十分適用可能であるものと考えられる。

**キーワード:** ロックシェッド, 重錘落下衝撃実験, 三次元動的骨組解析, 敷砂緩衝材

## 1. はじめに

我が国の山岳部や海岸線の急崖斜面に沿った道路には、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構造物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<sup>1)</sup>等に基づき許容応力度法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になっている<sup>2)</sup>。このような観点から、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が望まれている。

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最終目的に、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 縮尺 RC 製ロックシェッド模型を製作して重錘落下衝撃実験を実施している。また、上記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<sup>3)</sup>、これらの手法が実験結果を大略評価可能であることを明らかにしている。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衝撃挙動や弾塑性衝撃挙動に複雑に影響するものと推察される。従

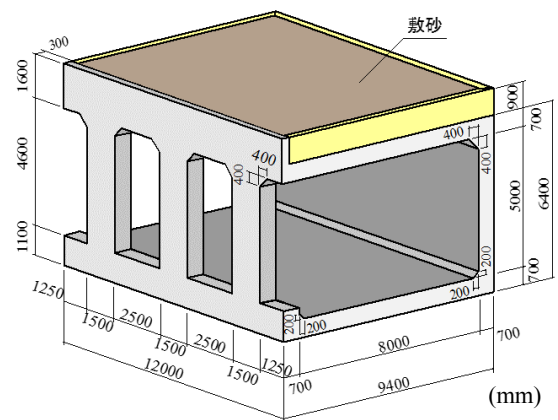


図-1 試験体の形状寸法



写真-1 実規模 RC 製ロックシェッド

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何よりも肝要であるものと判断される。

このような観点から、筆者らは、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

\*1 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム総括主任研究員 博 (工) (正会員)

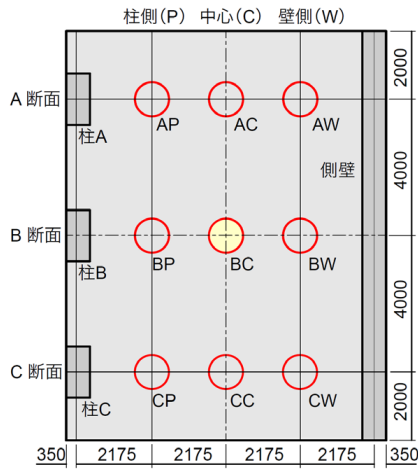
\*2 国土交通省 北海道開発局 網走開発建設部 興部道路事務所 計画課第 2 計画係長 (正会員)

\*3 (株) 構研エンジニアリング 防災施設部部長 博 (工) (正会員)

\*4 (独) 国立高等専門学校機構 釧路工業高等専門学校校長 工博 (正会員)

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
17,18	T-BC/CC-E3000	TLAS	BC, 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－2 载荷位置

ックシェッドを製作し、重錘落下衝撃実験を実施した。本実験は、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<sup>4)</sup>。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砕石の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的骨組解析を実規模RC製ロックシェッドに対する性能照査型設計のための解析ツールの一つとして適用することを目的に、要素長や減衰定数、入力荷重波形の違いや敷砂緩衝材の有無が数値解析結果に及ぼす影響を、载荷点直下の頂版変位波形に着目して実規模実験結果と比較することにより検討を行ったので報告する。

## 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、写真－1には外観を示している。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。柱の道路軸方向幅は1.5 m、部材厚さは、頂版、底版、柱および側壁共に0.7 mである。鉄筋比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。頂版の配力筋は、現行設計と同様に鉄筋量が軸方向鉄筋の50%程度となることを目安に、上面がD19、下面がD22をいずれも250 mm間隔で配置している。側壁の断面方向鉄筋は、外側がD29、内側がD19をいずれも250 mm間隔で配置している。底版の断面方向鉄筋は、上面にD22、下面に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、道路軸方向の両面には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SD345である。また、コンクリートの設計基準強度は24 N/mm<sup>2</sup>であり、実験時の底版、柱/側壁、頂版の圧縮強度はそれぞれ、30.68 N/mm<sup>2</sup>、30.19 N/mm<sup>2</sup>、37.87 N/mm<sup>2</sup>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－2には载荷位置を示している。比較検討対象とした実験ケースはNo.20のS-BC-E1500である。数値解析では、先ず初めに実験結果の重錘衝撃力波形を入力荷重とすることによって、実験結果との比較検討を行うこととする。既往の研究より、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<sup>5)</sup>。したがって、本数値解析では上記要素分割長の範囲内で、かつある程度均等に分割が出来るように標準要素長を部材厚の0.7倍（0.5 m）とした。さらに、要素長を長くした場合には解析モデルの作成や解析時間に対して有利であることから、比較のために標準要素長を部材厚の1.4倍（1.0 m）、2.8倍（2.0 m）とした場合についても検討した。減衰定数に関しては  $h = 1.0\%$ 、 $2.5\%$ 、 $5.0\%$ 、 $10.0\%$ の4種類に変化させた数値解析を実施し、その影響について検討を行った。上記の検討結果を基に、実験結果を精度良く解析可能な要素長および減衰定数を決定し、それらを用いて入力荷重波形や敷砂緩衝材の質量考慮の有無に関

表-2 数値解析ケース一覧

解析 No.	要素長 (m)	減衰定数 (%)	緩衝材の有無	入力荷重波形	Pmax (kN)
1~4	0.5	1.0, 2.5, 5.0, 10.0	有	重錘衝撃力	4,913
5~8	1.0	1.0, 2.5, 5.0, 10.0			
9~12	2.0	1.0, 2.5, 5.0, 10.0			
13	0.5	2.5			
14			重錘衝撃力台形	4,800	
15			設計衝撃力台形	4,300	
16			無	重錘衝撃力	4,913

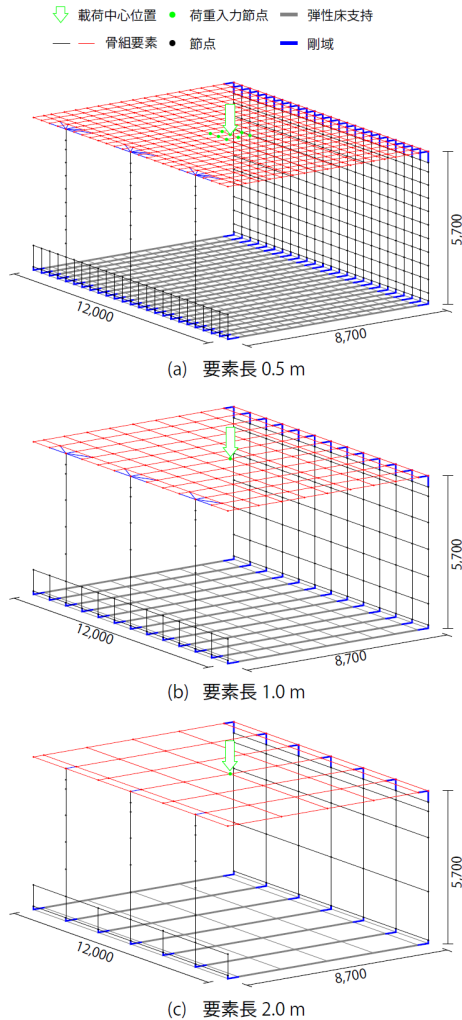


図-3 三次元骨組解析モデル

する検討を実施している。表-2には、数値解析ケース一覧を示している。

### 3. 数値解析概要

#### 3.1 数値解析モデル

図-3には、本数値解析に用いた3種類の三次元骨組解析モデルを示している。要素分割長は前述したとおり、部材厚を $D$ とした場合の標準要素長を、0.5 m ( $0.7D$ )、1.0 m ( $1.4D$ )、2.0 m ( $2.8D$ )の3種類とした。また、試験体内空の四隅にはハンチを設けていることから、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

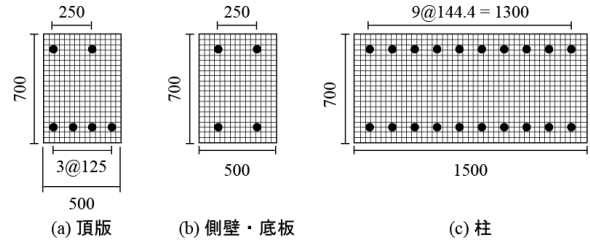


図-4 ファイバーモデルのセル分割状況

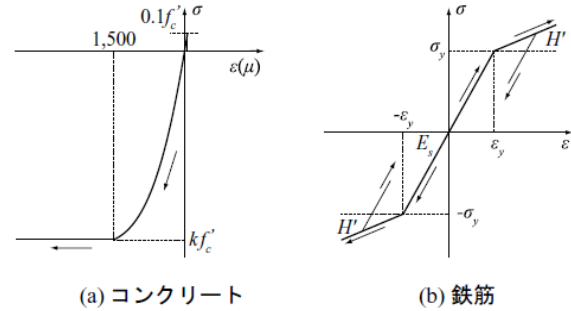


図-5 材料物性モデル

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、材軸が道路軸直角方向の部材に関しては、図-4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ている。また、上記に直交する要素に関しても、同様のセル分割に対して前述2.1に示す配力筋を配置している。なお、底面の境界条件は弾性床支持とし、圧縮方向のみバネを考慮している。ただし、試験体はコンクリート剛基礎上に設置されていることから、バネ定数は十分に大きな値を入力している。コンクリートおよび鉄筋の質量は、道路軸直角方向の部材のみに考慮し、道路軸方向部材は剛性のみを考慮している。なお、ねじり剛性は断面形状に応じて解析ツール内で自動算出され、その値は線形弾性が仮定されている。また、頂版上の敷砂緩衝材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、 $h = 1.0\%$ 、 $2.5\%$ 、 $5.0\%$ 、 $10.0\%$ 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 材料物性モデル

図-5 (a), (b)には、本数値解析に用いたコンクリートおよび鉄筋の材料物性モデルを示している。

材料物性モデルは、道路橋示方書に則して設定している。コンクリートの圧縮領域に関しては、相当ひずみが $\epsilon_{c0} = -0.15\%$ に達した状態で降伏するものと仮定している。この際の降伏強度は一軸圧縮強度とした。また、引

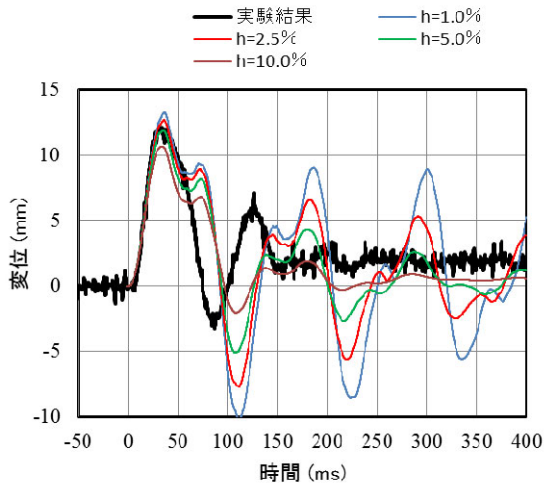


図-6 荷重点変位時刻歴波形 (要素長 0.5 m)

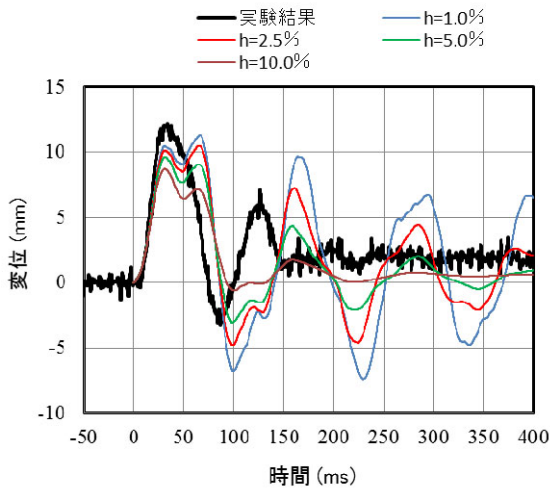


図-7 荷重点変位時刻歴波形 (要素長 1.0 m)

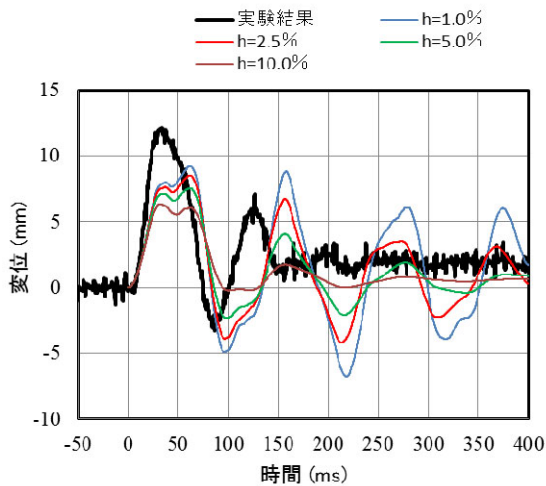


図-8 荷重点変位時刻歴波形 (要素長 2.0 m)

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、その強度 $f_t$ 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%とするパイリニア型の等方硬化則を適用している。

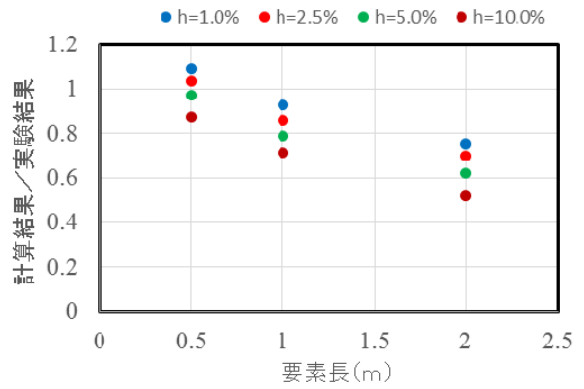


図-9 要素長および減衰定数の影響

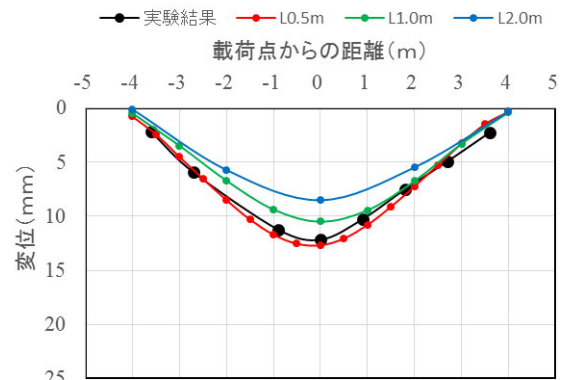


図-10 最大変位発生時の道路軸直角方向変位分布

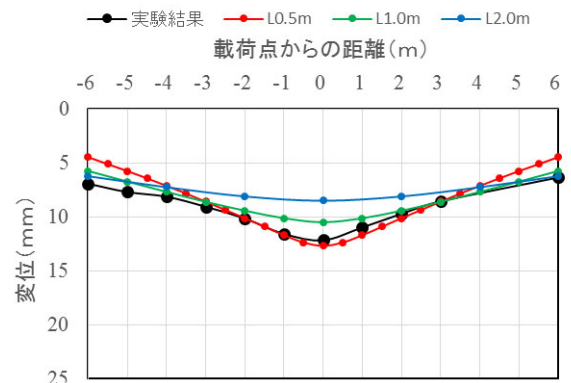


図-11 最大変位発生時の道路軸方向変位分布

#### 4. 実験結果と数値解析結果の比較

##### 4.1 要素長および減衰定数の影響

図-6～図-8には、後述する図-12の重錘衝撃力波形(実験結果)を入力荷重とした場合の各要素長における荷重点直下の頂版変位波形を示している。なお、以後の考察に使用する変位波形および変位量は、いずれも頂版上の任意節点における解析結果である。図-6に示す標準要素長0.5 mの各変位波形に着目すると、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



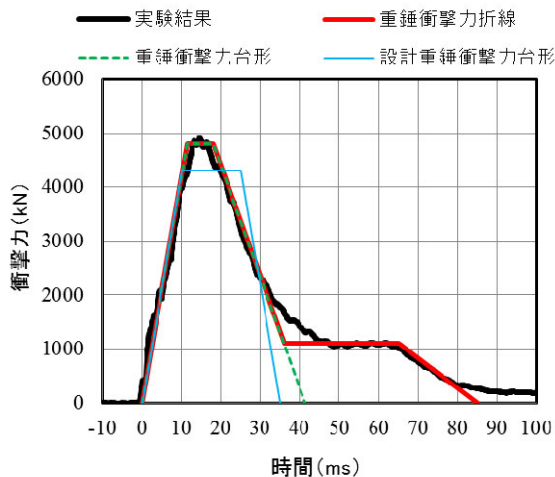


図-12 入力荷重波形

大値を過小評価する傾向であった。最大値以降は実験結果と異なる性状を示しており、実験結果が  $t = 150$  ms以降で残留変位近傍で微動しているのに対し、解析結果は大きく振動している。図-7に示す標準要素長 1.0 m の各変位波形に着目すると、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。図-8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。

図-9には、各要素長と載荷点最大変位に関する実験結果に対する計算結果の比を示している。図より、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、実験結果の載荷点最大変位を最も良く再現可能であることが分かった。

図-10, 11には、減衰定数  $h = 2.5\%$  における計算結果で、載荷点変位が最大値を示す時刻における道路軸直角方向および道路軸方向の変位分布を実験結果と共に示している。

図-10より、道路軸直角方向の変位分布は、いずれの要素長においても実験結果と同様に載荷点直下を最大値とする滑らかな2次放物線状の分布性状を示している。最大変位は、前述の通り要素長が 1.0 m、2.0 m と長くなるに従って実験結果を過小評価している。一方、要素長 0.5 m の場合には、側壁近傍の変位量が実験結果に比較して若干小さく示されているものの、それ以外の解析結果は実験結果を精度良く再現出来ている。

図-11より、道路軸方向の変位分布について見ると、要素長が 1.0 m、2.0 m の場合には載荷点直下の最大変位は過小評価しているものの、両自由端の変位は実験結果と同程度の値を示していることから、要素長を長くすることによって道路軸方向の剛性が試験体に比較して大きく評価されているものと推察される。一方、要素長が 0.5 m の場合には、載荷点直下を含む 6 m 程度の範囲におい

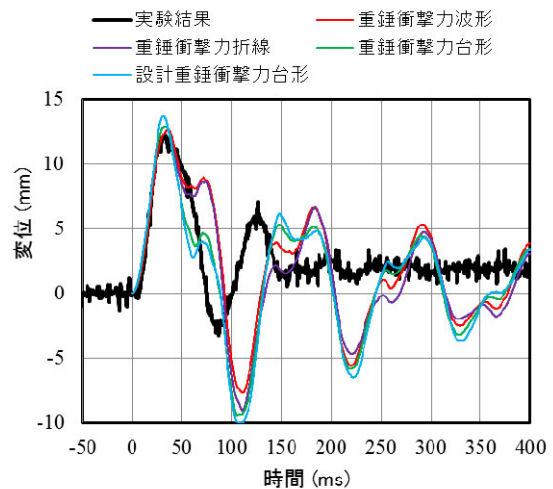


図-13 載荷点変位時刻歴波形(入力荷重波形の影響)

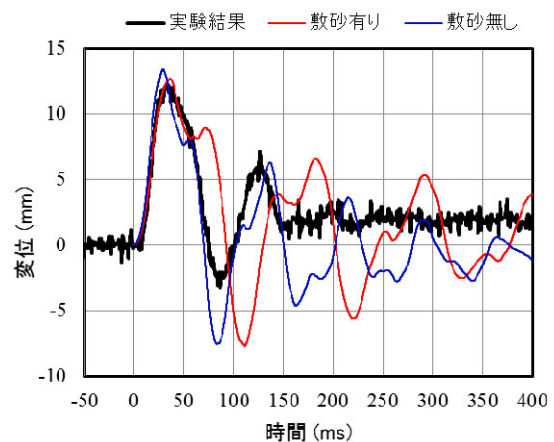


図-14 載荷点変位時刻歴波形(敷砂質量の影響)

て、解析結果は実験結果を精度良く再現している。ただし、両自由端近傍の変位は解析結果が実験結果に対して過小評価していることが分かる。

以上より、入力荷重を重錘衝撃力波形とした三次元的骨組解析は、最大応答値以降の波形性状に関しては、いずれの解析ケースにおいても実験結果を精度良く再現出来ていない。しかしながら、標準要素長を 0.5 m (0.7D)、減衰定数を  $h = 2.5 \sim 5.0\%$  と設定することで、実験結果の最大変位や道路軸直角方向変位分布および道路軸方向の載荷点近傍における変位分布は概ね再現出来ていることから、本解析法は、実務設計における解析ツールの一つとして十分適用可能であるものと考えられる。

#### 4.2 入力荷重波形の影響

図-12には、入力荷重波形の違いによる影響を検討するために用いた入力荷重波形図を示している。黒の実線は、前述までの検討において入力荷重波形として用いた重錘衝撃力波形を示している。重錘衝撃力波形は正弦半波状の波形に台形状の波形が合成されたような性状を示しており、最大重錘衝撃力は  $P = 4,913$  kN、最大値到達までの時間は 14.6 ms、継続時間は 100 ms 程度である。

赤の実線は重錘衝撃力波形を折れ線近似したものであり（以後、重錘衝撃力折線）、最大衝撃力は $P = 4,800$  kN、最大値到達時間は11.5 msで18 msまで継続し、36 msから65 msまで $P = 1,100$  kNの荷重が持続した後、85 msで除荷している。緑の破線は、台形状部分の有無の影響を検討するために重錘衝撃力折線波形の前半の台形部分を抜き出したものであり（以後、重錘衝撃力台形）、最大衝撃力は $P = 4,800$  kN、最大値到達時間は11.5 msで18 msまで継続し、その後41.4 msで除荷している。青の実線は、文献6)を参考に敷砂緩衝材を用いた場合の数值計算に一般的に使用されている台形状に簡易化した入力荷重波形であり（以後、設計重錘衝撃力台形）、最大値到達および最大値から除荷までの時間がそれぞれ10 ms、最大衝撃力継続時間が15 msで、荷重継続時間が35 msである。最大衝撃力は、落石対策便覧に示されている衝撃力算定式より、ラーメの定数を $\lambda = 1,000$  kN/m<sup>2</sup>、割り増し係数 $\alpha = 1.179$ として、 $P = 4,300$  kNとした。

図-13には、要素長を0.5 m、減衰定数を $h = 2.5\%$ とした場合の各入力荷重波形載荷時の載荷点直下における変位波形を実験結果と共に示している。

重錘衝撃力折線を入力荷重とした場合には、重錘衝撃力波形をそのまま入力した場合とほぼ同様の波形性状を示しており、実験結果の最大変位を精度良く再現している。次に、重錘衝撃力台形を入力荷重とした場合には、変位の立ち上がりから最大変位に至るまで、前述の重錘衝撃力折線を入力荷重とした場合と同様の性状を示しており、入力荷重波形の後半部における台形状の平坦部荷重の影響は小さいことが分かる。この部分の影響については、最大変位発生時以降の波形性状の違いとして現れている。設計重錘衝撃力台形を入力荷重とした場合には、波形性状は重錘衝撃力台形を入力荷重とした場合と同様であるが、最大変位に関しては設計重錘衝撃力台形を入力荷重とした場合が過大評価している。これは、最大衝撃力は、前者が後者に対して10%程度小さいものの、最大衝撃力の継続時間が2.3倍程度長いことと推察される。

以上より、入力荷重波形に関しては、最大衝撃力を緩衝材の種類や締固め度によって適切に評価し、台形状に簡易化したモデルを用いることで応答変位の最大値を安全側に評価できる可能性があることが明らかになった。

#### 4.3 緩衝材質量の有無の影響

図-14には、要素長を0.5 m、減衰定数を $h = 2.5\%$ とした場合の敷砂緩衝材の質量の有無による載荷点直下の変位波形を実験結果と比較して示している。なお、入力荷重波形は重錘衝撃力波形を直接入力している。図より、敷砂の質量を考慮しない場合には、波形性状は考慮する場合とほぼ同様であるものの、波形の周期は質量の減少により短くなり、実験結果により類似している。また最

大変位に関しては、考慮する場合よりも若干過大となっており、設計的には安全側の評価を与える。

## 5. まとめ

本研究では、実務設計を視野に入れ比較的簡便な三次元動的骨組解析を実規模RC製ロックシェッドの性能照査設計に適用することを目的として、要素長や減衰定数、入力荷重波形の違いや敷砂緩衝材の質量の有無が数值解析結果に及ぼす影響を、載荷点直下の頂版変位に着目して実規模実験結果との比較により検討した。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) 入力荷重を重錘衝撃力波形とした三次元動的骨組解析において、最大応答値以降の波形性状は、いずれの解析ケースにおいても実験結果を再現出来ていない。しかしながら、標準要素長を部材厚の0.7倍(0.5 m)、減衰定数を $h = 2.5 \sim 5.0\%$ と設定することで、実験結果の最大変位や道路軸直角方向変位分布および道路軸方向の載荷点近傍変位分布を概ね再現出来ることから、本解析法は実務設計における解析ツールの一つとして十分適用可能であるものと考えられる。

2) 入力荷重波形に関しては、最大衝撃力を緩衝材の種類や締固め度によって適切に評価し、台形状に簡易化したモデルを用いることで応答変位の最大値を安全側に評価できる可能性がある。

3) 敷砂緩衝材質量の考慮の有無に関しては、解析結果の波形性状は両者とも類似であるものの、最大変位に関しては考慮しない場合が若干大きく、設計的には安全側の評価を与える。

#### 参考文献

- 1) (社)日本道路協会：落石対策便覧，2000.6
- 2) 熊谷守晃：ルランベツ覆道における落石災害に関する報告，第2回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp.286-290，1993.6
- 3) 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
- 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.553-558，2014
- 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.529-534，2014
- 6) 土木学会：構造工学シリーズ8 ロックシェッドの耐衝撃設計，1998.11.1