

# 論文 RC製ロックシェッド模型の重錘落下衝撃挙動に関する二次元骨組解析法の妥当性検討

牛渡裕二<sup>\*1</sup>・川瀬良司<sup>\*2</sup>・今野久志<sup>\*3</sup>・岸 徳光<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本検討では、RC製ロックシェッドにおける性能照査型設計法の確立を目的に、1/2縮尺RC製ロックシェッド模型の重錘落下衝撃実験に対して、二次元骨組動的解析による再現を試みた。検討の結果、1) 二次元骨組動的解析を用いて、道路軸方向の有効長を考慮することで頂版部の応答変位は精度良く再現が可能となる。2) 各部材によって有効長が異なり、入力エネルギーの増加と反比例し有効長は小さくなる。3) 有効長を柱間隔として二次元骨組動的解析を用いて設計することで安全側の評価が可能となり、許容応力度設計法と比べ、より合理的な設計が可能となる。等が明らかになった。

**キーワード:** RC製ロックシェッド, 性能照査型設計法, 二次元骨組動的解析

## 1. はじめに

我が国の山岳部や海岸線における道路網には、落石災害を防止するための落石防護構造物が数多く建設されている。その落石防護工の一つとしてRC製ロックシェッド(以後、ロックシェッド)が挙げられる(写真-1参照)。これらのロックシェッドは一般に落石対策便覧<sup>1)</sup>に基づき、以下の要領で設計が行われてきた。すなわち、1) 設計対象となる落石の比高や斜面の状態から、落石衝突エネルギーを決定する。2) 決定された落石衝突エネルギーに対して、落石対策便覧で規定している衝撃力算定式を用いることにより最大衝撃力を決定する。3) この最大衝撃力を静的荷重に置き換え、二次元骨組静的解析により断面力を算定する。4) 求められた断面力に対して、許容応力度法を適用し、断面設計を行う。

上記設計法に対し、筆者らはロックシェッドの耐衝撃挙動を考慮した合理的な設計法を確立するために、実際のロックシェッドを用いた弾性範囲内の重錘落下衝撃実

験および数値解析的検討を実施し<sup>2),3)</sup>、敷砂あるいは三層緩衝構造を設置した場合の耐衝撃挙動を詳細に把握している。また、これらの実験結果をもとに三次元衝撃応答解析を実施し、実挙動を考慮した設計法を提案しており、これらの成果は北海道開発局におけるロックシェッドの設計要領<sup>4)</sup>に取り入れられている。

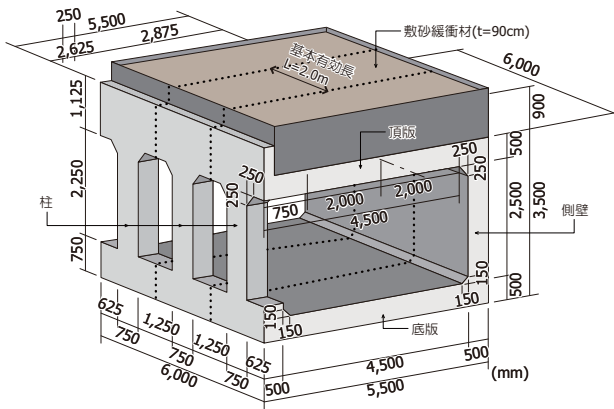
一方、許容応力度法を用いた設計は、耐力的に過大でコスト高となる傾向があるため、近年、橋梁等の設計では従来の許容応力度法から性能照査型設計法に移行しつつあるのが現状である。ロックシェッドにおいても、同様に性能照査型設計法の確立が求められているところである。しかしながら、その設計は比較的簡易な設計法にしなければ、実務設計が困難になる。ロックシェッドの場合には、衝撃荷重を考慮した設計法が必要となるため、三次元弾塑性衝撃応答解析を基礎として、最終的に二次元解析への移行を図ることが望ましいと考えられる。二次元解析へ移行するためには、基礎となる三次元弾塑性衝撃応答解析の精度向上が必要となるが、緩衝工となる敷砂の構成則を一意に設定することが難しいなど、実挙動を詳細にモデル化するには緩衝工の構成則あるいは緩衝工を介した作用力についてのさらなる検討が必要である。

このような背景のもと、本研究ではロックシェッドの性能照査型設計法の確立に向けたアプローチの一つとして、実験で得られた重錘衝撃力が敷砂緩衝工を介してロックシェッドに作用する伝達衝撃力を設定し、二次元骨組モデルに入力して動的解析を実施した。さらに本解析結果を実験時挙動と比較し、今後の性能照査型設計法に基づいた設計手法への適応性について検討を行った。

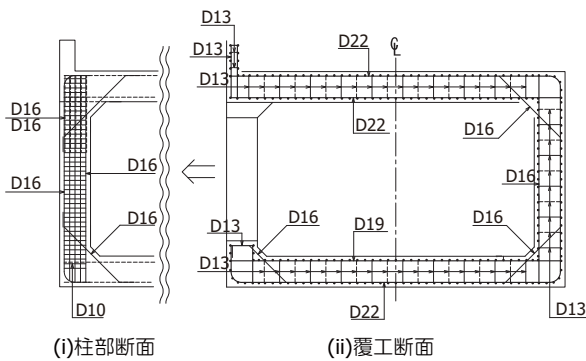


写真-1 RC製ロックシェッドの一例

\*1 (株)構研エンジニアリング 防災施設部次長 (正会員)  
 \*2 (株)構研エンジニアリング 取締役 博(工) (正会員)  
 \*3 (独)土木研究所寒地土木研究所 寒地構造チーム 博(工) (正会員)  
 \*4 室蘭工業大学大学院教授 工学研究科 ぐらし環境系領域 工博 (正会員)



(a)形状寸法



(b)配筋状況

図-1 ロックシェッド模型の形状寸法および配筋状況

## 2. 検討条件

### 2.1 実験概要

一般的に、実RC製ロックシェッドは1ブロックが12mの構造になっている。また、箱型断面を有しているが、左右非対称の柱部と側壁部、上下には頂版と底版による構造となっており、部材毎に剛性が異なる。このことから、本実験では、より実物大に近いロックシェッド模型(縮尺:1/2)として、頂版に対して45kJの落石エネルギーに対応する断面を設計製作した(3.4にて後述)。敷砂緩衝工は、頂版上面に重錘径程度の $t=90\text{ cm}$ 厚さで設置している。

図-1(a)には、衝撃実験に使用したロックシェッド模型の形状寸法、(b)図にはその配筋状況を示している。ロックシェッドの断面形状は、頂版部材厚、側壁および柱部材厚が500mm、内空幅4,500mm×高さ2,500mmとなっており、道路軸方向の1ブロック延長は6,000mmである。頂版下面および上面の軸方向鉄筋にはD22を125mm間隔で配置し、配力筋は軸方向鉄筋の50%を目安に上面、下面共にD13を125mm間隔で配置している。また、芯かぶりは75mmとなっている。鉄筋の材質は全てSD345であり、降伏強度はD22が381~400MPa、D13が378~397MPa、コンクリートの圧縮強度は $f_c=28.3\text{ MPa}$ であった。

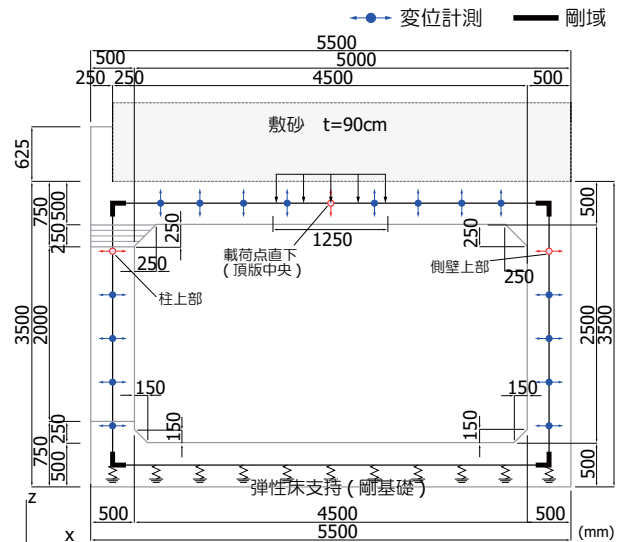


図-2 解析モデル

表-1 解析ケース一覧

解析ケース	落下高さ $H$ (m)	入力エネルギー $E$ (kJ)
S-II-H10.0	10	980
S-II-H15.0	15	1,470
S-II-H20.0	20	1,960

実験は繰り返し载荷で行うこととし、重錘質量10,000kgを、落下高さ $H=1.0\text{ m}$ 、2.5m、5.0m、10m、15m、20m、25mで漸増させて実施した。ただし、落下高さ $H=25\text{ m}$ の際には、大きく破損することが予想されたため、変位計測は行わずに実験を実施している。

### 2.2 二次元骨組動的解析概要

表-1には、解析ケースの一覧を示している。本研究では、落下高さ $H=10\text{ m}$ 、15m、20mの3ケースについて二次元骨組動的解析による検討を実施した。また、解析においては繰り返し载荷による供試体の損傷状態は考慮していない。

#### (1) 数値解析モデル

図-2に本数値解析に用いた解析モデル図を示す。骨組モデルは実験供試体の頂版・側壁・柱・底版コンクリート中央に配置するようモデル化している。部材の要素分割は、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。骨組モデルにはファイバー要素を使用し、各部材の断面寸法を設定している。ファイバー要素のセル分割については、図-3に示すようにセル要素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。断面設定の際には実験供試体延長6.0mに対し、柱間隔(2.0m)をモデル化し

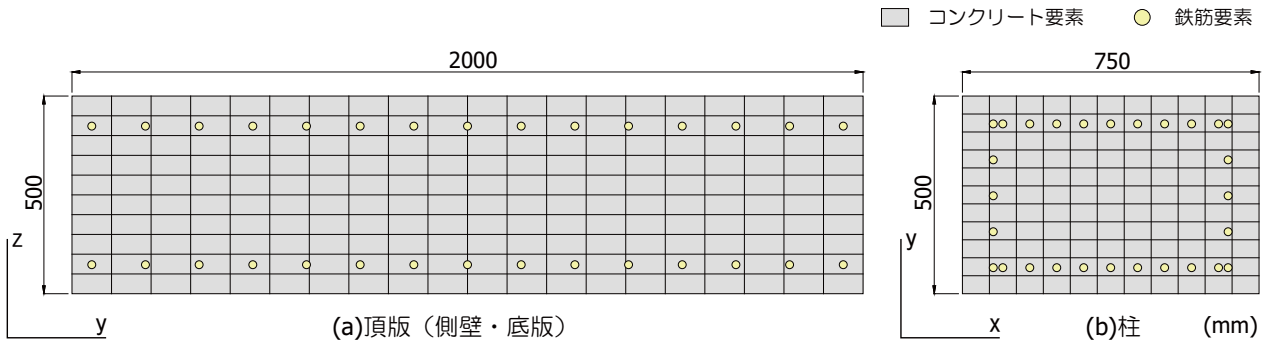
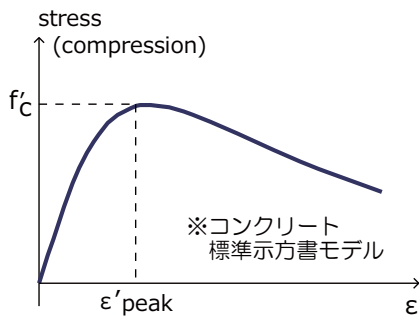
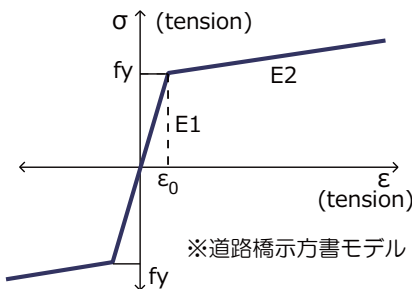


図-3 ファイバー要素断面のセル分割 (基本有効長)



(a) コンクリート



(b) 鉄筋

図-4 材料物性モデル

ている。境界条件は底面を弾性床支持とし、圧縮方向のみバネを考慮している。ただし、剛基礎を模擬するため、バネ定数は十分に大きな値を入力している。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、質量比例と剛性比例を考慮するものとし、事前に本解析モデルを用いた固有振動解析を行い、鉛直方向最低次および2次の固有振動数までを考慮し  $h = 10\%$  と設定している。なお、減衰定数の設定にあたり、異なる減衰定数を用いた事前解析を実施したところ、結果にほとんど差異が見られなかったことから、解析上の収束性に優れる  $h = 10\%$  を減衰定数として採用した。

なお、骨組モデルの総節点数、総要素数はともに70である。また、本数値解析には MIDAS Civil 2009 Ver.7.4.0 を使用している。

## (2) 材料物性モデル

図-4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、それぞれ、コンクリート要素および鉄筋要素に用いた応力-ひずみ関係を示しており、それぞれコンクリート標準示方書<sup>5)</sup>および道路橋示方書<sup>6)</sup>に則して設定している。なお、コンクリートの引張領域は考慮せず、コンクリート標準示方書に基づき、ピーク値を超えた場合の除荷・再載荷には、弾性剛性残存率を考慮することとした。

## (3) 衝撃力入力モデル

図-5には、解析に用いた衝撃力波形を示している。入力波形は実験から得られた重錘衝撃力波形を簡易化し、載荷範囲にある節点に等分割して与えている。載荷範囲は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、設定した(重錘径  $D = 125 \text{ cm}$ )。なお、前述の通り、敷砂はその質量のみを頂版に付加しており、載荷荷重は直接頂版へ入力している。

## (4) 有効長について

本論文では、有効長をパラメータとして検討を進めることとする。有効長は、立体構造物であるロックシェッドを平面骨組として計算する場合に、落石荷重により躯体に生じる曲げモーメントまたはせん断力が立体構造として計算した場合と等価になるように設定した平面骨組における道路軸方向の長さを示す。本解析では、有効長を求めるための基本有効長を、柱間隔  $L = 2.0 \text{ m}$  と設定している。

## 3. 衝撃実験結果と二次元骨組動的解析結果の比較

### 3.1 変位波形

図-6には、落下高さ  $H = 15 \text{ m}$  の場合における載荷点直下(頂版中央)、柱上部および側壁上部的変位波形に関して、実験結果と有効長を変化させて行った解析結果を比較して示している。載荷点直下について見ると、解析結果の波形は、実験値に比べて若干早く立ち上がっているものの、第1波目から残留変位に至るまでほぼ同様の性

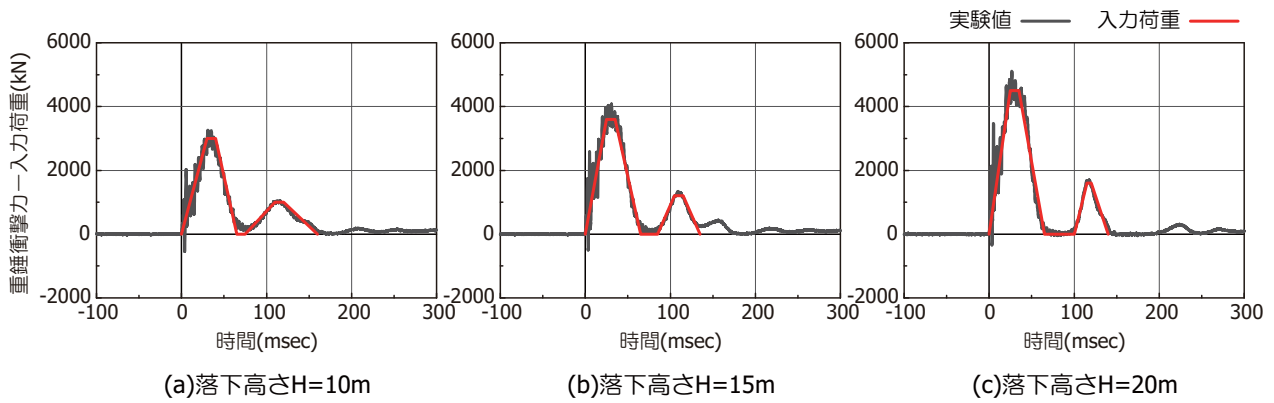


図-5 衝撃力入力モデル

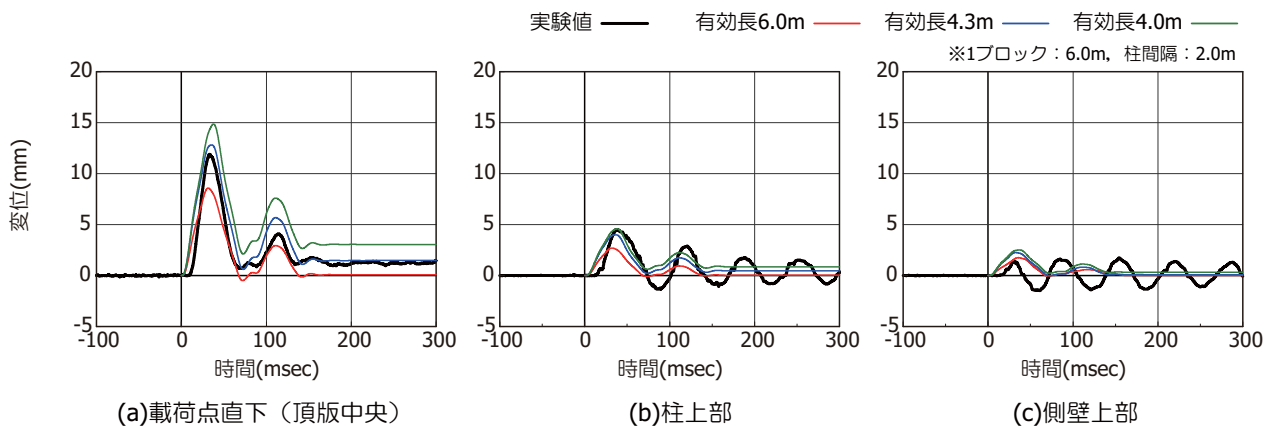


図-6 変位波形（落下高さ  $H = 15\text{ m}$ ）

状を示していることがわかる。最大変位および残留変位に着目すると、有効長が  $L = 4.3\text{ m}$  の場合において、最大変位は実験結果が  $11.9\text{ mm}$  に対して解析結果が  $12.8\text{ mm}$ 、残留変位は、実験結果が  $1.4\text{ mm}$  に対して解析結果が  $1.5\text{ mm}$  となり、両者は概ね一致する結果となった。柱上部について見ると、実験結果では第1波目に最大値を示し、その後、減衰自由振動となっている。解析では第1波目の最大値までは概ね再現されているが、第2波以降もなく振動が収束し減衰自由振動は再現できていない。側壁上部については、実験結果では第2波目に最大値を示し、それ以降は柱上部と同様に減衰自由振動となっている。数値解析の場合には、第1波目に最大値に達し、解析結果は第2波以降は振動が収束し、柱上部と同様に減衰自由振動は再現できていない。一方、柱上部および側壁上部における最大変位および残留変位に関して、実験結果と解析結果を比較すると、柱上部については、有効長  $L = 4.0\text{ m}$  の場合に、最大変位は、実験結果が  $4.5\text{ mm}$  に対して解析結果が  $4.6\text{ mm}$  と同程度であり、残留変位についても減衰自由振動の振動中心近傍の値となりほぼ再現できていると判断される。側壁上部では、有効長  $L = 6.0\text{ m}$  とした場合に、最大変位は、実験結果が  $1.7\text{ mm}$  に対して

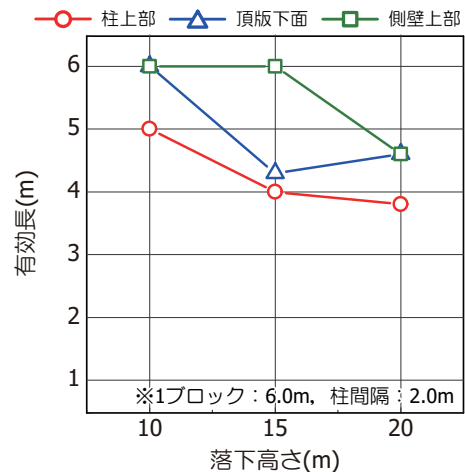


図-7 入力エネルギーと有効長の関係

解析結果が  $1.6\text{ mm}$  と同程度、残留変位についても実験結果と同様に零となる結果が得られた。

### 3.2 入力エネルギーと有効長

図-7には、 $H = 10\text{ m}$ 、 $15\text{ m}$ 、 $20\text{ m}$  落下時に着目して、載荷点直下（頂版下面中央）、柱上部および側壁上部における最大変位量を再現可能な有効長を二次元骨組を用い

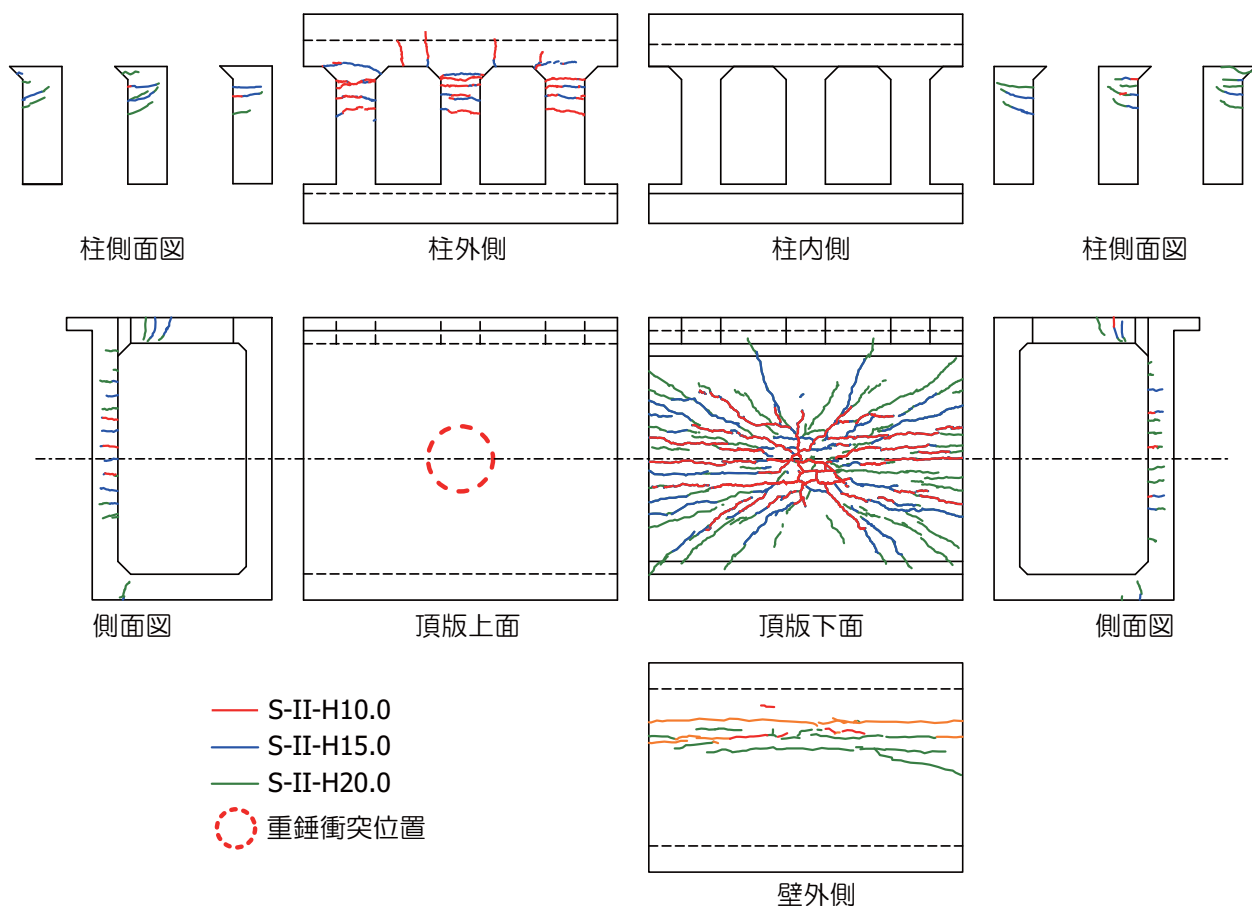


図-8 ひび割れ分布性状

表-2 鉄筋ひずみ最大応答値一覧

解析 ケース	頂版下面中央 ( $\mu\epsilon$ )	柱外側上端 ( $\mu\epsilon$ )	側壁外側上端 ( $\mu\epsilon$ )
S-II-H10.0	1,261 / 1,241	1,359 / 1,469	690 / 1,170
S-II-H15.0	1,806 / 1,947	2,204 / 1,825	1,206 / 1,283
S-II-H20.0	2,202 / 1,968	6,531 / 1,967	1,613 / 1,892

※ (実験結果 / 解析結果)

動的解析により算出し、落下高さとう有効長の関係として示している。図より、落下高さの増加に対応して、有効長は小さくなる傾向を示すことが分かる。ただし、図-8に示されるひび割れ発生状況より、 $H = 20\text{ m}$ 落下の場合における頂版中央点に関しては、繰り返し荷重による損傷が進行し、剛性が低下したことで、発生した変位に比較して重錘衝撃力が小さく計測されたものと考えられることから、解析における有効長が過大に評価されたものと推察される。また、部材毎に有効長が異なる結果となっている。これは、部材毎に剛性が大きく異なることと、直接衝撃力を受ける部材と受けない部材とで局所応答と全体応答等による応答の差異が生じたことによるものと推察される。

終局状態に至ったと推察される  $H = 20\text{ m}$ 落下時において、何れの部材においても有効長は柱間隔の  $2.0\text{ m}$ より大きな値となっていることから、設計に際しては有効長 = 柱間隔とすることで安全側に評価可能であるものと考えられる。

### 3.3 鉄筋ひずみ

表-2には、鉄筋ひずみについて、荷重点直下、柱上部および側壁上部における実験結果と数値解析結果を比較して示している。なお、数値解析結果は、各部材での最大変位が実験結果と等しくなる時の有効長で解析を実施した結果である。荷重点直下である頂版下面中央に着目すると、 $H = 10\text{ m}$ および  $15\text{ m}$ 落下時には、数値解析結果は実験結果と同程度の値が得られている。ただし、 $H = 20\text{ m}$ 落下時には、実験結果より小さな値となっている。柱上部に関しては、 $H = 10\text{ m}$ 落下時には、数値解析結果は実験結果とほぼ同程度であり、 $H = 15\text{ m}$ および  $20\text{ m}$ 落下時には、実験結果より小さな値となっている。

側壁上部に関しては、数値解析結果は実験結果と同程度あるいは若干上回る値を示している。数値解析結果が実験結果より小さな値となるケースに着目し、図-8に示されるひび割れの発生状況と比較すると、何れのケー

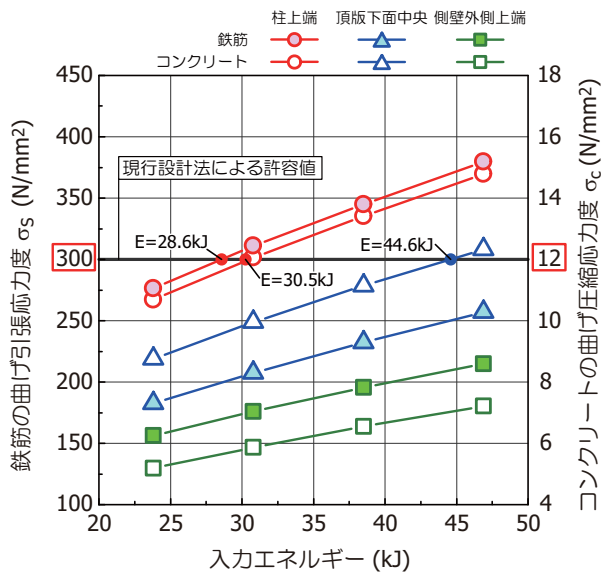


図-9 許容応力度設計法による解析結果

スにおいても、前述したように、繰り返し载荷での部材損傷により剛性が低下したことで、有効長が過大評価されたため鉄筋ひずみも小さな値になったものと考えられる。以上より、損傷を受けていない場合においては、本解析手法を用いることで、鉄筋のひずみにおいても大略評価可能となり、従って部材断面設計も可能であるものと判断される。

### 3.4 従来設計法で求めた耐力との比較

図-9には、従来設計法で求めた本モデルの耐力（入力エネルギー）計算結果を示す。ここでは、まえがきに述べたとおり、落石対策便覧に準拠し1ブロックに1個の落石荷重を考慮し二次元骨組静的解析により算出した断面力を用いて許容応力度法によって算出している。この際の有効長は柱間隔としている。図より、本実験で用いた1/2縮尺RC製ロックシェッド模型における耐力は、入力エネルギーで示すと、柱部が許容値を超過する値がE=28.6kJ、頂版部でE=44.6kJとなった。表-2および図-8から、本モデルの終局限界耐力をH=15m~20m落下時と考えると、この時の入力エネルギーEは1,470~1,960kJとなり、従来設計法は、30~40倍以上の保守的な設計となっていることが分かる。

以上より、本解析手法を用いて有効長を柱間隔とすることで従来設計法と比べて、より合理的な設計が可能になるものと推察される。

## 4. まとめ

本検討ではロックシェッドの性能照査型耐衝撃設計法の確立に向けた基礎資料を得ることを目的に、実際のロックシェッドの1/2程度のモデルに対し、落石を模擬した重錘落下衝撃実験を実施した。また、有効長を変化させた二次元骨組動的解析を実施し、実験から得られた重錘

衝撃力を等分布荷重として簡易に入力することにより、変位波形や最大変位、残留変位などの挙動の整合性や鉄筋ひずみについて実験結果と比較検討を行った。更に、従来設計法である許容応力度法を用いて求めた耐力（入力エネルギー）と本解析を比較した。検討結果を整理すると、以下のように示される。

- (1) 二次元骨組動的解析を用いて、有効長を考慮することで頂版部の応答変位は精度良く再現可能となる。ただし、側壁および柱の減衰自由振動は再現できなかった。
- (2) 各部材によって有効長は異なり、入力エネルギーが増加すると有効長は小さくなる傾向を示す。
- (3) 本モデルの終局限界耐力は、従来までの設計法（許容応力度法）で求めた耐力（入力エネルギー）に対して30~40倍の安全率を有している。
- (4) 二次元骨組動的解析を用いて、有効長を柱間隔とすることで安全側の評価は可能となり、許容応力度設計法と比べ、より合理的な設計が可能となる。

本検討においては、ロックシェッド模型への重錘落下実験に対し、実験から得られた重錘衝撃力波形を作用荷重として、簡易に作用させることで数値解析を実施した。破壊性状が曲げ破壊型の場合においては、载荷点直下における数値解析結果は、比較的精度良く実験結果を再現できることが明らかになった。一方、柱および側壁については再現性が低いことも明らかとなった。今後は、ロックシェッドの合理的な性能照査型設計法の確立に向けて、三次元衝撃応答解析を用いた検討を進めると共に、より簡易な解析モデルを用いた場合に対して、有効長の決定方法や支持条件、モデル化等に関する検討が必要であるものと考えられる。

## 参考文献

- (1) (社)日本道路協会：落石対策便覧，2000.6.
- (2) 岸 徳光，中野 修，松岡健一，菅田紀之：RC覆工の衝撃応答解析手法の適用性に関する実証的検討，土木学会論文集，第483号，pp97-106，1994.1
- (3) 岸 徳光，佐藤昌志，今野久志：敷砂や三層緩衝構造を設置した場合の柱式RC覆道の衝撃挙動解析，構造工学論文集，Vol.44A，pp.1773-1782，1998.3
- (4) (社)北海道開発技術センター：道路防災工調査設計要領（案）落石対策編，2001.3.
- (5) (社)土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕，2007.3.
- (6) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2002.3.