

# 論文 重錘落下衝撃荷重時時の 1/2 RC 製覆道模型に関する数値解析手法の妥当性検討

花岡 健治<sup>\*1</sup>・岸 徳光<sup>\*2</sup>・今野 久志<sup>\*3</sup>・牛渡 裕二<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本研究では、落石防護構造物の性能照査型耐衝撃設計法の確立に資するための衝撃応答解析手法を確立することを目的に、90 cm 厚の敷砂緩衝材が設置された 1/2 RC 製落石覆道模型を対象として、重錘落下衝撃実験を行い、三次元弾塑性有限要素法に基づいた数値解析手法に関する妥当性について検討を行った。検討の結果、入力エネルギーが 1.0 MJ 程度までは、提案の数値解析手法により、最大重錘衝撃力、载荷点変位波形、ひび割れ分布等、大略評価可能であることが明らかになった。

**キーワード:** 落石覆道、敷砂緩衝材、弾塑性衝撃応答解析、重錘落下衝撃実験

## 1. はじめに

我が国の国土は山岳地帯が多く、急峻な地形を呈していることから、海岸線や山岳部の斜面に沿って交通網が整備されている箇所が多い。このような地理条件の下に道路を整備する場合には、可能な限り安全となるルートを選定したうえで、斜面災害に対する対策を講じることが必要である。

道路の斜面災害対策の 1 つとして落石防護覆道(以後、落石覆道)が挙げられる(写真-1 参照)。落石覆道は、比較的大きな落石エネルギーに対応した落石対策工であり、山岳道路や海岸道路などに多数設置されている。落石覆道は、現在一般に以下の要領<sup>1)</sup>で設計が行われている。すなわち、1) 対策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て、骨組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、許容応力度設計法を適用し、断面設計を行う、である。

しかしながら、過去の被災事例の検証や数値解析の検討から、許容応力度法により設計された落石覆道は、設計入力エネルギーに対して、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<sup>2)</sup>。一方で、構造物の設計思想は許容応力度設計法から限界状態設計法を経て、性能照査型設計法に移行することが求められている。これより、落石覆道に対する性能照査型耐衝撃設計法を確立し、その設計法の下で耐衝撃設計を実施することが可能になれば、大幅な建設コストの縮減を実現することができる。すなわち、新設の場合には設計の合理化によって構造のスリム化が可能となる。また、既設の場合には各

限界状態に対する最大入力エネルギー評価が可能になり、構造物の信頼性が向上するものと判断される。

このような観点から、著者らの研究グループでは、落石覆道の合理的な性能照査型耐衝撃設計法の確立に資するための実規模落石覆道に対する数値解析手法を確立することを目的に、実物の 1/2 縮尺模型の落石覆道を用いて重錘落下衝撃実験を実施している。本研究では、現行設計と同様に緩衝材として頂版上に 90 cm 厚の敷砂を設置した場合における、数値解析手法の妥当性を検討することを目的に、繰り返し载荷実験結果に対する数値解析を実施し、実験結果と比較することにより、その妥当性を検討した。なお、本覆道模型は現設計法に従えば、約 45 kJ の落石入力エネルギーに対応して設計されたものである。また、本数値解析には非線形衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA<sup>3)</sup>を用いている。

## 2. 数値解析概要

### 2.1 試験体概要、実験概要および解析ケース

図-1 には、本実験で用いた覆道模型の形状寸法および



写真-1 落石防護覆道の例

\*1 札幌市役所 (正会員)

\*2 室蘭工業大学大学院教授 工学研究科 暮らし環境系領域 工博 (正会員)

\*3 (独)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)

\*4 (株)構研エンジニアリング 防災施設部 (正会員)

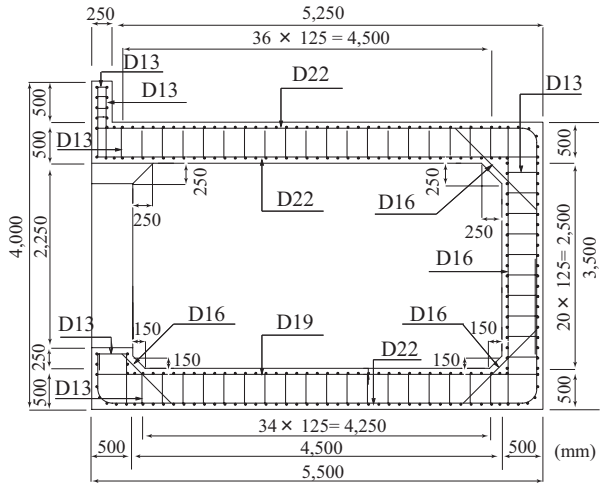


図-1 形状寸法および配筋状況

び配筋状況を示している。覆道模型の断面寸法は、5,500×3,500 mmで、道路軸方向に6,000 mm、柱部の高さは2,250 mmとしている。また、覆道模型の内空幅および高さは、それぞれ4,500 mm、2,500 mmであり、内空の四隅にはハンチが設けられている。配筋は、断面方向鉄筋として頂版上面、下面および底版下面にD22を、底版上面にD19を125 mm間隔で配筋している。また、柱部にはD16を62.5 mm間隔で配筋している。配力筋については、各部でD13を用い、柱部では75 mm間隔、その他部材では125 mm間隔で配筋している。コンクリートのかぶり厚は、芯かぶり厚で75 mmとしている。

本実験では、敷砂を90 cmの厚さで設置した覆道模型のスパン中央部に、質量が10 tonの重錘をトラッククレーンを用いて所定の高さまで吊り上げ、脱着装置を用いて自由落下させることにより行っている。なお、重錘は直径1.25 m、高さ95 cmで底部より高さ30 cmの範囲が半径1 mの球状であり、鋼製円筒の内部に鋼塊とコンクリートを充填して質量を調整している。

敷砂は、頂版周辺に木枠を設け、頂版全体に設置しており、各実験毎に荷重点部を中心に掘り返し、25 cm厚ごとに足踏みにより締め固めを行い所定の厚さに整形することとした。本実験に用いた敷砂は、アスファルト合材用の細目砂であり、表乾密度は2.56 g/cm<sup>3</sup>である。また、湿潤密度は1.531 g/cm<sup>3</sup>、含水比は平均11.4%であった。

実験は弾性内と想定される落下高さH=1.0 m、2.5 m、その後H=5.0 mから増分落下高さを5.0 mとし、頂版裏面コンクリートが剥落する程度まで実施している。

表-1、表-2には、本実験に対応した解析ケース一覧および物性値一覧を示している。実験では繰り返し荷重を行っている。しかしながら、数値解析では要素数が多く解析に数週間単位の多大な時間が必要となるためと、入力エネルギーが過度に大きくない場合には敷砂によって衝撃エネルギーが十分に吸収され、損傷が顕在化してい

表-1 解析ケース一覧

解析ケース	荷重方法		重錘質量 W (t)	落下高さ H (m)	入力エネルギー E (kJ)
	実験	解析			
W10H1.0	繰り 返し	単 一	10	1.0	98
W10H2.5				2.5	245
W10H5.0				5.0	490
W10H10.0				10.0	980
W10H15.0				15.0	1,470
W10H20.0				20.0	1,960

表-2 物性値一覧

材料	密度 $\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	強度 (MPa)	弾性係数 E (GPa)	ポアソン比 $\nu$
コンクリート	2.35	28.3	20	0.167
D22/D19/D16 /D13	7.85	391/402/389 /389	206	0.3
敷砂	1.531	-	10(除荷時)	0.06
基礎部鉄筋 コンクリート	2.5	-	30	0.2

ないことより、鉄筋のひずみ硬化やひび割れの影響が大きいものとは判断し、繰り返し荷重による損傷の蓄積を考慮せずに、各実験ケースに対して単一荷重の条件下で解析を行い、解析手法の妥当性を検討することとした。

## 2.2 数値解析モデルおよび解析条件

図-2には、本数値解析で用いた覆道模型の要素分割状況を示している。解析モデルは、構造および荷重条件の対称性を考慮して、道路軸方向の中心線位置で2等分した1/2モデルとしている。境界条件として、各接触面には面と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮している。また、コンクリート-鉄筋要素間は完全付着を仮定している。数値解析モデルの基礎底面は完全固定とし、モデルの対称境界面にはシンメトリー条件を入力している。また、試験体底面-基礎コンクリート間は連続と仮定している。要素のモデル化に関しては、鉄筋には2節点の梁要素を用い、その他の要素には8節点の固体要素を用いている。要素の積分点に関しては、要素変形量と計算精度を考慮して、敷砂には8点積分、その他の固体要素には1点積分、梁要素には4点積分を用いた。減衰定数は質量比例分のみを考慮するものとし、鉛直方向最低次元固有振動数に対して5.0%と設定している。また、本解析モデルは、コンクリートの要素長を40 mmを基本に分割しており、総節点数および総要素数は、それぞれ661,766、658,504である。

## 2.3 材料物性モデル

図-3には、本数値解析で用いたコンクリート、鉄筋および敷砂の応力-ひずみ関係を示している。なお、一般に

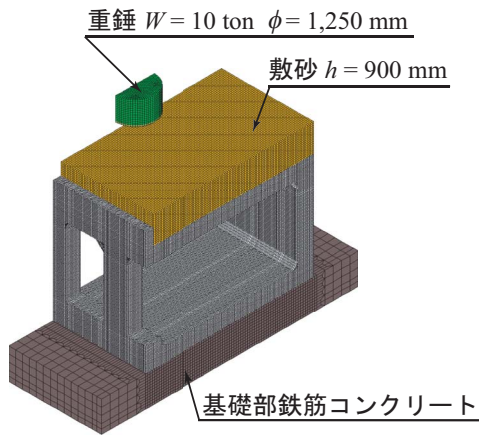


図-2 要素分割状況

載荷速度が大きい場合には、各材料にひずみ速度効果が発揮されることが知られている。しかしながら、本研究では中速度衝撃の問題であることや、敷砂緩衝材の設置により、大きなエネルギー吸収と衝撃荷重の分散が期待できることから、ひずみ速度効果の影響は小さいものと判断し、以下の簡略な構成則を用いることを条件に、その効果は考慮しないこととした。なお、事前解析において、落下高さ  $H = 20$  m における頂版上縁のひずみ速度は、重錘直下で最大  $4.3 \times 10^{-1}$ /s、重錘直下より 0.5 m および 1 m の位置においてそれぞれ最大  $5.9 \times 10^{-2}$ /s、 $3.1 \times 10^{-3}$ /s 程度であることを確認している。

図-3(a)には、コンクリートに関する応力-ひずみ関係を示している。圧縮側に関しては、相当ひずみが  $-1,500 \mu$  に達した状態でコンクリートが降伏するものと仮定し、完全弾塑性体のバイリニア型にモデル化した。引張強度は圧縮強度の  $1/10$  と仮定している。降伏の判定には Drucker-Prager の降伏条件式を採用している。

図-3(b)には、鉄筋に関する応力-ひずみ関係を示している。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硬化化則を適用している。降伏の判定には von Mises の降伏条件式を採用している。

図-3(c)には、敷砂の緩衝特性を評価するための応力-ひずみ関係を示している。本研究で適用した敷砂の材料構成則モデルは、筆者らが過去に実施した敷砂緩衝材に対する衝撃載荷実験結果 ( $W = 3$  ton,  $H = 5 \sim 30$  m) と数値解析結果の比較検討により適用の妥当性を検証したものであり<sup>4)</sup>、次式のように示される。

$$\sigma_{sand} = 50 \varepsilon_{sand}^2 \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_{sand}$  は相当応力 (MPa)、 $\varepsilon_{sand}$  は体積ひずみである。荷重の除荷勾配は  $E_{ul} = 10$  GPa と仮定した。

式(1)は、敷砂緩衝材(敷砂厚 90 cm)に対する衝撃載荷実験結果と数値解析結果の比較検討により得られたもの

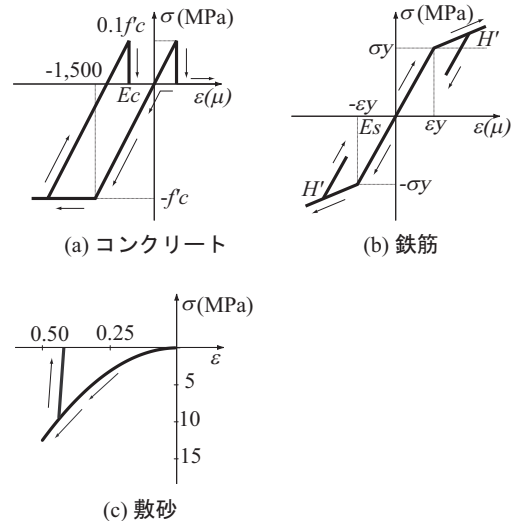


図-3 各材料の応力-ひずみ関係

であり、大型 RC 梁への適用性を検討した既往の研究<sup>5)</sup>において十分な信頼性が確認されている。本研究では、敷砂緩衝材を有する本覆道模型においても式(1)が適用可能と仮定し、数値解析を行うこととした。

### 3. 数値解析結果

#### 3.1 各種応答波形

図-4には、実験結果および解析結果の重錘衝撃力、載荷点変位に関する各応答波形を比較して示している。ここでは、代表的な例として  $H = 1.0, 2.5, 10.0, 20.0$  m について示している。図-4(a)には、重錘衝撃力波形に関する比較図を示している。図より、実験結果の重錘衝撃力は全てのケースにおいて重錘衝突時から急激に励起して最大値に至り、その後第1波より振幅が小さく、周期が同程度の第2波で構成されている。また、落下高さが増大するにつれて、第1波と第2波の振幅の差が大きくなる事が分かる。解析結果を見ると、重錘衝撃力波形は実験結果よりも若干緩やかに第1波が励起し、その後実験結果よりも周期の長い第2波で構成されている。しかしながら、第1波の最大値及び波形性状は実験結果を大略再現していることが分かる。

図-4(b)は、載荷点変位波形に関する比較図を示している。図より、実験結果の波形性状は重錘衝突より若干遅れて緩やかに最大値を示す第1波が励起した後、残留変位成分を含む振幅の小さい第2波で構成されている。また、落下高さが増加するにつれて、第1波と第2波の振幅の差が大きくなる事が分かる。解析結果は、実験結果よりも第1波が若干遅れて励起し、その後振幅が小さく、周期の長い第2波で構成されている。最大値及び残留変位は実験結果と良く対応していることが分かる。なお、解析結果と実験結果による変位波形の励起時刻の差に関しては、敷砂の構成則による影響が大きいものと考



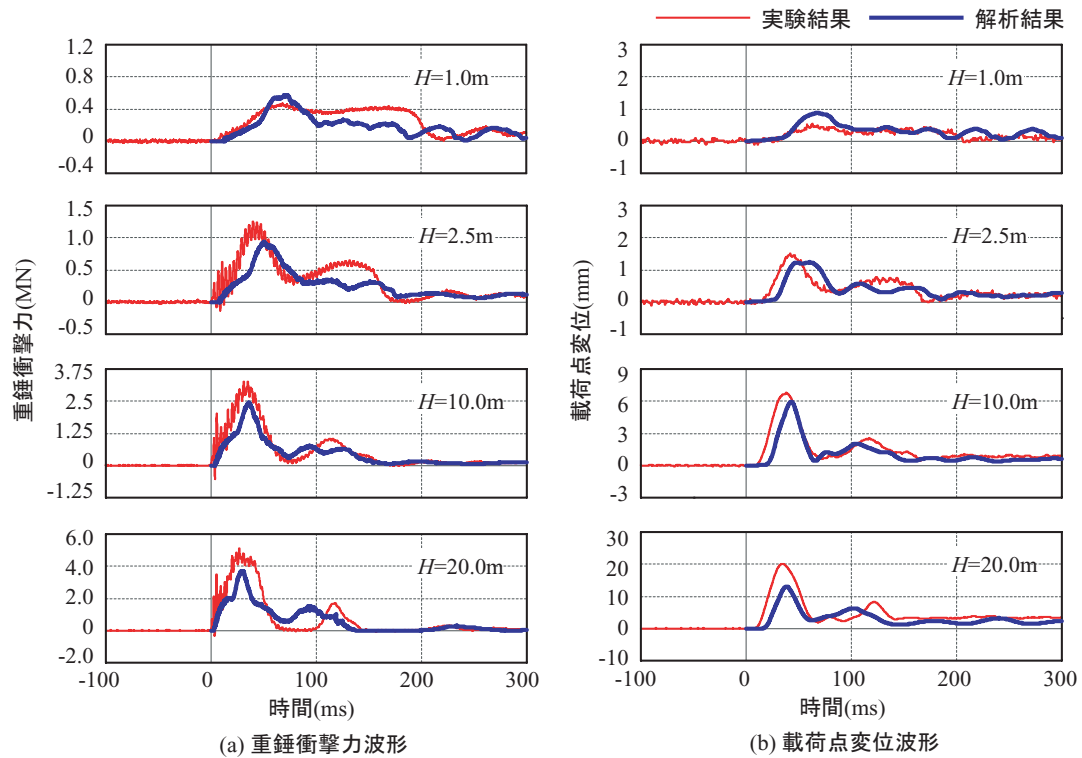


図-4 各種応答波形

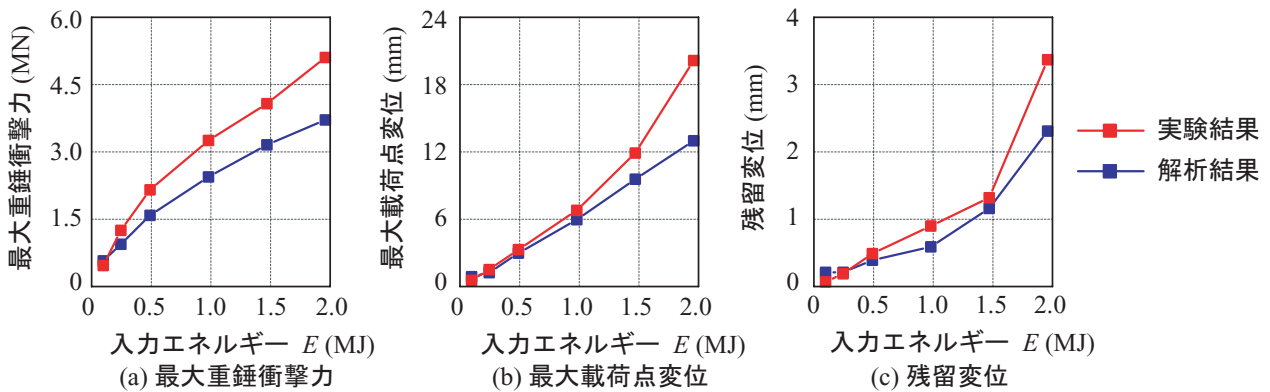


図-5 各応答値と入力エネルギーの関係

えられることより、より精度の高い数値解析を実施するためには、敷砂の構成則の再検討が必要であるものと考えられる。

### 3.2 各応答値と入力エネルギーの関係

図-5には、入力エネルギーに対する各応答値の分布に関する比較図を示している。

図-5(a)より、最大重錘衝撃力に関しては、実験結果は入力エネルギーが $E \geq 0.5$  MJでほぼ線形に増加する傾向を示している。一方、数値解析結果は、ほぼ1/2乗に比例して増加する傾向を示し、入力エネルギーの増加と共に両者の差が大きくなっている。

図-5(b), (c)に着目すると、実験結果の最大载荷点変位、残留変位は、入力エネルギー $E \leq 1.0$  MJの場合には線形に、 $E > 1.0$  MJでは放物線状に増加する傾向を示し

ている。一方、数値解析結果は最大载荷点変位の場合には $E \leq 2.0$  MJ、残留変位も $E \leq 1.0$  MJでほぼ線形に増加していることが分かる。実験結果と数値解析結果を比較すると、いずれも $E > 1.5$  MJで差が大きくなる傾向を示している。これは、実験結果の場合には、 $E > 1.5$  MJでは本覆道模型に対して入力エネルギーが大きいため、および数値解析では、繰り返し载荷による累積損傷を考慮していないこと等によるものと推察される。

これにより、本覆道模型は約45 kJの落石入力エネルギーに対応して設計されたものであることより、本数値解析結果は設計入力エネルギーの30倍程度の入力エネルギーに対して大略評価可能であることが分かる。

### 3.3 変位分布

図-6, 図-7には、落下高さ $H = 10.0$  mでの道路横断

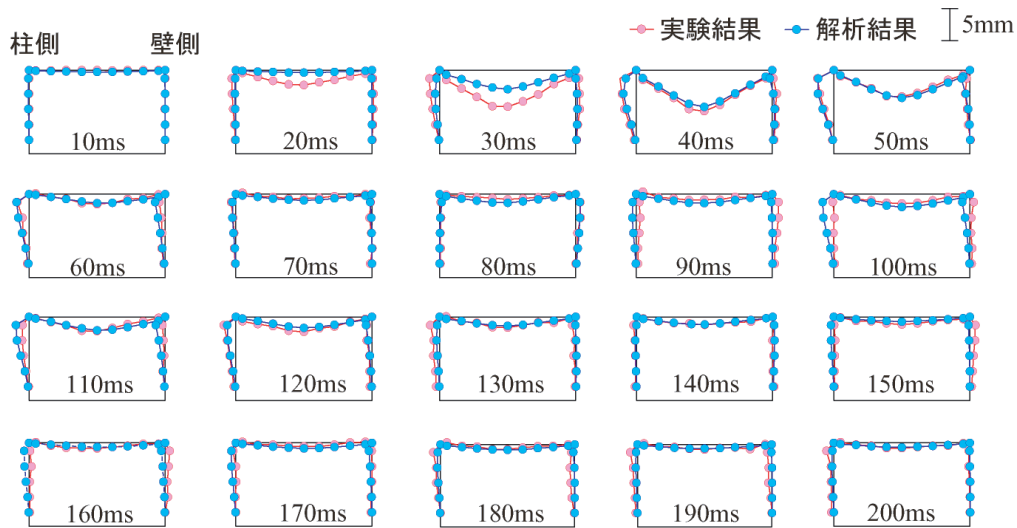


図-6 道路横断方向変位分布図 ( $H = 10.0 \text{ m}$ , 変形倍率: 200 倍)

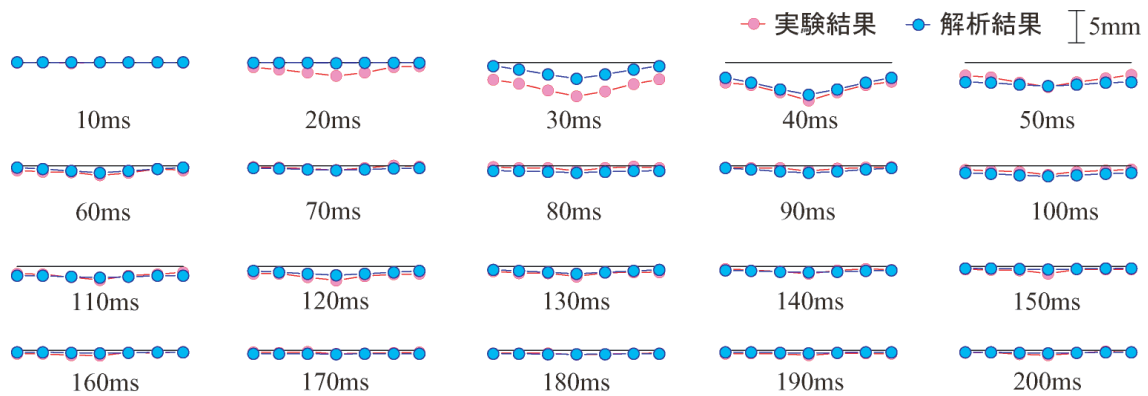


図-7 道路軸方向変位分布図 ( $H = 10.0 \text{ m}$ , 変形倍率: 200 倍)

方向及び道路軸方向の覆道模型内縁の変位分布に関して、実験結果と数値解析結果を時系列で比較して示している。

図-4 (b) で述べたように、解析結果の最大応答時刻が実験結果よりも若干遅れて発生するため、振動に多少のずれが生じているが、最大応答変位及び残留変位等は実験結果と概ね対応していることが分かる。

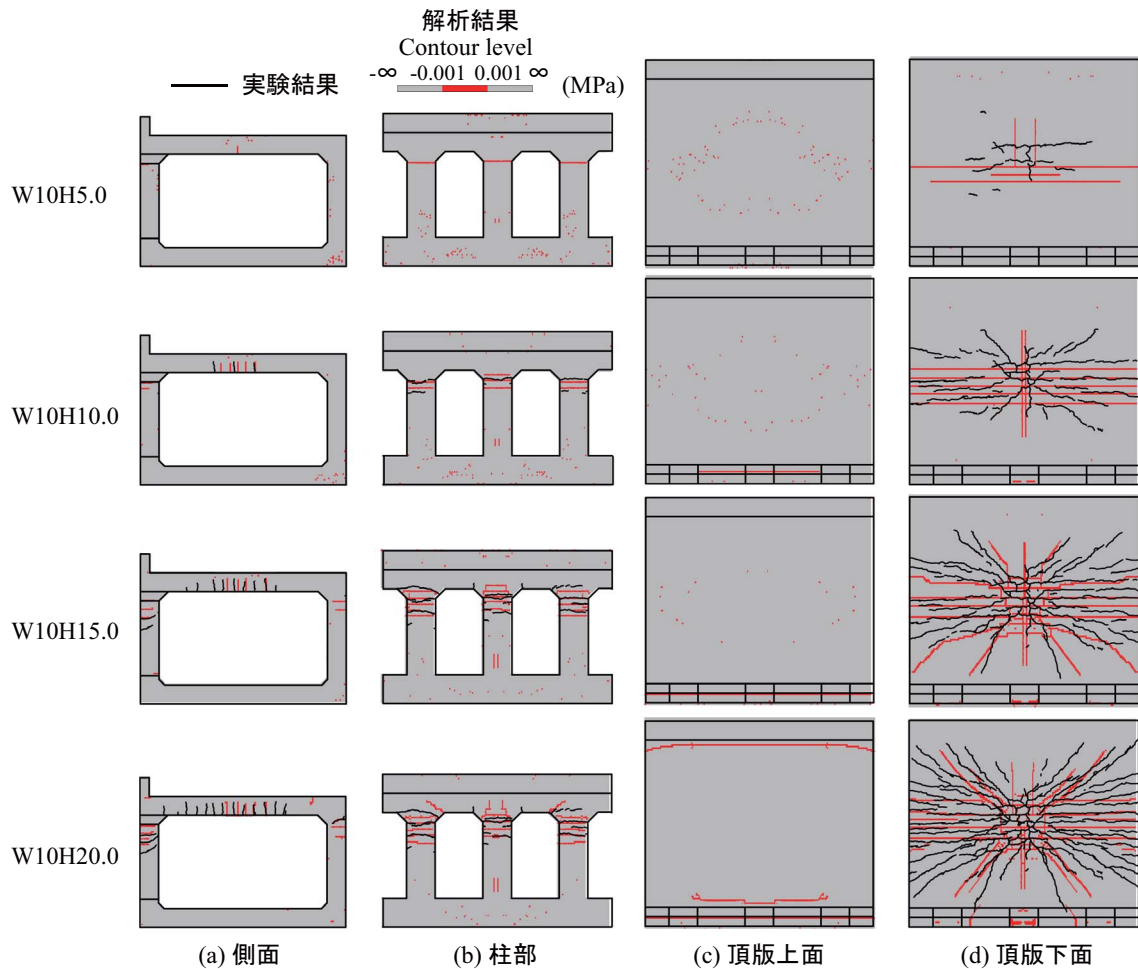
### 3.4 ひび割れ分布性状

図-8 には、落下高さ  $H = 5.0 \text{ m}$  から  $H = 20.0 \text{ m}$  荷終了時までのひび割れ分布性状を実験結果と数値解析結果とを比較して示している。なお、落下高さ  $H = 1.0 \text{ m}$  および  $H = 2.5 \text{ m}$  についてはほぼ弾性域内であり、ひび割れが生じていないことから示していない。なお、数値解析結果において、赤色で示された要素がひび割れと等価な状態であると判断される要素である。すなわち、図-3 (a) に示したコンクリートの応力-ひずみ関係に従うと、図中の赤色で示された領域 (コンクリート要素の第一主応力が  $-0.001 \sim 0.001 \text{ MPa}$  の範囲) は、ひび割れが発生して除荷状態に至っているか、もしくは荷状態て発生応力

が小さい要素であることを示すこととなる。従って、変形が大きく示されている領域ではひび割れが発生し除荷状態にあるものとして評価可能である。

図-8 より、頂版上面では実験結果、解析結果共にひび割れはほとんど生じていないことが分かる。一方、頂版下面では、実験結果は落下高さ  $H = 5.0 \text{ m}$  の時点から曲げひび割れが進行し、その後落下高さの増大と共に斜めひび割れを伴い、放射状にひび割れが分布している。解析結果は落下高さ  $H = 10.0 \text{ m}$  時で放射方向のひび割れが再現できていないが、その他は実験結果と大略対応していることが分かる。

次に、柱部のひび割れ分布に着目すると、落下高さ  $H = 5.0 \text{ m}$  では実験結果はひび割れが生じていないが、解析結果ではひび割れが発生している。また、落下高さの増大に対応して、解析結果のひび割れは実験結果よりも顕著になっていることが分かる。これは、解析モデルでは柱部の形状の再現性を高めるため、他部材よりも要素長を小さくしていることより、局所応力が顕在化したこ



図－8 ひび割れ分布図

とによるものと推察される。

#### 4. まとめ

本研究では、落石防護覆道の性能照査法の確立に寄与することを最終目的に実施された、1/2 縮尺 RC 製覆道模型の繰り返し荷重載荷実験を対象に、三次元弾塑性有限要素解析を実施した。本研究より明らかになった事項は、以下のとおりである。

- (1) 重錘衝撃力波形および载荷点変位波形の最大値及び波形性状は、入力エネルギーが  $E \leq 1.0 \text{ MJ}$  において、数値解析結果は実験結果と概ね対応する。
- (2) 数値解析結果のひび割れ分布性状は、実験結果に見られる放射状のひび割れが再現できていないものの、その他は実験結果とほぼ対応している。
- (3) 本数値解析は、コンクリートの要素長を 40 mm を基本にしてモデル化を行って実施したものである。これより、上述の要素長でモデル化することにより、実挙動を大略評価可能になるものと判断される。
- (4) 以上のことより、90 cm 厚の敷砂を設置し、約 45 kJ

の入力エネルギーを想定して設計された落石覆道模型の耐衝撃挙動は、提案の数値解析手法を用いることにより、設計入力エネルギーの 30 倍程度の入力エネルギーに対しても大略評価可能である。

#### 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) John O.Hallquist: *LS-DYNA User's Manual*, Livermore Software Technology Corporation, 2000.6
- 4) 岸 徳光, 岡田慎哉, 今野久志, 池田憲二：敷砂材の緩衝特性評価のための数値解析モデルに関する一考察，構造工学論文集，Vol. 49A, pp. 1323-1332, 2003.3
- 5) N. Kishi, S. Okada, and H. Konno: Numerical impact response analysis of rockfall protection galleries, *Structural Engineering International*, Vol. 37, No.1, pp. 103-113, 2009.