# 敷砂緩衝材を有する1/2 RC 製覆道模型の重錘落下衝撃挙動に関する 数値解析的検討

Numerical analysis of a harf scale model of RC type rock-shed with sand cusshion under falling-weight impact loading

室蘭工業大学大学院
○学生会員
花岡健治 (Kenji Hanaoka)
室蘭工業大学大学院
フェロー
岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
寒地土木研究所
正会員
西 弘明 (Hiroaki Nishi)
寒地土木研究所
正会員
今野 久志 (Hisashi Konno)

### 1. はじめに

我が国の国土は山岳地帯が大部分を占め、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が上げ られる. 落石防護覆道は、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 の検証や数値解析的検討から、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> . これより, 落石覆道に対する限界状態設計法を確立し, 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,既設の場合には限界状態 時におけ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,落石覆道の合理的な性能照査型 耐衝撃設計法を確立することを最終目的に,実物大の1/2 縮尺の覆道模型を作製し,重錘落下衝撃実験を実施した. 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,繰り返し載荷実験結果に 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,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. 数值解析概要

#### 2.1 試験体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配筋状況を示している。覆道模型の断面寸法は 5,500×



図-1 形状寸法および配筋状況

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,覆道模型の内空幅を 4,500 mm,内 空高さを 2,500 mm としている.覆道模型の配筋は,軸方 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 D16 を 125 mm 間隔で配筋している.また,柱 部には D13 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 を用いており,柱部では 75 mm 間隔 で,その他部材では 125 mm 間隔で配筋している. コンク リートのかぶりは,芯かぶりで 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 の頂版中央部に、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 80 cm の球状になっている.実験は弾性範囲内と想定 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.終局に至るまで実施した.

**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.実験では繰り返し載荷を行っているが,数値解析では要素数が多く解析に多大な時間が必要となるため,本論文では単一載荷での比較をすることとした.

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

# 表-1 解析ケース一覧

| 解析ケース名   | 載荷方法 |    | 重錘質量  | 落下高さ  | 入力エネルギー |
|----------|------|----|-------|-------|---------|
|          | 実験   | 解析 | W (t) | H (m) | E (kJ)  |
| 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

| ++ *1    | 密度             | 強度       | 弾性係数    | ポアソン比 |
|----------|----------------|----------|---------|-------|
| 1/3 作ት   | $\rho~(t/m^3)$ | (MPa)    | E(GPa)  | ν     |
| コンクリート   | 2.35           | 28.3     | 20      | 0.167 |
| D22,D19, | 7 85           | 391,402, | 206     | 0.2   |
| D16,D13  | 7.85           | 389,389  | 200     | 0.5   |
| 敷砂       | 1.531          | -        | 10(除荷時) | 0.06  |
| 基礎コンクリート | 2.5            | -        | 30      | 0.2   |

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 トー鉄筋要素間は,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,上述のように,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,その他固体要素には1点積 分を用い、梁要素には精度を向上させるため2×2 Gauss 積分を用いている.また,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,本解析モデルの総節点数お よび総要素数は,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。

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 μ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<sub>s</sub>の1%とするバイリニア型の等方硬化 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 t,  $H = 5 \sim 30$  m)と数値



図-2 要素分割状況



図-3 各材料の応力-ひずみ関係

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。

$$\sigma_{sand} = 50 \varepsilon_{sand}^2 \tag{1}$$

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 のであり、大型 RC 梁への適用は精度よく評価可能なこ とが明らかとなっている<sup>5)</sup>.本解析では、敷砂緩衝材を有 する覆道模型においても式(1)が適用可能と仮定し、解析 を行った.

#### 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.

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ことが分かる。 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

# 平成22年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第67号



図-4 各種応答波形

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よく再現しているこ 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ことが分かる.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 残留変位が実験結果と良く対応していることが分かる.

## 3.2 各応答値と入力エネルギーの関係

**図-5**には、横軸に入力エネルギー、縦軸に各応答値 を取って整理した結果を示している.

図-5(a)より,最大重錘衝撃力は,実験結果,解析結 果共に入力エネルギーに対してほぼ1/2乗に比例して増 加する傾向を示している.

図-5(b), (c) に着目すると,実験結果の最大載荷点変 位,残留変位共に E が 1.0 MJ 以下の場合は線形に,それ 以上の場合には放物線状に増加する傾向を示している. 特に,  $E \ge 1.5$  MJ の場合には,繰り返し載荷によって損 傷が蓄積され,両者共に著しい増加の傾向を示したもの と推察される.これに対して,数値解析結果は最大載荷 点変位の場合には,E = 2.0 MJ まで,残留変位もE = 1.5MJ まではほぼ線形に増加していることが分かる.



## 3.3 ひび割れ分布性状

図-6には、落下高さH = 5.0 mからH = 20.0 m載荷終 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 とを重ねて示している.なお、落下高さH = 1.0 mおよび H = 2.5 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割愛している.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と判断 される要素である.

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-0.001~0.001 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、もしくは載荷状態 で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 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ことが分 かる.解析結果は実験結果の傾向とよく対応しているこ とが分かる.

次に,柱部のひび割れに着目すると,落下高さH=5.0 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,落下高さが増大す るにつれ,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,剛性が過小評価されたものと推 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、1/2スケール覆道を対象として 繰り返し荷重載荷実験を行い、かつ、数値解析手法の確 立に向けた検討を行った.特に、本研究では90 cm 厚の 敷砂緩衝材が設置されている場合について、検討を行っ ている.本研究では、入力エネルギーが小さい場合を除 き、単一載荷状態においてもひび割れを伴う弾塑性挙動 を示すことから、数値解析時間を節約するために、繰り 返し載荷実験の各ケースに対して単一載荷を仮定し、数 値解析を行った.本研究によって、以下の事項が明らか になった.すなわち、

- (1) 重錘衝撃力波形および載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 ≤ 1.0 MJ において 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とほぼ 対応している
- (3) 以上のことより、90 cm 厚の敷砂を設置した落石覆

道の耐衝撃性状は,提案の敷砂に関する材料構成則 を用いることにより,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
- John O.Hallguist : 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
- N. Kishi, S. Okada, H. Konno : Numerical Impact Response Analysis of Rockfall Protection Galleries, Structual Engineering International, Vol.37, No.1 pp.103-113, 2009