敷砂緩衝工を設置したRC製ロックシェッド模型の 衝撃荷重作用時における数値解析的検討

A numerical study on RC type rock-shed model with sand cushion under falling-weight impact loading

(株) 構研エンジニアリング	正会員	鈴木健太郎 (Kentaro Suzuki)
(株) 構研エンジニアリング	正会員	牛渡裕二 (Yuji Ushiwatari)
寒地土木研究所	正会員	山口 悟 (Satoru Yamaguchi)
室蘭工業大学大学院	フェロー	岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
室蘭工業大学大学院	学生会員	花岡健治 (Kenji Hanaoka)

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製落石防護覆道(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に基づき,以下 の要領¹⁾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 置き換えて二次元骨組み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 設計を行ってきた.

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での重錘落下衝撃実験および数値解析的検討を実施し^{2),3)},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⁴⁾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.今後,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ることが想定される.



写真 - 1 落石防護覆道の一例



(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

また,その設計は比較的簡易な設計法とする必要がある. 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定めることが難しいなど,実 挙動を詳細にモデル化することは困難な状況である.

このような観点から,本研究ではロックシェッドの性能 照査型設計法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 程度の実験供試体に対し,落 石を模擬した重錘落下衝撃実験を実施し,実験結果から得 られた重錘衝撃力波形を簡易にロックシェッドへの作用荷 重と仮定して数値解析を行い,実験結果との比較により, 数値解析結果の妥当性を検討した.

平成21年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第66号





図 - 2 解析モデル

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12m毎に1プロック構造となっている.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,各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)を製作した.なお敷砂緩衝工は,実際のロックシェッドと同様に頂版上面にt=90 cmの厚さで設置した.

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,側壁および柱部が 500 mm,内空幅4,500 mm×高さ2,500mmとなっており, 道路軸方向の1プロック延長は,6,000 mmである.頂版主 鉄筋にはD13~D22 が125 mm間隔で,配力筋にはD13 が それぞれ250 mm間隔で配筋され,かぶりは75 mmとなっ ている.鉄筋の材質は全てSD345であり,降伏強度は388 MPa、引張強度は563 MPaである.コンクリートの圧縮強 度は $f_c = 28.3$ MPaであった.

実験は繰り返し載荷で,H=1m,2.5m,5m,10m,15m,20m,25m で漸増させて実施した.

2.2 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=5mの場合とH=20mの場合について数値解析的検討を実施したが,解析においては繰り返し載荷による供試体の損傷状態は考慮していない.





図 - 3 材料物性モデル



図 - 4 衝撃力入力モデル

(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.解析 モデルは実験供試体を忠実にモデル化している.解析は対称性を考慮(図中の赤線)して1/2 モデルに対して行った. 境界条件は,対称軸上にシンメトリー条件を付加し,基礎 地盤底面を完全固定としている.また,解析は,敷砂の緩 衝効果を考慮せず,敷砂の質量のみを考慮した場合と考慮 しない場合について実施した.また,敷砂有りのモデルに おいては,t = 10 cmの敷砂モデルにt = 90 cm分の敷砂質 量を付加して解析を行っている.敷砂無しモデルの総節点 数は550,871,総要素数は556,274 で,敷砂有りモデルの総節点 数は575,110,総要素数は580,268 である.

(2) 材料物性モデル

図 - 3 には,解析に用いた各材料物性モデルを示して いる.(a)図には,コンクリート要素に用いた応力-ひず み関係を示しており,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

平成21年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第66号



図 - 5 載荷点直下における変位波形

Drucker-Prager の降伏条件式を採用している.

(b) 図には,鉄筋要素に用いた応力-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 *Es*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.

(3) 衝撃力入力モデル

図 - 4 には,解析に用いた衝撃力波形を示している.本 入力波形は上述の通り,実験から得られた重錘衝撃力波形 をスムージングし,等分布荷重に置き換えたものである. 等分布荷重は重錘(*D* = 1.25m)を頂版に投影した際の面積 (*A* = 1.227m²)と同程度となる正方形の範囲に載荷すること とした.なお,荷重は敷砂の有無にかかわらず,直接頂版 へ入力している.

3. 実験と三次元弾塑性衝撃応答解析結果の比較 3.1 載荷点直下における変位波形

図 - 5(a) には,落下高さH=5mの場合での載荷点直下 における変位波形について,実験結果と解析結果を比較し て示している.図より数値解析結果の波形は,実験値に比 べて若干早く立ち上がっているものの,第2波目から残留 変位に至るまでほぼ同様の性状を示していることがわか る.また,最大変位に着目すると,敷砂をモデル化したH5 -sが実験値とほぼ一致している.

図 - 5(b) に示す落下高さ H = 20 m の場合における載荷 点直下変位波形に着目すると,数値解析結果は,残留変位 が異なっているものの,波形の立ち上がりから第2波以降



(a)H=5m 落下



(b)H=20m 落下 図 - 6 変位分布(載荷点直下最大変位時)

の推移まで,ほぼ同様の波形性状を示していることがわかる.特に敷砂の質量をモデル化していないH20の場合では 第2波のピーク発生時間まで類似しており,再現性が高い ことがわかる.

3.2 最大変位発生時における変位分布

図 - 6 には,載荷点直下での最大変位発生時刻における 覆工内変位分布を実験・解析ともに示している.(a)図の H=5m落下時に着目すると,変形モードは敷砂の有無に かかわらず大略一致する傾向にあることがわかる.

また,(b)図に示す H = 20 m 落下時においても,載荷点 直下における最大変位発生時刻での変位分布性状は,数値 解析結果は実験結果を比較的精度良く再現していることが わかる.

3.3 ひび割れ分布の比較

図 - 7 には,実験および解析結果におけるひび割れ分布 性状をロックシェッド頂版の下面側を下から見上げた形 で,落下高さ毎に示している.数値解析結果において図中 で赤色の領域(コンクリート要素の第一主応力が-0.001~ 0.001 MPa の範囲)で示されている要素は応力零近傍であ ることを示しており,最大応答時点において大きな応力が 出現する領域では,ひび割れが発生しているものとして評 価可能である.なお,数値解析結果におけるひび割れ分布 は,ひび割れの発生が明瞭に示されると考えられる載荷点 最大変位時における頂版下面の第一主応力分布図で示して いる.

(a) 図より, H = 5 m 落下時のひび割れ分布に着目すると, 実験時におけるひび割れは重錘落下点近傍において顕著な

平成21年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第66号



図 - 7 実験および三次元弾塑性衝撃応答解析のひび割れ分布性状

曲げひび割れが発生していることがわかる.一方,数値解 析結果では,敷砂質量を考慮していないH5のケースでは ほとんどひび割れが発生していないことがわかる.また, 敷砂質量を考慮したH5-sのケースにおいては,ひび割れ 性状は異なるものの,実験結果と同様に載荷点近傍から解 析モデル端部まで曲げひび割れが発生する結果となった.

(b) 図の H = 20 m 落下時におけるひび割れ分布から,実 験時には多数の曲げひび割れと載荷点から放射状に伸び るひび割れが発生している.また,数値解析結果において は,敷砂の有無にかかわらず,概ね実験結果を再現してい ることがわかる.

なお, H=5m および20mの両ケースにおいて解析時の ひび割れは,敷砂質量を考慮した場合により頂版下面の損 傷が激しい結果となった.

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,三次元弾塑性衝撃応答解 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で,変位波形やひび割れ分布など の挙動の整合性を,実験結果と比較することで分析した. 検討結果を整理すると,以下のように示される.

(1)数値解析結果における変位波形性状は,H=5m落下時には,敷砂の有無にかかわらず,ほぼ同様の推移を示した.また,H=20m落下時では残留変位が異なるものの,敷砂の有無にかかわらず,実験結果とほぼ同様の波形性状を示した.特に敷砂質量を考慮していな

い H20 の場合には,第2波以降のピーク発生時間まで 高い再現性を示す.

- (2) 載荷点直下での最大変位発生時刻における覆工内変位 分布は,敷砂の有無にかかわらず実験結果を精度良く 再現する.
- (3) ひび割れ分布において, H = 20 m 落下時のひび割れは,敷砂の有無にかかわらず,概ね実験結果を再現できる.

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衝撃荷重と して、簡易に作用させることで数値解析を実施したが、数 値解析結果は、比較的良く実験結果を再現できることが明 らかになった、今後は、ロックシェッドの性能照査型設計 法の確立に向けて、より簡易な解析モデルを用いた場合に 対して、実験の再現性を確認することが必要であるものと 考えられる.

参考文献

- 1) 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
- (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.