

# 周辺地盤を考慮した柱式 RC 落石覆工の弾性衝撃応答解析

An Elastic Impact Response Analysis of Column-Type RC Rock-Sheds Taking Surrounding Ground into Account

室蘭工業大学  
北海道開発局  
(株)構研エンジニアリング  
室蘭工業大学  
室蘭工業大学

正員 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)  
正員 今野 久志 (Hisashi Kon-no)  
正員 川瀬 良司 (Ryoji Kawase)  
フェロー 松岡 健一 (Ken-ichi G. Matsuoka)  
○学生員 岡田 慎哉 (Shin-ya Okada)

## 1. はじめに

著者らは、これまで RC/PC 落石覆工に関する実験および解析的検討を種々行ってきた。特に RC 落石覆工に関しては、谷側が柱である構造形式に対してもこれを対象とした実証実験結果に基づき、衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA を用いた解析手法の適応性を検証している<sup>1)</sup>。その結果、同手法を用いて実施された数値解析結果に基づいた実務設計に適用可能な設計手法が提案されるに至っている<sup>2),3),4)</sup>。

しかしながら、ここで提案の解析手法は、

- 1) 基礎地盤を無視し、底版の道路軸方向に沿って両端節点を単純支持と仮定していること。
- 2) 背面部の裏込土を無視していること。
- 3) 背面部への落石を考慮していないこと。
- 4) 落石の傾斜角の影響は考慮していないこと。

等の大略な仮定のもとに成り立っている。より合理的な RC 落石覆工の耐衝撃設計法の確立のためには、これらの仮定を排除した下での解析が要求される。

このような観点より、本論文では柱式 RC 覆工に関するより一層の合理的な耐衝撃設計法を確立するための基礎資料を得ることを目的として、背面裏込土および基礎地盤を考慮した三次元弾性衝撃応答解析を行った。また、解析では落石衝突角度を 90 度から 50 度まで 20 度刻みで変化させた場合の衝突角度の影響および、覆工頂版上と、背面部への落石の場合に関する落下位置の影響を検討し、併せて落石覆工の耐衝撃挙動に対する緩衝構造の影響についても検討を行っている。なお、本数値解析には著者らのこれまでの解析研究同様衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA を用いている。

## 2. 解析仮定

### 2.1. 解析モデル

本研究で用いた RC 覆工モデルには、国道 228 号に設置されている立岩覆道の 1 ブロックを基本構造として用いている。図-1 に本覆工の概略形状図を示す。図-2 に解析に用いたモデルの要素分割状況を示す。モデルの座標軸は、図に示すとおり道路軸方向を x 軸、幅員方向を y 軸、鉛直方向を z 軸とし、構造的な対称性を考慮せず、1 ブロック全体をモデル化している。背面裏込土部分と覆工本体間、および背面裏込土部分と背面基礎部分にはすべりを考慮したスライドインターフェイスを用

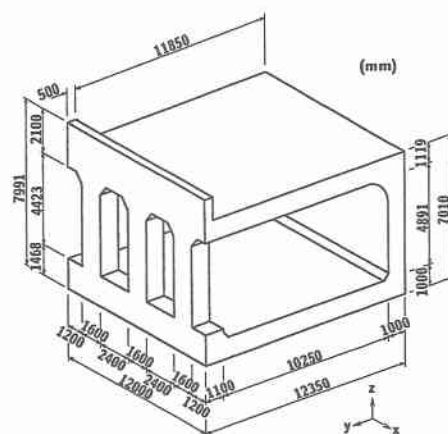


図-1 立岩覆道の1ブロック

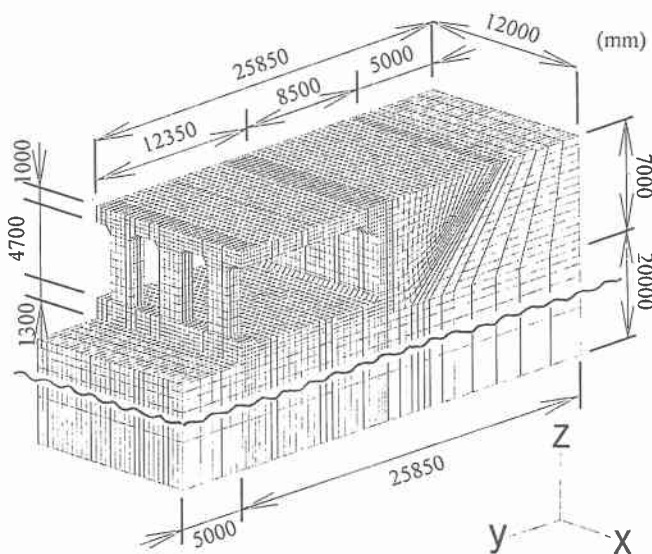


図-2 要素分割状況

いている。なお、モデル化した基礎地盤および背面裏込土の深さ、奥行の長さは、それぞれ領域を変化させた予備解析を行い、境界面からの反射波の影響が小さいことを確認後、図-2 に示すように決定している。すなわち、基礎地盤の深さ、背面の幅はそれぞれ覆工の高さ、幅の 3 倍、1.5 倍としている。

また、解析モデルは全て三次元固体要素を用いて分割している。覆工部の材料定数は、弾性係数  $E_c = 29 \text{ GPa}$ 、ポアソン比  $\nu_c = 0.2$ 、密度  $\rho_c = 2,500 \text{ kg/m}^3$  としている。基礎地盤の材料定数は、一般的な基礎として N 値が 50 程度の地盤を想定し、弾性係数  $E_r = 0.343 \text{ GPa}$ 、ポアソ

ン比  $\nu_r = 0.3$ ，密度  $\rho_r = 2,500 \text{ kg/m}^3$  とし，裏込土の材料定数は，砂質土を用いていることより  $N$  値が 10 程度の地盤を想定し，弾性係数  $E_s = 0.069 \text{ GPa}$ ，ポアソン比  $\nu_s = 0.45$ ，密度  $\rho_s = 1,800 \text{ kg/m}^3$  としている。

2.2. 衝撃荷重分布

本研究では，衝撃荷重が緩衝構造によって分散され部分分布状態で覆工頂版上および裏込部に作用するものとして解析を行った。落石による実衝撃荷重は同心円状に分散分布するものと考えられるが，ここでは幅員方向分布幅  $C$ ，道路軸方向分布幅  $B = \pi C/4$  とする円形分布と同一面積となる矩形分布に換算して入力することとした。なお，本研究では，緩衝構造として敷砂緩衝材と三層緩衝構造の 2 種類を対象として検討を行っている。

覆工頂版上および裏込部への衝撃荷重の時間分布，分布幅は緩衝構造に依存する。ここでは著者らの実証実験結果<sup>5)</sup>に基づき，図-3，表-1 のように仮定した。なお，衝撃荷重の最大値は弾性解析であることより便宜的に  $490 \text{ kN}$  と仮定した。なお，傾斜した落石による衝撃力は角度をつけて衝撃力を与えることで処理している。

3. 解析結果および考察

本研究では緩衝材および衝突角度の 2 種類の条件を組み合わせた全 12 ケースに対して数値解析を行い，これらの解析結果を比較する形で検討を行った。なお，ここでは実設計における断面力評価を前提としているため，解析結果より得られた各要素積分点における応力を断面力に換算して評価している。表-2 に断面力に関する定義一覧を示す。

各断面力は，覆工側壁部，頂版部および底版部に関しては各断面道路軸方向単位幅に対して評価を行っている。一方，柱部に関しては全断面に対する断面力を評価している。ここでは紙面の都合により，落石の作用位置を幅員方向，道路軸方向にそれぞれ 5 点，2 点仮定し，解析結果から得られた幅方向の最大断面力の包絡線分布についてのみ考察することとする。なお，比較のために覆工頂版上と，背面裏込部に落石を想定した場合との 2 ケースに分離して整理することとした。図-4 および図-5 に各断面力の最大包絡線分布を示す。正負の表示は断面内側に正值を，外側に負値を取り，敷砂緩衝材の場合を実線，三層緩衝構造の場合を破線で表している。

3.1. 衝突角度による応答の差異

(1) 曲げモーメントについて

図-4(a) の最大  $M_y$  包絡線分布を見ると，覆工部に落石がある場合には，頂版部側壁側の正の応答が衝突角の小さい場合ほど大きくなる傾向が見られる。特に敷砂緩衝材の場合には 衝突角度  $50^\circ$  で中央部の応答よりも大きくなっていることがわかる。しかしながら，頂版中央部の応答は角度が小さいほど小さくなる傾向を示している。また，覆工柱部に関しては，衝突角度が小さいほど応答が増幅する傾向を示し，覆工側壁部では衝突角度の減少とともに応答も顕著に減少する傾向を示している。一般に覆工頂版部に作用する外力の鉛直成分による曲げ

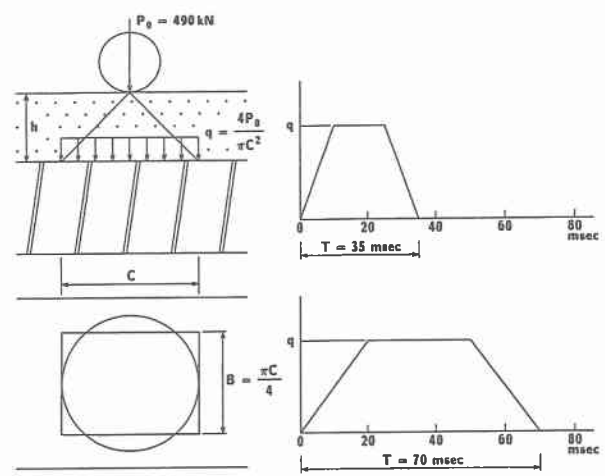


図-3 荷重の分布状況

表-1 入力衝撃荷重ケース一覧

| 緩衝材 | 幅員方向分布幅             | 軸方向分布幅                | 載荷時間                  |
|-----|---------------------|-----------------------|-----------------------|
| 敷砂  | $C = 1.0 \text{ m}$ | $B = 0.785 \text{ m}$ | $T = 35 \text{ msec}$ |
| 三層  | $C = 3.0 \text{ m}$ | $B = 2.356 \text{ m}$ | $T = 70 \text{ msec}$ |

表-2 断面力定義一覧

| 断面力         | 記号    | 頂版，底版                        | 側壁部                          | 柱                            |
|-------------|-------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 幅員方向曲げモーメント | $M_y$ | $\int_{A_1} \sigma_y z dA_1$ | $\int_{A_2} \sigma_y z dA_2$ | $\int_{A_3} \sigma_y z dA_3$ |
| 幅員方向せん断力    | $Q_y$ | $\int_{A_1} \tau_{yz} dA_1$  | $\int_{A_2} \tau_{yz} dA_2$  | $\int_{A_3} \tau_{yz} dA_3$  |
| 幅員方向軸力      | $N_y$ | $\int_{A_1} \sigma_y dA_1$   | $\int_{A_2} \sigma_z dA_2$   | $\int_{A_3} \sigma_z dA_3$   |

モーメントは，頂版中央部で正，頂版柱側および側壁側や，柱部，側壁部で負となる。また，水平成分による曲げモーメントは，側壁部付近で正，柱部付近で負になる分布をすると考えられる。従って，頂版中央部では鉛直成分の影響が大きく，柱部付近では鉛直成分と水平成分による影響が重なり，側壁部付近では相打ち消すように作用することから，上述のような傾向となったものと考えられる。リバウンド時の応答に関しても同様である。なお，底版部に関しては大きな差異は見られない。

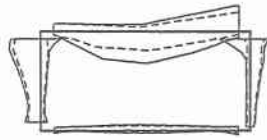
図-5(a)に示す裏込部の落石の場合には，全体的に覆工頂版上への落石の場合よりも小さい応答となっているが，その応答性状は覆工頂版上への落石時と大きく異なる。特に柱部の曲げモーメント分布は上部から下部に向かって直線的に推移しており，かつ上下部ではほぼ絶対値の等しい正負対称の性状を示している。また，土圧を直接受ける側壁部では，基部を除き正側に分布しており，背面土圧の影響を受けて等曲げに近い応答性状を示している。なお，ここでも頂版部の正の応答は衝突角度の小さい場合が全体的に大きくなる傾向を示している。

(2) せん断力について

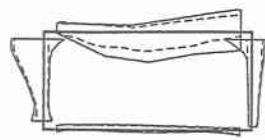
図-4(b)の  $Q_y$  の分布について見ると，衝突角度の

└ 200kNm/m, 400kNm

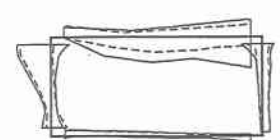
—— 敷砂緩衝材    ---- 三層緩衝構造



衝突角度 90 度

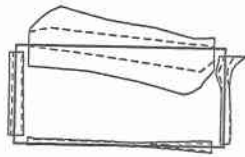


衝突角度 70 度

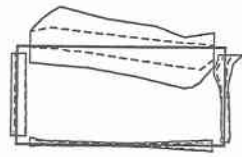


衝突角度 50 度

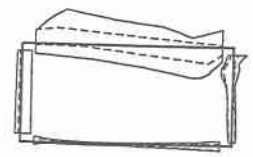
(a) 曲げモーメント  $M_y$



衝突角度 90 度

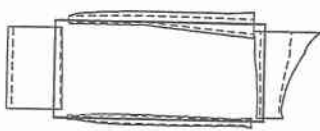


衝突角度 70 度

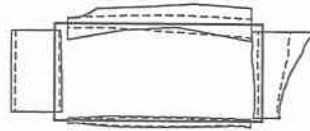


衝突角度 50 度

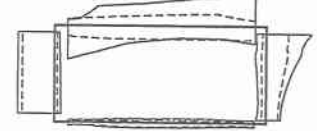
(b) せん断力  $Q_y$



衝突角度 90 度



衝突角度 70 度



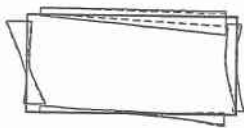
衝突角度 50 度

(c) 軸力  $N_y$

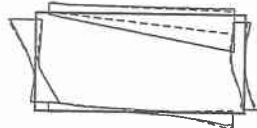
図-4 覆工部落石想定の場合の最大断面力包絡線

└ 100kNm/m, 200kNm

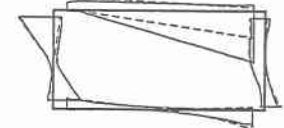
—— 敷砂緩衝材    ---- 三層緩衝構造



衝突角度 90 度

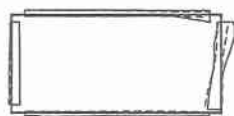


衝突角度 70 度

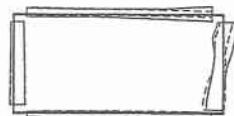


衝突角度 50 度

(a) 曲げモーメント  $M_y$



衝突角度 90 度

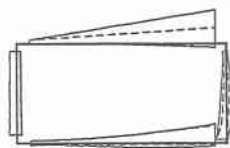


衝突角度 70 度

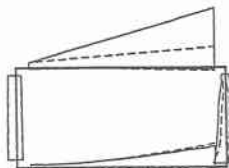


衝突角度 50 度

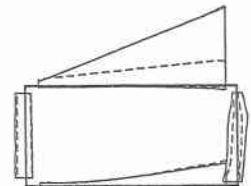
(b) せん断力  $Q_y$



衝突角度 90 度



衝突角度 70 度



衝突角度 50 度

(c) 軸力  $N_y$

図-5 裏込部落石想定の場合の最大断面力包絡線

違いによる応答値に差異は見られるが、全体的な分布性状は類似していることがわかる。また、覆工頂版上への落石の場合と図-5(b)の裏込部への落石の場合を比較すると、裏込部への落石の場合が小さな応答を示している。しかしながら、側壁基部においては逆に大きな応答を示している。

### (3) 軸力について

図-4(c)の  $N_y$  の分布に関しては、覆工頂版上の落石の場合には頂版部において衝突角度の違いによる応答の差異が顕著に現れている。また、衝突角度の減少とともに衝撃力の水平力成分が卓越するため、引張側、圧縮側の応答が増大する傾向を示している。一方、柱部、側壁部では衝突角度が小さくなるにつれて応答が小さくなっている。また、図-5(c)の裏込部への落石の場合には、頂版あるいは底版部が背面土圧の合力に抵抗することより、いずれも側壁側で大きな応答を示している。

## 3.2. 緩衝材による応答の差異

ここでは、緩衝材の違いによる影響を検討する。

### (1) 曲げモーメントについて

図-4(a)および図-5(a)の  $M_y$  を見ると、頂版部において緩衝材の種類による応答の差異が大きいことがわかる。特に覆工頂版上への落石の場合にその差が顕著であり、三層緩衝構造を用いる場合の応答が敷砂緩衝材を用いる場合の1/2程度に軽減されている。また、裏込部への落石の場合にも、頂版部において同様の傾向を示している。これは、これまで明らかになっているように三層緩衝構造による衝撃力の時間的空間的分散効果によるものである。

### (2) せん断力について

図-4(b)および図-5(b)の  $Q_y$  に関する比較図より、覆工頂版上への落石の場合には  $M_y$  の場合と同様の傾向が見られる。すなわち、覆工頂版上への落石における頂版部のせん断力は、三層緩衝構造を用いた場合が敷砂緩衝材を用いた場合の1/2～2/3程度に軽減されている。しかしながら、裏込部への落石の場合には、側壁部の応答値に若干差異が見られるものの、両緩衝構造の場合でほとんど同様の応答値となっている。これは、最大衝撃力を緩衝材にかかわらず490kNと一定にしていることと、側壁への背面土圧が類似の分布性状を示すためと推察される。

### (3) 軸力について

図-4(c)および図-5(c)の  $N_y$  に関しては、頂版部のみならず側壁部においても落石位置の違いにかかわらず、三層緩衝構造を用いる場合の応答値が敷砂緩衝材を用いる場合のそれに比べて1/2程度あるいはそれ以上に軽減されていることが読み取れる。これは三層緩衝構造を用いることにより頂版に作用する軸力に対応する背面土が軸方向に広く分散されるためと推察される。

## 4. まとめ

柱式 RC 覆工に対して、周辺地盤、背面裏込土および

落石衝突角を考慮したより合理的な耐衝撃設計法を確立することを目的として、衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA を用いた三次元弾性衝撃応答解析を行った。

本研究では、裏込部への落石や落石の衝突角度による影響に着目し、衝突角度や衝突位置等、各種パラメータを変更した数百種の解析ケースを設定し、数値解析を行った。本研究で得られた結果を要約すると、以下のようである。

- 1) 覆工頂版上への落石の場合、頂版部の応答は衝突角度の低減とともに減少するが、頂版部側壁側で正の曲げモーメントの応答が逆に大きくなる傾向を示すので注意が必要である。また、柱部の応答は衝突角度が小さいほどやや大きくなる傾向を示す。
- 2) 裏込部への落石の場合、その応答性状は覆工頂版上への落石の場合とは異なった性状を示している。しかしながら、その応答値は覆工頂版上への落石の場合のそれと比較してもそれほど大きいものではない。ただし、頂版部および底版部の軸力に関しては裏込部への落石の場合が覆工頂版上への落石の場合を上回ることより設計の時には留意すべきである。
- 3) 覆工頂版上への落石の場合には、緩衝材の違いが覆工の応答性状におよぼす影響が明瞭に現れる。また比較の結果、三層緩衝構造設置の場合には、敷砂緩衝材の場合に比べて頂版部における最大曲げモーメントを1/2程度以下に軽減させることができる。
- 4) 裏込部への落石の場合には、頂版部では緩衝材の影響が顕著であるが、柱部や底版部ではほとんど差異が見られない。

なお、今後さらに簡易かつ合理的な RC 覆工の断面力算定法を確立するために、覆工本体の形状を変えた場合の数値解析を行い、基礎資料を蓄積していく必要があると考えている。

## 参考文献

- 1) 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 覆工の衝撃挙動解析, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1773~1782, 1998.3.
- 2) 佐藤昌志, 岸 徳光, 松岡健一: 3次元挙動を考慮したRCロックシェッドの設計断面力評価, 土木学会北海道支部論文報告集, 第52号(A), pp.278~283, 1996.2.
- 3) 岸 徳光, 松岡健一, 佐藤昌志, 今野久志, 上坊寺実: 柱式 RC 覆道の弾性衝撃挙動, 第4回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム公演論文集, pp.71~78, 1998.6.
- 4) 土木学会: 構造工学シリーズ8 ロックシェッドの対衝撃設計, 1998.11.
- 5) 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応性に関する実証的検討, 土木学会論文集, No.483/I-26, pp.97~106, 1994.1.