

# アーチ構造の衝撃荷重作用時における敷砂緩衝材の緩衝効果

Absorbing effects of sand cushion on Arch-shape RC rock-shelter under falling weight impact loading

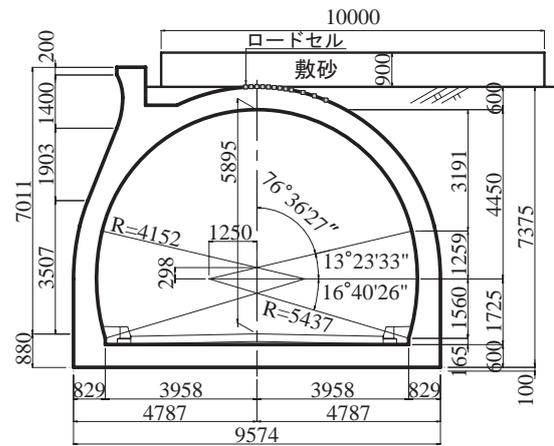
(株) 構研エンジニアリング	正員	鈴木 健太郎 (Kentaro Suzuki)
寒地土木研究所	正員	岡田 慎哉 (Shinya Okada)
寒地土木研究所	正員	表 真也 (Shinya Omote)
国土交通省北海道開発局	非会員	萩野 博紹 (Hiroaki Hagino)
室蘭工業大学	フェロー	岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

## 1. はじめに

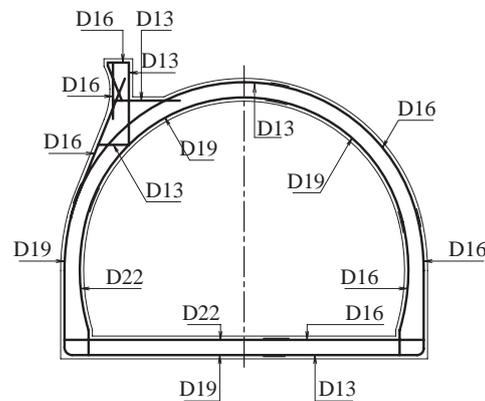
我が国の国土は、狭く細長い上に脊梁に山脈が縦断する急峻な地形を呈している。そのため、道路は海岸線や山岳部の急崖斜面に沿って建設されている箇所が多く、トンネルも多く建設されている。また、そのトンネル坑口部は一般的に斜面を背負っているため、鉄筋コンクリート製（以後、RC製）のアーチ構造形式のトンネル坑口部は、落石による衝撃力を受けることが想定される（写真-1参照）。しかしながら、落石対策が施されていない箇所も多く、かつ耐衝撃性能の検討が行われていないのが現状である。従って、落石から人命を守りかつ交通網を確保するためには、RC製アーチ構造形式のトンネル坑口部における耐衝撃性の確認と、耐衝撃性が十分でない場合には適切な耐衝撃性向上のための対策を講ずることが必要不可欠であるものと判断される。

著者らは、これまでにトンネル坑口部の落石対策のための緩衝構造として敷砂や三層緩衝構造を設置した場合の数値解析<sup>1)</sup>を実施し、RC製アーチ形式の衝撃応答特性や緩衝効果について検討を行ってきた。その結果、応答性状は矩形断面形状を有する落石覆工と大きく異なるものの、アーチ形状を有する覆工構造物においても三層緩衝構造が優れた緩衝効果を発揮することが明らかになっている。また、室内衝撃実験用小型RC製アーチ梁模型に関する衝撃応答解析<sup>2)</sup>を行い、その挙動性状に関する数値解析的な検討も行っている。

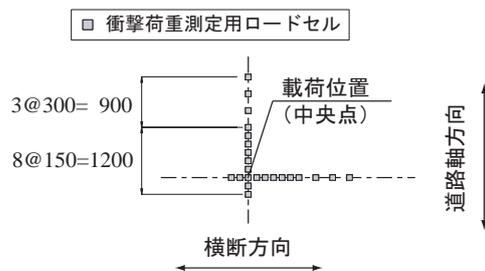
本研究では、敷砂緩衝材を設置した場合のRC製アーチ構造に関する緩衝効果を把握することを目的に、実物トンネル坑口部を用いた重錘落下衝撃実験を実施した。実験



(a) 形状寸法



(b) 配筋状況



(c) 伝達衝撃応力測定平面位置図



写真-1 トンネル坑口部の例

図-1 試験体の形状寸法および配筋状況



写真 - 2 実験状況

は、重錘の落下高さを漸増させた繰り返し载荷法により行った。検討項目は、重錘衝撃力、伝達衝撃力である。なお、本実物実験を実施したトンネル坑口は、別線ルート完成に伴い、平成14年度から廃道となっている259m区間を使用している。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

図 - 1(a) 図は実験に用いたトンネル坑口部の形状寸法、(b) 図はその配筋状況、(c) 図は伝達衝撃力測定平面位置図をそれぞれ示している。試験体に用いたトンネル坑口部の断面形状は、覆工部材厚：600 mm、上半内空半径：4,152 mm、側壁部高さ：1,725 mm、道路軸方向の1ブロック延長：6,000 mmである。覆工主鉄筋にはD13～D22、配力筋にはD13がそれぞれ250 mm間隔で配筋されている。かぶり厚は100 mmとなっている。なお、鉄筋の材質は全てSD295Aである。緩衝材の厚さは、設計要領<sup>3)</sup>に規定されている値を参考に900 mmとしている。

実験ケースは、落下高さ  $H = 2.5, 5, 10, 20$  m と変化させた全4ケースである。なお、試験体であるトンネル坑口部のコンクリートの圧縮強度は、 $f_c = 27.5$  MPaであった。

### 2.2 実験方法

写真 - 2 には実験状況を示している。実験は、質量10,000 kgの鋼製重錘をクローラクレーンを用いて所定の高さまで吊り上げ、アーチ部中央点に自由落下させることにより行っている。実験時における敷砂緩衝材の平均湿潤密度および平均含水比は、それぞれ  $1,660 \text{ kg/m}^3$  および  $8.4\%$  である。重錘は、直径1.25 m、高さ95 cmで底部が半径100 cmの球状となっている。

本実験の測定項目は、重錘頂部表面に設置したひずみゲージ型加速度計（容量500 G、応答周波数DC～5 kHz）による重錘衝撃力、覆工表面に凹凸が生じないように埋設された衝撃応力測定用ロードセル（受圧径32 mm、容量9.8 MPa、応答周波数DC～1 kHz、図 - 1(c) 図参照）による伝達衝撃力である。また、実験時の各種応答波形は、サンプリングタイム0.1 msでデジタルレコーダにて一括収録を行っている。

## 3. 衝撃実験結果

### 3.1 各種応答波形

図 - 2(a) 図および(b) 図には、各実験ケースにおける重錘衝撃力波形、载荷点の伝達衝撃力波形を示している。(a) 図より、いずれの実験ケースも衝突初期において振幅が最大応答値となる継続時間が100 ms程度の正弦半波状の第1波と、継続時間が50～80 ms程度の正弦半波状の第2波が重ね合わされた分布性状を示している。最大重錘衝撃力は、衝突エネルギー  $E_k$  が増加するに従い増加しているが、第2波のピーク値は衝突エネルギー  $E_k$  に関わらずいずれのケースも600 kN程度を示している。重錘衝撃力の波動継続時間は170 ms程度であるのに対し、平坦な剛基礎上に設置した敷砂緩衝材に関する重錘落下衝撃実験結果<sup>4)</sup>では120 ms程度である。このことから、本実験にお

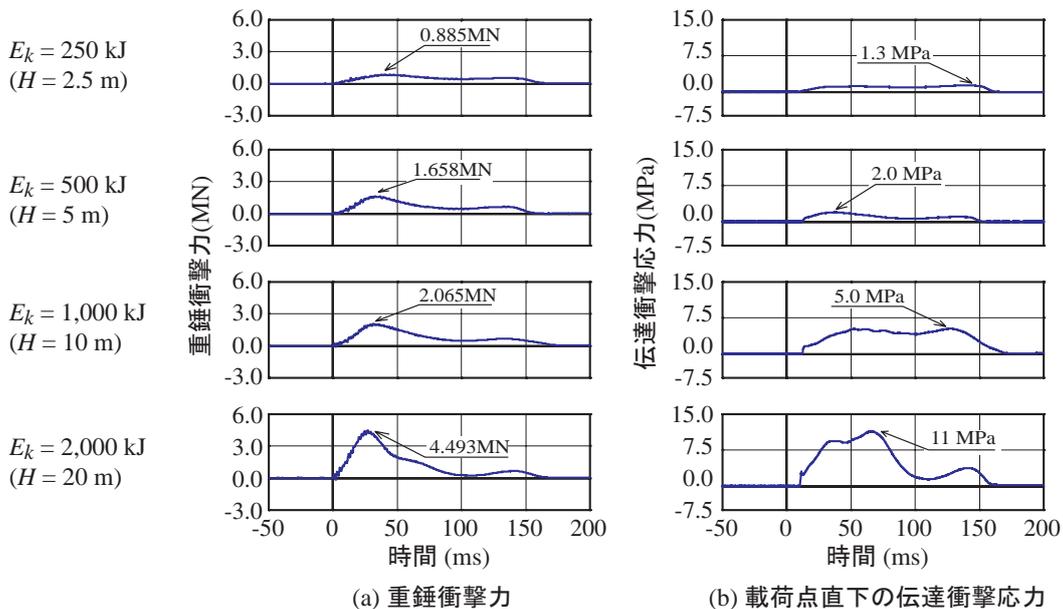


図 - 2 各種応答波形

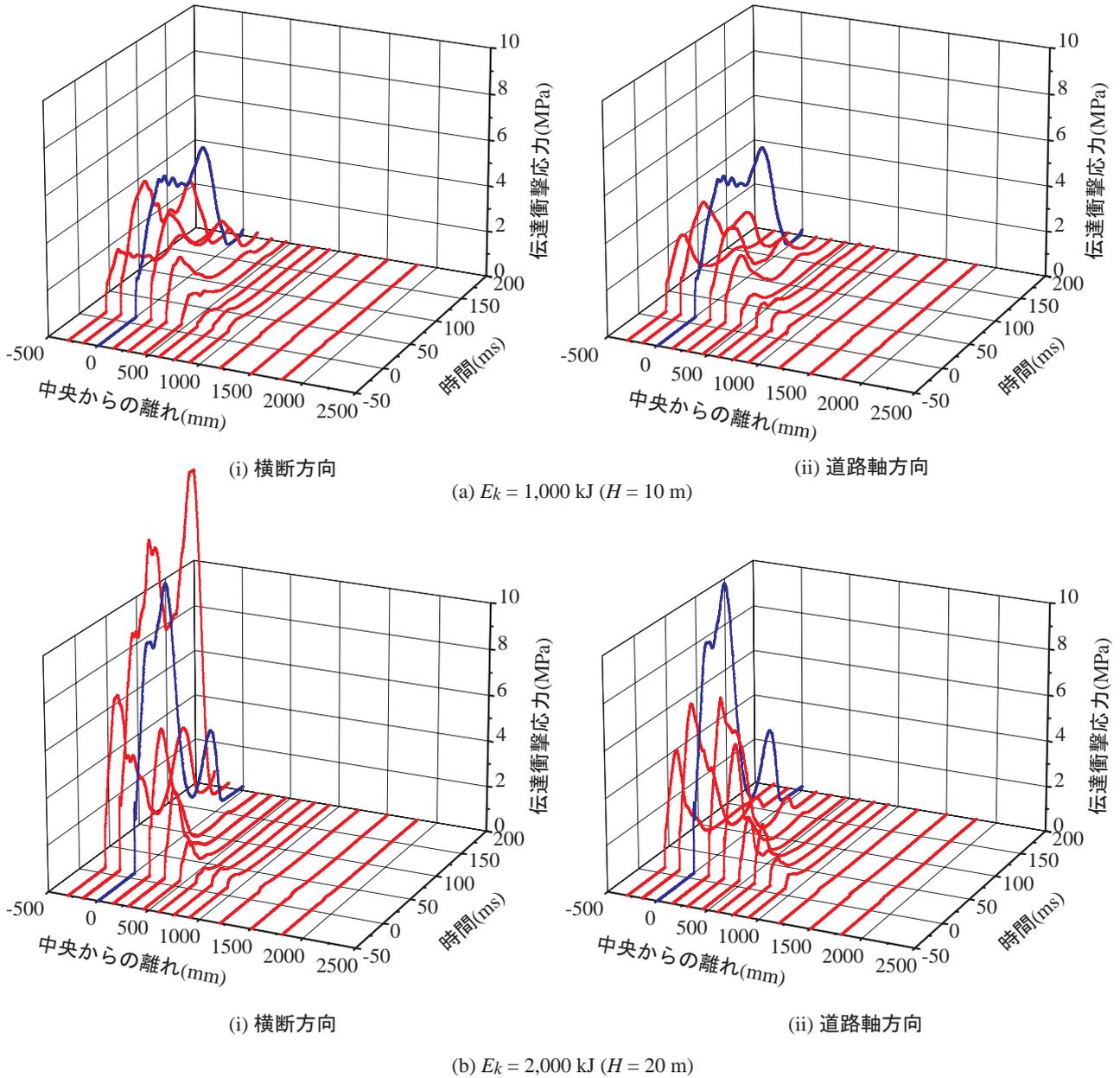


図 - 3 伝達衝撃応力分布波形

ける重錘衝撃力の主波動継続時間は、平坦な剛基礎上の場合に比較して 1.5 倍程度の値となっていることが分かる。これは、敷砂緩衝材とアーチ構造との連成効果によるものと考えられる。

(b) 図より、荷点の伝達衝撃応力波形の立ち上がりは、重錘衝撃力波形に対して 10 ms 程度遅れている。波動継続時間は重錘衝撃力波形とほぼ同様であるものの、衝突エネルギー  $E_k = 1,000$  kJ 以下と  $E_k = 2,000$  kJ の場合における波動分布性状は異なることが分かる。すなわち、 $E_k = 1,000$  kJ までは 150 ~ 170 ms 程度の台形状を示しているのに対して、 $E_k = 2,000$  kJ の場合には 100 ms 程度で応答値が減少し、その後低振幅の波動分布性状を示している。

### 3.2 伝達衝撃応力分布

図 - 3(a) 図および (b) 図には、それぞれ衝突エネルギー  $E_k = 1,000$  kJ ( $H = 10$  m) および  $E_k = 2,000$  kJ ( $H = 20$  m) の場合における横断方向および道路軸方向の各伝達衝撃応力の 3 次元分布波形を示している。(i) 図において、横軸は横

断方向のロードセル位置を示しており、原点が荷点位置を示している。また、縦軸は応力振幅、奥行き方向は時間を表しており、重錘衝突の 50 ms 前からの波形分布を示している。(ii) 図も横軸が荷点直下を原点とした道路軸方向のロードセルの位置である。

(a) 図の  $E_k = 1,000$  kJ の場合には、横断方向および道路軸方向ともに中央から 1,000 mm 程度の範囲まで伝達衝撃応力が分布していることが分かる。また、2 MPa 程度以上の大きな伝達衝撃応力は荷点中央から 500 mm 程度の範囲に分布している。荷点中央部での伝達衝撃応力の継続時間は、重錘衝撃力と同様に 170 ms 程度であるのに対し、平坦な剛基礎上の場合<sup>4)</sup>では 30 ~ 40 ms 程度である。このことから、本実験における伝達衝撃応力の継続時間は、平坦な剛基礎上の場合に比較して 4 倍程度の値となっており、アーチ構造の動特性が深く関与していることが推察される。

(b) 図の  $E_k = 2,000$  kJ の場合では、荷点中央部におい

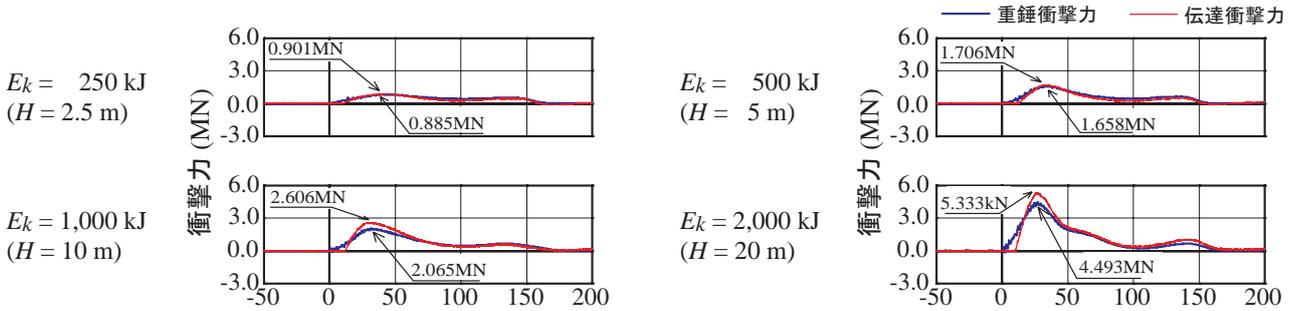


図 - 4 衝撃力波形

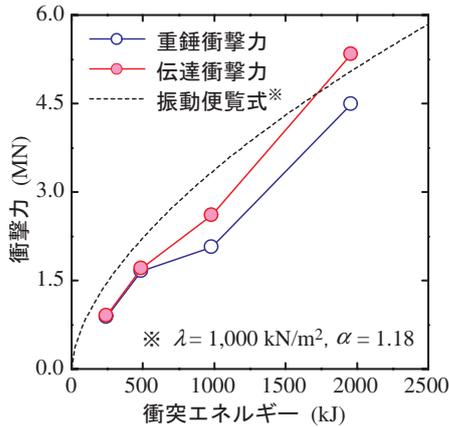


図 - 5 衝撃力と衝突エネルギーの関係

て 5 MPa 程度以上の最大伝達衝撃応力が発生しているものの、その発生領域は  $E_k = 1,000$  kJ の場合と同様に、横断方向および道路軸方向ともに載荷点中央から 500 mm 程度の範囲に分布している。以上より、敷砂緩衝材を設置した場合のアーチ構造における衝撃荷重は、本実験の範囲内において載荷点中央から 500 mm 程度の分布幅に発生する傾向にあることが明らかになった。

### 3.3 衝撃力波形

図 - 4 は、各実験ケースにおける重錘衝撃力および伝達衝撃力の波形分布を示している。なお、伝達衝撃力は、伝達衝撃応力が載荷点中央部に関して軸対称に分布するものと仮定し、応力を集積評価している。重錘衝撃力波形と伝達衝撃力波形を比較すると、両者ともにほぼ同様な波形性状を示している。また、伝達衝撃力波形は、重錘衝撃力波形に対して 10 ms 程度波形の立ち上がりに遅れが生じているものの、荷重継続時間および最大応答値発生時刻は両者でほぼ等しい。さらに、いずれのケースも最大伝達衝撃力は最大重錘衝撃力を上回る傾向にあることが分かる。

### 3.4 衝撃力と衝突エネルギーの関係

図 - 5 には、重錘衝撃力および伝達衝撃力の最大値と衝突エネルギーの関係を示している。また、Hertz の接触理論に基づく振動便覧式<sup>5)</sup>により算出した衝撃力も合わせて示している。

図より、実験結果における重錘衝撃力と振動便覧式による結果を比較すると、実験結果はラーメ定数： $\lambda = 1,000$  kN/m<sup>2</sup>、割増係数： $\alpha = \sqrt{D/T} = 1.18$  ( $D$ : 重錘径 1.25 m,  $T$ : 敷砂厚 0.9 m) と設定した場合の振動便覧式による衝撃力よりも小さく示される傾向にあることが分かる。また、伝達衝撃力に着目すると、衝突エネルギーが  $E_k = 1,000$  kJ

以上となる場合には、伝達衝撃力が重錘衝撃力よりも大きく示されており、その倍率は 1.2 倍程度となっている。一般に平坦な剛基礎上に敷砂緩衝材を設置する場合には、最大伝達衝撃力が最大重錘衝撃力の 1.5 ~ 2.0 倍になることが知られている<sup>4,5)</sup> ことより、本実験の場合にはアーチ部材厚が 600 mm と薄いことより大きく変形し、平坦な剛基礎の状態とは大きく異なることが推察される。以上より、敷砂緩衝材を設置した場合のアーチ構造において、伝達衝撃力は重錘衝撃力より大きいものの平坦な剛基礎上の場合における倍率よりは小さくなり、緩衝効果が大きく示される傾向にあることが明らかになった。

## 4. まとめ

本研究では、敷砂緩衝材を設置した場合の RC 製アーチ構造に関する緩衝効果を把握することを目的に、実物トンネル坑口部を用いた重錘落下衝撃実験を実施した。実験は、重錘の落下高さを漸増させた繰り返し载荷法により行った。本研究により得られた事項を整理すると、以下のように示される。

- (1) 敷砂緩衝材を設置した場合のアーチ構造における衝撃荷重は、本実験の範囲内において載荷点中央から 500 mm 程度の分布幅に発生する。
- (2) 敷砂緩衝材を設置した場合のアーチ構造においても伝達衝撃力は重錘衝撃力よりも大きくなるものの、アーチ構造も変形することにより、平坦な剛基礎上に設置した敷砂緩衝材に関する重錘落下衝撃実験結果における緩衝効果よりも大きく示される。

## 参考文献

- 1) 川瀬良司, 今野久志, 牛渡裕二, 岸 徳光: 各種緩衝材を設置した場合のトンネル坑口部の落石衝撃挙動解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.871-876, 2003.6
- 2) 川瀬良司, 岸 徳光, 今野久志, 岡田慎哉: 小型 RC アーチ梁模型の衝撃応答特性に関する数値解析的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.847-852, 2006.6
- 3) 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.
- 4) 土木学会: 構造工学シリーズ 8 ロックシェッドの耐衝撃設計, 1998.11.
- 5) 日本道路協会: 落石対策便覧, 1998.11.