

アーチ構造の衝撃荷重作用時における三層緩衝構造の緩衝効果

Effects of three-layered absorbing system for Arch type RC rock-shelter under falling weight impact loading

寒地土木研究所
 寒地土木研究所
 寒地土木研究所
 国土交通省北海道開発局
 (株)構研エンジニアリング
 室蘭工業大学

○ 正員 石川 博之 (Hiroyuki Ishikawa)
 正員 今野 久志 (Hisashi Konno)
 正員 岡田 慎哉 (Shinya Okada)
 非会員 萩野 博紹 (Hiroaki Hagino)
 正員 保木 和弘 (Kazuhiro Hoki)
 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

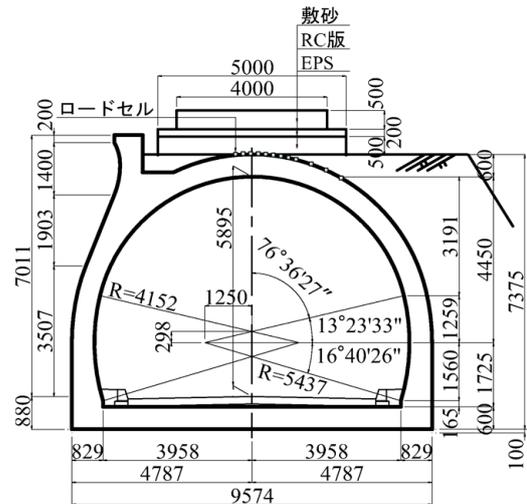
1. はじめに

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。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。写真-1にトンネル坑口部の例を示す。

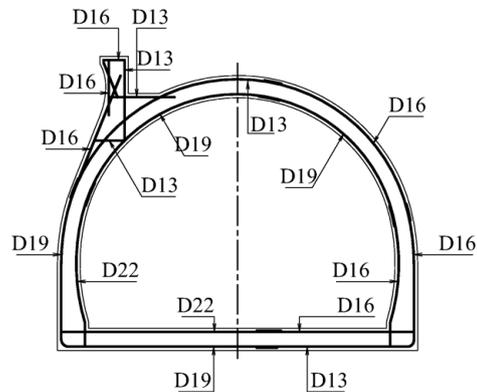
従って、落石から人命を守りかつ交通網を確保するためには、RC製アーチ構造形式のトンネル坑口部における耐衝撃性の確認と、耐衝撃性が十分でない場合には適切な耐衝撃性向上のための対策を講ずることが必要不可欠であるものと判断される。

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¹⁾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いる。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が、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²⁾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。

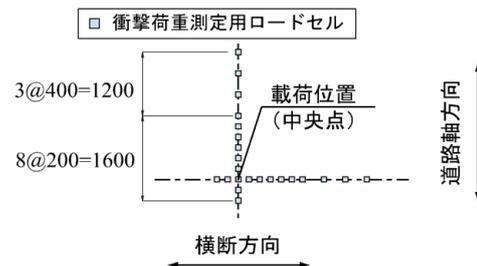
本研究では、三層緩衝構造を設置した場合のRC製アーチ構造に関する緩衝効果を把握することを目的に、実トンネル坑口部を用いた重錘落下衝撃実験を実施することとした。実験は、緩衝工として三層緩衝構造を用い、重錘の落



(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

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。また、三層緩衝構造の使用限界を超過した場合の緩衝効果の余裕度を把握するために、三層緩衝構造の設計は、設計要領³⁾に規定されている衝突エネルギー $E_k=1,000$ kJ までを対象として行い、実験では最大衝突エネルギー $E_k=3,000$ kJ まで増加させている。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)図は伝達衝撃応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:600mm、上半内空半径:4,152mm、側壁部高さ:1,725mm、道路軸方向の1ブロック延長:6,000mmである。覆工主鉄筋にはD13~D22、配筋筋にはD13をそれぞれ250mm間隔で配筋し、かぶりは100mmとなっている。なお、鉄筋の材質は全てSD295Aである。三層緩衝構造は、最小構成である、敷砂厚500mm、RC版厚200mm、EPS材厚500mmとしている。

実験ケースは、落下高さ $H=10, 20, 30$ m を変化させた

全3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、 $f_c=36.1$ 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10,000kgの鋼製重錘をクローラー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材の平均湿潤密度および平均含水比は、 $1,610$ kg/m³、13.8%である。また、三層緩衝構造の芯材に用いたRC版は、形状寸法が $5.0 \times 5.0 \times 0.2$ m、圧縮強度 $f'_c=27$ MPa、設計要領³⁾に準拠して鉄筋比1%以上の複鉄筋配筋となるようにD22(材質SD345)を250mm間隔とし、裏層材には密度 20 kg/m³のEPSを用いた。なお、各実験ケースにおいてRC版、EPS材は常に未使用材を用いることとした。重錘は、直径1.25m、高さ95cmで底部が半径100cmの球状となっている。なお、クレーン能力の限界が30mであることより、落下高さは30mまでとしている。

2.3 計測方法

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500G、応答周波数DC~5kHz)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32mm、容量9.8MPa、応答周波数DC~1kHz、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0.1ms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、それぞれ各実験ケースにおける重錘衝撃力波形および载荷点における伝達衝撃力波形を示している。なお、(b)図における衝突エネルギー $E_k=1,000$ kJ の場合は応答値が他の実験ケースと比較して小さいため、応答値表示範囲を0.4MPaと小さく設定している。

(a)図より重錘衝撃力波形は、衝突エネルギー $E_k=1,000$ kJ の場合を除きいずれも衝突初期において継続時間が30ms程度の正弦半波状の第1波と、継続時間が70~75ms

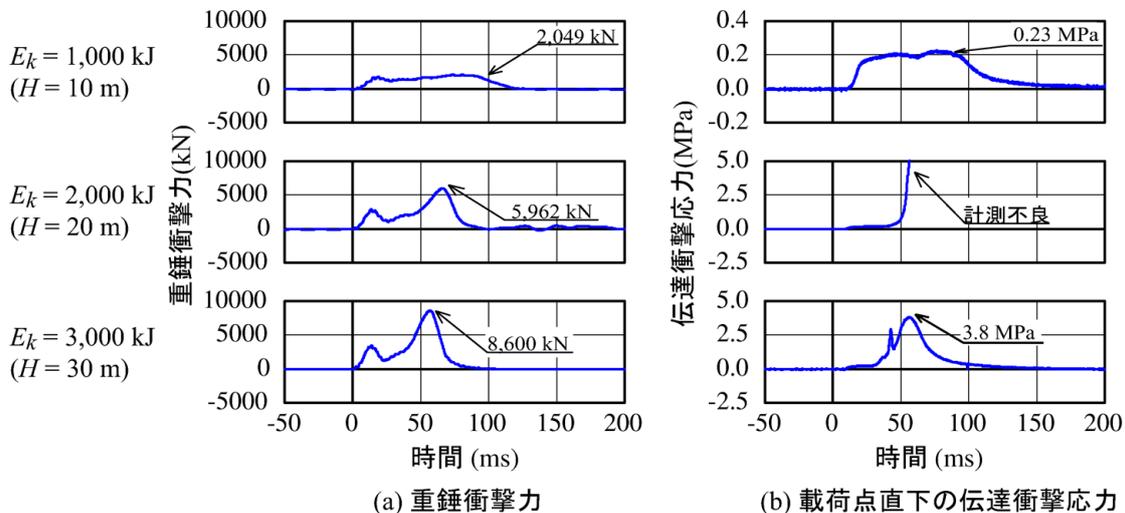


図-2 各種応答波形

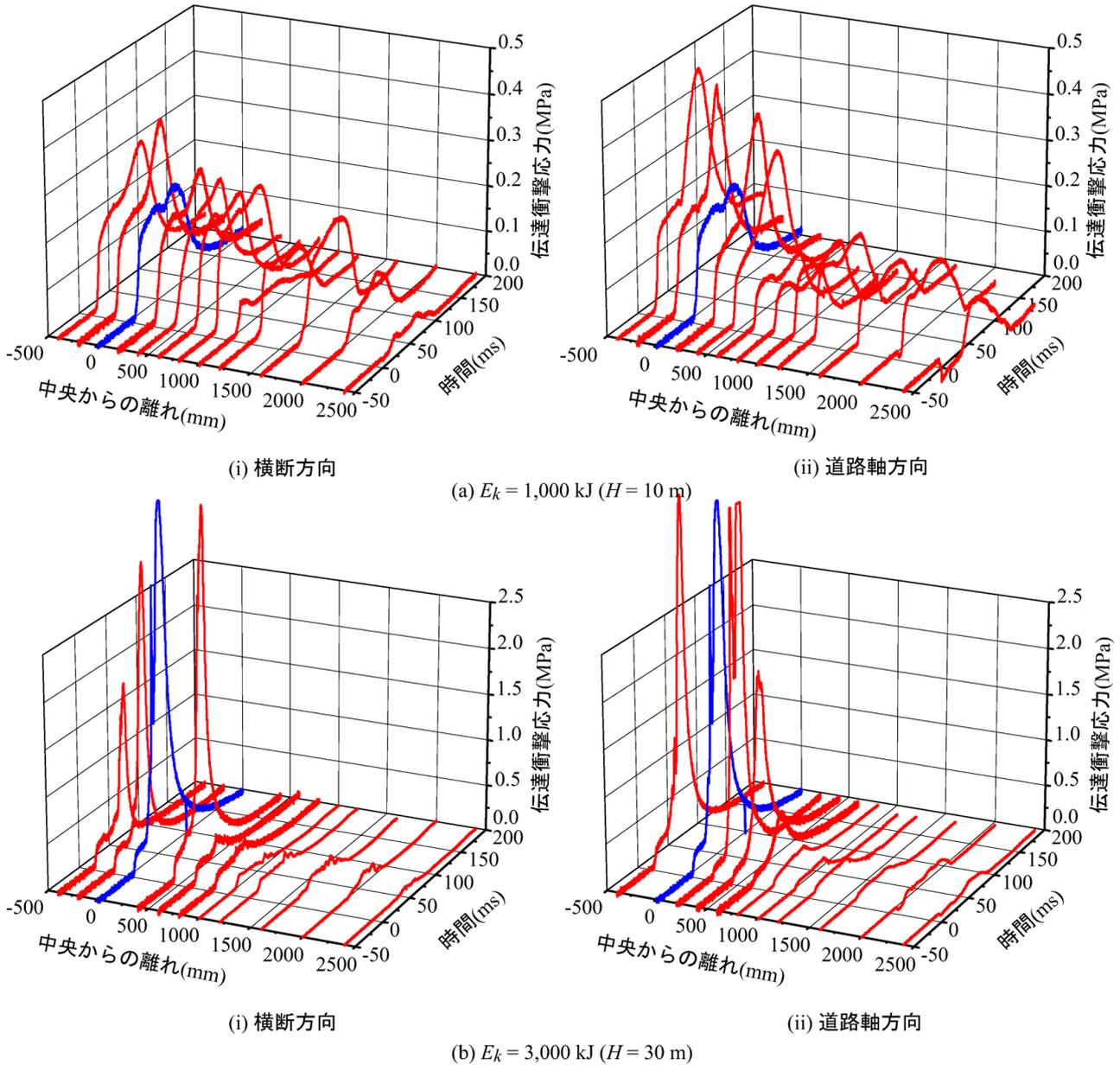


図-3 伝達衝撃応力分布波形

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。このように、三層緩衝構造を設置した場合のアーチ構造における主波動の継続時間は80～120ms程度であるのに対し、平坦な剛基礎上に設置した三層緩衝構造に関する重錘落下実験結果⁴⁾では60ms程度である。このことから、アーチ構造の場合にお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1～2倍程度の値となる。これは、アーチ構造が衝突衝撃力によって動的に応答することによるものと推察される。

(b) 図より、载荷点の伝達衝撃応力波形は、 $E_k = 1,000 \text{ kJ}$ の場合には重錘衝撃力波形に対して15ms程度の立ち上がりに遅れが生じており、波形性状は台形分布状と示されている。また、 $E_k = 2,000 \text{ kJ}$ の場合には計測不良のため計測範囲を大きく超過した。 $E_k = 3,000 \text{ kJ}$ の場合には、 $1,000 \text{ kJ}$ の場合の波形性状と大きく異なり、波形の立ち上がりも30ms程度遅れている。最大応答値では、 $E_k = 1,000 \text{ kJ}$ の場合で最大0.23MPa程度発生している。これはEPSブロック

が60%程度の圧縮されたひずみに相当し、EPSの吸収エネルギー限界値程度であることを示している。 $E_k = 3,000 \text{ kJ}$ の場合にはEPSの吸収エネルギー限界値を大きく超過し3.8MPa程度の応答値を示している。

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 $E_k = 1,000 \text{ kJ} (H = 10 \text{ m})$ および $E_k = 3,000 \text{ kJ} (H = 30 \text{ m})$ に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、原点が载荷位置を示している。また、縦軸は応力振幅、奥行方向は時間を表しており、重錘衝突の50ms前からの波形分布を示している。(ii)図も横軸が载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 $E_k = 1,000 \text{ kJ}$ の場合では、横断方向における伝達衝撃応力は時間的にほぼ台形状の分布性状となっており、0.1MPa程度以上の応力が構造全体に発生し、アーチ構造の場合においても平坦な剛基礎

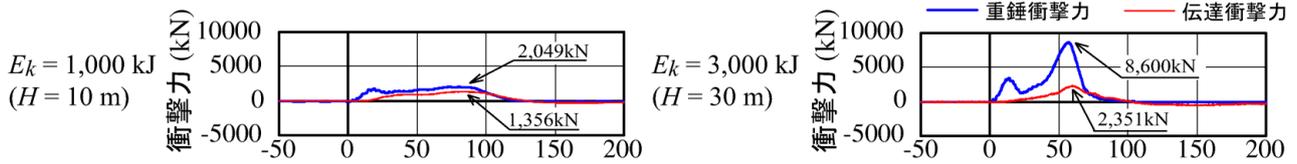


図-4 衝撃力波形

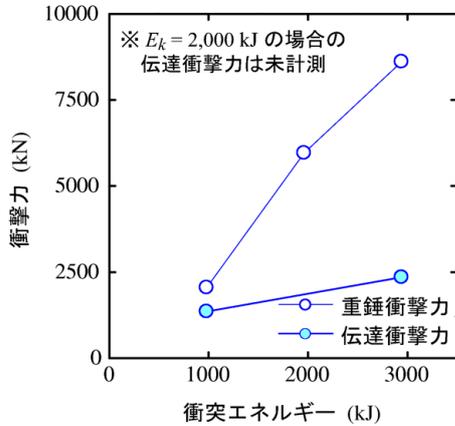


図-5 衝撃力と衝突エネルギーの関係

上の場合と同様に荷重分散性に優れていることが分かる。道路軸方向では、載荷点中央部において0.4MPa程度の大きな応力の発生は確認できるものの、荷重分散傾向は横断方向とほぼ同様である。主波動の継続時間は、重錘衝撃力と同様に120ms程度であるのに対し、平坦な剛基礎上の場合⁴⁾では60～80ms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1.5～2倍程度の値となる。この場合においても、アーチ構造が動的に大きく応答したことによるものと考えられる。

(b) 図の $E_k = 3,000$ kJ の場合では、載荷点中央部において2MPa程度以上の最大伝達衝撃応力が発生しているものの、0.1MPa程度以上の伝達衝撃応力は、1,000kJの場合と同様に横断方向および道路軸方向ともに構造全体に発生していることが分かる。以上より、本三層緩衝構造における規定の3倍程度の衝突エネルギーを作用させた場合においても、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実験結果⁴⁾と同様に構造全体に衝撃荷重が分散することが明らかとなった。

3.3 衝撃力波形

図-4には、 $E_k = 1,000$ kJ および $E_k = 3,000$ kJ に関す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。重錘衝撃力波形および伝達衝撃力波形を比較すると、 $E_k = 1,000$ kJ の場合では伝達衝撃力波形は重錘衝撃力波形に対して15ms程度波形の立ち上がりに遅れが生じている。 $E_k = 3,000$ kJ の場合では、伝達衝撃力の立ち上がりは20ms程度遅れており、 $E_k = 1,000$ kJ の場合の波形性状と異なることが分かる。これは、衝突エネルギーが本三層緩衝構造の対象エネルギーよりも大きいことによるものと推察される。また、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く、両者ともに最大伝達衝撃力は最大重錘衝撃

力を下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。図より、重錘衝撃力は、衝突エネルギーの増加に伴って最大応答値も増加することが分かる。また、伝達衝撃力は $E_k = 1,000$ kJ の場合で重錘衝撃力の0.7倍程度、 $E_k = 3,000$ kJ の場合では0.3倍程度となっている。以上より、三層緩衝構造を設置した場合のアーチ構造においても、平坦な剛基礎上の場合と同様に衝突エネルギーが増加するほど緩衝効果が大きくなる傾向にあることが明らかとなった。

4. まとめ

本研究では、これらのRC製アーチ構造に関する三層緩衝構造の緩衝効果を把握することを目的に、実規模トンネル坑口部を対象とした重錘落下衝撃実験を実施することとした。実験は、緩衝工に三層緩衝構造を用い、重錘の衝突速度を漸増させた繰り返し載荷を行った。検討項目は、重錘衝撃力、伝達衝撃力に着目して行うこととした。検討結果を整理すると、以下のように示される。

- (1) 横断方向および道路軸方向ともに伝達衝撃力は時間的にほぼ台形状の分布性状となっており、同程度の大きさの応力が構造全体に発生し、三層緩衝構造を設置した場合のアーチ構造においても平坦な剛基礎上の場合と同様に荷重分散性に優れている。
- (2) 本三層緩衝構造における規定の3倍程度の衝突エネルギーを作用させた場合においても、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実験結果と同様に構造全体に衝撃荷重が分散する。
- (3) 三層緩衝構造を設置した場合のアーチ構造においても、平坦な剛基礎上の場合と同様に衝突エネルギーが増加するほど緩衝効果が大きくなる傾向にある。

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.