# 三層緩衝構造を設置したトンネル坑口部の落石衝撃挙動に関する実物実験

Falling-weight impact test in field of Arch-shape RC rock-shelter with three-layered absorbing system

(株)構研エンジニアリング	○正員	川瀬 良司 (Ryoji Kawase)
寒地土木研究所	正員	今野久志 (Hisashi Konno)
寒地土木研究所	正員	岡田 慎哉 (Shinya Okada)
国土交通省北海道開発局	非会員	荒木 恒也 (Nobuya Araki)
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.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 果を発揮すること等が明らかになっている。

本研究では、三層緩衝構造を設置した RC 製アーチ構造 に関する落石衝撃挙動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、実構造の 挙動を把握することとした.実験は、緩衝工として三層緩 循構造を用い、重錘の落下高さを漸増させた繰り返し載 荷および単一載荷実験を行うこととした.検討項目は、重 錘衝撃力、アーチ構造の変位、コンクリート表面の応力お よびひび割れ状況の観察である.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<sup>2)</sup>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には実験に用いたトンネル坑口部の形状寸法, 図-2はその配筋状況および計測位置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



図-1 試験体の形状寸法



図ー2 配筋状況および計測位置

表-1 実験ケース一覧

1		~ ~
実験ケース	載荷方法	落下高さ
T-II	繰り返し	10, 20, 30 m
T-IS-H30	単一	30 m

材厚を 600 mm, 上半内空半径を 4,152 mm, 側壁部高さを 1,725 mm, 道路軸方向の 1 ブロック延長は 6,000 mm であ る. 覆工主鉄筋には D13 ~ D22, 配力筋には D13 をそれ ぞれ 250 mm 間隔で配筋し,かぶりは 100 mm 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



写真-1 実験状況

造は,最小構成である,敷砂厚 500 mm, RC 版厚 200 mm, EPS 材厚 500 mm としている.

**表**-1には、本実験に用いた実験ケースの一覧を示している.実験ケースは、落下高さを変化させた全4ケースである.表中の試験体名のうち、第一項目 T は三層緩衝構造を示している.第二項目は載荷方法を示しており、II および IS はそれぞれ衝撃荷重の漸増繰り返し載荷および単一載荷により実験を行ったことを示している.なお、試験体名の末尾に落下高さ H(m) を付している.試験体である各トンネル坑口部のコンクリートの圧縮強度は、繰り返し載荷の場合で、 $f_c = 36.1$  MPa、単一載荷で $f_c = 29.7$  MPa であった.

# 2.2 実験方法

**写真-1**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材の平均湿潤密度および 平均含水比は,繰り返し載荷でそれぞれ 1,610 kg/m<sup>3</sup>,13.8 %,単一載荷でそれぞれ 1,580 kg/m<sup>3</sup>,12.8 % 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 × 5.0 × 0.2 m, 圧縮強度  $f'_c$  = 27 MPa, 設計要領 <sup>2)</sup> 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 250 mm 間隔とし,裏層材には密度 20 kg/m<sup>3</sup>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 1.25 m,高さ 95 cm で底部が半径 100 cm の球状となっている. なお,クレーン能力の限界が 30 m であることより,落下 高さは 30 m 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 500 G,応答周波数 DC~5 kHz) による重錘衝撃力,図-2に示す位置の非接触式レーザ変 位計(容量 500 mm,応答周波数約1 kHz)による変位およ びひずみゲージによるコンクリート表面のひずみである. なお,コンクリート各点のひずみ測定に関しては,コンク リート表面に微細な凹凸やひび割れが発生しているため, ひずみゲージを直接添付することが不可能であることよ り,燐青銅板(50×20×0.3 mm)を樹脂系接着剤とネジ留 めにより固定し,その上にひずみゲージを添付して測定す ることとした.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.



# 図ー3 各種応答波形





# 3. 衝撃実験結果

### 3.1 各種応答波形

図-3(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載荷点における鉛直変位波 形を示している.

重錘衝撃力波形に着目すると、衝突エネルギー $E_k = 1,000$  kJ (H = 10 m 落下)の場合を除き衝突初期において継続時間が 30 ms 程度の正弦半波状の第 1 波と継続時間が 70 ~ 75 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。既往の研究<sup>3)</sup>より、第 1 波目は重錘が敷砂貫入時に発生したものであり、第 2 波目は主に重錘が締め固められた敷砂を介して芯材 RC 版に衝突することにより発生したものと推察される。一方、衝突エネルギー $E_k = 1,000$  kJ の場合には、第 1 波目と第 2 波目の振幅が類似し、全体として継続時間が 120 ms 程度の台形状波形を呈している。これは、入力エネルギーが相対的に小さいため、重

錘の敷砂への貫入量が小さく,従って芯材 RC 版の衝突衝 撃力も小さくなることにより,裏層 EPS 材の変形によって ゆるやかにエネルギーが吸収されるためと推察される.ま た、第1波目における重錘衝撃力の最大値は,衝突エネル ギーの2~3倍の増加に対して 1.6~2.0倍程度の小さな増 加を示している.しかしながら,第2波目における重錘衝 撃力の最大値は 2.9~4.2倍と急激に増加している.波動 継続時間も衝突エネルギーの増加に従い,やや短くなって いる.このことは,本三層緩衝構造が設計要領<sup>2)</sup>に規定 されている衝突エネルギー  $E_k = 1,000$  kJ までを対象とする 最小構成としているが,特に衝突エネルギーを $E_k = 3,000$ kJ (H = 30 m落下)と増加する場合には,裏層 EPS 材厚が 薄いことにより EPS 材が芯材 RC 版から伝達された衝撃エ ネルギーを十分に吸収することが出来ず,比較的大きな衝 撃力が覆工に伝達されるためと考えられる.

載荷点における鉛直変位波形に着目すると,波形性状



は正弦半波状を呈しており,波形の立ち上がりは重錘衝 撃力の場合に比較し 20 ~ 30 ms 程度の遅れが生じている. また, $E_k = 1,000$  kJ (H = 10 m)の場合には,残留変位は発 生しないが, $E_k = 3,000$  kJ (H = 30 m)では 10 mm 程度以上 の残留変位が発生している.このことは,衝突エネルギー  $E_k = 1,000$  kJ に対応した三層緩衝構造を用いる場合には, 衝突エネルギー $E_k = 3,000$  kJ 以上に対して本アーチ構造は 塑性化することを示唆している.しかしながら,1)衝突エ ネルギーが 2~3 倍に増加しているにもかかわらず覆エコ ンクリートの裏面剥離が発生していないこと,2)後述する 広範囲に発生する覆エコンクリートのひび割れ分布などか ら,三層緩衝構造は規定以上の衝突エネルギーに対しても 衝撃エネルギー吸収能や分散効果が期待できるものと考え られる.

# 3.2 変位分布およびひずみ分布

図-4 には、衝突エネルギー  $E_k = 3,000$  kJ (H = 30 m) で ある T-IS-H30 に関する (a) 変位分布図および (b) 外面ひず み分布, (c) 内面ひずみ分布を示している. なお,図には載 荷直後より t = 150 ms までの分布を 10 ms 毎に示している. また, (a) 変位分布は変形倍率を 50 倍として表示している.

(a) 図の変位分布に着目すると、変位は t = 60 ms 経過以降に顕著に発生していることがわかる。その後、アーチの円中心点より 45° 付近における変位が増大し、載荷点付近の変位が t = 100 ms までほぼ一定に推移していることが分かる。変形は t = 130 ms でほぼ落ち着き、最大で 10 mm程度の残留変位が発生している。また、アーチの左右で若干異なる挙動を示している。

(b) 図の外面ひずみ分布は, t = 40 ms から載荷点直下付 近の圧縮ひずみが増大し, t = 60 ms 経過後にアーチの円中 心点より 45°付近で引張ひずみが発生している. その後, t = 70 ms でピークに達し, t = 110 ms までに徐々にひずみ が減少している. なお, 載荷点部とアーチ左側の円中心点 より 45°の位置で残留ひずみが発生している.

(c) 図の内面ひずみ分布に関しては,載荷点を中心に幅 3m程度の範囲において,ひずみが小さく示されている領 域が確認できる.これは,本試験体がアーチ構造であるこ とにより載荷点近傍のアーチ断面内で軸圧縮力が発生し, 衝突荷重によって発生するアーチ断面内側の引張力と相殺 されることにより,ひずみが小さくなっているものと推察 される.

このことより、トンネル坑口部に三層緩衝構造を設置す

ることによる荷重の分散効果によってアーチ作用が効率よ く発揮されることが明らかとなった.

# 3.3 ひび割れ発生状況

図-5には、繰り返し載荷後のトンネル坑口部内側ひび 割れ状況を見上げ図として示している。図より、重錘落下 高さ $H = 10 \sim 30$  mにおけるひび割れに着目すると、載荷 点を中心に幅3 m 程度の範囲に放射状のひび割れが分布し ている。これは、三層緩衝構造の荷重分散幅が大きいため、 ひび割れが広範囲にわたり、全体として衝撃力を受け持っ た結果によるものと考えられる。なお、本三層緩衝構造の 対象エネルギー $E_k = 1,000$  kJを大きく超える $E_k = 3,000$  kJ の衝突エネルギーを載荷したにもかかわらず、コンクリー トの剥落はみられない。

# 4. まとめ

本研究では、三層緩衝構造を設置した場合のRC 製アー チ構造に関する落石衝撃挙動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る繰り返し載荷法と単 一載荷法に基づいて行った.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) 衝突エネルギーが E<sub>k</sub> = 1,000 kJ を対象とした三層緩衝 構造を用いた場合,本アーチ構造は衝突エネルギー E<sub>k</sub> = 3,000 kJ 以上に対して塑性化する傾向を示す.
- (2) 三層緩衝構造は規定以上の衝突エネルギーに対しても 衝撃エネルギー吸収能や分散効果が十分期待できる.
- (3)トンネル坑口部に三層緩衝構造を設置することで、衝 撃荷重の分散効果によりアーチ作用が効率よく発揮される。

#### 参考文献

- 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
- (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.
- 3) 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.