

衝突位置を変化させた実規模RCアーチ構造の落石衝撃挙動に関する実験的検討

Experimental study on falling-weight impact behavior of Arch-shape RC Rock-shelter in case varying impact point

寒地土木研究所
室蘭工業大学
国土交通省北海道開発局
寒地土木研究所
寒地土木研究所
寒地土木研究所

○正員 岡田 慎哉 (Shin-ya Okada)
フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
非会員 大工 秀樹 (Hideki Daiku)
正員 今野 久志 (Hisashi Konno)
正員 石川 博之 (Hiroyuki Ishikawa)
正員 西 弘明 (Hiroaki Nishi)

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）のアーチ構造形式であるトンネル坑口部は、落石による衝撃力を受ける状況が想定される。しかしながら、RCアーチ構造形式の耐衝撃性能については、未だ十分な検討が行われていない。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緩衝構造として敷砂緩衝材を設置した場合の数値解析¹⁾を実施している。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実験²⁾を実施し、その挙動性状に関する数値解析的検討も行っている。

本研究では、敷砂緩衝材を設置したRC製アーチ構造について、载荷位置が変化した場合の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、緩衝工に敷砂緩衝材を用い、重錘の载荷位置を3種類に変化させた実験を実施した。

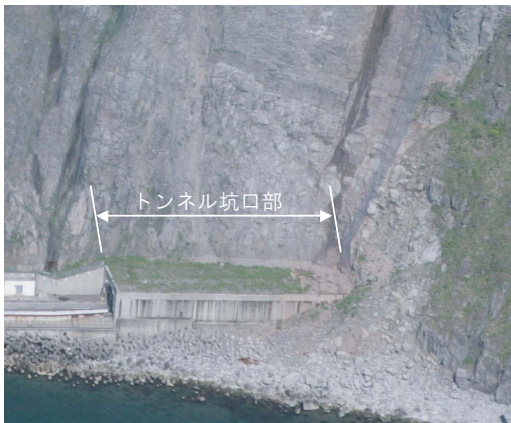


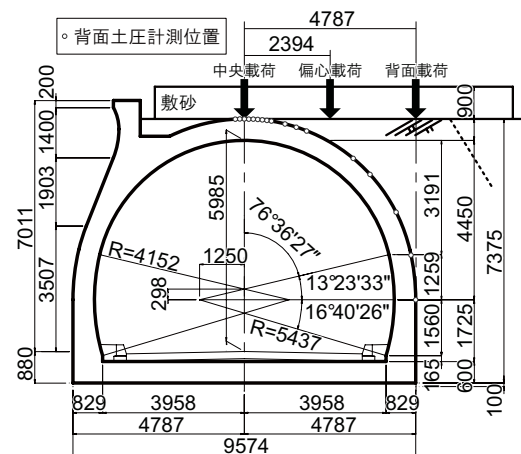
写真-1 トンネル坑口部の例

検討項目は、重錘衝撃力波形、変位波形、背面土圧分布、変位分布に着目して行うこととした。なお、本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区間の一部である。

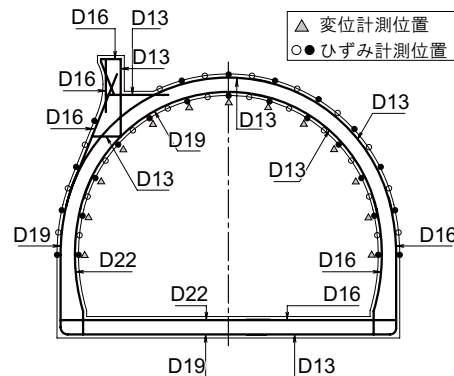
2. 実験概要

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、



(a) 形状寸法



(b) 配筋状況および計測位置図

図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

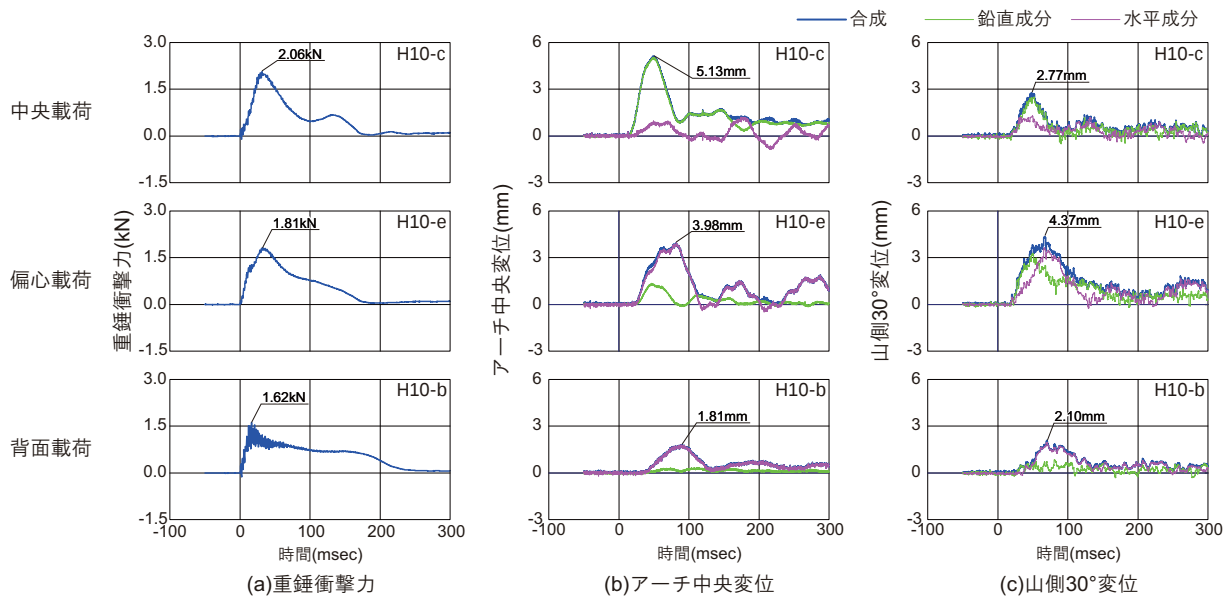


図-2 各種応答波形

を示している。

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、所定の荷重位置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、それぞれ $1,610\text{kg/m}^3$ 、13.8%である。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。

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）による覆工背面土圧、図-1(b)に示す位置の非接触式レーザ変位計（容量 500mm、応答周波数約 1kHz）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、コンクリートのひずみは、 $50\text{mm} \times 20\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ の磷青銅板にひずみゲージを貼付し、その磷青銅板をコンクリート表面における所定の位置に樹脂系接着剤およびネジにて取り付けて測定した。また、実験時の各種応答波形は、サンプリングタイム 0.1ms でデジタルレコーダにて一括収録を行っている。



写真-2 実験状況

表-1 実験ケース一覧

実験ケース	荷重位置	落下高さ	衝突エネルギー
H10-c	中央	10 m	1,000 kJ
H10-e	偏心 (2,394mm)	10 m	1,000 kJ
H10-b	背面 (4,787mm)	10 m	1,000 kJ

配筋筋には D13 がそれぞれ 250mm 間隔で配筋され、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。また、敷砂緩衝材の厚さは、設計要領³⁾に規定されている値を参考に 900mm としている。また、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、 $f_c=27.5\text{MPa}$ である。

表-1 には、実験ケースの一覧を示している。実験は、荷重位置をトンネル坑口中央部に荷重する中央荷重、覆工端部に荷重する背面荷重およびその中間部に荷重する偏心荷重の計 3 ケースを実施した。なお、実験は全て敷砂緩衝材 90cm を設置し、実施している。

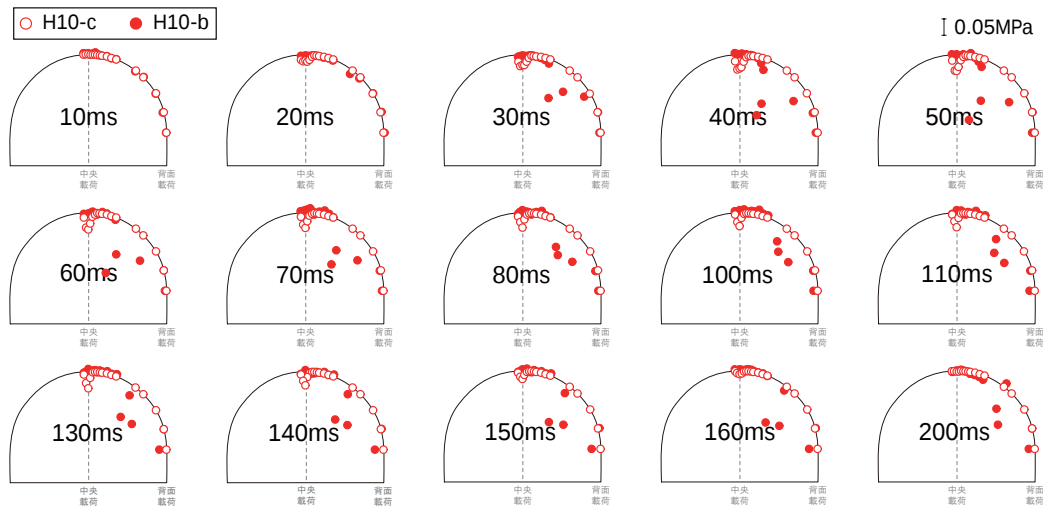
試験体名の第一項目は落下高さを示しており、第二項目は、それぞれ c が中央荷重、e が偏心荷重、b が背面荷重

3. 衝撃実験結果

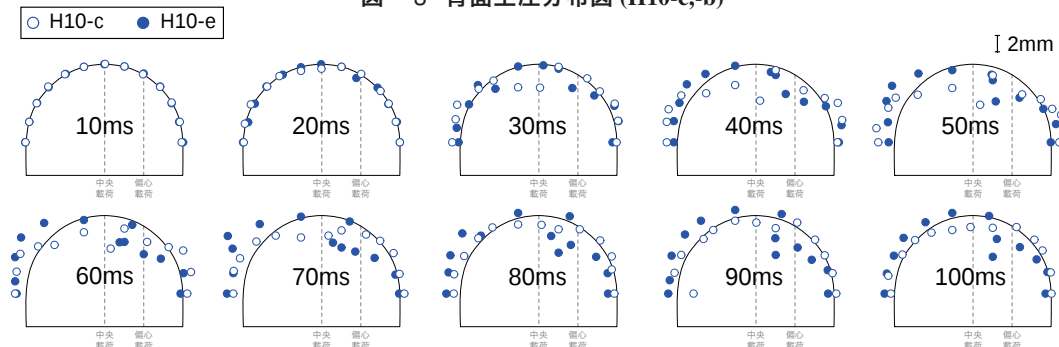
3.1 各種応答波形

図-2 には、(a) 重錘衝撃力波形、(b) アーチ中央変位波形、(c) アーチ中心から山側に 30° の位置における変位（以後、山側 30° 変位）波形を示している。

(a) 重錘衝撃力に着目すると、各ケースにおいて衝突初期において振幅が最大となり、継続時間が 80~100ms 程度の正弦半波状の第 1 波が発生する。その後、第 2 波が緩やかに推移しており、その継続時間は荷重点がアーチ中央から離れた荷重点ほど長い。これは、中央荷重時 (H10-c) においては敷砂緩衝材の直下に覆工本体があるのに対し、偏心荷重時 (H10-e) や背面荷重時 (H10-b) においては、敷砂緩衝材と覆工本体の間に裏込土が存在するため、緩衝材が厚く



図－3 背面土圧分布図 (H10-c, b)



図－4 変位分布図 (H10-c, e)

機能する状態となり、より柔軟なエネルギー吸収効果が発揮されたためと考えられる。また、最大重錘衝撃力はアーチ中央に近いほど増加しているが、第2波は载荷位置にかかわらず、いずれのケースも 0.75kN 程度を示している。

(b) アーチ中央における変位波形については、各ケースにおいて合成波形および合成波形を構成する鉛直成分波形、水平成分波形を示している。合成波形に着目すると、载荷点がアーチ中央に近いほど、大きな変位が発生していることがわかる。しかしながら、合成波形を構成する鉛直成分波形と水平成分波形では、中央载荷である H10-c において鉛直波形が主成分となっているのに対し、アーチ中央から離れている H10-e、H10-b においては、水平成分が主成分となっていることがわかる。これは、アーチに作用する伝達荷重位置が偏心することにより伝達力に水平方向成分が生じ、そのため剛性の低い水平方向の変形が鉛直方向と比較し大きく励起されたためと考えられる。

(c) 山側 30° 変位波形に着目すると、H10-e において最も大きな変位が発生していることがわかる。また、その構成成分は鉛直・水平ともに同程度の値を示しており、鉛直成分のピークよりも 20ms 程度遅れて水平成分のピークが発生している性状となっている。また、H10-c においては、鉛直方向が主成分である波形が $t=50\text{ms}$ でピークに達し、H10-b では、水平方向が主成分である波形が $t=70\text{ms}$ 程度でピークが発生している。

3.2 背面土圧分布

図－3 には、裏込土の介在によりアーチ覆工背面に発生する土圧分布を、中央载荷である H10-c と背面载荷である H10-b について $t=200\text{ms}$ まで抜粋して示している。

図より、H10-c に着目すると、 $t=20\text{ms}$ 以降に载荷点直下の土圧が徐々に増加し始めていることがわかる。土圧の増加は $t=60\text{ms}$ 程度でピークに達した後、一定に推移し、 $t=140\text{ms}$ 以降は落ち着く傾向となっている。

背面载荷である H10-b では、 $t=30\text{ms}$ 以降にアーチ円中心右 45° の位置で顕著な土圧が発生していることがわかる。土圧は、 $t=50\text{ms}$ でピークに達し、 $t=60\sim 100\text{ms}$ まで徐々に減少しているが、 $t=110\sim 150\text{ms}$ で再度緩やかな増加傾向を示している。その後、 $t=160\text{ms}$ 以降、土圧が減少し、 $t=220\text{ms}$ でゼロレベルとなったことを確認している。

また、偏心载荷である H10-e の場合については载荷点近傍であるアーチ円中心 30° の位置で顕著な土圧が発生していたことを確認している。

これらのことより、载荷点の中央からの距離が大きくなるに伴い背面土圧の分布が载荷点側に偏り、結果としてアーチに作用する衝撃土圧の水平方向成分が増加していることが分かる。

3.3 変位分布

図－4 には、中央载荷である H10-c と偏心载荷である H10-e における $t=100\text{ms}$ までの変位分布を 10ms 毎に示している。

H10-c における変位分布に着目すると、 $t=30\text{ms}$ 経過以降にアーチ中央部において顕著な変位が発生していることがわかる。アーチ内側への変形は载荷点直下であるアーチ中央部において最も大きく、アーチの円中心点より 45° の位置周辺においては、外側への変形であることがわかる。その後 $t=60\text{ms}$ 程度まで同様の変形性状を示し、 $t=70\text{ms}$ 経過以降は変形が落ち着く傾向となっている。

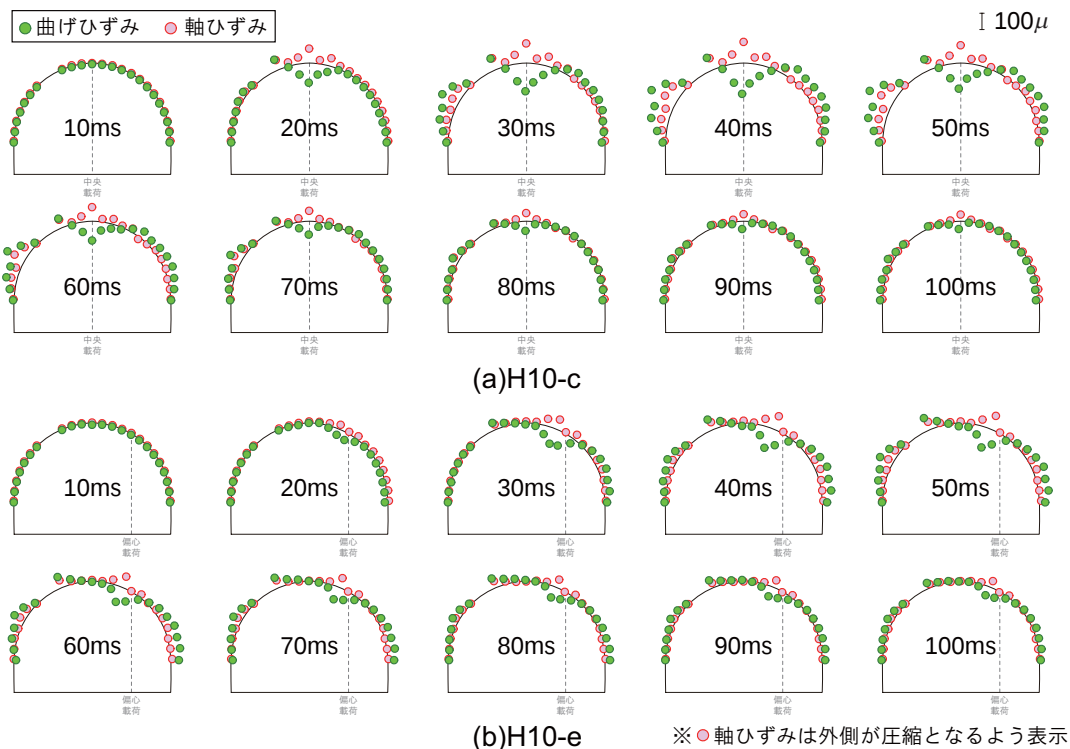


図-5 ひずみ分布図

H10-e における変位分布では、 $t=30\text{ms}$ 経過以降に変位が発生しはじめていることがわかる。変形は、荷点直下近傍で顕著であり、内側への変形である。また、アーチ中央を軸として対称の位置では、外側への変形が発生していることがわかる。これは、前述したように伝達荷重の水平成分の増大によるものと考えられる。なお、変形は小さいものの H10-b においても同様な傾向であったことを確認している。

3.4 ひずみ分布

図-5 には、アーチ覆工内面と外面で計測したひずみを、曲げひずみ成分と軸ひずみ成分に分解し、 $t=100\text{ms}$ まで 10ms 毎に示している。

(a) 図より、曲げひずみに着目すると $t=20\text{ms}$ 程度で、荷点直下とアーチ円中心点より 45° の位置周辺において曲げひずみが発生し始め、 $t=40\sim 50\text{ms}$ でピークに達している。その後 $t=60\text{ms}$ 経過以降はひずみが落ち着く傾向となっている。また、軸ひずみに着目すると、曲げひずみとほぼ同一時刻にアーチ中央部およびアーチ円中心点左 45° の位置で圧縮力が顕著に発生していることがわかる。これは、アーチ構造であることによる軸力変換効果が発揮されたものと考えられる。

(b) 図では、荷点近傍の覆工内面が引張、アーチ円中心点右側 45° 、左側 30° で覆工外面が引張となる曲げひずみが $t=30\text{ms}$ 程度で発生し始め、 $t=50\text{ms}$ 程度でピークに達している。その後 $t=60\text{ms}$ 経過以降はひずみが落ち着く傾向となっている。一方、軸ひずみに着目すると曲げひずみとほぼ同時に荷点近傍において圧縮力が発生しているが、その他に目立った傾向は見あたらない。また、背面荷重である H10-b においては、値は若干小さいものの H10-e とほぼ同様の傾向であることを確認している。

これらのことより、アーチ形状による軸力変換効果は荷点位置にかかわらず発揮され、特に荷点近傍において

顕著であることが明らかとなった。

4. まとめ

本研究では、敷砂緩衝材を設置した RC 製アーチ構造について荷点位置の変化が落石衝撃挙動に与える影響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した。検討結果を整理すると、以下のように示される。

- (1) 偏心荷重および背面荷重の場合には、衝突位置において敷砂緩衝材と覆工本体の間に裏込土が介在するため、裏込土が緩衝効果を発揮し、衝撃荷重がより緩衝される傾向を示した。
- (2) 荷点がアーチ中央から離れることにより、水平方向荷重成分が増大し、結果アーチ全体に水平方向の変形が励起されることが確認された。
- (3) アーチ構造による軸力変換効果は、荷点位置にかかわらず荷点近傍において顕著な傾向を示す。

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) (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.
- 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.