

## 論文 RC 巻き出し工模型に関する重錘落下衝撃挙動

岡田 慎哉\*1・岸 徳光\*2・川瀬 良司\*3・西 弘明\*4

**要旨：**本研究は、トンネル坑口部の耐衝撃性能を把握することを目的に、小型の RC 巻き出し工模型を作製して重錘落下式の衝撃実験を実施し、その動的挙動に関して検討を行ったものである。本検討の結果、落石衝撃荷重に対して、RC アーチ構造形式の場合には設計計算で実施するような奥行きを単位幅とする場合の挙動とは異なり、押し抜きせん断により破壊に至ることが明らかになった。

**キーワード：**アーチ構造形式、巻き出し工、衝撃実験

### 1. はじめに

日本の国土は南北に細長く、かつ山脈が縦横に伸びているため、急峻な地形となっている地域が多く、北海道においても例外ではない。そのため各地域を結ぶ主要な道路には海岸線や山岳部の急崖斜面に沿って敷設されている箇所が多い。また、これらの海岸道路や山岳道路は、落石等の斜面災害を回避することを目的にトンネルを用いてルート選定されていることも多い。しかしながら、これらのトンネルの坑口部は斜面を背負っている場合が多いにもかかわらず、斜面からの落石対策が施されていない箇所も少なくない。写真-1 にトンネル坑口部の例を示す。一般に、トンネル坑口部はトンネルと同様の内空断面を有する鉄筋コンクリート（以後、RC）製のアーチ構造形式となっている。

この種の構造物において、落石から人命を守りかつ交通網の安全を確保するためには、落石に対する耐衝撃性能の確認を行い、耐衝撃性が十分でないと判断された場合には、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巻き出し工における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を実施し、RC 製アーチ構造の衝撃応答特性や緩衝材の緩衝効

果について検討を行っている<sup>1)</sup>。その結果、動的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こと、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を明らかにしている。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。しかしながら、奥行き長さを大きくして実巻き出し工に対応したアーチ構造に関する性状を実験的に把握するまでには至っていない。

このような観点から、本研究では、実トンネル巻き出し工を想定した RC 製アーチ構造に関する耐衝撃特性を把握することを目的に、小型



写真-1 トンネル坑口部

\*1 寒地土木研究所 寒地構造チーム 研究員 修(工) (正会員)

\*2 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科 教授 工博 (正会員)

\*3 (株)構研エンジニアリング 取締役 博(工) (正会員)

\*4 寒地土木研究所 寒地構造チーム 研究員 博(工) (正会員)

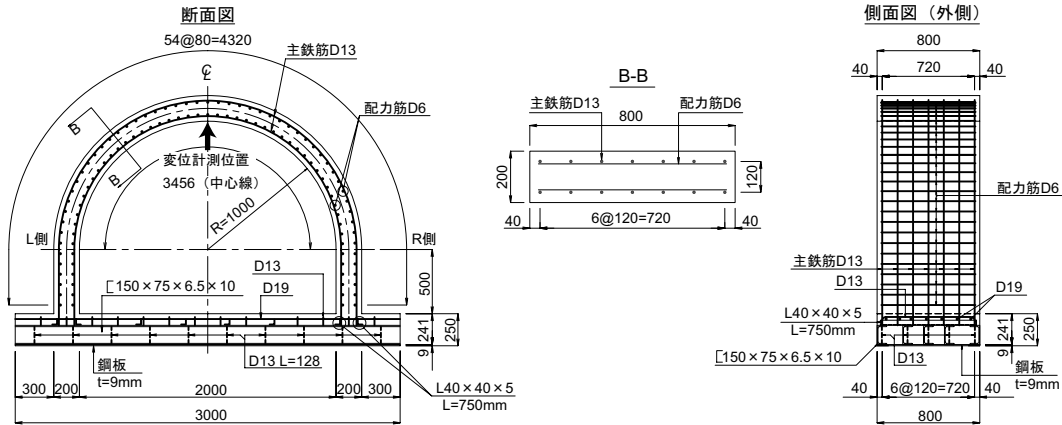


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

表-1 実験ケースおよび使用材料特性一覧

実験ケース	载荷方法	衝突速度 $V$ (m/s)	コンクリート		鋼材		
			圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	降伏強度 (MPa)		弾性係数 (GPa)
					D13	D6	
II-n	繰返し落下	( $n =$ ) 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0	22.9	22.6			
IS-6.0	単一落下	6.0	20.6	22.5	398	338	
IS-7.0		7.0					
IS-7.5		7.5					
IS-8.0		8.0	19.7	22.5			353

RC製アーチ模型（以後、アーチ）に関する重錘落下衝撃実験を実施することとした。実験は重錘の衝突速度を漸増させる繰返し载荷と単一载荷に関して行った。耐衝撃性に関する検討は、各種応答波形（重錘衝撃力、载荷点における応答変位）およびひび割れ分布に着目して行うこととした。なお、本実験は、室蘭工業大学が所有する構造物耐衝撃耐荷力評価試験装置を用いて実施した。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

図-1には、実験試験体の形状寸法および配筋状況を示している。試験体は、実際の巻き出し工の1/4程度の縮尺模型とした。すなわち、アーチの厚さを200 mm、アーチ部の内半径を1,000 mm、側壁部の高さを500 mmとしている。アーチ部主鉄筋には、実巻き出し工と同程度の鉄筋比(0.8%)となるように鉄筋量を調整し、D13を120 mm間隔で配筋した。なお、芯かぶりは40 mmとしている。配力筋には、主鉄筋との鉄

筋量および鉄筋間隔のバランスを考慮してD6を用い、主鉄筋量の1/3以上となるように断面中心線上で80 mm間隔で配筋することとした。

フーチング形状については、アーチ基部の固定条件が保持されるようにすることを前提に、巻き出し工断面方向長さ3,000 mm、巻き出し工軸方向幅800 mm、高さ250 mmとする矩形体とし、鋼製アングル材を配置して剛性の確保に努めている。また、フーチング下面には設置面の平滑度の精度を向上させるために、厚さ9 mmの鋼板を配置している。

表-1には、本実験に用いた試験体およびその材料特性の一覧を示している。本実験で用いた試験体数は全5体である。表中の試験体名のうち、第一項目は载荷方法を示しており、IIは重錘の衝突速度を漸増させた繰返し载荷（以後、繰返し载荷）、ISは重錘を1回だけ落下させる単一载荷により実験を行ったことを示している。なお、試験体名の末尾には衝突速度  $V$  (m/s)を付している。表に示すように、漸増繰返し载荷実験は初速度と増分速度を1 m/sとし

て終局まで実施している。

## 2.2 実験概要

写真-2には、衝撃実験状況を示している。実験はアーチフーチング部を跳ね上がり防止用治具により固定し、アーチクラウン中央点に所定の高さから300 kgの鋼製重錘を自由落下させることにより行っている。なお、重錘はリニアウエイレールによって鉛直落下するように制御されているため、若干の摩擦抵抗がある。そのため、重錘衝突速度の検定試験を実施した後、設定衝突速度に対応する高さから重錘を落下させることとした。衝撃荷重載荷に関しては、前述のように繰り返し載荷と単一載荷の2種類の載荷方法を採用することとしている。なお、繰り返し載荷実験の場合には、試験体が損傷しコンクリート片が落下した時点もしくは明瞭な押し抜きせん断破壊が生じた時点を終局状態と定義し実験を終了している。

本実験では、載荷点部の押し抜きせん断破壊が予想されることから、載荷点の影響が自由辺まで波及しないようにするため、載荷直径を小さくすることとし直径60 mmの鋼製円柱を採用した。

計測項目は、重錘に内蔵された起歪柱型ロードセルによる重錘衝撃力と非接触式レーザー変位計による載荷点鉛直方向変位（以後、載荷点変位）とした。図-1中には変位計測位置を併せて示している。重錘衝撃力測定用ロードセルの容量および応答周波数はそれぞれ1,470 kN, DC-4.0 kHzであり、レーザー式変位計の測定距離および応答周波数はそれぞれ500 mm, 約1 kHzである。また衝撃実験時の各種応答波形は、1 kHzのサンプリングタイムにてデジタルレコーダに一括収録を行っている。

## 3. 実験結果

### 3.1 重錘衝撃力

図-2には、重錘衝撃力波形を示している。なお、時間軸は重錘衝突時を0 msとして整理している。

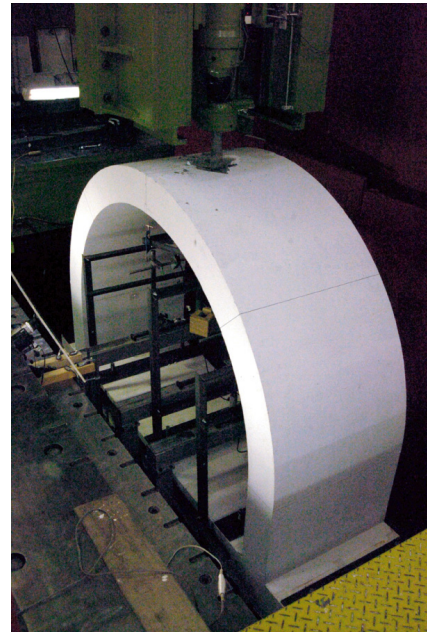
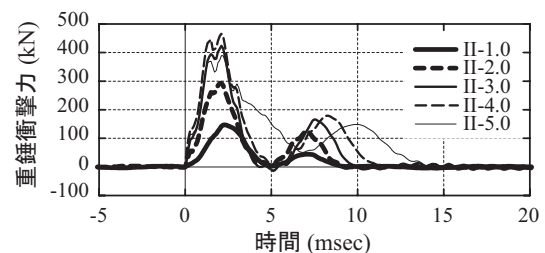
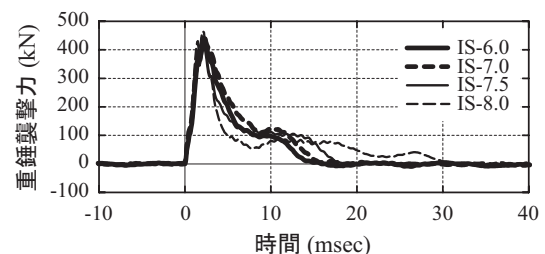


写真-2 衝撃実験状況



(a) 繰り返し載荷



(b) 単一載荷

図-2 重錘衝撃力波形

図-2(a)には、繰り返し載荷時の波形を重ねて示している。図より、衝突速度  $V$  が小さい場合には主に2波の正弦半波状の波動から構成されていることが分かる。II-1.0～II-4.0の場合において、第1波目は継続時間が4 ms程度の正弦半波の性状を示している。その最大衝撃力は衝突速度  $V$  の増加に対応して増加しているものの、その衝突速度  $V$  に対応する増加割合は、 $V = 3$  m/s 以降において減少傾向を示している。第2波目は5 ms時点から励起され、継続時間が5～6 ms程度の正弦半波状の性状を示しており、



その振幅は第1波目の1/2程度となっている。

一方、II-5.0の場合には、衝突速度 $V$ が最も大きい場合であるにもかかわらず最大衝撃力はII-3.0の場合よりも小さく、かつ第1波目の波動継続時間も7ms程度まで延び、1波目と2波目が連続した波形性状を示している。これは、繰り返し载荷を受けた結果、衝突速度 $V=5\text{ m/s}$ 時点で著しく損傷が進行したことを暗示している。

図-2(b)には、単一载荷時の波形を重ねて示している。図より、最大衝撃力値に達するまでは、衝突速度の大きさにかかわらず類似の応答性状を示している。その後、波動継続時間は、衝突速度 $V$ の大きさに対応して延びていることが分かる。特に、IS-8.0の場合にはIS-6.0～IS-7.5の場合に比して12～15ms程度延びており、アーチが終局に近い状態であることがうかがわれる。また、繰り返し载荷時には、2波の正弦半波の波形から構成されていたのに対して、単一载荷の場合には最大衝撃力値に達した後除荷するものの、最大衝撃力値の1/4程度の値を残存した形で2～3ms (IS-8.0の場合は5ms)程度継続し、その後ゆるやかに零レベルまで減少している。これは、上述のとおり、繰り返し载荷の場合よりも入力エネルギーが大きいことにより、重錘衝突部近傍が著しく損傷し、復元力が大きく減少したことによるものと推察される。

図-3には、最大重錘衝撃力と衝突速度 $V$ との関係を示している。図中、繰り返し载荷の結果を黒塗りの実線、単一载荷の結果を白抜きの実線で示している。図より、II-1.0～II-3.0の衝突速度 $V$ の低い場合には、前述の通り衝突速度 $V$ と最大重錘衝撃力との間にほぼ比例の関係があることが分かる。これより、繰り返し载荷において $V=3.0\text{ m/s}$ 程度まではアーチは健全な状態を維持しており、弾性的な応答を示しているものと推察される。しかしながら、 $V=4.0\text{ m/s}$ 以上の場合には増加率が低下しており、II-5.0の場合には、減少に転じている。また、単一载荷の場合には前述のとおりほぼ類似の値を示している。以上より、繰り返し载荷の $V \geq 4.0\text{ m/s}$ の

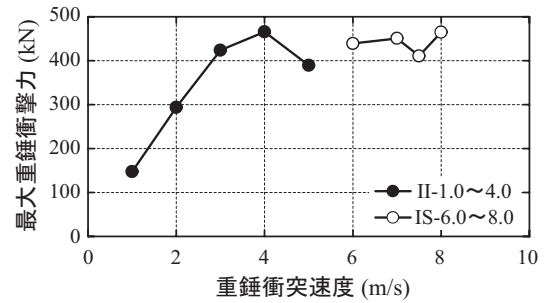
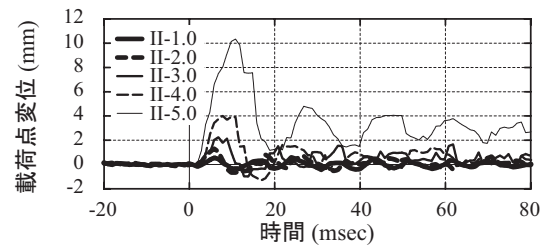
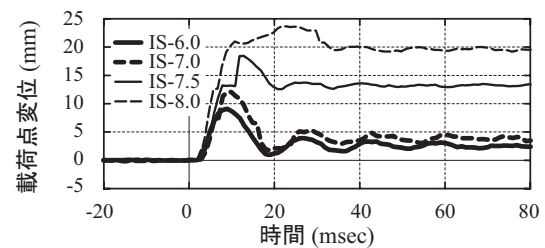


図-3 重錘衝突速度-最大重錘衝撃力関係



(a) 繰り返し载荷



(b) 単一载荷

図-4 载荷点変位波形

場合および $V \geq 6\text{ m/s}$ である単一载荷の場合には、载荷点近傍が衝突初期に同程度の損傷を受けていることが推察される。

### 3.2 変位応答性状

図-4には、载荷点変位応答波形を示す。なお、载荷点変位波形についても重錘衝撃力波形と同様に、時間軸は重錘衝突時を0msとしている。

図-4(a)には、繰り返し载荷時の波形を重ねて示している。図より、载荷点変位は重錘衝突時よりも数ms程度遅れて励起していることが分かる。全体波形を見ると、衝突速度 $V$ の増加に対応して、第1波目の周期も延びており、かつ除荷後には残留変位も増加して減衰自由振動状態に至っている。II-5.0における残留変位は、他のケースに比較して大きく示されており、損傷の大きいことが推察される。

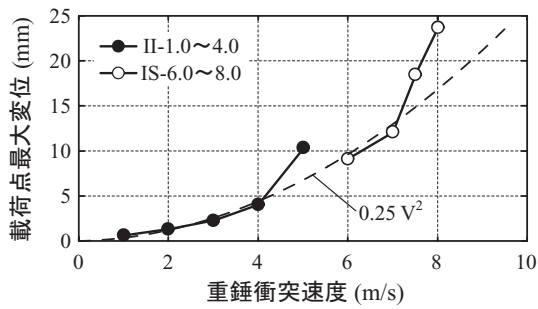


図-5 最大載荷点変位－衝突速度関係

図-4(b)には、単一載荷時の波形を比較して示している。図より、IS-6.0およびIS-7.0の場合は、II-5.0の場合と同様な傾向を示していることが分かる。これは、II-5.0の場合と類似の損傷状態にあることを示唆している。IS-7.5, IS-8.0の場合には、残留変位が最大変位と類似した値を示している。これは、復元力が完全に失われていることを意味しており、載荷点近傍部コンクリートに貫通ひび割れが発生し終局状態に陥っているものと考えられる。

図-5には、最大変位と衝突速度  $V$  との関係を示している。図より、繰り返し載荷の影響を大きく受け損傷が顕在化したと思われるII-5.0の結果を除いたII-1.0～II-4.0, IS-6.0, IS-7.0に関する最大変位は放物線状の分布性状を示し、衝突速度  $V$  に対応した弾性から緩やかに弾塑性状態に至る挙動を示していることが推察される。図中には近似放物線を併せて示している。一方、IS-7.5, IS-8.0の場合には、それよりも大きな変位を示しており、前述のとおり終局状態に至っているものと推察される。

図-6には、残留変位と衝突速度  $V$  との関係を示している。図より、 $V = 4.0$  m/s 以下の場合には残留変位はほとんど発生していないことより、ほぼ弾性的な挙動を示していることがうかがわれる。IS-6.0, IS-7.0は衝突速度  $V$  の増加に対応して残留変位も増加している。一方、IS-7.5, IS-8.0の場合には前述のとおり終局状態に至っていることが推察されることより残留変位も大きい。

### 3.3 重錘衝撃力－載荷点変位履歴曲線性状

図-7には、重錘衝撃力－載荷点変位履歴曲

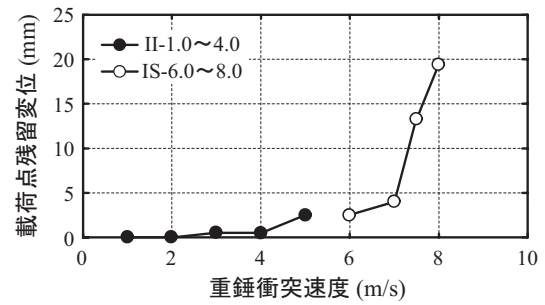
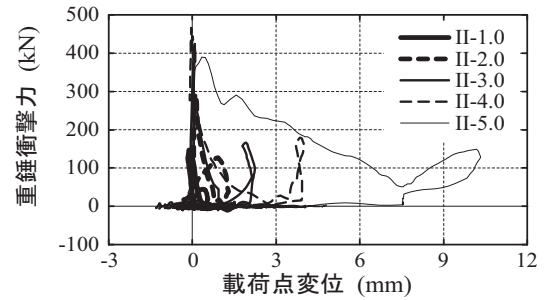
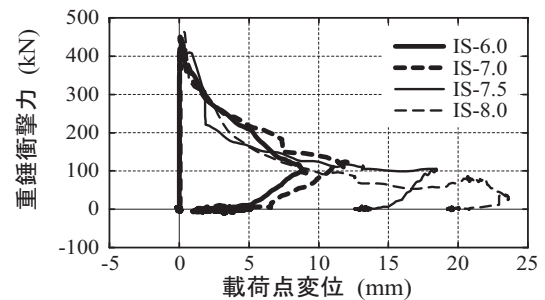


図-6 残留載荷点変位－衝突速度関係



(a) 繰り返し載荷



(b) 単一載荷

図-7 重錘衝撃力－載荷点変位履歴曲線

線を示している。図-7(a)より、II-1.0～4.0の場合にはほぼ弾性的な挙動を示しており、エネルギー吸収量も少ない。一方、II-5.0の場合にはせん断破壊型RC梁の履歴曲線<sup>3)</sup>と類似しており、せん断破壊型で終局に至っていることが推察される。

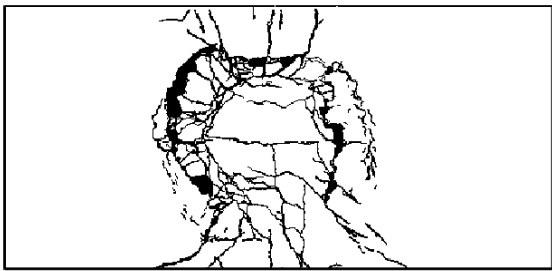
図-7(b)より、単一載荷の場合には、いずれの場合もII-5.0と類似のせん断破壊型の分布性状を示している。しかしながら、IS-6.0, IS-7.0の場合には残留変位も小さく、載荷点部の抜け落ち等の損傷が顕在化していないものと推察される。一方、IS-7.5, IS-8.0の場合には、最大変位と大差のない残留変位を示しており、載荷点部の押し抜けが顕在化しているものと考えられる。

### 3.4 損傷状況

図-8には、実験終了後の試験体下面のひび割



(a) IS-7.0



(b) IS-7.5

図－8 ひび割れ性状

れ分布図を示している。なお、ここでは紙面の都合により、損傷状況が著しく変化した IS-7.0 および IS-7.5 の結果のみについて示す。図より、IS-7.0 では荷点直下より放射状に広がるひび割れが複数本見られ、押し抜きせん断によると思われる荷点を中心とした円形のひび割れは顕著には見られない。このことより、前述のように押し抜きせん断による損傷は発生しているものの、貫通に至るまでの損傷は発生していないものと考えられる。

一方、IS-7.5 の場合には荷点を中心とした同心円状のひび割れが顕著に現れ、その外側に放射状のひび割れが発生している。これは、荷点の押し抜きせん断ひび割れが下面まで貫通したためと考えられる。これより、IS-7.5 では押し抜きせん断破壊が貫通し、終局に至っていることが確認できる。

これより、RC アーチ構造が落石等による衝撃荷重を受ける場合には、押し抜きせん断破壊により終局に至るものと推察される。従って、終局時には裏面剥離等の脆性的な破壊が進行する可能性があることを認識しなければならない。

#### 4. まとめ

本研究では、RC 製アーチ構造に関する耐衝撃

特性を把握することを目的に、小型 RC 製アーチ模型に関する重錘落下衝撃実験を実施した。結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 繰り返し荷重の場合には、衝突速度  $V = 4.0$  m/s まではほぼ弾性的な挙動を示し、 $V = 5.0$  m/s では押し抜きせん断破壊により終局に至る。
- (2) 単一荷重の場合には、衝突速度  $V = 6.0, 7.0$  m/s において押し抜きせん断ひび割れが生じ、 $V = 7.5$  m/s 以上において、押し抜きせん断破壊に起因する著しい損傷が顕在化する。
- (3) RC アーチ構造が衝撃荷重を受ける場合には、設計計算で実施するような単位奥行きを有する場合の挙動とは異なり、押し抜きせん断破壊により終局に至るため、終局時には裏面剥離等の脆性的な破壊が進行する可能性があることを認識する必要がある。

これらのことより、RC アーチ構造に衝撃力の作用が考えられる場合には、緩衝工を適切に設置するなどの、脆性的な損傷を発生させないような配慮が必要であるものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 川瀬良司, 今野久志, 牛渡祐二, 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, 2005.
- 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.
- 3) 安藤智啓, 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 蟹江俊仁: スターラップを有しないせん断破壊型 RC 梁の単一荷重衝撃実験, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1809-1818, 2000.