

RC巻き出し工模型の耐衝撃特性に関する実験的研究

Experimental study on impact resistant characteristic of small scale RC shelter models.

寒地土木研究所 ○正 員 岡田 慎哉
 寒地土木研究所 正 員 今野 久志
 寒地土木研究所 正 員 西 弘明
 (株)構研エンジニアリング 正 員 川瀬 良司
 室蘭工業大学 フェロー 岸 徳光

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する。そのため、道路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くなり、トンネルが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。これらのトンネル坑口部において、斜面からの落石対策が施されていない箇所も多く残されているため、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、現実には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。

これより、この種の構造物に関し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、これらの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（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た繰り返し載荷と単一載荷実験を行った。衝撃応答特性に関する検討



写真-1 トンネル坑口部の例

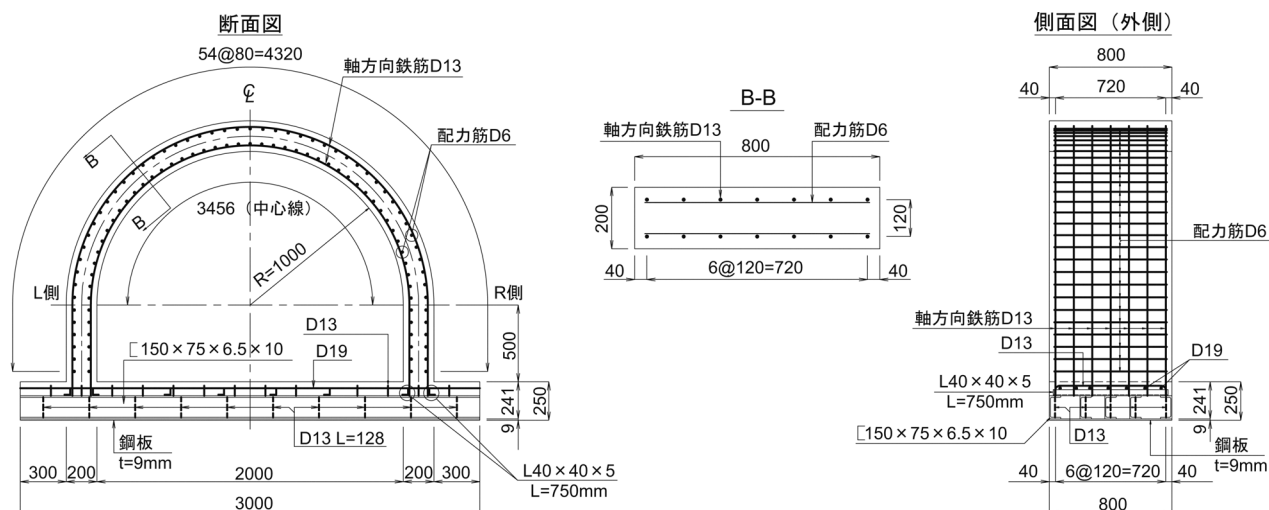


図-1 試験体形状寸法および配筋状況

は、各種応答波形（重錘衝撃力、載荷点における応答変位）およびひび割れ分布性状に着目して行うこととした。本実験は、室蘭工業大学におけ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。試験体の断面形状は、実トンネル断面形状の1/4 程度の縮尺模型とした。すなわち、アーチの厚さを200mm、アーチ部の内半径を1,000mm、側壁部の高さを500mmとしている。アーチ部軸方向鉄筋には、実トンネルと同程度の主鉄筋比となるようにD13を120mm間隔で配筋し、芯かぶりは40mmとしている。配力筋には、異形鉄筋の最小径であるD6を用い、主鉄筋量の1/3以上となるように断面中心線において80mm間隔で配筋している。フーチング形状については、可能なかぎり剛構造にして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考えた。すなわち、トンネル断面方向長さ3,000mm、トンネル軸方向幅800mm、高さ250mm とする矩形体とし、鋼製のアングルを埋設して剛性の確保に努めている。なお、フーチング下面には厚さ9mmの鋼板を配置している。

表－1には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体数は全8体である。表中の試験体名のうち、第一項目は載荷方法を示しており、IIは衝撃荷重の漸増繰り返し載荷を、ISは衝撃荷重の単一載荷により実験を行ったことを示している。なお、試験体名の末尾に衝突速度 V (m/s) を付している。

2. 2 実験概要

写真－2には衝撃実験状況を示している。実験は跳ね上がり防止用治具を用いてフーチング部を固定し、アーチ部中央点に所定の高さから質量300kg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、衝突速度の検定試験を実施の後、設定衝突速度に対応する高さから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2種類の載荷方法を採用することとした。すなわち、初速度および増分速度を1m/sと設定して、終局に至るまで繰り返し重錘を落下させる漸増繰り返し載荷法（以後、繰り返し載荷）および所定の衝突速度で一度だけ載荷する単一載荷方法である。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。

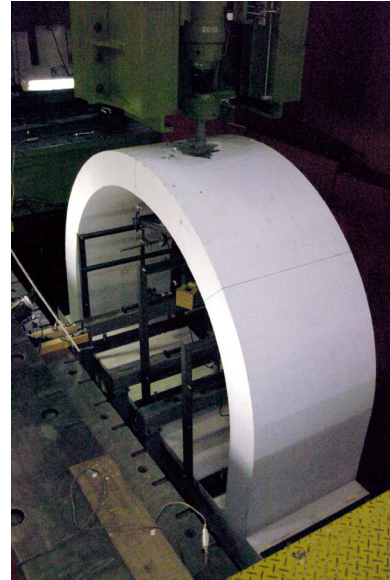
本実験においては、押し抜きせん断破壊が予想されることから、直径60mmの鋼製円柱を用い、押し抜きせん断耐力の過大評価とならないように載荷面積を小さくすることとした。

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変位計による載荷点変位とした。重錘衝撃力用ロードセルの容量と応答周波数

表－1 実験ケース一覧

実験ケース	載荷方法	衝突速度 V (m/s)
II-*. *	繰返し落下	1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0
IS-6.0	単一落下	6.0
IS-7.0		7.0
IS-7.5		7.5
IS-8.0		8.0

図－2 重錘衝撃力波形



写真－2 衝撃実験状況

は1,470kN、DC-4.0kHzであり、レーザ式変位計の容量と応答周波数は500mm、約1kHzである。また衝撃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. 実験結果

3. 1 重錘衝撃力

図－2には、重錘衝撃力波形を示す。なお、波形の時間は重錘衝突時を0として整理している。

図(a)には、繰返し載荷時の波形を重ねて示す。図より、重錘衝撃力は主に2波の正弦半波状の波動によって構成されていることが分かる。繰返し載荷の最終ケースであるII-5.0を除き、初期の正弦半波は重錘衝突とともに励起され、重錘衝突後およそ2msで最大応答を示す。その最大応答値は衝突速度の増加に伴い増加しているが、衝突速度が大きくなるにつれ、その増加の割合は減少している。その後、重錘衝突後およそ4msでほぼ零レベルまで除荷される。2波目の正弦半波は5ms程度から励起され、1波目と比較して1/3程度の最大応答値を示し、10msまでにほぼ零レベルとなる。

II-5.0のケースではII-1.0～4.0のケースと比較して最大応答値が衝突速度に比例して大きくならずII-3.0よりも小さい応答となっている。さらに、他のケースと比較して全体的に応答が遅れる傾向が見られる。これは、

繰り返し载荷を受けた結果、構造の破損が進行したことにより、他のケースと同等の応答が発生しなかったものと推察される。

(b)図には、単一载荷時の波形を重ねて示す。図より、ピークまでは繰り返し载荷の場合と同様な応答性状であるが、重錘衝突後およそ 6ms で 100kN 程度まで除荷された後、2 波目が励起されずに 100kN 程度の応答が 5ms～10ms 持続する。その後、緩やかに零レベルまで除荷される傾向を示す。また、最大応答値に関しても衝突速度にかかわらず 400～450kN 程度のおおよそ一定の値となっている。これは、衝突速度が大きくなったことにより構造に損傷が発生したため、2 波目の応答が発生しなかったものと考えられる。

図-3 には、最大重錘衝撃力と重錘衝突速度との関係を示す。図中、繰り返し载荷を青の実線、単一载荷を赤の実線で示す。図より、衝突速度の低い場合には、衝突速度と最大重錘衝撃力との間に比例の関係があることが分かる。しかしながら、衝突速度が 4m/s 以上のケースでは比例の関係から外れ、およそ 400～450kN で一定となっており、それ以上の重錘衝撃力は発生していないことが分かる。これより、衝突速度 3m/s まではアーチ構造は健全な状態を維持しており、弾性的な応答を示すものと推察される。また、衝突速度 4m/s 以上の場合には構造系に影響を与えるレベルの損傷が発生したため、450kN 以上の重錘衝撃力が発生しなかったものと推察される。

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、変位波形についても重錘衝撃力波形と同様に、時間は重錘衝突時を 0 として整理している。

図(a)には、繰り返し载荷時の波形を重ねて示す。図より、载荷点変位は、重錘衝突より若干遅れて励起され、5～10ms 程度に最大変位を迎える。また、その時の最大を迎えるまでに要する時間は、衝突速度の増加に伴い増加している。その後、励起時と同程度の除荷勾配で除荷され、自由減衰振動状態に移行していることが分かる。さらに、II-5.0 の場合にはその自由減衰振動に残留変位成分を含んだものとなっている。このことから、II-1.0～4.0 と比較して II-5.0 の構造的な損傷が大きいものと推察される。

図(b)には、単一载荷時の波形を重ねて示す。図より、IS-6.0 および IS-7.0 においては、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、衝突速度が大きくなったことにより、構造的な損傷が大きく発生しているためと考えられる。II-7.5 の場合には、最大変位発生後の除荷勾配がそれまでのケースに比べ緩やかとなり、自由減衰振動の減衰も強い傾向が見られる。これは、構造的な損傷がさらに大きくなったことで、リバウンドの応答が発生しないほどに構造が破壊されたためと考えられ、振動状態を維持するだけの剛性が構造に残っていないものと推察される。これより、II-7.5 において構造的に終局に至ったものと判断される。さらに衝突速度の大きい II-8.0 においては、II-7.5 に見られた性状がよ

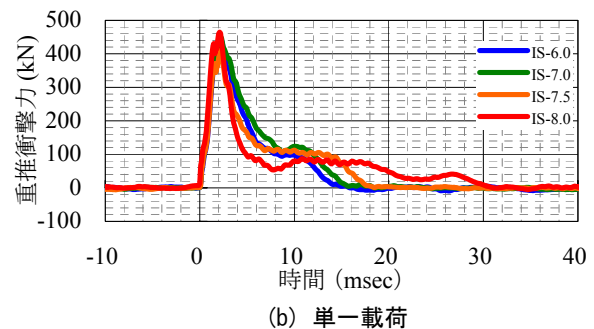
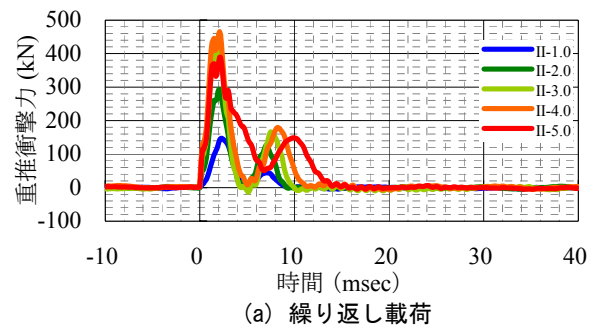


図-2 重錘衝撃力波形

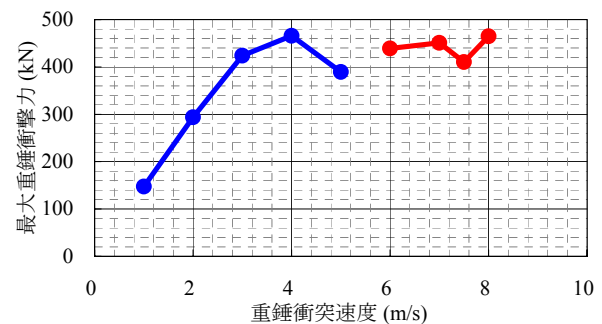


図-3 重錘衝突速度－最大重錘衝撃力関係

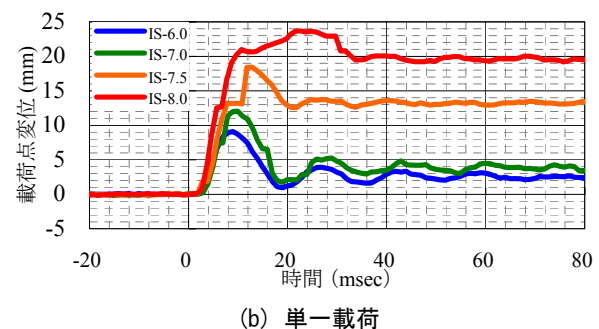
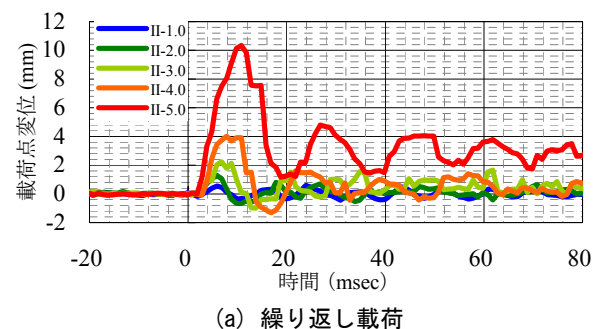


図-4 载荷点変位波形

り顕著に現れ、最大変位の発生時間が大幅に遅れ、最大変位後の自由振動状態もほとんど発生していないことが分かる。

図-5には、最大変位と入力衝撃エネルギーとの関係を示す。図より、繰り返し载荷により構造に影響を与えるレベルの初期損傷を有していたと思われる II-5.0 を除き、衝突速度 7m/s まではほぼ一様に最大载荷点変位が増加していることが分かる。これより、衝突速度 7m/s 以下のケースでは構造的に同様の損傷モードが発生しているものと考えられる。しかし、衝突速度 7.5m/s 以上の場合には、それまでのケースと比較し急激に最大変位が増加していることが分かる。これより、衝突速度 7.5m/s 以上の場合には構造的に異なる損傷モードに移行したものと推定される。

図-6には、残留変位と入力衝撃エネルギーとの関係を示す。図より、図-5の場合と同様に衝突速度 7m/s 以下の場合とそれ以上の場合とで、残留変位の増加傾向が変化していることが分かる。このことから、構造の損傷形態が異なる損傷モードに移行したものと推定される。

3. 3 損傷状況

図-7には、実験終了後の試験体下面のひび割れを示す。図より、IS-7.0ではアーチ幅方向にほぼ貫通したひび割れが2本見られ、その他のひび割れについても载荷点直下より放射状に広がるひび割れが顕著に伸展していることが分かる。これと比較し、IS-7.5では载荷点直下に幅方向に貫通したひび割れは見られず、载荷点を中心とした円状のひび割れが卓越していることが分かる。これより、衝突速度 7m/s 以下の場合には、アーチ方向の曲げが支配的な損傷モードであり、衝突速度 7.5m/s 以上の場合には、押し抜きせん断が支配的な損傷モードに移行したものと考えられる。

これより、本試験体は 7m/s 以上の衝突速度にて押し抜きせん断破壊により構造的な終局に至ったと判断される。

4. まとめ

本研究は、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ものである。結果をまとめると、以下のようである。

- 1) 本試験体の場合には、衝突速度が 3m/s までは、弾性的な応答を示す。
- 2) 衝突速度が 4m/s を超えると大きな残留変位が発生する。
- 3) 衝突速度が 7m/s 以上で押し抜きせん断により構造的な終局に至る
- 4) 衝突速度が 7m/s 以下の場合には曲げが支配的な損傷モードであるが、衝突速度が 7m/s 以上の場合には、押し抜きせん断破壊に損傷モードが移行する。

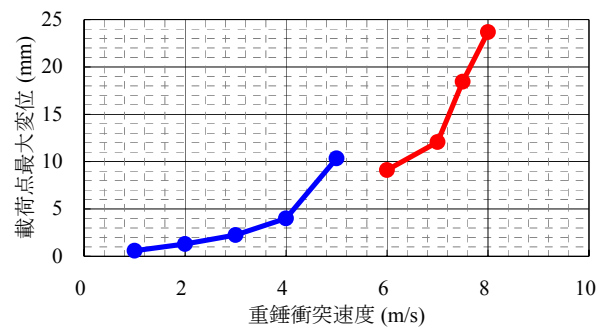


図-5 最大载荷点変位－衝突速度関係

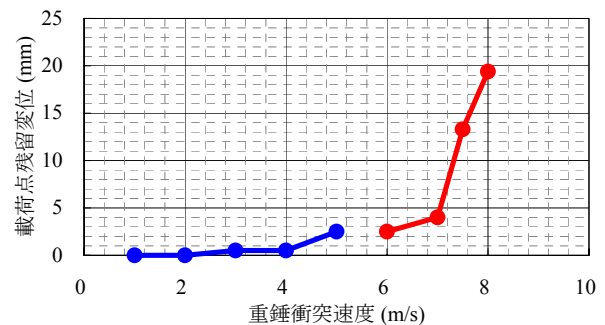
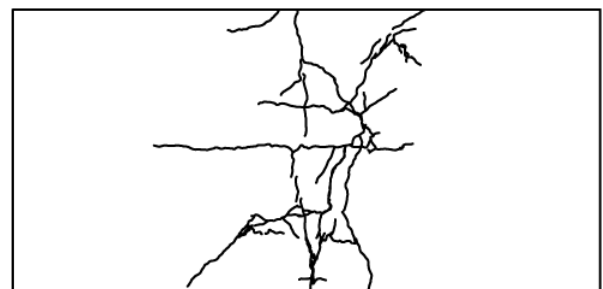
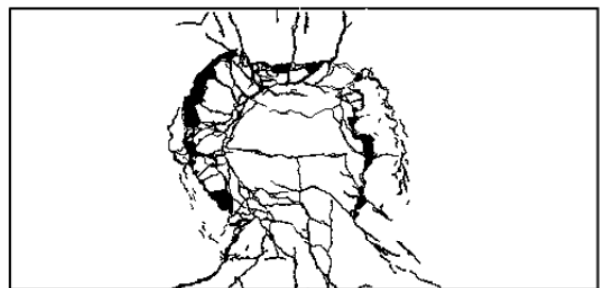


図-6 残留载荷点変位－衝突速度関係



(a) IS-7.0



(b) IS-7.5

図-7 ひび割れ性状

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、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、