

三層緩衝構造を設置した実規模RCアーチ構造の 衝撃荷重作用時における断面照査に関する検討

A study on section design of arch type RC structures
with three-layered absorbing system under falling-weight impact loading

(株) 構研エンジニアリング	○ 正会員	鈴木 健太郎 (Kentaro Suzuki)
室蘭工業大学	フェロー	岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
室蘭工業大学大学院	正会員	岡田 慎哉 (Shin-ya Okada)
(株) 構研エンジニアリング	正会員	川瀬 良司 (Ryoji Kawase)
(株) 構研エンジニアリング	正会員	牛渡 裕二 (Yuji Ushiwatari)

1. はじめに

道路トンネルには、海岸線や山岳部の急崖斜面に沿って建設された箇所も少なくない。これらのトンネル坑口部は斜面を背負っている場合も多く、落石の影響も懸念される。このような場合には安全性の検討が必要であるものの、RC製アーチ構造の耐衝撃設計法は未だ確立されていない。一方、落石防護施設の一つであるRC箱型ラーメン形式の落石覆道は、(1) 落石荷重を含めた全作用力を静的荷重に置き換え、二次元静的骨組解析（以後、静的骨組解析）により設計断面力を算出する方法¹⁾や、(2) 死荷重および土圧による設計断面力は静的骨組解析にて、落石荷重による設計断面力は三次元弾性衝撃応答解析によりそれぞれ算出し、それら設計断面力を合算する方法²⁾を用いて、許容応力度設計法による耐衝撃設計が実施されている。

著者らは、三次元弾塑性衝撃応答解析法に基づいた簡易で合理的な衝撃挙動解析法の確立を目的に、換算引張強度を評価する手法を提案³⁾している。また、三層緩衝構造を設置した実規模RC製アーチ構造の重錘落下衝撃実験結果と比較することによりその適用性に関する検討を行っており、三層緩衝構造の対象エネルギーの範囲内において適切に評価可能であることを明らかにしている⁴⁾。

本研究では、RC製アーチ構造の耐衝撃設計法の確立に向けた基礎資料を提供することを目的に、三層緩衝構造を設置した実規模RC製アーチ構造の重錘落下衝撃実験の衝突位置であるアーチクラウン部の曲げモーメントに関する断面照査を行った。断面照査は、設計断面力 S と設計断面耐力 R を比較することにより実施することとした。設計断面力 S は前述の(2)の方法を参考として静的骨組解析および三次元弾塑性衝撃応答解析を用いて算出した。設計断面耐力 R については、コンクリート標準示方書に準拠した断面分割法により算出した終局曲げモーメントを用いた。また、これら照査結果を実験および三次元弾塑性衝撃応答解析結果のひび割れ分布性状と比較検討することにより、照査方法の妥当性について検討した。

2. 検討条件

2.1 実験概要

図-1(a)図は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。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

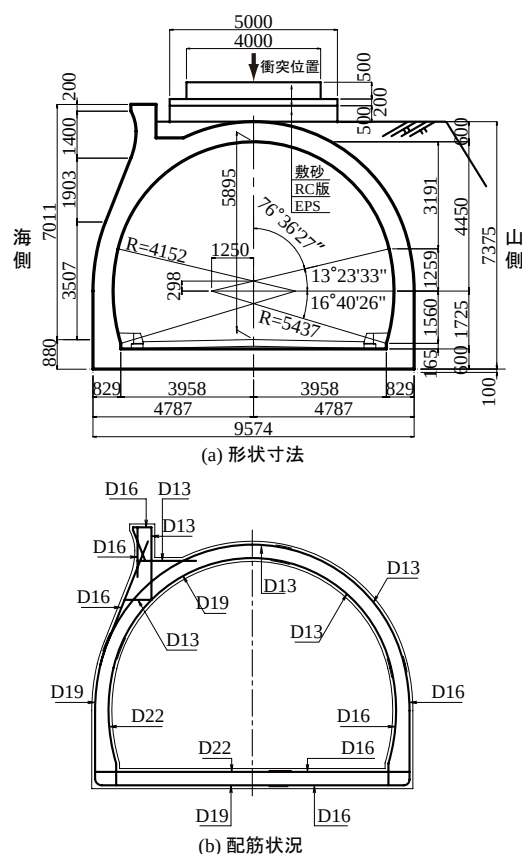


図-1 形状寸法および配筋状況

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、配力筋には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。鉄筋の材質は全てSD295Aであり、コンクリートの圧縮強度については $f_c=36\text{MPa}$ であった。

三層緩衝構造の仕様は、設計要領²⁾に規定されている衝突エネルギー $E_k=1,000\text{kJ}$ を対象とし、敷砂厚500mm、RC版厚200mm、EPS材厚500mmとしている。落石荷重条件は、重錘質量 $m=10\text{t}$ 、落下高さ $H=10\text{m}$ 、衝突位置はアーチクラウン部としている。

2.2 設計断面力 S の計算条件

設計断面力 S は、前述の落石覆道の算出方法(2)を参考に、死荷重および土圧作用時は二次元静的骨組解析により、重錘衝突時は三次元弾塑性衝撃応答解析により算出し、両者を合算してアーチクラウン部の設計断面力 S とする。

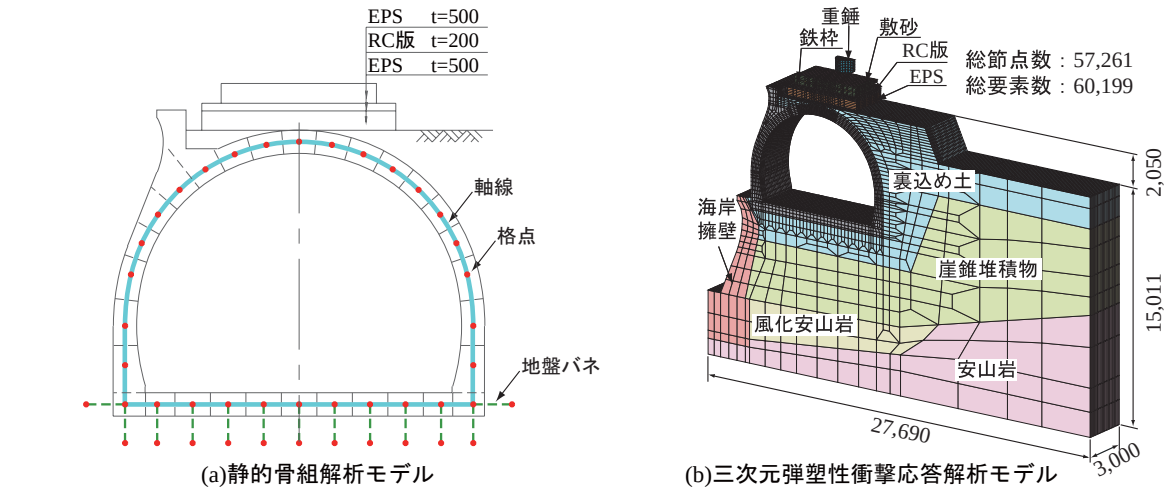


図-2 解析モデル

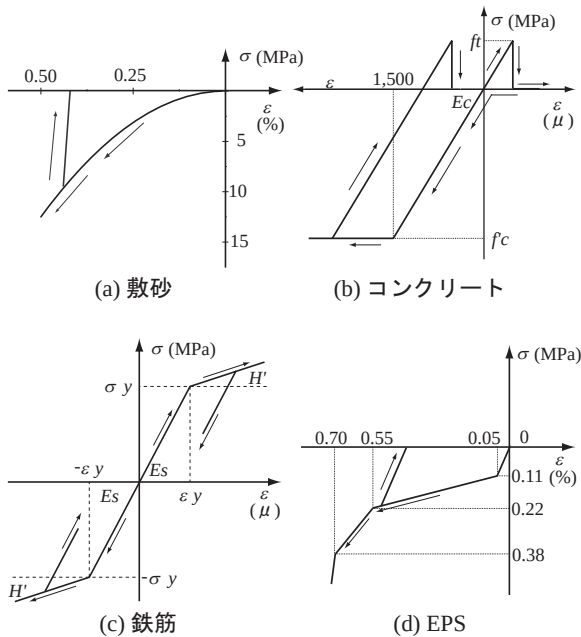


図-3 材料物性モデル

2.2.1 死荷重および土圧作用時

死荷重および土圧作用時による設計断面力は、図-2(a)図のモデルを用いて二次元静的骨組解析により算出する。解析モデルのアーチ部、側壁およびインバートは1m程度に分割して格点を設定している。また、インバート直下における地盤の設定については、実験時の周辺地盤における標準貫入試験結果より、N値20程度の盛土地盤として評価し、地盤バネをモデル化している。

2.2.2 重錘衝突時

(i) 数値解析モデル

重錘衝突時による設計断面力は、図-2(b)図のモデルを用いて三次元弾塑性衝撃応答解析により算出する。解析対象範囲は、山側に対してトンネル幅10m程度以上を考慮した。解析モデルは、構造物の対称性を考慮して、1/2モデルとしている。境界条件は底面および山側と谷側の側面を完全拘束するとともに、側面には無反射境界条件を定義して応力波が反射しないようにしている。質量に比例する粘性減衰定数は、最低次固有振動数に対して5%と設定した。なお、本研究の三次元弾塑性衝撃応答解析には、非

線形動的構造解析用汎用コードLS-DYNAを用いている。

(ii) 材料物性モデル

図-3には、解析に用いた各材料物性モデルを示している。(a)図には、敷砂の緩衝特性を評価するための応力-ひずみ関係を示している。(b)図には、RC版のコンクリート要素に用いた応力-ひずみ関係を示しており、引張破壊エネルギー等価の概念³⁾を用い、仮定の引張強度を設定した。(c)図には、鉄筋要素に用いた応力-ひずみ関係を示している。モデルは、降伏後の硬化係数 $H'=E_s/100$ を考慮した等方弾塑性体モデルである。(d)図には、EPS材の要素に用いた応力-ひずみ関係を示しており、応力-ひずみ関係は、静的な材料試験より得られた特性値を用い、テトラニア型にモデル化している。

3. 三次元弾塑性衝撃応答解析結果

図-4には、アーチクラウン部における三次元弾塑性衝撃応答解析結果に関する各応答波形を示している。(a)図の载荷点直下の鉛直波形については、実験結果も併せて示している。(a)図より、残留変位については、実験結果および解析結果ともにほぼ零となっており、未だ弾性範囲内であることが分かる。(b)および(c)図の曲げモーメントおよび軸力波形については、曲げモーメントの波動継続時間内では圧縮軸力が発生するものの引張軸力は発生していないこと、曲げモーメントおよび圧縮軸力の波動継続時間および最大応答値発生時刻がほぼ同程度であることから、アーチクラウン部における曲げモーメント照査時には圧縮軸力を考慮することが可能であることが明らかとなった。

図-5には、アーチクラウン部における道路軸方向の変位分布について、 $t=50\text{ms}$ 時の三次元弾塑性衝撃応答解析結果を実験結果と併せて示している。図より、両者ともに载荷点中央から端部まで一様の変位が発生していることが分かる。これは、三層緩衝構造によって衝撃荷重が分散してアーチクラウン部に伝達され、アーチ構造が全体的に挙動するためと考えられる。このことから、断面照査は単位幅1m当たりについて検討することとする。

4. 設計断面力Sの計算結果

図-6には、曲げモーメントおよび軸力について、静的骨組解析により算出した自重および土圧作用時における設

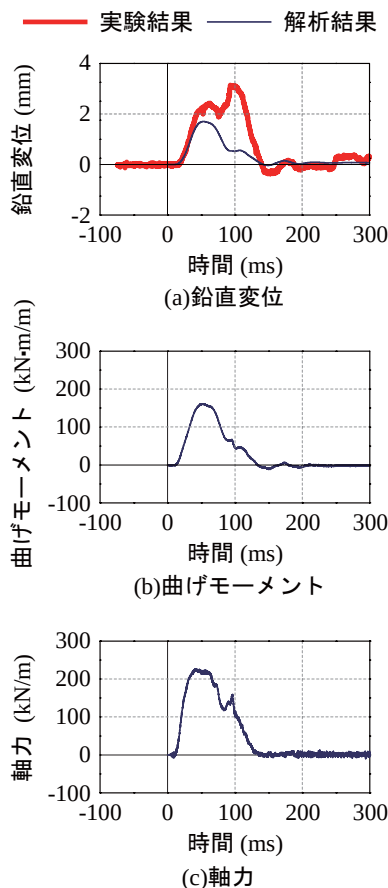


図-4 各応答波形分布 (アーチクラウン部)

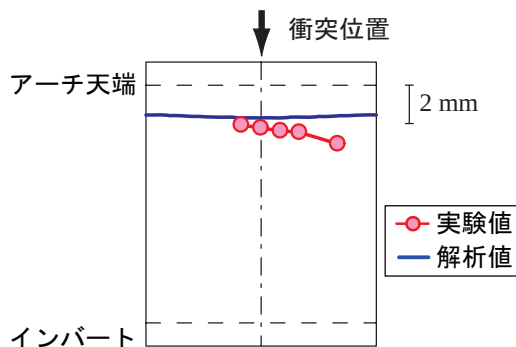


図-5 軸方向変位分布 (アーチクラウン部, $t=50\text{ms}$ 時)

計断面力, 三次元弾塑性衝撃応答解析により算出した重錘衝突時における設計断面力を示している。また, 重錘衝突時については, 正負両側の応答に関して解析実施時間を通じて最大となる応答を包絡したものを示している。さらに, 自重および土圧作用時と, 重錘衝突時の設計断面力を合算した場合についても併せて示している。なお, 曲げモーメントは軸線の内側を正として, 軸力は軸線の内側を圧縮軸力として示している。

4.1 自重および土圧作用時

自重および土圧作用時における曲げモーメントの設計断面力は, 土圧によって海側に偏心した分布性状を示している。軸力については, 全て圧縮軸力が発生している。

4.2 重錘衝突時

重錘衝突時には, 载荷点直下のアーチクラウン部では内側引張, アーチ中心より 45° 近傍においては外側引張とな

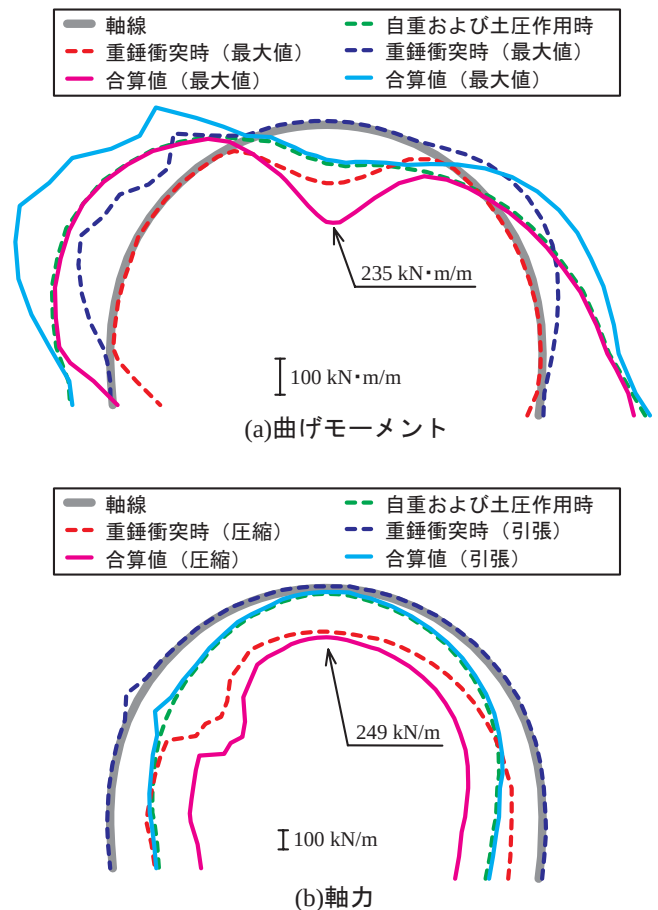


図-6 設計断面力図

る比較的大きな曲げモーメントが発生している。一方, 軸力については, 全断面ほぼ一様の圧縮軸力が発生していることが分かる。これは, アーチ作用によって衝撃荷重が圧縮軸力に変換されたことによるものと推察される。なお, 引張軸力については, 海側の一部において若干発生しているものの, 全体的にはほぼ零となっている。

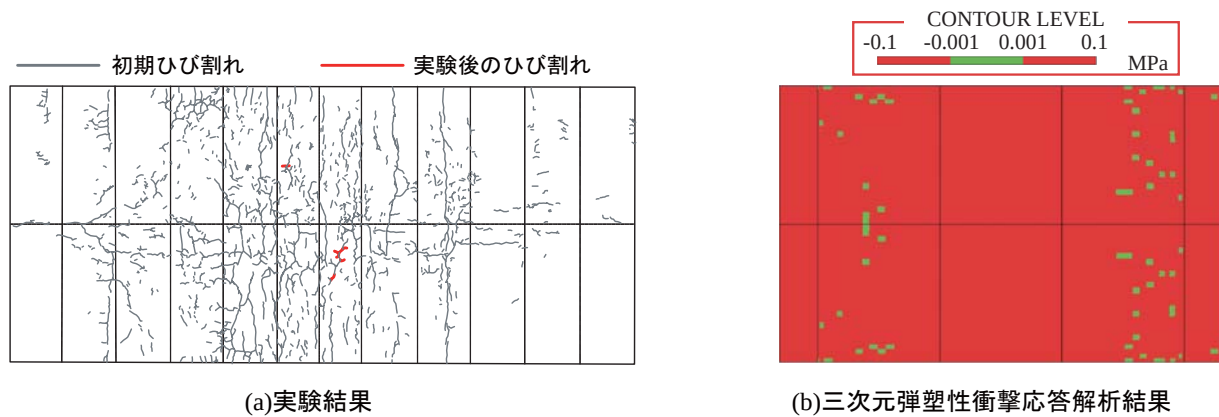
4.3 設計断面力 S の合算

自重および土圧作用時と重錘衝突時の設計断面力を合算した場合の最大曲げモーメント発生位置は, 内側引張となる载荷点直下のアーチクラウン部および外側引張となるアーチ中心より海側 45° 近傍である。なお, 山側側壁基部については, 重錘衝突による断面力の増加は見受けられない。アーチクラウン部の設計断面力 S については, 最大曲げモーメント $M=235\text{kN}\cdot\text{m/m}$, 最大圧縮軸力 $N=249\text{kN/m}$ と算出される。

5. 設計断面力 S および設計断面耐力 R の比較

5.1 設計断面耐力 R の計算

本研究では, 重錘衝突位置であるアーチクラウン部断面を対象として曲げモーメントに対する照査を行う。照査断面は, 部材厚 $h=600\text{mm}$, 上端鉄筋 $\text{D13}@250\text{mm}$, 下端鉄筋 $\text{D19}@250\text{mm}$, コンクリート圧縮強度 $f_c=36\text{MPa}$ である。設計断面耐力 R について, 単位幅当たりの終局曲げモーメントとしてコンクリート標準示方書⁵⁾に準拠して算出した結果, 軸力 $N=0\text{kN/m}$ のとき $M_u=179\text{kN}\cdot\text{m/m}$, $N=249\text{kN/m}$ (圧縮) のとき $M_u=249\text{kN}\cdot\text{m/m}$ となる。



図－7 実験および三次元弾塑性衝撃応答解析結果のひび割れ分布性状

表－1 照査結果一覧

設計断面力 S (kN・m/m)	設計断面耐力 R (kN・m/m)	
	軸力無視	軸力考慮
235	179 ($S/R=1.32$)	249 ($S/R=0.95$)

5.2 断面照査

本断面照査では、コンクリート標準示方書⁵⁾等による一般的な照査式を用いる。以下に照査式を示す。

$$\gamma_i \cdot S_d / R_d \leq 1.0 \quad (1)$$

ここに、 S_d ：設計応答値

R_d ：設計限界値

γ_i ：構造物係数

本研究では、実験結果および三次元弾塑性衝撃応答解析結果と比較検討を行うため、上記の構造物係数を含めた安全係数を考慮せずに検討を行うものとする。従って、設計応答値 S_d = 設計断面力 S 、設計限界値 R_d = 設計断面耐力 R として断面照査を行う。表－1に照査結果一覧を示す。

表より、軸力を考慮しない場合には、 $S/R=1.32$ で1.0を超過する結果となる。一方、軸力を考慮した場合は $S/R=0.95$ となり、1.0未満であるため断面破壊に関する安全性は確保される結果となる。

6. 実験および三次元弾塑性衝撃応答解析結果との比較

図－7には、実験および三次元弾塑性衝撃応答解析結果におけるアーチ内縁のひび割れ分布性状を示している。(a)図は初期ひび割れを灰色、実験後のひび割れを赤色で示した実験終了後のひび割れ分布性状である。(b)図はひび割れの発生が明瞭に示されとされる載荷点最大変位時におけるアーチ部の第一主応力分布図を示している。図中、緑色の領域（コンクリート要素の第一主応力が $-0.001 \sim 0.001$ MPaの範囲）は応力零近傍要素を示しており、最大応答時点において大きな応力が出現する領域ではひび割れが発生しているものとして評価可能である。

図より、実験および三次元弾塑性衝撃応答解析結果は明確なひび割れが発生しておらず、未だ終局状態に至っていないものと推察される。また、図－4(a)図より載荷点直下においても残留変位が発生しておらず、未だ弾性範囲内であることが伺える。このことから、軸力を考慮した場合の照査結果は、実験結果および三次元弾塑性衝撃応答解析結果と概ね同様な傾向となった。

7. まとめ

本研究では、RC製アーチ構造の耐衝撃設計法の確立に向けた基礎資料を提供することを目的に、三層緩衝構造を設置した実規模RC製アーチ構造の重錘落下衝撃実験の衝突位置であるアーチクラウン部の曲げモーメントに関する断面照査を行った。また、これら照査結果を実験および三次元弾塑性衝撃応答解析結果のひび割れ分布性状と比較検討することにより、照査方法の妥当性について検討した。検討結果を整理すると、以下のように示される。

- (1) アーチクラウン部における曲げモーメントおよび圧縮軸力の波動継続時間および最大応答値発生時刻は、ほぼ同様であることから、本断面における曲げモーメント照査時には圧縮軸力を考慮することが可能であるものと考えられる。
- (2) 自重および土圧作用時と重錘衝突時の設計断面力を合算した場合の最大曲げモーメント発生位置は、内側引張となる載荷点直下のアーチクラウン部および外側引張となるアーチ中心より海側 45° 近傍である。
- (3) 軸力を考慮した場合の照査結果は、実験結果および三次元弾塑性衝撃応答解析結果と概ね同様な傾向となる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，2000.6.
- 2) (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) 岸徳光，A.Q.Bhatti，三上浩，今野久志，岡田慎哉：破壊エネルギー等価の概念を用いた大型RC桁に関する衝撃応答解析手法の妥当性検討，構造工学論文集，Vol.53A，pp.1227-1238，2007.3
- 4) 川瀬良司，岡田慎哉，鈴木健太郎，岸徳光：三層緩衝構造を設置したトンネル坑口部の衝撃挙動に関する実規模実験と数値解析的検討，構造工学論文集，Vol.54A，pp.1055-1066，2008.3
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書（2007年制定）設計編，2007.12