

# 三層緩衝構造を設置した実規模RCアーチ構造の 衝撃応答時における断面力に関する数値解析的検討

Numerical study on section forces 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	正会員	岡田 慎哉 (Shin-ya Okada)
国土交通省北海道開発局	非会員	萩野 博紹 (Hiroaki Hagino)
(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。このようなトンネル坑口部では、安全性の確保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の耐衝撃設計は、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）を用いて断面力を算出する方法<sup>1)</sup>や、落石荷重は三次元弾性衝撃応答解析を用いて、死荷重および土圧による作用力は静的骨組解析を用いてそれぞれ算出し、それらを合算して静的骨組解析により断面力を算出する方法<sup>2)</sup>により実施されている。

著者らは、三次元弾塑性衝撃応答解析法（以後、衝撃応答解析）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、要素分割数を低減した場合においても工学的に妥当な数値解析結果を得るための方策として、曲げ破壊型RC桁<sup>3)</sup>および実規模RC製アーチ構造を対象にコンクリート要素の軸方向要素が基準の要素長よりも大きい場合に対して破壊エネルギー等価の概念を導入し、換算引張強度を評価する手法を提案し、各重錘落下衝撃実験結果と比較することでその適用性に関する検討を行っている。

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場合の実規模RC製アーチ構造に落石荷重を作用させた場合の静的骨組解析と、提案の換算引張強度を評価した衝撃応答解析をそれぞれ実施し、衝撃応答時の耐衝撃挙動および断面力に関する検討を行った。

検討項目は、衝撃応答時の耐衝撃挙動の検討では、衝撃応答解析結果における重錘衝撃力波形、载荷点直下の鉛直変位波形およびアーチ部の変位に着目して検討を行った。また、断面力に関する検討では、各解析結果における曲げモーメントおよび軸力に着目して行った。

## 2. 解析条件

### 2.1 構造寸法および配筋状況

本解析には、先に提案した衝撃応答解析の適用性に関する検討と同様な実規模RCアーチ構造のモデルを採用して

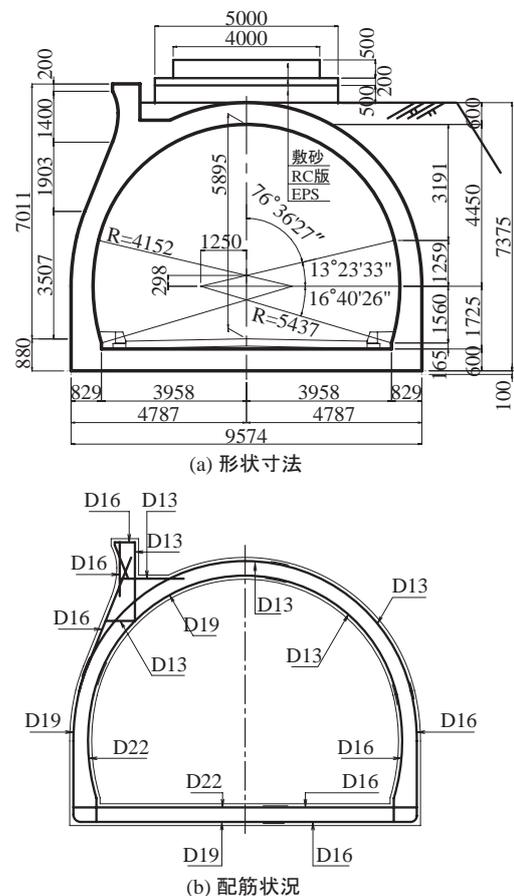


図-1 形状寸法および配筋状況

いる。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  $f_c=36.1\text{MPa}$  であった。

三層緩衝構造の厚さは、設計要領<sup>2)</sup>を参考に敷砂厚 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  $m=10t$ 、落下高さ  $H=10m$ 、衝突位

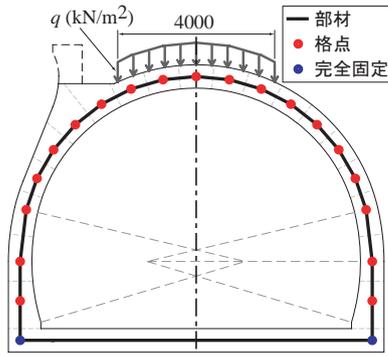


図-2 二次元静的骨組解析モデル

表-1 二次元静的骨組解析における荷重条件

落石衝撃力 P (kN)	分散面積 A (m <sup>2</sup> )	荷重強度 q (kN/m <sup>2</sup> )
3,730	16	233

置はアーチクラウン部としている。なお、落石時の各解析には自重および背面土圧は考慮せずに実施した。

### 2.2 二次元静的骨組解析

図-2には、静的骨組解析モデルを示している。解析モデルは、アーチ部および側壁は1m程度に分割して格点を設定し、底版については両端部を完全固定としている。なお、解析は山側の背面裏込土による外方変形の抑制を考慮している。コンクリートの弾性係数は後述する衝撃応答解析と同様に $E=25.0\text{GPa}$ とし、断面二次モーメントは単位幅1m相当の値を設定している。一方、落石荷重は、設計要領<sup>2)</sup>に準拠し以下の落石衝撃力算出式にて計算する。

$$P = 2.108(m \cdot g)^{2/3} \cdot \lambda^{2/5} \cdot H^{3/5} \quad (1)$$

ここに、P：落石の衝撃力 (kN)

m：落石の質量 10 (t)

g：重力加速度 9.8 (m/s<sup>2</sup>)

λ：ラーメの定数 2,000 (kN/m<sup>2</sup>)

H：落石の落下高 10 (m)

重錘衝突点を中心とした荷重分散範囲についても、設計要領<sup>2)</sup>に準拠し4m×4m四方と設定している。以上より、本静的骨組解析では幅4m、奥行き1mの範囲に表-1に示す荷重強度を設定している。

### 2.3 三次元弾塑性衝撃応答解析

#### 2.3.1 数値解析モデル

本研究の三次元弾塑性衝撃応答解析には、陽解法に基づく非線形動的構造解析用汎用コードLS-DYNA (ver.970)を用いている。図-3には、数値解析モデルを示している。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、海側に関しては海岸擁壁をモデル化している。地盤部としては、トンネルの高さ8m程度以上の深さを考慮することとした。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。

各要素において、鉄筋要素には梁要素を適用して4点積分を、それ以外の要素には全て三次元固体要素を適用し、敷砂要素とEPS要素には8点積分を採用し、その他の要素には1点積分を採用している。コンクリートの要素長は、断面方向には250mm程度を基本長さとしている。なお、

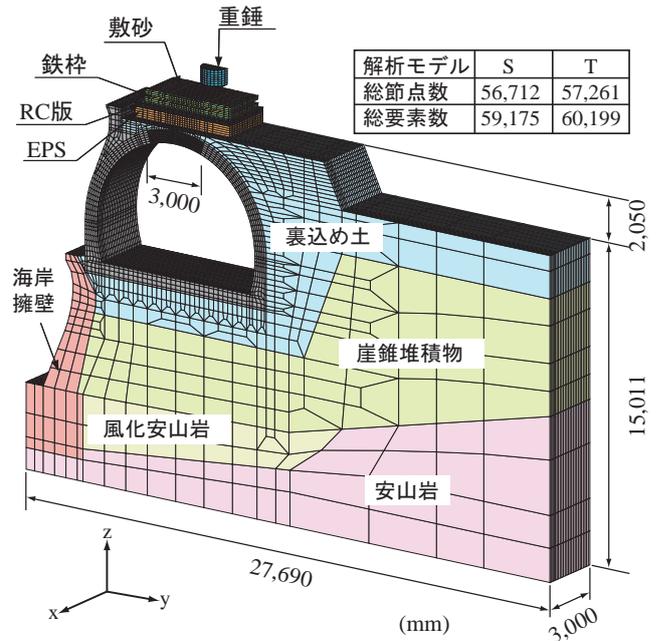


図-3 三次元弾塑性衝撃応答解析モデル

載荷点を中心に3mの範囲は、ひび割れが他の区間より多く発生するものと考えられることから、基本長さの1/2の125mm程度とした。なお、全てのコンクリート要素には引張破壊エネルギー等価の概念<sup>3)</sup>を適用し、コンクリートの引張強度には換算値を入力している。また、軸方向要素長は全て125mmとしている。なお、敷砂とRC版間、RC版とEPS材間、EPS材とトンネル覆工間、裏込め土とトンネル覆工間には接触と剥離を伴う接触面を定義している。

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。また、トンネル断面に関しては、道路軸方向に自由境界を定義している。コンクリート要素と鉄筋要素間は完全付着としている。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、本数値解析は、重錘が敷砂材に衝突した時点を0msとし、アーチ構造の挙動が定常状態に至るまでの300ms間について実施した。

#### 2.3.2 材料物性モデル

表-2には、解析に用いた基準値としての物性値一覧を、図-4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。本研究で適用した敷砂モデルの応力-ひずみ関係<sup>4)</sup>は、次式のように示される。

$$\sigma_{sand} = 50 \varepsilon_{sand}^2 \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_{sand}$ は応力(MPa)、 $\varepsilon_{sand}$ は体積ひずみである。荷重の除荷勾配は $E_{ul} = 10 \text{GPa}$ と仮定している。

(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いる。コンクリートの応力-ひずみ関係は、圧縮側に対しては0.15%ひずみ時に圧縮強度で降伏するバイリニア型とし、引張側に対しては応力が引張強度に達した時点で引張応力を伝達しないカットオフを定義している。本研究では、圧縮試験から得られた圧縮強度 $f_c'$ を圧縮側の降伏応力とした。引張側の引張強度 $f_t$ に関して

表-2 解析に用いた物性値一覧

材料	密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	弾性係数 $E$ (GPa)	ポアソン 比 $\nu$
敷砂	1,600	10.0*	0.060
コンクリート**	2,350	25.0	0.167
鉄筋**	7,850	206.0	0.300
EPS	20	0.0022	0.000
裏込土(盛土)	2,000	0.68	0.450
崖錐堆積物	2,000	1.40	0.40
風化安山岩	2,000	1.80	0.40
安山岩	2,100	3.10	0.40
重錘	10,080	206.0	0.300

\*: 除荷時の弾性係数

\*\* : 密度および弾性係数は設計値

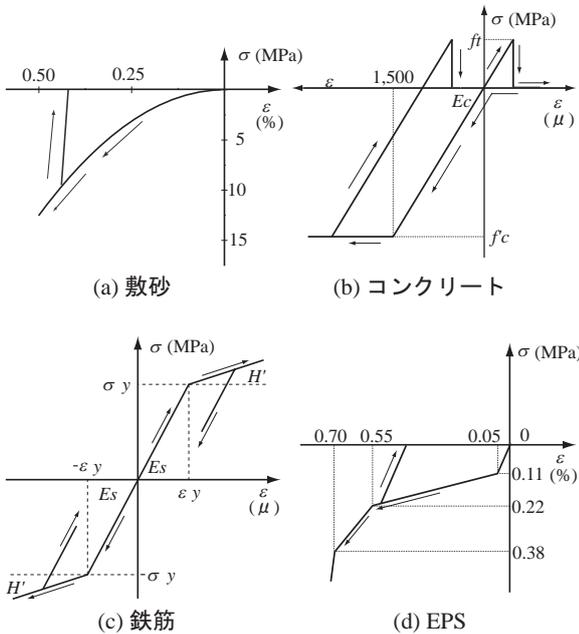


図-4 材料物性モデル

は、1要素の周方向に1個の曲げひび割れが発生するものと仮定し、周方向要素長が異なる場合においても等しいひずみエネルギーでひび割れが発生するように(引張破壊エネルギー等価の概念)、各コンクリート要素に対して仮定の引張強度を設定することとした。ここでは、断面方向要素長 250 mm, 125 mm の仮想引張強度として基準要素長を 35 mm と設定し、 $f_{t250} = 0.715$  MPa,  $f_{t125} = 1.011$  MPa と設定した。

(c) 図には、RC 製アーチ構造本体および三層緩衝構造 RC 版の異形鉄筋要素に用いた応力-ひずみ関係を示している。ここで採用したモデルは、降伏後の硬化係数  $H'$  を考慮した等方弾塑性体モデルである。ここでは、 $H' = E_s / 100$  と仮定している。なお、 $E_s$  は鉄筋の弾性係数である。

(d) 図には、EPS 材の要素に用いた応力-ひずみ関係を示している。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、5% ひずみ時の弾性限界応力を 0.11 MPa, 55% ひずみ時の応力を 0.22 MPa, 70% ひずみ時の応力を 0.38 MPa とするテトラリニア型にモデル化している。なお、除荷時には荷重時の初期弾性係数である 2.2 MPa を定義している。また、引張側はカットオフ値を零応力とし

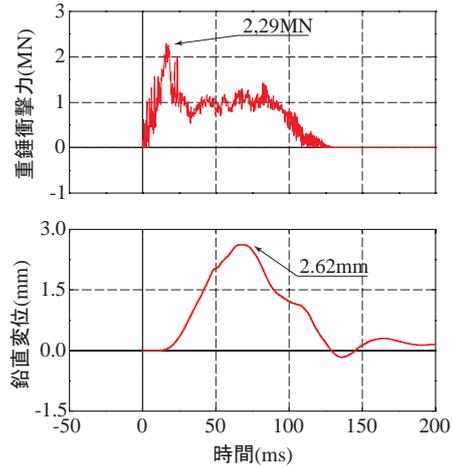


図-5 各種応答波形

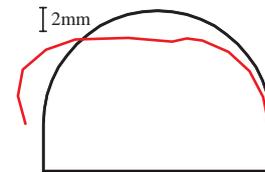


図-6 最大変位分布 (倍率 500 倍)

て弾塑性状態を定義している。

コンクリートおよび異形鉄筋の降伏条件は von Mises の降伏条件に従うものとし、ひずみ速度効果は考慮していない。また、海岸擁壁のコンクリート、裏込め土、重錘および地盤は弾性体として仮定している。

### 3. 三次元弾塑性衝撃応答解析結果

本研究では、衝撃応答時の耐衝撃挙動の検討を行うことから、まず衝撃応答解析結果について考察する。

図-5には、重錘衝撃力波形、荷点における鉛直変位波形を示している。なお、解析結果は重錘が表層材の敷砂に衝突した時点をも 0ms としている。図より、重錘衝撃力については衝突初期に最大応答値を示した後、台形状の波形分布を示している。変位波形については、正弦半波状波形を呈しており、残留変位は発生していないことが分かる。

図-6には、解析実施時間を通じて最大となる応答変位を示している。図より、荷点近傍において内方の変位が顕著に発生しており、さらに側壁上端近傍部では全体的に海側へ変形していることが分かる。これは、山側の背面裏込土により外方への変形が抑制されたためと考えられる。

図-7には断面力の一例として、アーチ中心から 0° (荷点直下) および山側 45° の断面における道路軸方向 1 要素分の曲げモーメントおよび軸力について、単位幅 1m 当たりに換算した断面力波形を示している。なお、曲げモーメントは内側引張を正、軸力については圧縮力を正として示している。図より、曲げモーメント波形では、0° の場合および 45° の場合で互いに正負に反転した台形状分布を呈している。波動継続時間についても、両者ともに 120ms 程度である。軸力波形に関しては、曲げモーメントよりも高周波成分が含まれた波形性状を示している。軸力の最大応答値については、0° の場合は 45° の場合の 1/6 程度と

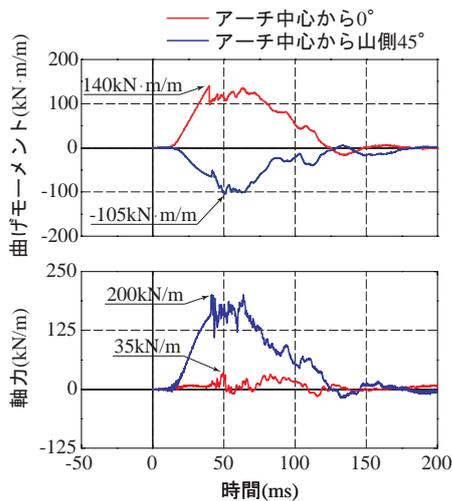


図-7 断面力波形

小さく示されている。なお、軸力の45°の場合の波動継続時間は曲げモーメントとほぼ同様である。

以上より、アーチ中心から45°の断面のように、曲げモーメントおよび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様となる場合の断面設計時には、軸力を考慮した計算が可能となるものと考えられる。一方、アーチ中心から0°の断面のように、軸力が小さい場合には断面設計時における軸力の考慮は慎重に設定する必要があるものと考えられる。

#### 4. 各解析結果の比較

図-8には、アーチ断面力を静的骨組解析結果と衝撃応答解析結果を示している。衝撃応答解析結果については、正負両側の応答に関して、変位分布と同様に解析実施時間を通じて最大および最小となる応答値を、断面力波形と同様に単位幅1mあたりに換算して示している。また、曲げモーメントは内側引張を、軸力に関しては圧縮力をそれぞれ最大として図化している。

(a) 図より、曲げモーメント分布に関しては、衝撃応答解析結果は静的骨組解析結果と比較して全体的に小さな応答となっていることが分かる。荷点直下の正の曲げモーメントに関しては、衝撃応答解析結果が静的骨組解析結果の1/2程度と小さく示されている。衝撃応答解析におけるリバウンド応答に関しても、全体的に正負反転した大きな応答は見受けられない。

(b) 図より、軸力分布についても曲げモーメント分布と同様に、静的骨組解析結果よりも衝撃応答解析結果が全体的に小さく示されている。特に、荷点直下においては衝撃応答解析結果は静的骨組解析結果の1/10程度の応答値である。また、リバウンド応答となる引張軸力に関してはほとんど発生していない。

以上のことより、静的骨組解析結果と衝撃応答解析結果の断面力を比較すると、衝撃応答解析結果は静的骨組解析結果よりも小さく、荷点直下においては曲げモーメントは1/2程度、軸力は1/10程度であった。よって、衝撃応答時として荷点直下の断面を静的骨組解析により設計を行う場合には、特に留意する必要があるものと考えられる。

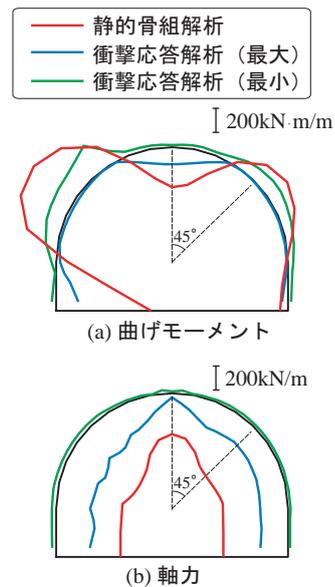


図-8 各解析結果による断面力分布

#### 5. 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場合の実規模RC製アーチ構造に落石荷重を作用させた場合の二次元静的骨組解析と、提案の換算引張強度を評価した三次元弾塑性衝撃応答解析をそれぞれ実施し、衝撃応答時の耐衝撃挙動および断面力に関する検討を行った。検討結果を整理すると、以下のように示される。

- (1) 三次元弾塑性衝撃応答解析結果より、曲げモーメントおよび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様となる場合の断面設計時には、軸力を考慮した計算が可能となるものと考えられる。
- (2) 二次元静的骨組解析結果と三次元弾塑性衝撃応答解析結果の断面力を比較すると、衝撃応答解析結果は静的骨組解析結果よりも小さく、荷点直下においては曲げモーメントは1/2程度、軸力は1/10程度であった。
- (3) 二次元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断面設計を行う際、荷点直下の断面のように軸力が小さい場合には軸力の取り扱いについて留意する必要があるものと考えられる。

#### 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) 岸徳光, 岡田慎哉, 今野久志, 池田憲二：敷砂材の緩衝特性評価のための数値解析モデルに関する一考察，構造工学論文集, Vol.49A, pp.1323-1332, 2003.3