

# 小型 RC 製アーチ梁模型の耐衝撃挙動に関する数値解析的検討

A numerical analysis on impact resistant behavior of small sized RC arch-type beam model

(株) 構研エンジニアリング ○ 正員 川瀬 良司 (Rycji Kawase)  
 室蘭工業大学 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)  
 (独) 北海道開発土木研究所 正員 今野 久志 (Hisashi Konno)  
 (独) 北海道開発土木研究所 正員 岡田 慎哉 (Shinya Okada)

## 1. はじめに

我が国の道路は、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いことから、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。しかしながら、これらのトンネルにおいて、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。

本研究では、これらの RC 製アーチ構造形式の耐衝撃挙動を把握することを目的に、今後実施する小型 RC 製アーチ梁模型に関する重錘落下衝撃実験を対象に数値解析的検討を行った。数値解析は、小型 RC 製アーチ梁模型（以後、アーチ梁）に重錘落下による衝撃荷重を作用させた場合の三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。本研究では、アーチ部形状を正方形断面として衝撃速度を変化させた場合の帯鉄筋の有無が耐衝撃挙動に与える影響について検討を行うものとする。検討方法は、重錘衝撃力、アーチ基部断面の応答軸力および衝突位置の変位やひび割れ分布性状に着目して行うこととした。なお、本数値解析には、陽解法に基づく非線形動的構造解析用汎用コード LS-DYNA<sup>1)</sup>を用いている。

## 2. 数値解析概要

### 2.1 アーチ梁模型の概要および解析ケース

図-1 には、帯鉄筋を有する場合のアーチ梁模型の形状寸法を示している。アーチ梁の形状は、実トンネル断面形状の 1/4 程度の大きさとした。すなわち、アーチ部材の断面寸法は 200 × 200 mm の正方形断面とし、アーチ部の内半径は 1,000 mm、側壁部の高さは 500 mm 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 を用い、芯あぶりは 40 mm としている。帯鉄筋には異形鉄筋の最小径である D6 を用い、断面中心線において断面有効高さの 1/2 である 80 mm 間隔で配筋している。フーチング形状については、アーチ部の挙動を検討するために剛体とし、トンネル断面方向 3,000 mm、トンネル軸方向 600 mm、高さ方向 400 mm とした。フーチングの配筋は、トンネル断面方向に D19、帯鉄筋には D13 を用いている。

表-1 には、本数値解析で実施したアーチ試験体の解析ケース一覧を示している。表中、解析ケース名の第一項目は帯鉄筋の有無（N：無し、S：有り）を、第二項目は速度を示す V に重錘衝突速度を併せて示している。本数値解析

の重錘落下衝突位置はアーチ頂部中央とし、衝突位置に配置した重錘に初速度（ $V = 3.0, 4.0, 5.0, 8.0$  m/s）を入力することにより衝突エネルギーを与えている。なお、重錘の質量は 300 kg としている。

### 2.2 数値解析モデルおよび解析条件

図-2 には、本数値解析で用いた要素分割モデルおよび配筋モデルを示している。

解析モデルは、アーチ構造および荷重条件の対称性を考慮してスパン方向および断面幅方向にそれぞれ 2 等分した 1/4 モデルとし、面对称を設定している。境界条件として、フーチング底面は完全固定、コンクリートと重錘の要素間には面と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義している。また、コンクリートと鉄筋要素間には、完全定着と仮定している。

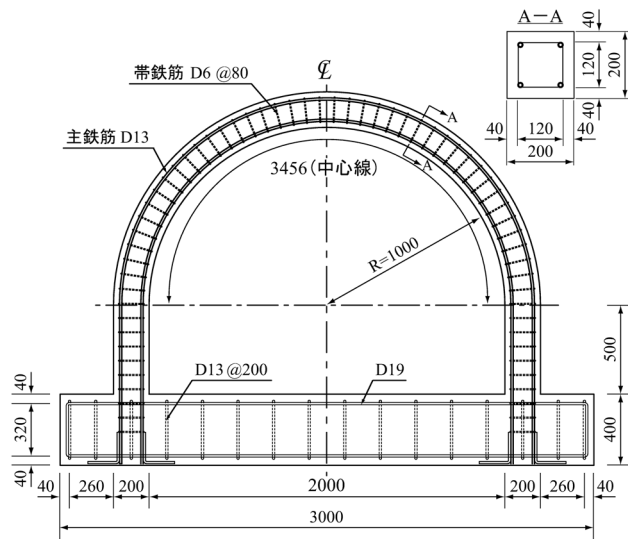


図-1 アーチ試験体の形状寸法（帯鉄筋有り）

表-1 数値解析ケース一覧

| 解析ケース  | 帯鉄筋の有無 | 重錘衝突速度  |
|--------|--------|---------|
| N-V3.0 | 無し     | 3.0 m/s |
| N-V4.0 |        | 4.0 m/s |
| N-V5.0 |        | 5.0 m/s |
| N-V8.0 |        | 8.0 m/s |
| S-V3.0 | 有り     | 3.0 m/s |
| S-V4.0 |        | 4.0 m/s |
| S-V5.0 |        | 5.0 m/s |
| S-V8.0 |        | 8.0 m/s |

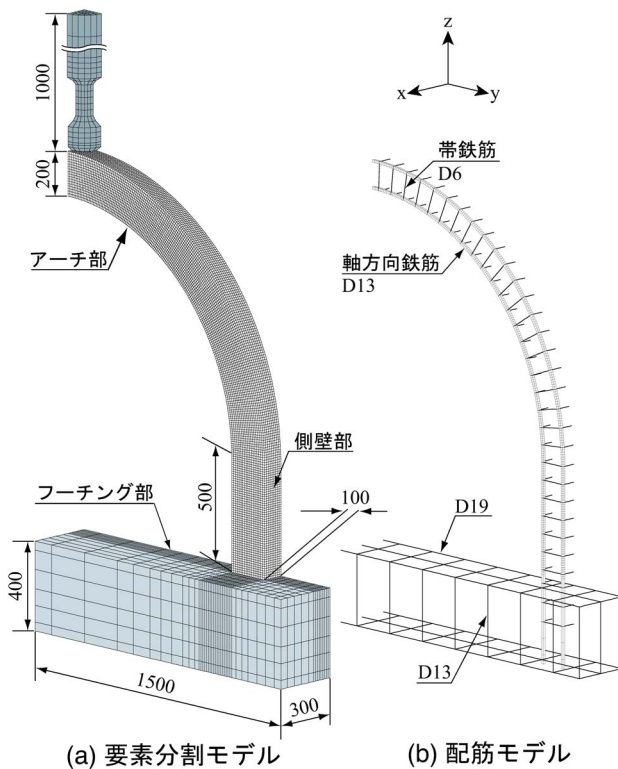


図-2 要素分割モデルおよび配筋モデル

アーチ部の要素分割に関しては、ひび割れ分布性状の検討を行うために要素の1辺が約10mmになるように分割している。要素に関しては、コンクリート、重錘および軸方向鉄筋には8節点の3次元固体要素を、それ以外の鉄筋要素には梁要素を用いてモデル化している。積分点に関しては1点積分を基本としているが、軸方向鉄筋は断面内において1要素でモデル化しているため、解析精度を考慮し8点積分としている。総節点数は46,815で、総要素数は帯鉄筋を用いないN試験体と帯鉄筋を用いるS試験体でそれぞれ39,954、40,698である。質量に比例する粘性減衰定数は、既往の研究<sup>2)</sup>と同様に、アーチ試験体の鉛直方向最低次固有振動数に対して0.5%と設定している。なお、本数値解析は、重錘がアーチ頂部に衝突した時点をも0msとし、アーチ試験体の挙動が定常状態に至るまでの150ms間について実施した。

### 2.3 材料物性モデル

図-3には、本数値解析で用いたコンクリートおよび鉄筋の等価1軸応力-ひずみ特性を示している。以下に、コンクリートと鉄筋等に関する材料物性モデルの概要を述べる。

#### (1) コンクリート

図-3(a)には、コンクリートに関する等価1軸応力-ひずみ特性を示している。コンクリート要素は、LS-DYNAコード<sup>1)</sup>に組み込まれている弾塑性体モデルを用いている。すなわち、圧縮側に対しては折線近似による相当応力-相当ひずみ関係、引張側に対しては線形の相当応力-相当ひずみ関係を仮定し、破壊圧力に達した段階で引張力を伝達しないとするモデルである。圧縮側に関しては、相当ひずみが $1,500\mu$ に達した状態でコンクリートが降伏するものと仮定し、完全弾塑性体のバイリニア型にモデル化した。

表-2 解析に用いた物性値一覧

| 材料     | 密度<br>$\rho$ (ton/m <sup>3</sup> ) | 弾性係数<br>$E$ (GPa) | ポアソン比<br>$\nu$ |
|--------|------------------------------------|-------------------|----------------|
| コンクリート | 2.35                               | 23.5              | 0.167          |
| 鉄筋     | 7.85                               | 206               | 0.3            |
| 重錘     | 10.39                              | 206               | 0.3            |

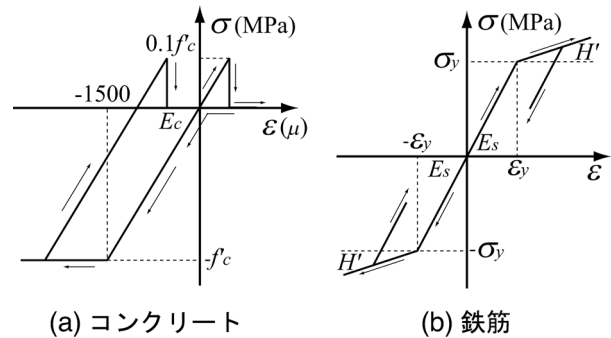


図-3 各材料の応力-ひずみ関係

本研究では圧縮強度 $f'_c$ を降伏応力とし、 $f'_c=21\text{MPa}$ を用いている。降伏の判定には von Mises の降伏条件式を採用している。引張強度は既往の研究<sup>2)</sup>の場合と同様に圧縮強度の1/10と仮定している。引張側の圧力は、要素内に生じる3方向の直応力の平均値として評価している。

#### (2) 鉄筋

図-3(b)には、鉄筋に関する等価1軸応力-ひずみ特性を示している。軸方向鉄筋要素に用いた物性モデルは、降伏後の塑性硬化係数 $H'$ を考慮した等方弾塑性体モデルである。降伏応力 $\sigma_y$ に関しては、軸方向鉄筋、帯鉄筋でそれぞれ $\sigma_y=345\text{MPa}$ 、 $295\text{MPa}$ を用い、弾性係数 $E_s$ およびポアソン比 $\nu_s$ には、表-2に示されている値を採用している。降伏の判定は、von Mises の降伏条件に従うこととした。塑性硬化係数 $H'$ は、弾性係数 $E_s$ の1%と仮定している。

なお、フーチング部コンクリートおよびフーチング内部の鉄筋に関しては、応答最大応力が弾性範囲内であるものと推察されることより表-2の物性値を用い、弾性体として解析を行っている。

## 3. 数値解析結果

### 3.1 各種応答波形

図-4(a)には、重錘とアーチ部コンクリートの要素間における接触反力を用いた重錘衝撃力波形分布、図-4(b)はアーチ基部断面の要素毎に発生するz方向応力を積分した応答軸力波形分布、図-4(c)はアーチ頂部における断面中央部のz方向変位に関する波形分布を衝突速度 $V=3.0, 5.0, 8.0\text{m/s}$ の場合についてそれぞれ示している。なお、本数値解析では1/4モデルを使用しているため、重錘衝撃力および応答軸力ともに出力値に対して4倍の値を用いている。また、図中、各波形とも正載荷時の値を正として波形を整理している。

図-4(a)より、重錘衝撃力の波形性状は、解析ケースにかかわらず重錘衝突初期に最大値を示し、その後の振幅が小さく継続時間の長い波形性状を示している。また、最大

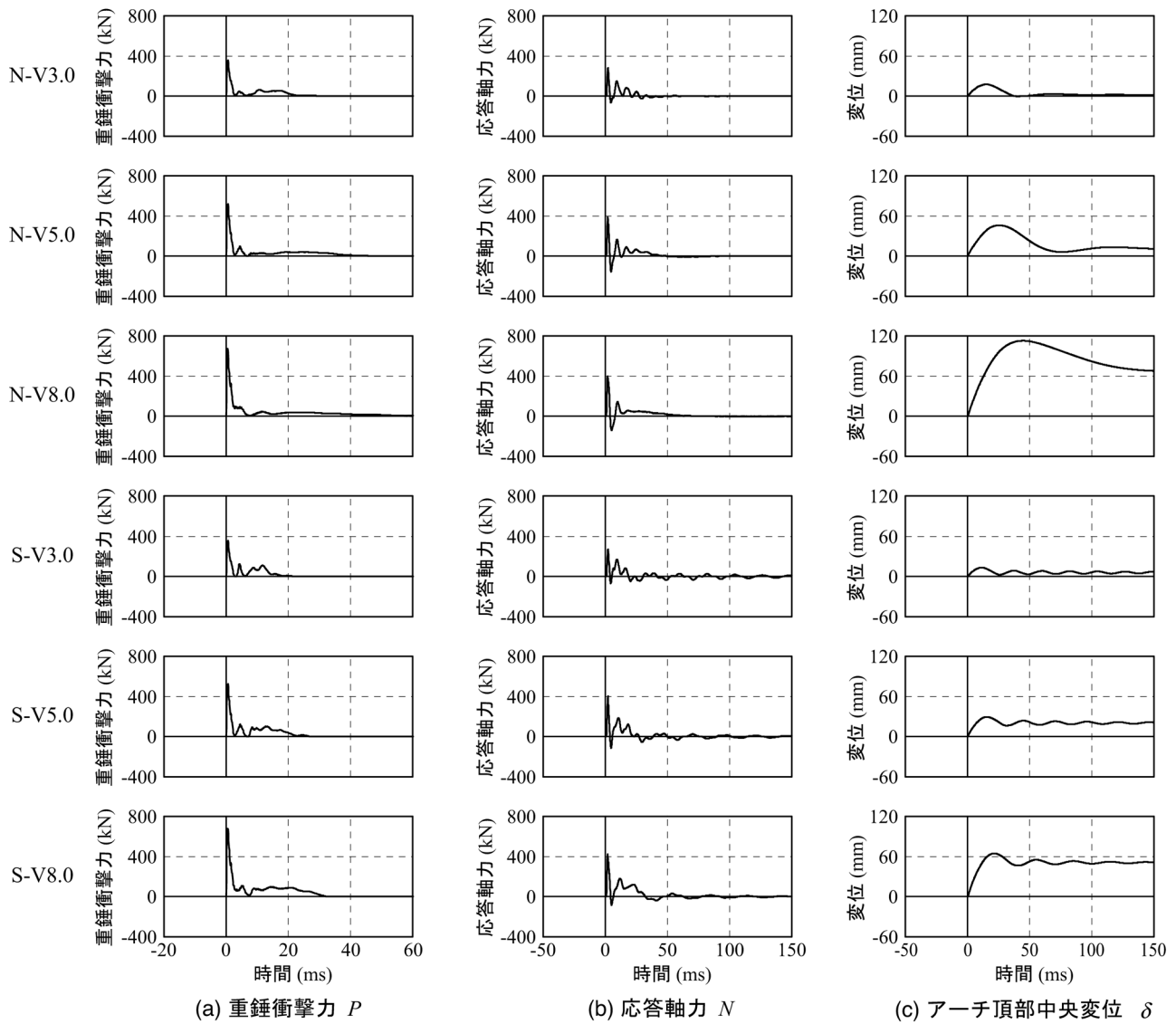


図-4 各種応答波形分布

応答値および波動継続時間は、帯鉄筋を用いない N 試験体および帯鉄筋を用いた S 試験体ともに衝突速度の増加に伴い大きくなる傾向を示している。各衝突速度で N 試験体および S 試験体を比較すると、最大応答値は両者でほぼ同程度となっているものの、波動継続時間は N 試験体よりも S 試験体が短く示されていることが分かる。

図-4(b)より、応答軸力の波形性状は、重錘衝撃力波形と同様にいずれのケースも重錘衝突初期に正弦波状の波形を示し、その後、継続時間が 25 ms 程度の三角波状の波動と若干周波数の高い減衰波動成分から構成された分布を示している。また、最大応答値は衝突速度  $V = 5.0$  m/s までは速度の増加に伴い増加する傾向を示しているものの、 $V = 8.0$  m/s 時では  $V = 5.0$  m/s 時とほぼ同程度の値となっている。これは、アーチ頂部の損傷が著しくなることから、衝撃エネルギーが局所的な損傷によって吸収されることによるものと推察される。

また、各衝突速度で N 試験体および S 試験体を比較すると、最大応答値は両者でほぼ同程度となっているものの、波動継続時間は重錘衝撃力と同様に N 試験体よりも S 試験体が短く示されている傾向にある。これは、帯鉄筋を配

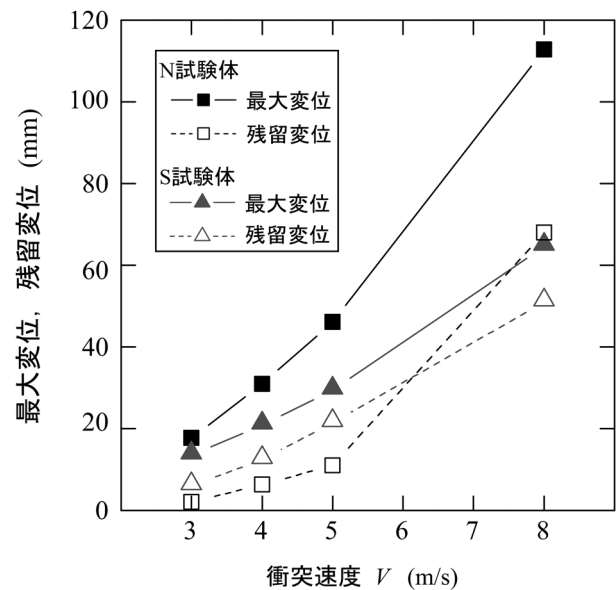


図-5 最大変位, 残留変位-衝突速度の関係

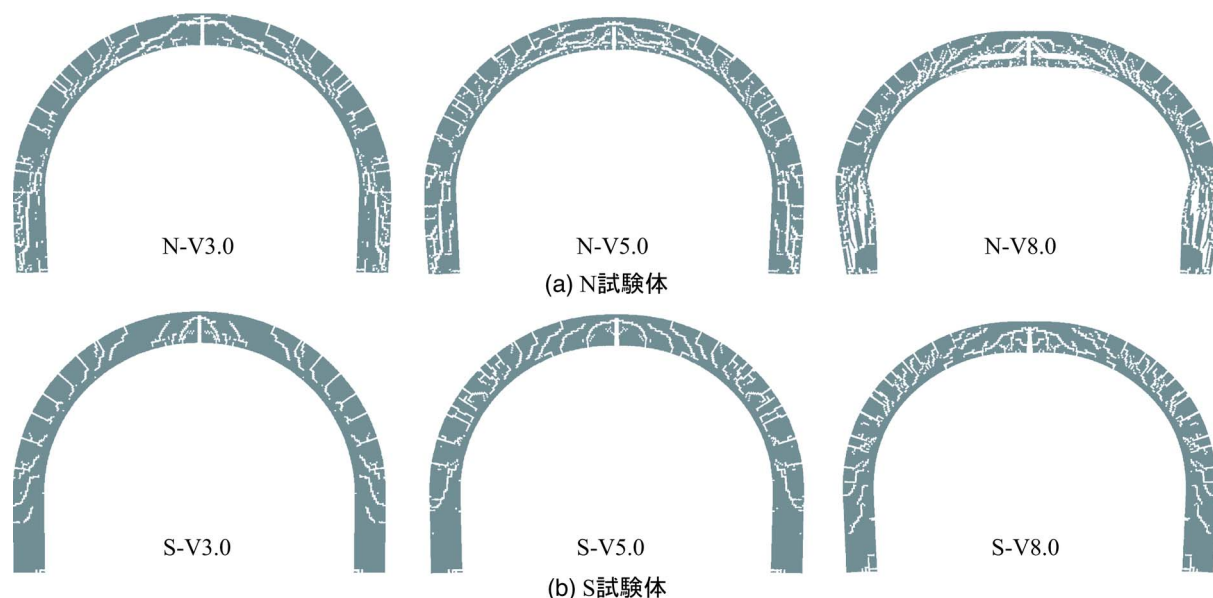


図-6 最大変位時における第一主応力分布

置することにより、断面剛性の低下が抑制されていることを示唆している。

図-4(c)より、アーチ頂部中央変位の波形性状は、いずれのケースも正弦波形状の分布を示していることが分かる。周期については、S試験体がN試験体よりも小さく示されている。これも応答軸力の場合と同様帯鉄筋の配置により、断面剛性の低下が抑制されることによるものと考えられる。また、S試験体は最大応答値発生後において変位が完全に復元せずに振動状態を示している。また、最大応答変位は、N試験体およびS試験体ともに衝突速度の増加に伴い大きく示され、各衝突速度でS試験体はN試験体よりも20~40%程度低減されていることが分かる。これは、帯鉄筋を配筋したことにより、ひび割れの発生および断面剛性の低減が抑制されたことによるものと考えられる。

### 3.2 最大変位、残留変位－衝突速度の関係

図-5にはアーチ頂部中央の最大変位および残留変位を縦軸に、衝突速度を横軸にとって整理した最大変位、残留変位－衝突速度の関係を示している。残留変位に関しては、帯鉄筋を用いないN試験体は解析終了後における変位を、帯鉄筋を用いるS試験体の場合には衝撃荷重除去後の自由振動状態における波形振動中心軸の変位を用いて評価している。

図-5より、最大変位は帯鉄筋の有無にかかわらず、衝突速度の増加に伴い大きく示されていることが分かる。また、最大変位はN試験体よりもS試験体の場合に小さく示されている。一方、残留変位に注目すると、 $V=5.0$  m/sまではN試験体の場合がS試験体の場合よりも小さくなる傾向を示されているものの、 $V=8.0$  m/s時ではN試験体の場合がS試験体の場合よりも大きい。これは、 $V=8.0$  m/s時のN試験体の場合には塑性化が大きく進行しているためと推察される。これより、帯鉄筋を配置することによってアーチ構造の耐衝撃性が向上することが分かる。

### 3.3 ひび割れ分布性状

図-6には、衝突速度 $V=3.0, 5.0, 8.0$  m/sの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、白色の領域（コンクリート要素の第一主応力が

$-0.001 \sim 0.001$  MPaの範囲）は破壊要素および応力零近傍要素を示しており、最大応答時点ではひび割れが発生しているものと評価することが可能である。

図-6より、いずれの解析ケースについても、アーチ頂部より $45^\circ$ 近傍の外側において法線方向の明瞭なひび割れが広範囲に発生していることが分かる。また、衝突速度が増加するに伴いひび割れ本数も増加している。N試験体とS試験体を比較すると、N試験体の場合には、衝突速度の増加とともに荷点部の裏面剥離および側壁部の割裂が顕在化しているのに対して、S試験体の場合には帯鉄筋の効果により、損傷が大きく抑制されているのが分かる。これより、アーチ梁の場合には、帯鉄筋を配置することにより、荷点部の裏面剥離、側壁部の割裂等を効率的に抑制可能であり、アーチ構造の構造特性を発揮するためには無視できない構造要素であることが明らかになった。

## 4. まとめ

本研究では、小型RC製アーチ梁模型に関する重錘落下衝撃実験を対象に数値解析的検討を行った。RC製アーチ梁に帯鉄筋を配筋した場合の耐衝撃性に与える影響についてまとめると、

- (1) ひび割れの発生および断面剛性の低減が抑制される
- (2) 衝突速度の増加に伴う塑性化の進行が小さくなる
- (3) 荷点部の裏面剥離および側壁部の割裂等を効率的に抑制可能である

以上より、帯鉄筋の配筋は、アーチ構造の構造特性を発揮するためには無視できない構造要素であることが明らかになった。

## 参考文献

- 1) John O.Hallquist : LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2000.6.
- 2) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 安藤智啓: 静荷荷時に曲げ破壊が卓越するRC梁の弾塑性衝撃応答解析, 土木学会論文集, No.619/I-47, pp.215-233, 1999.4