

RC アーチ構造の衝撃応答解析手法の開発に関する研究

Development of impact response analysis method for arch shape RC structures

岡田 慎哉*, 岸 徳光**, 今野 久志***, 川瀬 良司****

Shin-ya Okada, Norimitsu Kishi, Hisashi Konno and Ryoji Kawase

* 修(工) 寒地土木研究所 研究員 寒地構造チーム (〒007-0836 北海道札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

** 工博 室蘭工業大学 教授 建設システム工学科 (〒050-8585 北海道室蘭市水元町 27-1)

*** 博(工) 寒地土木研究所 主任研究員 寒地構造チーム (〒007-0836 北海道札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

**** 博(工) (株)構研エンジニアリング 取締役 (〒007-0836 北海道札幌市東区北 18 条東 17 丁目 1-1)

In order to establish a rational impact response analysis method for arch shape RC structures, conducting static and falling-weight impact loadings of small scale and arch shape RC beams, and three-dimensional elasto-plastic finite element analysis for those was performed and its applicability was discussed by comparing with experimental results. From this study, the following results were obtained: (1) impact force wave and maximum displacement at the loading point and the crack patterns occurred on the side-surface of the arch beams can be simulated in a good agreement with the experimental results; and however, (2) the damped free vibration after unloading and residual displacement cannot be better simulated.

Key Words : arch shape RC beams, falling-weight impact loading, elasto-plastic impact response analysis, three-dimensional finite element method

キーワード : アーチ形 RC 梁, 重錘落下衝撃実験, 弾塑性衝撃応答解析, 三次元有限要素法

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。そのため、道路の安全性を確保するためにトンネルを用いるルート選定が多く行われている。一般的にそのトンネル坑口部は斜面を背負っている場合が殆どであり、この坑口斜面の落石対策が施されていない箇所も多く残されている。

そのため、鉄筋コンクリート製(以後、RC 製)のアーチ構造形式となっているトンネル坑口部において、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、トンネル坑口部の設計は落石衝撃力を考慮した設計とはなっていない。このため、トンネル坑口部の落石が発生する可能性がある箇所において、人命を守りかつ交通網を確保するためには耐衝撃性の確認を行う必要がある。さらに、耐衝撃性が十分でないかと判断された場合には、耐衝撃性向上のための適切な対策を講ずることが必要であるものと判断される。

著者らは、これまでに二層緩衝構造を用いたトンネル坑口部に関する解析的研究^{1),2)}や RC 梁・版の耐衝撃性に関する検討^{3),4)}を実施し、それらの耐衝撃性を明らかにしてきた。また、アーチ構造形式であるトン

ネル坑口部について、梁モデルによる解析を実施し、帯鉄筋の有無が耐衝撃性に与える影響について検討を行い、帯鉄筋の配筋がアーチの構造特性を発揮させるためには無視できない構造であることを明らかにした⁵⁾。しかしながら、アーチ構造形式に関する実験的検討はいまだ行われておらず、数値解析精度の確認もなされていないのが現状である。

このような観点より、本研究ではこれらの RC 製アーチ構造に関する数値解析手法の開発を目的に、小型 RC アーチ梁モデル(以後、アーチ梁)に関する重錘落下衝撃実験を実施し、併せて本実験を対象とした三次元弾塑性衝撃応答解析を行った。衝撃実験は、アーチ梁のクラウン部に、所定の衝突速度で重錘を衝突させる重錘落下式により実施した。衝撃応答解析は、本実験を再現する形で実施し、数値解析結果を実験結果と比較することにより、数値解析の精度を検証した。衝撃応答解析に関する検討は、各種応答波形、変形状態およびひび割れ分布性状に着目して行うこととした。なお、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.960)⁶⁾を用いた。

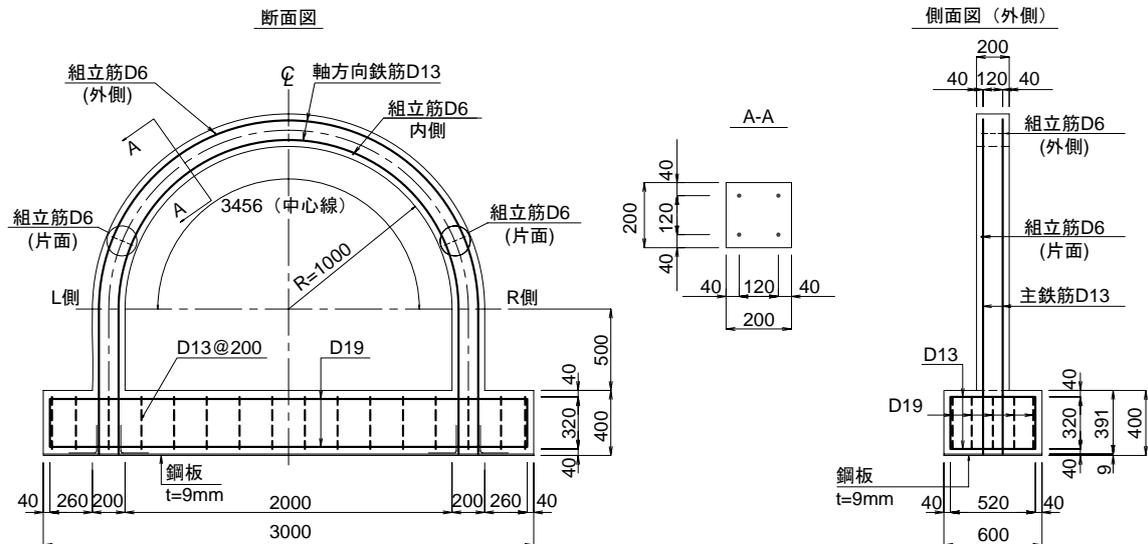


図-1 アーチ梁の形状寸法

表-1 コンクリートおよび鋼材の力学的特性値

実験ケース	コンクリート			鋼材			
	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポア ソン比	降伏強度 (MPa)		弾性係数 (GPa)	ポア ソン比
				SD345(D13)	SD295(D6)		
V-3	29.3	25.1	0.23	393	338	206	0.3
V-4	27.1	21.7	0.24				

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1にはアーチ梁試験体の形状寸法および配筋状況を示している。実験に用いたアーチ梁試験体は、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、アーチ梁の断面は200×200mmの正方形とし、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4本配筋した。その芯かぶり40mmとしている。帯鉄筋については、実構造において設計上考慮されていないため、実験においても配筋しないこととした。

フーチング形状については、可能なかぎり剛構造とし、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ている。フーチングの寸法は、トンネル断面方向長さ3,000mm、トンネル軸方向幅600mm、高さ400mmとする矩形体とし、トンネル断面方向にD19、帯鉄筋としてD13を配筋している。なお、フーチング下面には試験体設置面の平面確保のため、厚さ9mmの鋼版を配している。表-1には、試験体のコンクリートおよび鋼材の力学的特性値を示している。

2.2 衝撃実験の概要

実験は、室蘭工業大学の構造物耐衝撃耐荷力評価試験装置棟で実施した。写真-1には衝撃実験状況を示している。衝撃実験は、跳ね上がり防止用治具によりアーチ梁試験体フーチング部を固定し、アーチ部中央に所定の高さから鋼製重錘を自由落下させることにより行っている。なお、重錘はリニアウェイレールを介して姿勢が制御されていることより、落下時にはその摩擦抵抗によって減速される。本研究では、事前に衝突速度と落下高さに関する検定試験を行い、その結果の下に落下高さを決定している。衝撃荷重の荷重は、所定の衝突速度で一度だけ荷重する単一荷重とした。本実験では、重錘衝突速度 $V=3\text{ m/s}$ 、 4 m/s の2ケースについて実施した。以後、これらをそれぞれV-3、V-4と表記する。実験に用いた重錘は、質量が300kg、衝突部直径が150mmの円柱状鋼製重錘で、その底部には衝突時の片当たりを防止するために高さ2mmのテーパを施している。

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、非接触式レーザ変位計による荷重点変位(梁側面の梁高さ中心点で測定)とした。重錘衝撃力測定用ロードセルの容量と応答周波数は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

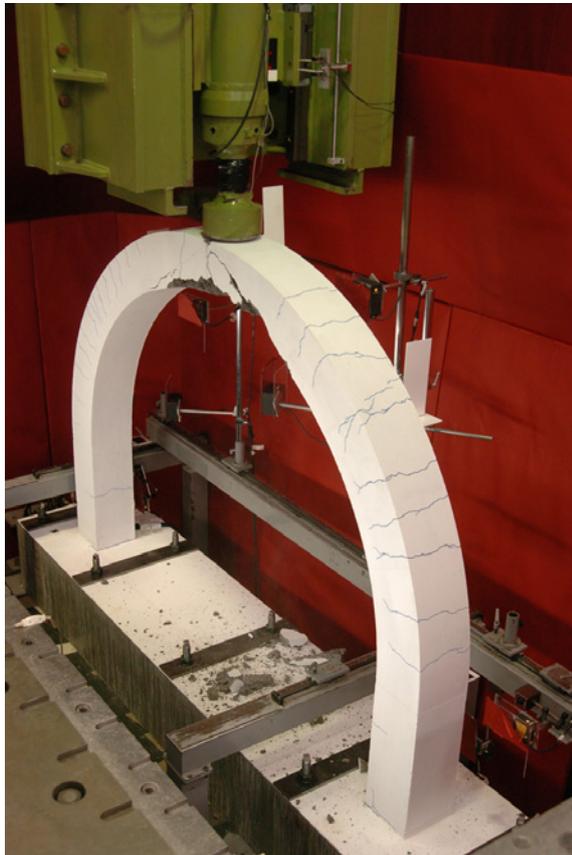


写真-1 実験状況写真

時の各種応答波形は、サンプリングタイム 0.1 ms でデジタルレコーダーにて一括収録を行っている。衝撃実験終了後には梁側面のひび割れをトレースし、ひび割れ分布図を作成している。

3. 数値解析概要

3.1 数値解析ケース

本数値解析は、衝撃実験を対象とした再現解析であるため、実験と同一のケースを実施した。すなわち、重錘衝突速度を $V = 3 \text{ m/s}$, 4 m/s と設定する場合である。なお、ケース名については実験と同じく V-3, V-4 と表記する。

3.2 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を示している。また、配筋モデルも併せて示している。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の際に実験結果との比較を容易にするため、1辺が 20 mm 程度の細かい要素分割とした。各要素において、コンクリート、重錘および軸方向鉄筋には 8 節点の三次元固体要素を、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。なお、コンクリート要素と鉄筋要素間の付着特性については、完全付着としている。要素積分点に関しては 1 点積分を基本としているが、軸方向主鉄筋は断面方向に 1 要素のみでモデ

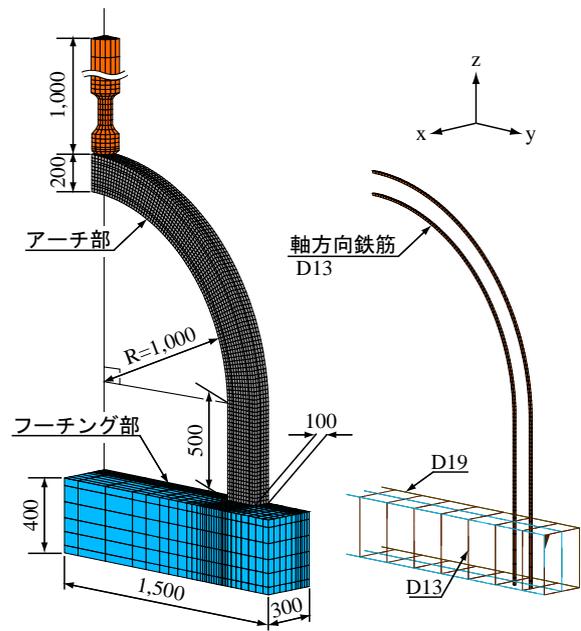


図-2 要素分割モデルおよび配筋モデル

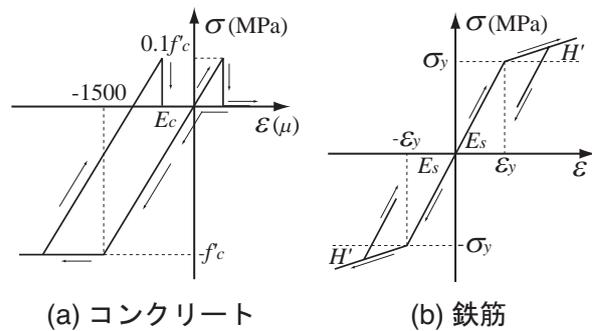


図-3 各材料の相当応力-相当ひずみ関係

ル化しているため、解析精度を考慮し 8 点積分として解析を行っている。

要素分割数に関しては、解析コストの縮減のため構造の対称性を考慮して 1/4 モデルを用いることとした。モデルの総節点数は 13,455 であり、総要素数は 10,802 である。

境界条件は実験条件に近似させることとし、フーチング底面を完全固定とした。また、モデルの対称境界は全て面対称として考慮している。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おり、衝撃力は衝突位置に配置した重錘に初速度を入力することにより与えている。なお、重錘の質量は実験と同じく 300 kg としている。質量に比例する粘性減衰定数は、既往の研究³⁾と同様に、アーチ梁の最低次固有振動数に対して 0.5% を設定した。なお、本数値解析は、重錘がアーチクラウン部に衝突した時点をも 0 ms とし、アーチ試験体の挙動が定常状態に至るまでの 100 ms 間について実施した。

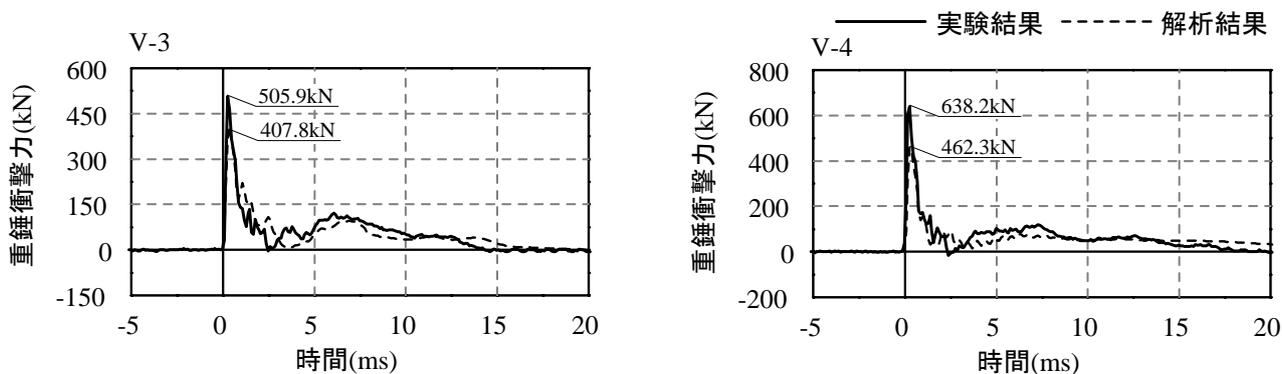


図-4 重錘衝撃力波形

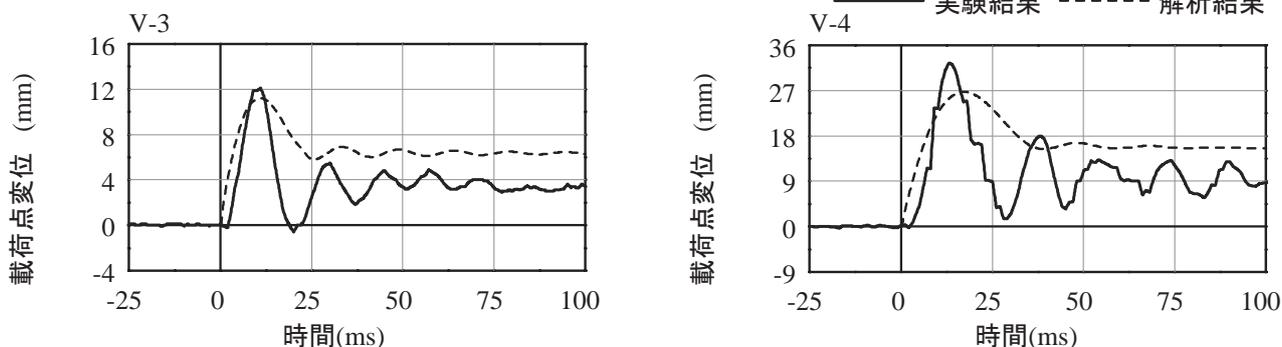


図-5 載荷点変位波形

3.3 材料物性モデル

図-3(a)には、本研究で採用したコンクリートに関する相当応力-相当ひずみ特性を示している。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。

本研究では降伏応力として圧縮強度 f_c' を用いている。引張側に関しては、応力が引張強度に達した段階で引張応力を伝達しないとするカットオフを定義している。なお、引張強度は既往の研究³⁾の場合と同様に圧縮強度の $1/10$ を仮定している。降伏の判定にはDrucker-Pragerの条件式に従うこととした。

図-3(b)には、鉄筋に関する相当応力-相当ひずみ特性を示している。アーチ部の軸方向鉄筋および帯鉄筋に用いた物性モデルは、降伏後の塑性硬化係数 H' を弾性係数 E_s の 1% とするバイリニア型等方弾塑性体モデルとした。降伏応力 σ_y 、弾性係数 E_s およびポアソン比 ν_s には、表-1に示されている値を採用している。鉄筋要素の降伏判定は、von Misesの条件式に従うこととした。

なお、本検討の衝突速度ではひずみ速度効果の影響は小さいものと判断し、解析では考慮しないこととした。

4. 実験結果と数値解析結果の比較

4.1 重錘衝撃力波形の比較

図-4には、重錘衝撃力波形を実験結果と解析結果

を比較する形で示している。図中実線が実験結果を、破線が解析結果を示している。なお、図は重錘の衝突した瞬間を原点として時間軸を設定している。

図より、実験結果の重錘衝撃力は衝突速度の差異にかかわらず、衝突の瞬間から急激に励起し、衝突後 $2\sim 3$ msで最大となる。最大値に達した後、 10 ms程度の間にはほぼ零レベルまで除荷され、その後は片振幅が 100 kN程度の長周期の正弦半波状の波形となっている。

数値解析結果はこの傾向をよく再現している。最大値に関しては、解析結果は実験結果を 2 割程度過小評価しているものの、急激な波形の立ち上がりから最大応答値に至るまでの所要時間は同程度となっている。最大応答到達後の除荷勾配もほぼ等しく、その後の長周期波に関しても良好に再現している。

これより、重錘衝撃力に関しては、最大衝撃力値は若干の過小評価となるものの、本解析手法により大略評価可能であるものと判断される。

4.2 載荷点変位波形の比較

図-5には、載荷点直下の変位波形を示している。なお、図の表示は図-4と同様である。図中、V-4における実験結果の波形に若干の乱れが見られるが、これは計測機器の不調により発生したものである。

図より、いずれのケースとも重錘衝突後 10 ms程度経過後に最大値を示している。V-3の場合の最大変位は約 12 mmであり、V-4の場合は約 33 mmである。その後、零レベル近傍まで減少し、残留変位成分を中

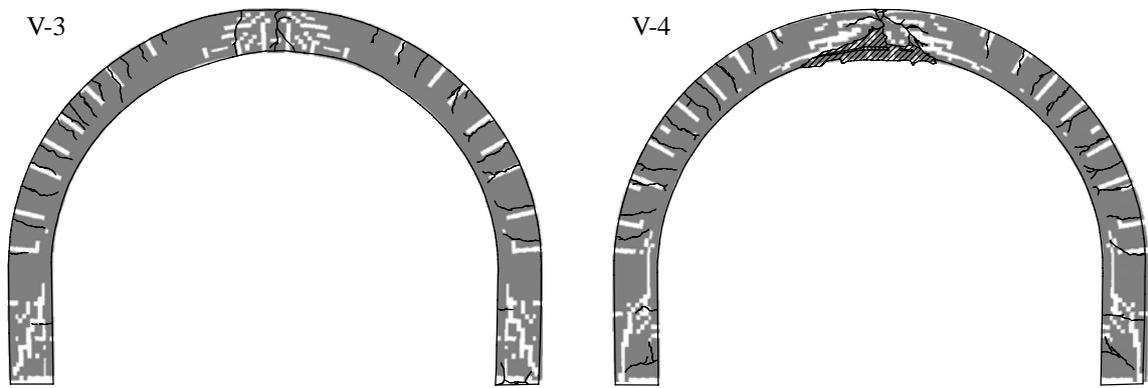


図-6 最大変位時における第一主応力分布 ($V = 3.4 \text{ m/s}$)

—— アーチ形状 —— 実験 - - - - 解析

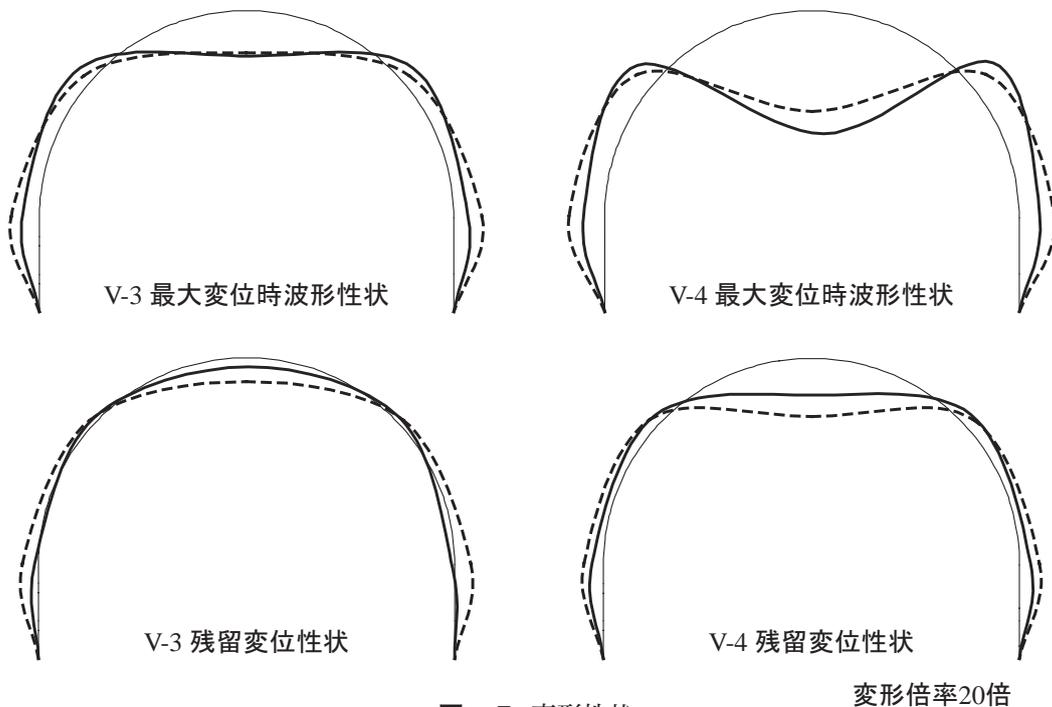


図-7 変形性状

心とする減衰自由振動を呈している。残留変位は V-3 の場合に 4mm 程度、V-4 の場合に 10 mm 程度となっている。

解析結果は、最大値までは実験結果を比較的良好に再現し、最大応答値を示す時間も実験結果とほぼ等しい。V-3 の場合における解析結果の最大変位値は実験結果のそれとほぼ等しく、V-4 の場合には実験結果よりも 5mm ほど過小評価となっている。また、V-3、V-4 共に最大応答変位発生以降、過減衰状態を呈して急激に減衰し、変位が残留している。V-3 の場合には 6mm、V-4 の場合には 15mm の残留変位となり、実験結果の 1.5 倍程度の評価となっている。

これより、本数値解析の結果、荷重点における最大応答変位は実験結果と対応した値を与えるが、荷重除荷後の自由振動状態や残留変位は適切に評価するまでには至っていないことが明らかになった。

4.3 ひび割れ性状の比較

図-6 には、荷重点最大変位時におけるアーチ部の第一主応力分布図に、実験終了時のひび割れ分布を重ねて示している。図中、白色の領域(コンクリート要素の第一主応力が $-0.001 \sim 0.001 \text{ MPa}$ の範囲)は引張破壊した要素あるいは応力零近傍要素を示しており、最大応答時点では大概ひび割れが発生しているものとして評価することが可能であるものと考えられる。

図より、実験結果は、V-3 の場合には荷重点近傍に貫通ひび割れが発生し、アーチ部には外側に曲げひび割れが、側壁部の内側にも若干曲げひび割れが見られる。また、基部にも若干の損傷が見られる。V-4 の場合の大略の性状は V-3 の場合に類似しているが、荷重点部の局所的な損傷が大きく、斜めせん断ひび割れおよび裏面の剥離が見られる。また、基部近傍においても斜めひび割れが発生している。

解析結果は、載荷点部、アーチ部とも実験結果のひび割れ性状によく類似している。側壁部および基部の損傷に関しては実験結果と比較して大きな斜めせん断ひび割れが発生している。これより、側壁部と基部における損傷は実験結果より過大に評価する傾向を示していることが明らかになった。

この原因として考えられるのは、数値解析ではフーチング基部全面に対して固定条件を付加したことにより、アーチ基部にも過大な拘束力が作用したことによるものと推察される。

4.4 変形状の比較

図-7には、載荷点最大変形時および残留変位の変形分布性状を、実験結果と解析結果を比較する形で示している。図中実線が実験結果を、破線が解析結果を示している。なお、変形は実際の20倍で示している。

図より、実験結果における最大変位時の変形状は、載荷点であるアーチクラウン部では大きな鉛直下方向の変形を、アーチ側面部および側壁部では外側に膨らむような変形を示している。残留変位についても、最大変位と同じような変形状を示して変位が残留していることが分かる。また、V-3の場合には側壁部の残留変位がそれほど大きくないのに対して、V-4の場合には大きな残留変位が確認できる。これは、前述のひび割れ性状で見られた斜めせん断ひび割れの発生によるものと考えられる。

解析結果は、実験結果の性状を比較的よく再現している。しかしながら、V-3、V-4ともに最大変位、残留変位のいずれにおいても側壁部の変位が大きく評価されている。これは、解析結果のひび割れ性状からも明らかのように、解析において基部の損傷が大きく発生していることに起因すると考えられる。また、残留変位に関する分布図より、アーチ部分の変形の曲率は実験結果と解析結果で大略等しいことが分かる。これより、前述の載荷点変位の残留成分が過大評価となるのは、載荷点直下の損傷部分のみならず基部の損傷が過大に評価されることに起因するものと推察される。

5. まとめ

本論文は、RCアーチ構造の衝撃応答解析手法の開発を目的として、RCアーチ構造に関する衝撃実験およびその再現解析を実施し、実験結果と解析結果を比較することで、ここで提案した解析手法に対する精度の検証を行ったものである。結果をまとめると、以下のようなものである。

- 1) 重錘衝撃力に関しては、最大値が若干過小評価となるものの、数値解析結果は実験結果をよく再現しており、大略評価可能である。

- 2) 載荷点変位に関しては、最大値は良好な精度で評価可能である。しかしながら、残留変位成分は1.5倍程度の過大評価となる。
- 3) ひび割れ性状に関しては、載荷点近傍およびアーチ部については良好に再現可能である。しかしながら、基部および側壁部に関する解析結果は損傷を過大に評価している。
- 4) 変形状において、解析結果は最大応答値に関しては実験結果をよく再現している。しかしながら、残留成分に関しては全体的に過大評価となっている。
- 5) これらの結果の差異は、主に側壁部および基部の損傷評価の差異に起因して発生しているものと考えられる。また、その差異はフーチング基部全面に課した固定条件によるものと推察される。

今後は、これらの問題点について検討を重ね、より精度を高めた解析手法を構築し、RCアーチ構造の耐衝撃設計手法の構築に寄与して行く所存である。

謝辞：本論文をまとめるに当たり、室蘭工業大学大学院建設システム工学専攻構造力学研究室の千葉知子さんに多大なるご支援を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 川瀬良司, 岸 徳光, 牛渡祐二, 鈴木健太郎: 三層緩衝構造で補強したトンネル坑口部の落石衝撃挙動に関する数値解析的検討, 第7回 構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, 2004.11
- 2) 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
- 3) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 安藤智啓: 静載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
- 4) 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梁の単一載荷衝撃実験, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1809-1818, 2000.3
- 5) 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, 2006.6
- 6) John O.Hallquist: LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2000.6.

(2006年9月11日受付)