

重錘落下衝撃荷重を受ける小型 RC 製アーチ梁の 主鉄筋のモデル化に関する数値解析的検討

A numerical study on reber modeling of small scale RC arch type beams under falling-weight impact loading

室蘭工業大学	フェロー	岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
(独) 寒地土木研究所	正会員	今野 久志 (Hisashi Konno)
(独) 寒地土木研究所	正会員	岡田 慎哉 (Shinya Okada)
(株) 構研エンジニアリング	正会員	川瀬 良司 (Ryoji Kawase)
室蘭工業大学	○学生会員	千葉 知子 (Tomoko Chiba)

1. はじめに

我が国では、道路交通網が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の多くは斜面を背負っているものの、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。そのため、これら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。従って、落石対策の施されていないトンネル坑口部の落石に対する耐衝撃性や限界衝撃耐力評価や合理的な緩衝構造の設置に関する検討を行うことは、災害に強い道路交通網を確立するために欠くことのできない重要な課題である。また、この種の検討を確実に実施するためには、未知の部分も多いことより実験的方法に基づいて行なうべきであると判断される。しかしながら、このようなアーチ形式の場合には、精度の高い試験体の製作が容易でないこと、また静載荷実験の場合においても載荷装置の設置を含めそれほど容易ではない。従って、精度の高い実験を実施してその結果を下に数値解析法を確立し、各種の検討を行うことがより合理的であるものと判断される。

このような観点から、本研究ではRC製アーチ構造の重錘落下衝撃荷重載荷時の挙動解析に関する数値解析手法の確立を目的に、小型RC製アーチ梁模型（以後、アーチ梁）に関する重錘落下衝撃実験を実施し、この実験を対象として提案の三次元弾塑性衝撃応答解析方法に関する妥当

性の検討を行った。衝撃荷重載荷実験は、帯鉄筋の有無に着目した2試験体に関して、アーチ梁の頂部に所定の衝突速度で重錘を衝突させる重錘落下方式により実施した。衝撃応答解析は、本実験を再現する形で実施した。アーチ梁のモデル化に関しては、固体要素を用いることを基本とし、特に軸方向鉄筋のモデル化において、(1)2節点梁要素を用いる場合と(2)8節点固体要素を用いる場合を取り上げ、数値解析結果を実験結果と比較することにより、軸方向鉄筋に関するモデル化の妥当性の検討を行った。本検討では、各種応答波形（重錘衝撃力、載荷点応答変位、アーチ部45度水平変位、側壁部水平変位）、およびひび割れ分布性状に着目して行うこととした。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-DYNA¹⁾を用いている。

2. 数値解析概要

2.1 試験体概要および解析ケース

図-1には、帯鉄筋を有する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程度の大きさとしている。すなわち、アーチ部材の断面寸法は200×200mmの正方形断面とし、アーチ部の内半径は1,000mm、側壁部の高さは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を用い、芯かぶりを40mmとしている。帯鉄筋を配筋する場合にはD6を用い、有効高さの1/2である80mm間隔で配筋している。また、アーチ基部の挙動が適切に把握できるようにするため、トンネル断面方向3,000mm、トンネル軸方向600mm、高さ方向400mmのフーチングを設けている。フーチング部には、断面方向鉄

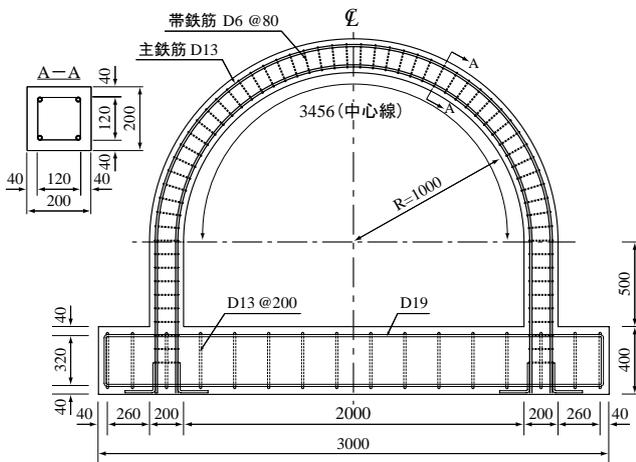


図-1 形状寸法および配筋状況（帯鉄筋：有）

表-1 解析ケース一覧

解析ケース名	帯鉄筋の有無	軸方向鉄筋要素	重錘衝突速度 (m/s)
N3-B	無	梁要素	3.0
N4-B	無		4.0
Y5-B	有		5.0
Y6-B			6.0
Y7-B		7.0	
N3-S	無	固体要素	3.0
N4-S	無		4.0
Y5-S	有		5.0
Y6-S			6.0
Y7-S			7.0

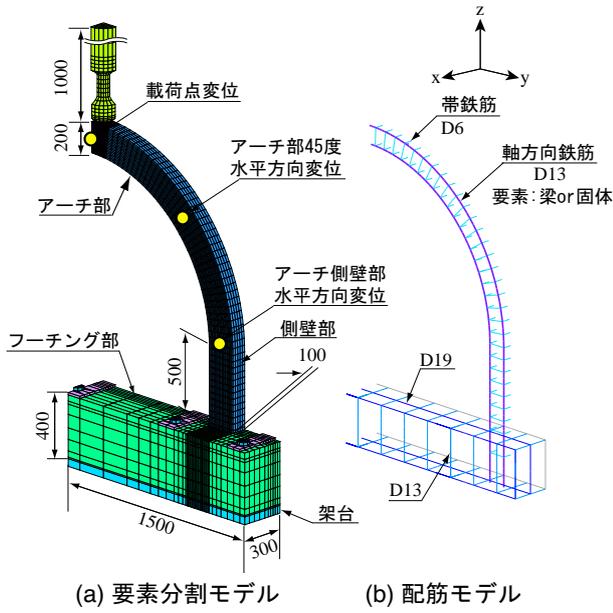


図-2 要素分割モデルおよび配筋モデル

筋にD19, 帯鉄筋にはD13を配筋している。

表-1には、本実験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, Y:有)および重錘衝突速度(m/s)を、第二項目は軸方向鉄筋要素の種類(B:梁要素, S:固体要素)を示している。重錘落下衝突位置はアーチ頂部中央に限定し、衝突位置に配置した重錘に自由落下による初速度($V = 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0$ m/s)を与え載荷している。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アーチ梁の要素分割状況、変位測定点および配筋モデルを示している。

解析モデルは、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、架台底面を完全固定、コンクリート-重錘間、フーチング-架台間、フーチング固定用ボルト穴-ボルト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-鉄筋要素間は、完全付着を仮定している。

アーチ部の要素分割に関しては、軸方向に関しては帯鉄筋の配筋間隔の1/2である40 mm、断面高さ方向には10 mm、断面幅方向には20 mm、として分割している。また、衝突位置近傍においては精度よくひび割れを再現するために軸方向の要素を前述の1/3(約13 mm)としている。各要素に関しては、コンクリート、重錘には8節点の固体要素、帯鉄筋およびフーチング内鉄筋要素には梁要素を用いてモデル化している。また、前述のように軸方向鉄筋モデルに関しては(1)梁要素を用いる場合と、(2)8節点固体要素を用いる場合について検討を行っている。積分点は、1点積分を基本とし、軸方向鉄筋については梁要素の場合で4点積分、固体要素の場合で8点積分としている。各解析ケースの総節点数、総要素数は、軸方向鉄筋に梁要素を用いる場合には総節点数が14,651、帯鉄筋の有無で総要素数がそれぞれ11,532、12,072である。また、軸方向鉄筋に固体要

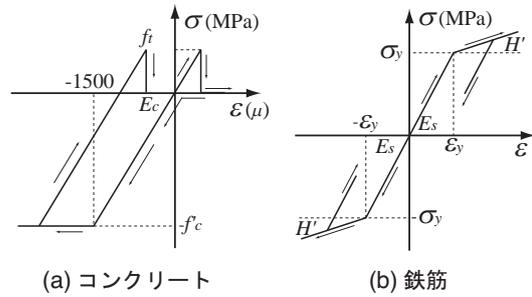


図-3 各材料の応力-ひずみ関係

表-2 設定した各コンクリート要素の強度一覧

解析ケース名	圧縮強度 f'_c (MPa)	引張強度 f_t (MPa)		
		軸方向要素長		
		35mm	40mm	13mm
N3	29.28	2.928	2.773	4.804
Y5				
N4	27.12	2.712	2.536	4.449
Y6				
Y7				

表-3 解析に用いた物性値一覧

材料	密度 ρ (ton/m ³)	弾性係数 E (GPa)	ポアソン比 ν
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

素を用いる場合には総節点数が16,420、総要素数が帯鉄筋の有無でそれぞれ13,013、13,673となっている。減衰定数は、質量比例分のみを考慮するものとし、既往の研究²⁾と同様に、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。

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¹⁾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を適用している。圧縮側に関しては、相当ひずみが1,500 μ 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、圧縮試験による圧縮強度 f'_c を圧縮側の降伏応力とし、引張側の引張強度 f_t に関しては、一要素に一個の曲げひび割れが発生するものと仮定し、軸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コンクリート要素によって仮定の引張強度を設定することとした。本研究では、直線のRC梁に関する過去の数値解析結果を参考に、軸方向の基

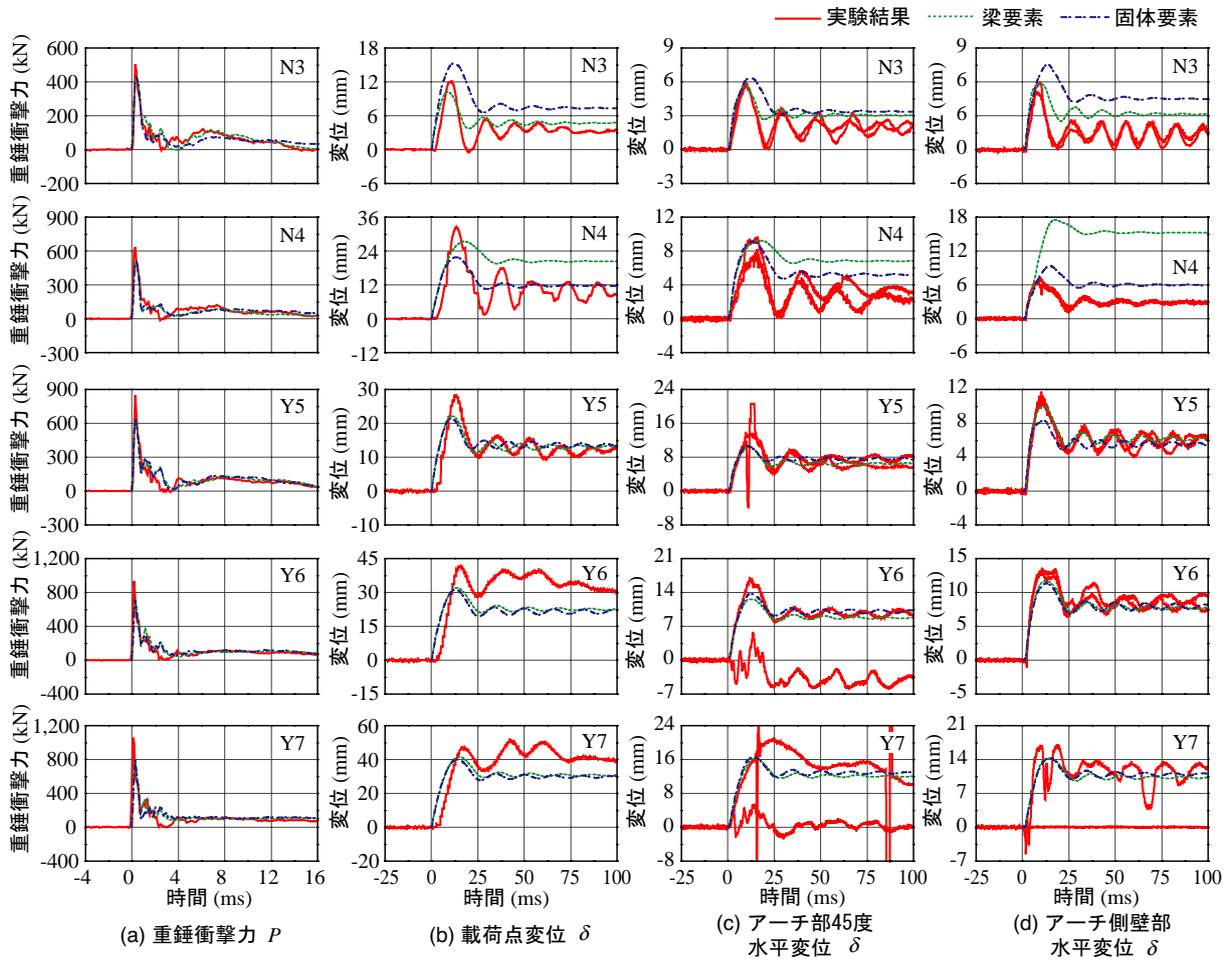


図-4 各種応答波形分布

準要素長を 35 mm と設定した。表-2 には設定した各コンクリート要素の引張強度一覧を示している。なお、降伏の判定には Drucker-Prager の降伏条件式を採用している。また、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 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。軸方向鉄筋、帯鉄筋の降伏応力 σ_y は材料試験結果を用いることとし、それぞれ $\sigma_y = 383 \text{ MPa}$ 、 335 MPa とした。また、表-3 には本解析で用いた各材料定数を示している。なお、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。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-3 の物性値を用い、弾性体として解析を行っている。

3. 実験結果と数値解析結果の比較

3.1 各種応答波形

図-4 には、各種応答波形を実験ケースごとに比較して示している。図中、実線は対称点の実測結果を示しており、破線、一点鎖線はそれぞれ軸方向鉄筋を梁要素、固体要素でモデル化した場合の解析結果である。図より、Y6、Y7 試験体のアーチ部 45 度の位置における水平変位に関する実験結果の応答波形に若干乱れがあることが分かる。これ

は衝突速度が大きいことにより、アーチ梁が衝撃初期に非対称に厳しく損傷を受けたことによる影響が顕在化したためと考えられる。なお、各波形とも正載荷時の値を正として整理している。

図-4(a)より、重錘衝撃力応答波形は衝突速度、帯鉄筋の有無にかかわらず、衝突直後の周期が短く振幅の大きい第一波と周期が長く振幅の小さい第二波で構成されており、梁要素、固体要素共にこれらの波形性状をよく再現していることが分かる。最大値に関しては若干過小評価となるものの大略再現可能であるものと判断できる。

図-4(b)~(d)において、帯鉄筋の無い N3 試験体に関する比較より、載荷点変位に関しては、梁要素を用いる場合が固体要素を用いる場合に比べ最大値、残留変位ともに実験値に近い値を示している。45 度水平変位に関しては、共に最大値はほぼ再現できているものの、残留変位に関しては、共に大きな値を示している。側壁部水平変位に関しては、固体要素を用いる場合が梁要素を用いる場合に比べ大きな値となっている、これは後述するひび割れ発生状況が影響しているものと考えられる。

N4 試験体において、載荷点変位の最大値に関しては、梁要素を用いる場合が実験値により近似しているが、残留変位に関しては固体要素を用いる場合がより対応した結果を示している。45 度水平変位は共に最大値は等しいが、残留変位は共に実験結果より大きな値を示している。側壁部の水平変位に関しては、梁要素を用いる場合に実験結果と比較して非常に大きな値を示している。これは後述するひ

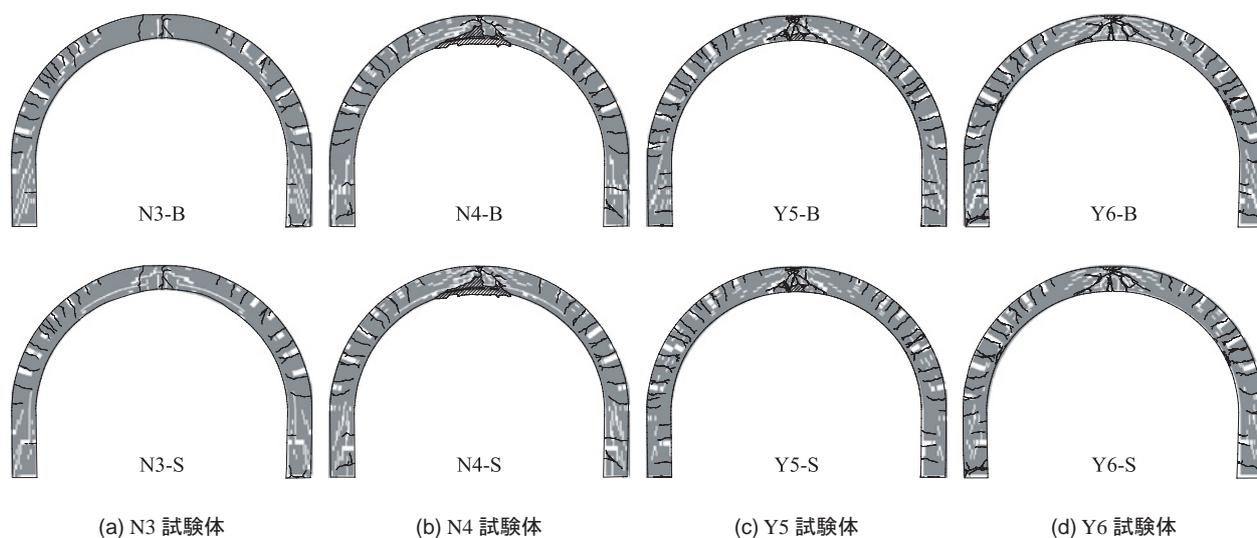


図-5 ひび割れ分布図

び割れ分布が大きく影響しているものと考えられる。

帯鉄筋を有する Y 試験体の場合には、梁要素、固体要素を用いる場合共に類似の分布を示しており、実験結果の 45 度水平変位、側壁部水平変位は最大値および残留変位を大略再現できている。しかしながら、荷点変位に関しては、全体的に過小評価となっている。

3.2 ひび割れ分布性状

図-5(a)~(d)には、N3, N4, Y5, Y6 試験体に関するひび割れ分布図に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 $-0.001 \sim 0.001$ MPa の範囲）は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して評価することが可能である。

図-5(a)より、N3 試験体の梁要素を用いる場合は、荷点部に貫通ひび割れの発生が確認でき、ひび割れ性状が再現できているものと考えられる。また、固体要素を用いる場合には荷点と側壁部においてせん断ひび割れの発生が確認できる。この側壁部のせん断ひび割れの発生によって図-4 に示される応答変位波形が全体的に大きく評価されたものと推察される。

図-5(b)より、N4 試験体の実験結果では、荷点の裏面部が剥離していることが確認できる。一方、数値解析結果では側壁部のせん断ひび割れが顕在化して示されている。これは、実験結果の場合には荷点部近傍の損傷が著しいことにより、衝突エネルギーがその領域で大きく吸収され、側壁部の損傷が軽微なものとなる。一方、数値解析結果の場合には、裏面剥離によるエネルギー吸収を適切に評価できないために、側壁部まで大きなエネルギーが伝播することとなり、結果として側壁部のせん断破壊が顕在化したものと推察される。

図-5(c), (d)より、帯鉄筋の有する Y 試験体については梁要素、固体要素を用いる場合は共に荷点部近傍にせん断ひび割れが発生しており、アーチ部においても曲げひび割れが発生している。以上より、せん断補強筋を配筋する場合には、側壁部のせん断ひび割れを過大に評価する傾向にあるものの軸方向鉄筋を梁要素あるいは固体要素でモデル化する場合共に大略実験結果を再現可能であるものと

推察される。

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、この種の構造物に関する数値解析法の確立に向けた検討を行った。本研究では、破壊エネルギー等価の考え方を適用して軸方向の要素長に対応したコンクリート要素の仮想引張強度を設定し、かつ実験結果と比較することにより軸方向鉄筋の要素に梁要素と固体要素を適用した場合の妥当性に関する検討を行った。本研究結果から得られた事項を整理すると、

- (1) 帯鉄筋のある場合は、梁要素、固体要素を用いる場合共に荷点変位は過小評価となるものの変形性状、ひび割れ分布共に概ね実験を再現可能である。
- (2) 帯鉄筋を配筋しない場合で、荷点部の剥離が生じない場合には梁要素を用いることにより精度よく再現できる。しかしながら、入力エネルギーが大きく、解析において荷点部に裏面剥離が生ずる場合や側壁部のせん断ひび割れが過大に評価される場合には、45 度点や側壁部水平変位は実験値と比較して過大に評価される。
- (3) 軸方向鉄筋に対して梁要素を用いる場合と固体要素を用いる場合では精度的に大差無い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
- 3) 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