# 破壊エネルギー等価の概念を用いた RC 製アーチ構造の 衝撃応答解析への適用性検討

An applicability of impact responce analysis for RC arch structures by using equivalent fracture energy concept

	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)
	室蘭工業大学大学院	○ 学生会員	千葉 知子	(Tomoko Chiba)

#### 1. はじめに

我が国における土木構造物に関する設計法は,許容応力 度設計法から限界状態設計法を経て,性能照査型設計法に 移行しつつある.このような状況下において,著者らは, 重錘落下実験を基に小型 RC 梁を対象とした三次元弾塑性 衝撃応答解析<sup>1)</sup>を試み,その適用性に関する検討を行って きた.また,小型 RC 梁に関する解析手法を踏襲した場合 の実規模 RC 桁への適用性<sup>2)</sup>に関する検討も行っている. さらに,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<sup>3)</sup>している.

本研究では、落石衝撃力を受ける実物トンネル坑口部の 要求性能を照査可能な数値解析手法の確立を目的として、 破壊エネルギー等価の概念を導入した三次元弾塑性衝撃応 答解析の RC 製アーチ構造への適用性およびアーチ構造へ の軸方向要素長の影響について検討を行った。検討方法 は、小型 RC 製アーチ版模型(以降アーチ版)を対象に破壊 エネルギー等価の概念を導入した場合の数値解析結果と実 験結果を比較することにより行った。検討項目は、重錘衝 撃力、アーチ部載荷点変位、アーチ版のひび割れの発生状 況に着目して行うこととした。なお、弾塑性衝撃応答解析



図-1 形状寸法および配筋状況

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)<sup>4)</sup>を用いている.

# 2. 数值解析概要

#### 2.1 解析対象試験体概要

図-1には、本解析の対象としたアーチ版試験体の形状 寸法, 配筋状況および変位測定位置を示している. アーチ 版の断面形状は、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 × 800 mmの長方形断面とし、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.アーチ部主鉄筋には, 実トンネルと同程度の主鉄筋比となるように D13 を用い て 120 mm 間隔で配筋し、芯かぶりを 40 mm としている. 配力筋には D6 を用い、主鉄筋量の 1/3 以上となるように 断面中心線において 80 mm 間隔で配筋している.フーチ ング形状は、トンネル断面方向長さ 3,000 mm、トンネル軸 方向幅 800 mm, 高さ 250 mm とする矩形体とし, 鋼製のア ングルを埋設している.なお、フーチング下面には厚さ9 mmの鋼板を配置している。本研究では、載荷径が60mm である 300 kg 重錘を衝突速度 6 m/s で一度だけ落下させた 場合の実験結果を対象に検討を行うこととした. 表-1 に は、材料試験結果より得られた各材料の物性値一覧を示し ている.

#### 2.2 数値解析モデルおよび解析条件

図-2(a)には、本数値解析における解析モデルの一例を示している。解析モデルは、構造および荷重条件の対称性を考慮して 1/4 モデルとし、面対称を設定している。境界条件は実験と同様に、架台底面を完全固定とした。また、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。なお、コンク リート-鉄筋要素間は、完全付着としている。

アーチ部の要素分割に関しては、図-2(b)のようにアー

表-1 物性值一覧

	密度	弾性係数	ポマリンド	圧縮強度
材料	ρ	Ε	v	/ 降伏強度
	$(ton/m^3)$	(GPa)		(MPa)
コンクリート	2.35	23.5	0.167	20.59
SS345(D13)	7.85	206	0.3	398
SD295(D6)	7.85	206	0.3	338



図-2 解析モデルおよび分割位置

解析ケーフタ	軸方向要素長		<b>紛筋占粉</b>	公西妻粉	
<b>唐田7 八百</b>	A (mm)	B (mm)	C (mm)	加口口口不安人	心女术奴
SSS-N/Gf	20	20	20	76,351	71,932
SSM-Gf			40	71,059	67,036
SSL-Gf			80	66,633	64,996
SMM-Gf		40	40	61,798	58,468
SML-Gf			80	59,152	56,020
SLL-Gf		80	80	54,301	51,532

表-2 解析ケース一覧

チクラウン部より 45 度の範囲を A 範囲, A 範囲以外の アーチ部を B 範囲,側壁部を C 範囲と領域を区分けし,各 領域において軸方向要素長を変化させることにより数値解 析を行うこととした.

各要素において,鉄筋要素には梁要素を適用し4点積分 を、コンクリート要素,重錘要素、フーチング要素には三 次元固体要素を適用し1点積分として解析を行うこととし た.質量に比例する粘性減衰定数は、予備解析を実施して 試験体の最低次固有振動数を求め、それに対して0.5%を 設定している.

### 2.3 解析ケース一覧

**表**-2には、本数値解析で実施した解析ケース一覧および各解析ケースの総節点数、総要素数を示している。解析ケース名は各領域における要素長の程度を意味する英文字を用いて表している。すなわち、S:short element を意味し、要素長を20mmとする場合、M:medium elementを意味し、要素長を40mmとする場合、L:long elementを意味し、要素長を80mmとする場合である。また、-Nは破壊エネルギー等価の概念を適用しない場合、-Gfは破壊エネルギー等価の概念を適用し換算引張強度を用いる場合である。なお、A領域に関しては重錘径との関係やひび割れが他の範囲より多く発生することが推察されることより、解析の安定性を考慮し軸方向要素長を20mmで統一することとした。

## 2.4 材料物性モデル

図-3(a)には、コンクリートに関する等価1軸応力-ひ



## 図-3 各材料の応力-ひずみ関係

#### 表-3 換算引張強度一覧

下滤油审	引張強度 f <sub>t</sub> (MPa)	換算引張強度 (MPa)		
工相强反 f <sup>/</sup> (MD <sub>a</sub> )		軸方向要素長		
$f_c(\mathbf{WIF}a)$		20mm	40mm	80mm
20.6	2.06	2.72	1.93	1.36

ずみ特性を示している. コンクリート要素は, 圧縮側に対 しては折線近似による相当応力-相当ひずみ関係を仮定 し,相当ひずみが 1,500 μ に達した状態でコンクリートが 降伏するものとし,完全弾塑性体のバイリニア型にモデル 化した.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.

本研究では、圧縮試験による圧縮強度 fc を圧縮側の降 伏応力とし、引張側の引張強度 ft に関しては、-Nの場合 には、引張強度は既往の研究<sup>1)</sup>の場合と同様に圧縮強度 の1/10と仮定している.-Gf の場合には、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、破壊エネルギー等価の概念を適用して コンクリートの軸方向要素長に対応して仮想の換算引張強 度を設定することとした。降伏の判定には Drucker-Prager の降伏条件式を採用している.



図-4 SSS に関する Gf の有無による各応答波形の比較図



図-5 SSS に関するひび割れ分布の比較

なお,換算引張強度 fti の算定式は次式のように示される

$$f_{ti} = f_{t0} \sqrt{\frac{y_0}{y_i}} \tag{1}$$

ここで、*f<sub>t0</sub>* はコンクリートの引張強度、*f<sub>ti</sub>* は換算引張強度, *y*<sub>0</sub> は基準となる1要素の軸方向要素長であり、本研究では、小型 RC 梁に関する過去の数値解析結果を参考<sup>1)</sup> に、軸方向の基準要素長を35 mmと設定した. *y<sub>i</sub>* は解析モデルの1要素の軸方向要素長を示している. **表**-3 には、設定した各コンクリート要素の軸方向要素長の換算引張強度を示している.

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。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 Es の1%と仮 定している。なお、フーチング内部の鉄筋に関しては、応 答最大応力が実験において弾性範囲内であるものと推察さ れるため、弾性体として解析を行っている。なお、本数値 解析に用いた物性値は実験値と同一としている。

## 3. 実験結果と数値解析結果の比較検討

## 3.1 Gf 考慮の有無による応答波形の比較

図-4には,解析ケースSSSに関する重錘衝撃力波形と, 載荷点変位波形の数値解析結果と実験結果を比較して示し ている.図中,重錘衝撃力波形は衝突初期の40 ms間につ いて、載荷点変位波形は 100 ms 間での時間に関して示している.

図-4(a)より,重錘衝撃力波形に関しては Gf 考慮の有 無に関わらず実験結果と大略類似した波形分布を示してい る.一方,図-4(b)の変位波形を見ると,-Nの場合には 最大応答値は実験結果より1.4 倍程度大きい値を示してい る.ただし,除荷後の自由振動状態における振動周期は実 験結果と概ね一致していることが分かる.しかしながら, 残留変位に関しては実験結果よりも2倍以上大きな値を示 している.これより,-Nの場合には,実験結果と比較し て,数値解析結果の損傷が過大に評価されるものと推察さ れる.-Gf 考慮の場合には,最大応答変位や除荷後の自由 振動状態における振動周期ともに,実験結果と大略一致し ていることが分かる.また,残留変位に関しても実験結果 を精度良く再現していることが分かる.

## 3.2 ひび割れ分布性状

図-5には、実験終了後のひび割れ分布図に載荷点最大 変位時におけるアーチ部の第一主応力分布図を重ねて示し 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-0.001~0.001 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.

図より,アーチ部側面および裏面のひび割れ分布につい て比較すると Gf 考慮の有無による明確な違いは確認でき ない.載荷点断面における Gf 考慮の有無によるひび割れ



図-6 Gfを考慮した場合の各応答波形

分布の比較を行うと,-Nの場合には重錘衝突位置直下か ら局所的なひび割れが発生している.一方,Gf考慮の場 合には広範囲に斜めひび割れが発生しているものの-Nに 比べひび割れの発生は少ない.本実験では,押し抜きせん 断破壊は発生していないことより,-Nの場合には,載荷 点部の剛性が過小に評価されたため,ひび割れによる損傷 の程度も大きくなったものと推察される.

以上より,アーチ構造においても破壊エネルギー等価の 概念を適用した場合において実験結果をより精度良く再現 可能であり,換算引張強度算定法は有効であることが明ら かになった.

# 3.3 軸方向要素長のアーチ構造への影響

図-6には、要素長を変化させた場合において破壊エネ ルギー等価の概念を適用した場合の各解析ケースの各応答 波形を示している. 図-6(a)には, 重錘衝撃力波形を示し ている. 波形より、軸方向要素長による重錘衝撃力への影 響は小さく、いずれのケースにおいても実験結果を精度良 く再現している. 図-6(b), (c) には, 載荷点変位波形を 示している。(b)図では、C領域の軸方向要素長のみが異 なる場合の3ケース(SSS, SSM, SSL)を示している.(c) 図には、B領域の軸方向要素長の異なる場合の波形を示し ている.(b)図より、C領域の要素長が大きい場合におい ても、実験結果とよく対応した値を示しており、Gfを考 慮することによって C 領域の軸方向要素長による影響は 小さいことが分かる.(c)図より,B領域の軸方向要素長 の影響に関しては、最大変位発生時まではいずれのケース においても実験結果を再現可能であることが分かった.し かし,残留変位に関しては軸方向要素長を大きく設定した SLL の場合において、Gf 考慮の場合においても解析精度 が低下する傾向がみられる。また、 SLL 以外の解析ケー スに関しては実験結果とよく対応している.これは, B領 域においても要素長が大きい場合には形状上の誤差が解析 結果に影響を与えることを暗示している.これより, B領 域においてもアーチ形状上の誤差を解決する程度の分割数 が必要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 製アーチ版模型の三次元弾塑性応 答解析を対象に、破壊エネルギー等価の概念を用いた換算 引張強度算定法のアーチ構造への適用性およびアーチ構造 への軸方向要素長の影響を検討した。検討結果を整理す ると、

- アーチ構造においても破壊エネルギー等価の概念を用いた換算引張強度算定法は有効である。
- (2) アーチ構造形式において破壊エネルギー等価の概念 を適用し、かつアーチ部の軸方向要素長を適度に要素 分割することにより、実験結果を精度良く再現可能で ある。

# 参考文献

- 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
- 2) 岸 徳光, A.Q.Bhatti, 今野久志, 岡田慎哉: 重錘落下衝 撃荷重載荷時の大型 RC 桁に関する衝撃応答解析法の 適用性検討, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.1261-1272, 2006.3
- 第 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
- John O.Hallguist : LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation,2000.6