

(7) 小型 RC 製アーチスラブ模型の弾塑性衝撃応答解析

A numerical analysis on elasto-plastic impact response of arch-shape RC miniature slab

牛渡 裕二*, 川瀬 良司**, 吉井 康訓*, 岡田 慎哉***, 岸 徳光****

Yuji Ushiwatari, Ryoji Kawase, Yasunori yoshii, Shin-ya Okada, Norimitsu Kishi

*構研エンジニアリング 防災施設部 (〒065-8510 札幌市東区北 18 条東 17 丁目 1-1)

**博 (工) 構研エンジニアリング 取締役 (〒065-8510 札幌市東区北 18 条東 17 丁目 1-1)

***修 (工) 室蘭工業大学大学院 博士後期課程 建設工学専攻 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

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

Key Words : arch-shape RC structure , three-dimensional analysis on elasto-plastic impact response ,
fracture energy equivalence , performance-based design

キーワード : RC 製アーチ構造, 三次元弾塑性衝撃応答解析, 破壊エネルギー等価, 性能照査型設計

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、耐衝撃設計においても性能照査型設計法を確立するための検討が土木学会において行われている。その中で、数値解析的検討は、衝撃実験の補間や照査方法の確立に向けて重要な位置づけとなっており、解析結果の精度向上が望まれている。

著者らは、重錘落下衝撃実験を基に小型 RC 梁を対象とした三次元弾塑性衝撃応答解析¹⁾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²⁾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、換算引張強度を用いる手法を提案³⁾している。その結果、実験結果を精度良く評価可能であることを明らかにしている。

本研究では、落石による衝撃荷重載荷時の実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、コンクリート要素に関する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法の適用性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と導入しな

い場合の数値解析結果を実験結果と比較することにより行った。検討項目は、重錘衝撃力、アーチ部内縁変位、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)⁴⁾を用いている。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1には、本解析で対象としたアーチ版試験体の形状寸法および配筋状況を示している。試験体の断面形状は、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、アーチの版厚を200 mm、アーチ部の内半径を1,000 mm、側壁部の高さを500 mmとしている。本研究では、実トンネル坑口部に近似させるために版構造にすることとし、その幅は、実験室の吊り上げ能力の限界重量となる800 mmとした。

試験体の配筋状況は、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120 mm間隔で配筋し、芯かぶりを40 mmとしている。また、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、可能なかぎりアーチ基部の固定条件が保持されるように、トンネル断面方向長さを3,000 mm、トンネル軸方向幅を800 mm、高さを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。

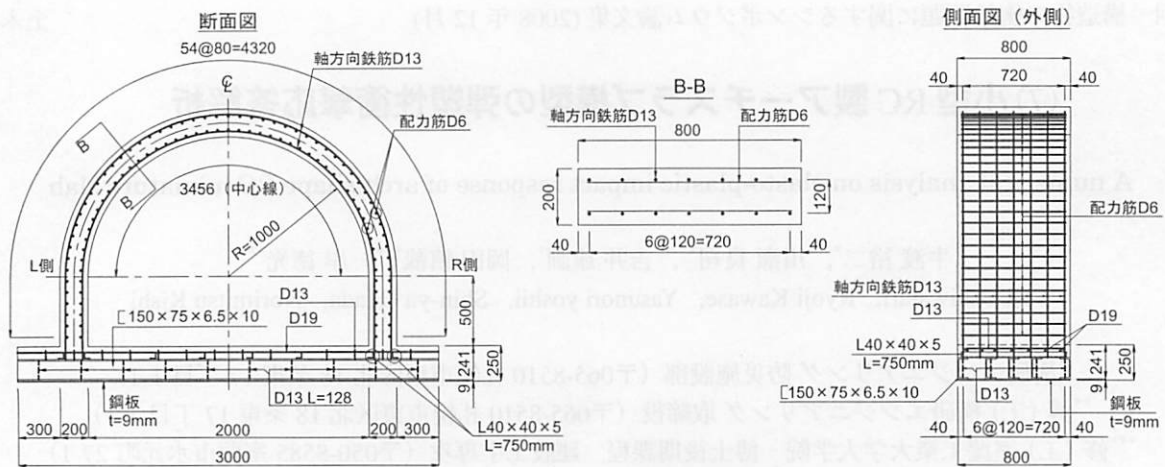


図-1 形状寸法および配筋状況

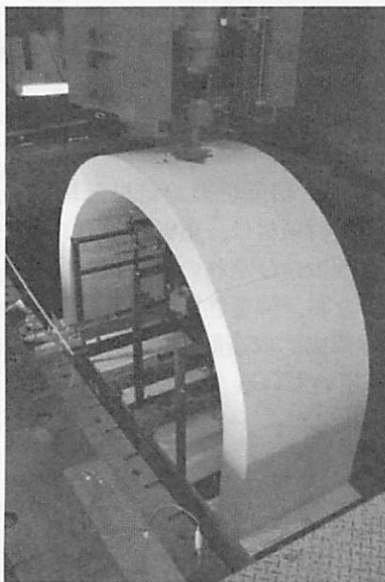


写真-1 衝撃実験状況

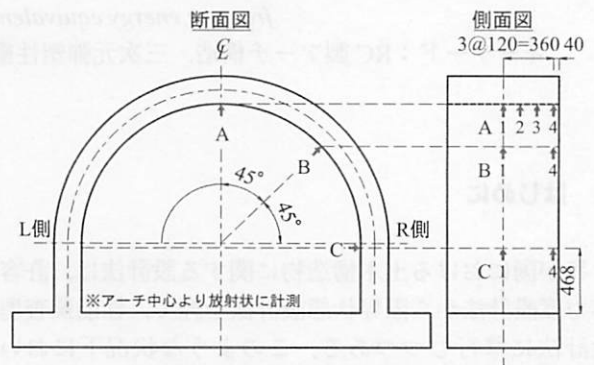


図-2 変位計測位置

2.2 衝撃実験の概要

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を用いてフーチング部を固定し、アーチクラウン中央位置に所定の高さから質量300 kgの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、衝突速度の検定試験を実施の後、設定衝突速度に対応する高さから落下させることとした。重錘形状は、実構造である版構造を想定して重錘載荷径の影響が自由辺まで波及しないようにするために、直径60 mmの鋼製円柱を採用することとした。その底部には、衝突時の片当たりを防止するために2 mmのテーパが施されている。衝撃荷重載荷方法に関しては、数値解析結果との比較を容易にするために、所定の衝突速度で一度だけ載荷する単一載荷方法を採用することとした。本研究では、同一試験体で第1回目の衝突速度を1.0 m/sとし、その後1.0 m/s毎に

衝突速度を漸増させる繰り返し載荷を行い、試験体が損傷しコンクリート片が落下した時点もしくは明瞭な押し抜きせん断破壊が生じた時点を終局状態と定義して最終衝突速度を決定し、その衝突速度 $V=6$ 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。

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とレーザ式変位計によるアーチ内縁変位とした。図-2には、レーザ式変位計位置を示している。アーチ内縁変位は、断面方向には載荷点中央部、アーチ中心頂部から45度および90度(アーチ基部近傍)の3列を計測している。幅方向には、載荷点に関する対称性を考慮し片側のみに配置することとした。具体的には、頂部においては載荷点(対称断面)から端部までを均等に4箇所、他は対称断面と端部の2箇所とした。また、変位の計測方向は、全てアーチ内縁の法線方向とし、試験体に直接ターゲットを接着し計測している。

重錘衝撃力測定用ロードセルの容量と応答周波数はそれぞれ1,470 kN, DC~4.0 kHzであり、レーザ式変位計の容量と応答周波数は500 mm, 約1 kHzである。

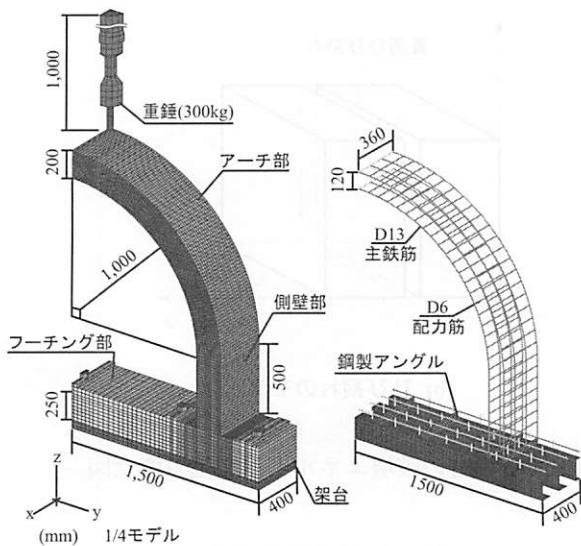


図-3 数値解析モデル

また、実験時の各種応答波形は、サンプリングタイム 0.1 ms とし、デジタルレコーダにて一括収録を行っている。

衝撃荷重載荷実験終了後には、アーチ側面部および内縁面に発生したひび割れをスケッチし、ひび割れ分布図を作成している。

3. 数値解析概要

3.1 数値解析モデル、解析条件および解析ケース

図-3には、本数値解析における解析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1/4モデルとし、面对称を設定している。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、周方向要素長を配力筋間隔 80 mm の1/4間隔である 20 mm とし、幅方向には解析の安定性を考慮し要素形状を正方形とするために軸方向と同様に 20 mm とした。また、版厚方向の要素分割長は、ひび割れの進展を精度良く再現するために 10 mm にすることとした。

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、重錘要素には三次元固体要素を適用し1点積分を行い、解析を行うこととした。減衰に関しては、質量に比例する粘性減衰項のみを考慮することとし、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。

解析ケースは、コンクリート要素の破壊エネルギー

表-1 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	圧縮強度 / 降伏強度 (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

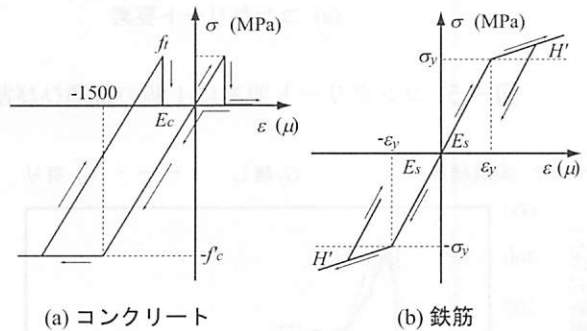


図-4 各材料の応力-ひずみ関係

等価 (G_f) の概念を適用しない場合を「 G_f 無し」、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を「 G_f 有り」の2ケースとしている。

3.2 材料物性モデルおよび解析ケース

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。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。また、図-4には、各材料の応力-ひずみ関係を示している。

図-4(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、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、完全弾塑性体のパイリニア型にモデル化した。降伏の判定には Drucker-Prager の降伏条件式を採用している。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。

図-4(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 E_s 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、実験において応答最大応力が弾性範囲内であるものと推察されるため、損傷は生じないものとして弾性体として解析を行っている。

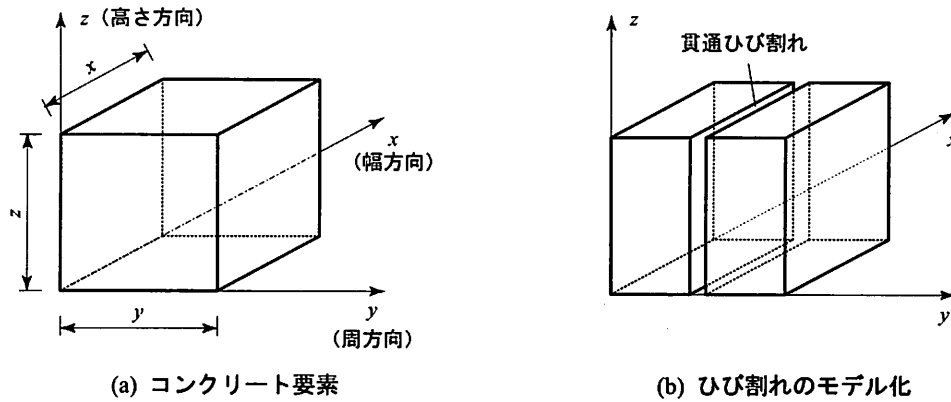


図-5 コンクリート要素に1個の貫通ひび割れが発生する場合の破壊エネルギー等価の概念図

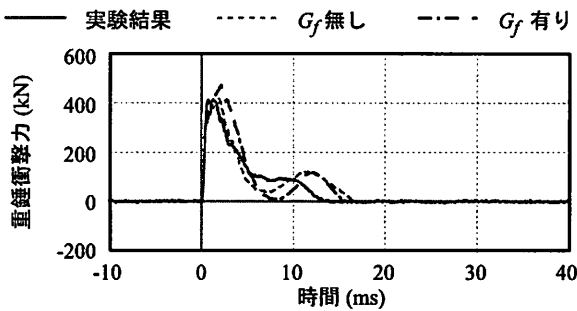


図-6 重錘衝撃力波形

表-2 換算引張強度一覧

解析ケース	圧縮強度 f'_c (MPa)	引張強度または換算引張強度 f_t (MPa)
G_f 無し	20.6	2.06
G_f 有り	20.6	2.72

エネルギーでひび割れの発生が考慮できるようにするため、破壊エネルギー等価の概念を適用してコンクリートの周方向要素長に対応した仮定の換算引張強度を設定することとした。

なお、周方向要素長が y_i である要素の換算引張強度 f_{ti} は次式のように算定される。すなわち、

$$f_{ti} = f_{i0} \sqrt{\frac{y_0}{y_i}}$$

ここで、 f_{i0} はコンクリートの基準引張強度、 y_0 は基準となる要素の軸方向要素長である。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¹⁾に、軸方向の基準要素長を 35 mm と設定した。表-2には、解析ケース毎に設定したコンクリート要素の圧縮強度と引張強度または換算引張強度を比較して示している。なお、本解析では、前述のように周方向の要素長を基準要素長よりも小さい 20 mm とし、ひび割れ分布も精度よく解析することとしている。

5. 実験結果と数値解析結果の比較検討

5.1 重錘衝撃力波形の比較

図-6には、重錘衝撃力波形を衝突初期の 40 ms 間について数値解析結果と実験結果を比較して示している。

図より、波形性状に着目すると、数値解析結果は G_f の有無に関わらず第1波と第2波の卓越した波から構成されているが、実験結果は第1波と第2波が連続し

4. コンクリート要素の引張破壊モデル

4.1 破壊エネルギー等価の概念

コンクリート要素の具体的な引張破壊モデルについて述べる。RC 構造を対象とした衝撃応答解析を前提に考えると、幅方向へのひび割れの発生より、断面方向へのひび割れの分散分布を現実に即して評価可能にすることが肝要である。これより、本論文では、図-5(a)に示されるようなコンクリート要素において、図-5(b)に示されるように幅方向と高さ方向(版厚方向)に貫通する1個のひび割れが発生する状況を想定し、そのひび割れが周方向の要素長にかかわらず同一の引張破壊エネルギーのもとに発生すると仮定した。また、そのエネルギーは要素のひずみエネルギーを用いて評価するものとする。本研究では離散ひび割れを仮定していないことより、数値解析的には要素のひずみエネルギーが引張破壊のレベルに達すると、要素に分散ひび割れが発生し引張力が伝達されない状態に至ることは勿論である。

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、 G_f 無しの場合には、既往の研究¹⁾の場合と同様に圧縮強度の 1/10 と仮定している。 G_f 有りの場合には、一要素に一個の曲げひび割れが発生するものと仮定し、周方向要素長が異なる場合においても等しいひずみエ

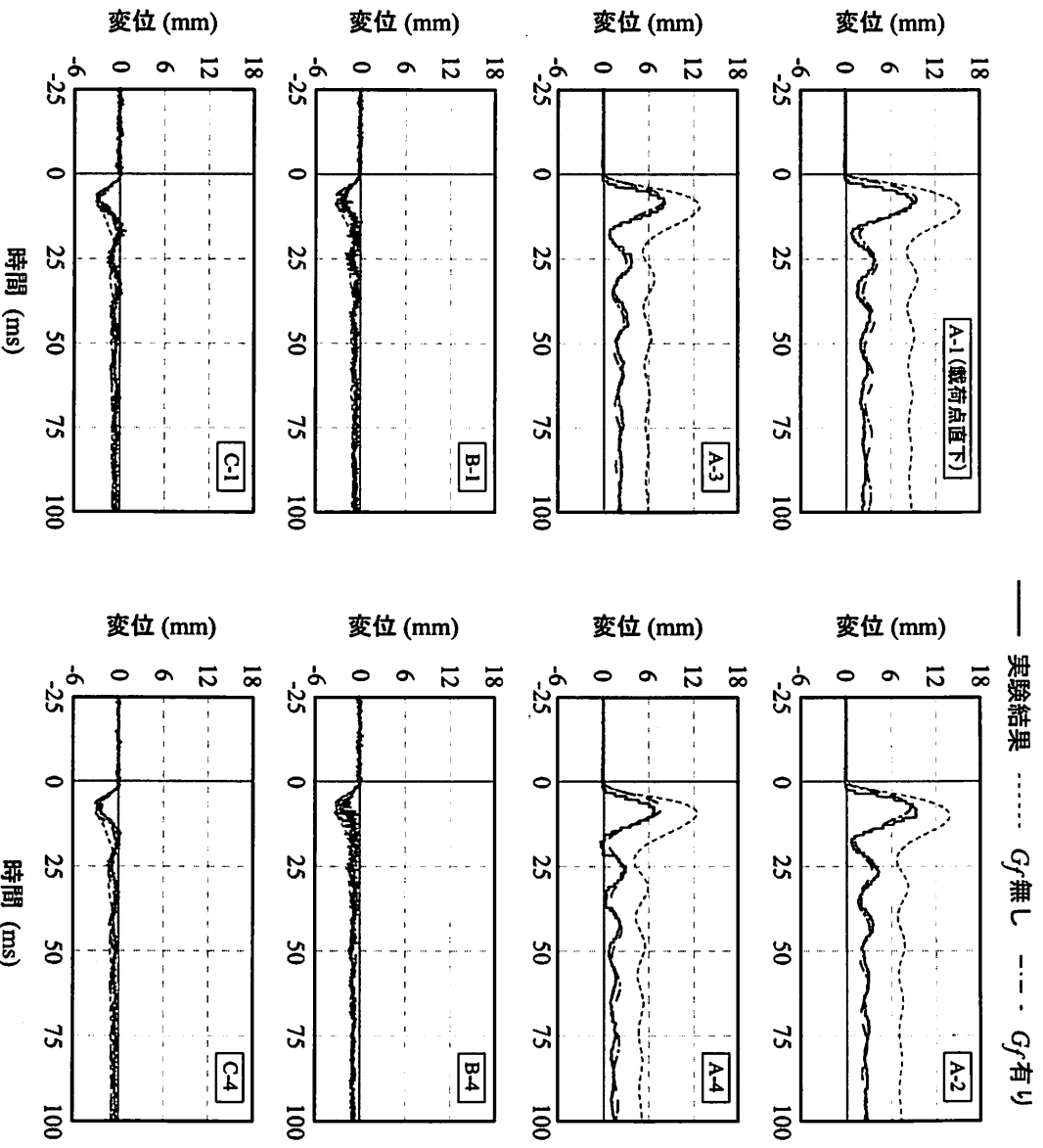


図-7 各点の変位波形

た波形を示し第2波のピークが消失している。このことは、実験では、重錘衝突点近傍の損傷が顕在化することにより、載荷点部の復元力が著しく低下しているのに対し、数値解析では局部的な損傷まで再現されないことによるものと考えられる。しかしながら、数値解析結果は G_f 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ことが分かる。また、最大重錘衝撃力に着目すると、実験結果と G_f 無しの場合において同等の値を示し、 G_f 有りの場合には実験結果や G_f 無しの場合に比較して1割程度大きい。これは、 G_f を用いることにより、換算引張強度が若干増加することによるものと推察される。

5.2 変位波形の比較

図-7には、各点のブーチ内縁の変位波形を衝突初期の100ms間について数値解析結果と実験結果を比較して示している。変位の方向は、内縁方向がプラス、外縁方向がマイナスとなるように整理している。載荷点のA-1～A-4の変位波形に着目すると、実験

結果と G_f 有りの場合には、最大値と除荷後の自由振動状態における振幅・周期および残留変位が良く一致している。一方、 G_f 無しの場合には、実験結果と比較して、最大値で1.4倍～1.8倍程度大きい値を示している。また、除荷後の自由振動状態においても、残留変位が2倍～3倍程度大きい。このことは、 G_f 有りの場合にはコンクリートの要素のひび割れ発生強度が適切に評価されているのに対して、 G_f 無しの場合には、それが若干小さく評価されていることによるものと推察される。また、載荷点から自由端に向かって最大変位や残留変位が僅かに減少する傾向を示している。これは、幅方向に版効果が出現していることによるものと推察される。

B-1, B-4とC-1, C-4の変位波形に着目すると、実験結果と G_f 有り/無しの場合ともに最大値と除荷後の自由振動状態における振幅・周期および残留変位が良く一致している。これは、載荷点近傍に比べ損傷が小さくひび割れが少ないことによるものと判断される。

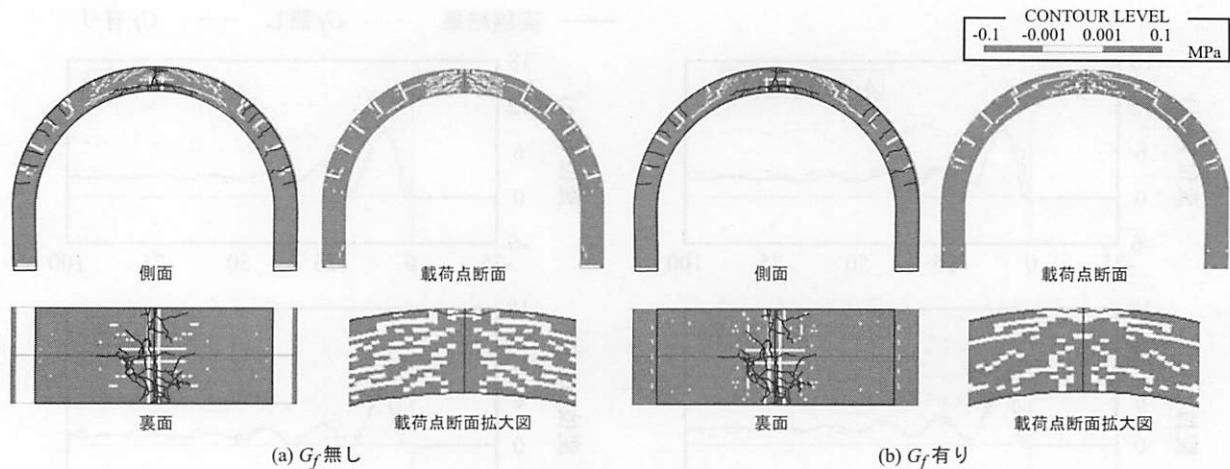


図-8 ひび割れ分布の比較

5.3 ひび割れ分布性状

図-8には、黒実線に示した実験終了後のひび割れ分布図と、ひび割れの発生が明瞭に示されると考えられる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、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、最大応答時点において大きな応力が出現する領域ではひび割れが発生しているものとして評価可能である。

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、数値解析結果と実験結果を比較すると、 G_f 無しの場合には実験結果に比べて載荷点部の局所的なひび割れや載荷点近傍からの斜めひび割れがより多く発生している。また、載荷点断面において、 G_f の有無によるひび割れ分布の比較を行うと、 G_f 有り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 G_f 無しの場合に比べひび割れの発生は少ない。本実験結果からは、押し抜きせん断面が形成される傾向は示しているものの、破壊には至っていないことが明らかになっている。これより、 G_f 無しの場合にはコンクリート要素の引張強度が過小に評価されるため、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。これらのことから、破壊エネルギー等価の概念は、押し抜きせん断ひび割れが発生する場合に対しても、ある程度適用可能であるものと推察される。

6. 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衝撃応答解析を対象に、破壊エネルギー等価の概念を導入した RC 製アーチ構造への適用性について検討を行った。破壊エネルギー等価の概念を導入すること

による結果を整理すると、

- (1) 重錘衝撃力に関しては、波形性状は実験結果を精度良く再現可能であるが、最大値に僅かながら差異が生ずる。
- (2) 変位波形に関しては、最大値と除荷後の自由振動状態における振幅・周期および残留変位は、実験結果を精度良く再現可能である。
- (3) 押し抜きせん断ひび割れが発生する場合に対してもある程度適用可能である。

以上のことから、RC 製アーチ構造の衝撃応答解析において、提案の破壊エネルギー等価の概念を導入した有限要素法による三次元弾塑性応答解析法は、実験結果に照らして妥当であり、工学的に有用であることが明らかになった。

参考文献

- 1) 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
- 3) 岸 徳光, A.Q.Bhatti, 三上 浩, 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) John O.Hallquist: LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2000.6

(2008年11月7日受付)