

# 論文 アルカリ骨材反応を受けたコンクリート柱の劣化予測

松島 学<sup>\*1</sup>・三浦 良輔<sup>\*2</sup>・中川 裕之<sup>\*3</sup>・横田 優<sup>\*4</sup>

**要旨:** アルカリ骨材反応によるコンクリート構造物の劣化は、近年大きな社会的問題として注目を浴びている。アルカリ骨材反応に起因する鉄筋の破断事例も報告されており、コンクリート構造物の耐荷力性能低下は軽視できない。本研究は、実務的な数値解析モデルを用いて、アルカリ骨材反応により損傷を受けた鉄筋コンクリート橋脚の数値シミュレーションを3次元有限要素解析により行った。数値解析と現場計測との比較を行った結果、実構造物に近い挙動が再現できた。

**キーワード:** アルカリ骨材反応, 有限要素, 等価ひび割れ要素, 鉄筋応力

## 1. はじめに

アルカリ骨材反応によるコンクリート構造物の劣化について様々な数値解析の研究が行われている。眞野<sup>1)</sup>は、スターラップの曲げ加工部のひび割れ損傷に着目し、2次元弾塑性有限要素法を用いアルカリ骨材反応による鉄筋損傷メカニズムの検討を行った。田中<sup>2)</sup>は、メゾレベルの2次元有限要素解析を行い、鉄筋隅角部における変形とひずみの検討を行った。両者とも、鉄筋破断のメカニズムを分析する点では有用性があるが、全コンクリート要素を膨張させているため、現実の挙動を表現していると判断しづらい。山城<sup>3)</sup>らは、コンクリートをモルタルと骨材、これらの境界より構成される複合材料とし、デジタル画像の基本単位であるボクセルを利用したイメージベースモデリングと有限要素法を融合した3次元ボクセル有限要素法を用い、アルカリ骨材反応に対する鉄筋拘束の効果を検討している。しかし、実構造物の解析を行う場合、要素数が膨大になり一般的なコンピュータによる解析には不向きと考えられる。

著者<sup>4)</sup>は、今までにも提案する数値解析モデルを用いて体積膨張に対する拘束力のない橋台の3次元数値解析を行い、有効性を明らかにしている。本論文は、提案する数値解析モデルを用い、アルカリ骨材反応による損傷を受けた実在する鉄筋コンクリート橋脚のひび割れ性状を再現し、鉄筋の応力状態の把握を目的としている。

## 2. 解析モデル

### 2.1 等価ひび割れ要素

提案する数値解析モデルで最も独創的かつ新規的な面は等価ひび割れ要素である。等価ひび割れ要素は、要素数の減少と解析時間の短縮、一般的なコンピュータで

の解析を可能にする実務で使用可能な解析要素である。

アルカリ骨材反応は、粗骨材に生成されたアルカリシリカゲルの吸水膨張に起因した内部応力が生じ、微視的なひび割れが発生する。反応が進行すると、微視的なひび割れが内部欠陥や粗骨材の配置等の影響を受け進展し、コンクリート構造物表面に巨視的なひび割れが発生する。本研究では、ランダムに配置されたコンクリートの中の骨材が、アルカリ骨材反応により全て膨張するモデルを考えた<sup>4)</sup>。コンクリート表面に発生するひび割れは、粗骨材の間隔よりもはるかに大きな間隔をもって形成される。そこで、各々のアルカリシリカゲルの膨張による微視的なひび割れというマイクロな挙動ではなく、アルカリシリカゲルの膨張により発生する微視的なひび割れを含むコンクリート領域というマクロな挙動に着目した。マクロレベルで見たコンクリートは変形の局所化が起こっていると考え、コンクリートを膨張する要素(膨張要素)と膨張しない要素(非膨張要素)に分けることで変形の局所化を表現し、アルカリ骨材反応によるひび割れ性状の再現を試みた。ひび割れを発生させる応力状態は巨視的に見ると、圧縮領域と引張領域が混在した状態であると仮定し、等価ひび割れ要素の膨張要素に熱ひずみを与えることで解析モデル内部に巨視的な応力状態を形成させ変形の局所化を表現し、アルカリ骨材反応による膨張現象を模擬している。膨張要素はコンクリートの不均一性を考慮し乱数を用いて配置した。

### 2.2 引張側におけるコンクリートの構成則

引張側におけるコンクリートの構成則は、図-1に示すひずみ軟化モデルを用いた。この構成則は、ひび割れの発生に伴いひずみ軟化挙動を呈する。引張強度  $f_t$  の応力度に至るまでは弾性的な挙動をし、引張強度に達した

\*1 香川大学 工学部安全システム建設工学科教授 (正会員)

\*2 香川大学大学院 工学研究科安全システム建設工学専攻

\*3 (株) 四国総合研究所土木技術部 (正会員)

後、引張応力が引張強度の $\alpha_c$ 倍（本研究では既往の実験結果を参考<sup>4)</sup>に $\alpha_c=0.6$ とした）まで急激に低下する。図に示すように、その後は引張ひび割れひずみ $\epsilon_{cr}$ の6倍の引張ひずみが生じる時に引張応力が0となる軟化勾配 $R_t$ で低下する。各要素において最大引張応力を求め、その応力が引張強度に達した場合、最大主応力方向に対して垂直な方向にひび割れが入る。この場合、ひび割れの入った方向に対して垂直な方向にのみ軟化が生じ、他の2方向については軟化しない。異方性材料として取り扱った。

### 2.3 解析モデルに用いるコンクリートの弾性係数

アルカリ骨材反応の内部膨張圧によるコンクリートの挙動は、反応により静弾性係数が低下すること、時間経過を伴うことからクリープ的な挙動に近いと考えられる。本解析モデルではその挙動はクリープが支配的と考え、コンクリートの弾性係数を文献<sup>6)</sup>を参考に式(1)を用いて低減した。

$$E_c = \frac{E_0}{1 + \varphi} \quad (1)$$

ここで、 $E_0$ ：クリープを考慮しないコンクリートの弾性係数、 $\varphi$ ：低減係数（本研究ではコンクリート標準示方書<sup>5)</sup>を参考に $\varphi=2.5$ とする）である。

### 2.4 解析モデルの膨張ひずみ

本解析モデルでは膨張要素に膨張ひずみを与えることでアルカリ骨材反応の膨張現象を表現することから、温度による熱ひずみを膨張要素に発生する膨張ひずみと等価とみなした。本解析モデルは、粗骨材の周囲に生成されたアルカリシリカゲルの吸水膨張現象がコンクリートの応力状態に与える影響について、膨張要素を用いて模擬する。そのため、全要素における膨張要素の割合をコンクリート全体積に占める粗骨材の割合とした。膨張要素と非膨張要素の配置は粗骨材の配置の不均一性を考慮し、乱数を用いて配置を決定した。等価ひび割れ要素を用いた解析モデル例を図-2(a)に示す。アルカリ骨材反応の膨張には、鉄筋等による内部拘束や周辺境界条件による強い膨張異方性を考慮しなければならず、等方的な膨張ひずみモデルを用いた数値解析では、鉄筋の影響をひび割れの発生に反映できないという報告<sup>5)</sup>もある。提案する等価ひび割れ要素も一つ一つの膨張要素の挙動は等方的であるが、非膨張要素の存在により、図-2(b)に示すように構造物全体で考慮した場合、巨視的な圧縮領域と引張領域が発生し、異方的な挙動を呈する。等価ひび割れ要素は、アルカリシリカゲルの吸水膨張といったミクロの膨張挙動等の微視的な観点からモデル化したものではない。したがって、微視的な破

壊から変形の局所化といったミクロ挙動を検討するためのものではなく、アルカリ骨材反応の膨張現象に伴う構造物全体に発生するマクロな応力状態を再現する解析モデルである。

## 3. 数値解析モデルの実構造物への適用

### 3.1 対象構造物

解析対象の構造物は、昭和55年に建設されアルカリ骨材反応による損傷を受けた鉄筋コンクリート造の橋脚Aである。橋脚Aが建設された当時、アルカリ骨材反応による認識は薄く、コンクリート用粗骨材に反応性骨材の一種である安山岩が使用されている。橋脚Aの概観を写真-1に示す。本解析の比較では、ひび割れ評価が容易

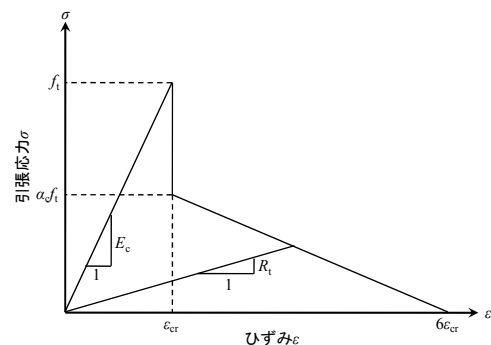
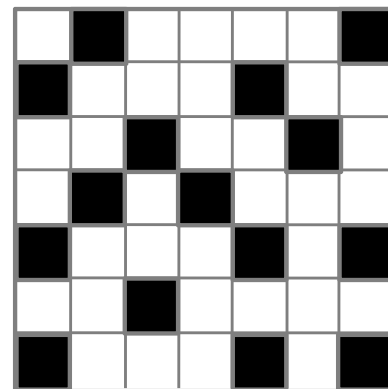
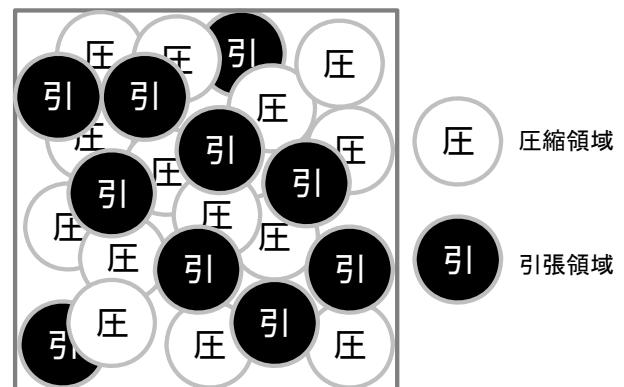


図-1 ひずみ軟化モデル



(a) 等価ひび割れ要素



(b) 巨視的な応力状態

図-2 解析モデルの概念

な橋脚平面部を評価対象とし、橋脚曲面部は評価対象外とした。写真-1の点線で囲まれた箇所がひび割れ評価箇所である。その箇所のひび割れスケッチを図-3に示す。ひび割れスケッチ上の点線はひび割れ幅0.2mm未満、実線はひび割れ幅0.2mm以上～1.0mm未満、太い実線はひび割れ幅1.0mm以上～3.0mm未満を示す。橋脚Aはアルカリ骨材反応の体積膨張に対する拘束力を持つため、軸方向に沿ったひび割れが卓越し、それに伴い亀甲状のひび割れが発生している。橋脚Aの寸法は、幅5600mm、高さ7700mm、奥行2000mmである。

### 3.2 材料特性の設定

アルカリ骨材反応による膨張量は、含水率に相関がある。外気に触れ乾燥しやすいコンクリート表面では膨張率は小さく、外気に触れないコンクリート内部では膨張率は大きい。既往の研究<sup>6)</sup>より、コンクリート表面からの距離とその位置における含水率は図-4(a)に示す関係がある。本研究は、コンクリートの膨張率が含水率の関数であることから、コンクリート表面からの距離と膨張要素に与える膨張ひずみの関係を図-4(b)のように簡易的にモデル化した。解析モデルは、コンクリート表面の要素を外部膨張要素、コンクリート内部の要素を内部膨張要素と定義し、図-4(b)の膨張率モデルから、外部膨張要素の膨張率は内部膨張要素の1/10とした。橋脚Aの地中部は、土中から水の供給を受けると考え全ての膨張要素を内部膨張要素とした。

コンクリートの材料特性を表-1に示す。建設当初の材料試験に関するデータはないため、建設後10年の調査結果で得られた圧縮強度から文献<sup>7)</sup>を参考に引張強度、弾性係数を算出した。弾性係数は式(1)を用いて低減し、クリープ係数 $\phi$ は既往の文献<sup>8)</sup>と設計で使用される最も大きい値<sup>9)</sup>である2.5を採用した。

### 3.3 解析モデルの設定

橋脚Aのコンクリート部材はひび割れを表現できる六面体ソリッド要素を用いた。その寸法は、今までの著者



写真-1 橋脚Aの概観

らの研究<sup>4)</sup>から10cmが最も適当であることが求められている。本研究でも10cmを基本とし、ソリッド要素のメッシュを作成した。鉄筋部材は軸力のみが作用するトラス要素を用いた。配筋は、設計図を基に配置した。膨張要素の割合は、一般的なコンクリートの全体積に占める粗骨材率40%を用いた。膨張要素は粗骨材の不均一性を考慮し、乱数を用いて三次元的にランダムに配置し、

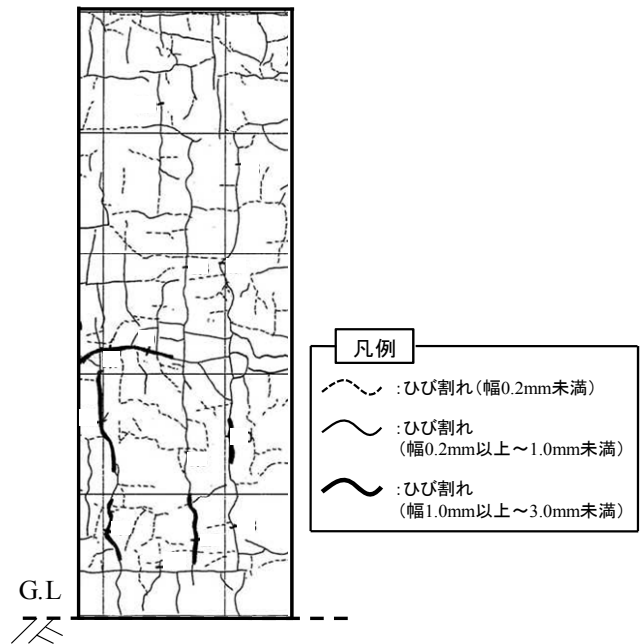


図-3 ひび割れスケッチ

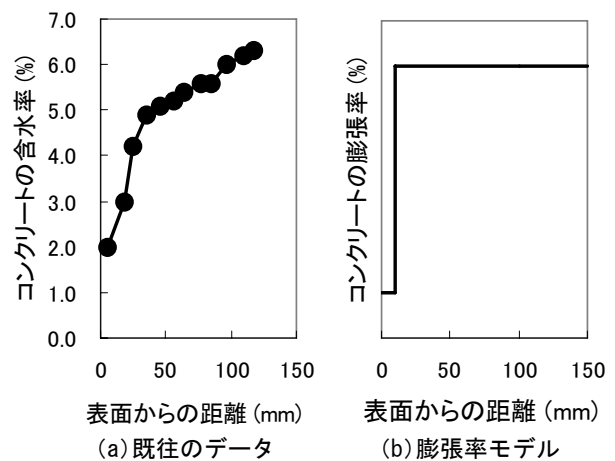


図-4 コンクリートの含水率と膨張率

表-1 コンクリートの材料特性

項目	設定値
低減前の弾性係数 $E_0$ (N/mm <sup>2</sup> )	$2.77 \times 10^4$
低減後の弾性係数 $E_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$7.91 \times 10^3$
引張強度 $f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	2.19
引張ひび割れひずみ $\epsilon_{cr}$	$2.77 \times 10^{-4}$
圧縮強度 $f_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$2.94 \times 10^1$

それら全てが膨張するものとした。膨張要素を配置した3次元解析モデルを図-5に示す。青が外部膨張要素、赤が内部膨張要素、白が非膨張要素である。地上部の膨張要素は、コンクリート表面から主筋までのかぶり10cmを外部膨張要素でモデル化している。橋脚Aは左右対称の構造物であるため、拘束条件を用いて1/4にモデル化した。分割した面は鉛直成分を自由とし、他の2つの成分を拘束した。橋脚の底面は、3方向を拘束した。解析モデルの寸法は、幅2800mm、高さ7700mm、奥行1000mmである。

### 3.4 荷重条件の設定

膨張ひずみは、モルタルパー法で有害とされる $1000\mu$ を基準とし、 $4000\mu$ まで $225\mu$ 刻みで増加させ解析を行った。また、実現象の荷重条件を再現するため、数値解析モデルに橋台と主桁の自重を考慮した。

## 4. 解析結果

### 4.1 ひび割れモード

#### (1) コンクリート表面におけるひび割れ

外観より評価可能な地上部におけるコンクリート表面面を対象とし、橋脚平面部を構成している要素に発生

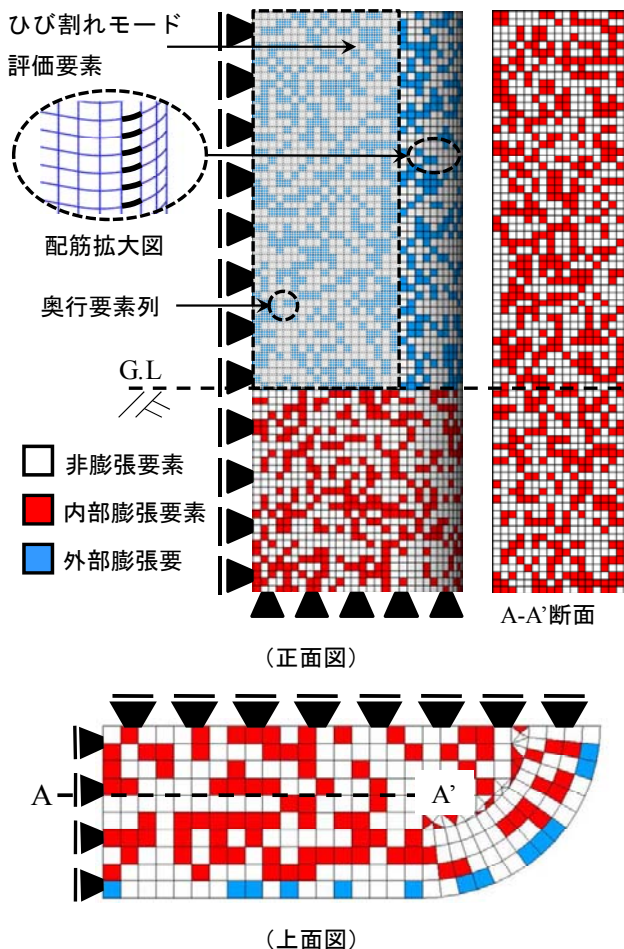


図-5 橋脚Aの数値解析モデル

したひび割れモードの比較を行った。橋脚平面部を構成している要素は、図-5(正面図)において点線で囲まれた要素である。膨張ひずみを $225\mu$ 毎増加させた数値解析結果と現場計測の比較を行った。この膨張ひずみは、内部膨張要素個々の膨張ひずみであり、解析モデル全体の膨張ひずみではない。ひび割れモードの変化を示すため、膨張ひずみ $1000\mu$ 時を図-6(a)、膨張ひずみ $2000\mu$

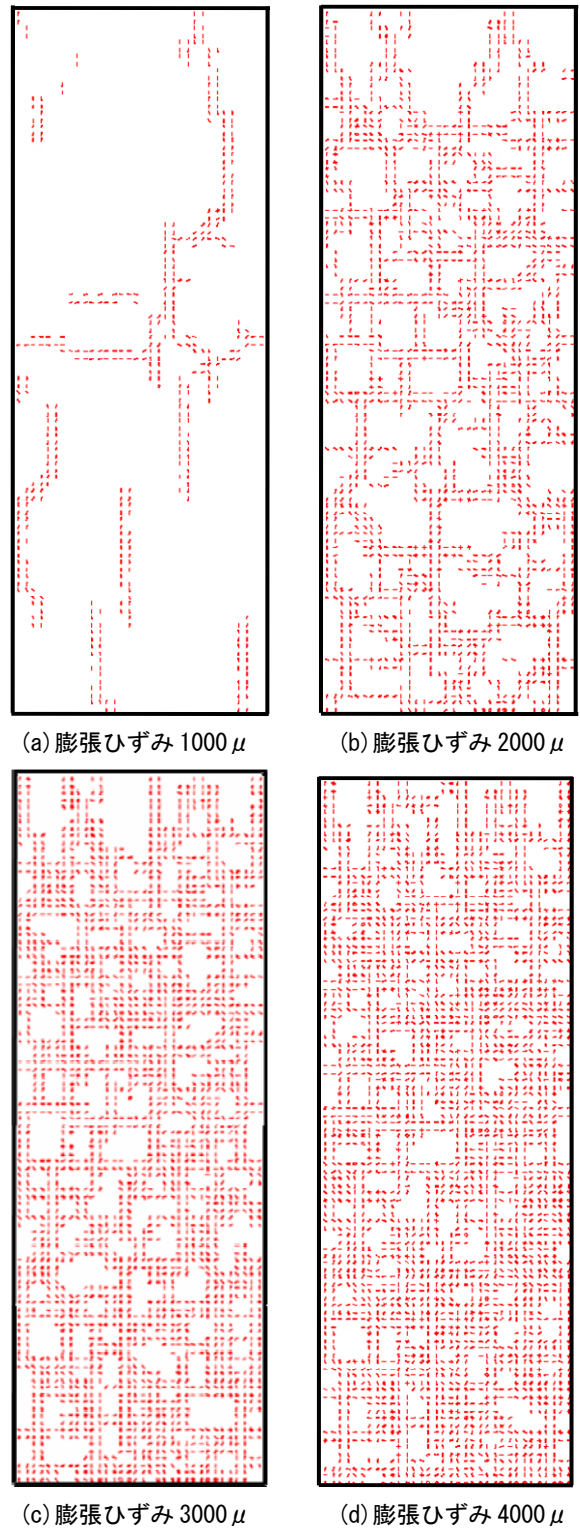


図-6 ひび割れ図



時を図-6 (b), 膨張ひずみ 3000 $\mu$  時を図-6 (c), 膨張ひずみ 4000 $\mu$  時を図-6 (d)に示す。膨張ひずみ 1000 $\mu$  時は、主筋の拘束方向に沿ったひび割れが発生している。膨張ひずみ 2000 $\mu$  時は、拘束方向に沿ったひび割れが卓越し、それに伴い亀甲状のひび割れが発生している。膨張ひずみを 3000 $\mu$  及び 4000 $\mu$  まで増加させると、ひび割れが著しく発生し亀甲状の間隔は非常に狭く現場計測とは異なる。

現場計測を最も再現した膨張ひずみを評価するため、本研究ではひび割れ密度を用いた。ひび割れ密度は、式(2)により定義した。

$$D_{cr} = \frac{\sum L}{A} \quad (2)$$

ここで、 $D_{cr}$  : ひび割れ密度、 $\sum L$  : 単位面積当たりの総ひび割れ長、 $A$  : 単位面積である。数値解析より得られたひび割れモードが、現場計測をある程度再現した膨張ひずみ 1500 $\mu$ ~2500 $\mu$ でのひび割れ密度を比較した結果を図-7に示す。縦軸はひび割れ密度 $D_{cr}$ , 横軸はアルカリ骨材反応の膨張ひずみ $\epsilon_e$ である。膨張ひずみ 2000 $\mu$  時、最も現場計測に近いひび割れ密度を再現した。

### (2) 奥行直交方向に発生するひび割れ

アルカリ骨材反応による損傷を受けたコンクリート構造物の内部は、コンクリート表面から奥行直交方向に引張ひび割れが発生する。本解析結果より得られた奥行直交方向のひび割れを図-8に示す。同図に示した要素列は、通常のコンクリートコアの採取方法と同様に、コンクリート表面側から奥行方向に採取したものである。要素に発生したひび割れは、コンクリート表面側から奥行方向に対して平行であれば真円、コンクリート表面側から奥行方向に対して垂直であれば直線である。コンクリート表面側に比べてコンクリート内部のひび割れ間隔は

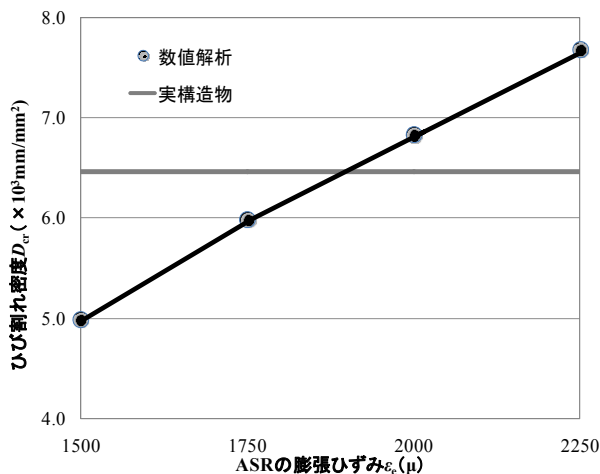


図-7 ひび割れ密度の比較

大きいことがわかる。膨張に対する拘束力は、内部の方が支配的であることがその理由である。既往の研究<sup>4)</sup>で表面側に比べてコンクリート内部のひび割れ間隔は大きいことがわかる。膨張に対する拘束力は、内部の方も、実構造物でアルカリ骨材反の膨張により引張ひび割れが発生し、本解析と同様な傾向を持つことが比較できる。

### 4.2 ひび割れ幅の比較

本研究は、数値解析より得られる全ひずみ $\epsilon_{all}$ から弾性ひずみ $\epsilon_e$ を減じたひび割れひずみ $\epsilon_{cr}$ を用いてひび割れ幅 $w_{cr}$ を式(3)により定義する。

$$w_{cr} = \epsilon_{cr} \cdot l_{cr} = (\epsilon_{all} - \epsilon_e) \cdot l_{cr} \quad (3)$$

ここで、 $l_{cr}$  : ひび割れ幅に影響を与える有効長さである。

アルカリ骨材反応の体積膨張に対する拘束力がある場合、主筋の拘束方向のひび割れが支配的となる。そこで、主筋の拘束方向のひび割れ間隔を有効長さとして定義し、橋脚Aの軸方向間隔から $l_{cr}=300\text{mm}$ とした。ひび割れ性状が最も現場計測を再現した膨張ひずみ 2000 $\mu$ 時を対象にひび割れ幅の比較を図-9に示す。縦軸は各ひび割れ幅数を総ひび割れ幅数で除した無次元量 $N/\sum N$ , 横軸は各ひび割れ幅 $w_{cr}$ である。ひび割れ幅は、0.2~1.2mmに関して比較した。0.2mmを除くひび割れ幅の小さい0.7mm以下の分布は、精度良く現場計測と一致している。一方、ひび割れ幅の大きい0.8mm以上の分布は現場計測と大差がある。0.2mm以下の小さなひび割れ幅は現場で

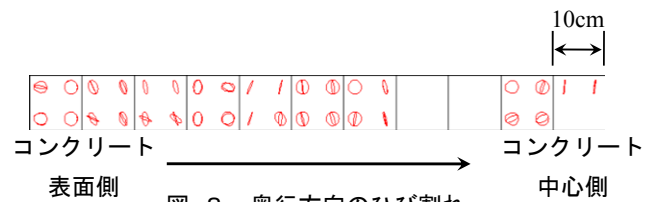


図-8 奥行方向のひび割れ

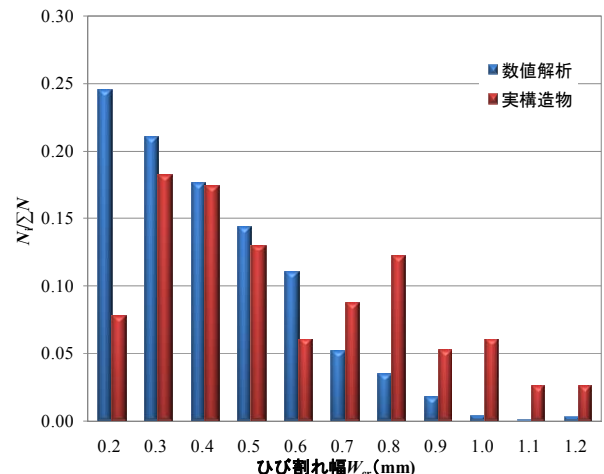


図-9 ひび割れ分布の比較

は正確に評価できないこと、0.8mm以上の大きなひび割れは、ひび割れ開口に伴い環境条件の影響因子が影響し乾燥収縮、中性化等の二次被害を受けひび割れ幅が進展する可能性があるためと考えられる。本数値解析モデルはひび割れ開口に伴う境界条件の変化を導入していないため、結果に影響したと考えられる。

### 4.3 鉄筋の応力状態

数値解析が橋脚Aの損傷状況を再現していると考え、鉄筋部材をモデル化したトラス要素を取り出し、発生した応力をひずみにより検討した。せん断補強筋に着目し、図-5に示す橋脚A配筋の円筒形部中心要素（配筋拡大図参照）を対象とした。結果を図-10に示す。縦軸はトラス要素に発生した鉄筋ひずみ $\epsilon_s$ 、横軸はアルカリ骨材反応の膨張ひずみ $\epsilon_a$ である。トラス要素は各要素が独立し連続体ではないため、注目したトラス要素に発生した平均ひずみにより整理を行った。現在の橋脚Aの損傷状況を再現している膨張ひずみ2000 $\mu$ 時の鉄筋ひずみは600 $\mu$ 程度であり、降伏に至っていない。膨張ひずみを4000 $\mu$ まで増加させても1200 $\mu$ 程度であるが、地震荷重を考慮すると構造物の安全性が懸念される。

## 5. まとめ

アルカリ骨材反応を模擬する簡易的な数値解析モデルを提案し、鉄筋拘束を受ける橋脚の数値解析を行った。結果より得られた知見を以下に述べる。

- (1) コンクリートを膨張する要素（膨張要素）と膨張しない要素（非膨張要素）の2つの要素アルカリ骨材反応の体積膨張を模擬する等価ひび割れ要素を提案した。
- (2) コンクリートの膨張率が含水率の関数であることから、コンクリートの表面からの距離と膨張要素に与える膨張ひずみの関係を示す簡易的モデルを提案した。

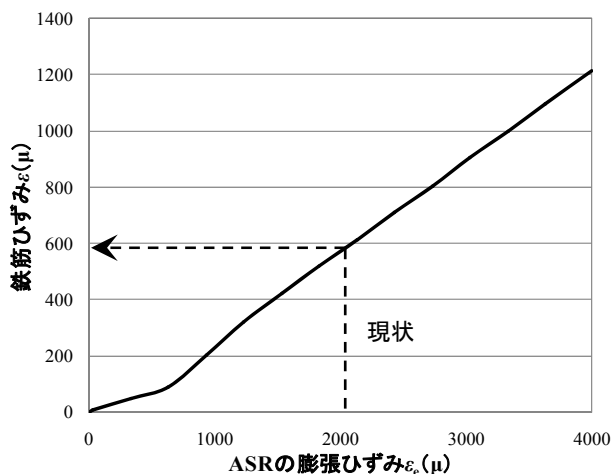


図-10 鉄筋の応力状態

- (3) 本数値解析モデルを用いて、数値解析と現場計測のひび割れ性状を比較した結果、ある程度再現することが出来た。既往の研究を踏まえ、アルカリ骨材反応の体積膨張に対する鉄筋拘束の有無に依存せず、実構造物のひび割れ性状を再現できることが分かった。
- (4) 鉄筋部材に用いたトラス要素を取り出し、発生した応力をひずみで評価した。今後、橋脚Aの劣化が進行しても鉄筋降伏は生じないと考えられる。ただし、アルカリ骨材反応により過度の損傷を受けた場合、鉄筋の残存耐力は急激に低下している。地震発生等に伴う外力が働いた場合、構造物の安全性を確保できない可能性がある。今後、地震荷重等外力を考慮した安全性評価が必要である。

## 参考文献

- 1) 眞野裕子, 幸左賢二, 松本茂, 橋場盛: 曲げ加工部での鉄筋損傷メカニズムの検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.963-968, 2004.7
- 2) 田中泰司, 岸利治: コンクリートの膨張作用による鉄筋隅角部の変形挙動に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.821-826, 2006.7
- 3) 山城建樹, 富山潤, 伊良波繁雄, 神田康行: アルカリ骨材反応によるひび割れ挙動に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.77-82, 2006.7
- 4) 岡孝二, 吉田秀典, 松島学, 横田優: アルカリ骨材反応によるコンクリートのひび割れ発生モデルの構築と解析手法の提案, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.4, pp.744-757, 2007
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], pp.29-33, 1996.3
- 6) 澤部純浩, 中村光, 田辺忠顕: 応力状態に依存した内部膨張ひずみを考慮したRC部材の解析, 土木学会第59回年次学術講演会, 5-014, pp.27-28, 2004.9
- 7) 飯島亨, 佐々木孝彦, 高瀬直輝, 竹井和夫: 上面防水工によるコンクリートの含水率の変化, 土木学会第57回年次学術講演会, V-575, pp.1149-1150, 2002.9
- 8) 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], pp.23-25, 1996.3
- 9) 稲葉洋平, 関田徹志, 桜本文敬: 構造用超軽量コンクリートの開発(その2)ークリープ及び長期たわみ性状ー, 鹿島技術研究所年報 第48号, pp.93-98, 2000.9