

論文 アルカリ骨材反応によるコンクリートのひびわれ幅の数値解析モデル

松島 学^{*1}・横田 優^{*2}・吉田 秀典^{*3}・岡 孝二^{*4}

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が注目されている。アルカリ骨材反応によって、コンクリートにひび割れが発生する。劣化の度合いによってはコンクリート中の鉄筋を破断する事例も報告されている。本研究は、アルカリ骨材反応によるコンクリート構造物のひび割れ性状を再現する解析モデルを構築した。また、アルカリ骨材反応によって損傷を受けた橋台の現場計測を行った。提案する解析モデルを用いた数値解析を行い、ひび割れ性状とひび割れ幅について数値解析と現場計測との比較検討を行った。

キーワード : アルカリ骨材反応, 現場計測, 数値解析, ひずみ軟化モデル

1. はじめに

近年、アルカリ骨材反応によるコンクリート構造物の劣化が社会問題となっている^{1),2)}。劣化はひび割れ、かぶりコンクリートの剥離・剥落、さらには鉄筋の降伏および破断にまで至り、コンクリート構造物の耐久性に大きな影響を与えることは否定できない。眞野ら³⁾は、2次元弾塑性有限要素解析法を用いて、アルカリ骨材反応による鉄筋損傷に関するメカニズム分析を行っている。鉄筋破断のメカニズムを分析するという目的に対しては有用性があるが、コンクリートの全要素を膨張させる点で、現実の挙動を表現していると判断するのは難しい。松原ら⁴⁾は、フリーメッシュ法による粗骨材分布を考慮した3次元ひび割れ解析を行っている。この研究で使用されているモデルは、コンクリートを現実的に非常に精度良くモデル化していると言える。しかし、要素数の問題からも実構造物に適用できる、実用的なモデルとは判断し難い。

本研究は、アルカリ骨材反応によって生じるコンクリート構造物のひび割れ幅を求める実用的な解析モデルの構築を行った。

2. 解析モデル

2.1 等価ひび割れ要素の導入

現実のコンクリートは、ばらついた粗骨材の配置や無数の微小ひび割れによる欠陥が影響した不均質性を持つ。コンクリートをモデル化する場合、微小ひび割れをモデル化することは非常に難しい。また、精度の良い全骨材のモデル化は、膨大な要素数を必要とし汎用コンピュータで計算できない。そこで、コンクリートの不均質性を考慮しつつ、要素数を削減するためにコンクリートを粗骨材の集合体から成る膨張要素とモルタルから成る非膨張要素の2つの要素で表す等価ひび割れ要素を導入した。以下に説明する等価ひび割れ要素の考え方は、反応性骨材の粒径および粒度に関わらずアルカリ骨材反応による膨張と反応性骨材の何らかの物性と相関があるという黒田ら⁵⁾の研究を参考に行っている。

2.2 粗骨材の集中

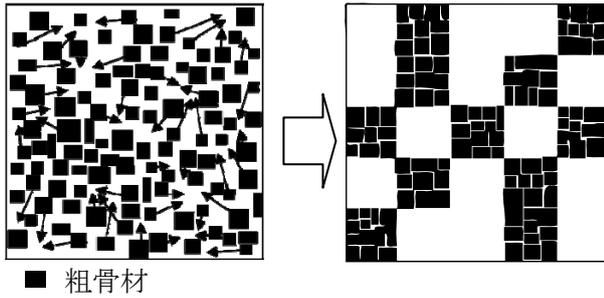
数値解析における要素数を減らし、コンクリートのひび割れをシミュレーションする方法として、コンクリートを粗骨材の集合体とモルタル

*1 香川大学 工学部安全システム建設工学科教授 工博 (正会員)

*2 (株) 四国総合研究所 土木技術部主席研究員 工博 (正会員)

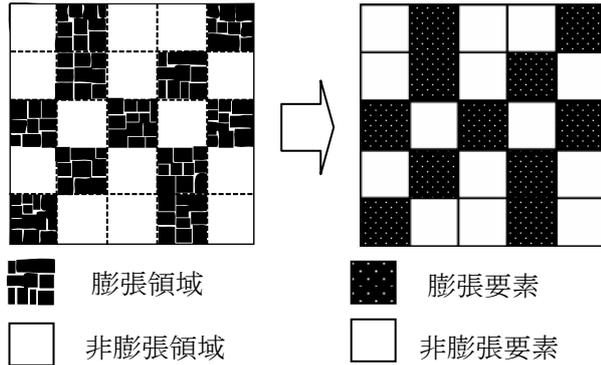
*3 香川大学 工学部安全システム建設工学科教授 博士(工学) (正会員)

*4 香川大学 大学院工学研究科安全システム建設工学専攻 大学院生



■ 粗骨材

図-1 粗骨材のリロケーションの考え方



■ 膨張領域

□ 非膨張領域

■ 膨張要素

□ 非膨張要素

図-2 等価ひび割れ要素の概念図

ルの2つで表すモデルを提案した。コンクリートを粗骨材の集合体とモルタルに区分した模式図を図-1に示す。コンクリート中で膨張する領域に粗骨材が集中し、残りの膨張しない領域にモルタルが存在すると考えた。集中した粗骨材はモルタルで密着していると仮定する。各領域の相互作用で発生するひび割れ⁶⁾で現実のひび割れをシミュレーションできるものと考えた。しかしながら、粗骨材を過度に集中させると現実のコンクリートと掛け離れ、現実の挙動を表すことができない。粗骨材の集中、つまり膨張領域の大きさの決定は、数値解析での要素数を削減しつつ、現実のコンクリートと同様の挙動を示す性質を失わない程度とする。

2.3 等価ひび割れ要素

解析は、膨張する領域と膨張しない領域をそれぞれ要素に置き換えることでコンクリートをモデル化できると仮定した。概念図を図-2に示す。各領域を膨張要素と非膨張要素に定義した。膨張要素の大きさは、その寸法を変化させて解析を行い、最も現実に近いひび割れ性状を示した解析ケースを基に、1辺10cmの正方形要素とした⁷⁾。膨張要素にひび割れが生じた場合、粗骨

材を密着させるモルタルにひび割れが生じ、集合した粗骨材が分離したと判断する。この挙動はひび割れが粗骨材に沿って生じる現実の挙動に基づいている。従って、膨張要素の強度はモルタル強度に依存すると考える。コンクリート強度とモルタル強度の間に強い相関があることから、膨張要素、非膨張要素はともにコンクリートの材料特性を持たせた。膨張要素は、温度荷重 T を加えることで式(1)に従って膨張ひずみが発生する。

$$\varepsilon = \alpha T \quad (1)$$

ここで、 α はコンクリートの線膨張係数である。膨張要素と非膨張要素の配置は、乱数によって決定し、引張りひび割れの発生は破壊力学に基づいている。全要素に占める膨張要素の割合は実配合を考慮し、全体積の40%に設定した。

3. アルカリ骨材反応が発生した構造物のシミュレーション

3.1 対象構造物

解析対象となる構造物は1979年に建設され、現在、アルカリ骨材反応によって大きく損傷している橋台Kである。対象構造物の形状を図-3に示す。地上部の寸法は幅750cm、高さ140cm、奥行き90cmである。本橋台が建設された当時はまだアルカリ骨材反応に対する認識が薄く、コンクリート用粗骨材に安山岩などの反応性骨材が使用されている。さらに、本橋台は背面地盤から水分の供給が絶えず行われ、補修が難しい構造物である。損傷しているコンクリート面を写真-1に、そのスケッチを図-4に示す。スケッチから、格子状のひび割れ(図-4, A 参照)と拘束の影響を受けて水平方向に卓越したひび割れ(図-4, B 参照)が生じていることがわかる。アルカリシリカゲルの滲出やその膨張によるコ

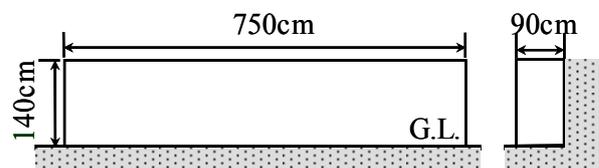


図-3 対象構造物



写真-1 損傷を受けたコンクリート面

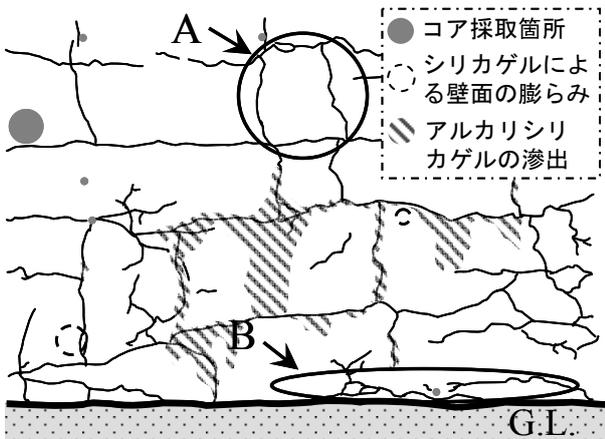


図-4 コンクリート面のひび割れスケッチ

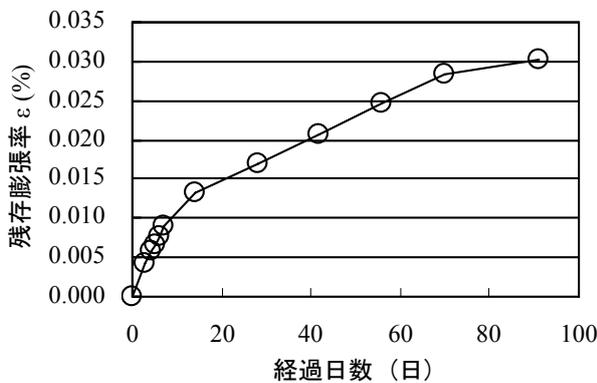


図-5 コンクリートコアの試験結果

コンクリート面の膨らみから、損傷の程度は激しいと考えられる。本橋台からコアを採取し、促進膨張試験を行った結果を図-5に示す。膨張率が最大で0.035%であることと、建設から25年経過していることから膨張はほぼ収束していると判断した。本橋台(橋台 K)のひび割れを調査し、得られた等価ひび割れ直径 ϕ_{cr} のデータを図-6に示す。等価ひび割れ直径 ϕ_{cr} とは、図-7の左図のように格子状のひび割れを右図のような等

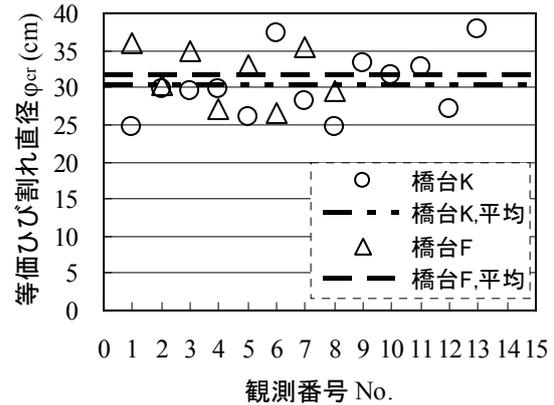


図-6 現場計測による等価ひび割れ直径

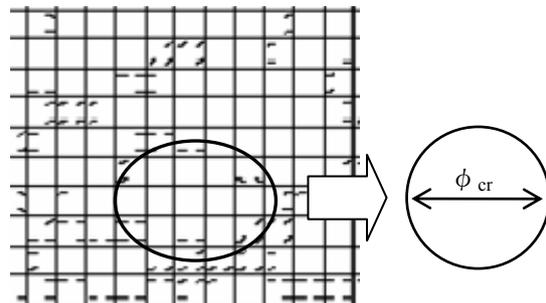


図-7 等価ひび割れ直径

価な真円に変換したときの円の直径である。図-6には、比較のために調査した本対象構造物よりも大きな壁面(幅 1440cm, 高さ 400cm)を持つ橋台(橋台 F)の調査結果を併せて示す。寸法が全く異なる2つの橋台における等価ひび割れ直径はそれぞれ30cm, 32cmとなり、2cmしか差が見られない。ひび割れ幅についての比較は行っていないが、実構造物で構造物の寸法はひび割れ性状にそれほど影響しないと考えられる。

3.2 材料特性の設定

提案する等価ひび割れ要素モデルを用いて本橋台に生じるひび割れをシミュレーションした。アルカリ骨材反応によるコンクリートの劣化は、時間依存によるクリープ的な挙動を示すことから、その影響を考慮し、式(2)のようにコンクリートの弾性係数を低減した⁸⁾。

$$E_c = E_0 \frac{1.0}{1.0 + \varphi} \quad (2)$$

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、 φ : 低減係数(本研究ではコンクリート標準示方書⁸⁾を参考に $\varphi=2.5$ とした)である。コンクリートの引張強度は現場で採集した

コアの圧縮強度試験結果を参考に設定した。コンクリートの定数は表-1のように設定した。全要素中に含まれる膨張要素の割合は一般的なW/Cから粗骨材量を設定し、40%とした。この粗骨材が全て膨張するとして、解析を行った。膨張要素は乱数を使って、図-8に示すように3次的にランダムに配置した。

表-1 コンクリートの材料特性

項目	設定値
クリープを考慮しない弾性係数 E_0 (N/mm ²)	20000
低減後の弾性係数 E_c (N/mm ²)	6000
引張強度 f_t (N/mm ²)	3.0
引張ひび割れひずみ ϵ_{cr}	5.0×10^{-4}

3.3 設定した膨張ひずみ

アルカリ骨材反応において、アルカリシリカゲルの膨張はコンクリートの含水率に影響を受けると考えられる。本研究では、コンクリート構造物内部の含水率が図-9(a)のようになると仮定した。さらに、コンクリートの含水率が膨張の割合に比例すると考え図-9(b)のようにモデル化した。本橋台は、常に水を供給される背面と乾燥の影響が小さいコンクリート内部の含水率が高く、乾燥の影響を受けるコンクリート表面の含水率は低いと考える。コンクリート内部の膨張要素を内部膨張要素、表面の膨張要素を外部膨張要素と定義する。外部膨張要素は内部膨張要素に与えるひずみの1割の膨張ひずみが発生すると仮定した。本解析は実構造物の劣化状態が終局に達していることから、内部

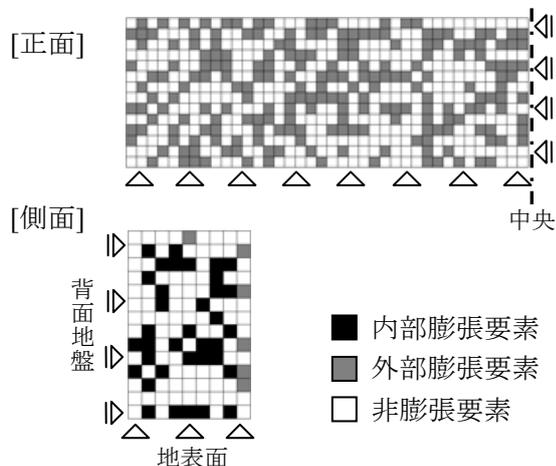


図-8 膨張/非膨張要素の配置

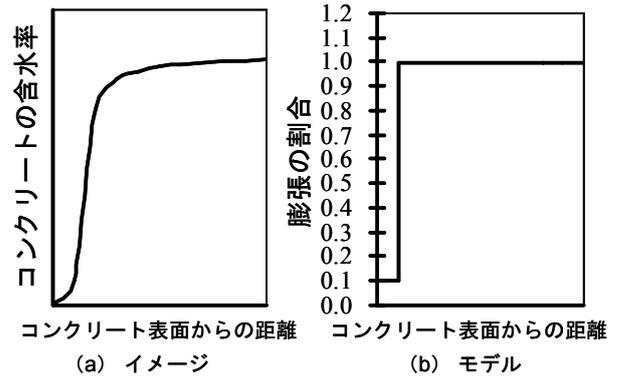


図-9 コンクリートの含水率と膨張の割合

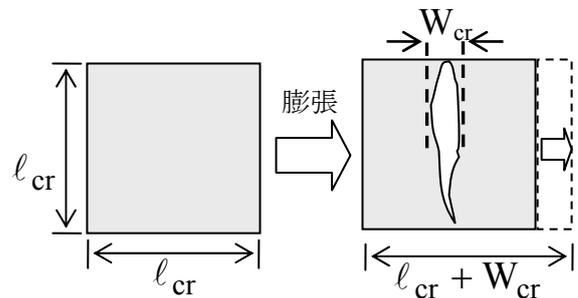


図-10 ひび割れ幅の仮定

膨張要素を膨張ひずみ $\epsilon=0.4\%$ まで膨張させることで、解析を行った。拘束条件は、構造物地上部最下部で地中の基礎による拘束を考慮して全自由度を拘束、背面は背面地盤を考慮して地盤面に対して直交方向の自由度のみを拘束した。

3.4 ひずみとひび割れ幅の関係

図-10に示すように長さ l_{cr} のコンクリートにひび割れが発生し、そのひび割れ幅が W_{cr} であるとする。解析より求まるひずみは、弾性ひずみと非弾性ひずみ（ひび割れひずみ）の和である。本研究では、弾性ひずみが非弾性ひずみより非常に小さいことから無視できるものと考え、ひび割れ幅は非弾性ひずみから求められるとした。従って、長さ l_{cr} 内の平均ひずみ ϵ_p を用いて式(3)のようにひび割れ幅を求められると仮定した。

$$W_{cr} = l_{cr} \epsilon_p \quad (3)$$

ここで、 W_{cr} はひび割れ幅である。本研究で問題になるのは、ひび割れが発生した時に影響を及ぼす範囲、言い換えると、式(3)に示す有効長さ l_{cr} を設定することである。本研究では次のように考えた。コンクリート表面における格子状のひび割れ

は、ある一定の間隔で発生している。この各格子状ひび割れの中心の間隔が、ひび割れに關与する有効長さ l_{cr} であると考えた。前述の等価ひび割れ直径 ϕ_{cr} が各格子状ひび割れの中心の間隔と等価であることから、式(4)の關係が成り立つ。

$$W_{cr} = \phi_{cr} \varepsilon_p \quad (4)$$

3.5 解析結果

(1) コンクリート表面のひび割れ

本数値解析で求めたコンクリート表面のひび割れ状況を図-11 に示す。数値解析では、各要素が持つ 8 つの積分点でひび割れを評価している。積分点に表示された線は引張ひび割れを示し、その方向がひび割れの発生した方向を示す。各積分点の直線を繋いだものが格子状に繋がっているのが見られる (図-11, A 参照)。解析で求められた格子状ひび割れの等価ひび割れ直径 ϕ_{cr} の平均値は 37cm であった。現場計測で得られた平均値は 30cm であり、現実に近い格子状のひび割れを再現できたと言える。構造物地上部最下部には拘束を反映した水平方向のひび割れ (図-11, B 参照) が卓越している。実構造物にも同様のひび割れが確認されている。本解析モデルを用いて、コンクリート表面における現場のひび割れ (図-4 参照) と同様のひび割れ性状をシミュレーションすることができた。

(2) ひび割れ幅の分布

解析結果から得られたひび割れ幅の分布を図

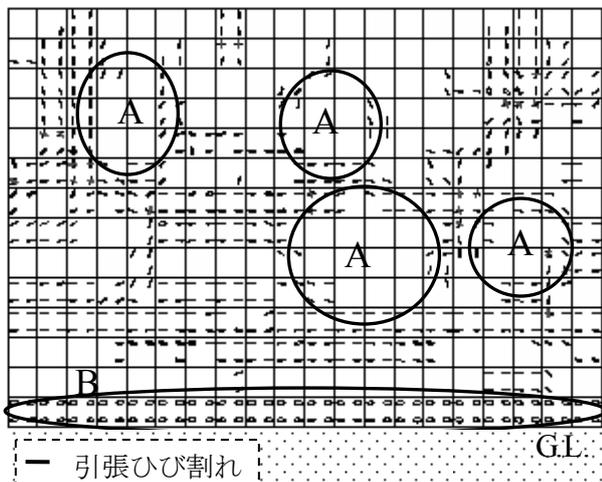


図-11 コンクリート表面のひび割れ

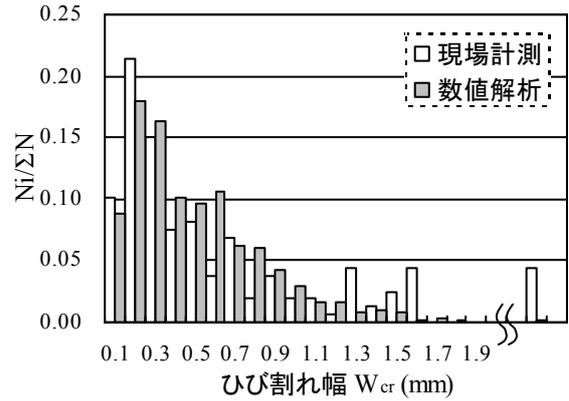


図-12 表面のひび割れ幅の分布

図-12 に示す。解析では 3 次元ソリッド要素を用いており、1 つの要素に 8 つの計算点を持つ。これらの点を介して応力、ひずみ等が得られる。本解析ではコンクリート表面に位置する代表点を選択し、式(3)を用いて得られた各平均ひずみ ε_p に対するひび割れ幅 W_{cr} を求めた。縦軸は頻度 (N_i) を総個数 (N) で除したものである。図からわかるように、ひび割れ幅は実構造物で発生したかなり大きな値のひび割れ幅を除いて、現場計測と数値解析でほぼ同様の傾向を示している。

(3) 奥行方向直交方向のひび割れ

アルカリ骨材反応によって損傷を受けたコンクリート構造物の内部には奥行方向に直行する方向に引張ひび割れが発生する。実構造物から採取したコンクリートコアを写真-2 に示す。10cm~20cm の間隔で引張ひび割れが発生していることがわかる。本数値解析でコンクリートコアと同様に奥行方向ひび割れ分布を図-13 に示す。図では、ひび割れの方法が紙面と平行であれば真円、直交であれば直線として表現される。本研究では、紙面に直交し、さらに奥行方



写真-2 実構造物の奥行方向直交ひび割れ

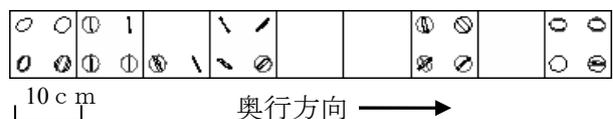


図-13 数値解析の奥行方向直交ひび割れ

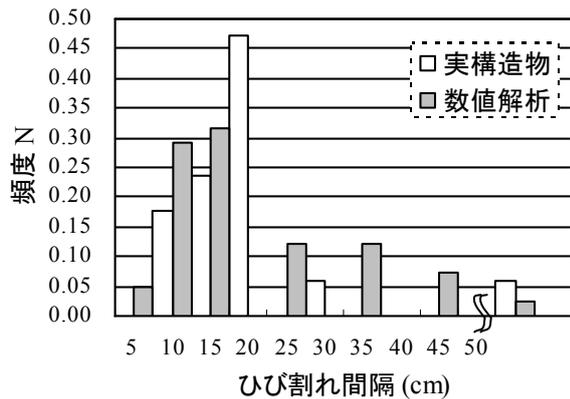


図-14 奥行方向直交ひび割れ間隔の分布

向とひび割れの方向のなす角が 75°~90°のひび割れを対象とした。図より、10cm~20cmの間隔で引張りひび割れが発生していることが分かる。実構造物のコンクリートコアと数値解析で得られた引張りひび割れ間隔の分布を図-14に示す。縦軸は頻度(N_i)を総個数(N)で除した無次元量である。実構造物と解析で同様の傾向を示す。実構造物の平均値は 16.1mm, 標準偏差は 13.4mm となり, 数値解析の平均値は 16.0mm, 標準偏差は 12.4mm となった。従って, コンクリート内部のひび割れ性状もシミュレーションすることができたと言える。

4. まとめ

本研究は, アルカリ骨材反応によってコンクリート構造物にひび割れが生じる現象を再現する実用的な数値解析モデルを提案し, 実構造物の挙動を用いて検証した。以降に, 本研究で明らかにしたことを示す。

- (1) コンクリート中で膨張する部分に粗骨材が集中し, 膨張しない部分にモルタルが存在すると仮定し, 各領域を膨張要素, 非膨張要素とした等価ひび割れ要素を提案した。
- (2) 提案する等価ひび割れ要素を用いて, 現場計測を行った橋台の解析を行った。その結果, 格子状のひび割れと構造物下部の拘束を反映した水平方向のひび割れを再現することができた。
- (3) コンクリート内部に発生する奥行方向に直交する引張りひび割れの間隔は, 実構造物と数

値解析ではほぼ同様の傾向を示した。

- (4) 本橋台に生じるひび割れのひび割れ幅の分布を現場計測と数値解析で比較を行った。ひび割れ幅は, 実構造物で発生するかなり大きな値のひび割れ幅を除き, 数値解析と現場計測ではほぼ同様の傾向を示した。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会: 'コンクリート診断技術' 04 基礎編, pp.195-199, 2001.3
- 2) 小林一輔: 'コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ 1 コンクリート構造物の早期劣化と耐久性診断', 森北出版, pp.22-29, 1991.7
- 3) 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', コンクリート工学会年次論文集, Vol.26, No.1, pp.963-968, 2004.7
- 4) 松原仁, 伊良波繁雄, 富山潤, 山城建樹: 'FMMによる粗骨材分布を考慮した三次元ひび割れ解析', コンクリート工学会年次論文集, Vol.26, NO.2, pp.121-126, 2004.7
- 5) 黒田保, 西林新蔵, 井上正一, 吉野公: '反応性骨材の粒度および混入量がモルタルのASR膨張に与える影響', コンクリート工学会年次論文集, Vol.24, No.1, pp.63-68, 2002.6
- 6) Xuehui AN: 'Failure Analysis and Evaluation of Seismic Performance for Reinforced Concrete in Shear', pp.18-37, 1996.7
- 7) 岡孝二, 横田優, 吉田秀典, 松島学: 'アルカリ骨材反応によるひび割れのシミュレーション', 土木学会第60回年次学術講演会, pp.41-42, 2005.9
- 8) 土木学会: 'コンクリート標準示方書 [設計編]', 1986.10