

論文 鋼材の腐食によるコンクリートのひび割れ解析モデルの構築

村上 正明^{*1}・川口 和広^{*2}・植木 博^{*3}・増井 隆^{*4}

要旨: コンクリートが炭酸化し, 鋼材の腐食によるコンクリートのひび割れ現象についての数値解析モデルを構築し, 鉄筋コンクリート構造物の被りコンクリートの剥離・剥落を防止するための補修時期を定量的に予測した。炭酸化反応解析では pH の低下する時期を求め, 次に鋼材腐食モデルにより鋼材の腐食速度と膨張量を求めた。また, ひび割れ解析では, 鋼材周囲の遷移帯厚さを考慮しつつ, 腐食による鋼材の膨張量を用いてひび割れ発生時期とひび割れ幅を定量的に求めた。鉄筋コンクリート壁高欄を解析した結果, 約 30 年で中性化が 2.0cm の深さまで進行し, 鋼材が腐食膨張し始めてから約 840 日で被りコンクリートに 0.2mm の表面ひび割れが発生するため, 樹脂注入等による補修が必要であることが分った。

キーワード: 中性化, 鉄筋腐食, 遷移帯, 引張軟化, 腐食速度, ひび割れ幅, pH

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の耐久性能を論じる場合, コンクリート中に配置された鋼材の腐食状況を的確に把握することが最も重要である。鋼材はコンクリート中の強アルカリ環境下では, その表面に不動態皮膜と呼ばれる酸化皮膜を形成し, この皮膜が鋼材と侵入した水分, 酸素との反応を遮断して腐食反応の進行を防いでいる。しかし, 鋼材周辺コンクリートの空隙水の pH が低下すると, 不動態皮膜が破壊され, さらに酸素と水分が供給されると鋼材の腐食が始まる(例えば¹⁾)。鋼材の腐食によるひび割れは, 腐食鋼材の体積膨張により鋼材周囲のコンクリートに膨張圧が作用することによって生じる。都市内高架道路においては被りコンクリートの剥離・剥落により第三者被害が想定されるために, 被りコンクリートのひび割れ性状とその発生時期の予測を定量的に行い, 補修が必要となる時期を適切に予測することは維持管理技術者にとって大きな課題となってきた。

このような背景の中, 著者らは空隙構造を考慮した二酸化炭素の拡散と空隙水中の化学平衡に基づき pH を評価指標とした炭酸化反応モデルを提

案した。また, 鋼材腐食速度モデルの構築と FEM によるひび割れ解析を連成し, 鋼材の腐食による被りコンクリートのひび割れ発生時期とひび割れ幅の検討を行ってきた²⁾⁻³⁾。今回, これら解析手法の予測精度を上げるため, 鋼材周囲の遷移帯厚さを考慮したモデルを構築した。さらに, FEM によるひび割れ解析においては, 引張破壊エネルギーを考慮した引張軟化特性を用いて解析を行った。鉄筋コンクリート壁高欄を対象に中性化解析, 鋼材腐食速度の算出, ひび割れ解析と一連の解析を実施し, 補修が必要となる時期を定量的に予測した。

2. コンクリートの炭酸化反応モデル

コンクリートの炭酸化反応モデルは, 著者らの既報のモデル²⁾を用いた。本モデルは, 配合, 施工, および環境条件により変化する空隙構造をモデル化しており, 空隙構造に依存する二酸化炭素の拡散係数を決定する物理モデルと, 拡散した二酸化炭素が水酸化カルシウムなどの各種アルカリ成分と反応し空隙水中の各種イオンの化学平衡を考慮した化学モデルから成り立っている。

*1 JIP テクノサイエンス(株)東京テクノセンタ事業開発部 (正会員)

*2 JIP テクノサイエンス(株)東京テクノセンタ事業開発部

*3 首都高速道路公団 東東京管理局保全部 (正会員)

*4 首都高速道路公団 東東京管理局保全部設計課

3. 鋼材の腐食モデル

鋼材の腐食モデルには、pH に依存する腐食速度モデルを用い、また、腐食による鋼材の膨張量は、須田ら⁴⁾の分析結果等から膨張率をモデル化することにより求めた。

なお、腐食速度のモデル化においては、腐食に必要な物質のうち、水分については、コンクリートの空隙水の形で鋼材近傍に常に存在していると仮定した。また、同じく腐食に必要な物質である酸素（気体）については、既報の浸透拡散の解析結果³⁾より、腐食反応に必要な量が常に十分に存在するとした。

3.1 鋼材腐食速度のモデル化

コンクリート中の鋼材の腐食速度は、施工状況などによるコンクリートの品質などに影響されて種々に変化するため一般に定まっていない。そこで、本モデルでは、水溶液の pH によって規定される腐食速度モデルを用いた⁵⁾。腐食の開始時期については、pH 13.2 以下とし、酸素イオンの供給に制限される pH10 以下では一定とし、その間の pH 領域では線形に補間した。なお、コンクリート中の鋼材の腐食速度は、文献値⁶⁾に対して水溶液中における腐食進行速度の実験定数 1/5 を乗じた値を用いた。本モデルに用いた腐食速度と pH の関係を図 - 1 に示す。コンクリートの中性化の進行と鋼材周囲の pH については、中性化領域が鋼材表面に到達した時点で鋼材の全周囲の pH がそれと同一になると仮定した。これは、鋼材の腐食量が鋼材の円周方向には全て均一で同一となる、いわゆるマイクロセル腐食のモデルである。

3.2 鋼材の体積膨張率のモデル化

須田ら⁴⁾の分析によると、腐食生成物は数種類の化学物質の混合物となっている。従って、腐食生成物の特性はそれを構成する化学物質の割合によって異なることになる。既往の研究結果^{例えば⁴⁾}を見ると、腐食生成物の体積膨張率 n は、2.5 ~ 3 前後の値が用いられている。本モデルでは、図 - 2 に示す鋼材径の定義と式(1)に示す体積膨張率 n を 3 としてモデル化した。鋼材の体積膨張に伴い、周囲のコンクリートに一樣に膨張圧による変形が

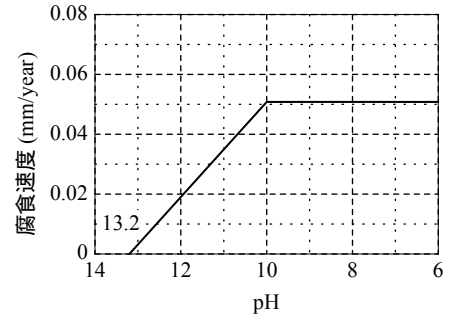


図 - 1 腐食速度モデル

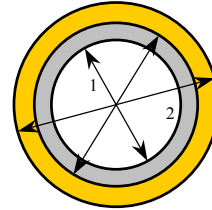


図 - 2 鋼材径

生じる。この変形によりコンクリートに引張りひび割れが発生するモデルとした。

$$n = \frac{\phi_2^2 - \phi_1^2}{\phi^2 - \phi_1^2} \quad (1)$$

ここに、
 ϕ : 腐食前の鋼材径 (mm)
 ϕ_1 : 腐食後の鋼材径 (mm)
 ϕ_2 : 腐食による鋼材膨張径 (mm)

4. コンクリートのひび割れ解析モデル

4.1 ひび割れモデル

本ひび割れ解析では TNO-DIANA 社 (オランダ) が開発した汎用 FEM 解析コード “DIANA” の分散ひび割れモデルの 1 つである多方向固定ひび割れモデル⁷⁾を用いた。本モデルは、最大主応力が引張強度に達した場合に最大主応力の直角方向にひび割れが発生するモデルで、さらに、一度生じたひび割れ面の方向は変わらない。その後主応力方向が変わり、さらに引張強度に達した場合には複数のひび割れが発生する。

4.2 コンクリートの引張軟化特性

引張軟化曲線には、引張破壊エネルギーを考慮した図 - 3 に示す 1/4 モデル⁸⁾を用いた。

引張強度 f_{tk} は設計基準強度 f_{ck} に基づいた式(2)から求め、また、引張破壊エネルギー G_F は、粗骨材の最大寸法の関数となる式(3)から求めた⁸⁾。

$$f_{tk} = 0.23 \cdot f_{ck}'^{2/3} \quad (2)$$

$$G_F = 10(d_{max}')^{1/3} \cdot f_{ck}'^{1/3} \quad (N/m) \quad (3)$$

ここに、 f_{ck}' ：設計基準強度(N/mm²)
 d_{max}' ：粗骨材の最大寸法(mm)

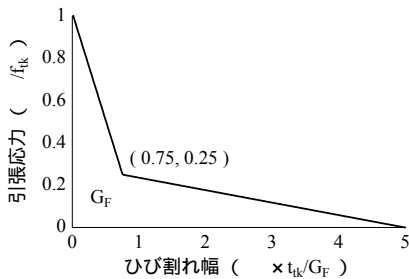


図 - 3 引張軟化曲線モデル

図 - 3 に示すようなひび割れ幅との関係で表した引張軟化特性を要素の応力 - ひずみ関係で表現する分散ひび割れモデルに適用する場合、ひび割れ幅をひずみに変換する必要がある。この変換には、ひび割れ方向、要素形状、要素長さを考慮した代表長さが用いられる。本モデルでは、この代表長さに、要素面積 A の 2 倍の平方根と定義した等価要素長さ l_{eq} を与えた⁷⁾。

$$l_{eq} = \sqrt{2A} \quad (4)$$

4.3 鋼材周辺の遷移帯のモデル化

鋼材の周辺では多孔質で強度の弱い領域である遷移帯が形成されている。この遷移帯の形成に及ぼす要因には、ブリージング水、Wall Effect、One-side growth effect 等があり、その領域は、配合、コンクリートの打設、配筋方向等によって変化する。遷移帯厚さは数十 μm と考えられ、鋼材の膨張によるコンクリートへの膨張圧の伝達に大きな影響があると考えられる。そこで、本モデルでは、大即らの研究⁹⁾から鋼材の周囲に 85 μm の遷移帯厚さがあるとし、また、遷移帯の剛性は十分小さいとし無視できるものとした。なお、鋼材周辺の遷移帯厚さは、主にブリージングの影響により鋼材の上面よりも下面の方が大きくなるが、今回は、本モデルでは鋼材周りに一様とした。

5. 解析結果と考察

5.1 解析対象モデル

解析対象は、コンクリートの剥離・剥落が顕在化している既設鉄筋コンクリート壁高欄とし、図 - 4 のように壁高欄の隅角部を対象に使用鉄筋径 D13 がかぶり厚 20mm で配筋されているとした。また、コンクリートの配合条件を表 - 1 に示す。

5.2 コンクリートの炭酸化解析

炭酸化解析モデルによるコンクリートの中性化予測結果は、図 - 5 に示す著者らの既報の 1 次元解析結果を用いた。解析結果の中性化深さは、土木学会式、岸谷式による中性化深さより大きな値となっており、中性化速度は、30 年で約 2cm となっている。この解析結果より、かぶり 2cm の壁高欄に対する鋼材の腐食膨張の開始は、供用期間 30 年後とした。

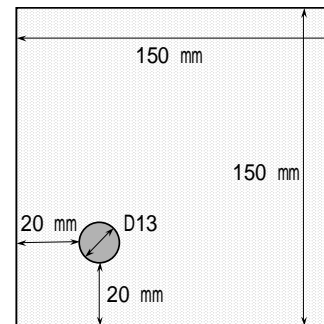


図 - 4 既設鉄筋コンクリート壁高欄の形状

表 - 1 壁高欄の炭酸化解析条件

単位水量 (kg/m ³)	167
単位セメント量 (kg/m ³)	287
水セメント比 (%)	58
乾燥開始材齢 (日)	7
湿度 (%)	70

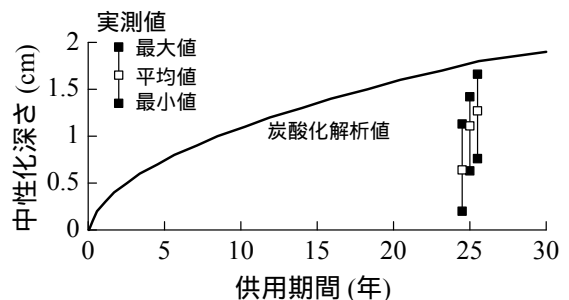


図 - 5 中性化深さの経時的変化

5.3 鋼材腐食速度および膨張速度の算出

鋼材の腐食速度 r_c は、図 - 1 の pH と腐食速度の関係から読み取ることができ、炭酸化したコンクリートの解析結果平均値であった pH=10.9 では腐食速度 $r_c=0.0365$ (mm/year) が得られる。

また、D13 (φ=12.7mm) 鉄筋に対して、腐食生成物による体積膨張率 $n=3.0$ を適用すると、式 (1) から鋼材の半径増分速度は以下の式から $r_d=0.20$ (μm/day) と算出できる。

$$\phi_2 = \sqrt{(1-n)\phi_1^2 + n\phi^2} \quad (1')$$

$$\phi_1 = \phi - 2r_c \quad (5)$$

$$\phi_2 = \phi + 2r_d \quad (6)$$

ここで、半径増分速度 r_d は、3.1 節で仮定した水溶液中の腐食速度からコンクリート中の腐食速度の実験定数と 3.2 節で定義した腐食鋼材の体積膨張率 n に依存する。これらの値による半径増分速度 r_d への影響を図 - 6 に示す。これらの値の結果への影響は小さくなく、実際は環境条件に依存するものと考えられるが、本論文では、実験定数 1/5 (0.20) と $n=3.0$ を用いた。これらの値の精度については、今後の実測値との比較によって検討していくものとする。

5.4 腐食膨張によるひび割れ解析

本解析では初期にコンクリートにひび割れが存在せず、鋼材は全く腐食が生じていない状態から腐食が進展すると考えた。

ひび割れ解析に用いたメッシュ形状を図 - 7 に示す。4 節点四角形平面ひずみ要素を用いた 2 次元モデルとした。境界条件として、図 - 7 の上端の鉛直方向と右端の水平方向をそれぞれ拘束した。

また、腐食膨張による鋼材半径の増分 R には、鋼材の外径の変化としてコンクリート要素の節点に直接、鋼材の半径方向に強制変位を与え漸増解析を行った。また、本解析に用いた材料特性を表 - 2 に示す。腐食によって鋼材が膨張すると、まず遷移帯領域に膨張圧が作用する。しかし、遷移帯は多孔質で強度が非常に弱いと考え、鋼材は遷移帯厚さ内では抵抗無く膨張するとした。腐食鋼材半径増分が鋼材周囲の一様の遷移帯厚さ 85 μm

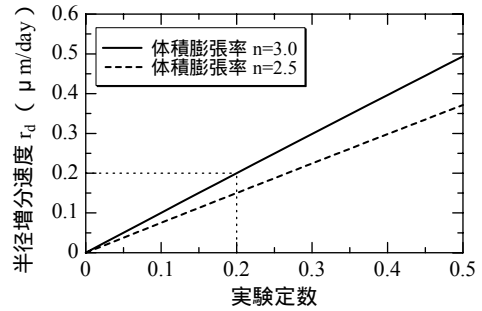


図 - 6 半径増分速度の変化

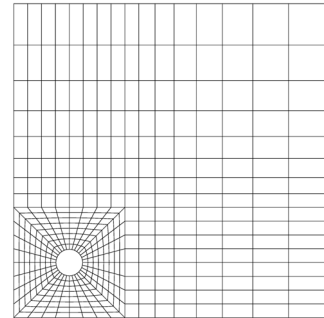


図 - 7 解析モデル

表 - 2 コンクリートの材料特性値

ヤング係数 (N/mm ²)	2.8×10^4
ポアソン比	0.2
設計基準強度 (N/mm ²)	30
引張強度 (N/mm ²)	2.22
粗骨材最大寸法 (mm)	25
引張破壊エネルギー (N/mm)	0.091

に達するまでの期間は、鋼材の半径増分速度 $r_d=0.20$ (μm/day) から 425 日と算出できる。

腐食鋼材径が遷移帯領域を超えると、コンクリートへの膨張圧が作用し引張応力が生じる。FEM によるひび割れ進展解析の結果、コンクリート表面までひび割れが貫通したのは、腐食開始後 443 日の鋼材増分半径 R が 88.65 μm の時であった。この時のひび割れ図を図 - 8 に示す。鋼材周囲では細かなひび割れが生じており、被りコンクリートの薄い表面に向かって貫通したひび割れが生じている。

図 - 9 に、腐食開始から 838 日後の鋼材増分半径 $R=167.7$ μm でのひび割れ図を示す。ひび割れ幅の最も大きかった表面要素では、既に樹脂注入等による補修が必要とされる 0.2mm のひび割

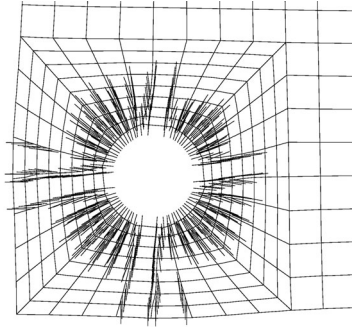


図 - 8 表面貫通ひび割れ時のひび割れ図
(R=88.65 μm)

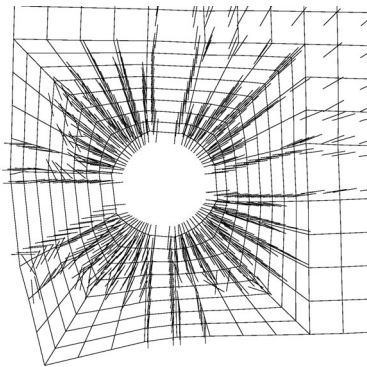


図 - 9 ひび割れ図 (R=167.7 μm)

れ幅が生じている。鋼材の腐食膨張が進行すると、鋼材周辺でのひび割れ領域が広がり、また、表面まで貫通したひび割れは、局所的にひび割れが大きくなり、ひび割れひずみの増大に伴って変形が増大していることがわかる。

ここで、表面貫通ひび割れが最も大きかった表面要素におけるひび割れ幅の変化を図 - 10 に示す。ひび割れひずみからひび割れ幅への変換には、式(4)より $l_{eq}=5.6\text{mm}$ を用いた。なお、分散ひび割れモデルによる解析から得られるひび割れひずみは、要素での平均的な結果であり、局所的なひび割れの幅を定量的に求めることは困難であるとされるが、本解析結果は、表面の1つの要素で局所的に分散ひび割れが生じたことから、その要素に1本の局所的なひび割れが生じたと考え、該当要素の等価要素長さをひび割れひずみに乗じて評価をした。図 - 10 から見られるように、表面ひび割れが生じる $88.65\ \mu\text{m}$ から徐々にひび割れ幅が増大し、約 $100\ \mu\text{m}$ からは線形的に増大する。

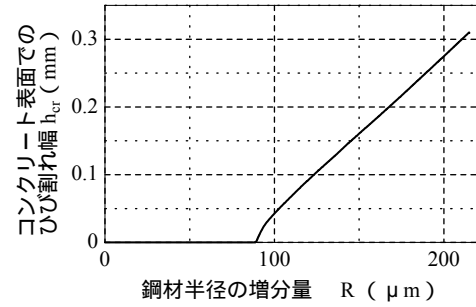


図 - 10 表面のひび割れ幅と膨張量の関係

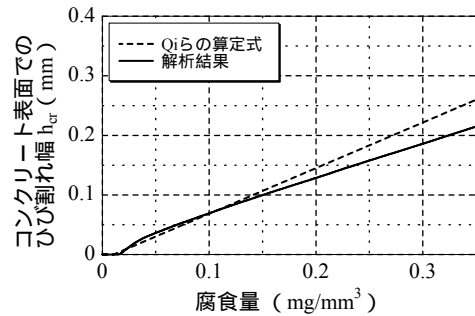


図 - 11 鋼材腐食量とひび割れ幅の関係

以上の解析結果より、かぶりコンクリート 2.0cm の鋼材位置まで中性化が進行するまでに 30 年かかり、その後の鋼材の腐食膨張によりコンクリート表面に 0.2mm のひび割れが生じるまでには、さらに 2.3 年 (838 日) がかかることが分った。すなわち、供用期間 32.3 年で補修が必要な 0.2mm の表面ひび割れが発生することを本解析モデルにより定量的に予測することができた。

また、式(7)により半径増分から得られる鋼材腐食量を用いて元ら¹⁰⁾による鋼材腐食量とひび割れ幅の算定式と比較した。図 - 11 に示すように、本解析結果と元らの算定式から求めた結果とはよく一致していることが確認できた。

$$W_c = \frac{\gamma}{(n-1)} u \quad (7)$$

ここに、 W_c : 鋼材腐食量 (mg/mm²)
 u : 鋼材半径の増分厚さ(mm)
 γ : 鋼の密度 (7.85mg/mm³)

次に、筆者らの既報³⁾の結果(腐食開始から 1515 日で表面ひび割れ 0.39mm)と今回の結果を比較すると、0.4mm の貫通ひび割れ幅が得られるのは、

図 - 10 から外挿して計算すると、腐食開始から約 1300 日後と予測でき、既報の結果とほぼ同じような結果が得られた。なお、今回の結果が既報の結果と比較して多少早くにひび割れが生じたのは、図 - 9 で見られたように、局所的なひび割れが進展したためである。図 - 9 におけるモデル下面要素での貫通ひび割れを見ると、一度はひび割れが生じたものの、モデル側面の貫通ひび割れの進展によって下面のひび割れは閉じている。一方、既報の結果では、ほぼ同じ幅のひび割れがモデル側面と下面に同時に進行しており、このようなひび割れパターンの違いが速度の違いとなっている。ただし、腐食速度は、実験定数や体積膨張率に少なからず影響される。実構造物を対象にした際には、施工の良否や環境条件などが影響すると考えられ、これらの精度の向上は今後の課題としたい。

6. まとめ

鉄筋コンクリートの炭酸化反応、鋼材の腐食膨張、そして鋼材周辺の遷移帯を考慮したコンクリートのひび割れについての数値解析モデルを構築した。一連の解析によって鉄筋コンクリート壁高欄の被りコンクリートが剥離・剥落を防止するための補修時期を定量的に予測することができた。解析結果を以下にまとめる。

- (1) 本解析で得られた鋼材腐食量とひび割れ幅の関係は示らの算定式とよく一致し、解析結果の妥当性が確認できた。
- (2) 中性化深さが 2cm に達し、鋼材周辺の pH が低下し鋼材が腐食し始めると、85 μm の遷移帯厚さまで膨張するのに 425 日かかり、コンクリート表面まで貫通するひび割れが生じるのは腐食開始から 443 日後となった。
- (3) 補修が必要とされる表面ひび割れ幅 0.2mm に達するのは、腐食開始から 838 日後、供用期間 32.3 年となった。

また、鋼材周囲の遷移帯の領域や強度、鋼材腐食速度、体積膨張率の値が解析結果に影響することが分かった。今後は、首都高速道路での車線拡幅工事等に併い撤去される鉄筋コンクリート壁高

欄等からサンプルを採取して実測値等との比較検討を行い、本解析モデルの精度の向上を図っていく予定である。

最後に、本研究を行うにあたり遷移帯に関してご指導を頂いた 東京大学生産技術研究所 加藤佳孝先生に深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向、土木学会コンクリート委員会、1997.2
- 2) 植木博・後藤孝治・村上正明・益子直人：空隙構造と化学平衡を考慮したコンクリートの炭酸化反応モデル、コンクリート工学論文集 第 13 巻第 3 号、2002.9
- 3) 下西勝・川口和広・植木博：中性化による鋼材の腐食とコンクリートのひび割れ解析モデル、コンクリート工学年次論文集、Vol.25、No.2、2003
- 4) 須田久美子・Misra Sudhir・本橋賢一：腐食ひびわれ発生限界腐食量に関する解析的検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、No.1、1992
- 5) Herbert H. Uhlig and R. Winston Revie: Corrosion and Corrosion Control, John Wiley & Sons, Inc, 1985
- 6) 小林悟志・下村匠：コンクリート中の物質移動と鉄筋の腐食に関する数値解析、コンクリート工学年次論文集、Vol.24、No.1、2002
- 7) J.G.Rots: Computational Modeling of Concrete Fracture, PhD thesis, Delft University of Technology, 1988
- 8) 土木学会、2002 年制定コンクリート標準示方書 [構造性能照査型] pp.21~27、2002.3
- 9) Nobuaki OTSUKI, Makoto HISADA, Nathaniel B.DIOLA and Tarek UDDIN Md. : Experimental Study on Interfacial Transition Zones in Reinforced Concrete, J.Materials, Conc. Struct., Pavements, JSCE, No.529/V-39, 155-167, 1998.5
- 10) 元 路寛・関 博：鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れ発生状況及びひび割れ幅に関する研究、土木学会論文集 No.669 / V-50、161-171、2001.2