

鉄筋の腐食膨張に伴うコンクリートひび割れモードの再現解析とそのメカニズムに関する一考察

Analysis of crack-paths in concrete due to reinforcement corrosion and their underlying mechanism

車谷 麻緒*・石幡 雅弘**・石井 建樹***・寺田 賢二郎****

Mao KURUMATANI, Masahiro ISHIHATA, Tateki ISHII and Kenjiro TERADA

*学生会員 修士(工学) 東北大学大学院 工学研究科 土木工学専攻・日本学術振興会 特別研究員 DC

(〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

**正会員 福島県 いわき建設事務所 (〒 970-8026 福島県いわき市平字梅本 15 番地)

***正会員 博士(工学) 講師 木更津工業高等専門学校 環境建設工学専攻 (〒 292-0041 千葉県木更津市清見台東 2-11-1)

****正会員 Ph.D. 助教授 東北大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 (〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

By performing numerical simulations of propagating cracks in concrete due to reinforcement corrosion, we illustrate various modes of crack paths according to the thickness of overburden for reinforcing steel, and investigate their underlying mechanisms. In order to accurately simulate the initiation and propagation of cracks, we enhance the finite cover method (FCM) so as to working with regularly structured mesh without remeshing and characterize nonlinear behavior of process zone fracture by means of the cohesive crack model. The method enables us to not only reproduce the modes of crack paths reported in experimental studies, but also predict the deterioration of concrete.

Key Words : *finite cover method, crack-path, reinforced concrete, salt corrosion, multiple cohesive crack growth*

1. はじめに

社会的重要度の高いコンクリート構造物は、従来メンテナンスフリーとして扱われていた。しかしながら、近年、塩害・アルカリ骨材反応・凍害などによってコンクリートは劣化することが認識されており、メンテナンスのタイミングをはかるために、その時期を予測する技術が求められている。なかでも塩害は、鉄筋コンクリート(以下、RC)構造物の最重要骨格である鉄筋を腐食劣化させることに加えて、かぶりコンクリートの剥落による第3者被害を招くことから、特にその予測技術の構築が重要視されている。

塩害劣化に関する既往の研究は、主にかぶりコンクリート中における塩化物イオン拡散過程を解析するものと、鉄筋の腐食膨張に伴うコンクリートの力学的な損傷過程を解析するものに大別される。前者は、コンクリートの内部構造や分子・イオンの移動などに着目した物理モデルが考案されているものの^{1)~3)}、後者については、コンクリートの損傷によってイオンなどの拡散過程が促進されるといった重要な背景があるにも関わらず、コンクリートのひび割れ挙動を的確に捉えた例はなく、有限要素法(以下、FEM)による等価不連続体解析^{4)~6)}や剛体バネモデル⁷⁾・境界要素法⁸⁾による解析に留まっている。

他方、松島・堤ら^{9),10)}は、鉄筋の腐食膨張に伴うコンクリートのひび割れ経路が、図-1に示される鉄筋径 ϕ とかぶり t_b の比によって、(a)鉄筋軸ひび割れ、(b)表面剥離ひび割れ、(c)水平剥離ひび割れに大別されることを実験結果として示しており、かぶりコンクリートの剥落を招く剥離ひび割れのモードが劣化進行速度や第

3者被害にとって重要であることを指摘している。しかしながら、このひび割れモードの発現に関しては、松島・堤らの弾性論に基づく簡易的な分類に留まっており、数値解析によってこれらを再現・分類した例はない。その一因として、従来法であるFEMはメッシュ(要素)による制約を受け、任意に成長するひび割れを解析できないことが挙げられる。したがって、メッシュに依存しない高精度のひび割れ進展解析法を開発し、これを塩害劣化に適用すれば、松島・堤らが示したコンクリートひび割れモードを再現できるはずであり、塩害によるRC構造物の劣化予測技術は飛躍的に進歩するものと期待される。

ひび割れモード・ひび割れ進展を適切に再現するには、可能な限りメッシュ依存を回避した解析手法の適用が望まれる。Element Free Galerkin法¹¹⁾の提案をきっかけに、1990年代中ごろから現在にかけて、FEMにおける要素の束縛を回避した解析手法が盛んに研究されている。近年では、特に従来のFEMに対して、PU条件(Partition of Unity)¹²⁾を用いて節点単位で近似の高度化を図る解析手法が注目を集めている。このような解析手法は、しばしばFEMの一般化あるいは一般化有限要素法と総称され、Manifold法¹³⁾を前身とする有限被覆法(Finite Cover Method, 以下FCM)^{14)~18)}やX-FEM^{19),20)}、GFEM²¹⁾などはその代表である。これらの手法の最大の特徴は、解析対象領域の幾何形状にとらわれることなく自由に近似部分領域である要素を構成できることである。すなわち、これらの手法を用いることによって、従来のFEMでは困難であったメッシュに束縛されないに解析対象領域のモデル化および進展するひび割れ形状のモデル化が可能となる。

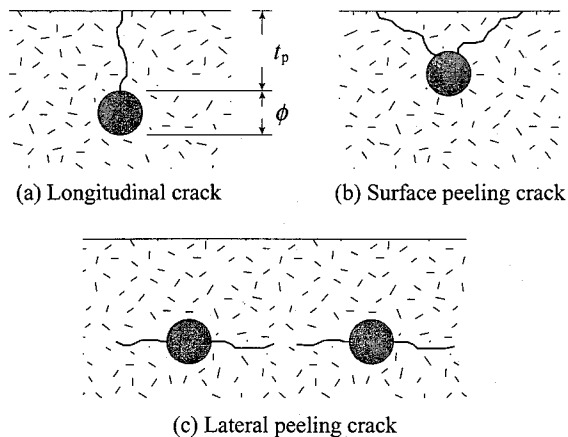


図-1 コンクリートに発生するひび割れモード^{9),10)}

以上のような背景から、本研究では、RC 構造の塩害劣化の重要な指標である鉄筋の腐食膨張に伴うコンクリートひび割れモードについて、一般化有限要素法を用いた数値解析による分類と再現を試みる。具体的には、まず FCM と定型メッシュを用いたメッシュによる制約を受けないひび割れ進展解析法について説明した後、これを用いて松島・堤らが実験で示したコンクリートひび割れモードの再現解析を試みる。そして、各ひび割れモードの発現機構やひび割れ形成メカニズム・劣化進行速度などについて考察する。

2. ひび割れ進展に対する有限被覆法

本節では、有限被覆法（以下、FCM）^{14)~18)}の近似の考え方と構成要素を概説したのち、FCM と定型メッシュを用いたひび割れ進展解析法について述べる。

2.1 FCM の近似概念^{14)~18)}

FEM では、解析対象を要素という部分領域に分割し、各々に対して節点値による補間近似を導入する。すなわち、要素という部分領域を単位に近似領域を定義し、要素ごとに得られた剛性方程式を要素の結合情報から全体系の連立代数方程式を組み立てるという方法論をとる。これに対して FCM では、解析対象と支配方程式の分割と再構築という点では FEM と同等であるが、「近似関数が定義される数学的な部分領域（数学領域）」と「支配方程式が満たされるべき物理的な部分領域（物理領域）」を分離して考えるという点で FEM とは大きく異なる。また FCM では、節点周りの部分領域に PU 条件を満たす近似関数（重み関数）を解析対象である物体領域とは独立に定義する。図-2 に示されるように、近似関数が定義されるこの部分領域を数学被覆といい、これと物体領域の共通領域を物理被覆という。そして、数学被覆同士の共通領域を数学要素といい、これを構成する数学被覆中心点は自由度が付加される節点となる。また、物理被覆同士の共通領域を物理要素といい、これらが FEM でいうところの要素に対応する。

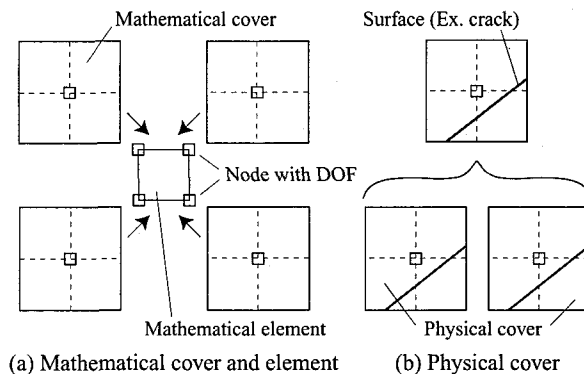


図-2 数学被覆と数学要素および物理被覆

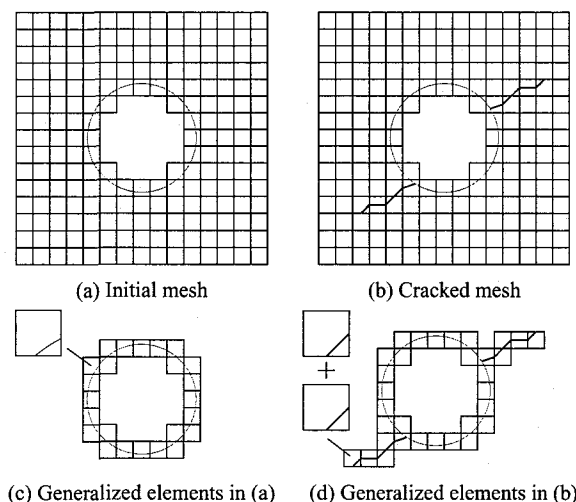


図-3 有限被覆メッシュと一般化要素

2.2 定型メッシュの利用と一般化要素

数学領域と物理領域の分離により、FCM におけるプリプロセスすなわちメッシュ生成は、図-3(a) に示されるように、解析対象の幾何形状の定義に加えて定型の格子メッシュを配置するだけでよい。さらに、ひび割れ進展問題においては、図-3(b) に示されるように、定型メッシュの空間的位置は変更することなく、ひび割れ進展に伴う幾何形状（物理被覆）の再定義をするだけで、従来の FEM で行われてきたリメッシュを必要としない。したがって、ひび割れの進展と同時に物理被覆の再定義を各解析ステップで行うことにより、これまで FEM でボトルネックとなっていたメッシュによる制約を受けない解析が実現される。

また FCM では、定型メッシュのみでモデル化が行えるものの、同図 (c)(d) に示されるように、数学要素内に部分的に物理領域を有する特殊な要素（一般化要素）を許容することになる。このような一般化要素は、ひび割れ進展を含む FCM の解析精度に対して大きく影響すると考えられるが、著者らの既往の研究において、このような一般化要素の近似性能が通常の有限要素とほぼ同等であることが確認されている^{17),18)}。

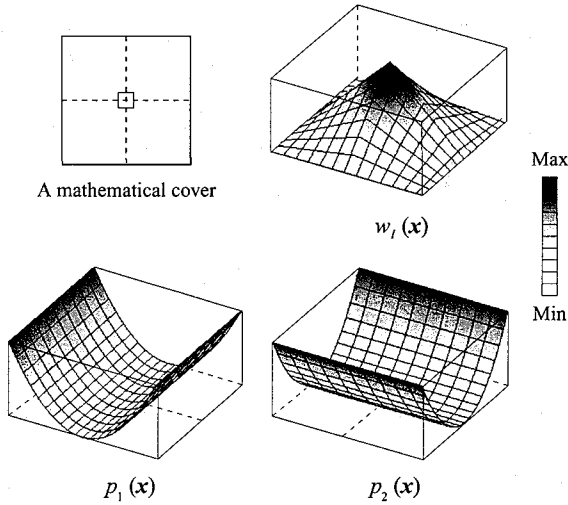


図-4 重み関数と被覆関数

2.3 変位の有限被覆近似

FCM では、解析対象領域 Ω とは無関係に配置された数学被覆 M_I において、次のような「重み関数」が定義される。

$$\begin{cases} w_I(x) \geq 0 & \text{for } x \in M_I \\ w_I(x) = 0 & \text{for } x \notin M_I \end{cases} \quad (1)$$

この重み関数は、要素を構成する際に次の PU 条件¹²⁾を満足するように設定しなければならない。

$$\sum_{I=1}^{N_M} w_I(x) = 1 \quad \text{in } x \in M = \bigcup_{I=1}^{N_M} M_I \quad (2)$$

ここで、 N_M は数学被覆総数である。一方、変位などの物理量は物理被覆 P_I ごとに次式のような「被覆関数」で近似する。

$$f_I^{[a]}(x) = \sum_{i=0}^m p_i(x) a_{iI} \quad \text{in } x \in P_I \quad (3)$$

ここで、 a_{iI} は定数係数の未知パラメータ、 $p_i(x)$ は任意の関数、 m は $p_i(x)$ の項数である。FCM では、変位を次式のように重み関数と被覆関数の積で表す。

$$u(x) \approx u^h(x) = \sum_{I=1}^{N_M} w_I(x) f_I(x) \quad (4)$$

$$= \sum_{I=1}^{N_M} w_I(x) \left(d_I + \sum_{i=1}^m p_i(x) a_{iI} \right) \quad \text{in } \Omega \quad (5)$$

なお、上式の第 2 式は被覆中心点、すなわち節点の変位ベクトルを $a_{0I} = d_I$ と置き換えて表したものである。以上のように、有限被覆近似においては被覆関数を適宜選定することで、精度の向上を図ることが可能であり、被覆同士の共通領域である要素で変位を近似することにより、通常の FEM と等価な近似となる。

次に、要素における有限被覆近似について述べる。本研究では、定型メッシュによる解析手法を構築するの

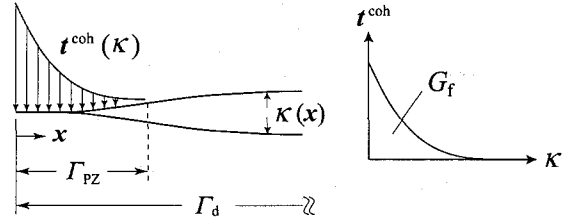


図-5 Cohesive crack モデル

で、正方形数学被覆を採用し、要素内の局所座標として自然座標系を定義する。まず、数学被覆内で定義される重み関数については、図-4 に示される FEM における双 1 次四辺形要素の形状関数を採用する。ここに、 ξ, η は自然座標、 $\bar{\xi}_J, \bar{\eta}_J$ は節点座標である。

$$\begin{cases} w_J = \frac{1}{4} (1 + \bar{\xi}_J \xi) (1 + \bar{\eta}_J \eta) \\ J = 1 \sim 4, \quad -1 \leq (\xi, \eta) \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

さらに、本研究では近似次数の高次化は被覆関数を用いて表現するものとし、次に示す 2 通りを設定する。

- 被覆関数に定数関数を採用する。この場合、変位の有限被覆近似は重み関数による有限要素近似と同等のものとなる。

$$p_i^0(x) = 0 \quad (7)$$

- 被覆関数に図-4 および次式で表される 2 次関数を採用する²²⁾。ここに、 $\bar{x}_J, \bar{y}_J$ は節点座標である。

$$p_i^Q(x) = \begin{bmatrix} (x - \bar{x}_J)^2 & (y - \bar{y}_J)^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

2.4 FCM によるひび割れ進展問題

(1) Cohesive crack モデルの適用

ひび割れ進展問題では、ひび割れ先端における力学挙動の取り扱いが重要であり、本研究では Cohesive crack モデルを導入する¹⁶⁾。

Cohesive crack モデルは、図-5 に示されるように、破壊進行領域（以下、FPZ）での結合力を考慮した非線形破壊力学に基づき、種々の準脆性材料に適用できるように一般化されたモデルである。具体的には、実験結果に基づいて決定した非線形な表面力-開口変位の関係を、FPZ に対する仮想的な不連続面 Γ_{PZ} に結合力として付与するものである。本研究では、Wells and Sluys²³⁾ が採用した次式で示される表面力-開口変位関係を与えるものとする。

$$\|t^{\text{coh}}\| - f_t \exp\left(-\frac{f_t}{G_f} \kappa\right) \leq 0 \quad \text{on } \Gamma_{PZ} \quad (9)$$

ここで、 t^{coh} は結合力、 f_t は引張り強度、 G_f は破壊エネルギー、 κ は載荷履歴における最大開口変位である。

(2) 支配方程式

図-6 に示されるように、ある状態においてひび割れなどの不連続境界 Γ_d が生じた脆性構造物 Ω の静的つり合い問題を考える。

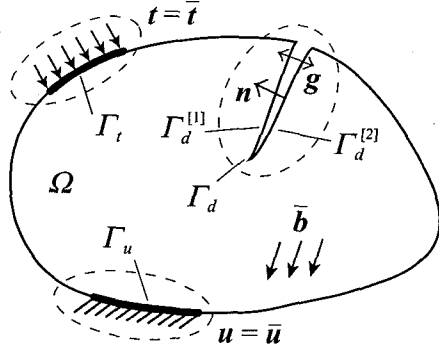


図-6 脆性材料の物理問題

このような構造体に関する線形弾性体の静的つり合い問題を考えると、平衡方程式・ひずみの適合条件式・構成式はそれぞれ次のように与えられる。

$$\nabla \cdot \sigma + \bar{b} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (10)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \{ \nabla u + (\nabla u)^T \} \quad \text{in } \Omega \quad (11)$$

$$\sigma = c : \varepsilon \quad \text{in } \Omega \quad (12)$$

ここで、 σ , ε , u はそれぞれ領域 Ω で定義される Cauchy 応力、微小ひずみ、変位ベクトル、 $\bar{b}$ は物体力を示している。

そして、ディリクレ境界 Γ_u とノイマン境界 Γ_t では、次の境界条件が課される。

$$u = \bar{u} \quad \text{on } \Gamma_u \quad (13)$$

$$t := \sigma \cdot n = \bar{t} \quad \text{on } \Gamma_t \quad (14)$$

ここで、 $\bar{\cdot}$ は既知量、 t は外向き単位法線ベクトル n で規定される面における単位面積当たりの表面力である。

不連続境界 Γ_d では、相対（ギャップ）変位 g を次式で規定する。

$$g := u^{[1]} - u^{[2]} + g_0 \quad \text{on } \Gamma_d \quad (15)$$

ここで、 g_0 は初期相対変位であり、ひび割れが新たに発生する場合は $g_0 = 0$ である。なお、不連続面が開口した際は、次の条件が満たされ自由境界として扱う。

$$\sigma^{[1]} \cdot n = \sigma^{[2]} \cdot n = 0 \quad (16)$$

(3) 弱形式のつり合い方程式

定型メッシュを用いた FCM では、解析対象の幾何形状に節点が配置されとは限らない。したがって、Lagrange 未定乗数 λ を用いて変位境界条件式 (13) を満足させることにすると、弱形式のつり合い方程式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} \nabla \delta u : c : \nabla u \, d\Omega + \int_{\Gamma_u} \delta u \cdot \lambda \, d\Gamma \\ &= \int_{\Omega} \delta u \cdot \bar{b} \, d\Omega + \int_{\Gamma_t} \delta u \cdot \bar{t} \, d\Gamma \\ &+ \int_{\Gamma_d} (\delta u^{[1]} - \delta u^{[2]}) \cdot t_d \, d\Gamma, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\int_{\Gamma_u} \delta \lambda \cdot (u - \bar{u}) \, d\Gamma = 0 \quad (18)$$

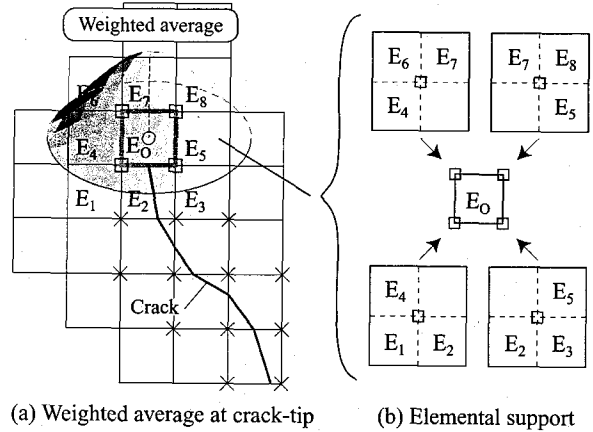


図-7 ひび割れ判定のための重み付き平均の詳細

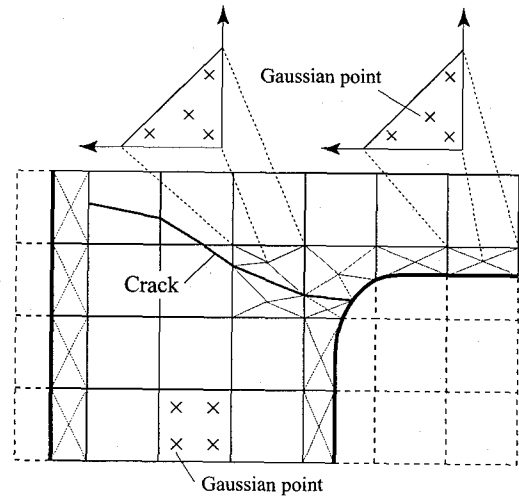


図-8 一般化要素に対する数値積分法

ここで、 Γ_d における表面力ベクトル t_d は次式で与えられ、式 (9) の Cohesive crack モデルを満足するように与えられる。

$$t_d = \sigma \cdot n = \begin{cases} t^{\text{coh}} & \text{on } \Gamma_{\text{PZ}} \\ 0 & \text{on } \Gamma_d \setminus \Gamma_{\text{PZ}} \end{cases} \quad (19)$$

逐次解析によって、ひび割れの進展を考慮しながら式 (17) と式 (18) を解くことにより、脆性構造体に対するひび割れ進展問題の解が得られる。なお、本解析では文献¹⁶⁾と同様のひび割れ進展解析アルゴリズムを採用する。

(4) ひび割れの発生

ひび割れ発生の判定基準は、「ある点の最大主応力 σ_1 が引張り強度 f_t に達したときに最大主応力方向と垂直な方向に不連続面が発生する」とする。ひび割れの発生後は、式 (9) に示した Cohesive crack モデルに従って、開口変位 κ に依存した結合力（表面力） t^{coh} が開口変位を抑える方向に作用するものとする。

ひび割れ発生を判定する最大主応力は、図-7 に示されるように、対象となる要素 E_0 を構成するすべての

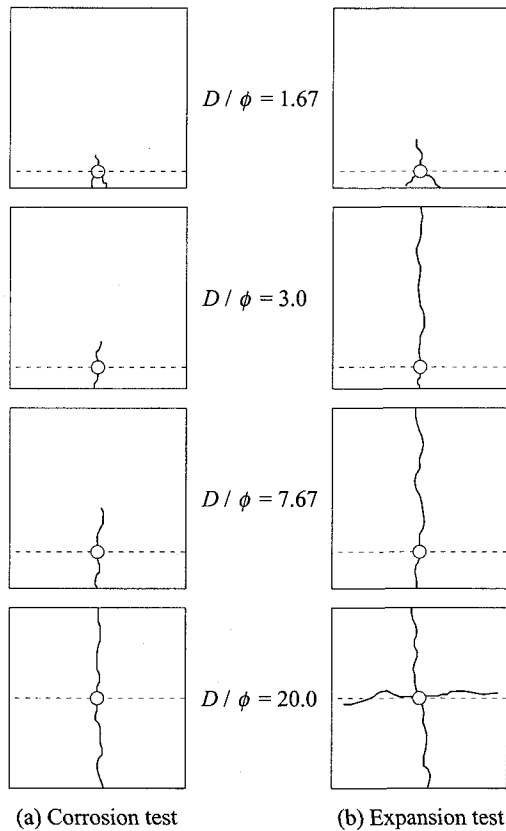


図-9 ひび割れモードの実験結果の模式図¹⁰⁾

物理被覆での応力を次式で与えられる重み付き平均した応力 $\bar{\sigma}$ から算出する²⁴⁾。

$$\alpha(r) = \begin{cases} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)^2 & \text{if } 0 \leq r \leq R \\ 0 & \text{if } R \leq r \end{cases} \quad (20)$$

$$\bar{\sigma} = \int_{V_w} \alpha(r) \sigma(r) dv \quad (21)$$

ここで、 V_w は平均化を行う領域、 R は対応する影響半径、 r は周囲の点までの距離、 $\sigma(r)$ は r での応力である。

また、ひび割れの先端に導入した Cohesive crack モデルにおいて、ひび割れの長さの次元を内包したパラメータである破壊エネルギー G_f が導入されているため、ひび割れ進展に対する要素寸法依存性は小さいことが確認されている¹⁶⁾。

(5) 一般化要素の数値積分

FCM によるひび割れ進展解析では、ひび割れが発生するたびに任意形状の一般化要素が定義されるため、数値積分法の取り扱いが重要となる。

本研究では、図-8 に示されるように、一般化要素の積分領域を三角形に分割し、面積座標に基づくガウス積分法を適用する。さらに、同図のようにひび割れ進展に伴って物理被覆が分断された際も、その解析ステップごとに物理領域を三角形に分割して正確に数値積分を行うものとする。

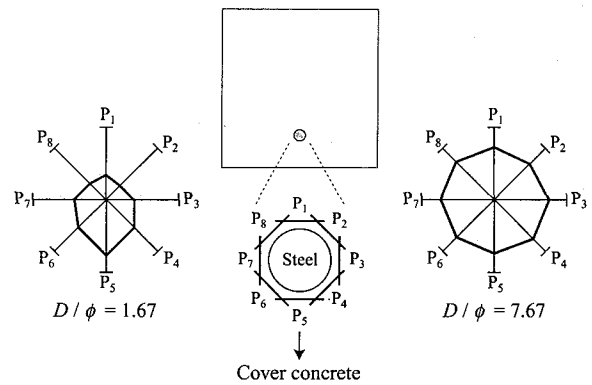


図-10 コンクリートひずみ分布の実験結果の模式図¹⁰⁾

3. コンクリートひび割れモードの再現解析

本節では、構築した FCM と定型メッシュによるひび割れ進展解析手法を用いて、これまで実験でのみ確かめられてきた鉄筋の腐食膨張に伴うコンクリートのひび割れモードの再現解析を試み、その発生メカニズムや劣化速度について考察する。

3.1 ひび割れモードの分類

松島・堤ら^{9),10)}は、塩害による鉄筋の腐食膨張に伴うコンクリートのひび割れモードに着目し、弾性論による簡易的な検証を行った後、電食実験と静的破砕材による膨張試験によって図-9 に示されるようにひび割れモードを再現した。そして、鉄筋径 ϕ とかぶりパラメータ D の比である D/ϕ を用いて、次のようにひび割れモードを定義した (図-1 参照)。

- $1.5 \leq D/\phi < 3.0$: 剥離ひび割れ, 図-1(b)
- $D/\phi \geq 3.0$: 鉄筋軸ひび割れ, 図-1(a)

ここで、 D は鉄筋中心からコンクリート表面までの距離の 2 倍であり、図-1 に示されるパラメータを用いて $D = 2t_p + \phi$ で表される。

3.2 コンクリートと鉄筋の腐食膨張モデル

松島・堤らの研究^{9),10)}によると、実験や現地調査においてコンクリート中の骨材がひび割れモードに影響することは論ぜられておらず、実験結果の図-9 を見ても、骨材の影響がひび割れモードの発現に直接関係するようには見受けられない。そこで本研究では、ひび割れモードの発現に対して骨材の影響は軽微であると考え、コンクリートを均質体と見なすことにした。

コンクリートのひび割れモードを再現するには、鉄筋の腐食膨張を的確にモデル化することが重要となる。図-10 は、松島・堤らの実験で観察された鉄筋周りのコンクリートひずみ分布の模式図である。これによれば、かぶりコンクリートが小さいとかぶり側に大きくひずみ、かぶりが大きくなると等方的にひずむと見てよく、腐食生成物の Young 係数が小さいという既往の研究²⁵⁾とも合致する。したがって、腐食膨張によってかぶりの違いを数値解析上で自然に表現するためには、鉄筋との界面での荷重制御法が妥当であると考えられるが、

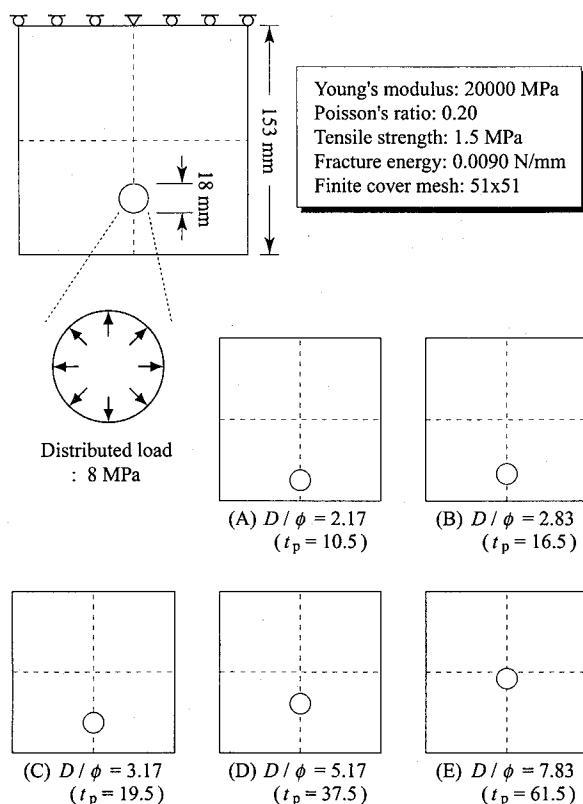


図-11 コンクリートひび割れモードの再現解析モデル

既往の研究においては強制変位や弾性体としての鉄筋への膨張ひずみを付加する解析が大多数を占めている。本研究では、腐食生成物の Young 係数がコンクリートに比べて十分小さいことや図-9の実験結果を考慮して、鉄筋表面からコンクリート内側に向く法線方向に分布荷重を与えることによって鉄筋の腐食膨張を表現することにする。

3.3 解析対象と解析条件

コンクリートひび割れモードの再現に用いる解析モデルは、図-11に示される構造形式とし、かぶりを変化させた5ケースを対象とする。ここで、(A)、(B)は剥離ひび割れを、(C)、(D)、(E)は鉄筋軸ひび割れを想定したモデルであり、すべてにおいて重力は考慮せず平面ひずみ状態を仮定した。本解析では純粋なひび割れモードを再現するために、5つのモデルすべてにおいて、鉄筋形状や解析条件をまったく同一とした。特に、鉄筋周りの一般化要素の形状まで同一であり、かぶりすなわち鉄筋位置のみが純粋に異なるものであることを強調しておく。また付録Iでも示すように、要素寸法や近似次数による影響は軽微であることを確認している。本解析では51x51メッシュと低次の有限被覆近似を採用することとした。なお、本解析は荷重制御法であるため、ひび割れが外部境界に達して解析が破綻する寸前までを評価の対象とする。

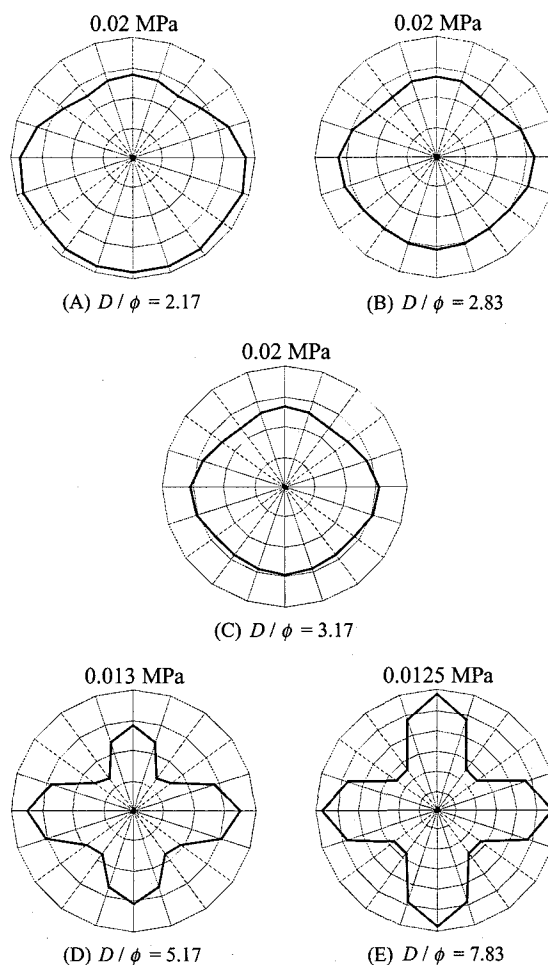


図-12 鉄筋周りのひび割れ判定応力の分布

3.4 線形解析による簡易評価

ひび割れ進展を伴う非線形解析を行うに先立ち、線形解析による簡易的な予測を目的として、荷重ステップ1/400における鉄筋周りのひび割れ判定応力の分布を図-12に示す。 D/ϕ が大きくなるにつれて応力分布が十字形に近づくことが示されており、鉄筋軸ひび割れを起こす変形状態に推移していくことが分かる。モデル(D)と(E)の結果から、鉄筋軸ひび割れを示すがほぼ予想されるが、モデル(A)~(C)がどのようなひび割れモードを示すかは線形解析だけで判断できないことが分かる。

3.5 ひび割れ進展解析結果と考察

5ケースともに同一の解析条件にて、ひび割れ進展を含む非線形解析を行った。ひび割れ進展の結果を図-13に、ひび割れモードの発現時における変形・応力分布を図-14に示す。ここで、本解析ではすべてのモデルに対して同じ荷重増分を与えているので、図中の荷重ステップは、腐食膨張の開始を時刻 $t = 0$ としたときの時間の経過とみなすことができる。

まず、全体を通して、 $D/\phi = 3$ 付近を境界に(A)、(B)では剥離ひび割れを、また(C)、(D)、(E)では鉄筋軸ひび割れを、

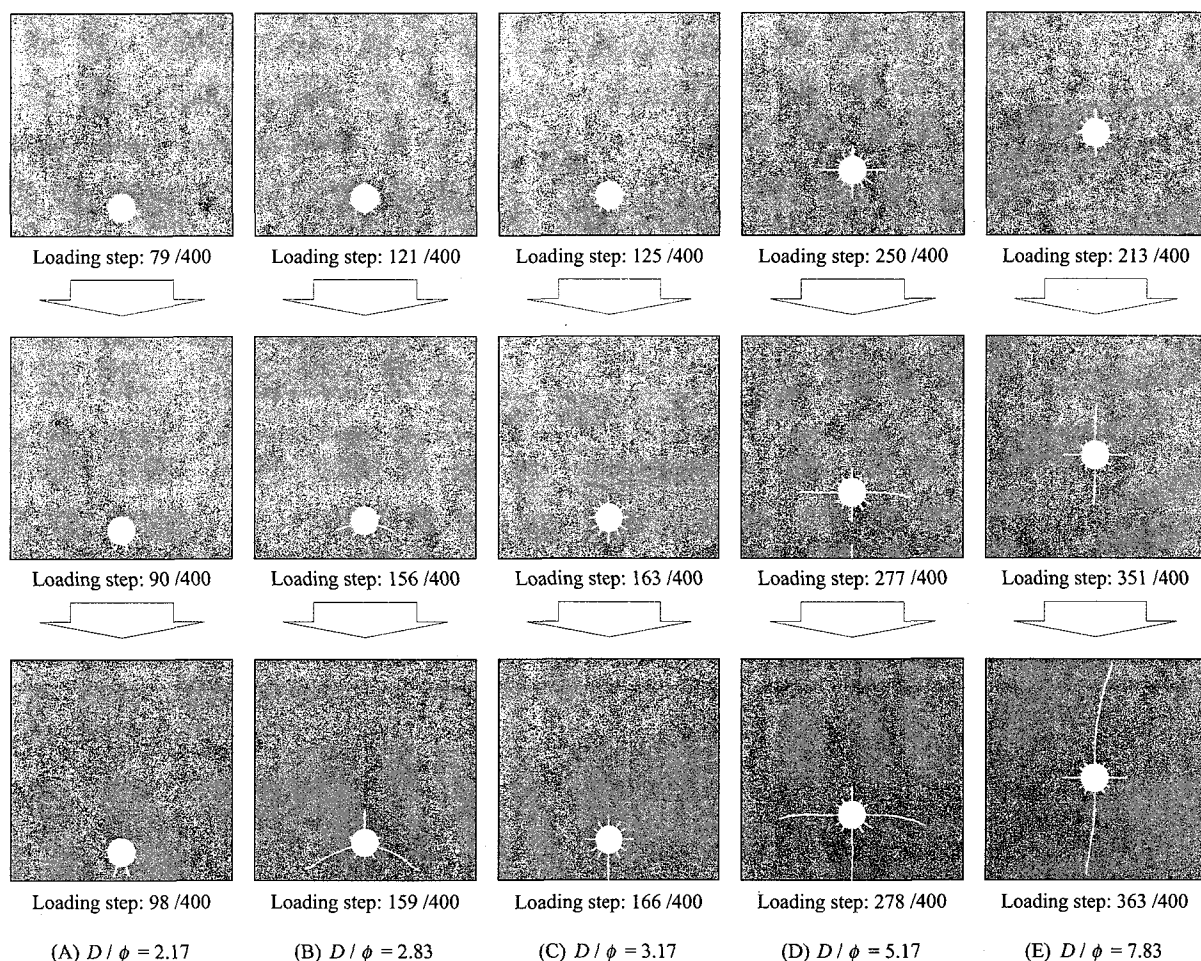


図-13 各モデルにおけるひび割れの進展

び割れを形成しており、松島・堤らが実験で確かめたひび割れモードを再現されている。また、(D)と(E)では線形解析で鉄筋軸ひび割れを簡易的に予測した通りに鉄筋軸ひび割れを形成したのに加えて、線形解析では判断できなかった(A)~(C)についてもこの非線形解析によってひび割れモードを分類できている。本解析では等方的に腐食膨張が発生すると仮定しているの、解析初期の段階では全体を通して放射状にひび割れが複数発生するが、その後はかぶりの影響を反映したひび割れのモードが選択的に発展する現象が適切に捉えられている。そして、これらのひび割れ形成は、実験結果を示した図-9と良好な一致を見ることができる。

次に、剥離ひび割れを示した図-13(A)(B)を見ると、かぶりの大きいモデル(B)の方が(A)よりも剥離の幅が広がっている。これは、剥離ひび割れを起こすかぶりの範囲内では、かぶりが大きくなるほど剥落するコンクリート量が増すことを意味する。また、時間の経過と同義である荷重ステップを見ると、かぶりの小さいモデル(A)の方が早期にひび割れがコンクリート表面に達している。したがって、かぶりが小さいほどかぶりコンクリートが剥落する時期が早く、塩害の劣化機構が促進されやすくなるという判断が可能である。

他方、鉄筋軸ひび割れを示した図-13(C)~(E)を見ると、剥離ひび割れのケースと比較して、ひび割れの発生機構が異なっている。かぶりが小さいモデル(C)では鉛直下向き(かぶり方向)に主にひび割れが進展するのに対して、最もかぶりの大きいモデル(E)ではかぶりの反対側にも鉛直上向きにひび割れが進展する。これは鉄筋周辺のコンクリートによる拘束が等方的になるからである。一方、これらの中間に位置するモデル(D)では、はじめに水平方向にひび割れが進展した後、コンクリート表面がはらみ出し、鉄筋とコンクリート表面の両方向から軸ひび割れが形成される。さらに、このかぶりのケースにおいては、鉄筋の軸ひび割れと同時に図-1(c)の水平剥離ひび割れをも伴う可能性が示され、劣化の促進に加えてかぶりコンクリートの剥落も併発することが予見される。

また、ひび割れ形成の発生時期については、かぶりが大きいほどひび割れ発生時期が遅くなっており、基本的にはかぶりに大きく影響すると考えられる。ただし、モデル(D)では荷重ステップが277付近においてひび割れ形成が急速に進むのに対して、モデル(E)では(D)よりも段階的にひび割れ形成が進んでおり、ひび割れ形成のメカニズムの相違も劣化の進行速度に影響する。

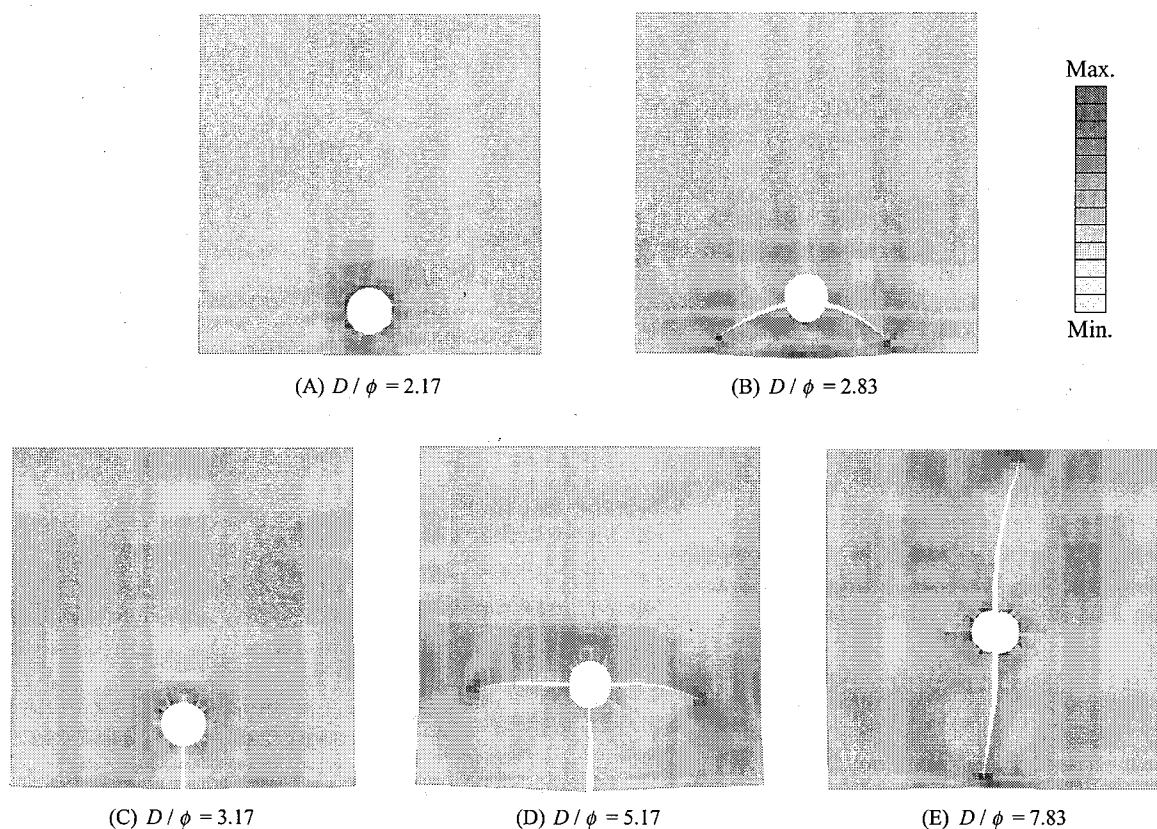


図-14 コンクリートひび割れモード発現時における変形図と応力分布

響すると考えられる。したがって、劣化の進行を予測する際には、かぶりの違いなどの構造形式のみを単純に用いるのではなく、ひび割れ進展などの力学現象や力学的考察も考慮する必要があると考えられる。

本節では、鉄筋の腐食膨張に伴うコンクリートひび割れモードを再現し、さらにその発生機構や進展時期について考察した。特に、本例題においては「鉄筋位置」といった幾何学的情報のみで、ひび割れの形成や進展時期が大きく異なることを指摘した。塩害劣化においては、このようなひび割れ経路やひび割れ進展時期の相違は、言うまでもなく重要案件であり、本研究で再現したような力学挙動を適切にモデル化し得る解析手法を導入することによって、より高精度なコンクリートの劣化予測技術を築き上げることができる。

4. おわりに

塩害のようなコンクリートの劣化予測を議論する際には、化学物質の単純な移動はもとより、力学的な膨張作用によるコンクリートのひび割れ進展は、構造物そのものの劣化や化学物質の拡散特性の向上や拡散経路の変化にとって軽視できない重要な現象である。それにもかかわらず、これまで精緻な力学モデルに立脚した数値解析的研究は少なく、なかでも鉄筋の腐食膨張に伴うコンクリートひび割れ挙動を適切に表現した例はなかった。

本研究では、コンクリートの劣化におけるひび割れ

形成の重要性に着目し、解析結果がメッシュに依存する従来の解析法ではひび割れ進展を適切に表現できないと考え、FCMと定型メッシュによるメッシュ依存の少ないひび割れ進展解析手法をコンクリートの解析に適用した。そして、鉄筋の腐食膨張に伴うコンクリートのひび割れモードの変化をはじめて数値解析で再現することに成功したことに加え、塩害をはじめとするコンクリートの劣化予測技術の向上に貢献しうる知見を得ることができた。

謝辞

東北大学大学院工学研究科の久田 真 助教授・秋山 充良 助教授には、コンクリートに関する資料提供や研究へのご助言をいただきました。ここに記して感謝いたします。

付録Ⅰ ひび割れ進展解析の性能評価

FCMを用いたひび割れ進展解析における要素寸法依存性を調査する。解析対象は、図-15に示されるような円孔穴あき板モデルである。同図に示される定型メッシュ・材料パラメータを設定し、平面ひずみ状態を仮定して変位制御試験を行う。なお、本例題においては、メッシュ数 51×51 と式(8)で与えた高次の有限被覆近似のケースを加えて、近似次数による影響も調べることにする。

解析結果として、各ケースの荷重-変位関係を図-16

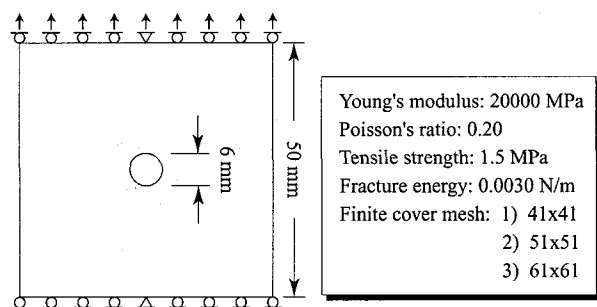


図-15 要素寸法依存性の検討に用いる円孔モデル

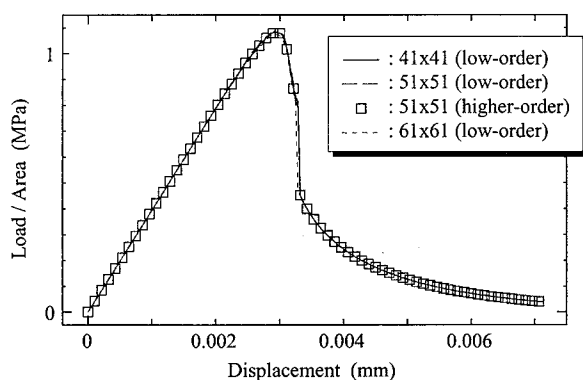


図-16 荷重-変位関係

に、ひび割れ形成と応力分布の進展を図-17 に示す。本研究では、ひび割れ発生判定に対して重み付き平均応力を用い、ひび割れ先端の力学挙動に対して Cohesive crack モデルを導入したことにより、メッシュ分割数を変化させても要素寸法に依存しない結果が得られている。また、高次の有限被覆近似を用いても結果に差異はなく、低次の有限被覆近似で十分に妥当なひび割れ進展解析が行えることを示している。

参考文献

- 1) Maekawa K., Ishida T., Kishi T. : Multi-scale Modeling of Concrete Performance — Integrated Material and Structural Mechanics, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.1, pp.91-126, 2003.
- 2) 石田哲也, 前川宏一: 物質・エネルギーの生成・移動と変形・応力場に関する連成解析システム, 土木学会論文集, No.627/V-44, Vol.44, pp.13-25, 1999.
- 3) 嶋 毅, 佐伯竜彦, 長瀧重義: コンクリート中の物質移動に対する LBM の適用への基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, pp.817-822, 2001.
- 4) 山田義智, 大城 武: 破壊力学に基づく FEM による縦ひびわれ発生腐食量の解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.15, pp.133-138, 1993.
- 5) 元 路寛, 関 博: 離散ひび割れモデルに基づく鉄筋腐食によるひび割れ幅に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, pp.1033-1038, 1999.
- 6) 山城建樹, 松原 仁, 伊良波 繁雄, 富山 潤: 鉄筋の腐食

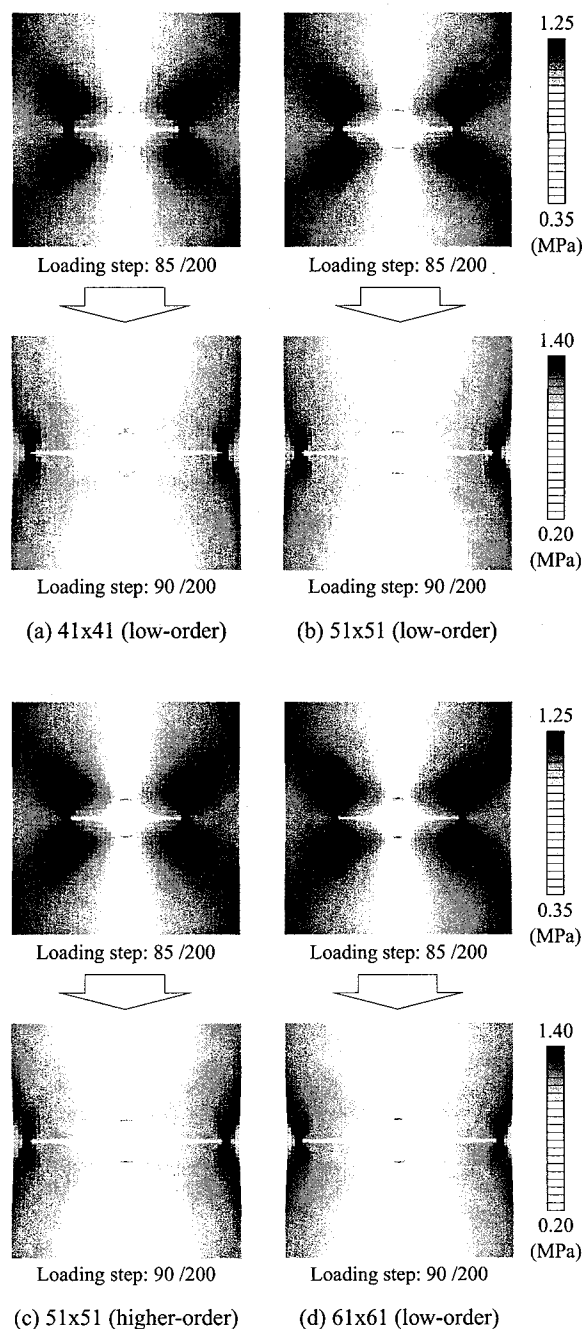


図-17 ひび割れ形成を含む変形図と von-Mises 応力分布

- 膨張によるコンクリートのひび割れ進展の FMM 解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, pp.133-138, 2004.
- 7) 野城良祐, 中村 光, SRISOROS WORAPONG, 田邊忠顕: 塩分浸透による鋼材腐食を考慮した RBSM 解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, pp.897-902, 2004.
 - 8) Farid UDDIN A.K.M., Ohtsu M. : Cracking mechanics due to corrosion in concrete identified by AE and BEM, *J. Materials, Conc. Struct. Pavements, JSCE*, No.760/V-63, pp.261-268, 2004.
 - 9) 松島 学, 堤 知明, 関 博, 松井邦人: 鉄筋の腐食膨張によるひびわれモード, コンクリート工学年次論文集, Vol.15,

- pp.133–138, 1993.
- 10) 堤 知明, 松島 学, 村上祐治, 関 博: 腐食ひび割れの発生機構に関する研究, 土木学会論文集, No.532/V-30, Vol.30, pp.159–166, 1996.
 - 11) Belytschko T., Lu YY., Gu L.: Element free Galerkin methods, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol.37, pp.229–256, 1994.
 - 12) Babuška I., Melenk JM.: The partition of unity method, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol.40, pp.727–758, 1997.
 - 13) Shi GH.: Manifold method of material analysis, *Transactions of the 9th Army Conference On Applied Mathematics and Computing, Report*, No.92–1, U.S. Army Research Office, 1991.
 - 14) 大坪英臣, 鈴木克幸, 寺田 賢二郎, 中西克嘉: 被覆単位で精度をコントロールするマニフォールド法 (FCM), 計算工学講演会論文集, Vol.2, pp.399–402, 1997.
 - 15) Terada K., Asai M., Yamagishi M.: Finite cover method for linear and nonlinear analyses of heterogeneous solids, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol.58, pp.1321–1346, 2003.
 - 16) 石井建樹, 寺田 賢二郎, 京谷孝史, 岸野佑次: 界面要素を用いた有限被覆法に基づく破壊進展解析法の開発, 土木学会論文集, No.794/I-72, pp.213–225, 2005.
 - 17) 車谷麻緒, 寺田 賢二郎: 有限被覆法における一般化要素の近似性能に関する基礎的研究, 日本計算工学会論文集, pp.127–136, 2003.
 - 18) Terada K., Kurumatani M.: Performance assessment of generalized elements in the finite cover method, *Finite Elements in Anal. Des.*, Vol.41, pp.111–132, 2004.
 - 19) Belytschko T., Parimi C., Moës N., Sukumar N., Usui S.: Structured extended finite element methods for solids defined by implicit surfaces, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol.56, pp.609–635, 2003.
 - 20) Budyn É., Zi G., Moës N., Belytschko T.: A method for multiple crack growth in brittle materials without remeshing, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol.61, pp.1741–1770, 2004.
 - 21) Strouboulis T., Babuška I., Copps K.: The design and analysis of the generalized finite element method, *Comput. Methods. Appl. Mech. Engrg.*, Vol.181, pp.43–69, 2000.
 - 22) Taylor RL., Zienkiewicz OC., Oñate E.: A hierarchical finite element method based on the partition of unity, *Comput. Methods. Appl. Mech. Engrg.*, Vol.152, pp.73–84, 1998.
 - 23) Wells GN., Sluys LJ.: A new method for modelling cohesive cracks using finite elements, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol.50, pp.2667–2682, 2001.
 - 24) Bažant ZP., Planas J.: *FRACTURE AND SIZE EFFECT in Concrete and Other Quasibrittle Materials*, CRC, 1998.
 - 25) 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集, Vol.14, pp.751–756, 1992.

(2006 年 4 月 1 日受付)