

異形鉄筋の準微視的付着作用を考慮した
鉄筋コンクリートの引張硬化のシミュレーションNUMERICAL SIMULATION OF TENSION STIFFENING IN REINFORCED CONCRETE
CONSIDERING DIRECT INTERACTION AT STEEL-CONCRETE INTERFACE

劉 玉擎*・彦坂 熙**

Yuqing LIU and Hiroshi HIKOSAKA

*工博 九州大学助手 工学部建設都市工学科 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)

**工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科 (同上)

A discrete crack model based on a rigid particle-spring system is used to simulate tension stiffening in reinforced concrete. Reinforced concrete prisms with square cross section are analyzed using two-dimensional, plane stress analytical models. An axial, tensile force is exerted on the reinforcing bar at the ends of each specimen. Special attention is given to modeling the lug geometry on reinforcing bars and the direct interaction at the steel-concrete interface, so that the micro-behavior in the vicinity of a deformed bar can be well simulated. The following results are given and discussed: 1) the load-displacement responses of specimens with different cover thickness; 2) the extent of concrete fracture in each specimen at different stages in the loading history; 3) the damage distributions of interfacial springs in concrete, which simulate the cracking patterns; 4) the distribution of steel stresses and bond stresses corresponding to the damage condition of concrete.

Key Words: rigid body-spring model, reinforced concrete, tension stiffening

1. 序論

鉄筋コンクリート (以下、RC と略す) 構造の設計では、終局限界状態の耐力のみならず降伏変位や終局変位などの算定精度を上げることが、近年重要となってきた。使用限界状態の検討の中心をなすのも、部材の耐久性に密接に関連するひび割れ幅および変位・変形の算定である。RC 構造の複雑な変形機構を明確にして解析精度を向上させるためには、引張を受ける RC 部材のひび割れ挙動、鉄筋とコンクリート間の付着すべり、およびこれらに基づく引張硬化 (tension stiffening) 現象の定量的評価を合理的に行う必要がある。

RC 部材の曲げひび割れの分散性や引張硬化挙動に最も重要な役割を果たすのは、鉄筋とコンクリート間の付着作用である。Wu ら¹⁾は、仮定した比較的単純な付着応力-すべり関係に基づく引張硬化のマクロモデルを定式化し、これを 2 次元応力場に拡張している。付着すべりを考慮する FEM 解析などでは、コンクリート中に埋め込まれた鉄筋の引抜き試験から得られる付着応力-すべり関係をリンク要素に組み込むモデルが多く用いられる²⁾。また、リンク要素を用いない FEM 解析として、鉄筋を取りまくコンクリート層要素の変形挙動から付着すべりを巨視的に評価する Rots³⁾の研究がある。しかし、付着作用

には鉄筋の径、表面形状、配筋状態、およびコンクリートの強度、かぶり厚さ、横拘束効果などが複雑に影響し、ひび割れの近傍では付着性能が低下するため、上記のような付着応力-すべり関係の現象論的モデルの適用には自ずから限界がある。本研究の特色の一つは、異形鉄筋の付着機構と付着性能が鉄筋表面のふしに大きく依存することに着目して、ふしとコンクリートのかみ合いによるすべり抵抗、鉄筋周辺のコンクリートの変形による鉄筋締め付け作用および摩擦抵抗などをそれぞれ物理的に考慮できる、付着作用の準微視的モデルを採用する点にある。

本研究では、引張を受ける RC 部材に離散的に生じる主ひび割れの間隔や幅を解析において定量化するために、連続体力学に立脚する FEM 解析でなく剛体-パネ系の不連続体力学モデルを用いる。コンクリートはモルタルマトリックス中に不規則な形状の細・粗骨材がランダムに混入された非均質材料であり、その影響を受けて実際のひび割れ進展経路は極めて不規則になる。このことを考慮するとともに、コンクリートの規則的な要素分割によるひび割れ進展のメッシュ依存性を避けるために、Voronoi 分割により細骨材粒レベルにまで細分されたランダム多角形要素を用いて解析を行うことも、本研究の特色である。これにより、小さな応力レベルでの微細ひび割れの発生から、

主ひび割れの貫通、鉄筋の降伏に至る RC 部材の引張硬化の全過程を準微視的にシミュレートすることができる。

本論文の計算例では、1 本の異形鉄筋が正方形断面の中心に埋め込まれた RC 柱状供試体の両引き試験をシミュレートする。曲げを受ける RC 部材にひび割れが生じた後の引張領域は両引き供試体の性状と類似しており、両引き試験は RC 部材の引張硬化現象を説明する最も基本的なものである。RC 部材の曲げひび割れ間隔を支配する要因の第 1 をコンクリートのかぶり厚さとするのが定説であることから、かぶりを鉄筋径の 1～3 倍に変えた解析モデルについて、荷重－変位関係、ひび割れ分布とその進展状況、鉄筋の平均応力－平均ひずみ関係、鉄筋降伏後の局所ひずみと応力の分布、コンクリートの損傷にともなう局所付着応力分布の変化などを詳細に比較し、異形鉄筋を用いた RC 部材の複雑な変形機構と引張硬化現象の解明に有用と思われる資料を提示する。

2. 異形鉄筋を用いた RC 部材の離散化モデル

2.1 異形鉄筋の要素離散化

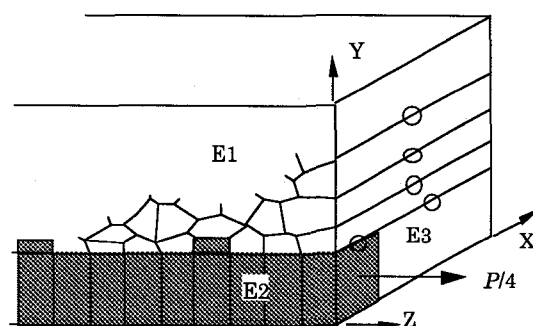
異形鉄筋の両引き試験には、図－1 に示すコンクリート正四角柱の中央部に異形鉄筋が 1 本配置された供試体がよく用いられる。図－2 は対称性を考慮して供試体の 1/4 の領域をモデル化したものである。異形鉄筋については表面突起の寸法、形状などの許容限度が JIS G 3112 に規定されている。表面突起のうち、鉄筋軸方向の突起をリブ、軸方向以外の突起をふしと呼び、ふしは全長にわたりほぼ一定間隔に同一形状・寸法を持って分布している。ふしの間隔・高さは異形鉄筋とコンクリートとの付着特性に大きく影響し、ふしは適切な形状となるように最終の圧延過程で付けられるものである。

本研究では異形鉄筋の個々のふしの付着抵抗作用に着目し、リブを考慮せず、ふしを軸方向に直交する横ふしとする。ふし前面の鉄筋軸に対する角度は 45° 以上であれば、その角度は付着特性にほとんど影響しないことが報告されている⁴⁾ ので、ふし前面と鉄筋軸との角度を 90° とし、ふしを四角形要素で表わす。鉄筋本体は全長にわたり

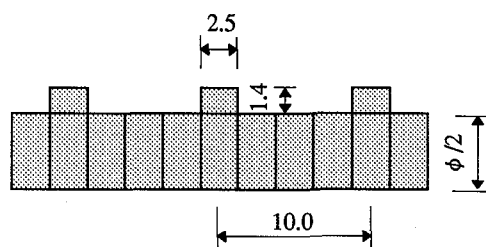
一定寸法の四角形要素に分割し、それぞれふし要素と別の要素で表現する。図－3 は $\phi 16\text{mm}$ の異形鉄筋の要素分割例であり、ふしの形状は幅 2.5mm、高さ 1.4mm、ふしの間隔は 10mm とする。鉄筋の円形断面を四角形断面に等置することにより、鉄筋本体およびふし要素の奥行きの厚さは $\pi\phi/8$ (ϕ : 鉄筋径) とする。

2.2 コンクリートの要素離散化

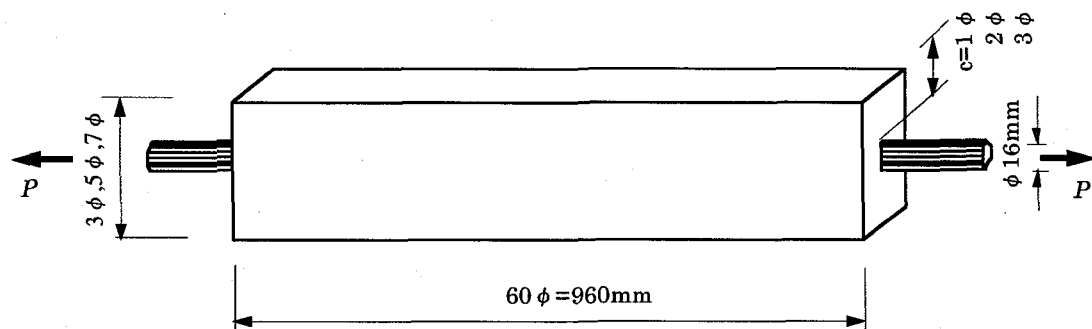
数値解析におけるひび割れの進展がメッシュ分割形状に依存することを避けるため、ランダムな形状の多角形要素を発生させるポロノイ分割手法^{5) 6)} を用いる。鉄筋上部のかぶりコンクリートの要素分割については、ポロノイ分割によりランダムな多角形要素を発生させ、要素の寸法はふしの大きさに近い 1～3 mm のオーダーとする。



図－2 全体供試体の 1/4 の領域のモデル化



図－3 $\phi 16$ の異形鉄筋要素分割例(単位: mm)



図－1 コンクリート正四角柱の供試体

供試体の奥行きモデル化については、図-2に示すように鉄筋上部のかぶりコンクリートを奥行き（X軸方向）の厚さを持つ単層要素（E1）とし、鉄筋位置では、角柱体とする鉄筋またはふし要素（E2）、およびその背後にあつて鉄筋またはふし要素と同一の平面形状を持つコンクリート（E3）からなる2層要素を設ける。ただし、前面の鉄筋またはふしと背後のコンクリートの2層要素間にはバネを配置せず、この2層要素間（E2, 3）の力はかぶりコンクリート要素（E1）を介して伝達させることとする。

3. 数値解析法

3.1 剛体-バネ系解析モデル

本研究では、2次元の剛体-バネ系モデル⁷⁾をシミュレーションモデルとして用いる。剛体-バネ系モデルは、固体が载荷の極限でいくつかのブロックからなるリンク機構を形成して剛体運動を起し、不安定になってゆく実験的事実に着目して、非線形問題を研究する離散系不連続体力学モデルの1つである。このモデルでは要素自身を剛体とし、各要素境界面上に体積変化およびせん断変形に抵抗する2種類の分布バネを設置し、要素内の仕事の代わりに要素境界面上に集中化された表面力の仕事を用い、変形エネルギーを評価する。

ここでは、鉄筋およびコンクリートをそれぞれ均質な微小構造要素からなる集合体であるとみなし、これらの微小構造要素を剛体として、剛体要素間に分布する垂直バネとせん断バネからなるバネ系を設ける。隣接する2個の剛体要素間のバネ剛性マトリックス $[k]$ は、要素厚さを t 、要素境界面の長さを b とするとき、次の線積分により求められる。

$$[k] = t \cdot \int_b [B]^T [D] [B] ds \quad (1)$$

ここに、 $[B]$ は要素重心の3自由度の剛体変位 (u, v, θ) を、隣接する2要素境界面の垂直およびせん断方向相対変位 (δ_n, δ_s) と関連づける 2×6 のマトリックス、また

$$[D] = \begin{bmatrix} k_n & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix}$$

ここに、 k_n, k_s は隣接する2要素境界面の垂直およびせん断方向のバネ定数を表わし、材料特性および応力状態により決定される。

式(1)の 6×6 のバネ剛性マトリックス $[k]$ をもとに、各要素の剛体変位 (u, v, θ) をパラメータとして全体剛性マトリックス $[K]$ を組み立てる。本研究では、次の増分形剛性方程式を用いる。

$$[K] \{\Delta u\} = \{\Delta f\} + \{f_r\} \quad (2)$$

ここに、 $\{\Delta u\}$ 、 $\{\Delta f\}$ はそれぞれ変位増分および荷重増

分ベクトル、 $\{f_r\}$ は前ステップにおける残差力ベクトルである。求解法としては、コンクリートのひび割れおよび鉄筋降伏以降の非線形挙動を解析できるように、変位制御の増分法を用いる。

3.2 材料の力学モデルの設定

隣接する2個の剛体要素間には図-4のような3種の異なるバネの組合せがあり、各組合せにおける $[D]$ マトリックスの計算や破壊条件などは結合している要素の材料特性により異なる。鉄筋、コンクリートおよび鉄筋とコンクリート間接合面の力学モデルについて、それぞれの設定方法を述べる

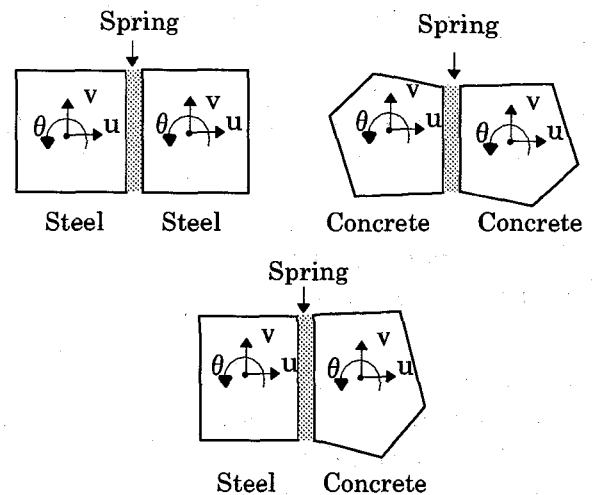


図-4 3種の異なるバネの組合せ

(1) 鉄筋

降伏前の鉄筋は平面応力状態とし、鉄筋要素の境界面に分布する垂直バネとせん断バネのバネ定数 k_{ns}, k_{ss} の計算には次式を用いる。

$$k_{ns} = \frac{E_s}{(1-\nu_s^2)(h_1+h_2)} \quad (3)$$

$$k_{ss} = \frac{E_s}{2(1+\nu_s)(h_1+h_2)}$$

ここに、 h_1, h_2 は隣接する2要素の重心から要素境界面上に下した垂線の長さ、 E_s, ν_s は鉄筋のヤング係数とポアソン比である。

本解析で取り扱うような引張破壊の問題に限定した場合、鉄筋の降伏条件には次式を用いる。

$$\sigma_s = f_y \quad (4)$$

ここに、 σ_s, f_y は鉄筋要素境界面の垂直応力および鉄筋の降伏強度である。降伏後の垂直バネの k_{ns} は $0.01k_{ns}$ とし、せん断バネの k_{ss} は変化しないものとする。

(2) コンクリート

a) ひび割れ発生前

コンクリートは、ひび割れが発生しない限りすべて線形弾性体とする。要素の境界面に分布する垂直バネとせん断バネのバネ定数 k_{nc} , k_{sc} は次式で与える。

$$\begin{aligned} k_{nc} &= \frac{E_c}{(h_1 + h_2)} \\ k_{sc} &= \frac{E_c}{2(1 + \nu_c)(h_1 + h_2)} \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 E_c , ν_c はコンクリートのヤング率とポアソン比である。

b) ひび割れ発生条件

本研究では、コンクリートの破損発生条件 (図-5) を次式で与える。

$$\begin{aligned} \tau_c &= \tau_o - \sigma_c \tan \alpha \quad (\sigma_c \leq 0) \\ \tau_c &= \tau_o(1 - \sigma_c / f_t) \quad (0 < \sigma_c \leq f_t) \end{aligned} \quad (6)$$

ここに、コンクリートのせん断強度 τ_o は $0.14f_c$ (f_c : コンクリートの圧縮強度) とし、内部摩擦角 α は 54° とする⁸⁾。 f_t はコンクリートの引張強度である。コンクリート要素境界面の垂直応力 σ_c およびせん断応力 τ_c が図-5 の斜線領域に入った場合には、最も単純なモデルとして、垂直バネの剛度 k_{nc} は保持させ、せん断バネの剛度 k_{sc} を零に低減させる。

ひび割れの発生は次式にて判定する。

$$\sigma_c = f_t \quad (7)$$

すなわち、垂直応力 σ_c が引張強度 f_t を超えたときにひび割れが発生することとする。

c) ひび割れ発生後

本研究では解析結果の要素寸法依存性を解消し、またいわゆる強度の寸法効果を表現するために、ひび割れ発生後

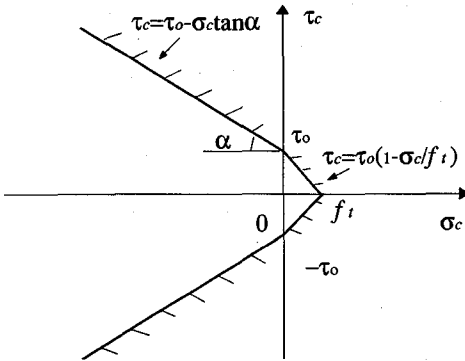


図-5 コンクリートの破損条件

のコンクリートは応力を直ちに0とせず、引張軟化を考慮した破壊力学的手法を導入する⁹⁾。コンクリートの引張軟化曲線は、1軸引張試験時に得られるひび割れ幅 $w(\sigma_c)$ とひび割れ間伝達応力 σ_c の関係をモデル化したもので、曲線下の面積が破壊エネルギー G_F を表わす。ここでは、普通強度コンクリートに比較的適合のよい 1/4 モデルの引張軟化曲線¹⁰⁾ (図-6) を採用し、ひび割れ面の応力 σ_c とひび割れ幅 $w(\sigma_c)$ の関係を次式で表す。

$$\sigma_c = \frac{\delta_{nc} - w(\sigma_c)}{h_1 + h_2} E_c \quad (8)$$

ここに、 δ_{nc} は隣接する2要素境界面上の midpoint における垂直方向の応力および相対変位であり、 h_1 , h_2 は隣接する2要素の重心から要素境界面上に下した垂線の長さを表わす。

式(8)で示したようにひび割れ面の垂直応力 σ_c は、バネの剛性と関係なく全応力 σ_c ~ 全相対変位 δ_{nc} の関係で与え、全相対変位 δ_{nc} と引張軟化モデルに基づいて計算する。全相対変位 δ_{nc} は式(2)の増分形方程式を解くことにより得た変位増分から求められる。ひび割れ面の要素境界面の垂直バネとせん断バネのバネ定数 k_{nc} , k_{sc} は次式のように計算する。

$$\begin{aligned} k_{nc} &= \frac{\lambda E_c}{h_1 + h_2} \\ k_{sc} &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

ここに、 λ は垂直バネの剛度 k_{nc} の低減係数を表わし、次式で与えられる。

$$\lambda = \frac{\sigma_c}{\delta_{nc} E_c} (h_1 + h_2)$$

σ_c , δ_{nc} は前収束計算ステップでの垂直応力および相対変位である。ひび割れ面のせん断剛度は零とし、ひび割れ面には全くせん断応力が発生しないと仮定する。また、垂直応力が除荷する場合には、原点指向型として除荷させるが、せん断剛度は回復しないものとする。

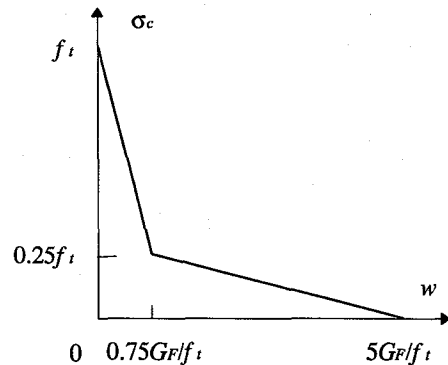


図-6 コンクリートの引張軟化モデル

(3) 鉄筋とコンクリートの接合面

鉄筋とコンクリートの間の付着作用には、接着、摩擦および機械的抵抗があると考えられ、いわゆる付着応力とは、鉄筋の単位表面積あたりに働くこれら3つのすべり抵抗力の組合せをマクロに取り扱ったものである。接着作用はセメントペーストと鉄筋表面との間の化学的粘着作用によるもので、鉄筋とコンクリート間のわずかなすべりが生じれば消失し、その後は摩擦作用が始まる。摩擦作用は鉄筋表面の微細な凹凸状態や直圧力などに大きく影響され、摩擦係数は表面粗さにより 0.3~0.6 の範囲にある。異形鉄筋の付着は、接着、摩擦の2つの作用のほかに、主にふしとコンクリートとのかみ合いによる機械的抵抗に大きく依存している。鉄筋コンクリートの FEM 解析などでは、これら3つの付着作用を組合せた現象論的モデルとして、付着応力-すべり曲線がよく用いられる。

本研究では、異形鉄筋のふしをそれぞれ鉄筋と別の要素で表現し、ふしとコンクリートとの相互作用を直接シミュレートする。接着作用は考慮せず、摩擦作用は一定な摩擦係数で表現する。隣接する鉄筋要素とコンクリート要素の接合面の面積は、実際の円柱の鉄筋付着面積と等しくなるように与え、そのバネ定数 k_{ni} , k_{si} は、式(5)中の E_c , v_c を次式で定義される鉄筋要素 (E_s , v_s) およびコンクリート要素 (E_c , v_c) の弾性定数の平均値 E_i , v_i と置き換えて求める。すなわち、

$$E_i = \frac{E_s h_s + E_c h_c}{h_s + h_c} \quad (10)$$

$$v_i = \frac{v_s h_s + v_c h_c}{h_s + h_c}$$

ここに、 h_s , h_c は隣接する鉄筋要素およびコンクリート要素の重心から要素接合面上に下した垂線の長さを表わす。

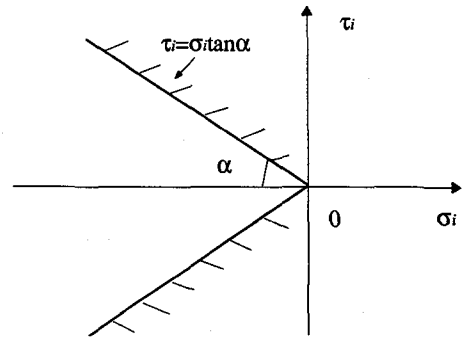


図-7 鉄筋とコンクリート要素接合面のすべり条件

鉄筋とコンクリート要素の接合面のすべり破壊条件は、次式を用いる (図-7)。

$$\tau_i = \sigma_i \tan \alpha \quad (11)$$

ここに、 α は摩擦角で、 $\tan \alpha = 0.45$ とする。 σ_i , τ_i は鉄筋とコンクリート要素の接合面の垂直およびせん断応力である。 σ_i と τ_i が図-7の斜線領域に入った場合には、垂直バネおよびせん断バネの剛度 (k_{ni} , k_{si}) をすべて零に低減させる。

4. 鉄筋コンクリート正四角柱の両引き試験のシミュレーション

4.1 供試体のモデル化

本解析では、図-1のように部材長さが鉄筋径 ϕ の 60 倍で、かぶり厚さ c を ϕ の 1, 2, 3 倍とした3つの正四角柱供試体の両引き試験をシミュレートする。鉄筋径は $\phi = 16\text{mm}$ とし、鉄筋およびふしは図-3のように四角形要素に分割し、それらの背後のコンクリート要素の形状と寸法は鉄筋またはふし要素と同じに設定した。鉄筋上部のかぶりコンクリートについては、ボロノイ分割によりランダ

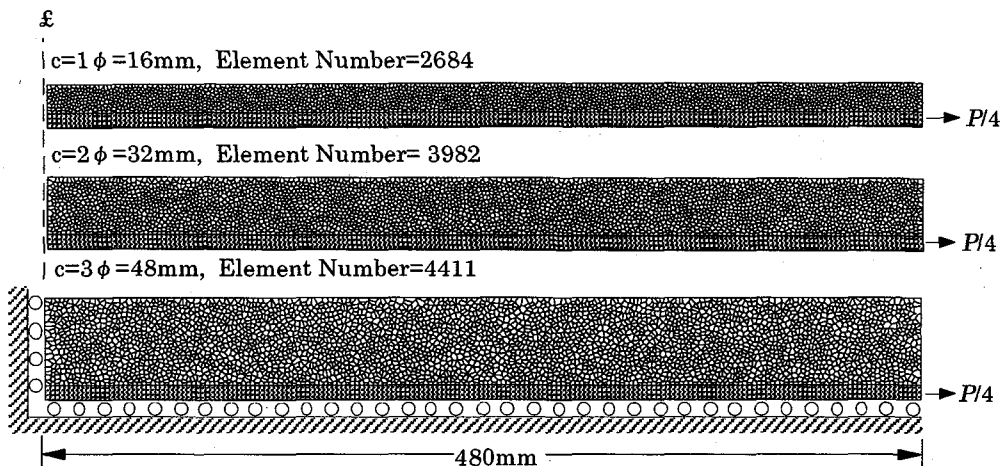


図-8 供試体の解析モデル($c=\phi, 2\phi, 3\phi$)

ムな多角形要素を発生させた。図-8は3つの供試体の解析モデルを示し、構造対称面における鉄筋上部のかぶりコンクリート要素、鉄筋要素およびそれらの背後のコンクリート要素をそれぞれローラーで支持させた。鉄筋とコンクリートの材料特性は表-1のように設定した。

表-1 鉄筋とコンクリートの材料特性

材 料 特 性	コンクリート	鉄筋
ヤング率 (GPa)	$E_c = 20.0$	$E_s = 210$
ポアソン比	$\nu_c = 0.18$	$\nu_s = 0.30$
引張強度 (MPa)	$f_t = 3.0$	$f_y = 345$
破壊エネルギー(Nm/m ²)	$G_F = 50$	-----

4.2 荷重-変位曲線および付着破壊挙動のシミュレーション

かぶり厚さ c を ϕ , 2ϕ , 3ϕ とした3つの供試体および鉄筋単体の鉄筋載荷端の荷重 P と変位 δ の曲線を図-9に、鉄筋降伏後の $\delta=0.92\text{mm}$ 時の破壊状態を図-10に示す。

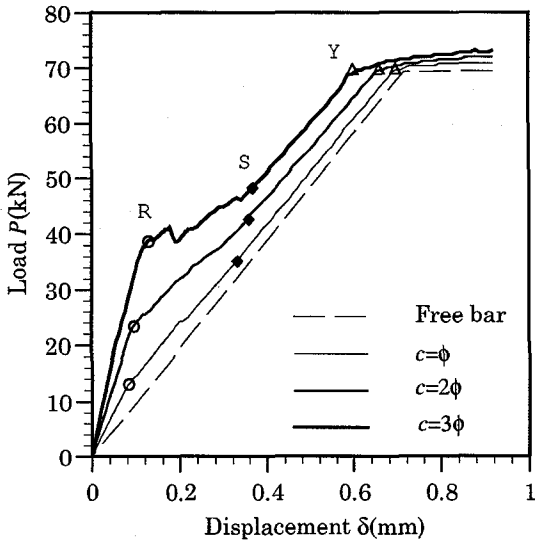


図-9 荷重 P -変位 δ の曲線

図-9における R, S, Y 点はそれぞれかぶりコンクリートの初期ひび割れ発生、ひび割れ定常および鉄筋降伏を表わすものである。

各供試体の P - δ 曲線より、かぶり厚さが大きい場合は P - δ 曲線の初期勾配が増大するが、かぶり厚さが小さい場合は P - δ 曲線が鉄筋単体のみの曲線に近づくことがシミュレートされている。初期ひび割れ発生 (R 点) に対応する鉄筋載荷端の変位 δ は、かぶり厚さの増加に従って大きくなる。新たなひび割れの生じない S 点以降、ひび割れ間のコンクリートが引張力を負担する引張硬化効果はかぶり厚さが増加するほど高くなり、鉄筋が降伏しても引張硬化効果が急激に低下していない¹¹⁾ことが確認された。また、各供試体の鉄筋降伏時 (Y 点) における荷重 P はそれほど変わらないが、鉄筋載荷端の変位 δ はかぶり厚さが大きいほど小さくなる。

図-10 の破壊状態は、かぶり厚さが大きくなるに従って、ひび割れ間隔が大きくなり本数が減少するかぶりコンクリートの拘束効果を示している。

4.3 鉄筋の局所応力およびひずみの分布

実験的研究では測点数が限られた測定値および仮定した各測点間の分布形により、鉄筋のひずみまたは応力の分布が求められている。本解析では、鉄筋を軸方向に沿って長さ 2.5mm ごとに要素分割しているため、鉄筋の局所ひずみまたは応力が計算できる。解析結果による鉄筋降伏後 ($\delta=0.92\text{mm}$) の応力およびひずみの分布を図-11に、鉄筋の平均応力と平均ひずみの関係を図-12 に示す。図-11の横軸 L は載荷端からの距離を表す。図-12の鉄筋の平均応力は全鉄筋要素の軸方向応力を平均したもので、平均ひずみは鉄筋載荷端の変位 δ より求めたものである。

図-10 および図-11 から、ひび割れの位置における各供試体の鉄筋は降伏しており、コンクリートの破壊により解放された引張力に抵抗していることがわかる。鉄筋のひずみおよび応力の最大値と最小値の差はかぶり厚さが増加するに従って、非常に大きくなる。両者の分布形は滑らかな曲線とならず、ふしが強く抵抗するため、ふしとふし間の分布は台形を示している。ここに得られた鉄筋応力分布形の傾向は玉井ら¹¹⁾の測定結果とよく一致している。

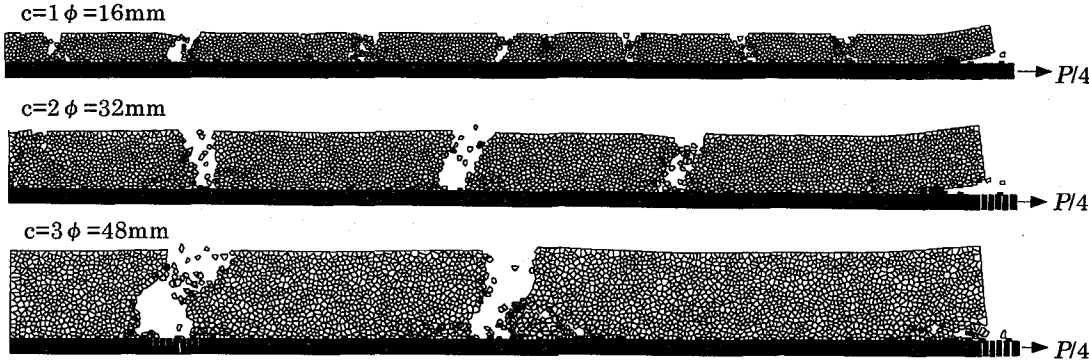


図-10 破壊状態($\delta=0.92\text{mm}$)

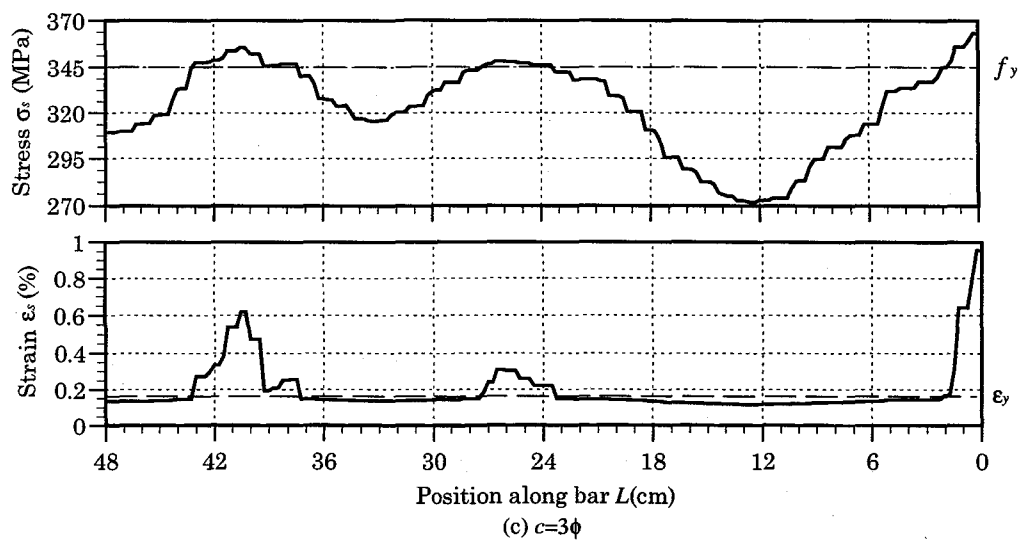
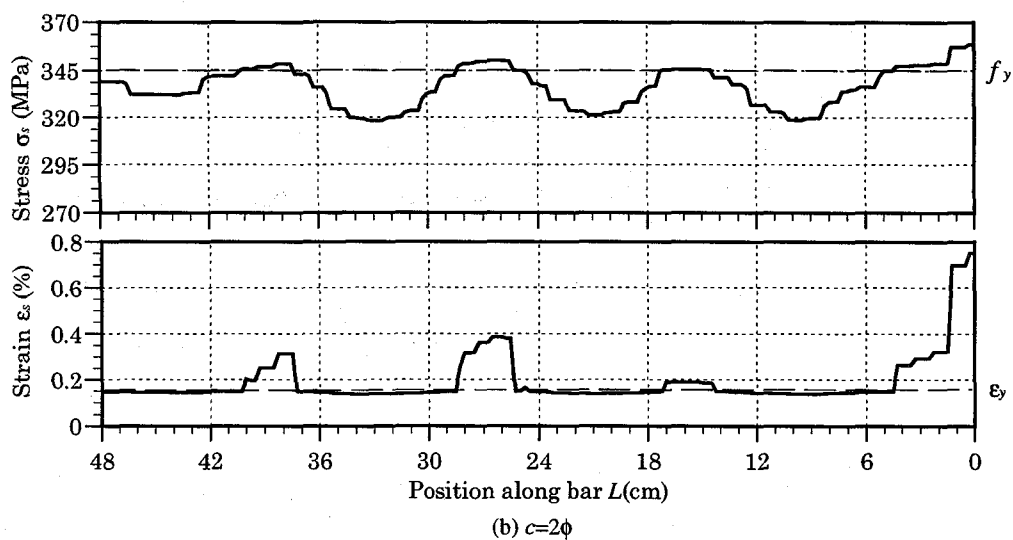
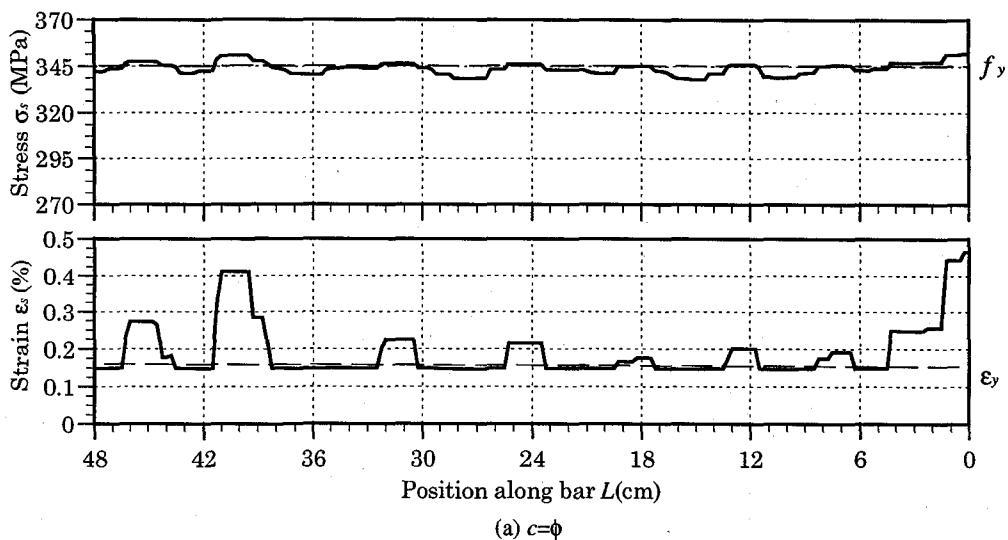


図-11 鉄筋応力およびひずみの分布($\delta=0.92\text{mm}$)

鉄筋の平均応力と平均ひずみ曲線（図-12）より、かぶり厚さの増加（鉄筋比の減少）とともに、鉄筋の平均降伏点は低くなること¹¹⁾が認められる。これはひび割れ間のコンクリートのかぶり厚さが大きくなるほど、ひび割れ間の鉄筋応力（図-11）が降伏強度より小さくなり、平均応力が減小するためである。

図-13は $\delta=0.10, 0.22, 0.37, 0.92\text{mm}$ 時におけるかぶり厚さ $c=2\phi$ の供試体の鉄筋応力分布、およびそれに対応するひび割れパターンを示したものである。ひび割れパターン図の太線はひび割れ幅 $w \geq 5G_{F/f_t}$ （図-6）時の貫通ひび割れを、細いひび割れは $0 < w < 0.75G_{F/f_t}$ 時のものを表す。 $0.75G_{F/f_t} \leq w < 5G_{F/f_t}$ の場合は両者の中間の太さで示している。 $\delta=0.10\text{mm}$ 時の供試体では、多数の微細ひび割れが生じているが、鉄筋応力は載荷端付近を除く範囲で一様に分布している。変位 δ が増大するに伴い、これらの微細ひび割れは除荷または閉鎖を生じて主ひび割れが次第に形成され（ $\delta=0.22, 0.37\text{mm}$ 時）、主ひび割れ付近の鉄筋応力が大きくなる。 $\delta=0.37\text{mm}$ 時より、新たに主ひび

割れは発生せず、ひび割れ幅のみが増大している。

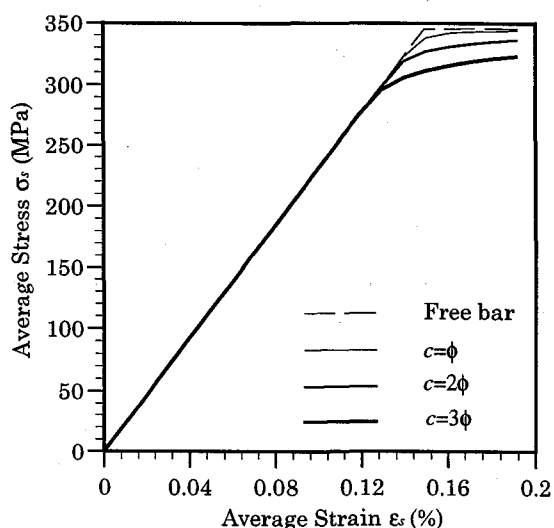


図-12 鉄筋の平均応力と平均ひずみの曲線

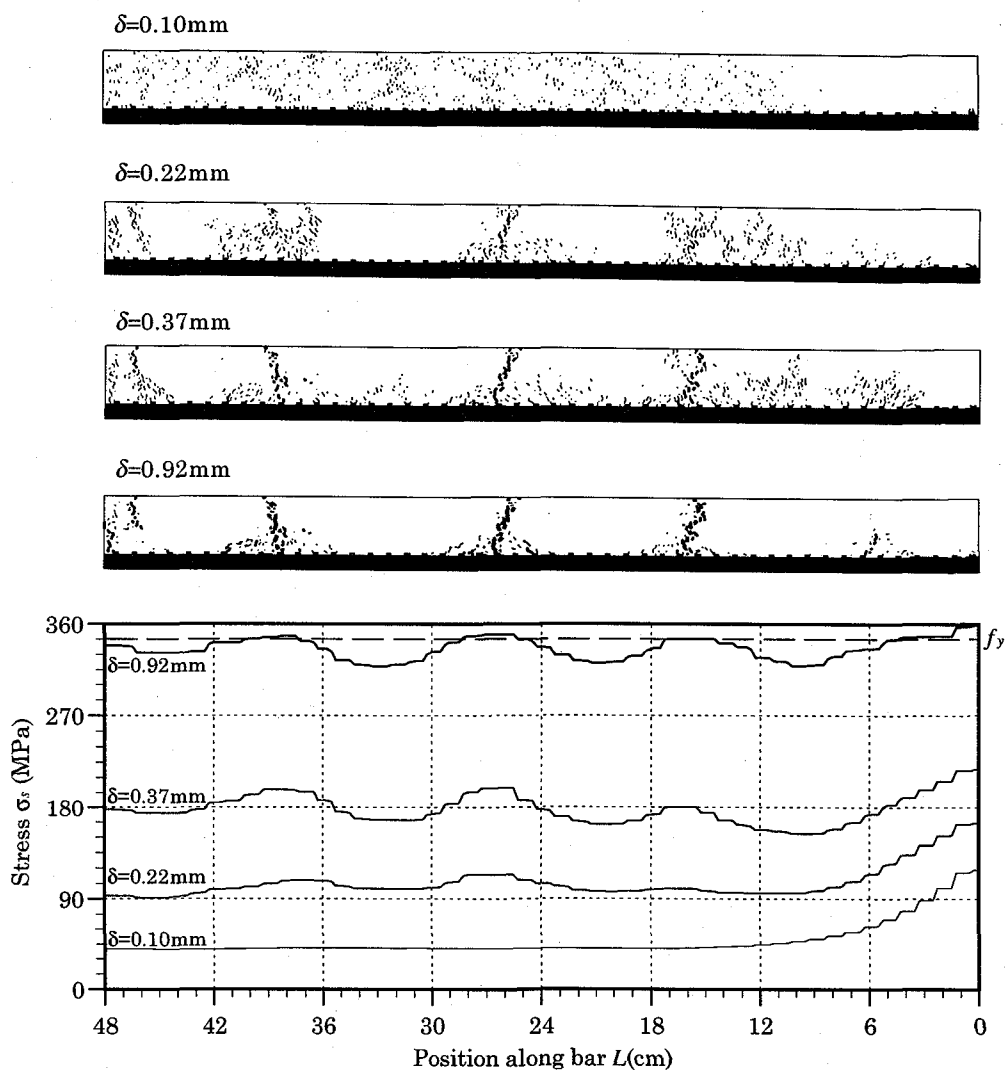


図-13 鉄筋応力分布およびそれに対応するひび割れパターン

4.4 局所付着応力の分布

鉄筋とコンクリートの付着応力は、鉄筋からコンクリートへ伝達される鉄筋の単位表面積当たりの力であり、実験では測点数が限られるため、比較的長い範囲にわたる平均値として求められる。ここでは、付着応力をふし間隔内で

の平均値で表わし、これを局所付着応力とみなす。各供試体の荷端変位 $\delta=0.10, 0.27, 0.92\text{mm}$ 時におけるそれぞれの局所付着応力の分布、および鉄筋降伏後($\delta=0.92\text{mm}$)のひび割れパターンを図-14に示す。

荷端変位 $\delta=0.10\text{mm}$ では各供試体とも主ひび割れは

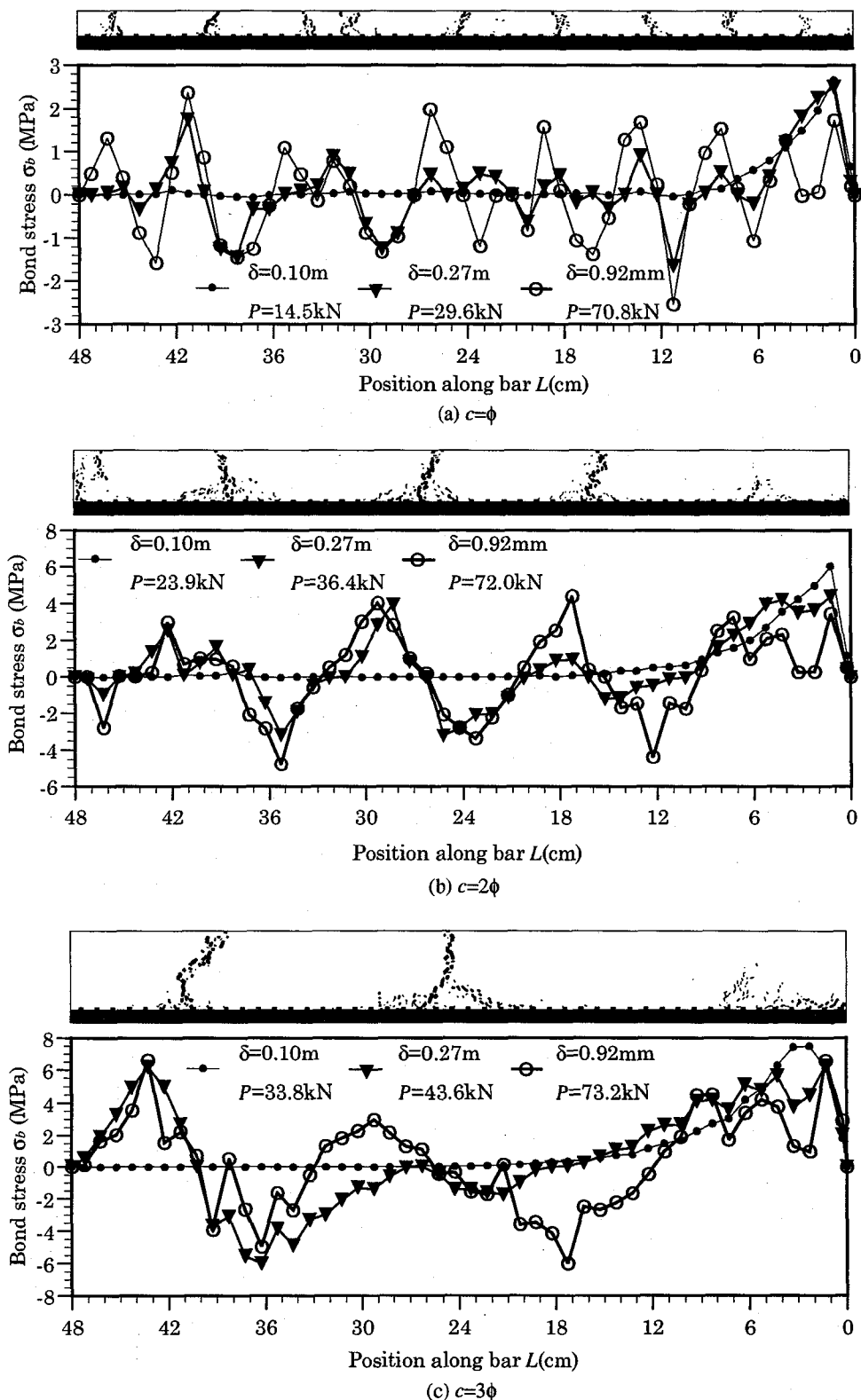


図-14 局所的付着応力分布とひび割れパターン

生じておらず、付着応力は載荷端付近のみに作用している。かぶり厚さ $c=\phi$, 2ϕ , 3ϕ の各供試体の局所付着応力の最大値 σ_{bmax} はそれぞれ 3.3, 6.3, 7.5MPa であり、かぶりの拘束効果が認められる。

鉄筋降伏後 ($\delta=0.92\text{mm}$) の局所付着応力の分布形より、各供試体の局所付着応力の零点は、ひび割れ付近および隣接するひび割れの間に発生していることがわかる。ひび割れ面の両側の付着応力は逆向きに作用し、付着応力の絶対値はその作用位置がひび割れを離れるほど大きくなるが、ある位置から小さくなっている。

5. 結語

本研究は、異形鉄筋とコンクリートとの準微視的付着挙動を解析的に検討するために、鉄筋およびコンクリートをそれぞれ均質な微小剛体要素パネ系からなる不連続体として扱い、コンクリートの破壊力学特性を導入した新しい解析手法を提案したものである。本法の特色は、異形鉄筋のふしを単独な要素で表現し、個々のふしとコンクリートの相互作用を直接シミュレートするとともに、かぶりコンクリートを大きさ $1\sim 3\text{ mm}$ オーダーでのランダムな多角形要素に分割し、ひび割れ進展の要素分割依存性を避けるよう工夫した点にある。鉄筋の背後にあるコンクリートを鉄筋またはふし要素と同じ平面形状の要素で表現し、前面の鉄筋またはふしと背後のコンクリートの 2 層要素間にはパネを配置しないことにより、奥行き方向のコンクリートの拘束効果を考慮した。また、解析上容易に計算できる要素間の相対変位をコンクリートのひび割れ幅と関連づけて、ひび割れ後のコンクリートの力学特性に引張軟化モデルを適用した。

計算例として、部材長さが鉄筋径 ϕ の 60 倍で、かぶり厚さ c を ϕ の 1, 2, 3 倍とした 3 つの正四角柱供試体の両引き試験をシミュレートした。本解析により、鉄筋応力や付着応力などの分布についてはふし間隔以下のオーダーにまで局所化された情報が得られ、このような局所応力の変化を供試体の巨視的破壊現象と関連づけて考察することがわかった。また、コンクリートのひび割れ分散に及ぼすかぶりの拘束効果を明確にし、局所付着応力の零点がひび割れ付近および隣接するひび割れの間に発生していることを観察した。ここに得られた解析結果については、既往の実験結果を良くシミュレートできており、鉄筋の平均ひずみとコンクリートの損傷の増大に伴う局所付着応力分布の変化(図-14)のように、これまで必ずしも定量的に確認されていない新たな付着特性の情報も含まれている。本来 3 次元拘束効果を持つ異形鉄筋の付着作用を 2 次元モデルによって取り扱うことには限界があり、今後さら

に改良の余地が残されているが、異形鉄筋の付着特性を解明するために本研究のような準微視的解析法の有用性が期待できると考えられる。

参考文献

- 1) Wu, Z., Yoshikawa, H. and Tanabe, T.: Tension Stiffness Model for Cracked Reinforced Concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.117, No.3, pp.715-732, 1991.
- 2) 彦坂 熙、John Bolander Jr., 劉 玉擎: 鉄筋コンクリート構造物の非線形 FEM 解析における付着すべりモデルの精密化、土木学会構造工学論文集、Vol.40A、pp.1357-1367、1994.
- 3) Rots, J.G.: Simulation of Bond and Anchorage: Usefulness of Softening Fracture Mechanics, in Applications of Fracture Mechanics to Reinforced Concrete, Carpinteri, A., Ed., Elsevier Applied Science Publishers, London/New York, Chap. 11, pp.285-306, 1992.
- 4) 木村秀樹、James O.Jirsa: 鉄筋の節形状とコンクリート強度が付着性状に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15, No.2, pp.117-122, 1993.
- 5) Liu, Y.-Q., Hikosaka, H. and Bolander, J.: Modelling Compressive Failure Using Rigid Particle System, Proc. 2nd Int. Conf. on Fracture Mechanics of Concrete Structures, pp.375-382, 1995.
- 6) 彦坂 熙、劉 玉擎: 不連続体力学モデルによる古い多連式石造アーチ橋の強度評価法、土木学会構造工学論文集、Vol.43A, pp.995-1001, 1997.
- 7) 川井忠彦、竹内則雄: 離散化極限解析プログラミング、培風館、1990.
- 8) 三島徹也、Bujadham, B., 前川宏一、岡村 甫: 鉄筋コンクリート離散ひびわれを構成する材料モデルの開発、土木学会論文集、No.442/V-16, pp.171-179, 1992.
- 9) 内田裕市、六郷恵哲、小柳 治: 仮想ひびわれモデルを組み込んだ分布ひびわれモデルによるコンクリートのひびわれの有限要素解析、土木学会論文集、No.466/V-19, pp.79-88, 1993.
- 10) コンクリートの破壊力学研究委員会: コンクリート構造の破壊力学に関するコロキウム第1部・委員会報告、日本コンクリート工学協会、1990.
- 11) 玉井真一、島 弘、出雲淳一、岡村 甫: 一軸引張部材における鉄筋の降伏以降の平均応力-平均ひずみ関係、土木学会論文集、第 378 号/V-6, pp.239-247, 1987.

(1997年9月26日受付)