

# 琉球大学学術リポジトリ

有限要素法による鉄筋とコンクリートとの付着強度  
解析 その1 ー異形鉄筋の割り裂き付着破壊についてー

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学工学部 公開日: 2010-08-03 キーワード (Ja): キーワード (En): Deformed bar, Bond strength, Concrete, FEM 作成者: 伊良波, 繁雄, 具志, 幸昌, 和仁屋, 晴謹 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12000/17671">http://hdl.handle.net/20.500.12000/17671</a>

有限要素法による鉄筋とコンクリートとの  
 付着強度解析 その1  
 — 異形鉄筋の割り裂き付着破壊について —

伊良波繁雄\* 具志 幸昌\* 和仁屋晴謙\*

**Finite Element Analysis of Bond Strength  
 between Steel and Concrete, I**  
 — Splitting Bond Failure of Deformed Bars —

Shigeo IRAHA, Yukimasa GUSHI, Haruyoshi WANIYA

**Synopsis**

Bond failure of deformed reinforcing bars generally takes place by splitting of surrounding cover concrete, unless they are confined by heavy reinforcements in surrounding. Therefore, bond strength of deformed reinforcing bars is determined by the cracking resistance of cover concrete.

This paper presents analytical method the determine cracking strength of cover concrete by the finite element method where only the effect of tensile cracking is considered to simplify the failure structure of the model.

The following results are obtained.

1. Progressive behavior of cracking and cracking strength of cover concrete are determined.
2. Radial stresses perpendicular to the surface of reinforcing bars are uniform before cracks start in concrete and become non-uniform after cracks develop.

**Key words:** Deformed bar; Bond strength; Concrete; FEM.

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物で異形鉄筋を使用した時、  
 付着破壊によって生じるひびわれは鉄筋軸に沿って生

じる縦ひびわれと、鉄筋の横ふしから発生し鉄筋軸と  
 斜交するひびわれ<sup>1)</sup>(図-1)がある。本研究では前者  
 の縦ひびわれの発生メカニズム及び割り裂き付着破壊  
 について考察を行った。

受付：1982年4月30日

\*琉球大学工学部土木工学科

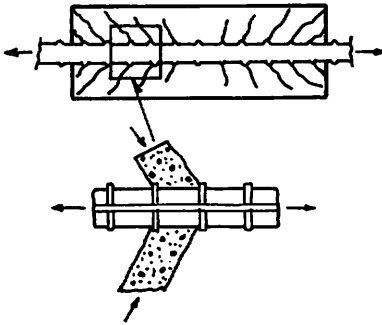


図-1 異形鉄筋周囲の内部ひびわれ

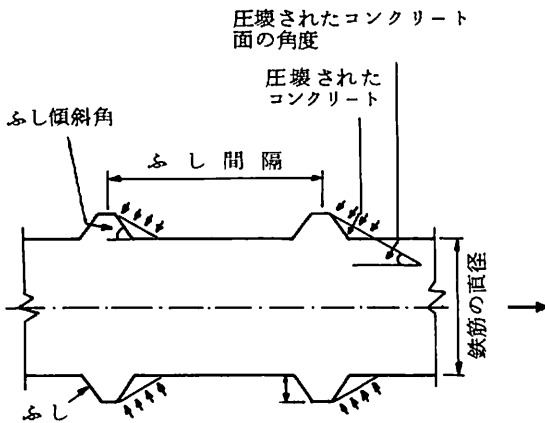


図-2 異形鉄筋の付着機構

図-2に示すように鉄筋が引張力を受けると鉄筋のふし前面のコンクリートが圧壊され、ふし前面にコンクリートの粉体ができ、ちょうど楔のようにコンクリートを押し広げる作用をする。押し広げる圧力は図-1の横ふしから発生するひびわれの角度が $45^\circ$ 程度であるので、鉄筋に作用する付着応力に等しいことがわかっていて、この押し広げる圧力が強ければコンクリート部材に割り裂き破壊が起ることになる。

コンクリートの割り裂き破壊によって付着強度が決まる時は、図-3に示すように鉄筋表面で外に向って一様な圧力を作用させ、コンクリートの破壊圧力を求めれば、これより付着強度が求められる。このような方法で付着強度を求めるのはFerguson<sup>3)</sup>による重ね継

手の強度に関する研究以来多くの研究<sup>2)</sup>がある。FEMを割り裂き問題に応用した研究に森田らの研究<sup>4)</sup>がある。森田らは円孔に一樣な圧力を作用させ2次元弾性問題として解いている。Tepfers<sup>5)</sup>は厚肉円筒を用いた理論と実験を比較し、実験値はひびわれの進展を考慮した理論値と円筒内の引張応力を一定とした理論値の間にくることを示した。

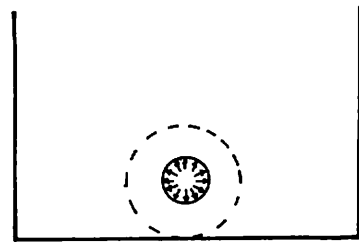


図-3 コンクリートに作用する圧力

図-3に示す円孔内部に圧力を受けるコンクリート部材の問題で、コンクリートの塑性とひびわれの両方を考慮した解析はFEMを用いても複雑な問題点がある。すなわち、鉄筋とコンクリートの付着強度を知るためには圧力の降下域までの解析を必要とするからである。最大圧力後に圧力の降下が急激なものであれば、載荷端部から急激に付着破壊を起すことになる。最大圧力後に圧力降下を起しても以後一定の圧力を保持しているならば、破壊が進行しても一定の付着力が存在することになり延性破壊となる。

コンクリートの割り裂き破壊は主に引張破壊であるので、本研究ではコンクリートの塑性を省略し、ひびわれのみを考慮して解析を行った。解析は圧力降下域まで行ない、ひびわれの進展、割り裂き補強筋の有無

による付着強度特性について考察した。FEM解析にはPian<sup>6)</sup>によって提案されたHybrid Stress Modelより導かれた四辺形要素を用いている。ひびわれ部の要素の剛性マトリックスはHybrid Stress Modelでひびわれ面に垂直な応力とせん断応力が零になるような応力場を仮定して導いた。

## 2 解析方法

### 2-1 剛性マトリックス

剛性マトリックスはPianによって提案されたHybrid

Stress Model を用いて求めた。これは変位法に比較して剛性マトリックスを作る時に逆行列の計算を含むので、計算するのに多少時間がかかるが、精度調査の結果全般的に良い結果<sup>7)</sup>を示している。

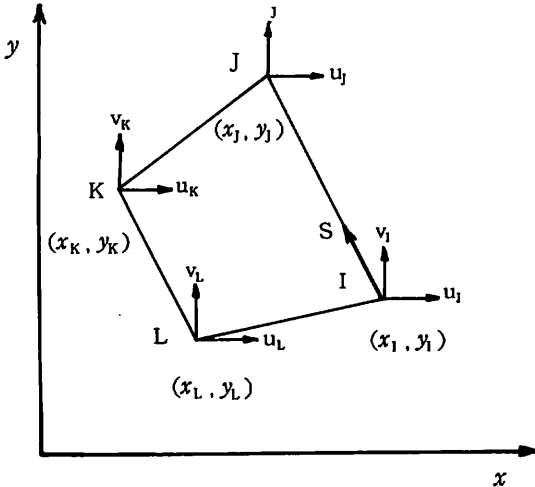


図 - 4 四辺形要素

ハイブリッド型コンプリメンタリーエネルギーの原理<sup>8)</sup>は

$$\pi_{CH} = \sum_n \left( \iint_{v_n} B(\sigma_{ij}) dx dy - \int_{\partial v_n} (uX_\nu + vY_\nu) dS + \int_{S\sigma_n} (u\bar{F}_x + v\bar{F}_y) dS \right) \dots \dots \dots (1)$$

付帯条件は

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \right\} ; V_n \text{ 内} \dots \dots (2)$$

$$u = \bar{u}, v = \bar{v} ; S_{un} \text{ 上} \dots \dots (3)$$

ここに、 $B(\sigma_{ij})$ : コンプリメンタリーエネルギー関数、 $u$ :  $x$  方向の変位、 $v$ :  $y$  方向の変位、 $\bar{F}_x$ :  $x$  方向の外力、 $\bar{F}_y$ :  $y$  方向の外力、 $\bar{u}$ :  $x$  方向の既知変位、 $\bar{v}$ :  $y$  方向の既知変位、 $\partial v_n$ : 要素の境界、 $S\sigma_n$ : 要素境界で外力が与えられている部分、 $S_{un}$ : 要素境界で変位が与えられている部分、 $X_\nu, Y_\nu$  はそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} X_\nu &= \ell \sigma_x + m \tau_{xy} \\ Y_\nu &= \ell \tau_{xy} + m \sigma_y \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (4)$$

である。ここに、 $\ell, m$  は外向き法線方向の方向余弦である。

Pian によって Hybrid Stress Model と名付けられた方法では、応力場を式(2)の釣合条件式を満足するように仮定する。ここでは

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{aligned} \right\} = \begin{bmatrix} 1 & x & y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x & y \\ 0 & -y & 0 & 0 & -x & 1 \end{bmatrix} \left\{ \begin{aligned} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_7 \end{aligned} \right\} \dots \dots (5)$$

と仮定し、これを

$$\{\sigma\} = [P] \{\beta\} \dots \dots \dots (6)$$

で表わす。ひずみ  $\{\epsilon\}^T = \{\epsilon_x \ \epsilon_y \ \tau_{xy}\}$  と応力の関係式は

$$\{\epsilon\} = [C] \{\sigma\} \dots \dots \dots (7)$$

ここに

$$[C] = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & 0 \\ C_2 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & C_3 \end{bmatrix}$$

平面ひずみ問題の場合は  $C_1 = (1 - \nu^2)/E, C_2 = -\nu(1 + \nu)/E, C_3 = 2(1 + \nu)/E$

である。(6)式、(7)式を使えば(1)式の右辺第一項は

$$\iint_{v_n} B(\sigma_{ij}) dx dy = \frac{1}{2} \{\beta\}^T [H] \{\beta\} \dots \dots \dots (9)$$

ここに

$$[H] = \iint_{v_n} [P]^T [C] [P] dx dy \dots \dots \dots (10)$$

で、具体的に示すと

$$[H] = \iint_{v_n} \begin{bmatrix} C_1 & C_1 x & C_1 y & C_2 & C_2 x & C_2 y & 0 \\ C_1 x^2 + C_3 y^2 & C_1 x y & C_2 x & C_2 x^2 & (C_2 + C_3) x y & -C_3 y & \\ & C_1 y^2 & C_2 y & C_2 x y & C_2 y^2 & 0 & \\ & & & C_1 & C_1 x & C_1 y & 0 \\ & & & & C_1 x^2 & C_1 x y & 0 \\ & & & & & C_1 y^2 + C_3 x^2 & -C_3 x \\ & & & & & & C_3 \end{bmatrix} dx dy \dots \dots \dots (11)$$

である。ここでは図-4に示す四辺形要素を使うので式(1)の積分はこの要素内で行う。図-4)に示すように四辺形の節点をI, J, K, Lとし、各節点のx, y方向の変位を図示のように $u_i, v_i, \dots, u_L, v_L$ とする。図-4に示すようにI節点からJ節点向きに座標Sを定義する。辺IJ上の変位u, vはそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} u &= (1-\xi) u_i + \xi u_j \\ v &= (1-\xi) v_i + \xi v_j \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(12)$$

と仮定する。ここに $\xi = S/L_{IJ}$ ,  $L_{IJ}$ は辺IJの長さである。式(4), (11)を式(1)の右辺第2項に代入し積分をすれば、辺IJについて示せば

$$= \{\beta\}^T \begin{bmatrix} -y_{IJ}/2 & 0 & -y_{IJ}/2 & 0 \\ \frac{-\{y_{IJ}(2x_i+x_j)+x_{IJ}(2y_i+y_j)\}}{6} & \frac{y_{IJ}(2y_i+y_j)}{6} & \frac{-\{y_{IJ}(x_i+2x_j)+x_{IJ}(y_i+2y_j)\}}{6} & \frac{y_{IJ}(y_i+2y_j)}{6} \\ \frac{-y_{IJ}(2y_i+y_j)}{6} & 0 & \frac{-y_{IJ}(y_i+2y_j)}{6} & 0 \\ 0 & \frac{x_{IJ}}{2} & 0 & \frac{x_{IJ}}{2} \\ 0 & \frac{x_{IJ}(2x_i+x_j)}{6} & 0 & \frac{x_{IJ}(x_i+2x_j)}{6} \\ \frac{-x_{IJ}(2x_i+x_j)}{6} & \frac{x_{IJ}(2y_i+y_j)+y_{IJ}(x_i+2x_j)}{6} & \frac{-x_{IJ}(x_i+2x_j)}{6} & \frac{x_{IJ}(y_i+2y_j)+y_{IJ}(x_i+2x_j)}{6} \\ \frac{x_{IJ}}{2} & \frac{-y_{IJ}}{2} & \frac{x_{IJ}}{2} & \frac{-y_{IJ}}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(13)$$

ここに $x_{IJ} = x_i - x_j$ ,  $y_{IJ} = y_i - y_j$ , となる。同様に各辺について積分を行い、加えると

$$\int_{\partial V_m} (uX_n + vY_n) ds = \{\beta\}^T [G] \{q\} \dots\dots\dots(14)$$

ここに[G]は式(13)の7×4のマトリックスから造られる、7×8のマトリックスである。式(14)で $\{q\} = \{u_i, v_i, u_j, v_j, u_k, v_k, u_L, v_L\}$ である。式(1)の右辺第3項は $\{F\}$ を外力ベクトルとすれば

$$\int_{\partial V_m} (u\bar{F}_x + v\bar{F}_y) dS = \{\bar{F}\}^T \{q\} \dots\dots\dots(15)$$

となる。式(14), (15)を式(1)に代入すれば、1個の要素については

$$\pi_{CH} = \frac{1}{2} \{\beta\}^T [H] \{\beta\} - \{\beta\}^T [G] \{q\} + \{\bar{F}\}^T \{q\} \dots\dots\dots(16)$$

となる。式(16)で $\{\beta\}$ についての停留条件より

$$\{\beta\} = [H]^{-1} [G] \{q\} \dots\dots\dots(17)$$

となる。式(17)を式(16)に代入し、 $\{q\}$ について停留条件を求めると

$$[K] \{q\} = \{\bar{F}\} \dots\dots\dots(18)$$

となる。ここで

$$[K] = [G]^T [H]^{-1} [G] \dots\dots\dots(19)$$

で剛性マトリックスと称している。

要素内の引張応力がコンクリートの引張強度に達し

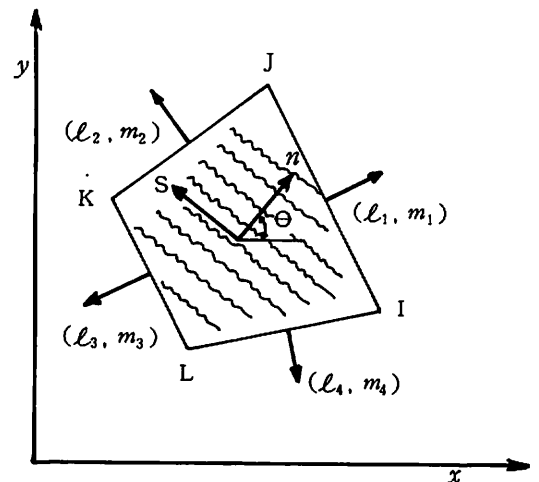


図-5 ひびわれ要素の局部座標系

ひびわれが生じた場合の剛性マトリックスを導く。図-5に示すように、ひびわれができたとき、ひびわれ面に垂直に  $n$ 、平行に  $s$  座標をとる。 $n-s$  座標系の回転角を  $\theta$  とし、方向余弦を  $\ell = \cos \theta$ ,  $m = \sin \theta$  とすると、 $n-s$  系と  $x-y$  系の応力の変換式は

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \ell^2 & m^2 & -2\ell m \\ m^2 & \ell^2 & 2\ell m \\ \ell m & -\ell m & \ell^2 - m^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \sigma_s \\ \tau_{ns} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (20)$$

で表わされる。ひびわれが生じた要素でのひびわれ面に垂直な応力  $\sigma_n$  の応力は零であるので、応力場の仮定は、定応力場として

$$\begin{Bmatrix} \sigma_n & \sigma_s & \tau_{ns} \end{Bmatrix}^T = \{ 0 \ \beta_1 \ \beta_2 \}^T \dots\dots\dots (21)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_n & \sigma_s & \tau_{ns} \end{Bmatrix}^T = \{ 0 \ \beta_1 \ 0 \}^T \dots\dots\dots (22)$$

が考えられる。式(21)はせん断応力を完全に伝達できる場合で、式(22)はせん断力の伝達がない場合である。コンクリートの場合は骨材のかみ合いによりせん断力の伝達が行なわれ、両者の中間の性状を示す。この研究

では簡単に剛性マトリックスが得られる式(22)の応力場を用いる。式(21)を式(19)に代入すれば

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} m^2 \\ \ell^2 \\ -\ell m \end{Bmatrix} \{ \beta_1 \} \dots\dots\dots (23)$$

となる。式(23)を式(10)に代入すれば

$$[H] = \iint_{V_n} (m^2 \ell^2 - \ell m) \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & 0 \\ C_2 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & C_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} m^2 \\ \ell^2 \\ -\ell m \end{Bmatrix} dx dy$$

となる、平面ひずみ問題では

$$[H] = \frac{1-\nu^2}{E} \text{AREA} \dots\dots\dots (24)$$

ここに  $\text{AREA} = \iint_{V_n} dx dy$  で四辺形要素の面積である。

次に  $[G]$  を求める。変位場は式(12)のように線形を仮定する。辺の外向き法線ベクトルの方向余弦を図-5に示すように仮定する。式(1)の右辺第2項の積分を辺  $IJ$  について示すと、式(4)、(12)、(23)を代入して

$$\int_I^J (uX_2 + vY_2) ds = \{ \beta_1 \}^T \cdot \frac{L_{IJ}}{2} \left\{ \ell_1 m^2 - m_1 \ell m \quad m_1 \ell^2 - \ell_1 \ell m \quad \ell_1 m^2 - m_1 \ell m \quad m_1 \ell^2 - \ell_1 \ell m \right\} \begin{Bmatrix} u_I \\ v_I \\ u_J \\ v_J \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (25)$$

同様に他の辺についても計算し、和をとれば  $[G]$  が求まる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} G(1,1) &= R_{11} + R_{41}, & G(1,2) &= R_{12} + R_{42} \\ G(1,3) &= R_{11} + R_{21}, & G(1,4) &= R_{12} + R_{22} \\ G(1,5) &= R_{31} + R_{21}, & G(1,6) &= R_{32} + R_{22} \\ G(1,7) &= R_{31} + R_{41}, & G(1,8) &= R_{32} + R_{42} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (26)$$

ここに

$$\left. \begin{aligned} R_{11} &= (\ell_1 m^2 - m_1 \ell m) L_{IJ} / 2, & R_{12} &= (m_1 \ell^2 - \ell_1 \ell m) L_{IJ} / 2 \\ R_{21} &= (\ell_2 m^2 - m_2 \ell m) L_{JK} / 2, & R_{22} &= (m_2 \ell^2 - \ell_2 \ell m) L_{JK} / 2 \\ R_{31} &= (\ell_3 m^2 - m_3 \ell m) L_{KL} / 2, & R_{32} &= (m_3 \ell^2 - \ell_3 \ell m) L_{KL} / 2 \\ R_{41} &= (\ell_4 m^2 - m_4 \ell m) L_{LI} / 2, & R_{42} &= (m_4 \ell^2 - \ell_4 \ell m) L_{LI} / 2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (27)$$

である。したがって、ひびわれ要素の剛性マトリックス  $[K]_e$  は式(9)より

$$[K]_e = [G]^T [H]^{-1} [G] \dots\dots\dots (28)$$

に、式(24)、(26)を代入すれば求まる。 $[K]_e$  の  $(I, J)$  成分は  $G(1, I) \times G(1, J) \times \frac{E}{(1-\nu^2) \times \text{AREA}}$  で、 $I, J$  は1から8までをとる。

## 2-2 解析手順

構造物の弾塑性解析のための荷重増分法には、各増

分段階で要素を1個ずつ降伏させて行く山田の方法と何個かの要素を同時に降伏させ反復操作で解を求めるMarcalの方法がある。この研究ではコンクリートの塑性及びひびわれ面の再接触を無視しているのでコンクリートは弾性挙動を示し、増分法によらずとも解析が可能である。すなわち、あるひびわれ状態で次にひびわれを進展させるためにはいくらの荷重が必要かを計算し、次の段階でコンクリートの引張強度に近い要素をひびわれ要素とすればよい。具体的に示すと、

円孔内部に任意の圧力  $P_0$  を作用させ、各要素ごとに最大の主応力  $PSGM1$  を求め、コンクリートの引張強度に最も近い要素、すなわち

$$HM = (PSGM1 - \sigma_{ct}) / \sigma_{ct} \dots\dots\dots (29)$$

ここに  $\sigma_{ct}$ ：コンクリートの引張強度、で定義されるHMの最も大きい要素を探す。そして次の段階で、この要素をひびわれ要素とする。解析しようとしている物体の形状及び作用している荷重も対称の場合はひびわれが同時に2ヶ所に発生する。また計算コストの上から、HMの最も大きい要素と次に大きい要素のHMが近い値であれば同時にひびわれが発生したと見なした。判定基準としては

$$(HM1 - HM2) / (HM1 + 1) < 0.05 \dots\dots (30)$$

ここにHM1：1番大きいHM, HM2：2番目に大きいHM, を用いている。HM1が求まれば、この要素にひびわれが発生する直前の内圧は  $P_0 / (1 + HM1)$  である。この時、各要素の応力及び変位はそれぞれ  $\sigma / (1 + HM)$ ,  $\nu / (1 + HM)$  となる。フローチャートは図-6に示した。コンクリートの塑性を無視したので弾性解析を内圧が低下するまでくり返し計算すればよい。なお連立方程式の解法はバンドマトリックス法を使っている。

3 解析結果および考察

以上述べた解析方法でコンクリートの割れ裂き破壊の問題を解いた。コンクリートの材料定数はいずれのcaseでも圧縮強度：300 kgf/cm<sup>2</sup>, 引張強度：30 kgf/cm<sup>2</sup>, ヤング率：3.0 × 10<sup>5</sup> kgf/cm<sup>2</sup>, ポアソン比：0.125として計算した。

case-1

コンクリート断面はたて：20cm, よこ：30cmで、表面から5cmの位置を中心に直径2cmの円孔がある。この円孔に一樣な圧力が作用した時のひびわれの進展を調べた。図-7はその半分だけを示しており、要素の内の数字は要素番号である。このような問題は半無限領域に対しては解析解<sup>10)</sup>があり、それを用いて最大引張応力を求めれば内圧を  $P_0$  とした時1.089  $P_0$  で、図-7では左上角から円孔に接線を引いた時の接点の位置(要素49付近)の円周上に発生することがわかっている。しかし、円周上に発生したひびわれがどう進展して行くのかを知るためにはFEMのような近似解法

にたよらざるを得ない。図-8はひびわれの進展を示した図で、図の中の数字はひびわれの発生順序を示す。解析結果は円孔の斜上方からひびわれが発生し、斜方向に進むが途中で停止し、つぎにコンクリート表面から円孔の中心方向に進んでいる。この例を鉄筋の付着破壊によるひびわれと対応させると、斜方向のひびわれの長さにも問題があるがコンクリート表面から円孔をつきぬけ破壊に到るのは実験でよく見られる。内圧の変化は図-10に示してあるが、case-2と一緒に考察する。

case-2

図-9のひびわれ進展図は図-7で左右側面をローラー支承で固定した条件で解析したものである。これ

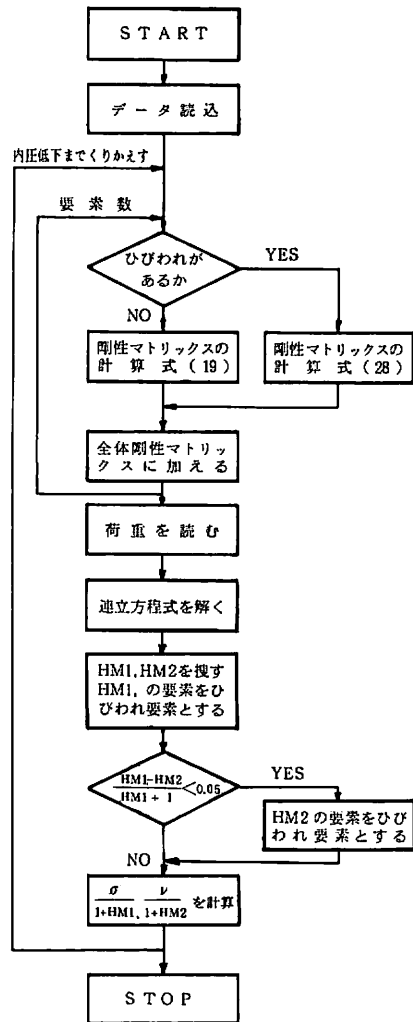


図-6 フローチャート

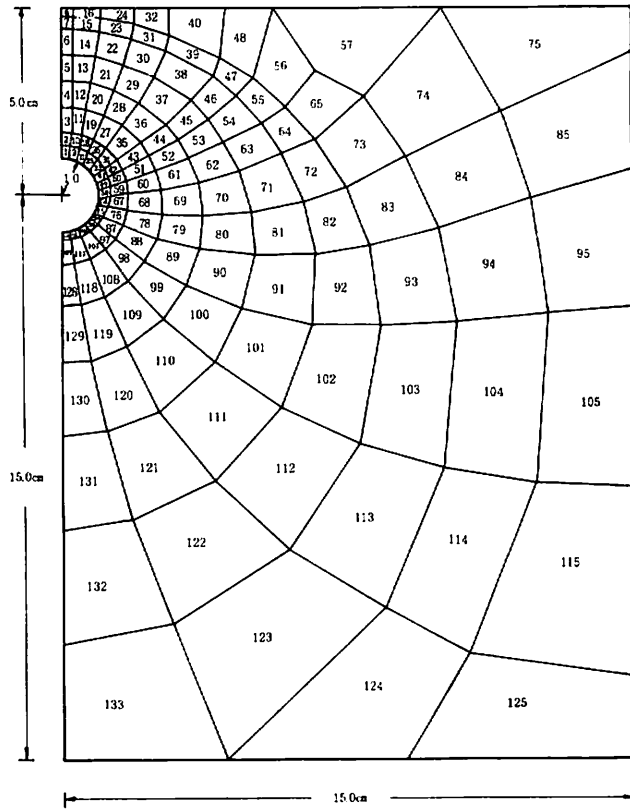


図-7 要素分割

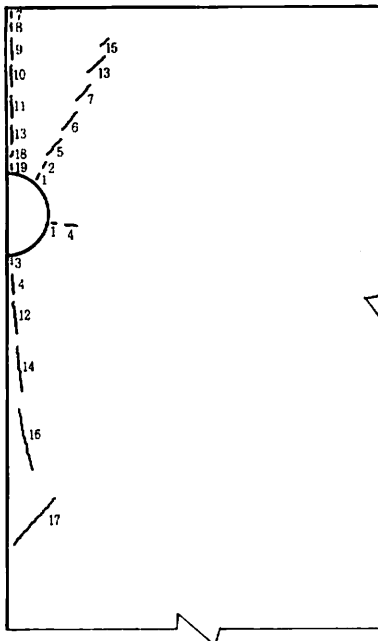


図-8 ひびわれの進展 (case-1)

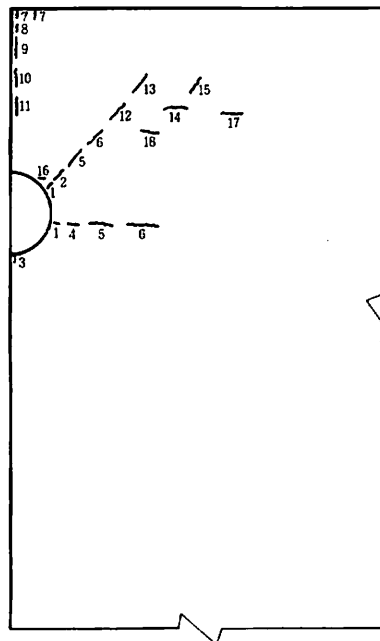


図-9 ひびわれの進展 (case-2)



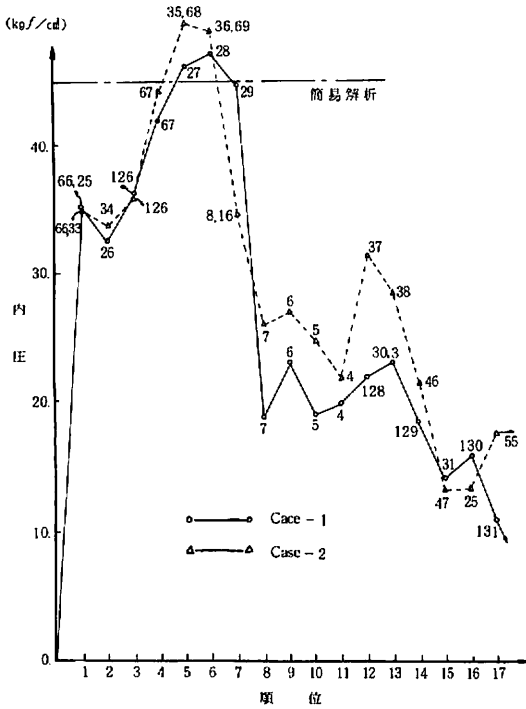


図-10 内圧の変化

は鉄筋の中心間隔が30cmで配置された場合の割り裂き問題を解いたものである。また、鉄筋コンクリート・スラブ下面の鉄筋が腐食した時のひびわれ進展をシュミレーションしたものと考えることもできる。ひびわれの進展はcase-1と違い、水平方向と斜め方向に同時に進行し、途中で停止する。つぎに表面から孔の方向にひびわれが進行するが孔に達する前に停止する。そして、斜めひびわれの先端から水平方向にひびわれが伸びる。このひびわれの型はC. O. Orangon<sup>9)</sup>らの分類によるVノッチ型と側面底面スプリット型の混合破壊形式になっている。また、鉄筋コンクリート・スラブ下面に見られる鉄筋の腐食によるコンクリート片の剥離は図-9の水平方向のひびわれが原因である。図-10はひびわれの発生順序に圧力の大きさを示した。曲線上の数字は要素番号である。この図でcase-1とcase-2を比較するとcase-2の方が最高圧力も高く、圧力降下域でも高めであるので付着強度も高いと思われる。FEM解とTepfersの簡易解析と比較してみると、円筒内の引張力を一定とした解では120.0 kg/cm<sup>2</sup>、

ひびわれの進展を考慮した解は45.1 kg/cm<sup>2</sup>であるので、FEM解は図-10に示すようにひびわれの進展を考慮した解よりも少し高めである。最高内圧時のひびわれの進展位置はcase-1では鉄筋中心から2.7 cm、case-2では2.1 cm~2.5 cmである。簡易解析法によれば2.4 cmとなるのでFEM解に近いと云える。

case-3

断面が15cm×15cmのコンクリートの中心に直径19mmの鉄筋を押し込んだ供試体の解析結果を示す。図-11は供試体の1/4部分の要素分割を示す。ここでは前の

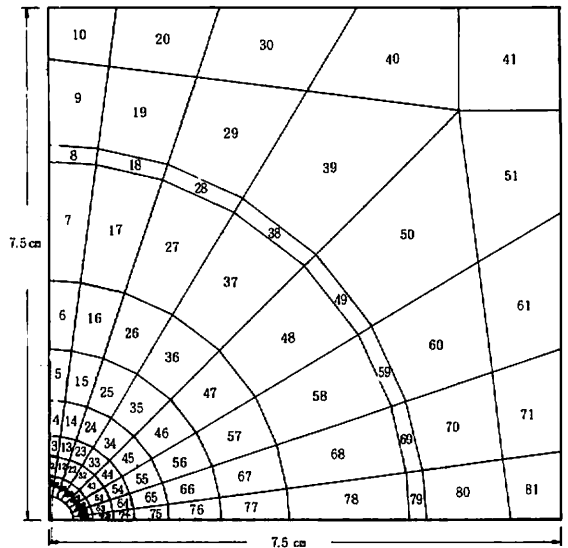


図-11 要素分割

case-1,2のようにコンクリート部に直接圧力をかけることはしてない。実際の現象は鉄筋がコンクリートを押し広げているので、この境界条件に近いと思われる、鉄筋を一様に膨張させる方法で解析している。このために鉄筋の内部に円孔をつくり、この円孔から一様な圧力をかけている。円孔を設けたために鉄筋の剛性が低下するので、ヤング率は実際のものよりも高い、 $2.1 \times 10^8$  kg/cm<sup>2</sup>を用いて計算した。図-11で左角の第1,2層の要素は鉄筋である。図-12はひびわれの進展を示したもので、鉄筋周囲のすべての要素にひびわれが生じた後に、鉄筋から外へ向って一直線にひびわれが生じている。一般に鉄筋周囲から発生したひびわれは、かぶりの薄い方に向うものと考えられるが、解

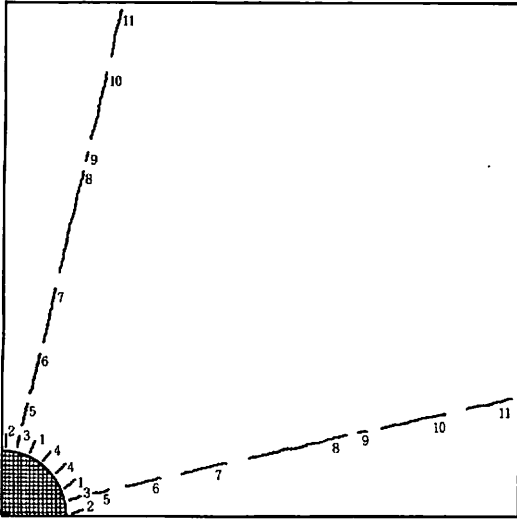


図-12 ひびわれの進展 (case-3)

析結果は図-12のように少しずれた所に進行している。つきに鉄筋表面に作用する鉄筋表面に垂直な応力 $\sigma_n$ について述べる。 $\sigma_n$ は第3層の鉄筋に接しているコンクリート部分の要素の応力から鉄筋表面の位置に換算したものである。

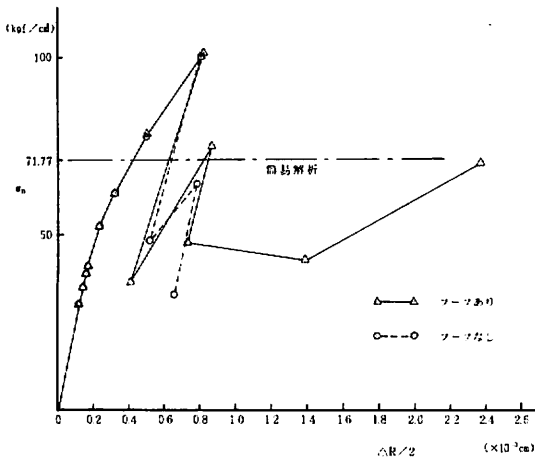


図-13 内径の変化

図-13は $\sigma_n$ の平均値と鉄筋の直径の変化量 $\Delta R$ の関係を示したものである。case-3は破線で示した曲線で、最高圧力99.9 kgf/cm<sup>2</sup>に達するまでは徐々に圧力

を増して行くが、最高値に達した後は急激に圧力が低下している。これは補強筋のない供試体の特徴でぜい性的な割れ裂き破壊を意味している。Tefersの簡易解析法によれば、引張応力の分布を一定とした時の最大圧力は196.5 kgf/cm<sup>2</sup>、ひびわれの進展を考慮した場合は71.66 kgf/cm<sup>2</sup>となるので、FEM解は両者の間にくる。図-14は鉄筋表面の応力 $\sigma_n$ の分布を示したものである。これより、ひびわれができる直前は $\sigma_n$ を一定

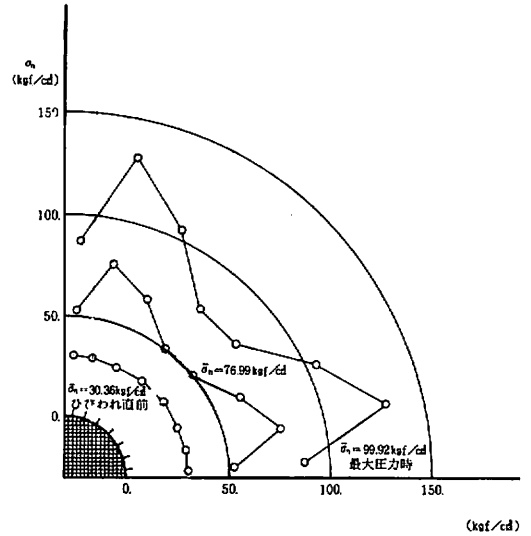


図-14 鉄筋表面上での垂直応力 $\sigma_n$ の変化

とみなせるが、付着強度を計算するのに重要な最大圧力時ではかなり変動している。圧力の高い部分は直線ひびわれの生じている個所である。この供試体のように正方形断面で、形状からして圧力が一樣になると思われるものでも最大圧力時には、ひびわれによってかなり変動しているので、実験による確認が必要である。最大圧力時のひびわれ進展位置はFEMで鉄筋中心より4.3 cm、簡易解析法で3.6 cmとなった。

case-4

割り裂き補強用のらせん鉄筋の効果を知らるために、図-11の断面にらせん鉄筋を入れて解析した。図-11に示す要素番号8, 18, 28, 38, 49, 59, 69, 79の部分がらせん鉄筋で直径: 2.5 mm, ヤング率:  $2.1 \times 10^6$  kgf/cm<sup>2</sup>の鋼線を2cmピッチで6巻してある。なお、鉄筋の付着長さは15cmで供試体は立方体である。らせん鉄筋部分の要素は、ひびわれ前はコンクリートと一体となっているがひびわれ発生後はらせん鉄筋だけで応力

を受けるものとして解析した。ひびわれ進展図は図-15に示すようにcase-3と比較すると7番目のひびわれまでは同じであるが、それ以後多少違っている。

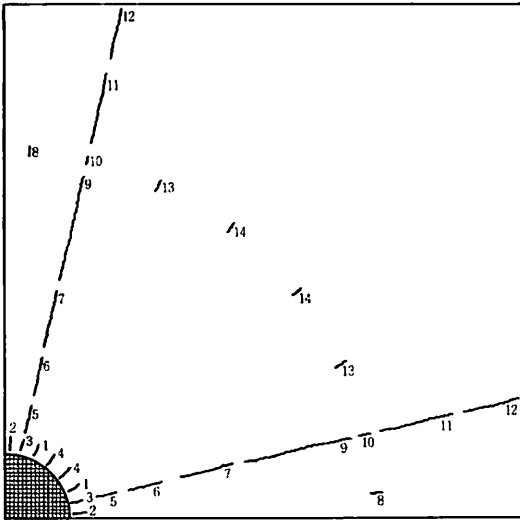


図-15 ひびわれの進展 (case-4)

しかし、鉄筋から発生する直線ひびわれの位置は同じ所にある。らせん鉄筋を入れたので、らせん鉄筋に直交するひびわれが生じているが実験による確認が必要であろう。要素番号18, 69のらせん鉄筋の応力は要素19, 70にひびわれが生じる直前で32.5kgf/cm<sup>2</sup>, 38, 49番目の要素にひびわれが入る直前で(図-15で14番)238.8kgf/cm<sup>2</sup>となり直線ひびわれがコンクリート表面に達した後に急激に増加する。case-3と同様に $\bar{\sigma}_n$ と鉄筋直径の変化 $\Delta R$ の関係を図-13に示した。最大内圧は補強筋の有無にかかわらず大体等しいが、補強筋を入れた供試体は圧力降下後でも最大圧力の50~70%程度を保有しており、case-3に比べて付着強度も高く、破壊形式もゆるやかで延性破壊と見なすことができる。鉄筋表面上の応力 $\sigma_n$ の分布は、最大内圧時まではcase-3とほとんど同じ結果を示した。

解析結果と実験との比較

片引き付着実験を行いcase-3,4の解析結果と比較した。供試体は15cm×15cm×15cmの立方体で鉄筋径は19mmである。実験は3回行い各各供試体2個の平均値を表-1に示した。実験1, 2はらせん鉄筋がない場

実験号	ひびわれの進展を考慮した解	円筒内引張応力を一定とした解	付着強度	コンクリートの圧縮強度	コンクリートの引張強度	らせん鉄筋の有無
1	69.2	201.3	64.0	270.0	28.6	無
2	67.8	197.2	61.4	268.0	25.7	無
3	67.8	197.2	77.6	268.0	25.7	有

単位(kgf/cm<sup>2</sup>)

表-1 付着強度

合で、実験3はらせん鉄筋がある場合である。角<sup>11)</sup>らの割裂補強に関する実験では付着長16cmの場合でも鉄筋軸に沿って一様な付着応力が生じてないので、これを念頭におき考察する。FEM解では付着長さ15cmに渡って一様に最大付着応力が作用しているとすれば99.9kgf/cm<sup>2</sup>となるが実際には載荷端の方から徐々に付着降下域に入るので99.9kgf/cm<sup>2</sup>の値は上限となる。らせん鉄筋で補強した時、付着降下域での値は50kgf/cm<sup>2</sup>~70kgf/cm<sup>2</sup>であるので、この値はらせん鉄筋を有する場合の下限となる。らせん鉄筋のない場合は付着降下域での値が小さいので下限の推定は不可能である。実験1, 2は補強筋のない場合で付着強度は64.0

kgf/cm<sup>2</sup>と61.4kgf/cm<sup>2</sup>となっている。FEM解の上限が99.9kgf/cm<sup>2</sup>となっているのでかなりの差がある。これはcase-3に見られるように載荷端より急激な付着力の低下が起こるのが原因であろう。本研究では鉄筋軸に沿っての付着応力の分布については考慮していないので、付着応力の低下が大きいかかなり高めの評価をしてしまう。付着強度を精度よく求めるためにはコンクリートと鉄筋のずれ量に関するデータが必要である。

簡易解析法でひびわれの進展を考慮したときの解は実験値に近い。しかし載荷端付近で付着低下を起こしていると考えられる実験値に近いということは、簡易

解析法自体, 正解よりも小さ目に評価した式といえよう。らせん鉄筋を配置した時の付着強度は  $77.6 \text{ kgf/cm}^2$  で, らせん鉄筋のないものよりも高くなっている。これは case-4 で解析したように, らせん鉄筋があるために付着降下域でも  $50 \sim 70 \text{ kgf/cm}^2$  の付着応力度を保持しているからである。

#### 4. あとがき

本研究では, コンクリートの塑性及びひびわれ面の再接触による弾性回復を無視することで, 割り裂き問題を付着降下域まで解析することができた。その主な結果は次の通りである。

(1) 解析の結果得られた最大付着応力及びひびわれの進展に伴う付着降下域での付着応力から, 割り裂きに対して急激に付着応力を失うか, あるいはねばりのある付着力を示すかを知ることができた。

(2) 解析にあたっては, 鉄筋軸方向の付着応力度の変化を考慮してないためか, 実験値とよく一致しているとはいえない。

(3) しかし, ここで得られた最大付着応力は, 鉄筋軸上の任意点での付着応力度と相対すべりとの関係<sup>12)</sup>の最大せん断応力度  $\tau_{max}$  に相当するものと考えられるので, この時のすべり量を知ることができれば付着理論の基礎式から付着応力分布も知ることができる。

(4) case-1, 2 では, ひびわれの進展をかなり詳しく知ることができた。しかし, case-3, 4 と同様に, 圧力を鉄筋内の円孔からかけて比較する必要がある。

(5) case-3, 4 では, 鉄筋表面に垂直な応力度  $\sigma_n$  が一定とみなされるのは, ひびわれが生じる直前までで, ひびわれの進展に伴って変動し, 特に付着強度を算出するのに重要な最大圧力時には, ひびわれ部とそうでない部分とは, 相当大きな差があった。

以上, 今回得られた主な点を列挙したが, 今回は解析を主体にしたので, 実験で確認してない部分も多い。したがって, 今後実験結果と比較検討をすることによって, 付着強度の解析手法を完成させて行きたいと考えている。

謝辞: 研究の遂行にあたり, 数値計算及び実験に協力をいただいた本学科技官玉那覇宣雄氏, コンクリート研究室の卒研学生, 森文市郎(現川田工業), 松田

義郎(現鴻池組), 里正雄(現新井組), 喜屋哲, 親泊宏(現栄光エンジニアリング)の諸君に謝意を表する次第である。なお数値計算は本学計算センターの FACOM M-180 を使用した。

#### 参考文献

- 1) 後藤幸正・植田紳治・満木泰郎: 鉄筋コンクリート部材引張部のひびわれに関する研究(両引供試体による実験), 第2回異形鉄筋シンポジウム, 1965年12月, 土木学会
- 2) 森田司郎: 鉄筋とコンクリートとの付着性状(異形鉄筋の割り裂き付着破壊について), コンクリート工学, Vol 16, No 10, 1978年
- 3) Ferguson, P. M: Reinforced Concrete Fundamentals, 3rd Ed, Jon Wiley & Sons, 1972年
- 4) 森田司郎: 異形鉄筋の割り裂き作用と鉄筋位置との関連について(有限要素法による弾性解析), 日本建築学会近畿支部研究報告集, 昭和53年5月
- 5) Tepfer, R: Cracking of Concrete Cover along Anchored Deformed Reinforcing Bar, Magazine of Concrete Research, Vol 31, No 106, March. 1979.
- 6) Pian, T. H. H: Derivation of Element Stiffness Matrices by Assumed Stress distribution, AIAA Journal, July. 1964.
- 7) 川井忠彦・川島矩郎・三木本茂夫: 薄板構造解析コンピューターによる構造工学講座II-7-A, 培風館
- 8) 鷲津久一郎: 弾性学の変分原理概論, コンピューターによる構造工学講座II-3-A, 培風館
- 9) Orangun, C. O・Jirsa, J. O・Breen, J. E; A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices, J. of ACI, Mar. 1977.
- 10) Savin, G. N; Stress Concentration Around Holes, Pergamon Press, 1961.
- 11) 角徹三・長友克寛・中村桂久: 異形鉄筋の割裂補強に関する基礎実験, セメント技術年報, 昭和56年
- 12) 森田司郎: 鉄筋コンクリートにおける付着とひびわれ, コンクリート・ジャーナル, 1969. Vol 7. No 4