

# 鉄筋コンクリート部材における鉄筋とコンクリート との応力伝達に関する研究

## STUDIES ON THE STRESS TRANSMISSION BETWEEN REINFORCING BARS AND CONCRETE IN REINFORCED CONCRETE MEMBERS

池 田 尚 治\*

By Shoji IKEDA

### 1. 序 論

鉄筋コンクリート部材は、鉄筋とコンクリートとが相互に応力を伝達することによってその複合機構が成り立っている。この相互の応力伝達は、鉄筋とコンクリートとの境界面である鉄筋表面での付着機構に多くを依存している。したがって、今日ではほとんどの鉄筋がその表面に異形を施し、コンクリートとの付着強度を高めるように配慮されている。しかしながら異形鉄筋の付着について考える場合、表面の平滑な従来の普通丸鋼鉄筋の場合の考え方を踏襲して、ややもすると付着挙動を単に鉄筋表面での付着現象のみに限定して考えがちである。ところが、異形鉄筋とコンクリートとの間に付着応力が生ずる場合には、コンクリート中でふしが機械的に滑動に抵抗し、これによってふしに接するコンクリートは支圧力を受けるとともに鉄筋周方向に引張応力を生じさせ、場合によっては鉄筋に沿った縦ひびわれや、ふし部分から横ひびわれが発生するのである。したがって、異形鉄筋の付着挙動は鉄筋周囲のコンクリートに発生するひびわれ、かぶりの厚さ、鉄筋の間隔、および横方向鉄筋の有無と量、等に大きく影響されると思われる。このことは、鉄筋の付着を考える場合、鉄筋周囲の相当広範なコンクリートの挙動を考えることが必要であり、また、これに伴って鉄筋の付着によって生ずるコンクリートのひびわれが部材の耐荷能力に影響を及ぼすことについても考慮することが必要と思われる。しかしながら、これらの点を考慮した鉄筋とコンクリートとの応力伝達の問題はきわめて複雑であるため、その機構の定量的把握、鉄筋の付着性能の妥当な評価方法、鉄筋表面の適切な異形の形状、等の基本的な点がまだ十分に解明されていないのが現状と思われる。また近年コンクリート構造物の大型化、施工の合理化等の観点から直径が 50 mm 以上の

太径鉄筋が使用されるようになり、その使用方法に関連してあらためて鉄筋の付着性能が問題となっており、応力伝達の解明の必要性がますます大きくなってきているものと思われる。

本論文は、以上の観点に立って、鉄筋の付着の問題を鉄筋とその周囲のコンクリートとの応力伝達の挙動に着目して研究した結果を取りまとめたものである。すなわち、両者の応力伝達の問題をまず単純なモデルに置き換えて理論的に把握し、これを応用して両引き状態における応力伝達の挙動、およびこれと関連させて鉄筋の耐久性と密接に関係のあるコンクリートの最大ひびわれ間隔について論じ、ついで鉄筋の付着性能を合理的に評価する方法について、独特の引抜き試験方法を提案するものである。さらに、鉄筋とコンクリートとの応力伝達機構の 1 つの応用例として、鉄筋の重ね継手を取り上げ、これの応力伝達機構、重ね継手の信頼度を高めるための重ね継手補強金具の考案とその効果、重ね継手の設計方法等について論じようとするものである。

### 2. 既往の研究

鉄筋とコンクリートとの応力伝達の理論的な研究の先駆的なものは、鉄筋とコンクリートとの応力と変形の関係から微分方程式を誘導し、種々の境界条件における付着応力度分布の理論式を求めた福田の研究<sup>1)</sup>がある。この研究によって鉄筋の引抜き試験時、押抜き試験時、およびコンクリート収縮時における鉄筋とコンクリートとの間の弾性挙動が基本的に把握されたのである。付着挙動の非線形性を考慮した研究としては、鉄筋とコンクリートとの間に非線形の相対すべりの関係を仮定して求めた森田の研究<sup>2)</sup>がある。有限要素法を用いた解析としては Ngo, Scordelis の研究<sup>3)</sup>、Lutz, Gergely の研究<sup>4)</sup>、Nilson の研究<sup>5)</sup>等が 1967 年以降に発表され、以降わが国でも同様な手法による研究が行われている。コンクリ

\* 正会員 工博 横浜国立大学教授 工学部土木工学科

ートの脆性的な挙動、ひびわれの影響、等を十分定量的に考慮することは困難であるが、有限要素法はこの種の問題を解析的に求める場合に最も強力な手法の1つと思われる。一方、実験的研究としては、古くは水セメント比則で有名な D.A. Abrams の研究<sup>9)</sup>等があるが、抵抗線ひずみゲージの大量使用による本格的な付着応力度の測定を行った Mains の研究<sup>7)</sup>が 1951 年に報告されている。Mains は鉄筋の中心を切削して溝を作り、そこに多数のひずみゲージを溝に沿って貼付し、それによって部材中での鉄筋応力度の分布を求めている。この方法は、鉄筋表面の付着に悪影響を及ぼすことなく鉄筋の応力分布を詳細に測定できる画期的な方法であって、わが国においても 1963 年に水野・渡辺がほぼ同様な方法を用いて普通丸鋼、異形丸鋼およびねじり異形棒鋼を用いた部材の付着応力分布を求めている<sup>8)</sup>。これらの実験により鉄筋コンクリート部材中での付着応力分布が明らかにされ、部材中での鉄筋とコンクリートとの応力伝達の挙動が通常的设计計算で仮定されているような平均的なものでないことが認識されるようになった。これらの実験結果からも明らかのように、コンクリート中の鉄筋の付着応力分布はある程度鉄筋応力が大きくなると複雑な性状を示すようになり、このことは、鉄筋周囲のコンクリートの挙動を詳細に把握することを必要とするのである。これについては、B.B. Broms および後藤がコンクリートに発生したひびわれに樹脂またはインクを圧入して内部ひびわれの状況を観察している<sup>9)・10)</sup>。特に、後藤は異形鉄筋周囲の内部ひびわれについて詳細に実験し、異形鉄筋のふしを起点として内部ひびわれが発生していることを見出している。また、異形鉄筋周囲における断面の面外変形についても測定し、鉄筋コンクリート部材の表面に現われたひびわれは、その幅が内部まで一様ではなく、鉄筋近傍ではきわめて小さくなっていることを指摘している<sup>11)</sup>。

鉄筋の異形の形状については太径鉄筋 D51 を対象として鉄筋の定着性、耐疲労性に着目した研究が国分・岡村によって行われ、ふしとコンクリートとの支圧面積が鉄筋の付着性能を決定するものとして、支圧面積係数を指標とすることを提案している<sup>12)</sup>。また、国分・岡村は切削加工によって種々の支圧面積、およびふし高さを有する鉄筋を製作して、ふしの形状と鉄筋の定着性能特性との関係を実験的に求めている<sup>13)</sup>。

鉄筋の付着性能としては、主として定着性能およびひびわれ分散性能が注目され、これに対して種々の試験方法が提案されている。前者については単純な引抜き試験<sup>14)</sup>、およびせん断力を考慮した偏心引抜き試験<sup>15)</sup>等があるが、試験結果の評価方法も含めて、まだ満足な試験方法が確立されていないと思われる。一方、後者につい

ては両引きによる試験方法が提案されており<sup>11)</sup>、最大ひびわれ間隔が鉄筋直径、鉄筋比に関連することが求められているが、鉄筋の付着性能の評価とは必ずしも結びついていないと思われる。

鉄筋の重ね継手については、すでにいくつかの実験結果が報告されており、継手端部における付着応力度が大きいこと、継手部に横方向鉄筋を配置すると継手の耐力が増大すること、等が報告されている<sup>16)</sup>。また、重ね継手部の補強にせん断鉄筋が有効であることも実験によって求められている<sup>17)</sup>。しかしながら、重ね継手部の応力伝達機構についての解析的研究はほとんど行われていなかったものと思われる。また、重ね継手はその機構をすべて周囲のコンクリートの品質に依存しているため、その信頼度が懸念される場合があるが、これに対して重ね継手部を機械的に結合し、合理的に継手の安全度を増す方法、等についての研究もほとんど見られないようである。

鉄筋の付着性能と鉄筋コンクリート部材の耐力との関係については、はりのせん断耐力が付着の良好でない場合に増大することが Kani らによって指摘されており<sup>18)・19)</sup>、また地震力のような繰返し荷重に対しては、異形鉄筋より普通丸鋼の方が優れているとの実験結果が大野・柴田・服部より報告されている<sup>20)</sup>。このことは、鉄筋の付着性能を評価する基準を定める場合にきわめて重要な事項であると思われる。

以上、本論文のテーマに関係のあるいくつかの既往の研究を通じて、鉄筋とコンクリートとの応力伝達についての研究の概要を簡単に述べた。ただし、ここではこれらに関連して著者自身が行った研究結果については、次章以下で記述するため除いてある<sup>21)~29)</sup>。

### 3. 応力伝達に関する理論

#### (1) 基礎理論

鉄筋とその周囲のコンクリートとの間の応力伝達機構には多くの因子が複雑に影響を及ぼすために、これらの因子をすべて定量的に把握して解析することは現段階ではきわめて困難と思われる。そこでここではまず鉄筋とコンクリートとの応力伝達を考える上で最も基本となる状態、すなわち両者を弾性体とし両者の間の付着が完全である場合について、理論的に解析することとした<sup>21)</sup>。解析方法としては、鉄筋コンクリート部材を軸方向部材とし、鉄筋も含めて部材を軸方向要素に分割し、要素間の応力および変形の関係から連立微分方程式を誘導し、これを解く方法である。なお、この理論は部材の幅に比べ長さがやや大きい場合に適用するものである。

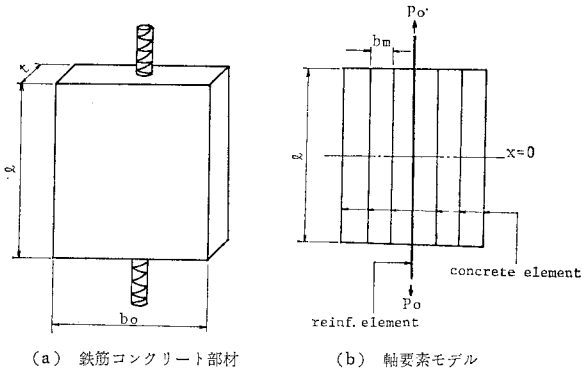


図-1 対称な鉄筋コンクリート部材とその軸要素モデル

問題を単純化するため、図-1 (a) のように鉄筋の埋め込まれた鉄筋コンクリート板を考え、この板を鉄筋に平行な要素に分割し、各要素の断面積は要素の中心に集中し、これらの要素がせん断剛性のみをもつ板で結合されている 図-1 (b) の系に置き換える。ここで、せん断剛性については要素の中心間におけるコンクリート板のせん断変形抵抗を考える。

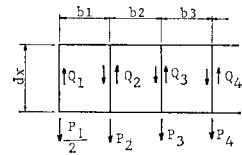


図-2 軸要素間の力の伝達

このような置き換えにより、各要素間の応力の伝達は図-2 に示される関係で表現できる。鉄筋が中央にある対称モデルを考えれば、各要素に作用する軸力と要素間のせん断力との関係は 図-2 から式 (1) で表わされる。

$$\frac{dP_i}{dx} = -2Q_i, \dots, \frac{dP_i}{dx} = Q_{i-1} - Q_i, \dots, \frac{dP_n}{dx} = Q_{n-1} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、

- $P_i$ :  $x$  の位置における鉄筋を含む要素の軸力
- $P_i$ :  $x$  の位置におけるコンクリート要素の軸力
- $Q_i$ :  $x$  の位置における要素  $i$  の右側の単位長さ当りのせん断力

一方、せん断力とせん断変形の関係は式 (2) で表わされる。

$$Q_i = \tau_i t_i G = \frac{w_{i+1} - w_i}{b_i} \cdot t_i G \dots \dots \dots (2)$$

ここで、

- $\tau_i$ : せん断ひずみ
- $t_i$ : 板の厚さ
- $G$ : コンクリートの剛性率
- $w$ : 要素の軸方向変位
- $b$ : 要素間の距離

式 (1) と式 (2) を組み合わせることにより、この系を

次の連立微分方程式で表わすことができる。

$$\begin{bmatrix} D^2 - 2\lambda_{11} & 2\lambda_{11} & 0 & \dots & 0 \\ \lambda_{12} & D^2 - (\lambda_{12} + \lambda_{22}) & \lambda_{22} & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_{23} & D^2 - (\lambda_{23} + \lambda_{33}) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & D^2 - \lambda_{n-1,n} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ \vdots \\ w_n \end{Bmatrix} = 0 \dots \dots \dots (3)$$

ここで、

- $\lambda_{ii} = \frac{t_i G_i}{A_i E_i b_i}, \lambda_{i,i+1} = \frac{t_i G_i}{A_{i+1} E_{i+1} b_i}$
- $A_i, A_{i+1}$ : それぞれ要素  $i, i+1$  の断面積
- $E_i, E_{i+1}$ : それぞれ要素  $i, i+1$  のヤング率
- $G_i, b_i, t_i$ : それぞれ要素  $i, i+1$  間の剛性率, 間隔, 厚さ

図-1 のような両引き部材を対称7要素程度に分割する場合には、式 (3) から固有値を計算し、境界条件を入れて両引き状態における応力伝達挙動の理論式を求めることができる。たとえば対称7要素の場合、図-1 (b) を参照し各要素の軸方向ひずみおよび中心軸に配置された鉄筋の付着応力度の分布は次のように求められる。まず、この場合の固有値は次の式 (4) から3次方程式を解くことにより式 (5) に示される  $\alpha, \beta, \tau$  および  $D^2 = 0$  の解として得られる。

$$D^6 + a_1 D^5 + a_2 D^4 + a_3 D^3 = 0 \dots \dots \dots (4)$$

ここに、

$$\begin{aligned} a_1 &= -(\lambda_{12} + \lambda_{22} + \lambda_{23} + \lambda_{33} + \lambda_{34} + 2\lambda_{11}) \\ a_2 &= \lambda_{12} \cdot \lambda_{23} + \lambda_{12} \cdot \lambda_{33} + \lambda_{12} \cdot \lambda_{34} + \lambda_{22} \cdot \lambda_{33} + \lambda_{22} \cdot \lambda_{34} \\ &\quad + \lambda_{23} \cdot \lambda_{34} + 2\lambda_{11} \cdot (\lambda_{22} + \lambda_{23} + \lambda_{33} + \lambda_{34}) \\ a_3 &= -\{\lambda_{12} \cdot \lambda_{23} \cdot \lambda_{34} + 2\lambda_{11}(\lambda_{22} \cdot \lambda_{33} + \lambda_{22} \cdot \lambda_{34} \\ &\quad + \lambda_{23} \cdot \lambda_{34})\} \end{aligned}$$

この結果を用いて、対称7分割要素モデルの場合の式 (3) の解として各要素のひずみ分布は、次の式 (5) で表わされる。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1(x) \\ \varepsilon_2(x) \\ \varepsilon_3(x) \\ \varepsilon_4(x) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_a(\alpha, x) & C_a(\beta, x) & C_a(\tau, x) & 1 \\ C_b(\alpha, x) & C_b(\beta, x) & C_b(\tau, x) & 1 \\ C_c(\alpha, x) & C_c(\beta, x) & C_c(\tau, x) & 1 \\ C_d(\alpha, x) & C_d(\beta, x) & C_d(\tau, x) & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{Bmatrix} \dots \dots \dots (5)$$

ここに、

$$\begin{aligned} C_a(Y, X) &= Y \cosh(Y \cdot X) \\ C_b(Y, X) &= \left(1 - \frac{Y^2}{2\lambda_{11}}\right) \cdot C_a(Y, X) \\ C_c(Y, X) &= \frac{1}{\lambda_{22}} \left[ \lambda_{12} + (Y^2 - \lambda_{12} - \lambda_{22}) \left(1 - \frac{Y^2}{2\lambda_{11}}\right) \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \cdot C_a(Y, X) \\
 C_d(Y, X) = & -\frac{1}{\lambda_{33}} \left[ \lambda_{23} \left( 1 - \frac{Y^2}{2\lambda_{11}} \right) + \frac{\lambda_{23} + \lambda_{33} - Y^2}{\lambda_{22}} \right. \\
 & \left. \cdot \left\{ \lambda_{12} + \left( 1 - \frac{Y^2}{2\lambda_{11}} \right) (Y^2 - \lambda_{12} - \lambda_{22}) \right\} \right] \\
 & \cdot C_a(Y, X)
 \end{aligned}$$

$C_1, C_2, C_3, C_4$  : 未定係数

図-1 に示される両引き状態の場合には、部材端部すなわち  $x=l/2$  で  $\epsilon_1 = P_0/A_s E_s, \epsilon_2 = \epsilon_3 = \epsilon_4 = 0$  であるから、これを式 (5) に代入することによって、式 (5) の未定係数  $C_1 \sim C_4$  が容易に求められる。ただし、 $P_0$  は

鉄筋端部に作用する軸方向力、 $A_s, E_s$  はそれぞれ鉄筋の断面積、ヤング係数である。

また、鉄筋の付着応力度の分布は式 (5) を微分することによって式 (6) のように求められる。

$$\begin{aligned}
 \tau_0(x) = & \frac{A_s E_s}{u} (C_1 \alpha^2 \sinh \alpha x + C_2 \beta^2 \sinh \beta x \\
 & + C_3 r^2 \sinh r x) \dots\dots\dots (6)
 \end{aligned}$$

ここに、 $\tau_0(x)$  は付着応力度、 $u$  は鉄筋の周長である。

この解の妥当性を確認するために、図-3 中に示す均等質部材の内部応力について、この解による値を応力関数による理論値（厳密解）と比較した。その結果、図-

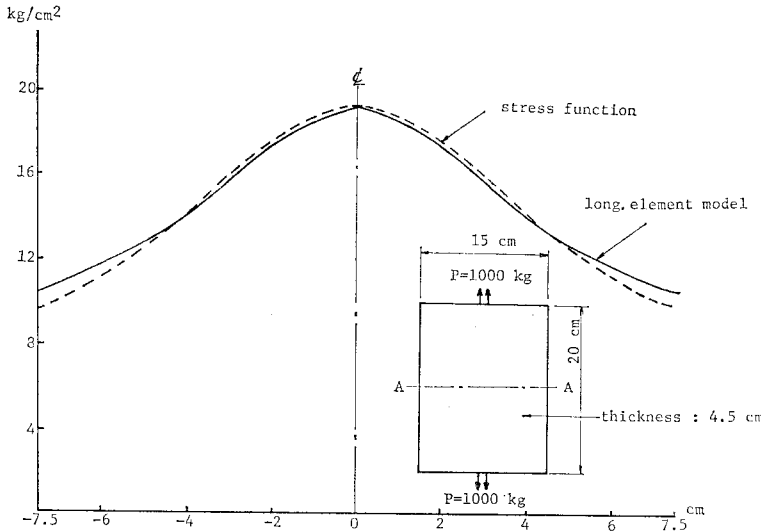


図-3 中央断面（図の A-A 断面）の応力分布の計算値の比較

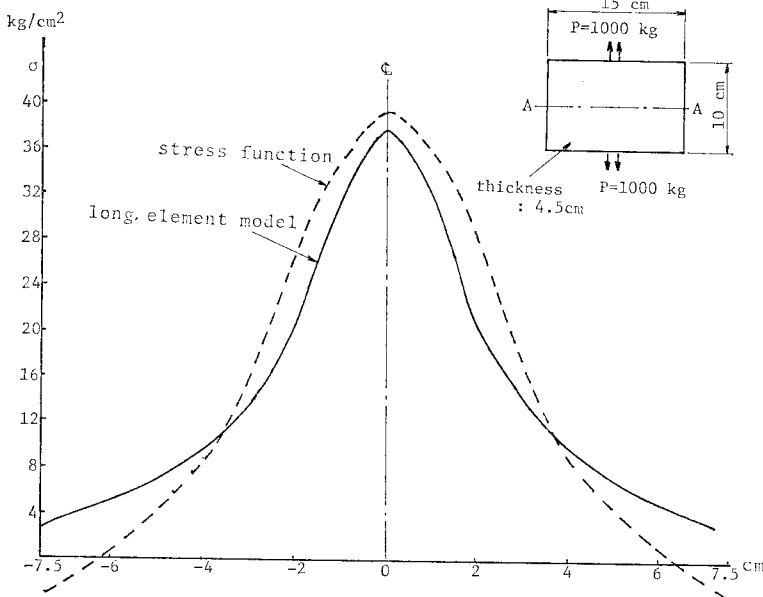


図-4 長さが幅に比べて小さい場合の中央断面（図の A-A 断面）の応力分布の計算値の比較

3 に示すように、軸方向要素に分割する本方法の解は、部材の軸方向の長さが幅の約 1.5 倍程度以上あれば部材内の応力分布をよく表わすことが確かめられた。しかしながら部材の軸方向長さが幅の 2/3 程度以下となると、図-4 に示すように部材の中央断面の縁部で応力関数による理論値の符号が作用力の符号と異なって圧縮応力が生じているのに対して、本方法による値はそうになっていない。これは、この方法が 2 次元問題を 1 次元の軸方向要素のみで取り扱っているからであって、この方法が適用に限界をもつことを示すものである。しかしながら、部材の長さが幅と比べて特に小さくなければ部材内部の応力伝達についての解析解として適用することが可能である。本方法は解が数式の形で求められること、計算にあたって有限要素法の場合より未知数が相当に少なくよいこと、などの特徴を有しており、鉄筋とコンクリートとの応力伝達に関する概念を把握するための基礎理論として有用であると思われる。

(2) ばね系有限要素法による理論

部材の軸方向応力の分布を求める方法として 図-1 の軸方向要素を直列のばねの集合体に置換し、軸要素相互の間のせん

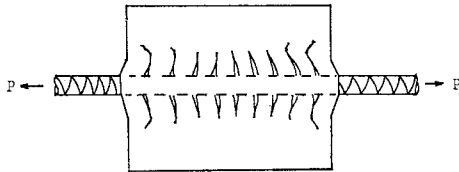


図-5 内部ひびわれと断面の面外変形の状態

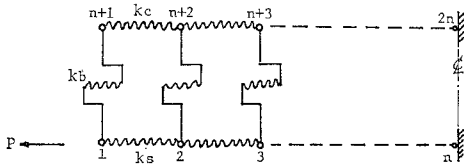


図-6 ばね系有限要素モデル

断剛性も同様に分割されたせん断ばねに置換したモデルとし、これを有限要素法によって計算する方法が考えられる<sup>22)</sup>。この方法は(1)で述べた基礎理論のモデルを単にばねモデルに置換しただけであるが、ばねの剛性を独立に変化させて計算できるので計算方法としては式(5)または式(6)を用いる場合より適用性が高い。ここでは、このモデルを用いてコンクリートの内部ひびわれを考慮した鉄筋とコンクリートとの応力伝達について述べる。

鉄筋とコンクリートとの間の軸方向の変位の差は、従来より両者間の滑りによるものであると考えられてきたが、異形鉄筋の表面にはふしがありコンクリートとかみ合っているため、すべての変位の差を両者間の滑りとして考えるのは適当でないと思われる。

鉄筋周囲のコンクリートの挙動については、鉄筋の引張応力が大きくなると異形鉄筋のふし付近から内部ひびわれが発生することが後藤の研究<sup>10)</sup>で明らかにされており、また、著者の行った4.で述べる内部ひびわれの実験結果から内部ひびわれの発生と成長の状態が把握されている<sup>22)</sup>。これらの実験結果から鉄筋の周囲に内部ひびわれが発生すると、鉄筋とコンクリートとの間の応力伝達はコンクリートのせん断変形等のほかに内部ひびわれによって図-5に示すように形成されるくし歯状の片持ちはりの曲げ変形の影響が加味されるため、内部ひびわれの成長に伴って応力伝達の剛性が徐々に低下することが考えられる。このような現象を力学的に検討するために、ここでは図-6に示すような単純化された有限要素モデルを考えた。すなわち、軸方向に鉄筋お

よびコンクリートを1列ずつのばねに置換し両者間の結合ばねの中で次のようにコンクリートの内部ひびわれによる剛性低下の影響を含めた剛性マトリックスを考えることとした。

内部ひびわれ発生前：

$$\{k_b\} = k_1 \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (7)$$

内部ひびわれ発生後：

$$\{k_b\} = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

ここで、

$$k_1 = \frac{2 G_c t l_m}{b_m}$$

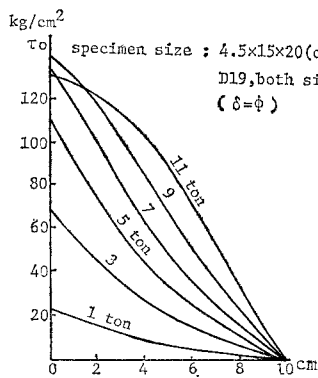
$$k_2 = \frac{6 E_c I_m}{e^3 \delta}$$

- $E_c, G_c, t$  : それぞれ、コンクリートのヤング率、剛性率、部材厚さ
- $l_m$  : ばね要素の長さ
- $b_m$  : 鉄筋要素とコンクリート要素の中心間隔
- $\delta$  : 内部ひびわれの間隔
- $e$  : 内部ひびわれの深さ
- $I$  : 内部ひびわれ間のくし歯状部分の断面2次モーメント

計算を単純化するために内部ひびわれの間隔を鉄筋直径の倍数とし、実験結果を参照して内部ひびわれの発生と発達についてはその位置での鉄筋の引張応力 $\sigma_s$ が $\sigma_{s1}$ のときに発生し、 $\sigma_{s2}$ のときにその深さ $e$ が鉄筋直径 $\phi$ に等しくなる次のような直線的な成長を仮定することとした。

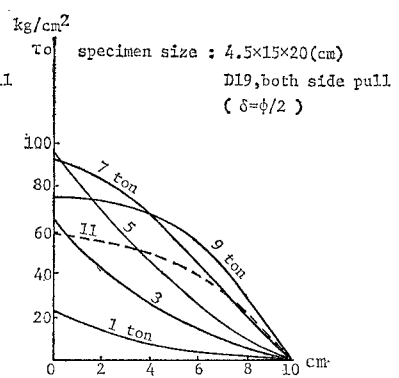
$$e = \frac{(\sigma_s - \sigma_{s1})}{\sigma_{s2}} \cdot \phi \dots\dots\dots (9)$$

内部ひびわれを検討している部分での鉄筋の引張応力が $500 \text{ kg/cm}^2$  (50 MPa)のときに内部ひびわれが発生し、 $3000 \text{ kg/cm}^2$  (300 MPa)のときにその深さが鉄



(ひびわれ間隔  $\delta = \phi$ ,  $\phi$  : 鉄筋直径)

図-7 附着応力度分布計算値 (1)



(ひびわれ間隔  $\delta = \phi/2$ ,  $\phi$  : 鉄筋直径)

図-8 附着応力度分布計算値 (2)

筋直径に等しくなると仮定すると、式 (9) において  $\sigma_{s1} = 500 \text{ kg/cm}^2$  (50 MPa),  $\sigma_{s2} = 2500 \text{ kg/cm}^2$  (250 MPa) となる。これを用いて 図-6 の有限要素モデルについて  $n=11$  として繰り返し演算を行った結果を 図-7 および 図-8 に示す。ここで 図-7 は内部ひびわれの間隔を鉄筋直径に等しいとした場合であり、図-8 はこれを鉄筋直径の 1/2 に等しいとした場合であって、鉄筋とコンクリートとの間の応力伝達特性は、鉄筋周囲に発生する内部ひびわれの間隔とその深さに大きく影響され得ることが示された。また、実験によって測定される付着応力度分布の非線形性は、ここで仮定したような内部ひびわれの発達を考慮することによって表現し得ることが示されたものと思われる。ただし、実際の内部ひびわれは、ある程度不規則に発生・発達するし、鉄筋のふし近傍でのコンクリートの支圧変形、コンクリートの縦ひびわれ等が応力伝達特性に複雑に影響するので、ここで述

べた理論はあくまで現象を把握するための 1 つの概念的なものである。

図-9 にコンクリート円柱の中心軸に鉄筋が埋め込まれた部材の両引き状態における付着応力度の分布の計算値と実験値との比較の例を示す。なお計算は部材を 図-6 のモデルに置換して極度に単純化したので、これを補うために計算値と実験値とが対応するようにせん断剛性に対しては 0.3、内部ひびわれに起因する剛性については 0.2 の低減係数を用いて計算を行ったものである。

#### 4. 鉄筋周囲のコンクリートの挙動とその影響

##### (1) 内部ひびわれに関する実験

鉄筋周囲のコンクリートの種々の挙動が異形鉄筋の付着挙動に影響を与えるであろうことは 1. で述べたが、ここでは前章のばね系有限要素モデルによる解析で仮定した内部ひびわれについてまず述べる。

鉄筋周囲のコンクリートに発生し、外面に達しない数多くの内部ひびわれが存在することは後藤の研究で明らかにされているが<sup>19)</sup>、内部ひびわれの発生と成長の過程については現在まで明らかにされていなかった。

そこで本研究では厚さが鉄筋直径よりわずかに大きいコンクリート平板の中央に鉄筋を配置した供試体を作製して両引き試験を行い、コンクリート平板に現われる内部ひびわれに相当するひびわれを荷重段階ごとに詳細に観察した<sup>22)</sup>。この平板供試体はそのまま両引き試験を行うと鉄筋の両側のコンクリートが剥離するので、図-10 に示すように拘束金具によって平板の両側から拘束した。この金具は何個も独立して配置するので軸方向の剛性に対してはなんら影響を及ぼさない。

しかし横方向にはあらかじめボルトで締めつけておくために若干の応力が導入され、そのため純粋な意味で鉄筋コンクリート引張部を切り出したような応力状態とは異なっている。しかしながらボルトの締めつけによってコンクリートの横方向に生ずる平均圧縮応力度は  $60 \text{ kg/cm}^2$  (6 MPa) 程度であるので、内部ひびわれの発生と成長には特に大きな影響を与えることはないものと思われた。

供試体は、幅 15 cm、長さ 15 cm、厚さ 3 cm のコンクリート平板の中央に D 25 の鉄筋を 1 本埋め込んだもので、コンクリートには圧縮強度  $360 \text{ kg/cm}^2$  (36 MPa) のモルタルを用いた。

ひびわれの観察は、アセトンを含ませ

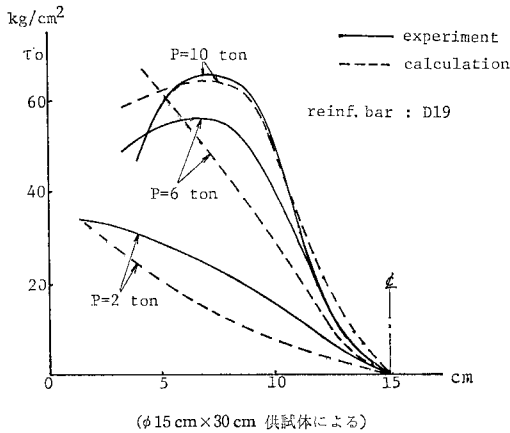


図-9 両引き状態における付着応力度分布

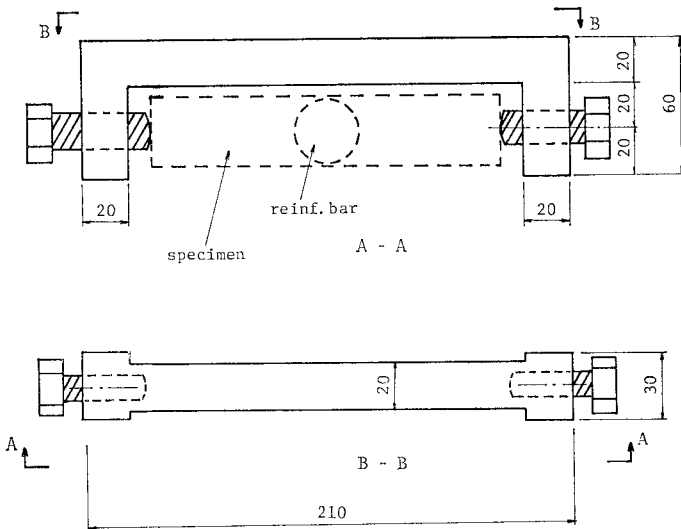


図-10 平板供試体用の拘束金具 (寸法単位 mm)

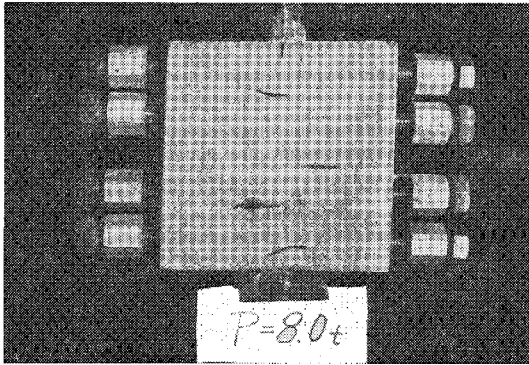


写真-1 内部ひびわれの直接観察 (1)

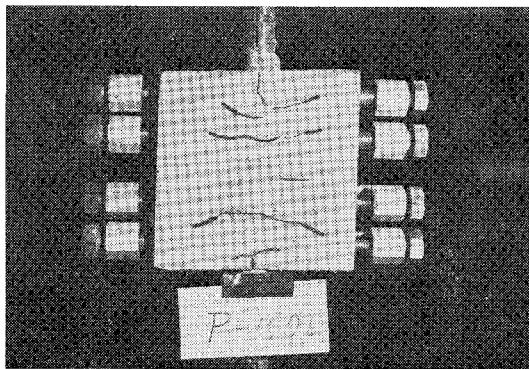


写真-2 内部ひびわれの直接観察 (2)

た布で供試体の観察面を拭き、アセトンが即座に乾燥した後にひびわれ中に残る線を見出すことによって行った。この方法は肉眼でまったく見えないような微細なひびわれの発見にも有効であった。写真-1 および写真-2 に鉄筋端部の引張応力度がそれぞれ  $1600 \text{ kg/cm}^2$  ( $160 \text{ MPa}$ ) および  $3000 \text{ kg/cm}^2$  ( $300 \text{ MPa}$ ) のときのひびわれの成長状態を示す。これらの写真によれば鉄筋近傍のひびわれは鉄筋応力度が端部で  $1600 \text{ kg/cm}^2$  ( $160 \text{ MPa}$ ) 程度になって明瞭に現われ、 $3000 \text{ kg/cm}^2$  ( $300 \text{ MPa}$ ) 程度になるとひびわれの深さは鉄筋直径以上となるものも見られる。

供試体観察面の変形をコンタクトゲージによって測定した結果によれば、鉄筋の近傍のコンクリートはほぼ鉄筋と一体となって変形しており、内部ひびわれの発達によって鉄筋の大きな伸びに追随していることが認められた。鉄筋軸からある程度離れた位置での軸方向の変形は僅かであるので、両者の変形の差はひびわれ間に形成されるくし歯状の片持ちはり的な変形を伴うことになる。したがって、きわめて簡単な実験ではあるが、傾向的には前章のばね系有限要素モデルを用いた理論において仮想した鉄筋近傍のコンクリートの挙動をある程度裏づけることができたものと思われる。

ここで述べた鉄筋周囲の内部ひびわれに相当するひび

われの直接観察方法は、簡便である上に鉄筋の応力の増加とともに連続して内部ひびわれの挙動を肉眼で確かめられるので、鉄筋の付着挙動を観察するのにきわめて有用であると思われる。

## (2) 縦ひびわれの影響

鉄筋周囲のコンクリートの挙動として内部ひびわれと同様に重要な因子は、鉄筋に沿って発生するコンクリートの縦ひびわれであると思われる。異形鉄筋を用いた鉄筋コンクリート部材では、一般に計算上の付着応力度の大きな位置で縦ひびわれが見られるが、計算上の付着応力度が零のところでも、局部的に生じている付着応力のため、横ひびわれ位置を起点として縦ひびわれが見られる場合がある。このような縦ひびわれが鉄筋とコンクリートとの応力伝達性状に及ぼす影響については、ほとんど明らかにされていないので、本研究では基礎的な実験を行ってこれを検討することとした。

実験は直径  $15 \text{ cm}$ 、高さ  $30 \text{ cm}$  のコンクリート円柱の中心軸に  $D19$  の鉄筋を配置して両引き、および片引き試験を行った。実験の要因としては、図-11 に示すような鉄筋に沿う縦ひびわれの有無、鉄筋周囲を拘束するための  $\phi 6$  によるらせん鉄筋の有無とその量とした。この結果、両引き試験では、縦ひびわれの有無が、鉄筋の付着に及ぼす影響を明確に把握することはできなかった。らせん鉄筋の効果については、縦ひびわれ面に対して  $0.1\%$  程度配置されている場合には、部分的に  $70 \text{ kg/cm}^2$  ( $7 \text{ MPa}$ ) 程度の付着応力度の発生が見られ効果があるようであった。片引き試験の場合には、縦ひびわれがあつたらせん鉄筋による補強がない場合に、平均付着応力度が  $55 \text{ kg/cm}^2$  ( $5.5 \text{ MPa}$ ) のときに別の縦ひびわれを発生して急激に引き抜けた。その他の供試体はいずれも軸鉄筋の降伏が先行し、付着応力度の分布も大きな相違は認められなかった。

以上の実験結果から、縦ひびわれに関しては次のように考えるのが妥当であると思われる。すなわち、縦ひびわれが、あらかじめ1本鉄筋に沿ってコンクリートに入っている、それ自身では付着挙動に与える影響は小さく、縦ひびわれが付着強度を低下させるには、縦ひびわ

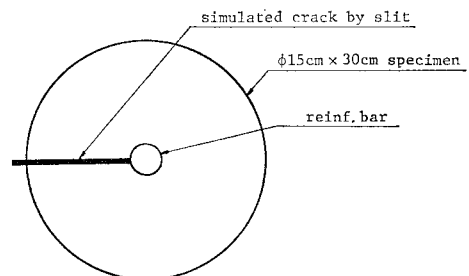


図-11 縦ひびわれを入れた供試体断面図

れが2本以上入って鉄筋に対する拘束が極度に小さくなった場合であると考えられる。また、らせん鉄筋などによる鉄筋周囲の拘束は、付着強度に対して大きな効果が期待できるものであり、実験によってもこれが確認された。ただし、あらかじめ縦ひびわれが入っていて周囲がらせん鉄筋などで拘束されていない場合は、縦ひびわれが入っていない場合に比べて若干別の縦ひびわれを発生しやすく付着強度も小さくなる。

実際の鉄筋コンクリート大型部材では、打ち込んだコンクリートの沈下によってコンクリート上面に鉄筋に沿った縦ひびわれが発生する場合がある。このような場合の付着強度についても横方向鉄筋が十分に配置されていれば耐力上の問題は大きく改善されるものと思われる。

### 5. コンクリートの最大ひびわれ間隔

#### (1) 最大ひびわれ間隔

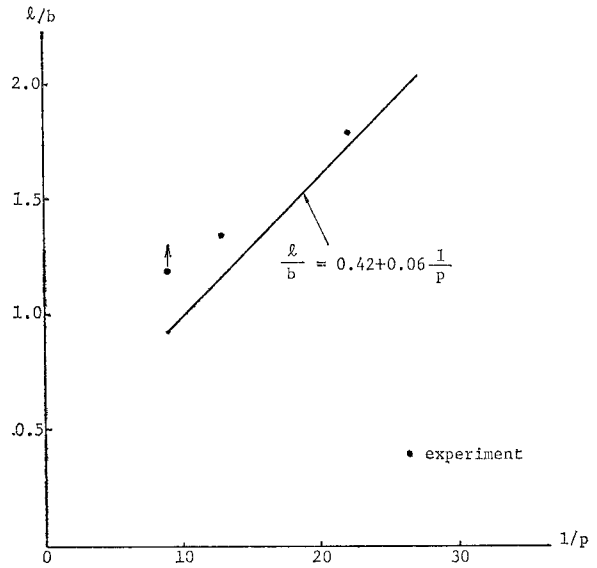
鉄筋コンクリートの耐久性を支配するコンクリートのひびわれ幅は、コンクリートに発生するひびわれの間隔と密接な関係があり、一般にひびわれ間隔が大きいほどひびわれ幅も大きくなる。したがって、鉄筋の作用応力下における最大ひびわれ幅を求めるには、そのときの最大ひびわれ間隔を知ることが必要である。そこで、ここでは 3.(1) で述べた軸要素モデルによる式 (5)、式 (6) を用いて両引き状態における引張鉄筋比と、最大ひびわれ間隔との関係を求めることとした。

計算にあたっては、円柱の中心軸部分に引張鉄筋が配置されたモデル部材を考え、これを円筒状要素に分割し、最外部の要素がある一定の引張ひずみに達するときコンクリートにひびわれが発生するとした。ただし、鉄筋の両端における付着応力度がある限度になればそれ以上はコンクリートへの応力伝達は増加しないものとした。実験結果を勘案し、コンクリートの引張ひずみの上限を  $100 \times 10^{-6}$ 、付着応力度の上限を  $150 \text{ kg/cm}^2$  ( $15 \text{ MPa}$ )、コンクリートのヤング係数を  $0.3 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  ( $30 \times 10^3 \text{ MPa}$ ) として計算を行った結果、最大ひびわれ間隔部材幅比と鉄筋比との関係について直線式である式 (10) を得た。また、この式を用いて円断面と等断面積の正方形断面に換算した場合の式として式 (11) を得る。

円断面の場合

$$\frac{l}{b} = 0.37 + 0.053 \frac{1}{p} \dots\dots\dots (10)$$

正方形の場合



図—12 最大ひびわれ間隔・部材幅比  $l/b$  と鉄筋比の逆数  $1/p$  との関係

$$\frac{l}{b} = 0.42 + 0.06 \frac{1}{p} \dots\dots\dots (11)$$

ここで、

$l$  : 最大ひびわれ間隔

$b$  : 断面の幅または直径

$p$  : 鉄筋比

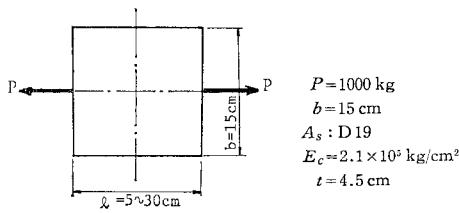
正方形断面の場合、式 (11) より、鉄筋比が 4% および 10% に対して最大ひびわれ間隔はそれぞれ断面の幅の 2 倍、および 1 倍程度であることがわかる。図—12 に実験結果を示すように鉄筋比が 4.5% から 8% までの間で傾向的に最大ひびわれ間隔は、式 (11) の関係を満足することが確かめられた。しかしながら、鉄筋比が 10% 以上になると計算上からはひびわれ間隔と幅との比が 1 程度となるが実験ではそのように小さい最大ひびわれ間隔は求められなかった。これは式の適用に限界があるからである。

通常の鉄筋コンクリートの場合、鉄筋のかぶりおよびあきは鉄筋直径以上であるので、鉄筋周囲のコンクリートの影響面積は鉄筋直径の 3 倍 × 3 倍が下限と考えられる。このときの鉄筋比は約 13% であり、また、鉄筋比の最小値も 3% 程度であるから式 (10) および式 (11) は実用上の鉄筋比の範囲でほぼ適用が可能であると思われる。

#### (2) ひびわれ間隔の限界

鉄筋コンクリートのひびわれ間隔は 図—12 の実験結果にも見られるように限界のあることが示された。このことは 図—4 に示した弾性体の基本的挙動および Broms の研究結果<sup>31)</sup> からも予想されることである。そ



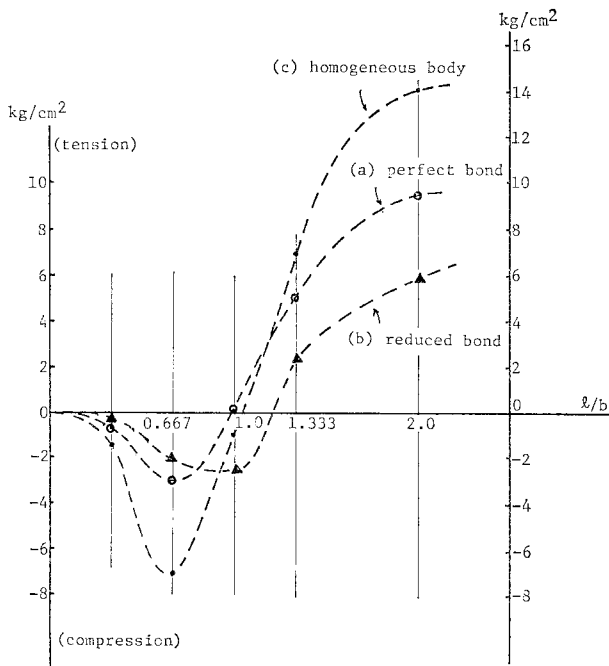


図—13 計算に用いた両引き状態の部材の諸元

ここで、ここでは2次元の有限要素法を用い単純なモデル化によって両引き部材の中央断面のコンクリート最外縁に引張応力が生ずる限界を求めることとした。

計算に用いた部材の形状は 図—13 に示すとおりで断面の中心に D19 鉄筋を配し、断面の幅を 15 cm、厚さ 4.5 cm、長さを 5 cm から 30 cm に変化させた5種類の形状について計算を行った。また、各形状のものについて、(a) 鉄筋とコンクリートとの付着が完全な場合、(b) 付着の不完全さを考慮して鉄筋に隣接するコンクリート要素の剛性を 1/10 に低減した場合、(c) 部材全体を均等質のコンクリートとした場合、の3種類の条件について計算を行った。

図—14 に鉄筋部分に加わる引張荷重が 1000 kg (10 kN) のときに発生する部材中央断面の最外縁部に生ずる応力度を示す。この図から明らかなように (a)、(b)、(c) いずれの条件の場合でも部材の長さが断面の幅よりある



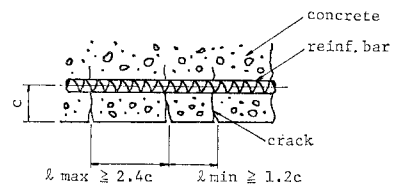
図—14 両引き状態の部材の中央断面最外縁部の応力度と部材の長さ幅比  $l/b$  との関係 (FEM による計算値)

程度大きければ中央断面最外縁部に引張応力が生じているが、部材の長さが小さくなるにつれてその値も小さくなり、いずれの場合も長さ幅比  $l/b$  が 1.0~1.2 の間で引張応力が零となり、長さがさらに小さくなると圧縮応力に変化している。この圧縮応力も長さが零に近づくにつれ零に収斂する。

実際の鉄筋コンクリート部材の場合には付着が完全でないで、ここでは簡単のため (b) を鉄筋コンクリートの場合として考えれば、長さが部材幅の 1.2 倍以下の場合には中央断面最外縁部に軸方向の引張応力が生じないために、鉄筋端部に加わる引張力がいかに大きくても最外縁部コンクリートにはひびわれが生じないことになる。このことは 図—12 における最大ひびわれ間隔に限界値のあることと合致している。

鉄筋コンクリートのコンクリート部分は、乾燥収縮による引張応力が生じている場合が多いので、荷重によって鉄筋に引張応力が生ずればコンクリート最外縁部には容易にひびわれが発生すると考えられる。そこで、単に鉄筋の引張応力によってわずかも最外縁部に圧縮応力が生ずればひびわれは発生しないと考えれば、図—15 に示すように最大ひびわれ間隔は鉄筋比に無関係に  $2.4c$  (ここで  $c$  は鉄筋の中心からコンクリート最外縁までの距離) 以上、最小ひびわれ間隔は  $1.2c$  以上となる。

したがって、鉄筋コンクリート部材のひびわれ間隔は単に鉄筋比や付着性能に支配されるだけでなく、弾性体としての固有の力学的機構によって限界値が存在するのでひびわれ間隔を小さくしようと鉄筋の付着強度を大幅に改善することはあまり大きな意味を持たないものと思われる。



図—15 ひびわれ間隔の限界値

### 6. 鉄筋の付着性能の試験方法

鉄筋には、ひびわれ分散性能、定着性能、重ね継手とした場合の継手性能、等に対して所要の付着特性を持たせることが必要であるが、一方、鉄筋コンクリートのせん断耐力に対しては鉄筋の付着がむしろ悪影響を与える場合もある<sup>19)</sup>。現在までのところ鉄筋の付着特性を合理的に評価する方法は確立されておらず、またそのための試験方法も満足なものがないものと思われる。そこで本研

究では、付着性能を合理的に評価するための情報を得ることを当面の目的として鉄筋の付着試験方法を提案することとした。試験方法の検討にあたっては、試験が簡便であること、種々の鉄筋径に容易に適用でき同一に評価できること、実構造部材中での付着状態にある程度類似な応力状態で試験ができること、等に留意して次のような試験方法を提案することとした。すなわち、試験の簡便性、機構の明解性の点から引抜き試験方法とし、付着挙動に影響が大きいと思われる項目、すなわち、鉄筋のかぶり、鉄筋の埋込み長さ、横方向鉄筋量、荷重端におけるコンクリートの支圧状態、等をすべて無次元化して表現することとした<sup>23),24)</sup>。

実構造物における最小かぶりは、 $1\phi$  ( $\phi$  は鉄筋直径) であるので供試体のかぶりは  $1\phi$  とした。供試体は鉄筋を水平に型枠中に配置し、鉄筋の下側に  $1\phi$  のかぶりを、鉄筋の上側には供試体の製作誤差を考慮して  $2\phi$  のかぶりをとることとした。鉄筋の埋込み長さは  $5\phi$  とした。試験時の荷重端には2枚の鋼板を用いて載荷板の間

隔を  $3\phi$  とすることとした。これらの寸法は実験結果を検討して定めたものである<sup>23)</sup>。図-16 に供試体の形状および載荷状態を示す。試験時の測定は鉄筋自由端の相対変位をダイヤルゲージを用いて測ることとした。試験値の表現方法としては、自由端の相対変位量  $s$  を鉄筋直径  $\phi$  で除して無次元化した相対すべり指数  $s/\phi$  と、平均付着応力度  $\tau_0$  との関係として表わすこととした。

図-17 に切削によって表面に異形を施したモデル鉄筋を用いてふしの形状が試験結果にどのように反映されるかを試験した一例を示す。ここで用いたモデル鉄筋は垂直な横ふしをもち、ふしの間隔を鉄筋直径の約70%としたものを標準とし、これに対してふしの間隔が2倍のもの、およびふしの高さが1/2のもの、の3種類について比較した。この結果この試験方法によってふしの支圧面積の差が容易に区別できること、付着特性とふしの支圧面積との間に一定の関係が見出せること、などが明らかとなった。また、別の実験から鉄筋のふし形状が相似な場合には平均付着応力度と相対すべり指数  $s/\phi$  との関係がほぼ同一となること<sup>24)</sup>、横ふしと斜めふしとの差が容易に結果に表われること<sup>23)</sup>、等の結果も得られた。したがって、本研究で提案した鉄筋の付着試験方法は所期の特性を有する試験方法になり得ることが明らかとなった。

鉄筋には直径の種類が多いためにすべてを相似とした付着試験を行う場合には直径ごとに異なった寸法の型枠が必要となり、実際上煩雑である。そこで本研究の方法では、供試体の幅が試験結果にあまり影響しないことが確かめられたので供試体の幅を3種類にグループ分けし、型枠の底板と側板はグループ内で兼用とし、鉄筋が貫通する端板のみを各鉄筋ごとに用意することとした。鉄筋の埋込み長さは鉄筋の直径ごとに異なるが底板および側板のそれぞれの長さの位置に切込みをつけることによって満足させることができる<sup>24)</sup>。なお、試験の精度を確保するために型枠は鋼製とすることが必要である。

試験結果の評価方法としては、付着特性を明確に識別するために相対すべり指数  $s/\phi$  が  $2 \times 10^{-3}$  のとき、 $5 \times 10^{-3}$  のとき、最大荷重のとき、の3段階における平均付着応力度の値を用いて評価するのがよいと思われる。ただし、これらの値によって識別される付着特性の物理的な意義については今後検討を加えることが必要である。

### 7. 鉄筋の重ね継手

#### (1) 重ね継手の応力伝達機構

鉄筋の重ね継手は、その周囲のコンクリートを介して

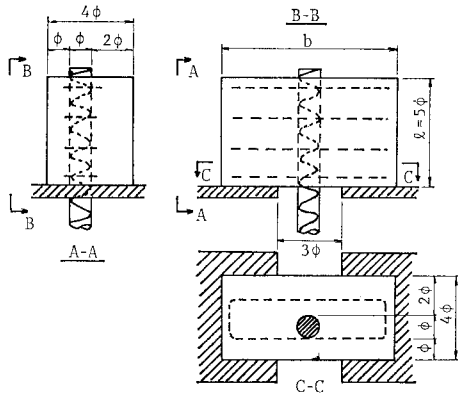
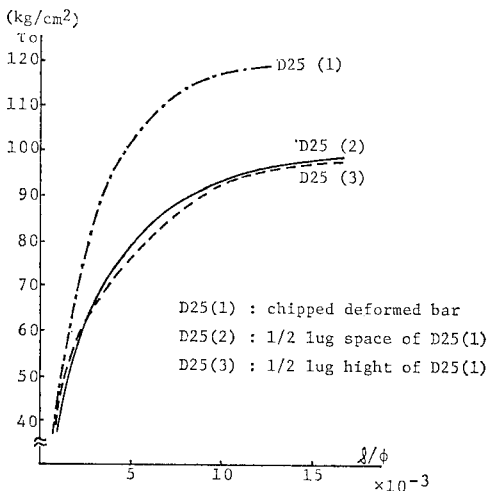


図-16 付着試験供試体の形状



( $\tau_0$ : 平均付着応力度,  $s/\phi$ : 相対すべり指数)

図-17 付着試験の結果の例

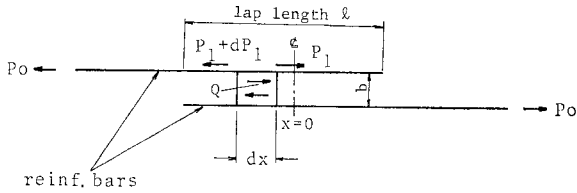


図-18 重ね継手のモデル

鉄筋の相互の応力を伝達するものである。この場合の応力伝達機構については、継手が引張応力を受ける場合、周囲のコンクリートにはひびわれが発生するので軸引張力はすべて鉄筋が受け持ち、周囲のコンクリートはせん断剛性のみをもつとすれば 図-18 に示すようなモデルに重ね継手を置き換えることができる。このモデルは式(3)と同様にして式(12)に示す連立微分方程式で表わすことができる<sup>25)</sup>。

$$\begin{bmatrix} D^2 - \lambda^2 & \lambda^2 \\ \lambda^2 & D^2 - \lambda^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(12)$$

ここで、

$$\lambda^2 = \frac{Gt}{A_s E_s b}$$

$G, b, t$ : それぞれコンクリートの剛性率, 鉄筋の中心間隔, 剛性を考える厚さ

$A_s, E_s$ : それぞれ鉄筋の断面積, ヤング係数

$w_1, w_2$ : 継手部鉄筋の変位

図-18 の境界条件を入れて式(12)を解くと、重ね継手部の鉄筋の引張応力度分布、および付着応力度分布はそれぞれ式(13)および式(14)で表わされる。

$$\sigma_s = \frac{P_0}{2A_s} \left[ 1 - \frac{\sinh(\sqrt{2}\lambda x)}{\sinh(\lambda l/\sqrt{2})} \right] \dots\dots\dots(13)$$

$$\tau_0 = \frac{P_0}{u} \frac{\lambda \cosh(\sqrt{2}\lambda x)}{\sqrt{2} \sinh(\lambda l/\sqrt{2})} \dots\dots\dots(14)$$

ここで、

$P_0$ : 継手に作用する力

$u$ : 鉄筋の周長

図-19 に実験結果を勘案して式(14)の  $t$  を鉄筋直径の 1/2 として計算した結果を示す。また、同図には

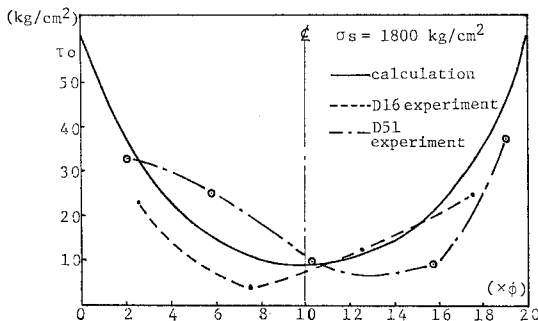


図-19 設計荷重時の重ね継手部付着応力度分布

鉄筋に D16 および D51 を用い、相似な条件で実験を行った結果を示す。実験値はコンクリートがひびわれ間で若干の引張応力を分担するためにややばらついているが、D16 の場合も D51 の場合もほぼ同じ力学的挙動を示すこと、式(14)の計算結果と傾向がよく一致していることなどが示されている。

(2) 補強金具による重ね継手の改良

重ね継手は、施工の最も容易な継手であるが鉄筋どうしが直接接続されていないために、継手周囲のコンクリートに弱点があると継手の強度は大幅に低下する恐れがある。また、D51 のような太径鉄筋に重ね継手を用いることは、継手が受ける軸力が大きいために不安をもたれているようである。そこで本研究では 図-20 に示すような鋼製環とくさびの組合せによる重ね継手補強金具を考案し、これを用いて重ね継手の靱性および信頼度を高めること、重ね合せ長さを低減すること、等の検討を行った。この補強金具は付着応力の大きい継手端部に配置するとその効果が大きいことから初期の研究<sup>25)</sup>では継手両端に配置して実験を行ったが、施工性、経済性等を考慮して補強金具を継手中央部に 1 個配置して研究を進めることとした<sup>26)</sup>。補強金具に用いる鋼製環は鋼管を冷間で偏平にしたものであり、くさびは鉄筋との接触面に歯型を入れて焼入れ加工を施したものをを用いた。

図-21 に 3. で述べたばね系有限要素モデルを用いて補強金具の配置された重ね継手部鉄筋の付着応力度分布を計算した結果およびその実験値を示す。この図に示

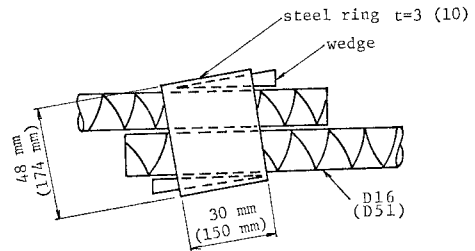


図-20 重ね継手補強金具 (D16用およびD51用)

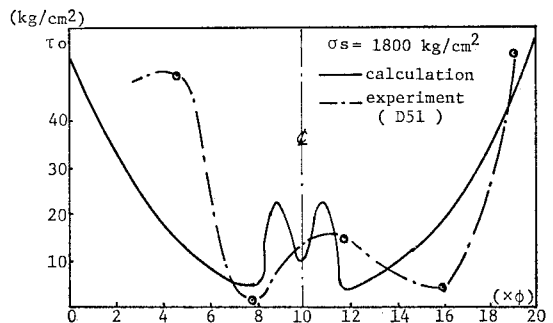


図-21 継手補強金具をつけた場合の付着応力度分布

されているように継手に作用する鉄筋応力が許容応力度程度の場合には、補強金具部分で負担する応力は必ずしも大きくないが、鉄筋応力が大きくなるに従い補強金具の効果が大きくなることが実験的に確かめられた<sup>27)</sup>。なお、図-23 の計算値に示すようにせん断ばねの剛性を一般部の 20 倍に高めて補強金具の剛性を評価したところほぼ実験値と対応する計算結果となった。

### (3) 重ね継手の耐力と設計方法

鉄筋の重ね継手の力学的性状に影響すると考えられる種々の因子のうち、本研究では鉄筋直径、重ね合せ長さ、横方向鉄筋量、かぶりの厚さ、継手部コンクリートに存在するたてひびわれによる欠陥、継手補強金具の効果、等について D16 を主鉄筋とした小型はり供試体を 20 体、D51 を主鉄筋とした大型はり供試体を 10 体作製して系統的な実験を行った<sup>27)</sup>。用いた鉄筋は斜めふしをもつ SD35 であり、コンクリートの圧縮強度は試験時  $370 \text{ kg/cm}^2$  であった。横方向鉄筋量については部材単位幅当りの鉄筋の断面積として主鉄筋に対する比率を用いその量を表現することとした。実験ではこの比率を  $1/3$ ,  $1/6$ ,  $1/12$  の 3 段階に変化させた。

この実験の結果<sup>27)</sup>、現行の土木学会コンクリート標準示方書の重ね継手の設計式によって求めた重ね合せ長さは D16, D51 いずれの場合でも満足なものであることが確かめられた。横方向鉄筋比率については少なくとも  $1/6$  以上配置することが好ましいと思われ、 $1/3$  配置した場合には十分満足な結果が示された。かぶりの厚さについては鉄筋直径の 0.7 倍の場合には D16, D51 の場合ともに鉄筋直径の 1.5 倍の場合に比べて 10% 程度耐力が低下したことから、少なくとも現行のコンクリート標準示方書に規定されている鉄筋直径以上のかぶりが必要と思われる。重ね継手に沿ったたてひびわれの影響については、横方向鉄筋比率が少ない場合明らかに継手耐力を低下させており、4. (2) で述べた付着に対する縦ひびわれの影響に比べ重ね継手の場合の方が継手部コンクリートの欠陥に対して敏感であることが示された。ただし、この場合でも横方向鉄筋比率が  $1/3$  の場合には縦ひびわれによる悪影響はまったく認められなかった。考案した補強金具については重ね合せ長さが短い場合にその効果が顕著であり、また、継手の靱性の改善にも有効であることが示された。別に行った疲労試験<sup>28)</sup>および高応力繰返し試験<sup>29), 30)</sup>の結果からも補強金具の有効性が確認された。

以上に述べた重ね継手の応力伝達機構に関する検討の結果から、重ね継手の設計方法に関しては次の点に留意することが必要であると思われる。すなわち、鉄筋直径に関しては 6. の付着性能の試験方法で述べたような無

次元的な取扱いが重ね継手の耐力についてもあてはまるので D51 のような太径鉄筋にも重ね継手の使用は可能である。ただし、継手端部に生ずるひびわれ幅については注意する必要がある。また、継手部には必ず横方向鉄筋を配置することが必要であり、その比率は少なくとも単位幅当り  $1/6$  以上とするのが適当である。重ね継手の安全度、信頼度を高める手段として本研究で考案した継手補強金具を用いる方法は有効であると思われる<sup>27)</sup>。

## 8. 結 論

鉄筋コンクリート部材における鉄筋とコンクリートとの応力伝達について鉄筋周囲のコンクリートの挙動に着目して研究した結果、前章までに述べたような多くの知見が得られた。以下におもな要点を列挙する。

(1) 鉄筋コンクリート部材を軸方向要素に分割し、連立微分方程式、またはばね系有限要素モデルによる解析によって応力伝達特性を基礎的に把握した。

(2) 薄肉平板供試体を用いて鉄筋周囲に発生・成長する内部ひびわれを肉眼で直接観察し、解析に用いた仮定と対応させた。

(3) 鉄筋に沿ってあらかじめたてひびわれが存在していた場合、鉄筋の付着性状には必ずしも大きな影響を与えない結果が得られた。しかしながら重ね継手部にたてひびわれがあらかじめ存在している場合には相当に継手耐力に悪影響を与えることが明らかとなった。

(4) コンクリートのひびわれ間隔には、力学的に下限が存在することを確認した。すなわち、ある間隔以下では鉄筋に引張力が作用してもひびわれ間の中央断面のコンクリート最外縁部には圧縮応力が生ずるのでひびわれが生じないのである。

(5) 鉄筋の付着性能を合理的かつ簡便に試験する方法として主要な形状が相似な供試体による引抜き試験方法を提案し、試験結果の表現方法として自由端における鉄筋の相対変位量  $s$  を鉄筋直径  $\phi$  で除した相対すべり指数  $s/\phi$  で表わすことによって試験値に一般性を持たせることが可能となった。

(6) 鉄筋の重ね継手についてその応力伝達機構を理論的実験的に解明し、合理的な設計方法の提案を行った。また、重ね継手の性能の改善を図るために継手補強金具を考案しその効果を確認した。

(7) 以上に述べた事柄は鉄筋とコンクリートとの応力伝達を主として鉄筋の軸に沿った応力の伝達機構として検討を行ったものである。しかしながらこのような応力伝達機構のほかにも重要な応力伝達機構が存在する。それは鉄筋端部における定着によってコンクリートに鉄筋の応力が伝達される機構である。鉄筋の付着が完全に

害されていても鉄筋の定着部が強固であれば部材の耐力が著しく大きい場合もあるのであり<sup>19)</sup>、鉄筋コンクリート部材における鉄筋とコンクリートとの応力伝達を検討する場合には、鉄筋周囲のコンクリートの挙動の影響のほかに鉄筋端部での応力伝達の影響をも含めた部材全体としての検討も必要な場合がある。

謝 辞：本論文は著者が東京大学へ提出した学位論文の内容を中心に取りまとめたものである。研究遂行にあたり終始ご懇切なるご指導を賜った恩師国分正胤先生に深甚の謝意を表する次第である。また、本研究の実施にあたり多くのご配慮を賜った村田二郎先生に厚く御礼を申し上げる。

本研究は著者が東京都立大学に在職中に行ったものであり、当時の土木材料科学研究室の職員および学生の方々の多大のご協力に対して心より感謝の意を表したい。

なお、本研究に対し、土木学会より吉田研究奨励金を授与され、また、文部省より科学研究費補助金を交付されたことを付記し関係各位に御礼を申し上げる。

#### 参 考 文 献

- 1) 福田武雄：軸方向力を受くる鉄筋コンクリート部材における応力の分布に関する二、三の理論的問題に就て、土木学会誌第19巻第3号，昭和8年3月。
- 2) 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 Vol. 7, No. 4, 1969年4月。
- 3) Ngo, D. and A.C. Scordelis: Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams, Journal of ACI No. 64-14, March, 1967.
- 4) Lutz, L.A. and P. Gergely: Mechanism of Bond and Slip of Deformed Bars in Concrete, Journal of ACI No. 64-62, Nov. 1967.
- 5) Nilson, A.H.: Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete by the Finite Element Method, Journal of ACI, Sept. 1968.
- 6) Abrams, D.A.: Tests of Bond between Concrete and Steel, Univ. of Illinois Engineering Experiment Station, Bulletin 71, 1913.
- 7) Mains, R.M.: Measurement of the Distribution of Tensile and Bond Stresses along Reinforcing Bars, Journal of ACI, No. 48-17, Nov., 1951.
- 8) 水野高明・渡辺 明：丸鋼，異形丸鋼および異形ねじり鉄筋の付着に関する研究，土木学会論文集第93号，昭和38年5月。
- 9) Broms, Bengt B.: Technique for Investigation of Internal Cracks in Reinforced Concrete Members, Journal of ACI No. 62-3 Jan., 1965.
- 10) Goto, Y.: Crack Formed in Concrete around Deformed Tension Bars, Journal of ACI No. 68-26, April, 1971.
- 11) 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，土木学会コンクリートライブラリー，No. 14, 昭和40年12月。
- 12) 国分正胤・岡村 甫：太径鉄筋の使用に関する研究，土木学会論文報告集第202号，昭和47年6月。
- 13) 国分正胤・岡村 甫：コンクリートと補強材との結合機構に及ぼす補強材の表面形状の影響，第6回複合材料シンポジウム発表報文集，日本科学技術連盟，昭和48年10月。
- 14) 日本コンクリート工学協会：コンクリート便覧，p. 1039，付着強度試験，昭和51年2月。
- 15) Kemp, E.L. and F.S. Brezny: Effect of Rust and Scale on the Bond Characteristics of Deformed Reinforcing Bars, Journal of ACI No. 65-54, Sept., 1968.
- 16) 丸安隆和・小林一輔・伊藤利治：鉄筋コンクリートばりの重ね継手に関する実験，土木学会コンクリートライブラリー第14号，昭和40年12月。
- 17) 江尻隆雄・松本弘輝・小松和興：太径鉄筋(D38)重ね継手実験，首都高速道路公団技報第2号，昭和46年度。
- 18) Kani, G.N.J.: The Riddle of Shear Failure and Its Solution, Journal of ACI, No. 61-28, April, 1964.
- 19) 池田尚治・宇治公隆：鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷挙動に及ぼす鉄筋の付着の影響に関する研究，土木学会論文報告集第293号，昭和55年1月。
- 20) 大野和男・柴田拓二・服部高重：曲げとせん断の動的繰返を受ける鉄筋コンクリート梁の耐力に関する研究(軸鉄筋の付着の影響)，文部省科研特定研究，複合材料第五次研究成果報告書，昭和50年6月。
- 21) 池田尚治：鉄筋とコンクリートとの応力伝達について，土木学会第27回年次学術講演会講演概要集第5部，V-40，昭和47年10月。
- 22) 池田尚治：コンクリートの内部ひびわれを考慮した鉄筋の応力伝達について，土木学会第28回年次学術講演会講演概要集第5部，V-49，昭和48年10月。
- 23) 池田尚治：鉄筋の付着試験方法の研究，土木学会第2回関東支部年次研究発表会講演概要集，V-4，昭和50年1月。
- 24) 池田尚治・鈴木 昭：鉄筋の付着試験方法に関する研究，土木学会第33回年次学術講演会講演概要集第5部，V-141，昭和53年9月。
- 25) 池田尚治：鉄筋の重ね継手に関する研究，セメント技術年報第27巻，セメント協会，昭和48年。
- 26) 池田尚治：鉄筋とコンクリートの応力伝達とその複合特性について—特に重ね継手の複合特性について—土木学会第29回年次学術講演会講演概要集第5部，V-1，昭和49年10月。
- 27) 池田尚治：重ね継手に関する実験，コンクリートジャーナル Vol. 12, No. 5, 日本コンクリート工学協会，昭和49年5月。
- 28) 池田尚治・信田佳延：鉄筋の重ね継手の疲労特性に関する研究，土木学会第31回年次学術講演会講演概要集第5部，V-115，昭和51年10月。
- 29) 池田尚治・柳田 力・太田 実：鉄筋の重ね継手の耐力特性に関する研究，土木学会第30回年次学術講演会講演概要集第5部，V-165，昭和50年10月。
- 30) 池田尚治・永井義規・大谷久長・藤川泰司：くさびと鋼環による重ね継手の補強に関する研究，鉄筋の継手および定着の設計施工に関するシンポジウム発表報文集，日本コンクリート工学協会，昭和51年3月。
- 31) Broms, Bengt B.: Crack Width and Crack Spacing in Reinforced Concrete Members, Journal of ACI No. 62-67, pp. 1237~1256, Oct., 1965.
- 32) 後藤貞雄，吉田正吾：超大型ウエル工法によるLNG地下タンクの設計と施工，土木学会誌，昭和50年6月。