

# 付着割裂作用を受けるコンクリートの応力解析

## STRESS ANALYSIS OF CONCRETE SUBJECTED TO SPLITTING BOND ACTION

角 徹三\*・山田 守\*\*

By Tetsuzo KAKU and Mamoru YAMADA

In order to investigate the splitting crack patterns due to the wedge action and dowel action of deformed bars and estimate the splitting bond strength, the two-dimensional non-linear finite element analysis was carried out on reinforced concrete members. The wedge force or dowel force was replaced by uniform or non-uniform internal pressure, respectively, and the subject of analysis was limited to concrete only. Concrete cover and bar spacing were selected as analytical parameters.

The analytical results show that three splitting crack patterns proposed by Jirsa and Morita: V-notch, side splitting and corner splitting type are also observed by this analysis, and that the dowel action aggravate especially the side splitting failure. On the basis of the analytical results, a tentative equation to estimate the splitting bond strength was proposed.

*Keywords: deformed bar, splitting bond failure, wedge action, dowel action, finite element analysis*

### 1. 序 論

異形鉄筋を用いたRC柱やはりのせん断実験を行うと、斜めびわれの発達やコンクリートの圧壊に先行して、主筋のかぶり部分のコンクリートが割り裂かれて部材の耐力を失う、付着割裂破壊が起こることがある。この破壊は、せん断破壊と同様、エネルギー吸収能力の小さい脆性的なモードで、破壊に対する安全性を基本とする限界状態設計法の思想の下では好ましくないものである。

RC部材のせん断破壊は、鉄筋に丸鋼が使用されていた時代から難問とされており、今日までメカニズムの解明、耐力式の提案に多くの労力が注がれてきた。一方、鉄筋コンクリートの基本的性質として、付着性状に関する研究も古くから行われてはいたが、付着作用が部材の耐力に及ぼす影響が認識されたのは、Leonhardt<sup>1)</sup>、Kani<sup>2)</sup>らの研究以後である。以来、付着に関する研究は多岐にわたり行われるようになり、急速な発展を遂げた。その後、1970年代に行われたせん断実験<sup>3)</sup>において、多くの

試験体でせん断破壊とはかなり異なる性状の破壊が認められたことにより、RC部材の脆性的な破壊としての付着割裂破壊が、新たにクローズアップされてきたのである。

しかし、付着とせん断の相互作用は甚だ複雑で、主筋のただ作用(dowel action)、横補強筋の影響、部材寸法や主筋の配置によっては、付着割裂破壊かせん断破壊か明瞭には区別できない場合も多い。そのため、付着割裂破壊とせん断破壊のメカニズムは明らかに異なるにもかかわらず、現行の設計方針では、付着割裂破壊をせん断破壊の一部として取り扱っている感がある<sup>4)</sup>。わが国の土木、建築両分野で用いられているせん断設計式は、いずれも多くの実験データに基づくもので<sup>5), 6)</sup>、実用上、十分な評価を受けているが、これらの式で付着割裂破壊も有効に防げるかどうかは疑問が残るところである。

異形鉄筋の付着割裂作用に注目した解析的、実験的研究は、せん断破壊の研究に比べ、非常に少ないのが現状である。Harvill<sup>7)</sup>、Tepfers<sup>8)</sup>は、異形鉄筋の割裂作用を調べるために、くさび作用(wedge action)を受ける鉄筋周囲のコンクリートを、内圧が作用する厚肉中空円盤に置き換えて応力解析を行った。しかし、断面内の鉄筋の配置については考慮されていないため、実設計に結びつく知見は得られていない。Orangun・Jirsa<sup>9)</sup>らは、割

\* 正会員 工博 豊橋技術科学大学助教授 建設工学系  
(〒440 豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘1-1)

\*\* 学生会員 工修 豊橋技術科学大学大学院工学研究科博士課程(同上)

裂ひびわれの発生するパターンを、かぶりと鉄筋間のあきの大小関係により、きわめて明瞭に分類した。しかし、その判別法は工学的判断のみによるところが多く理論的裏付けに欠けている。森田・藤井<sup>10)</sup>は、カンチレバー型の付着実験より、断面内の主筋の配置を考慮し、3種類のひびわれパターン別の付着割裂強度算定式を提案した。さらに、Orangun・Jirsa<sup>9)</sup>式、Jimenez・Gergely<sup>11)</sup>式と比較し、実験値との適合性が優れていることを証明した。しかしながら、これらの付着割裂強度の算定式は、いずれも影響因子一たとえば、かぶり厚さ、付着長さ、横補強筋量—の評価が非常に異なっており、統一された見解は得られていない。これらの式の妥当性を検証するには、実験・解析両面からのデータの蓄積が必要であろう。

そこで、本論文は、付着割裂破壊を防ぐためのより合理的な設計法の確立を目的として、その主たる要因である異形鉄筋のくさび作用および部材断面内での軸方向鉄筋の配置に注目し、それが鉄筋周囲のコンクリートに与える影響について二次元有限要素法により解析的研究を行う。また、せん断と付着の相互作用の解決の足がかりとして、主筋のだけ作用の影響についても言及する。

## 2. 解析概要

### (1) 異形鉄筋の付着割裂メカニズム

異形鉄筋とコンクリート間の力の伝達機構は、図—1に示すような、ふしによる機械的な抵抗、すなわちくさび作用であると考えてよい。このふしで鉄筋からコンクリートに作用する力に注目すると、ふしに垂直に作用する支圧力  $f_b$  は、鉄筋軸方向の成分いわゆる付着応力  $\tau_b$  と鉄筋軸に垂直方向で放射状に作用する応力  $\sigma_{ro}$  に分解される。

$$\tau_b = f_b \cdot \sin \theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma_{ro} = f_b \cdot \cos \theta \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\theta$  はすべり面の鉄筋軸に対する角度である。コンクリート中の異形鉄筋が軸力を受けると鉄筋は、

ふしで周囲のコンクリートを押し開きながらすべろうとする。この押し開こうとする力が式(2)の  $\sigma_{ro}$  である。 $\tau_b$  は種々の付着試験により容易に求めることができるが、 $\sigma_{ro}$  を実験的に求めるのは困難である。式(1)、(2)より

$$\sigma_{ro} = \tau_b \cdot \tan \theta \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、ふし角度が  $45^\circ$  以上あればふし前面のモルタルが粉状化することにより約  $45^\circ$  のすべり面を形成するという説<sup>12)</sup>に従えば、式(3)は

$$\sigma_{ro} \approx \tau_b \quad \dots\dots\dots (4)$$

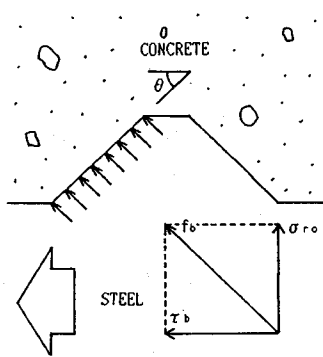
となり、付着応力と放射方向応力は同じ程度の大きさであるといえる。この  $\sigma_{ro}$  の作用による鉄筋周囲のコンクリートの応力状態は、中空に  $\sigma_{ro}$  と等価な内圧  $P_i$  を受けたコンクリートの応力状態に置き換えて考えることができる。厚肉中空シリンダーの弾性解(Disk Theory)<sup>13)</sup>によると、放射方向には圧縮応力が、円周方向には引張応力(リングテンション)が作用する。RC部材の場合、リングテンション  $\sigma_t$  がコンクリートの割裂強度  $f_{sp}$  を超えれば放射方向のひびわれ、すなわち割裂ひびわれが生じるのである。

一方、柱やはりのせん断試験を行うと、せん断ひびわれが発生し、さらにそれが主筋に沿って進展し部材の耐力を失うタイプの破壊がみられる。これは、上記の  $\sigma_{ro}$  による割裂作用と、せん断ひびわれ面で鉄筋がせん断力の一部を負担するだけ作用との相乗効果により、かぶり部分のコンクリートを割裂しようとする力が加速されるためである(図—2)。

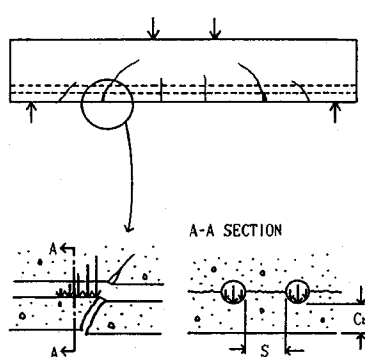
このように、RC部材で起こる脆性的な割裂破壊は、異形鉄筋のくさび作用とせん断力によるだけ作用に起因する。本解析では、この2つの作用を外力として与え、断面内の鉄筋の配置をパラメーターとしてコンクリートの応力状態を解析する。以下、その解析方法を示す。

### (2) 解析対象とした基本断面

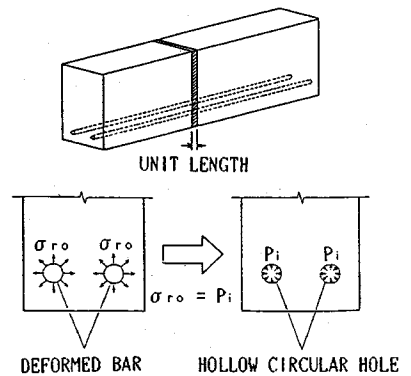
RC部材から図—3のように単位長さの切片を取り出



図—1 異形鉄筋のくさび作用



図—2 だば作用による割裂ひびわれ



図—3 くさび作用のモデル化

す。コンクリートに放射方向応力  $\sigma_{ro}$  を与える鉄筋を中空に置き換え、この部分に、 $\sigma_{ro}$  に等価な内圧  $P_i$  を作用させる。解析対象は、実験で通常観察される<sup>14)</sup>V-notch split, Side split, Corner split の3つのひびわれパターンを想定し、断面内の主筋の配置により図-4に示す3つのシリーズに分ける。表-1に解析を行った各シリーズの断面諸寸法を示す。

Aシリーズは、鉄筋径  $d_b$  と底面かぶり厚さ  $C_b$  の関係が、コンクリートの応力状態に与える影響を調べるためのものである。 $C_b$  を変数として、他の三方向のかぶり厚さは十分大きくしたもので、V-notch split 型のひびわれが予想される断面である。 $C_b/d_b$  の値が、0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0 の場合について解析する。

Bシリーズは、Side split 型のひびわれが予想される断面で、主筋が多数一列に配置された場合の鉄筋径  $d_b$  と鉄筋間のあき  $S$  の関係が、コンクリートの応力状態に与える影響を調べるものである。 $C_b/d_b=1.5$  で一定とし、 $S/d_b$  が 1.5, 2.0, 3.0, 5.0 の場合について解析する。

Cシリーズは、断面の隅角部に鉄筋が対称に配置さ

れて Corner split 型のひびわれが予想される場合で、底面かぶり  $C_b$ 、側面かぶり  $C_s$ 、および鉄筋間のあき  $S$  がコンクリートの応力状態に与える影響を調べるものである。 $C_b/d_b=C_s/d_b=1.5$  として  $S/d_b$  を 3.0, 5.0 とした場合、 $S/d_b=5.0$  として  $C_b/d_b=C_s/d_b$  を 1.0, 1.5, 2.0 とした場合について解析する。

(3) 解析モデル

図-4に示した解析対象のうち図中のハッチを施した部分を、8節点アイソパラメトリック要素により図-5のように分割して解く。A, Cシリーズは、対称軸上のX方向変位は生じないため、計算対象は図-5(a), (c)に示すように断面の半分でよい。Bシリーズは、断面内に鉄筋が十分多く並んでいるとすれば、図-4(b)の  $l-l'$ ,  $n-n'$  上のX方向変位は生じないものと考えられ、計算対象は図-5(b)のようになる。Y方向の境界条件は、中空円に内圧が作用している状態を考えれば、鉄筋中心点を不動点として拘束するのが最も事実即しているが、本研究ではだば作用との組合せも考慮しているので、便宜的に部材上端面のY方向変位を拘束することにした。試計算によると、ふしのくさび作用による

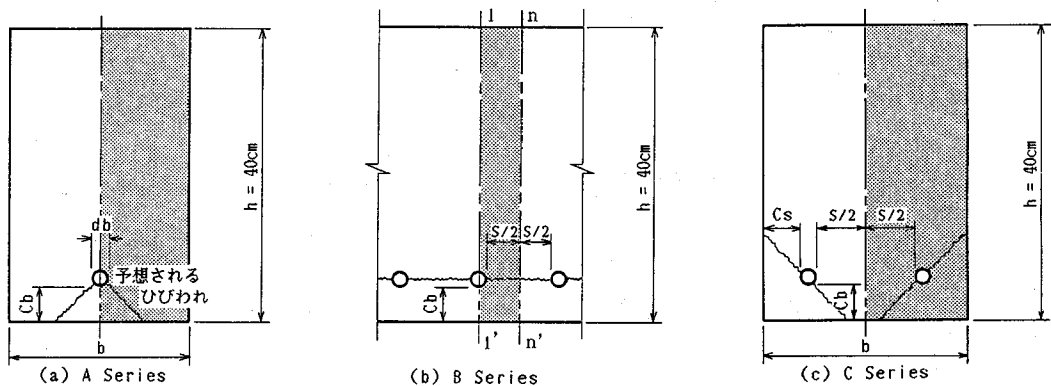


図-4 解析対象に選んだ3つの基本断面

表-1 断面性状

Number	b(cm)	Cb(cm)	Cs(cm)	S(cm)	Cb/db	Cs/db	S/db
A-1	30.0	1.0	—	—	0.5	—	—
A-2	30.0	1.5	—	—	0.75	—	—
A-3	30.0	2.0	—	—	1.0	—	—
A-4	30.0	3.0	—	—	1.5	—	—
A-5	30.0	4.0	—	—	2.0	—	—
B-1	—	3.0	—	3.0	1.5	—	1.5
B-2	—	3.0	—	4.0	1.5	—	2.0
B-3	—	3.0	—	6.0	1.5	—	3.0
B-4	—	3.0	—	10.0	1.5	—	5.0
C-1	18.0	2.0	2.0	10.0	1.0	1.0	5.0
C-2	16.0	3.0	3.0	6.0	1.5	1.5	3.0
C-3	20.0	3.0	3.0	10.0	1.5	1.5	5.0
C-4	22.0	4.0	4.0	10.0	2.0	2.0	5.0

$h=40.0\text{cm}$ ,  $d_b=2.0\text{cm}$

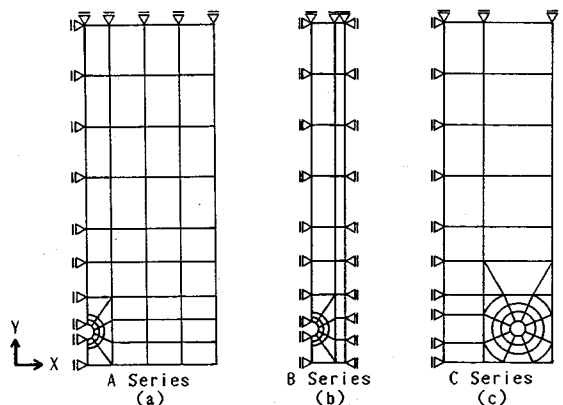


図-5 要素分割

部材上端面近くの応力・変位は非常に小さく、鉄筋中心点を不動点とした場合の解析結果と全く差異はみられなかった。

コンクリート要素の応力-ひずみ構成則には、Darwin・Pecknold<sup>15)</sup>の提案した等価一軸ひずみ説に基づく直交異方性モデルを、破壊条件には、Kupfer<sup>16)</sup>のモデルを用いる。これらのモデルは、多軸応力下のコンクリートの挙動を比較的良好に表わすことができ、多くの研究に用いられている。具体的な内容等は有限要素法のレビュー<sup>17)</sup>にも紹介されているので、ここでは省略する。本研究で用いたコンクリートの材料定数は、表-2に示すように常識的な値とした。

鉄筋に相当する部分は、直径 20 mm の中空円とし、その円周部分には  $\sigma_{\theta}$  に等価な内圧  $P_i$  を等分布となるように配分する。内圧  $P_i$  は式 (4) より  $\tau_b$  と同値である。

以上のように、RC 部材の断面を中空円を有するコンクリートのみを二次元平面応力問題に置き換えて、異形鉄筋の割裂作用に注目して解析を行う。

表-2 コンクリートの材料定数

一軸圧縮強度 kgf/cm <sup>2</sup>	一軸引張強度 kgf/cm <sup>2</sup>	最大圧縮応力時歪	ポアソン比	初期接線弾性係数 kgf/cm <sup>2</sup>
300	30	0.0025	0.2	$2.1 \times 10^5$

(1kgf/cm<sup>2</sup> = 0.098MPa)

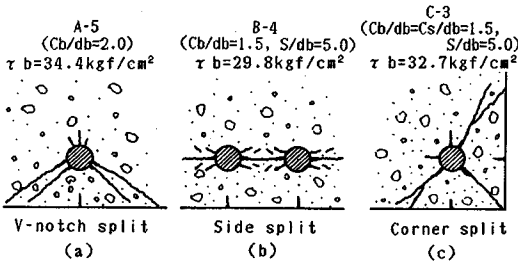


図-6 典型的なひびわれパターン

### 3. 解析結果と考察

#### (1) ひびわれ性状

付着割裂破壊をひびわれパターンにより分類するため、また、ひびわれ方向を特定することは、次節の応力解析にも有効なため、まず、ひびわれ性状について考察する。

図-6は、各シリーズで得られる解析結果をもとに描いた典型的なひびわれパターンである。

Aシリーズは、鉄筋からコンクリート表面に向かってお互いの角度が90°~120°のいわゆるV-notch型のひびわれが生じている。

Bシリーズでは、鉄筋軸を連ねたラインでのひびわれが隣の鉄筋から発生するひびわれと、明らかにつながっているのが観察される。

A, B両シリーズの解析結果は、予想したひびわれパターンや、既往の実験<sup>14)</sup>でみられるひびわれパターンをほぼ正確に再現している。しかし、Cシリーズの解析結果は、これまで周知されているコンクリート隅角部を45°~70°に割り裂くcorner split型のひびわれとともに、コンクリート隅角部に進展するひびわれがみられるのが特徴的である。実際の実験でこのようなひびわれが観察

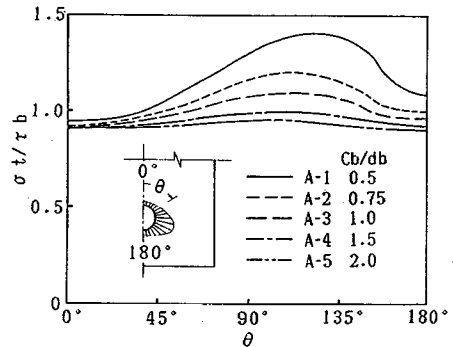


図-7 円周方向の応力分布 (A series)

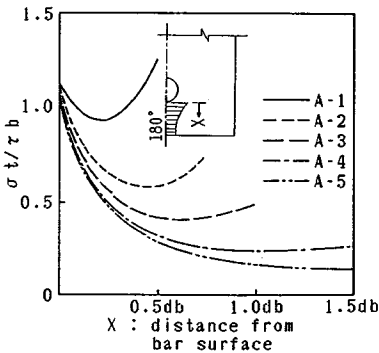


図-8  $\theta=180^\circ$  方向の応力分布 (A series)

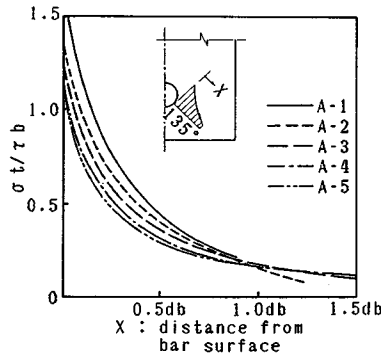


図-9 ひびわれ方向 ( $\theta=135^\circ$ ) の応力分布 (A series)

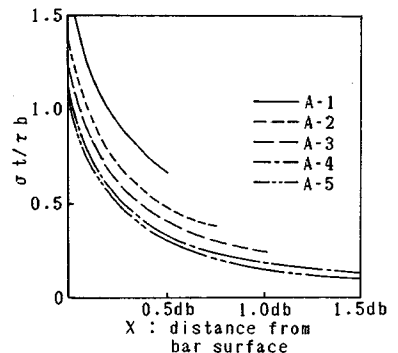


図-10 Disk Theory による応力分布 (A series)

されるかどうかについては、著者らはまだ知り得ていない。

また、すべてのシリーズで、鉄筋からコンクリート表面に向かって進展し直接破壊につながるひびわれ以外に、鉄筋真下あるいは真横のかぶり部分のコンクリート表面からひびわれが発生する現象がみられた。この原因については次節で考察する。

実験等で観察される付着割裂ひびわれは、ふしによる漏斗状の内部ひびわれの影響やスターラップの存在により、複雑なものとなってコンクリート表面に現われるが、異形鉄筋のくさび作用による割裂ひびわれのパターンは、大局的にはこの3つに分類できることが解析の面からも実証された。

(2) 内圧のみによる応力解析結果

ここでは、ひびわれ前のコンクリートの応力状態について考察する。本解析で用いたコンクリートモデルの場合、ひびわれ前の  $\sigma_t$  と  $\tau_b$  の関係はほとんど線形となる。そのため、応力解析の結果は  $\sigma_t$  を  $\tau_b$  で無次元化した数値で表わすことにする。

a) Aシリーズ

図-7~10にAシリーズの応力解析の結果を示す。

図-7は、鉄筋表面に最も近い積分点(鉄筋表面から  $0.03d_b$ )における引張応力の円周方向の分布を示したものである。 $\sigma_t/\tau_b$  が最大となる角度は、底面かぶり厚さの大小により移動するが、 $120^\circ \leq \theta \leq 135^\circ$  の範囲にあ

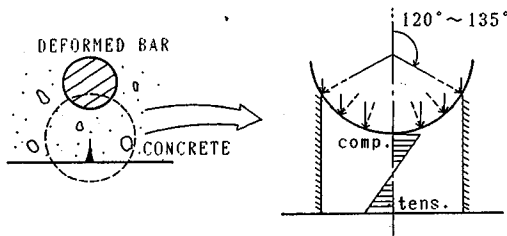


図-11 かぶりコンクリートのはり作用

り V-notch ひびわれ方向と一致する。

図-8は、鉄筋とコンクリート表面との最短距離を結んだライン( $\theta=180^\circ$ )上での  $\sigma_t/\tau_b$  を  $C_b$  をパラメータとして表わしたものである。どの場合も鉄筋表面から離れるに従って  $\sigma_t/\tau_b$  は急激に減少するが、コンクリート表面に近づくと逆に増大し始めるのが特徴である。特に、かぶりの最も小さい  $C_b=0.5d_b$  の場合は、コンクリート表面近くの応力の方が鉄筋表面近くの応力よりも大きくなっている。また、鉄筋表面近くでは、 $\sigma_t/\tau_b$  の大きさはどの場合もさほどの差はみられないが、鉄筋表面から離れてくるとかぶり厚さの影響が現われている。

図-9は、3.(1) で得られた結果から、ひびわれ角度を  $\theta=135^\circ$  とし、その方向の応力分布を表わしたものである。図-10は、鉄筋半径を内半径とし、かぶり厚さと鉄筋半径の和を外半径とした厚肉中空シリンダーの弾性理論式(Disk Theory)<sup>13)</sup>式(5)から求めた応力分布である。

$$\sigma_t/\tau_b = \frac{a^2}{b^2 - a^2} \left( 1 + \frac{b^2}{x^2} \right) \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 a : 内半径 (=  $d_b/2$ )  
 b : 外半径 (=  $C_b + d_b/2$ )  
 $d_b$  : 鉄筋径

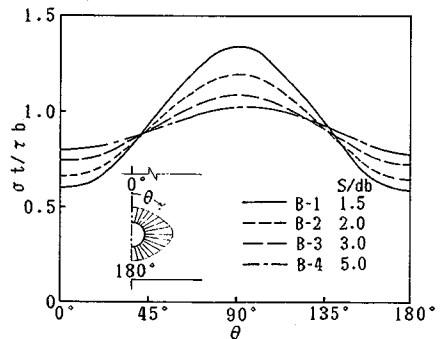


図-12 円周方向の応力分布 (B series)

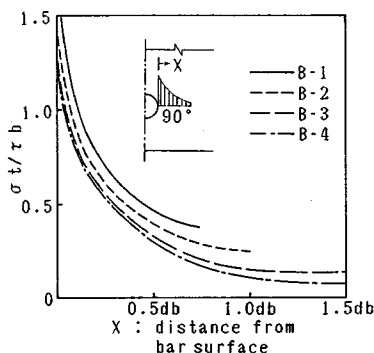


図-13 ひびわれ方向 ( $\theta=90^\circ$ ) の応力分布 (B series)

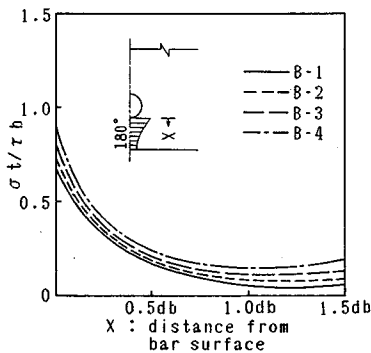


図-14  $\theta=180^\circ$  方向の応力分布 (B series)

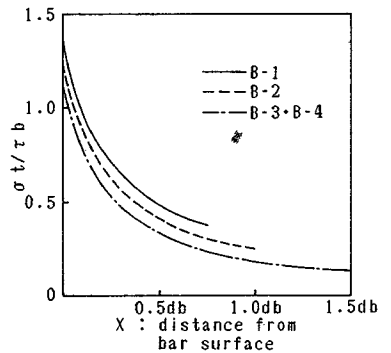


図-15 Disk Theory による応力分布 (B series)

$C_b$ ：かぶり厚さ

$x$ ：鉄筋中心からの距離

図—8,9と図—10を比べると、ひびわれ方向( $\theta=135^\circ$ )の応力状態は比較的 Disk Theory と一致しているが、かぶりコンクリート部分は、Disk Theory では説明できない応力状態となっている。特に、かぶり厚さの薄い場合にその傾向が顕著である。

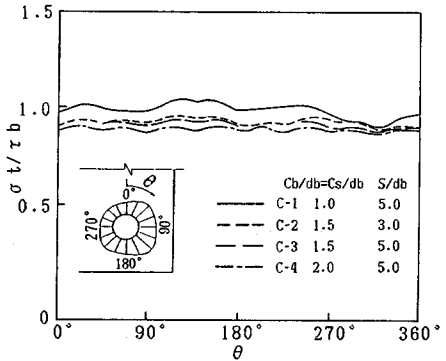
このような傾向が生じる原因を図—11で説明する。かぶり部分のコンクリートは、鉄筋から作用する内圧  $P_i$  の垂直成分を分布荷重とし、 $120^\circ \leq \theta \leq 135^\circ$  の部分で固定されたようなはりの応力状態に類似したものとなる。このはり作用による引張応力とくさび作用によるリングテンション  $\sigma_t$  が複合して、Disk Theory では説明できないかぶり部分の応力状態が生じると考えられる。したがって、かぶり厚さが小さいとはり作用が支配的となり、逆にかぶり厚さが十分あればリングテンションが支配的となり Disk Theory に近づくのであろう。また、はり作用によって生じたコンクリート表面の引張応力は、3.(1)で述べた鉄筋直下のコンクリート表面から進展するひびわれの原因になると考えられる。

b) B シリーズ

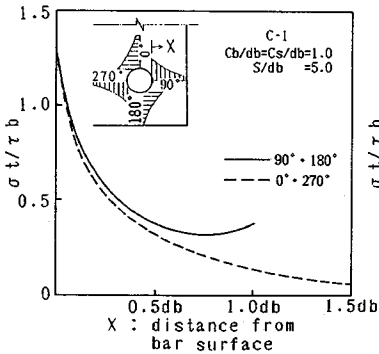
図—12~15に B シリーズの解析結果を示す。

図—12は、A シリーズの場合同様に主引張応力の円周方向の分布を示したものである。どの場合も、 $\sigma_t/\tau_b$  は  $\theta=90^\circ$  すなわち、鉄筋軸を連ねるラインで最大となり、その値は鉄筋間隔が小さくなるほど大きくなる。逆に  $\theta=0^\circ$  と  $\theta=180^\circ$  の位置では鉄筋間隔が小さくなるほど  $\sigma_t/\tau_b$  は小さくなっている。

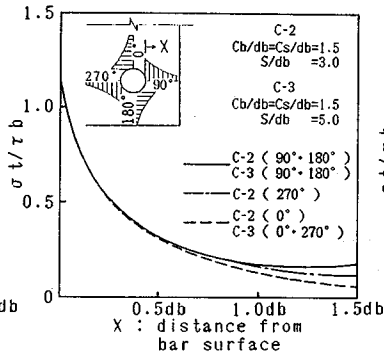
図—13は  $\theta=90^\circ$  方向の応力分布、図—14は  $\theta=180^\circ$  の応力分布を示したものである。図—15は、Disk Theory によって求めた応力分布である。 $\theta=180^\circ$  方向の応力分布をみると、A シリーズほど顕著ではないが、



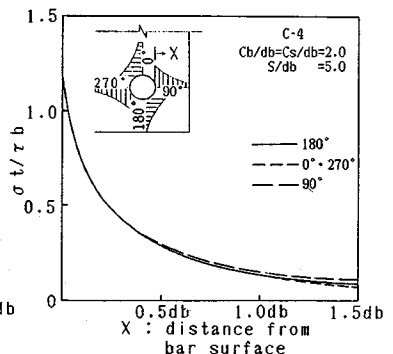
図—16 円周方向の応力分布 (C series)



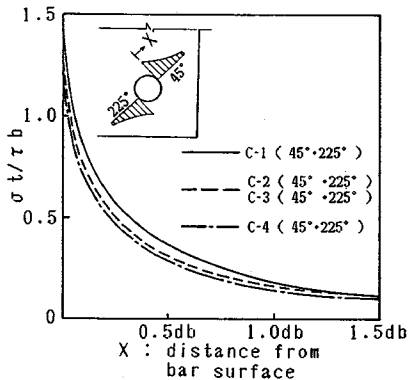
図—17 C-1の応力分布



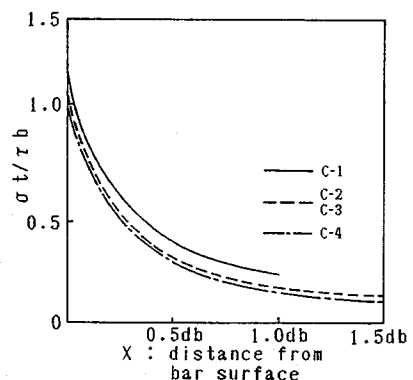
図—18 C-2・C-3の応力分布



図—19 C-4の応力分布



図—20 ひびわれ方向の応力分布 (C series)



図—21 Disk Theory による応力分布 (C series)

コンクリート表面近くで  $\sigma_t/\tau_b$  が増加する傾向があり、ここでもわずかではあるが、はり作用が生じているのがわかる。 $\theta=90^\circ$  方向、すなわちひびわれ方向の応力分布は Disk Theory と比較的一致している。

以上の結果からも、Bシリーズでは、鉄筋軸を連ねるラインでのひびわれが他の方向のひびわれよりも先行することがわかる。

c) Cシリーズ

図一16~21 に Cシリーズの解析結果を示す。

図一16 は主引張応力の円周方向の分布を表わしたものである。どの場合も  $\theta=45^\circ, 135^\circ, 225^\circ$  付近で  $\sigma_t/\tau_b$  がピーク値を示すが、円周方向の応力変化は少なく、他のシリーズほど大きなピークを示していない。

図一17~19 は  $\theta=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  の方向の応力分布を、かぶり厚さ別に表わしたものである。他のシリーズ同様、コンクリート表面近くで  $\sigma_t/\tau_b$  が増加し、特にかぶり厚さの小さい場合にその傾向が強い。C<sub>b</sub>、C<sub>s</sub> は同じで、S が異なる C-2 と C-3 の応力状態を比較すると、 $\theta=270^\circ$  方向のコンクリート表面近くでわずかに異なるだけで、ほとんど同じである。この Cシリーズの場合、鉄筋間のあきはかぶり厚さの2倍以上あれば、コンクリートの応力状態にはさほど影響を与えないといえる。

図一20 は、3.(1) よりひびわれ方向を  $\theta=45^\circ, 225^\circ$  とし、その方向の応力分布を示したものである。図一17~図一20 と図一21 の Disk Theory による応力分布を比較すると、ひびわれ方向の応力分布は Disk Theory と

一致しているが、他の方向、特にかぶり厚さの小さい場合に Disk Theory では説明できない分布となっている。これもかぶりコンクリートのはり作用による影響であろう。

(3) 内圧とだぼ作用の組合せの応力解析結果

ここでは、だぼ作用がくさび作用による応力状態にどのような影響を及ぼすか、(2) の解析同様にひびわれ前の応力状態を調べる。主筋のだぼ作用が分担するせん断抵抗の割合は、作用せん断力の大きさにより変化するが、野口の実験<sup>18)</sup>を参考にして降伏せん断力の約20%と考える。断面内に複数の鉄筋が配置されている場合、だぼ作用がおのおの鉄筋に均等に働くものとするれば、

$$V_d = 0.2 \tau_b \cdot u \cdot z \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $V_d$ : 主筋一本に作用するせん断力  
 $\tau_b$ : 付着応力  
 $u$ : 主筋一本の周長  
 $z$ : 応力中心間距離

さらに、解析対象とした単位長さの任意の切片に作用する応力を導くため、式(6)の力が図一22(a)に示すように、鉄筋下半面の円周に、付着長さ  $l$  にわたって均等に支持されると仮定すれば、 $m-m'$  断面では

$$\sigma_d = 0.4 \tau_b \cdot z/l \quad \dots\dots\dots (7)$$

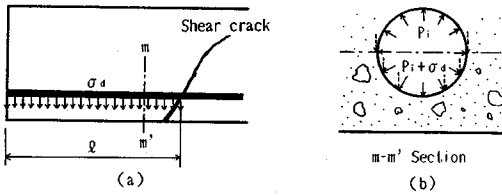
の応力が作用している。上式に本研究で用いた断面 ( $C_b/d_b=1.5$ ) より、 $z=31.5$  cm を代入し

$$\sigma_d = 12.6 \tau_b/l \quad \dots\dots\dots (8)$$

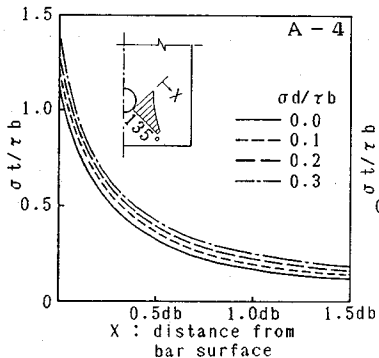
が得られる。

本解析では図一22(b)に示すように、内圧とだぼ作用を組み合わせて作用させるのであるが、その比率は、式(8)の  $l=50$  cm としたときの  $\sigma_d=0.252 \tau_b$  に基づき、 $\sigma_d/\tau_b$  が 0.1, 0.2, 0.3 の3通りとした。

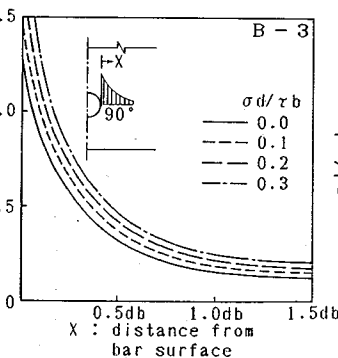
図一23~25 にひびわれ方向での応力分布を示す。各シリーズとも  $\sigma_d/\tau_b$  に比例して  $\sigma_t/\tau_b$  が増加するが、その割合は  $\sigma_d/\tau_b=0.1$  に対して、Aシリーズで5.6%、Bシリーズで17.4%、Cシリーズでは6.0%となっている。だぼ作用は、明らかに鉄筋の付着に対して不利で



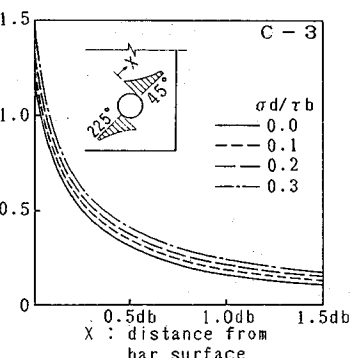
図一22 だぼ作用のモデル化



図一23 だぼ作用の影響 (A series)



図一24 だぼ作用の影響 (B series)



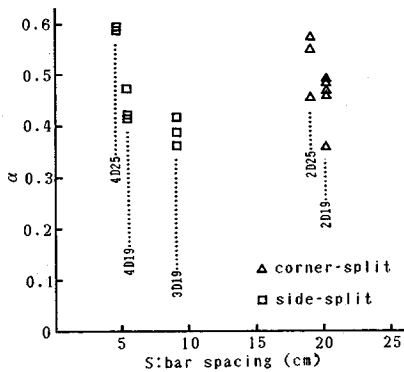
図一25 だぼ作用の影響 (C series)

表一三 森田らの実験との比較

Specimen No.	Number of Bars	C <sub>min</sub> (cm)	S (cm)	db (mm)	f <sub>c</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	Morita's Experiment		Author's Analysis			
						① τ <sub>bu</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	Failure Mode	τ <sub>bu</sub> Eq.(13) (kgf/cm <sup>2</sup> )	② τ <sub>bu</sub> Eq.(12) (kgf/cm <sup>2</sup> )	Failure Mode	α = ①/②
1	2	3.0	20.2	19	172	26.7	C	11.7	53.9	C	0.495
2	2	3.0	20.2	19	209	28.3	C	12.9	59.4	C	0.476
3	2	3.0	19.0	25	199	25.0	C	11.9	45.0	C	0.555
4	2	3.0	20.2	19	227	28.8	C	13.4	61.9	C	0.465
5	2	3.0	20.2	19	227	30.4	C	13.4	61.9	C	0.491
6	4	3.0	5.5	19	227	18.4	S	13.2	43.4	S	0.424
7	2	3.0	19.0	25	227	28.0	C	12.7	48.1	C	0.582
8	2	3.0	20.2	19	262	24.2	C	14.4	66.5	C	0.364
9	3	3.0	9.2	19	262	24.4	S	14.4	66.4	S	0.367
10	2	3.0	19.0	25	287	25.0	C	14.2	54.1	C	0.462
11	3	3.0	9.2	19	277	26.7	S	14.8	68.2	S	0.391
12	4	3.0	5.5	19	277	19.9	S	14.6	47.9	S	0.415
13	3	3.0	9.2	19	277	28.6	S	14.8	68.2	S	0.419
14	4	3.0	5.5	19	277	22.7	S	14.6	47.9	S	0.474
15	4	3.0	4.7	25	255	17.5	S	12.5	29.8	S	0.587
16	4	3.0	4.7	25	255	17.8	S	12.5	29.8	S	0.597

(1 kgf/cm<sup>2</sup> = 0.098MPa)

Dimension of specimen : Bond length 50.0cm  
Overall depth 40.0cm  
Width 30.0cm



図一三 α と鉄筋間のあきの関係

あり、特に鉄筋の配置により side split 型のひびわれが予想される場合は、付着割裂破壊を著しく助長することになる。

4. 付着割裂強度の推定

3. (1), (2) の結果から断面内の鉄筋の配置により、周囲のコンクリートの応力状態が全く異なり、ひびわれパターンや、せん断力に対する抵抗に差異が生じることがわかった。特に B シリーズ (side split 型ひびわれ) の断面では、鉄筋間のあきが十分あっても、鉄筋軸を連ねるひびわれが発生しやすく、鉄筋のだぼ作用により割裂破壊が助長される。

ここでは、これまでの解析結果をもとに、付着割裂強度の算定法について考察する。考察にあたり以下の仮定をたてる。

① 3. (1) より、side split 型のひびわれ角度は  $\theta = 90^\circ$ 、corner split 型のひびわれ角度は  $\theta = 45^\circ$  とする。

② 3. (2) より、ひびわれ方向の応力分布は式 (5) の Disk Theory によって表わせる。

③ 鉄筋軸方向の付着応力の分布は一定である。  
なお、断面内に主筋が一本のみとした A シリーズ (V-notch split 型) は、実際の設計に現われる例はほとんどなく、実用的な意義が薄いので除外する。

仮定②より、ひびわれ面での平均応力は、

$$\sigma_{t.av} = \frac{\tau_b}{l_{cr}} \int_a^{l_{cr}+a} \frac{a^2}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{x^2}\right) dx \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $l_{cr}$  : ひびわれ長さ

最大応力は、鉄筋表面のコンクリートに生じ

$$\sigma_{t.max} = \tau_b \cdot \frac{a^2}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{a^2}\right) \dots\dots\dots (10)$$

となる。異形鉄筋によるコンクリートの割裂強度を  $f_{sp}$  とすれば、付着割裂破壊が発生する条件は、式 (9) において  $\sigma_{t.av} = f_{sp}$  となるとき、式 (10) において  $\sigma_{t.max} = f_{sp}$  となるときの 2 通りが考えられる。 $f_{sp}$  は、異形鉄筋の横ふしから発生する内部ひびわれの影響等により、一軸引張強度より小さく

$$f_{sp} = \alpha \sqrt{f_c} \quad (\alpha < 1.0) \dots\dots\dots (11)$$

と表わせるであろう。 $\alpha$  の値は、主に内部ひびわれの発生状況に影響を受けると考えられるが、内部ひびわれは横ふしの形状や間隔、打設したコンクリートの状態等の要因で発生状況が異なり、これらの関数として  $\alpha$  を決



定するのは困難である。また、後藤<sup>19)</sup>によれば、鉄筋の水平間隔により内部ひびわれの発生状況が異なり、その内部ひびわれにより形成されたくし歯コンクリートの変形作用が割裂ひびわれを発生される原因の1つであるとしている。すなわち、鉄筋間のあきにより  $\alpha$  の値が変化することも予想される。

式 (10) と式 (11) より付着割裂強度  $\tau_{bu}$  は、破壊条件に  $\sigma_{t,av} = f_{sp}$  を用いた場合

$$\tau_{bu} = \frac{\alpha \cdot l_{cr} \cdot \sqrt{f_c}}{\frac{a^2}{b^2 - a^2} \left( l_{cr} + \frac{b^2}{a} - \frac{b^2}{l_{cr} + a} \right)} \dots\dots\dots (12)$$

破壊条件に  $\sigma_{t,max} = f_{sp}$  を用いた場合

$$\tau_{bu} = \frac{\alpha \cdot \sqrt{f_c}}{\frac{a^2}{b^2 - a^2} \left( 1 + \frac{b^2}{a^2} \right)} \dots\dots\dots (13)$$

となる。

- 式 (12) のひびわれ長さ  $l_{cr}$  は、仮定 ① より
- $s_{lcr} = s/2$  (side split 型)  $\dots\dots\dots (14 \cdot a)$
- $c_{lcr} = \sqrt{2} (C_{min} + d_b/2) - d_b/2$  (corner split 型)  $\dots\dots\dots (14 \cdot b)$

ここに、 $S$  : 鉄筋間のあき  
 $C_{min}$  : 最小かぶり

ひびわれパターンが side split 型になるか corner split 型になるかは  $s_{lcr}$  と  $c_{lcr}$  の大小関係によって決まる。式 (14) より

$$C_{min} > \frac{\sqrt{2}}{4} S + \frac{\sqrt{2} - 2}{4} \dots\dots\dots (15)$$

のとき side split 型

$$C_{min} < \frac{\sqrt{2}}{4} S + \frac{\sqrt{2} - 2}{4} \dots\dots\dots (16)$$

のとき corner split 型となる。

表—3 は森田・藤井の横補強筋のないカンチレバー型付着試験の結果<sup>14)</sup>と式 (12)、式 (13) を比較したものである。

式 (13) による  $\tau_{bu}/\alpha$  は実験値よりかなり小さく、 $\alpha$  は 1.0 より大きくなり矛盾が生じる。これは、鉄筋軸方向の付着応力分布の仮定に起因すると考えられる。すなわち、実験では鉄筋軸方向の付着応力分布は一樣にはならず、破壊を生じた部分から順次応力の再分配が行われて最終的な破壊に至るが、計算では鉄筋軸方向の付着応力分布は一定とし、付着長さ全長にわたり同時に破壊すると仮定したためであろう。付着割裂破壊が発生する条件を  $\sigma_{t,max} = f_{sp}$  とするには、鉄筋軸方向の付着応力分布、破壊後の応力の再分配を何らかの形で考慮する必要がある。また式 (13) では、ひびわれパターンの判別ができないという短所がある。

一方、式 (12) による  $\tau_{bu}/\alpha$  は実験値よりも大きくな

り、 $\alpha$  を用いれば実験結果を説明できる。式 (15)、(16) による判別法も実験でのひびわれパターンと一致している。

式 (12) を用いれば  $\alpha$  の平均値は、side split 型で 0.46、corner split 型では 0.49 と大きな差はみられない。鉄筋間のあきと  $\alpha$  の関係を図—26 に示すが、相関関係はないようである。むしろ、同じ、コンクリートを打設した供試体の  $\alpha$  の値が非常に近いことを考えると、 $\alpha$  は、コンクリートの打設状況、締め固めの程度、空気量等に大きく依存するものと考えられる。式 (12) に  $\alpha_{av} = 0.47$  を代入して、横補強筋のない場合の付着割裂強度式

$$\tau_{bu} = \frac{0.47 \cdot l_{cr} \cdot \sqrt{f_c}}{\frac{a^2}{b^2 - a^2} \left( l_{cr} + \frac{b^2}{a} - \frac{b^2}{l_{cr} + a} \right)} \dots\dots\dots (17)$$

が得られる。しかし、 $\alpha$  には上述の割裂破壊発生条件、鉄筋軸方向の付着応力分布の仮定の影響も含まれている可能性もあり、これらをいかに評価するかが問題点として残る。

## 5. 結 論

異形鉄筋のくさび作用およびせん断力による dowel action が、鉄筋周囲のコンクリートにどのような影響を与えるか二次元有限要素法で解析し、以下のような結論を得た。

- (1) 異形鉄筋のくさび作用による付着割裂ひびわれは、Darwin-Pecknold モデルを用いた解析より図—6 の 3 種類が得られた。これは、実験で観察される他の要因を含んだ複雑なひびわれパターンの基本となるものである。
- (2) かぶり部分のコンクリート表面には、Disk Theory では説明できない引張応力が生じる。これは、かぶりコンクリートのはり作用の影響と考えられる。鉄筋直下のコンクリート表面には、このはり作用によるひびわれが発生する。
- (3) ひびわれ方向の主引張応力分布は、どのひびわれパターンにおいても Disk Theory によって表わすことができる。
- (4) side split 型のひびわれが予想される断面では、他の 2 つのひびわれが予想される断面に比べ、だば作用が割裂ひびわれを著しく助長する。
- (5) 式 (15)、(16) により、断面内の鉄筋の配置から、side split 型と corner split 型のひびわれパターンの判別が可能である。
- (6) 式 (17) により、横補強筋のない場合の付着割裂強度の推定が可能である。

## 参 考 文 献

- 1) Leonhardt, F. and Walther, R. : Contributions to the treatment of the problems of shear reinforced concrete construction, Translation No. 111, Cement and Concrete Association, London, 1964.
- 2) Kani, G.N.J. : The riddle of shear failure and its solution, Journal of ACI, pp.441~467, Apr. 1964.
- 3) 建設省建築研究所：建築構造部材の耐震強度の解析（鉄筋コンクリート柱の靱性の向上について（その3）），建設省建築研究所報告書，1977年3月。
- 4) 土木学会：コンクリート構造の限界状態設計法指針（案），コンクリート・ライブラリー第52号，昭和58年10月。
- 5) Okamura, H. and Higai, T. : Proposed design equation for shear strength of reinforced concrete beams without web reinforcement, Proc. of JSCE, No. 300, pp.131~141, Aug. 1980.
- 6) 荒川 卓：鉄筋コンクリート梁のせん断抵抗に関する研究，日本建築学会論文集，第66号，pp.437~440，昭和35年10月。
- 7) Harvill, Jr. P.S. : The nature of bond splitting in reinforced concrete, Ph-D Thesis, Univ. of Colorado, 1964.
- 8) Tepfers, R. : Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars, Magazine of Concrete Research, Vol.31, No.106, pp.3~12, Mar. 1979.
- 9) Orangun, C.O., Jirsa, J.O. and Breen, J.E. : A reevaluation of test data on development length and splices, ACI Journal, Proc. Vol.74, Mar. 1977.
- 10) 藤井 栄・森田司郎：異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究—第2報 付着割裂強度算定式の提案—，日本建築学会論文報告集，第300号，pp.45~53，昭和58年2月。
- 11) Jimenez, R., White, R.N. and Gergely, P. : Bond and dowel capacities of reinforced concrete, ACI Journal, Proc. Vol.76, Jan. 1979.
- 12) Lutz, L.A. and Gergely, P. : Mechanics of bond and slip of deformed bars in concrete, ACI Journal, Vol.64, No.11, pp.711~721, Nov. 1967.
- 13) Timoshenko, S. and Goodier, J.N. : Theory of Elasticity, Second edition, McGraw-Hill Book Company, Feb. 1951.
- 14) 藤井 栄・森田司郎：異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究—第1報 付着破壊を支配する要因についての実験結果—，日本建築学会論文報告集，第319号，pp.47~55，1982年9月。
- 15) Darwin, D. and Pecknold, D.A. : Nonlinear biaxial stress law for concrete, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.103, No.EM 2, pp.229~241, Apr. 1977.
- 16) Kupfer, H.B. and Gerstle, K.H. : Behavior of concrete under biaxial stresses, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.99, No.EM 4, pp.852~866, Aug. 1973.
- 17) ASCE Task Committee : State-of-the-Art Report on Finite Element Analysis of Reinforced Concrete, ASCE, 1982.
- 18) 野口 博・落合正雄・堀川考助：鉄筋コンクリートばりのせん断抵抗に関する研究（第2報），日本建築学会関東支部研究報告，pp.117~120，1980年。
- 19) 後藤幸正・大塚浩司：引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひびわれに関する実験的研究，土木学会論文報告集，第294号，pp.85~100，1980年2月。

(1988.1.5・受付)