

# [66] 側圧を受ける鉄筋コンクリート引張部材のひびわれ性状並びに 付着特性に関する研究

正会員 ○白 井 伸 明 (日本大学理工学部)  
佐 藤 稔 雄 (日本大学理工学部)  
正会員 小 野 新 (日本大学理工学部)  
正会員 安 達 洋 (日本大学理工学部)

## 1. まえがき

筆者等は、RC連層耐震壁の弾塑性性状に関する研究の一環として、既応の付着理論及び実験に基づき、壁板のせん断ひびわれ発生機構の解明<sup>1)</sup>、さらには、有限要素解析のための付着モデル<sup>2)</sup>の提案を行ってきた。本研究は、壁板を長いRC角柱にモデル化し、角柱側面に定圧を作用させたまま、両端の鉄筋に引張载荷する2軸応力状態での両引試験を、壁板の付着及びひびわれ性状に及ぼす側圧の影響を解明するための資料を得ることを目的として実施したものである。

## 2. 壁板の圧縮応力度

両引試験体に作用させる側圧を評価するため、過去に実験を行った3層1スパンRC耐震壁試験体の実測値<sup>3)</sup>(各層柱・はり交点 $x, y$ 方向の変位)より、壁板のひずみ( $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$ )を求め、これを45°方向のひずみ( $\epsilon_1, \epsilon_2, \gamma_{12}$ )に変換し、さらに、 $\epsilon_2$ をコンクリートの応力-ひずみ関係を表わす $e$ 関数式に代入し、圧縮応力度 $\sigma_2$ を求めた。図1は、曲げ破壊した76W101、曲げせん断破壊した77W203、せん断破壊した77W206の2層について求めた $\sigma_2$ のコンクリート圧縮強度( $f_c$ )に対する比( $\sigma_2/f_c$ )を、水平変位( $\delta$ )に対してプロットしたものである。破壊形式により多少の差異が見られるが、 $\delta$ の増加に伴って $\sigma_2$ は次第に増大し、 $f_c$ の約65~90%に達していることが分る。

## 3. 実験概要

3.1 試験体： 試験体は、図2に示す断面10×10cm、長さ114cm(測定区間100cm)のコンクリート角柱の軸心に、径19、13mmの異形鉄筋(D)、径1.9mmの丸鋼(P)を埋め込んだもので、各8体づつ製作した。また、試験体両端の7cmの区間は、鉄筋周辺のコンクリートに漏斗状のひびわれが発生するのを防ぐため、発泡スチロールで鉄筋とコンクリートを絶縁した。コンクリートは、普通ポルトランドセメント、川砂、川砂利(最大粒径10mm)を用いて調合した(W/C=67%, 1:2.9:3.0)。コンクリートは、横打ちとし、鉄筋位置で1度打ち止め、約20分後、残り半分を打ち足した。コンクリート

打設後2日で脱枠し、実験開始までビニールシートで被い、室内に放置した。表1、2は、鉄筋とコンクリート・テストピースの材料特性を示す。

表2 コンクリートの材料特性

試験体	ヤング係数 10 <sup>4</sup> (kg/cm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	圧縮強度 時歪度 (μ)	引張強度 時歪度 (μ)	引張強度 (kg/cm <sup>2</sup> )
異形D13	2.57	191.4	1873	17.99	
丸鋼19φ	2.30	206.3	1583	21.96	

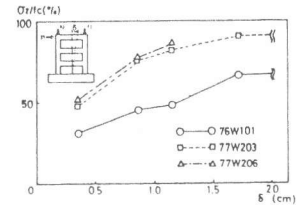


図1 壁板の圧縮応力度



図2 試験体詳細

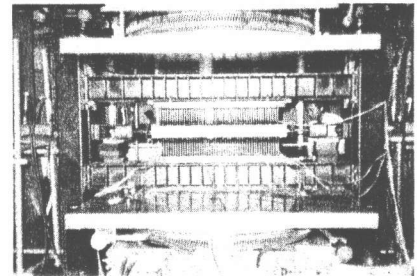


写真1 加力装置

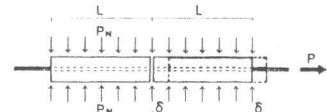


図3 水平抵抗試験

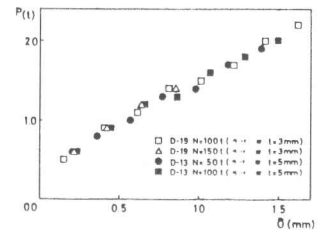


図4 ブラシの水平抵抗

表1 鉄筋の材料特性

鉄筋	断面積 (cm <sup>2</sup> )	降伏 強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	降伏 歪度 (μ)	最大強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	伸び率 (%)	ヤング係数 10 <sup>4</sup> (kg/cm <sup>2</sup> )
D19 (SD30)	2.87	3682	2031	5424	17.1	1.81
D13 (SD30)	1.27	3885	1981	5538	15.2	1.96
19φ (SR24)	2.84	3721	1896	5587	23.2	1.96

3.2 加力装置： 写真1に、本実験で使用した加力装置を示す。側圧は、3000トン・アムスラー試験機により、側圧用フレームに固定した側圧ブラシを介して試験体に作用した。また、引張力は、左右の引張反力用フレームに取り付けた2台のセンターホールジャッキで、チャックを介して両端の鉄筋に作用した。ここで、側圧ブラシは、長さ20.2cm、径1.0cmのボルト(S45C)の1端を、心々距離2.0cmの間隔で鉄板に固定し、他端に六角ナット(受圧面積2.44cm<sup>2</sup>)を溶接固定したものである。さらに、試験体に、様な側圧分布を与え、また試験体との摩擦抵抗を減じるため、3mmのラバーシート及び、カップグリースを塗布した2枚のテフロンシート(厚さ0.1mm)を、側圧ブラシと試験体の間に挿入した。

次に、本加力装置を用いて実験を行った場合に生じる水平抵抗を推定するため、断面10×10cm、長さ50cmのRC角柱2本を用い、図3に示す様な引張抵抗試験を行った。図4は、側圧N=50,100,150トンの各々の場合について求めた水平抵抗(P)とRC角柱の水平移動量(δ)の関係を示す。実験値は、ほとんど同一の傾向を示し、側圧の大きさの違いによる影響は見られない。材長100cmの両引試験体の場合伸び量の分布が、試験体中央でのゼロ値から端部での最大値へと線形変化すると仮定すれば、鉄筋降伏時(ε<sub>fy</sub> ≒ 0.002)で0.7~0.8トンの水平抵抗が生じると推定される。

3.3 加力方法及び測定方法： 加力は、まず所定の側圧を載荷し、一定に保ったまま試験体両端の鉄筋に、0~3トンは、0.25トン、3~6トンは0.5トン、6トン以降は1.0トンきざみで漸増的に引張荷重を作用させた。また、各側圧値に対し2体の試験体を準備し、1体は単調載荷、もう1体は、3トンと6トンで3サイクルの正側繰り返し載荷試験を行った。なお、作用側圧(P<sub>N</sub>)は、f<sub>c</sub>の0,25,50,75%の4種類とする。試験体名称は、例えば、DM19-25の様に定義し、最初の記号は、鉄筋の種類、2番目の記号は、載荷方法(M:単調, C:繰り返し)、次の2桁の数字は、鉄筋径、最後の2桁の数字は、P<sub>N</sub>のf<sub>c</sub>に対する割合(%)を示すものとする。測定は、図5に示す様に1/1000mmダイヤルゲージ6台を用い、試験体の伸び量及び、コンクリート端部からの鉄筋の抜け出し量を測定し、全伸び量(δ)を次式で求めた。

$$\delta = (\delta_2 + \delta_5) / 2 + \{ (\delta_1 + \delta_4) / 2 + (\delta_3 + \delta_6) / 2 - P \Sigma \ell' / sE sA \} \quad (1)$$

ここで、 $\Sigma \ell = (\ell_1 + \ell_4) / 2 + (\ell_3 + \ell_6) / 2$ 、Pは作用引張力(Kg)、sE、sAは、鉄筋のヤング係数(Kg/cm<sup>2</sup>)及び、断面積(cm<sup>2</sup>)である。さらに、各荷重毎に、ひびわれの発生状況を観測した。なお、試験体の表面をA面、裏面をB面、側圧作用面の側上をC面、側下をD面と呼ぶことにする。

3.4 実験結果： 図6(a)、(b)は、各試験体の引張荷重(P) - 伸び(δ)曲線と裸鉄筋のP - δ曲線を示す。裸鉄筋のP - δ曲線の原点が圧縮側から始まっている。この裸鉄筋の初期力(sP)は、試験体を空中養生したため生じる収縮ひずみ(ε<sub>sh</sub>)と、P<sub>N</sub>により生じる試験体の伸び変形を考慮し、次式より求めた。

$$sP = sEsA\varepsilon_{sh} + c\nu cEsAP_N / (cE + p_t sE) \quad , \quad p_t = sA / cA \quad (2)$$

ここで、cE、cA、cνは、コンクリートのヤング係数、断面積、ポアソン比を示す。ε<sub>ch</sub>は、森田の実験結果<sup>4)</sup>

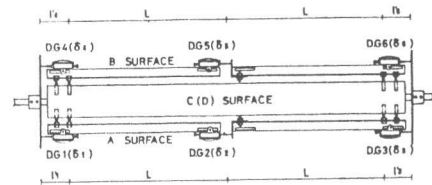


図5 測定装置

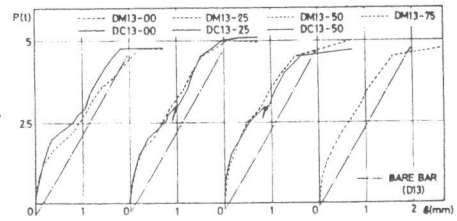


図6 (a)

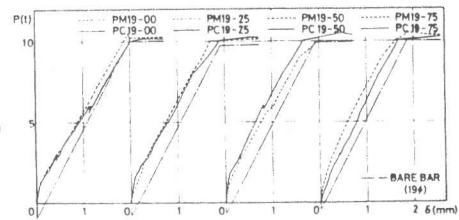
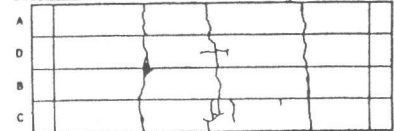


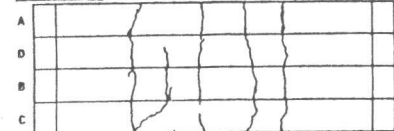
図6 (b)

図6 P - δ 曲線

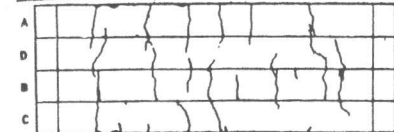
DM 13-00



DM 13-25



DM 13-50



DM 13-75

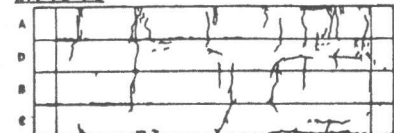


図7 最終ひびわれ図

を参考にし、丸鋼の場合  $1.78 \times 10^{-4}$ 、異形鉄筋の場合  $1.49 \times 10^{-4}$  と仮定した。P- $\delta$  曲線で、ある伸び量における2曲線の縦距離が、付着により見かけ上コンクリートが負担する引張抵抗を示す。この抵抗力は、側圧が無い場合、 $\delta$ が増大するに従い減少する傾向があるが、側圧が作用する場合、この傾向は見られない。丸鋼と異形鉄筋では、丸鋼の方が、この抵抗力はかなり小さい。

図7は、DM13シリーズの最終ひびわれ図を示す。側圧が高くなるに従い、ひびわれ本数が増す傾向があり、側圧が0.75 f<sub>c</sub>の場合、C、D面に割裂ひびわれが発生している。図8(a)、(b)は、試験体のA、B面で観測されたひびわれより、次式により求めた平均ひびわれ間隔(e<sub>av</sub>)と平均ひずみ(ε<sub>av</sub>)の関係を示す。

$$e_{av} = 4L / (n + 2) \quad , \quad n = \sum L_{cr} / D \quad (3)$$

ここで、Lは、試験体の半分の長さ(cm)、nは、ひびわれ本数、 $\sum L_{cr}$ は、ひびわれの材軸と垂直な線分への投影長さの総和(cm)、Dは、試験体断面の辺長(cm)。図より、いずれの場合も、ε<sub>av</sub>の増大に伴ってe<sub>av</sub>は減少し、側圧が高い程、小さな値を示している。

#### 4. 付着理論による検討

RC角柱のひびわれは、鉄筋からコンクリートに伝達されるコンクリート応力(cσ<sub>x</sub>)が、f<sub>t</sub>に達した時発生し、cσ<sub>x</sub>は、付着応力分布(τ<sub>x</sub>)が求めれば決定できる。まず、付着の基礎微分方程式を、次式で定義する<sup>4)</sup>。

$$d^2 S_x / dx^2 = (1 + n\rho_t) \psi \tau_x / sE_s A \quad , \quad n = sE / cE \quad (4)$$

ここで、S<sub>x</sub>は、コンクリートと鉄筋の平均変形の差として定義されるすべり量(cm)、ψは、鉄筋の周長(cm)である。τ<sub>x</sub>が、Sの関数で与えられれば、式(4)を、任意の境界条件の下で解くことにより、S<sub>x</sub>、τ<sub>x</sub>、鉄筋応力(sσ<sub>x</sub>)、cσ<sub>x</sub>の分布を求めることが出来る(図9)。

ここでは、τ-S関係を、次式の様に、完全弾塑性に近似する(図10)。

$$\text{直線①:} \quad \tau = \alpha S + \tau_a \quad (S > S_y) \quad (5)$$

$$\text{直線②:} \quad \tau = \tau_y \quad (S \geq S_y) \quad (6)$$

ここで、τ<sub>a</sub>は、側圧の作用により、S=0の時に生じる異形鉄筋リブのかみ合い抵抗で、丸鋼の場合は存在しない。上式で、重要なパラメータは、最大付着応力(τ<sub>y</sub>)とτ-S曲線の勾配(α)であり、ここでは、τ<sub>y</sub>の評価法について述べる。側圧が作用する時、異形鉄筋ではリブ抵抗、丸鋼では摩擦抵抗により、τ<sub>y</sub>が上昇する。一方、異形鉄筋の場合、割裂破壊により、τ<sub>y</sub>の上限が決まる場合がある。ここでは、前者をb<sup>τ</sup><sub>y</sub>、後者をs<sup>τ</sup><sub>y</sub>とし、両者のうち小さい方でτ<sub>y</sub>が決まると仮定する。まず、b<sup>τ</sup><sub>y</sub>を決定するため、PNが作用する時のコンクリート断面内の応力分布を調べる。図11に示す極座標を定義し、RC角柱を弾性体と仮定すれば、コンクリート断面の応力分布は、次式で与えられる<sup>5)</sup>。

$$c\sigma_r = PN \{ Aa^2 / 2r^2 - 1/2 - (3Ba^4 / 2r^4 - 2Ba^2 / r^2 + 1/2) \cos 2\theta \} \quad (7)$$

$$c\sigma_\theta = PN \{ -Aa^2 / 2r^2 - 1/2 + (3Ba^4 / 2r^4 + 1/2) \cos 2\theta \} \quad (8)$$

ここで、A = {(1-2sν)cG - (1-2cν)sG} / {(1-2sν)cG + sG}、B = (cG - sG) / {cG + (3-4cν)sG}。cG、sGは、コンクリートと鉄筋のせん断弾性係数(Kg/cm<sup>2</sup>)を意味する。

b<sup>τ</sup><sub>y</sub>は、次式で与える鉄筋とコンクリートの接触面(r=a)に作用する平均放射応力(c<sup>σ</sup><sub>ra</sub>)の関数と仮定し、

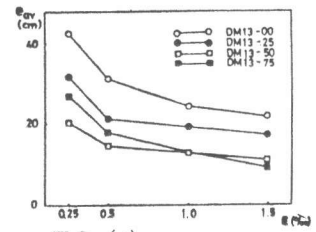


図8(a)

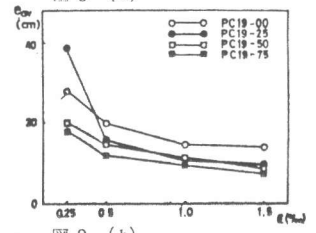


図8(b)

図8 e<sub>av</sub> - ε<sub>av</sub> 関係

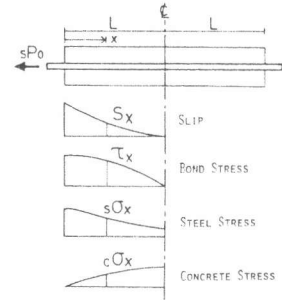


図9 付着応力分布

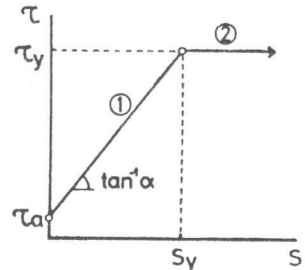


図10 τ-S関係

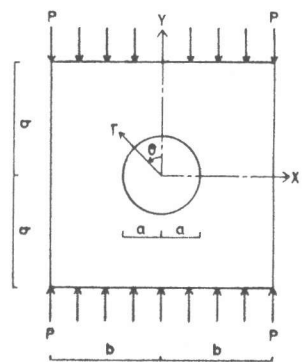


図11 極座標

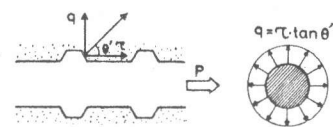


図12 リブ放射圧

$$c\bar{\sigma}_{ra} = 4 \int_0^{a/2} c\sigma_r d\theta / (2ra) = (A-1.0) PN/2 \quad (9)$$

異形鉄筋については、油圧により側圧を作用させたDörrの両引試験結果<sup>6)</sup>から最小自乗法で定数を求め、次式を提案する。

$$b\bar{\tau}_y = b\bar{\tau}_y \{1.0 + 2.0 (c\bar{\sigma}_{ra} / fc)^2\} + \tau_a, \quad \tau_a = -0.05 c\bar{\sigma}_{ra} \quad (10)$$

ここで、 $b\bar{\tau}_y$  は、 $PN=0$ の時の $\tau_y$ で、建築学会短期許容応力度の2倍を仮定する。また、丸鋼については、次式の山本の提案式<sup>7)</sup>を採用する。

$$b\bar{\tau}_y = 0.36 c\bar{\sigma}_{ra} + b\bar{\tau}_y \quad (11)$$

次に、異形鉄筋の割裂破壊時の $s\bar{\tau}_y$ を評価する。割裂ひびわれの発生機構は、図12に示す様に、リブからの放射圧( $q = \tau_x \cdot \tan \theta'$ )によると考えられ、この時のコンクリート断面内の接線応力( $c\sigma_\theta$ )は、次式で与えられる。

$$c\sigma_\theta = a^2 (b^2 + r^2) q / r^2 (b^2 - a^2) \quad (12)$$

割裂破壊面は、放射線に沿って発生し、式(8)と(12)の和で定義される接線応力の平均値( $c\bar{\sigma}_\theta$ )が最大となる面と仮定すると、 $\theta = 0$ の時最大で、 $c\bar{\sigma}_\theta$ は、次式で与えられる。

$$c\bar{\sigma}_\theta = q / (R-1) + \{ -A/2R + B(R^2 + R + 1) / 2R^3 \} PN, \quad R = b/a \quad (13)$$

$s\bar{\tau}_y$ は、側圧の作用を受けない割裂試験の結果<sup>8)</sup>を基に、定数項と上式の $c\bar{\sigma}_\theta$ に比例する項の和として次式を提案する。

$$s\bar{\tau}_y = \beta_1 ft + \beta_2 ft (R-1) [ 1 + PN \{ A/2R - B(R^2 + R + 1) / 2R^3 \} / \beta_2 ft ] / \tan \theta' \quad (14)$$

ここで、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ は、2.39、0.192また、 $\theta'$ は、 $20^\circ$ を仮定する。本実験結果に、式(10)、(14)を適用し、 $\tau_y$ を求めると、D19では $PN/fc = 50$ 、75%、D13では、75%の時、 $\tau_y$ は $s\bar{\tau}_y$ で決まる結果が得られた(図13)。

最後に、表3に示す付着特性を用いた解析と実験の最終 $e_{av}$ を、図14(a),(b),(c)で比較する。なお、 $e_{av}$ は、図15のフローチャートに従って計算する。

解析の $r$ は、次式の2軸応力条件下におけるコンクリートの引張強度低減係数を仮定した<sup>9)</sup>。

$$r = 1.0 - 0.8 PN / fc \quad (15)$$

異形鉄筋の場合、いずれも $r$ を考慮した理論値が実験値と良く一致している。一方、丸鋼の場合、 $PN$ の影響が小さく、 $PN$ が低い時の適合性が悪い。

## 5. 結び

以上、側圧を受けるRC角柱の両引試験結果並びに、付着理論による検討結果を要約すると、異形鉄筋の場合、 $\tau_y$ は、側圧の増大に伴って上昇するが、その上昇には限界があり、割裂破壊により制約を受ける。さらに、コンクリートの引張強度は、側圧の影響を強く受け、2軸応力条件下における引張強度低減式が適用できる。一方、丸鋼の場合、側圧の影響は小さく、異形鉄筋とは、異なった付着性状を示す。

### 〔参考文献〕

- 1) 小野、安達他「鉄筋コンクリート造剛出頃のせん断ひびわれ発生機構に関する研究」第3回JCI年次講演会、1981年6月
- 2) N. Shirai, T. Sato, "Inelastic Analysis of Reinforced Concrete Shear Wall Structures", IABSE COLLOQUIUM, Delft, June 1981
- 3) 佐藤、小野他「鉄筋コンクリート造剛出頃の弾塑性性状に関する研究」日大理工研究所報、No. 53、1980年6月
- 4) 森田司郎「鉄筋コンクリートにおける付着とひびわれに関する研究」京都大学学位論文、1968年4月
- 5) J.N. Goodier, "Concentration of Stress around Spherical and Cylindrical Inclusions and Flaws", Trans. ASME, V. 55, 1933
- 6) K. Dörr, "Bond Behavior of Ribbed Reinforcement under Transverse Pressure", IASS SYMPOSIUM, July 1978
- 7) 山本康弘「鉄筋とコンクリートの付着性状に関する力学的及び材料学的研究」東京大学学位論文、1976年6月
- 8) E.L. Kemp, W.J. Wilhelm, "Investigation of the Parameters Influencing Bond Cracking", ACI Journal, V. 76, 1976
- 9) H. Kupfer et al., "Behavior of Concrete under Biaxial Stresses", ACI Journal, Aug. 1969

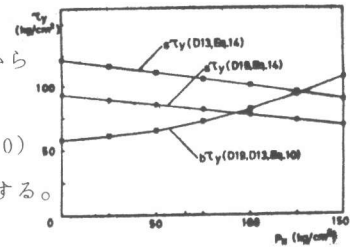


図13 最大付着応力度

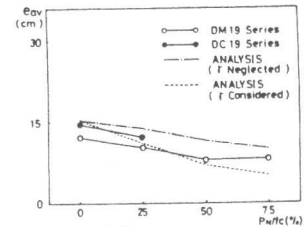


図14(a)

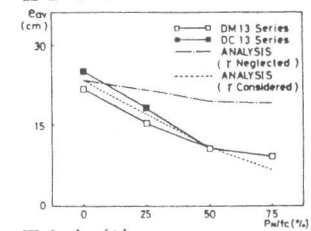


図14(b)

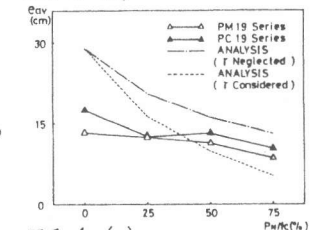


図14(c)

図14 最終ひびわれ間隔

表3 付着特性

SERIES	$P_u/fc$ (%)	$\tau_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\beta_2$ (cm)	$\tau_x$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\alpha$ (kg/cm <sup>2</sup> )
D19	0	57.4	0.01672	0.0	3432
	25	63.7	0.01856	1.87	3432
	50	77.1	0.02247	3.77	3432
	75	68.9	0.02008	5.65	3432
D13	0	57.4	0.01672	0.0	3432
	25	63.7	0.01856	1.88	3432
	50	79.0	0.02302	3.77	3432
	75	90.3	0.02631	5.65	3432
D19	0	37.2	0.01225	0.0	3036
	25	52.0	0.01225	0.0	4244
	50	66.6	0.01225	0.0	3435
	75	81.3	0.01225	0.0	4635

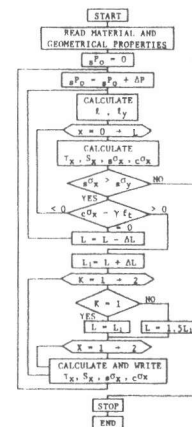


図15 フローチャート