

論文

[2102] 複合面内力を受ける RC 平板の弾塑性挙動

正会員 上田 眞稔 (竹中工務店技術研究所)

正会員 東端 泰夫 (竹中工務店技術研究所)

正会員 瀬谷 均 (竹中工務店技術研究所)

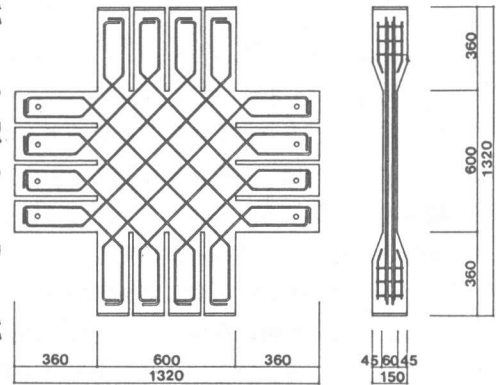
正会員 ○谷口 元 (竹中工務店技術研究所)

1. まえがき

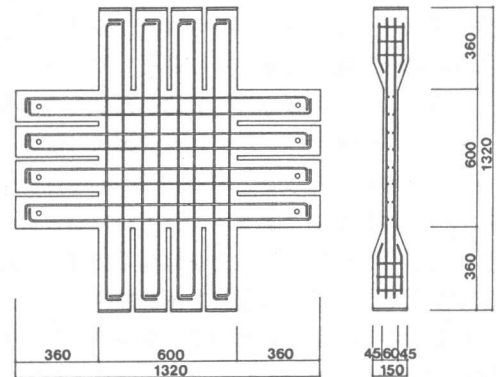
せん断破壊するRC部材の終局強度を推定するうえで重要なパラメータとして、ひびわれたコンクリートの強度低減がある。耐震壁を対象としたマクロモデル等においても、有効係数として表現されているが、定量的な評価が十分に確立されたとは言い難い。¹⁾ 本報告は、面内に圧縮及び引張力を受けるRC平板要素のひびわれ後の剛性・耐力の低下を実験により調べたものである。配筋角度の違いにより明らかになった、平板の力学挙動に関する知見に基づき、ひびわれたコンクリートの強度低下のメカニズムを考察した。

2. 実験概要

試験体の形状と諸元を図1及び表1に示す。試験部は、60cm x 60cmの正方形で、厚さは6cmであり、その外周にはスリットを設けた荷重用の補強部が取り付けられている。鉄筋は2方向等量の配筋とし、補強部にアンカーされている。鉄筋比の大きいNo.1～No.4はダブル配筋、No.5～No.10はシングル配筋とした。配筋角度は、加力方向に対して45度傾けたものと、平行のものと2種類に分けた。また、No.7とNo.10の2つの試験体では、2方向の鉄筋の交差部を溶接した。さらに、鉄筋比の小さいNo.5～No.10の各試験体では、スリット間にクラック誘発目地を設け、小



斜め配筋試験体



縦横配筋試験体

表1 試験体諸元

No	鉄筋比 (%)	配筋角度 (deg)	引張力 $T_{max}(t)$	荷重タイプ	交点溶接	F_c 強度 (kg/cm)
1	0.89	45	9	A	×	235
2	1.78	45	18	A	×	
3	1.39	0	18	A	×	
4	0.89	45	8→0	B	×	255
5	0.445	45	4	A	×	
6	0.445	45	4→0	B	×	
7	0.445	45	4	A	○	
8	0.7	0	8	A	×	
9	0.35	0	4	A	×	
10	0.35	0	4	A	○	

図1 試験体形状

さい引張力でクラックを発生させるようにした。

載荷装置は、図2に示すように、引張側は1台のジャッキで一様に加力した。載荷履歴に関しては、2種類の方法を用いた。タイプAでは、まず引張力と圧縮力を同時に加える純せん断状態で加力し、ひびわれを発生させる。つぎに鉄筋の予想降伏荷重の直前で、引張力を停止し、引張力をそのまま保持したまま圧縮力を増加させて破壊させた。タイプBでは、純せん断加力によりひびわれを発生させた後、引張力を0に戻し圧縮力のみを加えた。表1に、各試験体に作用させた最大引張力の値(T_{max})を示す。

3. 実験結果

引張力の影響に着目し、以下の試験体の、引張方向及び圧縮方向の荷重変形関係の比較を行う。

- No.1 と No.4
- No.5 と No.6
- No.1 と No.2 と No.5
- No.3 と No.8 と No.9

図3は、No.1 と No.4 を比べたものである。これらの試験体では、鉄筋比及び配筋角度は等しく、載荷履歴が異なる。即ち、No.1 では、引張力が保持されたまま圧縮荷重が載荷されたのに対し、No.4 では引張力を除荷した後圧縮荷重が加えられた。ただし、両試験体とも面内に一樣にひびわれが生じている。圧縮側の荷重変形関係と比較すると、載荷履歴の異なる $\sigma_c=25\text{kg/cm}^2$ より大きい荷重において、剛性に違いを生じ、耐力も大きく異なっている。No.1 は、引張力の影響により、剛性・耐力ともかなり低下している。

図4は、No.5 と No.6 を比べたものである。これらの試験体では、鉄筋比及び配筋角度は等しく、載荷履歴が異なる。即ち、No.5 では引張力(4t)が保持されたまま圧縮荷重が載荷されたのに対し、No.6 では引張力を除荷した後、圧縮荷重が加えられた。この場合も両試験体とも面内に一樣にひびわれが生じている。圧縮側の荷重変形関係は、No.6 は No.5 に比べ、剛性・耐力とも大きくなっているが、その違いは、No.1 と No.4 の場合より小さい。

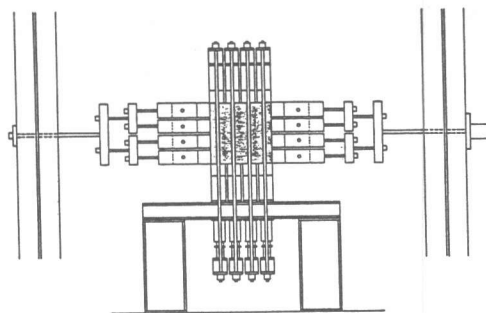


図2 加力図

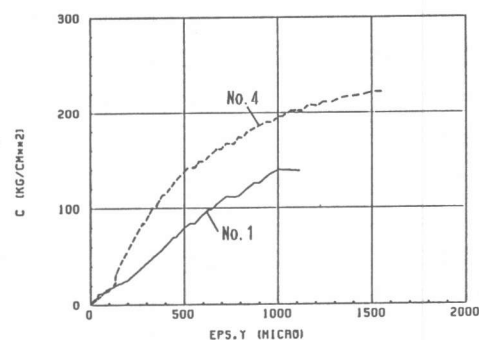


図3 圧縮荷重変形関係 (No.1とNo.4)

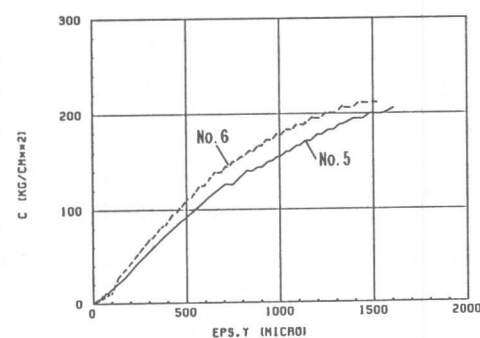


図4 圧縮荷重変形関係 (No.5とNo.6)

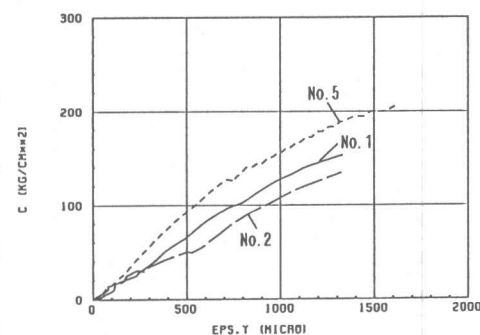


図5 圧縮荷重変形関係 (No.1とNo.2とNo.5)

図5は、No.1 と No.2 と No.5 を比較したものである。これらの試験体では、鉄筋比が各々異なり、鉄筋比に比例して引張力も異なっている。またいずれも斜め配筋試験体である。圧縮側の荷重変形関係を比較すると、耐力・剛性とも、引張力の小さい No.5 が最も大きく、引張力の大きい No.2は、鉄筋比が大きいにも拘わらず、剛性・耐力の低下が著しい。

図6は、No.3 と No.8 と No.9 を比較したものである。これらの試験体も、鉄筋比が各々異なり、鉄筋比に比例して引張力が異なっている。またいずれも縦横配筋試験体である。これら3つの試験体においては、圧縮側の荷重変形関係には、明確な違いは表れなかった。斜め配筋試験体では鉄筋比に拘わらず引張力が圧縮側の変形特性に対し支配的な影響を与えたのに対し、縦横配筋試験体には大きな影響は与えなかった。

配筋角度の影響に着目し、以下の試験体の、圧縮方向の荷重変形関係の比較を行う。

- No.2 と No.3
- No.1 と No.8
- No.5 と No.9

図7は、No.2 と No.3 を比較したものである。両試験体とも引張力は同じ(18t)であるが、No.2 が斜め配筋であるのに対し、No.3 は縦横配筋である。圧縮側の荷重変形関係を比べると、No.3の方が剛性・耐力ともかなりNo.2を上回っていることがわかる。

図8は、No.1 と No.8 を比較したものである。この場合も引張力はほぼ同じレベル(No.1は 9t, No.8は 8t)であるが、No.1 が斜め配筋であるのに対し、No.8 は縦横配筋である。圧縮側の荷重変形関係を比べると、やはり縦横配筋であるNo.8の方が剛性・耐力とも大きくなっていることがわかる。しかし、その差は、No.2 と No.3 の差と比べると小さい。

さらに図9は、No.5 と No.9 を比較したものである。引張力は同じ(4t)であるが、No.5 が斜め配筋であるのに対し、No.9 は縦横配筋である。この場合も、圧縮側の荷重変形関係は縦横配

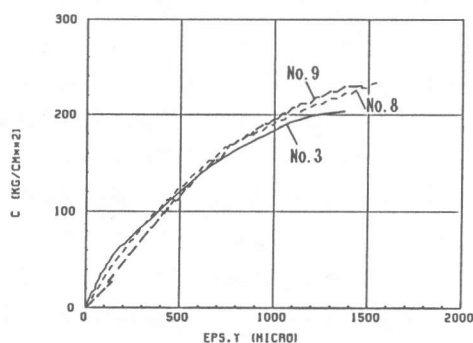


図6 圧縮荷重変形関係 (No.3とNo.8とNo.9)

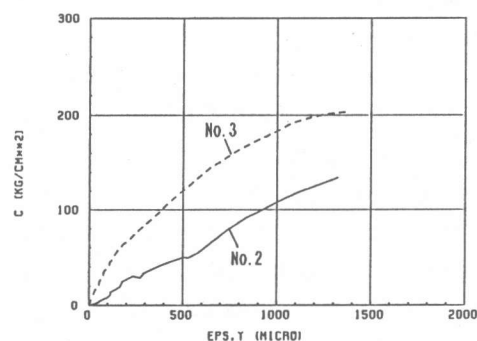


図7 圧縮荷重変形関係 (No.2とNo.3)

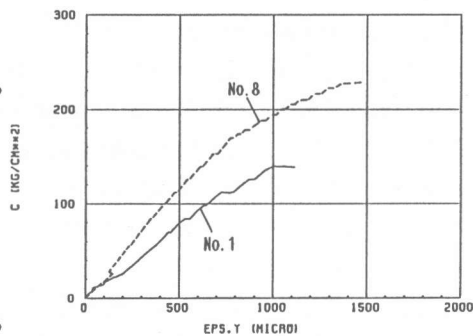


図8 圧縮荷重変形関係 (No.1とNo.8)

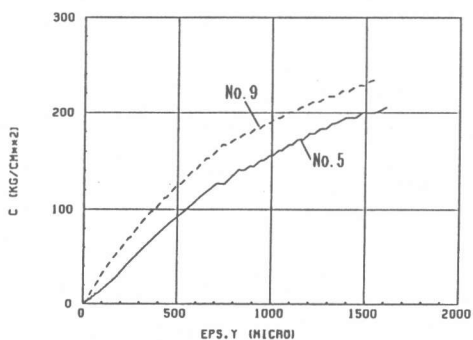


図9 圧縮荷重変形関係 (No.5とNo.9)

筋である No.9 の方が剛性・耐力とも大きくなっているが、その差はさらに小さくなっている。

図10～12は、これら配筋角度の異なる試験体における、圧縮方向変形と引張方向変形の履歴を比較したものである。それぞれの場合とも、斜め配筋試験体 (No.2,1,5) は、圧縮荷重載荷時においても、引張方向変形が大きくなっている。これに対し、縦横配筋試験体 (No.3,8,9) においても、圧縮荷重載荷時に引張方向の伸びは見られるが、斜め配筋試験体に比べると小さい。斜め配筋試験体では、圧縮力をそれと直交方向に伝えるメカニズムがあると予想される。

交点溶接の影響に着目し、以下の試験体の圧縮方向の荷重変形関係の比較を行う。

- No.5 と No.7
- No.9 と No.10

図13において、No.5 と No.7 は斜め配筋、No.9とNo.10 は縦横配筋の場合である。両比較とも、交点溶接の有る試験体の方が、無いものに比べ、若干耐力が小さくなっているものの有意な差は見られない。

図14は、最大耐力時での引張力と圧縮最大耐力との関係をプロットしたものである。図中●印は、斜め配筋試験体、○印は縦横配筋試験体の最大耐力を表している。斜め配筋試験体は、縦横配筋試験体に比べ、全体的に最大耐力が小さくなっている。また、斜め配筋試験体では引張力が大きくなるにしたがって最大耐力が小さくなっているのに対し、縦横配筋試験体では、最大耐力は、引張力の大きさに影響されないことがわかる。

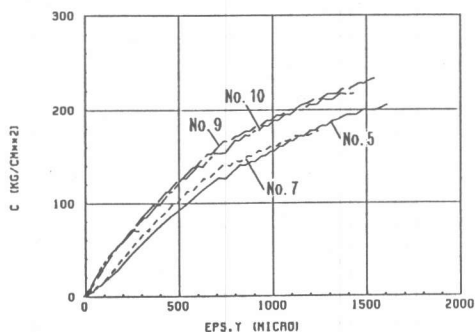


図13 圧縮荷重変形関係
(No.5とNo.7とNo.9とNo.10)

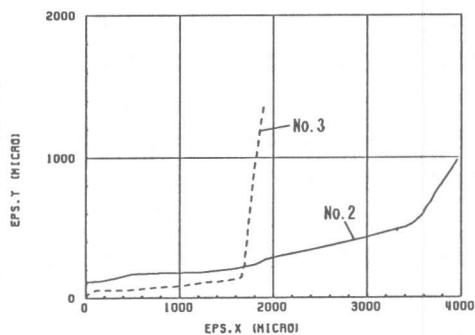


図10 圧縮歪-引張歪関係 (No.2とNo.3)

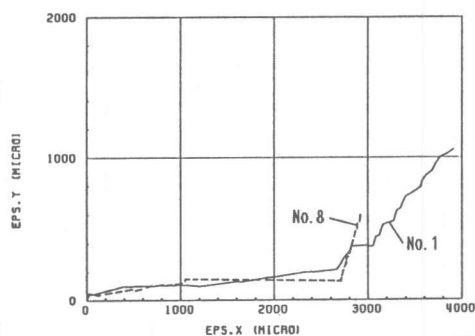


図11 圧縮歪-引張歪関係 (No.1とNo.8)

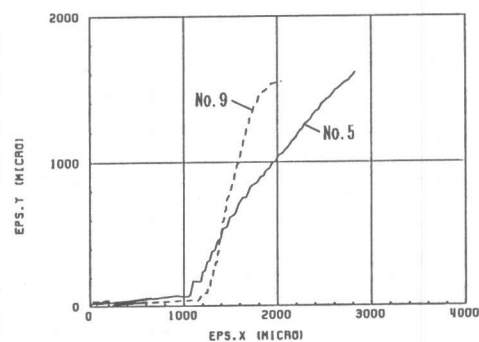


図12 圧縮歪-引張歪関係 (No.5とNo.9)

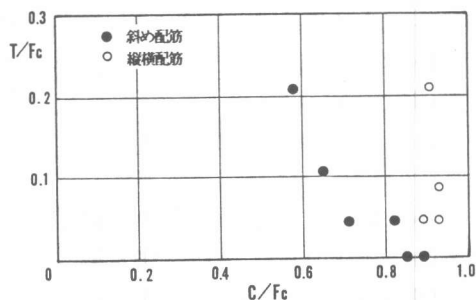


図14 引張力 (最大耐力時) と最大耐力の関係

4. パンタグラフ効果

各試験体の実験結果の比較より、配筋角度の違いによって、平板の力学性状に顕著な差異が見られた。即ち、引張荷重が同じレベルであっても、斜め配筋試験体は、縦横配筋試験体に比べ、剛性・耐力とも小さくなること、及び、斜め配筋試験体では、圧縮荷重のみの载荷においても引張方向変形がかなり増加することの2点である。

これらの現象をさらに詳しく調べるため、斜め配筋平板のひびわれ後の抵抗メカニズムを考察する。図15に示す座標系において、平板内の応力と歪分布が一樣であると仮定すると、y軸に平行にひびわれが生じたコンクリートの応力-歪関係は、次式で表される。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & E_{cr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 E_{cr} は、ひびわれに平行な方向のコンクリートの圧縮剛性を示す。一方、鉄筋は材軸方向にのみ剛性をもつものとし、2方向（±45度）の応力-歪関係を合計すると、次式が導かれる

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho E_s/2 & \rho E_s/2 \\ \rho E_s/2 & \rho E_s/2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 ρ は鉄筋比、 E_s は鉄筋剛性を示す。これらの関係より、平板全体の応力-歪関係は、以下のように表される。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho E_s/2 & \rho E_s/2 \\ \rho E_s/2 & E_{cr} + \rho E_s/2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \end{Bmatrix} \quad (3)$$

上式は、歪-応力関係の形に直すと次式のように表される。

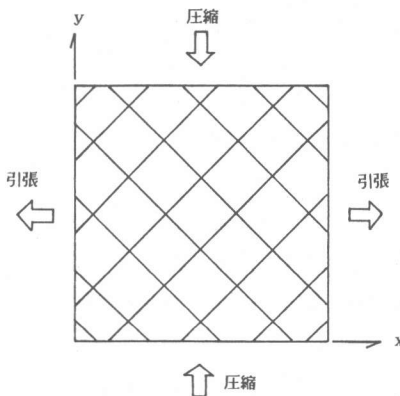


図15 座標系

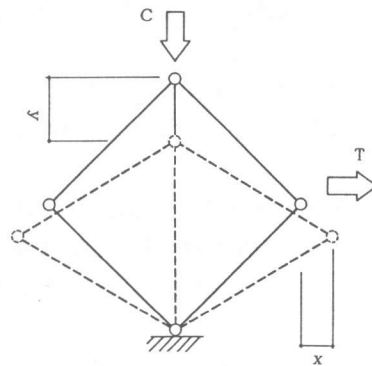


図16 パンタグラフのメカニズム

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_{cr} + 2/\rho_s & -1/E_{cr} \\ -1/E_{cr} & 1/E_{cr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \end{Bmatrix} \quad (4)$$

ここで得られた関係式に基づき、コンクリート及び鉄筋の剛性を、等価な線材の剛性で置換すると、次の変形－荷重関係式が導かれる。

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = L/A \begin{bmatrix} 1/E_{cr} + 2/\rho_s & -1/E_{cr} \\ -1/E_{cr} & 1/E_{cr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T \\ C \end{Bmatrix} \quad (5)$$

上式は、図16に示されるような、パンタグラフ状の動きをする抵抗メカニズムを表している。即ち、コンクリートは、圧縮力のみを負担する束材で表され、鉄筋は、引張力に抵抗する4本の斜材で表される。上式において、圧縮力Cのみが作用する時(T=0)の変形は、 $x=-y$ となり、圧縮方向と等量の変形が引張方向にも表れることを示している。一方、引張力Tのみが作用した時(C=0)には、圧縮方向にも変形が誘発されることを示している。またこの時、力の釣り合いより束材に圧縮力Tが加わることがわかる。この引張力により発生した束材の圧縮力は、コンクリートの

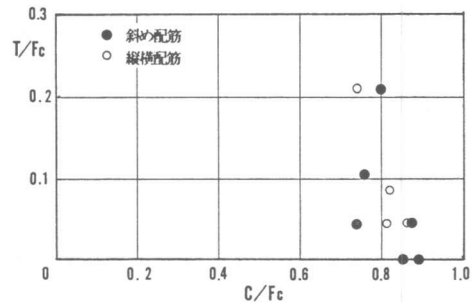


図17 コンクリート圧縮柱の最大耐力

の耐力低下の一因になると思われる。即ち、一般的な荷重条件として圧縮力Cと引張力Tが作用しているとすれば、コンクリート圧縮柱には、 $T+C$ の圧縮力が加わっていることになる。この効果を考慮して、斜め配筋試験体の最大耐力を $T+C$ とみなしてプロットし直すと、図17が得られる。ただし、縦横配筋試験体に関しては、鉄筋の圧縮応力をさし引いている。同図より、ひびわれ後のコンクリート圧縮柱の最大耐力は、概ね圧縮強度の8割程度であり、配筋角度、さらには、引張力の大きさにもあまり依存しないという傾向がうかがえる。

5. まとめ

複合面内力を受けるRC平板の実験を行い、以下の知見が得られた。

- (i) 引張荷重が同じであれば、斜め配筋試験体は、縦横配筋試験体より、剛性・耐力とも小さくなる。
- (ii) 斜め配筋試験体では、引張荷重の増大により、平板のみかけの圧縮耐力は低下する。
- (iii) 斜め配筋試験体のひびわれ後の挙動はパンタグラフ状の抵抗メカニズムによって説明され、コンクリートのみの圧縮柱の耐力は、配筋角度や引張力の大きさに依存しない。

参考文献：

- 1) 日本コンクリート工学協会「RC耐震壁のマクロモデルとFEMマイクロモデルに関するパネルディスカッション－研究の現状と問題点－」昭和63年 1月