

[2049] 膨張コンクリートを用いた RC 部材のせん断性状

正会員 〇向井孝男 (広島市役所)  
 正会員 丸山久一 (長岡技術科学大学工学部)  
 正会員 先村律雄 (長岡技術科学大学大学院)  
 正会員 辻 幸和 (群馬大学工学部)

1. まえがき

RC部材のひびわれ制御の一方法として、膨張コンクリートを用い化学的に導入されるプレストレスを利用する方法がある。この方法で曲げひびわれ性状改善の報告[1]がなされているが、せん断ひびわれ等について検討した報告は少ない。スターラップが配置されている場合、膨張コンクリートを用いることによって軸直角方向にもプレストレスが導入され、せん断ひびわれ耐力の向上、ひびわれ幅の制御等に効果があると期待できる。

本研究は、膨張コンクリートを用いたRC部材(CPC部材)について、せん断ひびわれ発生荷重、ひびわれ幅の進展状況、破壊耐力等を実験的に調べ、RC部材やPC部材との比較を通して既往の算定方法の適用性について検討した結果を報告するものである。

2. 実験概要

供試体の代表的な形状・寸法を図1に、諸元を表1に示す。各供試体とも断面に一樣なプレストレスを導入させるため複鉄筋矩形ばりとしている。せん断性状に及ぼすケミカルプレストレスの効果は、膨張材混入率、スターラップ数、 $a/d$ 、引張鉄筋比、有効高さ等により異なると考えられるので、これらを実験パラメーターとした。なお、本実験ではせん断ひびわれ性状を把握することを目的としていることから引張鉄筋比を大きくしている。スターラップは全て鉛直に配置し、せん断スパン内に卓越したせん断ひびわれが生じるように腹鉄筋比を小さく抑えた。

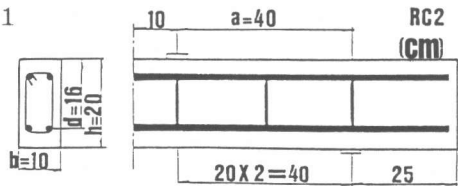


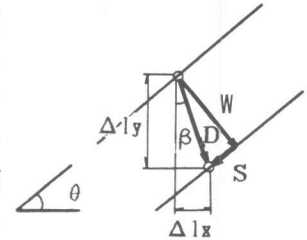
図1 供試体形状・寸法

表1 断面諸元

供試体名	E/(C+E) (%)	断面幅 (cm)	有効高さ (cm)	a/d	引張鉄筋	腹鉄筋	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )
RC1	0	10	16	2.5	2-D19	---	311
RC2	0	10	16	2.5	2-D19	2-D6	312
RC3	0	10	16	2.5	2-D19	2-D6×3	422
RC4	0	15	16	2.5	2-D19	2-D6	347
CPC1	12.5	10	16	2.5	2-D19	---	---
CPC2	12.5	10	16	2.5	2-D19	2-D6	---
CPC3	12.5	10	16	2.5	2-D19	2-D6×3	---
CPC4	15	10	16	2.5	2-D19	2-D6	---
CPC5	15	15	16	2.5	2-D19	2-D6	---
CPC6	15	10	16	3	2-D19	2-D6	---
CPC7	15	15	25	2.5	2-D22	2-D6	---

用いた材料は、セメントは早強ポルトランドセメント、膨張材はカルシウムサルフォアルミネート系である。骨材は川砂、川砂利を用い、比重はそれぞれ2.57および2.67である。コンクリートの配合は、水セメント比50%、細骨材率41%と一定にし膨張材混入率を3種(0, 12.5, 15%)に変化させた。全鉄筋は、SD35で降伏強度は39kg/mm<sup>2</sup>程度であった。

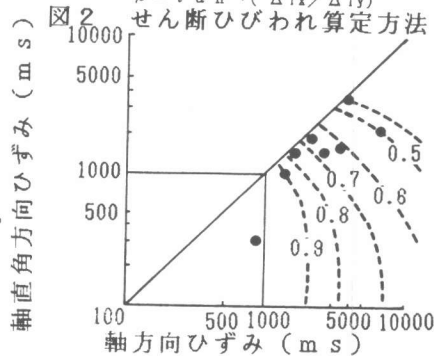
供試体は材令1日で脱型した後、20℃の水中で鉄筋の伸びの増加が始り終了する材令7日まで養生し、その後載荷試験(材令10日)まで実験室に放置した。載荷は2点集中荷重とし、油圧ジャッキを用い変位制御で行った。支承は一端はヒンジ、他端はローラーとした。鉄筋のひずみはストレインゲージで測定した。ひびわれ幅は供試体側面に貼付した標点(縦、横とも10cm)間をコンタクト



### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 強度性状

膨張コンクリートは、大きく膨張すると圧縮強度が低下し、同様にせん断強度も低下すると考えられる。そこで、既往の研究報告 [3] を基に軸方向および軸直角方向の膨張量と圧縮強度比(プレーンコンクリートに対する強度比)との関係の評価することとした。各CPC部材の圧縮強度は、実測した膨張量を、図3



#### 3.2 せん断ひびわれ発生時のせん断応力度 ( $\tau_c$ )

表2に実験結果を示す。軸方向及び軸直角方向とも図3 圧縮強度比(参考文献 [4])

表2 実験結果および計算値

引張鉄筋あるいはスターラップの中央部の伸びひずみから各方向に導入されたケミカルプレストレスを算定し、これが各方向の断面中に一様に分布しているとして算定した。せん断ひびわれ発生時のせん断応力度の実測値は、肉眼で最初にせん断ひびわれを発見した時のせん断応力度 ( $V/bd$ ) である。せん断ひびわれ発生

供試体	ケミカルプレストレス (kg/cm <sup>2</sup> )		せん断ひびわれ発生時のせん断応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )			終局時のせん断応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )			破壊形式
	軸方向	軸直角方向	実測値	計算値	実/計	実測値	計算値	曲げ	
RC1	----	----	18.8	19.3	0.97	34.4	19.3	44.7	SC
RC2	----	----	18.8	19.3	0.97	45.3	29.7	44.7	SC
RC3	----	----	20.3	20.8	0.98	47.5	42.2	46.3	F
RC4	----	----	17.7	18.5	0.96	32.3	25.4	31.5	F
CPC1	29.1	----	21.9	16.1	1.36	45.3	19.3	44.7	F
CPC2	36.9	7.53	25.0	19.4	1.29	48.4	29.7	44.7	F
CPC3	36.6	12.10	26.6	23.2	1.15	43.8	40.6	44.7	F
CPC4	63.4	9.86	26.6	23.9	1.11	43.8	29.7	44.7	F
CPC5	52.2	8.29	22.9	21.0	1.09	32.3	24.0	30.6	F
CPC6	62.3	8.47	25.0	23.3	1.07	35.9	26.6	37.2	F
CPC7	33.3	4.86	18.0	17.4	1.03	25.3	20.0	28.7	F

SC: せん断圧縮破壊 F: 曲げ破壊

応力度の計算値は、RC部材に関しては岡村・檜貝式 [4] より求め、またCPC部材に関しては導入プレストレスの影響を考慮して断面図心位置の主引張応力度がコンクリートの引張強度に達した時にひびわれが発生するとして求めた。

#### ① RC部材 (岡村、檜貝式)

$$\tau_c = 0.94 f_c^{1/3} (0.75 d / a) (1 + \beta_o + \beta_d) \quad \dots (1)$$

#### ② CPC部材 (主引張応力度より求めた算定式)

$$\tau_c = \frac{I}{Qd} \sqrt{f_t^2 + f_t (\sigma_{cdx} + \sigma_{cdv}) + \sigma_{cdx} \cdot \sigma_{cdv}} \quad \dots (2)$$

$f_c$ : コンクリート圧縮強度

$f_t$ : コンクリート引張強度 =  $0.58 f_c^{2/3}$

$\sigma_{cdx}$ : 軸方向ケミカルプレストレス

$\sigma_{cdv}$ : 軸直角方向ケミカルプレストレス

表2より、軸方向のケミカルプレストレスがほぼ等しく軸直角方向のケミカルプレストレスだけが異なるCPC1、CPC2、CPC3の3体を比較すると、軸直角方向のケミカルプレストレスが大きい部材ほど、 $\tau_c$ は大きくなっており軸直角方向のケミカルプレストレスの効果がうかがえる。膨張材混入率の違うCPC2とCPC4を比較すると、膨張材混入率が大きく導入ケミカルプレストレスの大きいCPC4の方が $\tau_c$ が大きくなっている。

全供試体を式(2)により算出した値と実測値を比較した結果、実測値と計算値の比の平均値は1.22で変動係数は16.7%であった。ところで、弾性論による主引張応力度の算出には、軸方向及び軸直角方向のプレストレスは同等に扱われることから本論文において、両方向のケミカルプレストレスの効果を表す指標として式(3)に示すK値を導入する。

$$K = \sqrt{\frac{\sigma_t^2 + \sigma_t(\sigma_{c0x} + \sigma_{c0y}) + \sigma_{c0x} \cdot \sigma_{c0y}}{\sigma_t^2}} - 1 \quad \dots (3)$$

実測値と式(2)を用いた場合の計算値の比とKの関係を図4(a)に示す。Kが1付近の時、計算値は実験値に近いが、Kが1以下になると、Kの低下に伴い実測値と計算値の比は大きくなっている。これは、RC部材同様にa/d、鉄筋比、有効高さの影響を受けたためである。CPC7においてK=0.63であるのに実測値と計算値の比は1.03と大変精度良く推定されているが、これは他の供試体に比べ、有効高さが大きく引張鉄筋比が小さかったからである。

そこで、a/d、鉄筋比、有効高さの影響を考慮するために、岡村・檜貝式を拡張し検討した式(4)を提案する。式(4)は式(1)にケミカルプレストレスの効果を導入したものである。

ここで、係数Cは軸方向及び軸直角方向のケミカルプレストレスがせん断ひびわれに及ぼす効果を軸方向のみの圧縮力が有する効果に等価に置き換えるものである。

$$\tau_c = \text{式(1)} \times (1 + C \cdot \beta_n) \quad \dots (4)$$

$$C = \sqrt{\frac{\sigma_t^2 + \sigma_t(\sigma_{c0x} + \sigma_{c0y}) + \sigma_{c0x} \cdot \sigma_{c0y}}{\sigma_t^2 + \sigma_t \sigma_{c0x}}}$$

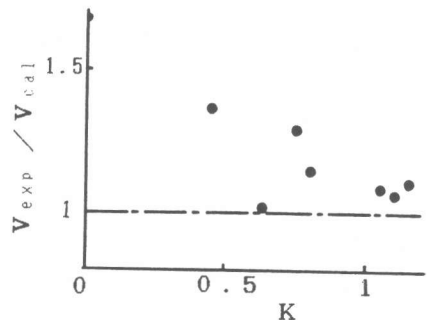
$$\beta_n = 2M_o / M_u$$

$M_o$ : デコンプレッションモーメント

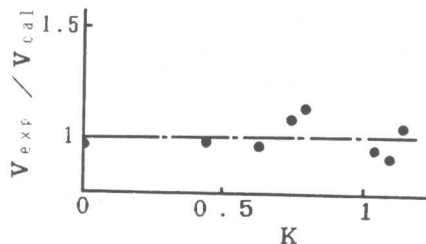
$M_u$ : 終局曲げ耐力

表3 式(4)による算定結果

供試体名	ケミカルプレストレス(kg/cm <sup>2</sup> )		C	実測値(kg/cm <sup>2</sup> )	計算値(kg/cm <sup>2</sup> )	実/計
	軸方向	軸直角方向				
CPC1	29.1		1.00	21.9	22.2	0.99
CPC2	36.3	7.53	1.13	25.0	23.4	1.07
CPC3	36.9	12.10	1.21	26.6	23.8	1.12
CPC4	63.4	9.86	1.17	26.6	25.6	1.04
CPC5	52.2	8.29	1.15	22.9	24.0	0.95
CPC6	62.3	8.47	1.14	25.0	26.9	0.93
CPC7	33.3	4.86	1.08	18.0	18.5	0.97



(a) 式(2)による推定精度



(b) 式(4)による推定精度

図4  $\tau_c$  推定精度

式(4)による計算値と実測値の比の平均値は1.01で変動係数は5.7%であった。式(4)により算定した結果を表3に示す。図4(b)に実測値と式(4)を用いた計算値の比とKの関係を示す。式(4)は式(1)に比べK値の大小による推定精度のバラツキがなく、より適用範囲の広いものである。

### 3.3 ひびわれパターン

CPC部材において、導入ケミカルプレストレスにより、 $\tau_c$ が増大するのみでなくひびわれ発生位置、進展状況にもその影響がみられる。図5にRC部材とCPC部材のひびわれパターンの相違の一例を示す。各供試体のひびわれ状況より、CPC部材のひびわれ性状には次のような特徴があった。

①スターラップを配置した場合、導入ケミカルプレストレスが大きくなる程、スターラップを避けるようにして発生する傾向があった。②RC部材に比べひびわれ幅の進展が小さく、RC部材では、

ひびわれはほとんど荷重点直下まで伸びているのに対し、CPC部材ではひびわれは荷重点の下方 $1/4$  h程度の領域には進展していない。③導入プレストレスが大きいく程、せん断ひびわれは発達せず、発生位置も荷重点側による傾向があった。④せん断ひびわれが卓越して終局に至るような部材でもケミカルプレストレスを導入することにより、せん断ひびわれが抑制され曲げひびわれが卓越して終局に至った。⑤ $a/d$ 、スターラップ数、有効高さがCPC部材のひびわれ性状に及ぼす影響はRC部材とほぼ同様な傾向であった。

### 3.4 せん断ひびわれ幅

せん断ひびわれ幅の算定は、図2に示すように、実験時にひびわれ角度( $\theta$ )を測定しておき、 $x$ 、 $y$ 両方向の標点間の変位量( $\Delta l_x$ 、 $\Delta l_y$ )からひびわれ面に鉛直な変位( $W$ )および平行な変位( $S$ )を求めた。以後、本論文では( $W$ )をひびわれ幅、( $S$ )をずれ変位として用いることにする。

各供試体について、卓越したせん断ひびわれ幅を終局直前まで追跡した。図6~図10にせん断応力度と最大せん断ひびわれ幅の関係を示す。

#### ① 膨張材混入率の影響

図6に膨張材混入率が、0、12.5、15%の3種類について比較した結果を示す。3種類ともグラフの傾きがほぼ同じであり、ひびわれ幅の進展に対してはケミカルプレストレスの効果は特に認められない。しかし、膨張材混入率が高いほど、 $\tau_c$ は大きくなるので、同一せん断応力度レベルを比較した時、RC部材に比べCPC部材は、せん断ひびわれ幅が小さくなっている。

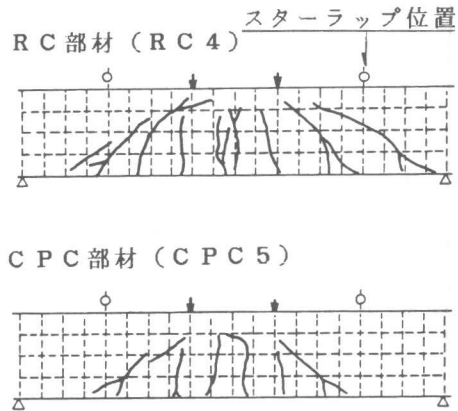


図5 ひびわれパターン

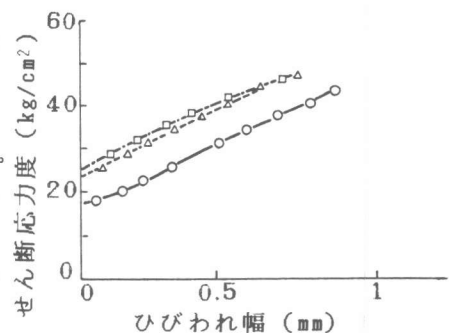


図6 膨張材混入率の影響

② スターラップ数の影響

図7にスターラップ数を、0、1、3本の3種類に変化させたRCおよびCPC部材について比較した結果を示す。スターラップの本数が多い程、導入プレストレスも大きくなり、せん断ひびわれ制御の効果が大きい。スターラップの本数が同じRCとCPC部材を比較した時、0と1本の場合はグラフの傾きはほぼ同じであるが、3本の場合はCPC部材の方が傾きが大きくせん断ひびわれ制御の効果が大きい。また、RC部材においてスターラップの数は $\tau_c$ に対して効果は認められないがCPC部材においてはスターラップ数が多い程 $\tau_c$ に対する効果が大きくなる。よって同せん断応力度レベルのRCとCPC部材を比較した時、スターラップ数が多いCPC部材程、RC部材に比べせん断ひびわれ幅の制御効果が大きい。

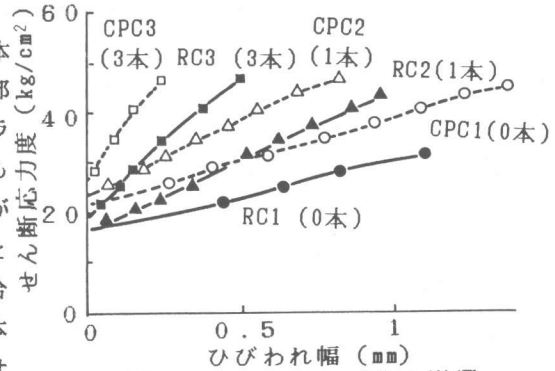


図7 スターラップ数の影響

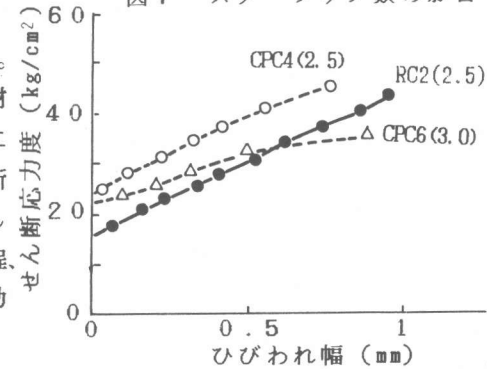


図8 a/dの影響

③ a/dの影響

図8に $a/d=2.5$ および3のCPC部材について比較した結果を示す。ケミカルプレストレスの効果はほぼ同じであるが、 $a/d=3$ のほうが $\tau_c$ は小さく、またグラフの傾きも小さく、ひびわれ発生後せん断ひびわれ幅の発達が大である。この傾向は、RC部材でも同様であり、CPC部材においてもせん断ひびわれの進展に対し $a/d$ の影響がうかがわれる。

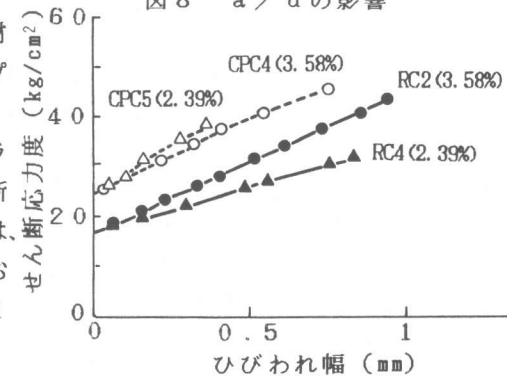


図9 引張鉄筋比の影響

④ 引張鉄筋比の影響

図9に引張鉄筋比 $p=2.39$ および $3.58$ のRCおよびCPC部材について比較した結果を示す。 $p=3.58$ の時RCおよび、CPC部材のグラフの傾きはほぼ等しく、せん断ひびわれ発生以後のひびわれ幅抑制に対してはケミカルプレストレスの効果は認められない。しかし、 $p=2.39$ の時はRCに比べCPC部材はグラフの傾きが大きくひびわれ幅の抑制にもケミカルプレストレスの効果が認められる。RC部材にお

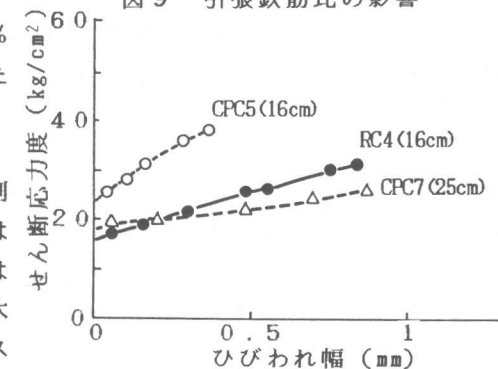


図10 有効高さの影響

いて引張鉄筋比の大きい部材の方がせん断ひびわれ幅は小さくせん断ひびわれ制御の効果が大きいのであるが、CPC部材においては、導入ケミカルプレストレスにより、引張鉄筋比の影響が小さくなる傾向にある。逆に言えば、ケミカルプレストレスによるひびわれ幅の抑制効果は、引張鉄筋比の小さなものほど大きく表れてくる。

#### ⑤ 有効高さの寸法効果の影響

図10に  $a/d$ 、腹鉄筋比を一定にし、引張鉄筋比をあまり変化させない (RC4, CPC5-2.39%, CPC7-2.06%) 状態で有効高さ  $d$  を16と25cmにした場合について比較した結果を示す。CPC部材でも  $d=25\text{cm}$ の方が、グラフの傾きが小さく、せん断ひびわれ幅制御の効果が小さい。また、寸法効果により低レベルのせん断応力度で大きなひびわれ幅となっている。

### 3.5 終局耐力

終局時のせん断応力度 ( $V/bd$ ) の実測値、計算値および破壊形式を表2に示す。計算値は、せん断ひびわれ発生荷重 ( $\tau_c$ ) に、スターラップの影響を  $45^\circ$  トラスモデルで考慮して加算したものである。RC1~RC4はせん断破壊するよう設計しているが、RC3, 4は実際には圧縮部コンクリートの圧壊で終局に至っている。

CPC1~3はRC1~3に、CPC5はRC4に対応しているが、CPC部材は全て曲げ破壊しており、曲げ耐力の計算値とよく合っている。

RC1, 2とCPC1, 2の比較およびせん断ひびわれ状況図を比較することにより、CPC部材は、せん断耐力が増加し、曲げ破壊が先行する破壊形式になることが認められる。

### 4. 結論

本実験範囲内において次のようなことが言える。

(1) CPC部材における  $\tau_c$  は、一定値以上のケミカルプレストレスが導入されていればPC部材と同様に弾性論に基づいて推定可能である。しかし、導入ケミカルプレストレスの程度により、RC部材同様、 $a/d$ 、引張鉄筋比、有効高さの影響を受ける。そこで、これらの影響を考慮した実験式を提案した。

(2) せん断ひびわれ幅は、導入プレストレス量、 $a/d$ 、スターラップ数、引張鉄筋比、有効高さ、それぞれの影響を受ける。一般に、CPC部材は導入プレストレス量が大きい程、 $a/d$ が小さい程、スターラップ数が多い程、引張鉄筋比が小さい程、有効高さが小さい程、せん断ひびわれ幅の制御効果が大きい。なお、これはそれぞれの相互作用があるため、現時点では定量的に評価するのは困難である。

(3) ケミカルプレストレスの導入により、せん断耐力 (特に  $\tau_c$ ) を増加することが出来る。従ってRC部材でせん断破壊しやすい部材に膨張コンクリートを使用して、せん断耐力を増加させ、破壊形式を曲げ破壊に導くことも可能である。

### 5. 参考文献

[1] 岡村 甫、辻 幸和; ケミカルプレストレスを導入したコンクリート部材の力学特性、土木学会論文報告集、第225号pp81~88、1974年5月

[2] 沢村、丸山: 鉄筋コンクリート単純ばりのせん断ひびわれ性状、JCI第6回年講、pp481~484、1984年

[3] 丸山、木田: 膨張混和材を用いたコンクリートの拘束膨張特性、セメント技術年報XIV pp425~428、1975年

[4] 岡村 甫: コンクリート構造の限界状態設計法 (第2版) 共立出版、pp74~95、1984