

# 論文 ケミカルプレストレストコンクリート梁における高強度鉄筋の利用に関する基礎研究

辻 幸和\*<sup>1</sup>・池田 正志\*<sup>2</sup>

**要旨:** 本研究は、降伏点が  $390\text{N/mm}^2$  以上の高強度鉄筋を用いることの有用性を、ケミカルプレストレストコンクリート (CPC) 梁について実験した結果を報告する。コンクリートに導入されたケミカルプレストレスにより曲げひび割れ発生荷重が増加するとともに、引張鉄筋に導入されたケミカルプレストレインに相当する分に応じて曲げひび割れ幅は減少することが、膨張エネルギーの大きい膨張コンクリートを用いてケミカルプレストレインを  $1000 \times 10^{-6}$  程度まで多量に導入した場合についても認められた。そしてスターラップについても、SD390 以上の高強度鉄筋を、斜めひび割れの制御に有効に使用できることが示唆された。

**キーワード:** 膨張コンクリート, ケミカルプレストレス, ケミカルプレストレイン, 高強度鉄筋, 曲げひび割れ

## 1. まえがき

膨張材を鉄筋コンクリートに積極的に活用してケミカルプレストレストコンクリート (CPC) として利用するための研究成果は、これまでも数多く報告されている。またそれらの研究成果に基づき、ボックスカルバートやヒューム管などのコンクリート工場製品に実用され、高品質なコンクリート工場製品が製造されている。しかしながら、これらのコンクリート工場製品でも、降伏点が  $345\text{N/mm}^2$  を超える高強度鉄筋を用いている例は少ない。これは、SD390 や SD490 の高強度鉄筋の製造が限られて入手が比較的困難なこと、加工に少し手間がかかること、価格も高いことといった理由による。また、CPC の力学的性状における高強度鉄筋の役割についての定量的な検討がなされてこなかったことも一因と考えられる。

本研究では、CPC 梁における降伏点が  $390\text{N/mm}^2$  以上の SD390 クラス以上の高強度鉄筋を用いる有効性について、実験した結果を報告するものである。特に鉄筋に  $1000 \times 10^{-6}$  程度まで多量に導入したケミカルプレストレインの量と曲げひび割れ幅の関係に重点をおいている。

## 2. 実験の概要

実験に用いた梁供試体の断面形状寸法を図-1 に示す。いずれも矩形断面を用い、断面对称に複鉄筋配置とし、主として引張鉄筋には SD390, SD490 またはそれを超える SD590 クラスの高強度異形鉄筋を用いている。なお圧縮鉄筋と B シリーズでは SD345 を、D シリーズの RC 梁には SD295 をそれぞれ用いている。表-1 に鉄筋の種類、機械的性質、表面の形状および寸法を示す。

コンクリートの配合を表-2 に示す。膨張コンクリートを用いた CPC 梁では、エトリンガイト系の膨張材を単位量で  $60, 67.5\text{kg/m}^3$  と多量に用いた。またセメントは、

多量の膨張材を用いた場合に良好な膨張性状と力学的性状を示す早強ポルトランドセメントを用いた。

骨材は富士川産の良質な川砂および川砂利を用いた。密度はそれぞれ  $2.62\text{g/cm}^3$  および  $2.66\text{g/cm}^3$  程度のもの、粗粒率はそれぞれ 3.03 および 6.93 (最大寸法 25mm) 程度のものであった。

CPC 梁に軸方向に導入されたケミカルプレストレスは、梁中央部の引張鉄筋と圧縮鉄筋の膨張ひずみであるケミカルプレストレインからそれらを平均してケミカルプレストレス力を求め、これが断面内に一様に分布しているとして算定した。鉄筋の膨張ひずみは、ゲージ長が 6mm のワイヤストレインゲージによるコンクリート打込み前からのひずみを、固定抵抗法によって測定した。この膨張ひずみはコンタクト型ひずみ計によって材齢 1 日より測定した鉄筋位置のコンクリートの膨張ひずみとほぼ等しい増加を示し、この方法によって測定した鉄筋の膨張ひずみの値は信頼できると考えられる。

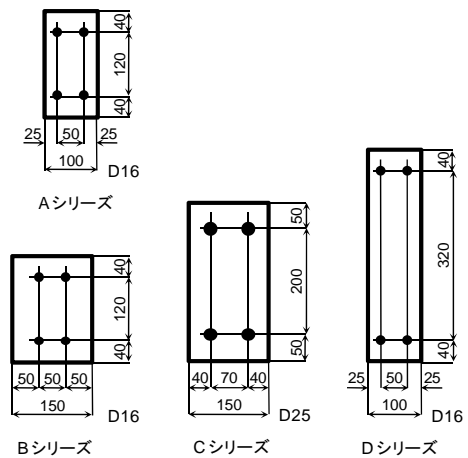


図-1 断面諸元

\*1 群馬大学大学院 工学研究科教授 工学博士 (正会員)

\*2 群馬大学工学部 工学系技術部技術専門職員 (正会員)

表-1 鉄筋の種類、機械的性質、表面の形状および寸法

シリーズ名	鉄筋の種類および用途	断面積 (cm <sup>2</sup> )	降伏点* 応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	表面の形状および寸法			
						節と軸線 のなす角 度(°)	節の寸法		
							平均間隔 (mm)	高さ (mm)	スキマの 和(mm)
Aシリーズ	D16 SD590 引張鉄筋	1.97	606	818	15	90	10.5	1.2	6.4
	D16 SD345 圧縮鉄筋	1.96	392	573	21	45	9.4	1.1	5.0
	D10 SD295 スターラップ	0.671	337	467	30	90	6.5	0.7	3.6
Bシリーズ	D16 SD345	1.96	392	573	21	45	9.4	1.1	5.0
Cシリーズ	D25 SD390 引張鉄筋	5.01	470	627	23	60	16.5	2.2	10.0
	D25 SD345 圧縮鉄筋	5.03	407	646	24	45	15.4	1.5	8.0
	D10 SD295 スターラップ	0.671	337	467	30	90	6.5	0.7	3.6
Dシリーズ	D16 SD490 引張鉄筋	1.96	550	726	20	90	10.4	1.1	7.0
	D16 SD345 圧縮鉄筋	1.96	392	573	21	45	9.4	1.1	5.0
	D16 SD295 RCのみ	1.95	366	557	24	90	10.8	1.2	6.1
	φ6 SR295 スターラップ	0.283	370	580	31	—	—	—	—

\* 降伏点応力度は公称断面積を用いて算出した

表-2 コンクリートの配合

用途	水結合材比 W/(C+E) (%)	膨張材の 置換率 (%)	単位水量 W (kg/m <sup>3</sup> )	単位セメント量 C (kg/m <sup>3</sup> )	単位膨張材量 E (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材率 s/a (%)	セメント の種類	AE 減水剤	スランプ (cm)	空気量 (%)
A, Dシリーズ	38.5	0	173	450	0	36	早強	—	3.0~5.5	1.5~1.6
		15		382.5	67.5				3.0~5.5	1.5~1.6
Bシリーズ	38.5	0	173	450	0	36	早強	単位結合材量の 0.25%	9.5	3.3
		15		382.5	67.5				9.0~12.5	3.5~3.7
Cシリーズ	45	0	180	400	0	37	早強	—	7.5	1.5
		15		340	60				7.5	1.5

表-3 ケミカルプレストレイン、ケミカルプレストレスおよび圧縮強度

シリーズ名	供試体名	スターラップ の配置	ケミカルプレストレイン (10 <sup>6</sup> )		ケミカルプレストレス (N/mm <sup>2</sup> )		A法一軸拘束 膨張ひずみ (10 <sup>6</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
			軸方向	鉛直方向	軸方向	鉛直方向		
A	AC-A	なし	620	—	5.08	0	1370	49.8
	AC-B	D10 20cm 間隔	670	670	5.49	0.98		
	AC-C	D10 10cm 間隔	650	755	5.32	2.21		
B	BP-A	なし	0	0	0	0	—	45.3
	BC-A	なし	830	—	4.30	0	1450	38.5
C	CP-A	D10 25cm 間隔	0	0	0	0	—	42.0
	CC-A	D10 25cm 間隔	380	780	3.52	0.58	950	38.2
D	DP-A	なし	0	0	0	0	—	55.3
	DC-A	なし	1130	—	4.40	0	1460	47.0
	DC-B	φ6 10cm 間隔	1330	1900	5.13	1.57	1530	

鉛直方向のケミカルプレストレインとケミカルプレストレスは、それぞれスターラップの高さ中央位置に貼付したワイヤストレインゲージの膨張ひずみの平均値とスターラップが配置された箇所に鉛直方向に様に分布するとして算定した圧縮応力度である。表-3 にまとめて示す。

梁供試体は、材齢1日で脱枠後20℃の水中養生をケミカルプレストレスングの期間、すなわち鉄筋の膨張ひずみの増加がほとんど終了するまで行い、試験の1日前に水中より取り出して実験室内に放置した後、載荷試験を行った。導入されるケミカルプレストレスは養生方法によって著しく異なるが、水中養生以外の養生方法をほとんど採らなかったのは、実験の目的から、ケミカルプレストレスを効果的に導入でき、コントロールも容易で

ある水中養生を行った場合の力学的特性をまず明らかにしようとしたからである。

表-3 には、JIS A 6202 附属書2の断面が10×10cmでその中央に呼び名が11mmのPC鋼棒を配置し、両端部に配置した鋼板と溶接したA法一軸拘束体の原型(長さがA法より4cm長い40cmのもの)を用いて測定した膨張ひずみも示している。また直径が15cmで高さが30cmの円柱供試体による圧縮強度も示している。いずれも、梁供試体と同様な養生方法を行った。ただし、膨張コンクリートは、JIS A 6202 附属書3に従って、試験直前まで型枠内に置き、脱型して直ちに強度試験を行った。

### 3. ケミカルプレストレインとケミカルプレストレス

表-3 には、載荷実験直前における膨張コンクリート

の使用により引張鉄筋に生じたケミカルプレストレンおよびコンクリートに導入されたケミカルプレストレスを示している。

膨張材を多量に用いたこともあり、CPC 梁にはケミカルプレストレンで軸方向に  $1300 \times 10^{-6}$  が、軸方向に直角な鉛直方向に  $1900 \times 10^{-6}$  が、またコンクリートに導入されたケミカルプレストレスでは軸方向に  $5.5 \text{ N/mm}^2$  が、鉛直方向には  $2.2 \text{ N/mm}^2$  が、それぞれ最大で生じている。ここで、 $900 \times 10^{-6}$  のケミカルプレストレンは、RC 梁における従来の鉄筋の許容応力度の  $180 \text{ N/mm}^2$  に相当する大きな値である。

#### 4. ひび割れ性状と破壊型式

載荷実験は、表-4 に示す曲げモーメントの一定区間

がある 2 点載荷方法を採用した。梁引張底面に貼付したゲージ長が  $60 \text{ mm}$  のワイヤストレインゲージの急変点より曲げひび割れ発生荷重を求め、総断面を用いて梁下縁の曲げ応力度を算出し、曲げひび割れ発生応力度とした。目視により、一般に曲げひび割れから斜め方向に急変する荷重を斜めひび割れの発生とし、その時のせん断力を梁の幅と引張鉄筋の有効高さで除して、斜めひび割れ発生時のせん断応力度とした。また、破壊時のせん断力より、同様に破壊時のせん断応力度を求めた。それぞれの応力度を、表-4 に示している。

図-2 には、スターラップを配置していない RC 梁と CPC 梁とともに、スターラップを配置した CPC 梁のひび割れ図を示す。

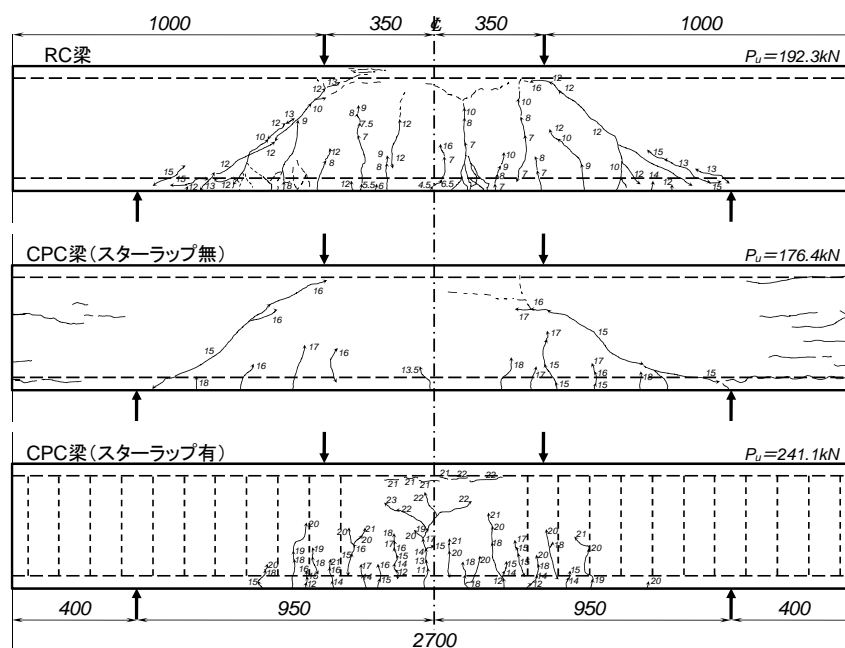
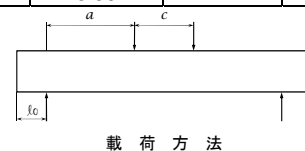
曲げモーメントが一定区間に最初の曲げひび割れが發

表-4 部材の載荷方法および曲げ強度試験結果

シリーズ名	載荷方法				ケミカルプレストレス (N/mm <sup>2</sup> )		曲げひび割れ発生応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	斜めひび割れ発生時のせん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	破壊時のせん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	破壊型式 <sup>+++</sup>	試験材齢 (日)
	$\frac{a}{d}$	a (cm)	c (cm)	$l_0$ (cm)	軸方向	鉛直方向*					
A	3.5	56	26	21	5.08	0	11.72	1.99	2.81	SC	14
					5.49	0.98**	12.35	2.75	3.47	F	14
					5.32	2.21***	12.67	3.07	3.58	F	14
B	3.13	50	40	10	0	0	4.41	1.43	1.84	DT	80
					4.30	0	13.23	2.01>	2.01	F	85
C	4.5	112.5	45	25	0	0	3.61	1.31	2.20	F	14
					2.38	0.58**	9.01	2.10	2.32	F	14
D	1.67	60	70	40	0	0	3.48	1.64	2.68	SC	28
					4.40	0	10.36	2.04	2.45	SC	28
					5.13	1.57 <sup>+</sup>	10.45	3.39>	3.39	F	28

\* スターラップ配置区間の平均  
\*\* D10mm 異形鉄筋を 20cm 間隔  
\*\*\* D10mm 異形鉄筋を 10cm 間隔

+  $\phi 6 \text{ mm}$  丸鋼を 10cm 間隔  
++ D10mm 異形鉄筋を 25cm 間隔  
+++ F 曲げ引張破壊 SC せん断圧縮破壊  
DT 斜め引張破壊



ひび割れ図の数値はton表示

図-2 RC 梁と CPC 梁(スターラップの有無)のひび割れ図 (D シリーズ)

生し、荷重の増加とともにこの曲げひび割れが進展し、また新たな曲げひび割れが曲げモーメント一定区間とせん断スパンに生じた。せん断スパンに生じた曲げひび割れは発達して、斜め方向に大きく角度を変えた斜めひび割れとなった。この斜めひび割れは、スターラップが配置されている CPC 梁ではその発達が拘束されたが、配置されていない CPC 梁と RC 梁では拘束されずに発達して、斜めひび割れの先端の圧縮部が圧壊されるせん断圧縮破壊を生じさせた。

スターラップを配置しない CPC 梁では、鉛直方向の膨張を拘束していないこともあり、ケミカルプレストレスの段階で引張・圧縮鉄筋方向に平行な水平ひび割れが梁端部に生じた。しかしながらこの水平ひび割れは、曲げひび割れと斜めひび割れの発達状況にはほとんど影響を及ぼしていない。なお、曲げモーメント一定区間に生じている水平方向のひび割れは、破壊直前に生じたものである。

スターラップを配置すると、この方向にも平均で  $1.6\text{N/mm}^2$  のケミカルプレストレスが導入された。そのため、この CPC 梁では斜めひび割れが発生しなくて引張鉄筋が降伏し、その後圧縮縁のコンクリートが圧壊する曲げ引張破壊を生じた。

CPC 梁については、曲げモーメント一定区間内の曲げひび割れの発達が、RC 梁に比べて著しく遅いことが認められる。図中の数字は、荷重の値を示す。また CPC 梁では、せん断スパンに生じた曲げひび割れの発達も遅く、スターラップのない CPC 梁に生じた斜めひび割れは曲げひび割れからではなく、単独に生じたかのような発達状況であった。

スターラップを配置した CPC 梁の曲げモーメント一定区間の曲げひび割れの発達も遅かった。スターラップを配置しなかった CPC 梁がせん断圧縮破壊を生じた荷重を超えてから、曲げひび割れが著しく発達していたことも認められる。

## 5. 引張鉄筋のひずみの増分

曲げモーメントが一定区間の梁中央部における引張鉄筋のひずみの増分を、D シリーズについて図-3 に示す。既往の報告のように<sup>1)~3)</sup>、CPC 梁（スターラップ無）はケミカルプレストレスの導入により曲げひび割れ発生応力度が RC 梁に比べて増加するとともに、曲げひび割れの発生直後の引張鉄筋のひずみ増加が小さくなっている。また、曲げひび割れが十分に発生した後の引張鉄筋のひずみの増分は、RC 梁に比べてほぼケミカルプレストレスの値だけ小さくなっている。なお、コンクリートの引張力を無視し、ヤング係数比を 7 と仮定して弾性計算により求めた値を、破線で RC 梁計算値として示してい

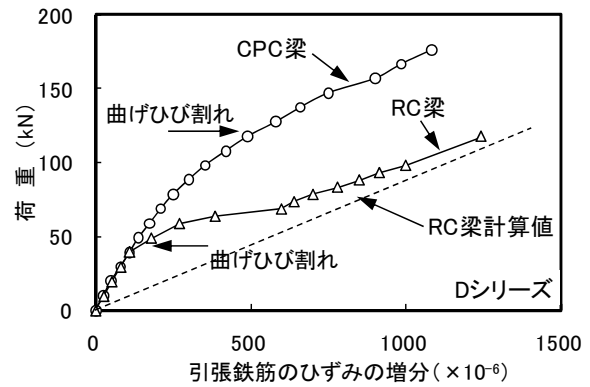


図-3 CPC 梁（スターラップ無）と RC 梁の引張鉄筋のひずみの増分

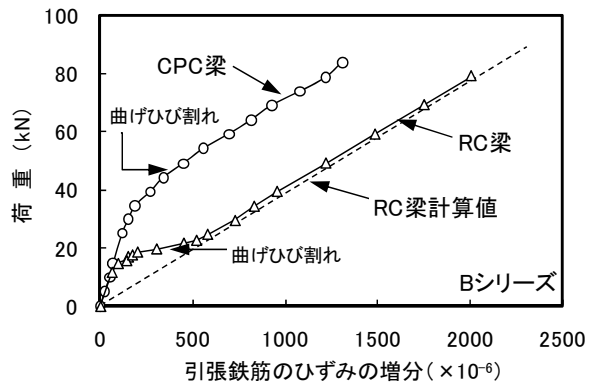


図-4 SD345 引張鉄筋のひずみの増分

る。RC 梁では、曲げひび割れ発生後はこの計算値に近い値を示している。このような CPC 梁の現象が、SD490 クラスの高強度引張鉄筋に  $1100 \times 10^{-6}$  のケミカルプレストレスを軸方向に生じさせた CPC 梁についても確認された。

RC 梁の引張鉄筋には SD295 クラスを用いたが、引張鉄筋が降伏する直前でせん断圧縮破壊した。スターラップを配置していない CPC 梁は、SD490 クラスの引張鉄筋を配置したが、図-2 に示したように、それが降伏する前の RC 梁より少し小さい荷重でせん断破壊した。そして、スターラップを配置した CPC 梁では、SD490 クラスの引張鉄筋が降伏した後に曲げ引張破壊をした。

B シリーズの引張鉄筋に SD345 クラスを用いた RC 梁と、それに膨張コンクリートを用いて  $800 \times 10^{-6}$  のケミカルプレストレスを導入した CPC 梁における引張鉄筋のひずみの増分を、図-4 に示す。図-3 と同様な膨張コンクリートを積極的に使用した効果が認められる。ただ普通強度の引張鉄筋を B シリーズでは用いたために、曲げひび割れの発生から曲げ引張破壊までの荷重段階が非常に狭くなっている。

B シリーズでは、いずれの梁もスターラップを配置していなかったため、表-4 に示したように、RC 梁は斜めひび割れが顕著に発達した斜め引張破壊を、CPC 梁より小さい荷重で生じた。

## 6. 曲げひび割れ幅

図-5は、DシリーズのCPC梁側面の引張鉄筋位置で求めた曲げひび割れ幅と曲げモーメントの関係を示す。曲げひび割れ幅は最大から3番目まで大きいものの平均値で示す。最大から3番目までの曲げひび割れは、図-2に示したように、曲げモーメント一定区間のスターラップの配置していない箇所に生じている。ケミカルプレストレインを $1300 \times 10^{-6}$ 程度と多量に生じさせたCPC梁においても、RC梁に比べて同一の曲げモーメントに対応する曲げひび割れ幅は著しく小さくなっている。また除荷時の残留ひび割れ幅も小さくなっている。

曲げひび割れ幅と引張鉄筋のひずみの増分との関係を図-6に示す。B、C、Dシリーズをまとめている。同一の断面形状と配筋方法であれば、高強度鉄筋を用いたRC梁とCPC梁はほぼ同じ直線関係を示すことが、各シリーズにおいて明らかである。このことは、大きな膨張エネルギーで引張鉄筋に $1300 \times 10^{-6}$ 程度のケミカルプレストレインを導入させても、CPC梁の鉄筋とコンクリートとの付着性状はRC梁と同じであることを意味している。

Dシリーズのせん断スパンにおけるスターラップの有無のみを変えた場合について、引張鉄筋のひずみの増分と曲げひび割れ幅の関係を図-7に示す。両者の関係は、スターラップの有無に無関係にほぼ同じ直線を示すことが認められる。軸方向に $1100 \sim 1300 \times 10^{-6}$ の膨張ひずみのケミカルプレストレインを導入し、コンタクト型ひずみ計で測定したせん断スパンにおける梁高さ方向にはスターラップを配置していない場合は $4000 \times 10^{-6}$ 、スターラップを配置した場合で $2000 \times 10^{-6}$ 程度の膨張ひずみを生じた。曲げモーメント一定区間にはスターラップを配置していないため、この区間の梁高さ方向の膨張ひずみはせん断スパンにスターラップを配置したCPC梁で $4000 \times 10^{-6}$ 程度であった。このような膨張ひずみを生じたCPC梁についても、鉄筋との付着性状にはほとんど変化を生じていないことを示唆しているといえる。

図-8は、図-9に示すようにせん断スパンにおけるスターラップの有無と配置方法を変えたCPC梁の引張鉄筋のひずみの増分を示している。引張鉄筋にはSD590クラスを用いた。荷重直前の引張鉄筋には約 $650 \times 10^{-6}$ のケミカルプレストレインが導入されており、スターラップの無いものとD10を20cm間隔（せん断補強鉄筋比 $r=0.71\%$ ）および10cm間隔（ $r=1.43\%$ ）に配置したものについてである。

引張鉄筋のひずみの増分は、せん断スパンにおけるスターラップの有無と配置方法にかかわらず荷重の増加に伴ってほぼ同じ増加量を生じている。このひずみの増分の挙動は、スターラップの無いCPC梁が、斜めひび割れが卓越するまで続いている。斜めひび割れが発達して

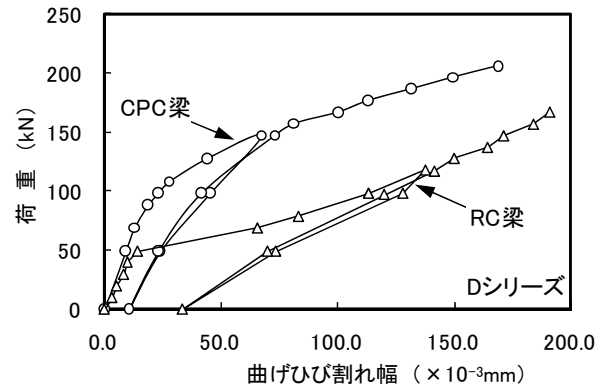


図-5 CPC梁(スターラップ有)とRC梁の曲げひび割れ幅

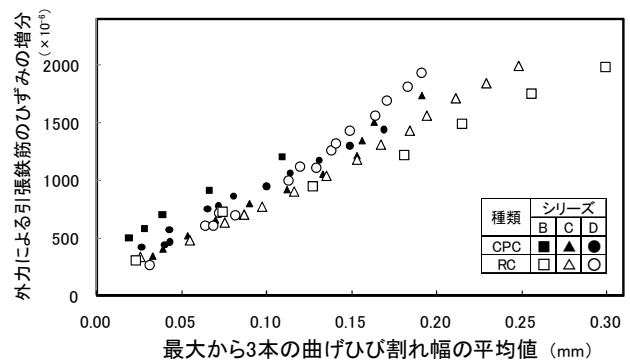


図-6 最大から3本の曲げひび割れ幅の平均値と外力による引張鉄筋のひずみの増分

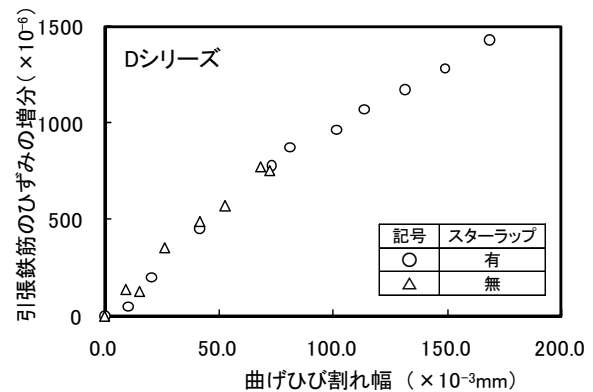


図-7 スターラップの有無とCPC梁の曲げひび割れ幅

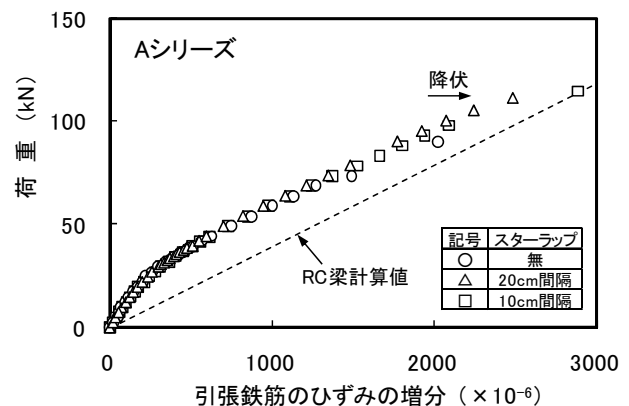


図-8 スターラップの有無と配置方法が異なるCPC梁の引張鉄筋のひずみの増分

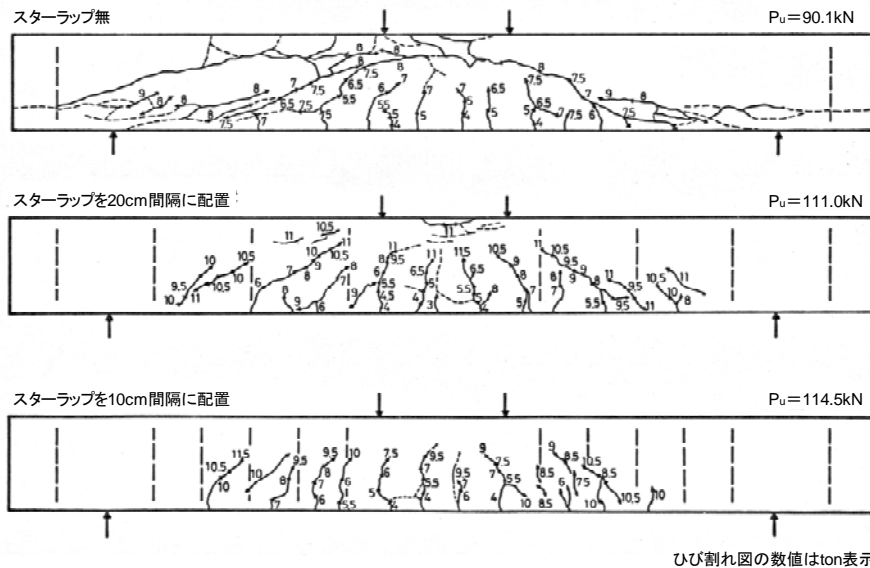


図-9 CPC 梁におけるスターラップの配置とひび割れ性状との関係 (A シリーズ)<sup>1)</sup>

せん断圧縮破壊を生じる直前のひずみの増分は  $2000 \times 10^{-6}$  となっている。せん断スパンにスターラップを配置した CPC 梁では、斜めひび割れが図-9 に示すように、スターラップを横切ることがほとんどなくて、引張鉄筋のひずみの増分が  $3000 \times 10^{-6}$  程度まで、ケミカルプレストレインの  $650 \times 10^{-6}$  を加算すると  $3650 \times 10^{-6}$  に達すると降伏して曲げ引張破壊を生じた。

D10 のスターラップの配置を 20cm 間隔のせん断補強鉄筋比で 0.71% とすると、斜めひび割れの発達を抑えて引張鉄筋の降伏を生じさせた。D10 のスターラップを 10cm 間隔に縮めて配置すると、斜めひび割れはその角度が大きくなって、SD590 クラスの引張鉄筋の降伏までスターラップを横切らないように発達した。

CPC 梁では、せん断スパンにおけるスターラップの量と配置位置が斜めひび割れの発達に大きな影響を及ぼす例を示した。このスターラップにも高強度鉄筋を用いて大きなケミカルプレストレインとケミカルプレストレスを導入することにより、斜めひび割れ発生荷重の増加とそのひび割れ幅の低減を、曲げひび割れの場合と同様に著しく期待できる可能性が認められる。

## 7. まとめ

膨張エネルギーの大きい膨張コンクリートに SD590 クラスまでの高強度鉄筋を用いたケミカルプレストレストコンクリート (CPC) 梁の実験結果を、ひび割れの発達性状と曲げひび割れ幅に及ぼす導入されたケミカルプレストレインとケミカルプレストレスの影響の観点より報告した。本研究の範囲より、次のことがいえる。

1) コンクリートに導入されたケミカルプレストレスにより曲げひび割れ発生荷重が増加するとともに、引張鉄筋に導入されたケミカルプレストレインに相当する分曲げ

ひび割れ幅は減少することが、ケミカルプレストレインを  $1000 \times 10^{-6}$  程度まで多量に導入した場合も認められた。

2) 断面形状寸法と鉄筋の配置方法が同じであれば、RC 梁と CPC 梁の曲げひび割れ幅は、引張鉄筋のひずみの増分に等しく対応し、この直線関係はせん断スパンにおけるスターラップの配置方法の影響をほとんど受けないことが明らかになった。

3) 梁に生じる斜めひび割れの発生と発達、CPC 梁では軸方向鉄筋だけでなくスターラップの量と配置位置の影響を RC 梁よりも著しく受けることが明らかになった。

4) 軸方向の引張鉄筋だけでなくスターラップについても、SD390 以上のクラスの高強度鉄筋を CPC 梁に配置して、斜めひび割れを制御できることが示唆された。

本研究の実験は、著者の一人辻が東京大学大学院に在学中に國分正胤、岡村甫両先生のご指導のもとに実施したものの一部である。当時の実験結果を、別な観点でまとめ直した。付記して、両先生に厚くお礼申し上げます。

## 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的特性, 土木学会論文報告集, 第 225 号, pp.101-108, 1974.5
- 2) 辻 幸和: コンクリートにおけるケミカルプレストレスの利用に関する基礎研究, 土木学会論文報告集, 第 235 号, pp.111-124, 1975.3
- 3) 栖原健太郎, 李春鶴, 芦田公伸, 辻幸和: 膨張コンクリートを用いた CPC はりの曲げひび割れ幅の評価, コンクリート工学年次論文集, 第 31 巻, No.2, pp.229-234, 2009.7