

[119] 曲げ・せん断およびねじりを受けるPCはりの力学的特性

正会員 田沢 栄一（広島大学工学部）

正会員 米倉 亜州夫（広島大学工学部）

正会員 ○宮沢 伸吾（広島大学工学部）

柳川 昭信（広島大学工学部）

1. まえがき

ねじりを含む組合せ応力を受ける部材についての設計上の資料は、鉄筋コンクリートについてはかなり蓄積されてきたが、プレストレストコンクリート(PC)に関してはまだ不明な点が多い。本報告は、曲げ、せん断およびねじりを受けるPCはりのひびわれ発生耐力や終局耐力などに及ぼすねじりモーメントと曲げモーメントあるいはせん断力の相互作用、PC鋼材の位置、横方向鉄筋の有無等の影響について検討するために、長方形断面の単純ばかりを対象として行なった実験的研究である。

2. 実験概要

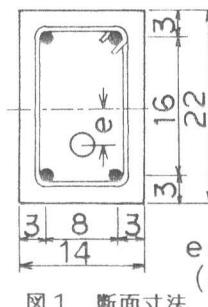
2.1 使用材料

早強ポルトランドセメント(比重3.14)、山砂(比重2.59、吸水率1.65%)、碎石(最大寸法15mm、比重2.73)および高性能減水剤を使用し、表1に示す配合でコンクリートを製造した。表2は、全供試体に使用したコンクリートの力学的性質の平均値を示したものである。スランプは約10cm、また空気量は約2.5%であった。

軸方向鉄筋には熱間圧延異形棒鋼2種SD30、D13を、腹鉄筋には熱間圧延異形棒鋼1種SR24、Φ9を用いた。PC鋼棒には呼び名23mmの丸棒C種1号(SBPR110/125)を使用した。

2.2 供試体

供試はりは図1に示すような複鉄筋長方形断面である。軸方向鉄筋比($p_d = A_s / b \cdot h$)、 A_s :全軸方向鉄筋の断面積、 b :ウェブ幅、



PC鋼材の偏心距離 cm	有効プレストレス レス(kgf/cm)	
	上縁	下縁
0 cm	108	
4 cm	7.4	15.2

表3 有効プレストレス

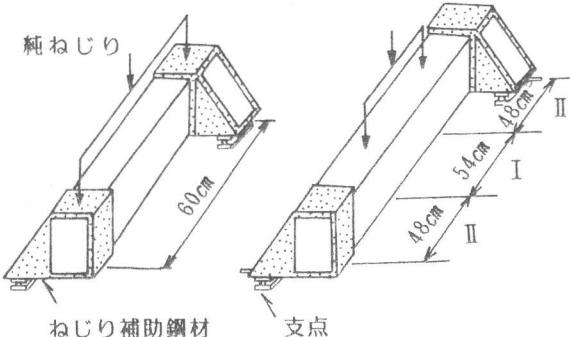


図2 載荷方法

表1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)			add. g/m³
		W	C	S	
50	45	190	380	745	960
					950

表2 コンクリートの力学的性質

圧縮強度 kgf/cm²	引張強度 kgf/cm²	曲げ強度 kgf/cm²	静弾性係数 (kgf/cm²)
452	34.8	70.6	3.20×10⁵

表4 試験結果

純ねじり	M_T (t-m)	e (cm)	p_v (%)	斜めひびわれ発生時			曲げひびわれ発生時			終局時		
				M_T	M_B	S	M_T	M_B	S	M_T	M_B	S
曲げねじり	0	0	0	1.05						1.08		
		1.3	1.00							1.36		
		4	0	0.75						0.79		
		1.3	0.75							1.17		
曲げ	0	0	0				2.16			4.54		
		1.3					2.04			5.04		
		4	0				2.52			6.31		
		1.3					2.28			6.48		
曲げねじり	0.3	0	0.68	2.28			0.50	1.68		0.78	2.63	
		1.3	0.72	2.40			0.46	1.56		1.05	3.51	
		4	0	0.61	2.04		—	—		0.75	2.51	
		1.3	0.68	2.28			0.57	1.92		1.07	3.61	
曲げ	1.2	0	0.91	0.77						0.92	0.77	
		1.3	1.03	0.86						1.31	1.10	
		4	0	0.80	0.67					0.84	0.71	
		1.3	0.80	0.67						1.23	1.03	
曲げせん断	0	0	0	3.84	8.00			4.50			(10.50)	
		1.3		4.08	8.50			5.00			(10.42)	
		4	0	4.32	9.00			6.00			13.00	
		1.3		4.32	9.00			6.00			(13.01)	
曲げねじり	0.3	0	0.64	2.16	4.50		0.68	4.75	0.71	4.95		
		1.3	0.64	2.16	4.50		0.64	4.50	(1.11)	(7.73)		
		4	0	0.61	2.04	4.25	—	—	0.61	4.25		
		1.3	0.64	2.16	4.50		0.82	5.75	1.07	7.50		
曲げねじり	1.2	0	0	0.86	0.72	1.50				0.91	1.60	
		1.3	0.91	0.77	1.60					1.27	2.23	
		4	0	0.74	0.62	1.30				0.74	1.30	
		1.3	0.80	0.67	1.40					1.08	1.90	

M_T :ねじりモーメント(t-m), M_B :曲げモーメント(t-m), S:せん断力(t), ()…曲げ破壊

h : 部材高さ) は 1.7% とし、腹鉄筋には垂直スターラップを用い腹鉄筋比 ($p_v = A_v / b \cdot s$, A_v : 併合スターラップ 2 本分の断面積, s : スターラップの配置間隔) は 0, あるいは 1.3% の 2 種類とした。また、PC 鋼材の偏心距離 e は 0, あるいは 4 cm とし、ポストテンション方式で応力導入を行なった後グラウチングを施した。有効プレストレスは表 3 に示すとおりであるが、有効率は約 95% であった。なお、せん断スパンと有効高さの比は 2.5 と一定にした。

2.3 載荷試験

図 2 に、載荷方法の概略を示す。曲げとねじりを受ける場合について検討する際は区間 II をスターラップで十分補強し区間 I で破壊させることを目標とし、ねじり補助鋼材の腕長を変化させることにより、ねじりモーメントと曲げモーメントの比率 (M_T / M_B) = 0 (純曲げ), 0.3, 1.2, ∞ (純ねじり) とした。曲げ、せん断およびねじりを受ける場合については、区間 I を補強し区間 II で破壊させることを目標とし、ねじりモーメントとせん断力の比率 ($M_T / S \cdot b$) = 0 (曲げせん断), 1.0, 4.1, ∞ とした。なお、 $M_T / S \cdot b = 1.0, 4.1$ はそれぞれ曲げモーメントの最大値を用いて $M_T / M_B = 0.3, 1.2$ と表示する。

3. 実験結果および考察

表 4 は、試験結果の一覧表である。以下、PC はりのひびわれおよび破壊特性について記す。

3.1 ひびわれ発生状況

表 5 は、初ひびわれの発生位置を示したものである。純ねじりを受ける場合、ねじりモーメントにより斜ひびわれが発生するが、初ひびわれ発生位置は PC 鋼材の偏心距離 e により異なり、 $e = 0$ cm では側面、 $e = 4$ cm では上縁であった。 $M_T / M_B = 0.3$ の場合は、 e により初ひびわれの種類に相違が認められた。 $M_T / M_B = 1.2$ で曲げとねじりを受ける場合、あるいは曲げ、せん断およびねじりを受ける場合は、いずれも側面に

表 5 初ひびわれ発生状況

M_T / M_B	e (cm)	p_v (%)	曲げ・ねじり	曲げ・せん断・ねじり
0.3	0	0	曲げひびわれ	側面に斜めひびわれ
	0	1.3		曲げひびわれと共に側面に斜めひびわれ
	4	0	側面に斜めひびわれ	側面に斜めひびわれ
1.2	0.4	0, 1.3	曲げひびわれ	側面に斜めひびわれ
∞	0	0, 1.3	側面に斜めひびわれ	側面に斜めひびわれ
	4		上縁に斜めひびわれ	

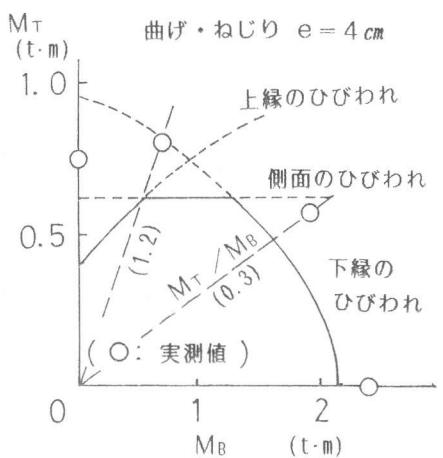


図 3 ひびわれ発生時における曲げモーメントとねじりモーメントの関係

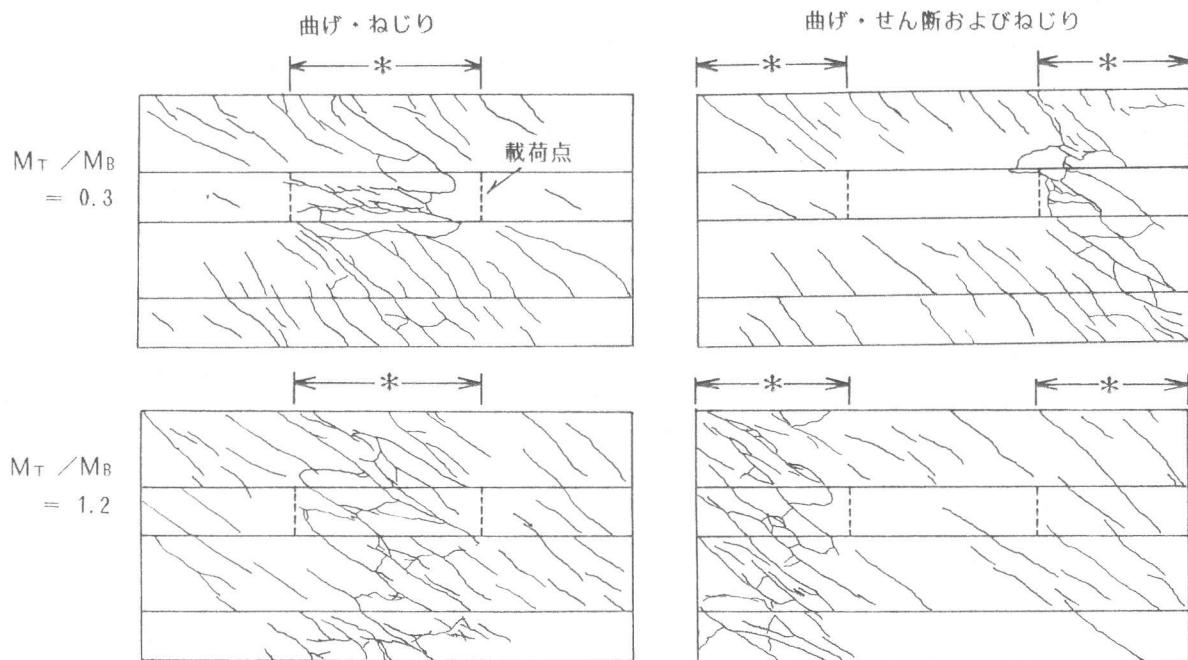


図 4 終局時におけるひびわれ性状 ($e = 4$ cm, $p_v = 1.3\%$) * : 試験区間

おける斜めひびわれが先行した。

前述のような初ひびわれの発生位置を考慮した上で、最大主応力説により求めたひびわれ発生耐力と実測値との比較を行なったものを図3に示す。図中の曲線は、

$$\sigma_{ct} = \sqrt{(1/4)(\sigma_b + \sigma_{pe})^2 + \tau_t^2} - (1/2)(\sigma_b + \sigma_{pe})$$

σ_{ct} : コンクリートの引張強度, σ_b : 曲げ応力

σ_{pe} : 有効プレストレス, τ_t : ねじりせん断応力度により求めたが、ねじりによるせん断応力度は弾性理論による値を用いたものである。図より、曲げとねじりを受ける場合のひびわれ発生位置および耐力は、以上の方針で安全側に推定できるものと考えられる。

3.2 破壊性状

スターラップのないはりでは、純ねじりあるいはねじりを含む組み合わせ応力を受ける場合、いずれも斜め曲げ型の破壊を呈した。この際、一本の斜めひびわれが二面ないし三面で連なり、側面の一方には斜めひびわれは発生せず破壊の直前にPC鋼材に沿ったひびわれが発生した。 $e = 4\text{ cm}$ のはりが純ねじりあるいは $M_T / M_B = 1.2$ で曲げとねじりを受ける場合は、鋼材に沿うひびわれが下面にも認められた。

スターラップを有するはりの場合は、両側面に数本の斜めひびわれが発生したが破壊性状は M_T / M_B により特徴づけられた。すなわち、図4に終局時におけるこれらのはりのひびわれ発生状況の一例を示すが、純ねじりおよび $M_T / M_B = 1.2$ の場合はらせん状のひびわれによる破壊を呈した。また、 $M_T / M_B = 0.3$ の場合、曲げとねじりを受ける時は曲げ破壊に類似した破壊型式、曲げ、せん断およびねじりを受ける時はせん断圧縮破壊に類似した破壊型式を示した。

3.3 斜めひびわれ発生耐力および終局耐力

図5～8は、曲げとねじり、あるいは曲げ、せん断およびねじりを受けるPCはりの斜めひびわれ発生時および終局時における曲げモーメントとねじりモーメントとの関係を示したものである。なお、断面寸法や載荷方法が同様であるRCはりの実験結果¹⁰も併記し比較検討した。ただし、コンクリートの圧縮強度は本実験における 452 kgf/cm^2 と比較するとかなり低い（RCは 200 kgf/cm^2 ）。

(1) 斜めひびわれ発生耐力

斜めひびわれ発生耐力は、いずれの場合も、スターラップの有無の影響をほとんど受けなかった。RCでは、曲げモーメントあるいはせん断力が大きくなるに伴って斜めひびわれ発生ね

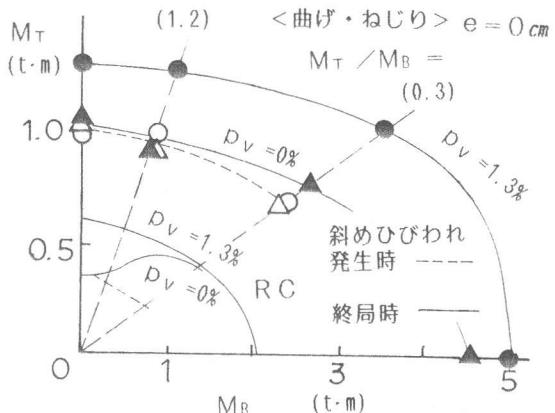


図5 曲げモーメントとねじりモーメントの関係

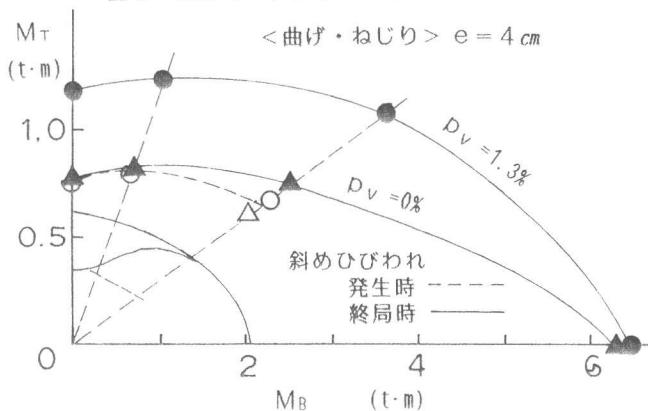


図6 曲げモーメントとねじりモーメントの関係

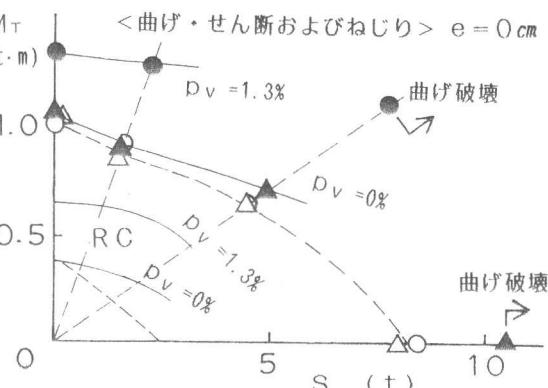


図7 せん断力とねじりモーメントの関係

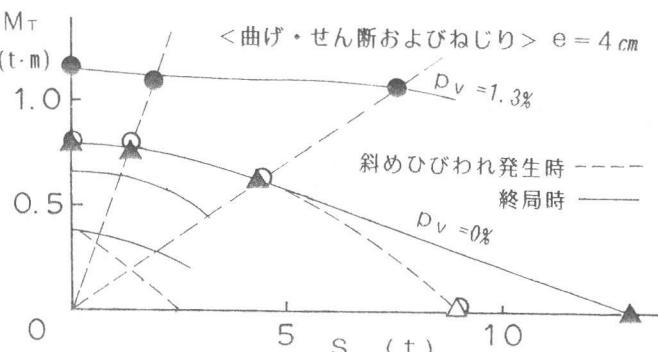


図8 せん断力とねじりモーメントの関係

じりモーメントは直線的に小さくなっている。図5, 7より、PCはりは、プレストレスの偏心距離eが0 cmの場合はRCとほぼ同様の傾向を示した。e = 4 cmの場合は、曲げとねじりを受ける場合、 $M_T / M_B = 1.2$ における斜めひびわれ発生ねじりモーメントが純ねじりの場合より若干大きくなり（図6）、また、曲げ、せん断およびねじりを受ける場合でも $M_T / M_B = 1.2$ における斜めひびわれ発生ねじりモーメントは純ねじりにおけるそれに比較して減少は認められなかった（図8）。なお、曲げ、せん断およびねじりを受ける場合の斜めひびわれ発生時における、せん断力とねじりモーメントの相互作用線を図9に示す。ここで、 M_{T0} 、 S_{10} はそれぞれ純ねじりおよび曲げせん断における斜めひびわれ発生時のねじりモーメントおよびせん断力である。

(2) 斜めひびわれ発生後の耐力増加

図5～8より、スターラップのないPCはりは、純ねじり、および $M_T / M_B = 1.2$ の場合、斜めひびわれ発生後に破壊に至った。 $M_T / M_B = 0.3$ の場合は、斜めひびわれ発生後に若干の耐力増加が認められるが、RCのそれに比べるとかなり小さくなつた。しかし、スターラップで補強すると、いずれの M_T / M_B においても斜めひびわれ発生後RCの場合と同程度の耐力増加が認められた。

(3) 終局耐力

図5, 6より、曲げとねじりをうけるPCはりの終局ねじりモーメントはe = 0 cmの場合は、曲げモーメントの増大に伴ないしだいに減少するのに対し、e = 4 cmの場合は $M_T / M_B = 1.2$ の時終局ねじりモーメントが純ねじりの場合にくらべて若干大きくなっている。したがつて、図10に示すように、ねじりが卓越する場合はe = 0 cmが、曲げが卓越する場合はe = 4 cmが有利となる。なお、曲げとねじりを受けるはりの終局時における曲げモーメントとねじりモーメントの相互作用線を図11に示す。ここで、 M_{T0} 、 M_{B0} はそれぞれ純ねじりおよび純曲げにおける終局時のねじりモーメントおよび曲げモーメントである。

PCはりにおけるねじりに対するスターラップの補強効果は、純ねじりの場合、e = 0, 4 cmともにRCと同等であった。また、図5, 6より、曲げとねじりを受ける場合、RCでは曲げモーメントの増大に伴ない補強効果が急激に減少するのに対し、PCでは、曲げモーメントが純曲げ耐力の1/2程度以下であればほとんど低下しなかつた。曲げ、せん断およびねじりを受ける場合は、図7, 8に見られる範囲では、スターラップの補強効果はRCとほぼ同様の傾向を示した。

4. まとめ

ねじりを含む組合せ応力をうけるPCはりの力学的特性は、RCの場合とは著しく異なりかつ複雑である。特に、プレストレスの位置および大きさと軸方向鉄筋量・横方向鉄筋量との兼ね合ひ、さらに、コンクリート強度や断面形の影響などについて、実験的および理論的検討を今後積み重ねていく必要がある。

参考文献 1) 船越、岡本、舟橋；曲げ・せん断およびねじりをうけるRC部材の力学的特性

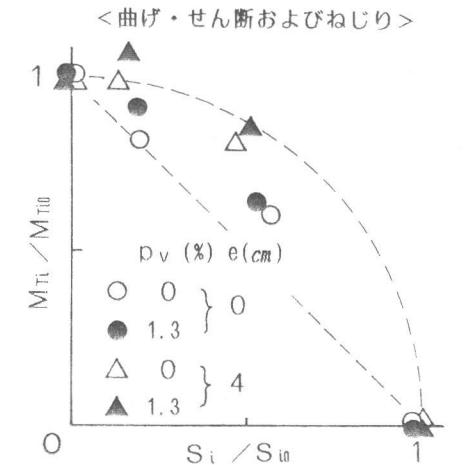


図9 斜めひびわれ発生時におけるせん断力とねじりモーメントの相互作用線

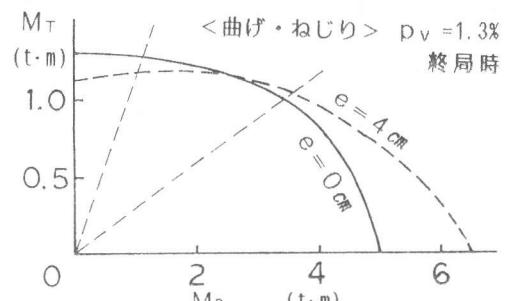


図10 曲げモーメントとねじりモーメントの関係

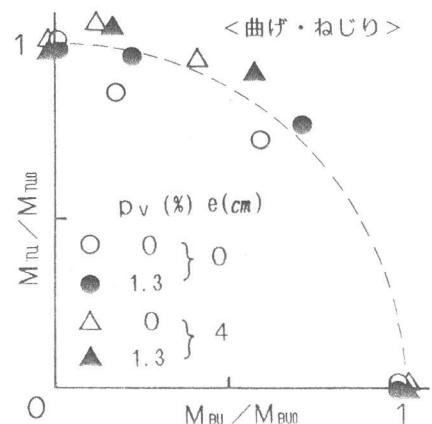


図11 終局時における曲げモーメントとねじりモーメントの相互作用線