

V-353 PRC部材の終局純ねじり耐力算定に関する研究

橋大林組 正会員 上垣義明 立命館大学理工学部 正会員 児島孝之 正会員 高木宣章

1. はじめに 土木学会「コンクリート標準示方書」(以下、示方書)では、PC部材の終局限界状態に対する検討をRC部材と同様に行うことが規定されている。しかし、プレストレスト鉄筋コンクリート(PRC)部材の終局ねじり耐力は、プレストレスの導入により増加し、示方書の終局耐力算定式による理論値はプレストレスが小さい場合に危険側を示す¹⁾。これは、終局耐力に対するPC鋼材の寄与が小さいためと考えられる²⁾。本研究では、軸方向鋼材量・横方向鉄筋量・導入プレストレス量を要因としたPRCはりの正負交番純ねじり載荷試験を行い、示方書の終局純ねじり耐力算定式のPRC部材への適用に関して検討を行った。

2. 実験概要 実験計画を表-1に示す。供試体寸法は、25×35×200及び15×24×200cmである。使用PC鋼材は、SBPR80/95(90年)及びSBPD130/145(88,89年)である。軸方向鉄筋には全てSD35を、横方向鉄筋にはSD35と高強度せん断補強筋KSS80を使用した。鋼材比 $m(p_l/p_w)$ は0.32~1.52であり、示方書の適用範囲 $(0.8 < m < 1.25)$ 以外の供試体も対象にすることにする。導入プレストレスは0~80kgf/cm²、供試体数は29である。終局プレストレス率 $(\lambda = \sum A_p \cdot f_{py} / (\sum A_p \cdot f_{py} + \sum A_s \cdot f_{sy}))$ は0.38~1.0であり、 $\lambda = 1.0$ の供試体は軸方向鋼材にPC鋼材のみを用いたものである。載荷試験時のコンクリートの圧縮強度は330~480kgf/cm²であり、ねじり載荷は全て正負交番純ねじりモーメントを変位制御により作用させた。

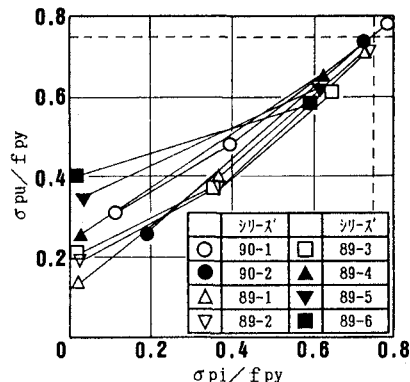
表-1 実験計画

シリーズ	断面寸法	A _m	A _{m1}	軸方向鋼材		横方向鉄筋		鋼材比 (%)				終局時のせん断流 (kgf/cm)				λ	有効プレストレス		
				鉄筋	PC鋼材	種類	間隔	p _p	p _l	p _w	m	q _s	q _p	q _l	q _w			r	
90-1	25×35	20×30	16.8×26.8	4φ13	KSS80	140	0.61	0.61	0.58	1.05	0	467	467	503	0.93	1.00	5, 20, 40		
90-2			17.6×27.6	4D13	—	D10	140	0.31	0.88	1.52	191	425	0.84	0.55					
90-3			17×27	4D16	2φ13	SD35-D13	110	0.31	1.21	1.32	0.92	293	234	527	435	1.21		0.44	
89-1	15×24	11×20	8.4×17.4	—	—	100	—	—	—	1.23	0.58	0	—	268	2.19	1.00	0.40, 80		
89-2			8.4×17.4	—	4φ9.2	SD35-D10	130	0.71	0.71	0.94	0.76	0	586	586	206			2.85	
89-3			8.6×17.6	—	—	KSS80-R8	100	—	—	0.66	1.08	0	596	596	324			1.84	
89-4			8.4×17.4	—	—	—	100	—	—	1.23	0.36	0	—	—	268			1.43	
89-5			8.4×17.4	—	—	4φ7.4	SD35-D10	130	0.44	0.44	0.94	0.47	0	382	382			206	1.85
89-6			8.8×17.8	—	—	—	130	—	—	0.42	1.06	0	387	387	187			2.06	
88-1	15×24	11×20	8.4×17.4	—	4φ7.4	90	0.44	0.44	1.36	0.32	0	382	382	301	1.27	1.00	0, 45, 70		
88-2			8.4×17.4	—	4φ9.2	SD35-D10	65	0.71	0.71	1.89	0.38	0	586	586	416			1.41	
88-3			8.7×17.7	4D13	2φ7.4	—	65	0.22	1.69	1.89	1.03	308	191	499	416			1.20	0.38

A_m=b₀·d₀, b₀, d₀:横方向鉄筋の短辺と長辺の長さ, A_{m1}=b₀'·d₀', b₀', d₀':軸方向鋼材の中心間距離, u=2(b₀+d₀)
 p_p=ΣA_p/(b·d), p_l=ΣA_l/(b·d), p_w=A_w·u/(b·d·s), A_p, A_l, A_w:PC鋼材、軸方向鉄筋、横方向鉄筋の断面積
 m=p_l/p_w, q_s=ΣA_s·f_{sy}/u, q_p=ΣA_p·f_{py}/u, A_s:軸方向鉄筋の断面積, f_{sy}, f_{py}:軸方向鉄筋、PC鋼材の降伏点応力度
 q_l=q_s+q_p, q_w=A_w·f_{wy}/s, r=q_l/q_w, s:横方向鉄筋の間隔, f_{wy}:横方向鉄筋の降伏点応力度, λ:終局プレストレス率

3. 実験結果及び考察 図-1に90-1・2と89-1~6シリーズにおけるPC鋼材降伏点応力度 f_{py} に対する終局状態(最大ねじりモーメント時)のPC鋼材応力度 σ_{pu} 及びPC鋼材有効引張応力度 σ_{pi} の比の関係を示す。PC鋼材の使用状態の許容応力度比 $(\sigma_{pi}/f_{py} = 0.75)$ 付近で両者の比はほぼ同じであるが、 σ_{pi}/f_{py} が0.4より小さくなると σ_{pu}/f_{py} は幾分増加するものの、降伏点応力度 f_{py} まで達しているものはない。したがって、終局耐力算定式に降伏点応力度を用いれば、終局耐力が過大に算定されることになる。

示方書の設計ねじり耐力式 $(M_{tyd} = 2A_m \sqrt{q_w \cdot q_l})$ 、記号の詳細は表-1を参照)中の q_l は、 $q_l = \sum A_l \cdot f_{ly} / u$ により求められるが、PRC部材では軸方向鉄筋とPC鋼材の和として $q_l = (\sum A_p \cdot f_{py} + \sum A_s \cdot f_{sy}) / u$ となる。 q_l には図-1で指摘したようにPC鋼材応力度 σ_{pu} を用いることにする。また、載荷実験によって、軸方向鉄筋とPC鋼材を併用した場合には最大ねじりモーメント時に、軸方向鉄筋の降伏が観測されていない(最大で f_{py} の約75%)ことから f_{sy} には $0.8 f_{sy}$ を採用することにより、



qlは次式となる。

$$ql' = \{ \sum Ap \cdot \sigma_{pu} + \sum As \cdot (0.8 f_{sy}) \} / u \quad (1)$$

ここで、 σ_{pu} の算定方法が問題となるが、本研究では図-1に示した関係を一次関数 ($\sigma_{pu} / f_{py} = \alpha \cdot \sigma_{pi} / f_{py} + \beta$) で表すことができると仮定した。まず、傾き α に影響を及ぼす主な要因としてPC鋼材比 $pp (= \sum Ap / (bd))$ 、 $r (= ql / qw)$ 、終局プレストレス率 λ を選定した。実験結果より、 pp が大きく、 λ が小さいほど傾き α は大きいという傾向があらわれているので、各要因を乗除して $pp \cdot r / \lambda$ を α の基本式とした。そして、 pp の影響がそれ程大きくないと考えてその平方根を採用し、実験結果との比較によって安全係数を1.5に設定することにより、 $\alpha = \sqrt{pp} \cdot r / (1.5 \lambda)$ ($0.8 \leq r \leq 1.25$, $\alpha \leq 1$)と定義する。次に、図-1で $\sigma_{pi} = 0.75 f_{py}$ の場合に $\sigma_{pu} = 0.75 f_{py}$ と仮定し、一次関数に代入することにより $\beta = 0.75 \cdot (1 - \alpha)$ 。したがって、 σ_{pu} の算定式は、次式となる。

$$\sigma_{pu} = \alpha \cdot \sigma_{pi} + 0.75(1 - \alpha) f_{py} \quad (2)$$

また、ねじり有効断面積は、横方向鉄筋の中心線で囲まれた面積より軸方向鋼材の中心を結んだ線で囲まれた面積とする方が安全側となる¹⁾ので、設計ねじり耐力式の A_m には軸方向鋼材中心の A_{ml} を採用する。PRC部材の設計ねじり耐力 M_{tyd}' は次式となる。

$$M_{tyd}' = 2 A_{ml} \sqrt{q_w \cdot ql'} \quad (3)$$

PRC部材の終局ねじり耐力の実験値と式(3)により得られた理論値を表-3に示す。なお、表中の供試体名の最後の数字は導入プレストレスを表す。RC部材における斜め圧縮破壊耐力に相当するものとして、 $\beta_{nt} \cdot M_{tcud} (\beta_{nt} = \sqrt{1 + \sigma_{pe} / (1.5 ft)})$ 、 $M_{tcud} = 4 \sqrt{f_c \cdot Kt}$ 、 σ_{pe} : 有効プレストレス、 f_c , ft : コンクリートの圧縮及び引張強度、 Kt : ねじり係数を求めたが、全て M_{tyd}' より大きな値となった。また、図-2に実験値とRC部材と同様に求めた理論値及び M_{tyd}' により求めた理論値の関係を示す。 M_{tyd}' による理論値は、全体的に安全側を示しているが、式(2)中の α の整合性及び軸方向鉄筋の割合が多く、導入プレストレスが大きい場合の理論値が、危険側を示すことなどの課題が残されている。

参考文献 1) 児島他: PRC部材の終局純ねじり耐力に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、1990
2) 児島他: 純ねじりを受ける大断面PRC部材の終局耐力に関する研究、土木学会関西支部年次講演概要、1991

表-2 終局ねじり耐力の実験値と理論値 (tf・cm)

供試体	λ	r	α	σ_{pu}	qp'	qs'	ql'	r'	実験値	JSCC Mtyd'
90-1-5	1.00	0.93	0.4842	3851	234.4	0	234.4	0.47	279.1	236.0 (1.18)
90-1-20				5081	309.3	0	309.3	0.62	373.2	311.4 (1.20)
90-1-40				6765	411.8	0	411.8	0.82	455.4	409.8 (1.11)
90-2-5	0.55	0.84	0.5623	3615	112.0	169.3	281.3	0.56	332.7	305.5 (1.09)
90-2-20				6467	189.9	0	359.2	0.71	359.4	390.2 (0.92)
90-3-5	0.44	1.21	1.0000	1714	51.7	266.2	317.9	0.73	351.3	326.3 (1.08)
90-3-20				6330	190.9	0	457.1	1.05	417.0	409.3 (1.02)
89-1-0	1.00	2.19	0.7022	3483	172.8	0	172.8	0.85	62.5	56.5 (1.11)
89-1-40				7107	352.6	0	352.6	1.32	111.3	89.8 (1.24)
89-1-80				10850	538.3	0	538.3	2.01	137.5	112.0 (1.23)
89-2-0	1.00	1.84	0.7022	3532	175.2	0	175.2	0.85	65.0	55.5 (1.17)
89-2-40				7107	352.6	0	352.6	1.72	116.3	78.8 (1.48)
89-2-80				10869	544.2	0	544.2	2.64	142.5	97.9 (1.46)
89-3-0	1.00	1.43	0.5528	3479	170.0	0	170.0	0.52	63.8	57.5 (1.11)
89-3-40				7053	344.6	0	344.6	1.06	102.5	101.2 (1.01)
89-3-80				10154	496.1	0	496.1	1.53	127.5	121.4 (1.05)
89-4-0	1.00	2.06	0.5528	4937	153.1	0	153.1	0.57	58.0	50.0 (1.16)
89-4-40				9663	299.6	0	299.6	1.12	115.0	82.8 (1.39)
89-5-0				4987	154.6	0	154.6	0.75	58.8	50.5 (1.16)
89-5-40	1.00	1.27	0.5528	9601	297.7	0	297.7	1.45	107.5	72.4 (1.48)
89-6-0				4979	149.7	0	149.7	0.80	62.5	52.4 (1.19)
89-6-40	9544	287.0	0	287.0	1.53	112.5	72.6 (1.55)			
88-1-0	1.00	1.41	0.7022	4763	147.7	0	147.7	0.49	70.0	48.3 (1.45)
88-1-45				10360	321.2	0	321.2	1.07	107.5	90.8 (1.18)
88-2-0	1.00	0.38	1.20	3306	164.0	0	164.0	0.39	73.5	53.6 (1.37)
88-2-35				6762	335.5	0	335.5	0.81	117.5	109.2 (1.08)
88-2-70				10218	506.9	0	506.9	1.22	144.0	134.3 (1.07)
88-3-0	1.00	1.20	0.9875	133	2.0	289.7	291.7	0.70	94.5	100.4 (0.94)
88-3-20				9021	136.7	0	426.4	1.02	105.0	129.7 (0.81)

σ_{pu} : 終局状態のPC鋼材応力度(kgf/cm²) = $\alpha \cdot \sigma_{pi} + 0.75(1 - \alpha) f_{py}$, $\alpha = \sqrt{pp} \cdot r / (1.5 \lambda) \leq 1$
 pp : PC鋼材比(%), σ_{pi} : PC鋼材有効引張応力度, $qp' = \sum Ap \cdot \sigma_{pu} / u'$, $u' = 2(b'o' + do')$
 $qs' = \sum As \cdot (0.8 f_{sy}) / u'$, $ql' = qp' + qs'$, $r' = ql' / qw$, (): 実験値/理論値

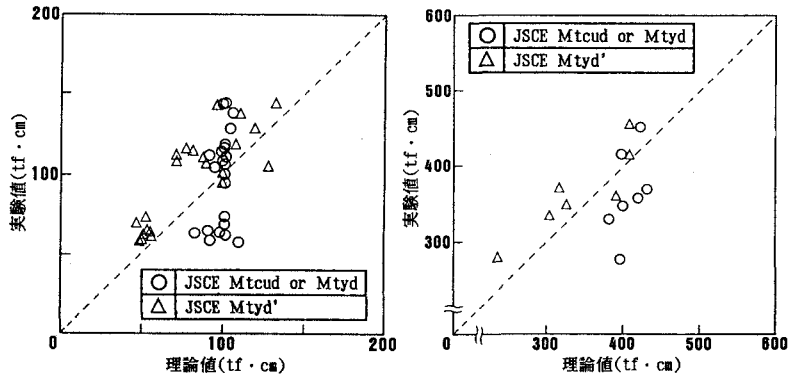


図-2 実験値と理論値の関係

図-2に実験値とRC部材と同様に求めた理論値及び M_{tyd}' により求めた理論値の関係を示す。 M_{tyd}' による理論値は、全体的に安全側を示しているが、式(2)中の α の整合性及び軸方向鉄筋の割合が多く、導入プレストレスが大きい場合の理論値が、危険側を示すことなどの課題が残されている。