

論文

[2122] 大断面を有するPRC部材の終局純ねじり耐力に関する研究

正会員 児島孝之 (立命館大学土木工学科)

正会員 高木宣章 (立命館大学土木工学科)

正会員○上垣義明 (大林組)

1. はじめに

土木学会「コンクリート標準示方書」では、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を鋼材の降伏が先行する場合には、終局限界状態でプレストレスが消失するとして鉄筋コンクリート部材同様に求めてよいことが規定されている。しかし、PRC部材の終局ねじり耐力は導入プレストレス量に依存すること、しかも本示方書のねじり耐力式における終局時の軸方向鋼材と横方向鉄筋のせん断流 q_1 と q_w がほぼ等しいねじり型配筋になっていても、軸方向鋼材と横方向鉄筋の鉄筋比の比つまり剛性の差により、実験値が理論値より非常に小さくなることなどが指摘されている[1][2]。更に部材断面積が小さい時には、ねじり有効断面積が純ねじり耐力に及ぼす影響が大きいことも指摘されている。

本研究では、土木学会「コンクリート標準示方書」のねじり耐力式における終局時の軸方向鋼材と横方向鉄筋のせん断流 q_1 と q_w がほぼ等しく、両者の鋼材比もほぼ等しい大断面を有するPRC部材の純ねじり試験を、軸方向鋼材量、横方向鉄筋量と導入プレストレス量を要因として行ない、終局ねじり耐力、変形性能などに及ぼすプレストレスの効果について検討を行なった。

2. 実験概要

終局時の軸方向鋼材と横方向鉄筋のせん断流 q_1 と q_w の比を $0.8 \leq q_1/q_w \leq 1.25$ にし、鋼材比(p_1/p_w)をほぼ1にするため、4タイプのはりを作製した。実験計画を表-1に示す。タイプR1は、PC鋼棒を4本配置し高強度せん断補強筋を使用したPRCはりで、軸方向鋼材と横方向鉄筋の鋼材比はともに約0.6%である。タイプR2は、RCはり(軸方向鉄筋:4D13, 高強度せん断補強筋)の上下にPC鋼棒を配置したPRCはり。タイプR3はRCはり(軸方向鉄筋:4D16, スターラップ:SD35)の上下にPC鋼棒を配置し、軸方向鋼材と横方向鉄筋の鋼材比をタイプR1の約2倍にしたPRCはり。タイプR4は、軸方向鋼材と横方向鉄筋の鋼材比をタイプR1の

表-1 実験計画

タイプ	軸方向鋼材		横方向鉄筋		鋼材比(%)			終局時のせん断流(kgf/cm)					λ	σ_{pe} (kgf/cm ²)	
	鉄筋	PC鋼棒	規格	種類	s	p_1	p_w	p_1/p_w	q_{1s}	q_{1p}	q_1	q_w			q_1/q_w
R1	----	4φ13	KSS80	D10	14	0.61	0.58	1.05	----	467.1	467.1	502.9	0.93	1.00	5,20,40
R2	4D13	2φ13	KSS80	D10	14	0.88	0.58	1.52	191.3	233.6	424.9	502.9	0.84	0.55	5,20
R3	4D16	2φ13	SD35	D13	11	1.21	1.32	0.92	292.8	233.6	526.4	434.8	1.21	0.44	5,20
R4	4D19	----	SD35	D13	11	1.31	1.32	0.99	452.8	----	452.8	434.8	1.04	0	----

$p_1 = \sum A_{t1} / (b \cdot d)$ $p_w = A_{tw} \cdot u / (b \cdot d \cdot s)$ $u = 2(b_0 + d_0)$ s : 横方向鉄筋の軸方向間隔(cm)
 $q_{1s} = \sum A_{t1} \cdot f_{1d} / u$ $q_w = A_{tw} \cdot f_{wd} / s$ q_{1s}, q_{1p} : 軸方向鉄筋とPC鋼棒のせん断流
 b_0, d_0 : 横方向鉄筋の短辺長さおよび長辺長さ σ_{pe} : 有効プレストレス (kgf/cm²)
 λ : 終局プレストレス率 $\lambda = \sum A_p \cdot f_{pyd} / \sum A_{t1} \cdot f_{1d}$ A_p, f_{pyd} : PC鋼材の断面積と降伏強度

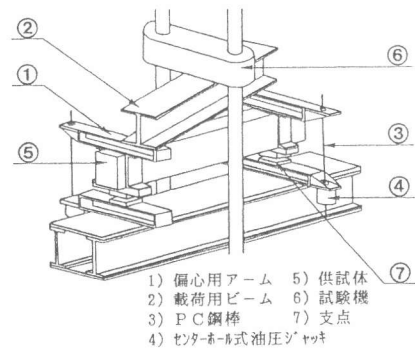
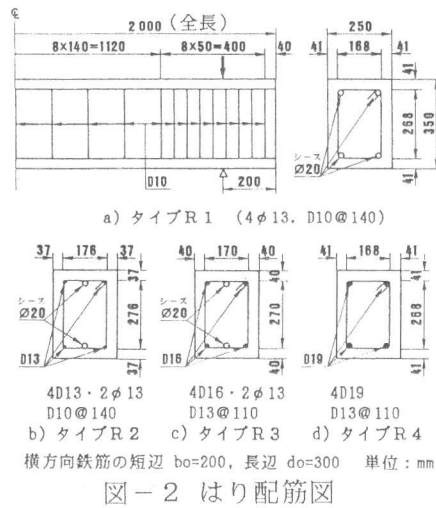
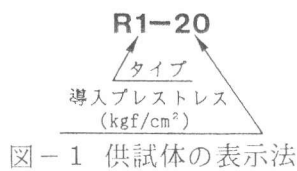


表-2 使用鋼材の機械的性質

規格	種類	降伏強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)
SD35	D13	3775	5754
SD35	D16	3686	5821
SD35	D19	3951	6216
KSS80	D10	9870	10520
SBPR80/95	φ13	8800	9700

表-3 ねじり回転角

供試体	θ_{cr}	θ_u	θ_{max}
R1-5	20.9	156.5	536.6
R1-20	31.0	38.3	615.1
R1-40	44.7	-14.5	489.8
R2-5	22.8	25.1	619.7
R2-20	30.0	30.0	542.3
R3-5	29.1	274.5	655.0
R3-20	34.0	330.9	645.2
R4	14.6	259.0	697.7

θ_{cr} : ねじりひびわれ発生時のねじり回転角
 θ_u : 最大ねじりモーメント時のねじり回転角
 θ_{max} : 最大ねじり回転角
 単位: 10^{-6} rad/cm

約2倍にしたRCはり。各はりの終局ねじり耐力は、土木学会「コンクリート標準示方書」の鋼材降伏時の終局ねじり耐力がほぼ同じになるように設計した。

導入プレストレス量は、5、20、40kgf/cm²の3水準とした。各タイプの供試体とも正負交番純ねじり載荷試験を行なった。

供試体の表示法を図-1に、はりの配筋図を図-2に示す。軸方向鉄筋にはD13、D16、D19(ともにSD35)を、横方向鉄筋にD13(SD35)と高強せん断補強筋D10(KSS80)を、PC鋼棒にφ13(SBPR80/95)を使用した。使用鋼材の機械的性質を表-2に示す。はり寸法は、全て25x35x200cm。

ねじり載荷装置を図-3に示す。ねじり載荷は、はりの両支点部に取り付けた偏心載荷用アームを直接載荷することにより行なった。試験スパンは160cm、偏心距離は20cmである。正負交番ねじり載荷は、荷重増分を処女載荷時には0.5あるいは1tf、経験荷重時には2あるいは3tfとし、ねじり回転角による変位制御により行なった。1ループ目は、 $8x10^{-6}$ rad/cmの回転角まで載荷し、その後除荷し負のねじり載荷を同じ回転角まで行なった。その後、16、32、64x 10^{-6} rad/cm毎に各一回づつループさせ、はりを破壊させた。大変形時においても正確なねじり回転角を測定するために、はりに埋め込んだ変位測定用アングルから変位計により変位を測定し、単位長さあたりのねじり回転角を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 ねじり変形

ねじりひびわれ発生時、最大ねじりモーメント時のねじり回転角および最大ねじり回転角を表-3に示す。ねじりモーメントとねじり回転角の関係の一例を図-4に示す。最初に発見されたねじりひびわれは、全て正方向載荷時に発生した。PRCはりのねじりひびわれ発生時のねじり回転角は、導入プレストレスに伴い増加し、タイプR4(RC)はりよりかなり大きい値を示した。しかし、プレストレスの増加に伴い、ひびわれ発生から終局耐力時までのねじり回転角の増加が少ない。タイプR3はりの最大ねじりモーメント時のねじり回転角が大きいのは、タイプR1とR2はりの約2倍の鋼材を使用していること、および軸方向鋼材に占めるPC鋼棒の割合が少ないために、RCはりに近い挙動を示すためと考えられる。

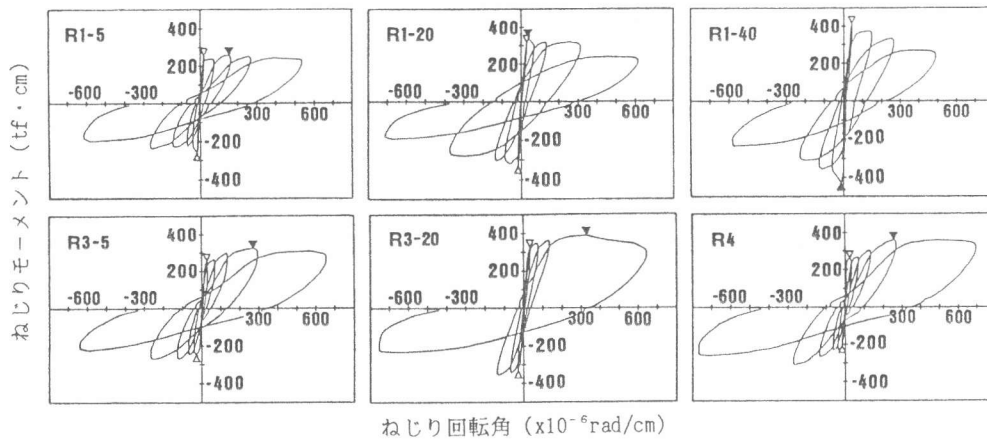


図-4 ねじりモーメントとねじり回転角の関係
注：▽はねじりひびわれ発生時，▼は最大ねじりモーメント時

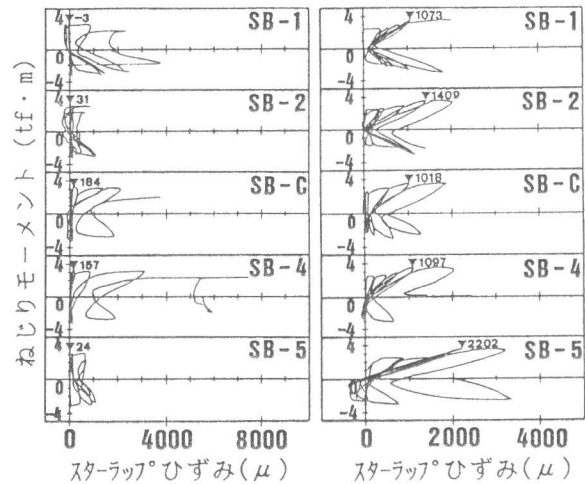
3.2 鋼材のひずみ

(1) スターラップひずみ

ねじりモーメントとスターラップひずみの関係の一例を図-5に示す。高強度せん断補強鉄筋(KSS80、D10)とSD35(D13)の降伏ひずみは、各々7050、1798 μ である。高強度せん断補強鉄筋を使用したタイプR1とR2はりでは、最大ねじりモーメント時のスターラップひずみは一例を除き非常に小さく降伏していないが、最終ループまでにほとんどのはりで少なくとも1本のスターラップが降伏しているのが観察された。SD35のせん断補強鉄筋を使用したタイプR3とR4はりでは、最大ねじりモーメント時に数本のスターラップが降伏し、最終ループまでにほとんどのスターラップが降伏しており、ねじりに対してスターラップが効果的に抵抗している。高強度せん断補強鉄筋は普通鉄筋に比較してひずみの増加が少ないために、ねじりに対して必ずしも効果的に抵抗していないと考えられる。

(2) 軸方向鋼材ひずみ

ねじりモーメントと軸方向鋼材ひずみの関係の一例を図-6に示す。P C鋼棒と軸方向鉄筋の降伏ひずみは、各々6300($\phi 13$)、1798 μ (D13)、1881 μ (D19)である。プレストレス導入時にP C鋼棒のひずみに幾分の変動があり、更には測定不能になったゲージがあるものの、最大ねじりモーメント時にP C鋼棒の降伏は観察されなかった。タイプR1はりでは、プレストレス導入時のP C鋼棒の緊張ひずみが小さいタイプR1-5はりを除くと、プレストレス導入時のP C鋼棒ひずみ近傍で最大ねじりモーメントに達した。タイプR2はりでは、タイプR1はりと同様の傾向であったが、最大ねじりモーメント直後に変位制御が困難になりP C鋼棒と軸方向鉄筋のひずみに急激な増加が見られた。しかし、最大ねじりモーメント時の軸方向鉄筋のひずみが非常に小さい。最終ループまでP C鋼棒は降伏しないが、数本の軸方向鉄筋の降伏が確認された。タイプR3はりでは、最大ねじりモーメント時の軸方向鉄筋のひずみがタイプR2はりより大きい、挙動はR



a) タイプR1-20 b) タイプR4
図-5 ねじりモーメントとスターラップひずみの関係
注：▼は最大ねじりモーメント時のひずみ
図中の記号はスターラップ番号

2はりと同じであった。タイプR4(RC)はりでは、正方向と負方向のねじりモーメントに対して軸方向鉄筋が同等に抵抗し、最大ねじりモーメント時に1本の鉄筋が降伏し、その後の繰返し載荷で残りの鉄筋が最終ループまでに降伏した。一般に、PC鋼棒はプレストレス導入時のひずみあたりまでしかねじりに対して抵抗していない。

3.3 ひびわれ発生ねじりモーメント

ひびわれ発生ねじりモーメントの増加率とプレストレス係数の関係を図-7に示す。ひびわれ発生ねじりモーメントを表-4に示す。ひびわれ発生ねじりモーメントの増加率はプレストレス係数にほぼ等しいものの、導入プレストレスが小さいとプレストレス係数より小さく、導入プレストレスが大きいとプレストレス係数より大きい傾向にある。Hsu式[3]はコンクリートの曲げ強度を使用することにより塑性効果を考慮しているものの、はり断面の縦横比の影響を考慮していない。児島式[4]は、コンクリートの応力~ひずみ曲線をbilinear型に仮定して、終局ひずみを引張強度と曲げ強度の関数で表示し、はり断面の縦横比の影響を考慮している。そのため、Hsu式は全体的に危険側を、児島式は安全側の良好な値を示した。

3.4 終局ねじり耐力

終局ねじり耐力を表-5に示す。終局ねじり耐力と有効プレストレスの関係を図-8に、終局ねじり耐力の増加率とプレストレス係数の関係を図-9に示す。終局ねじり耐力は、プレストレス係数にほぼ比例して増加する。各はりとも土木学会「コンクリート標準示方書」の鋼材降伏時の終局ねじり耐力がほぼ等しくなるように設計されている。しかし、導入プレストレスが 20kgf/cm^2 (プレストレス係数 $1.26\sim 1.27$)より小さいPRCはりの終局ねじり耐力は、プレストレスを導入していないタイプR4はりより小さい。しかも終局時の軸方向鋼材のせん断流にPC鋼棒が占める割合が少ないほど、終局ねじり耐力が大きくなる傾向にあった。タイプR4はりと同等の終局ねじり耐力を得るためには、プレストレスを $20\sim 25\text{kgf/cm}^2$ 導入することが必要であった。

終局ねじり耐力時に高強度せん断補強鉄筋とPC鋼棒は降伏しておらず、非常に小さい値を示

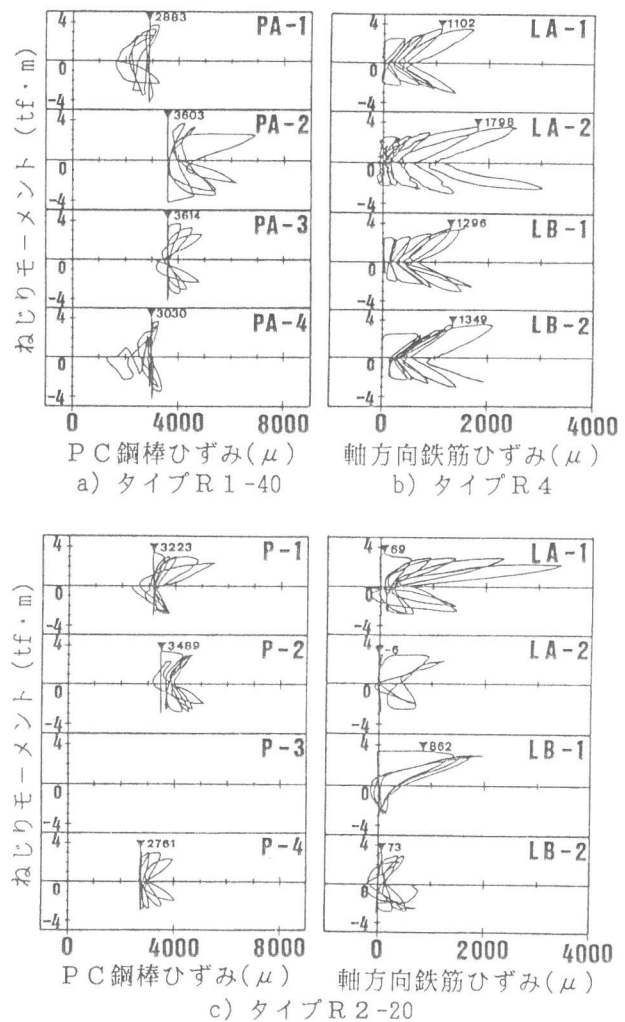


図-6 ねじりモーメントと軸方向鋼材ひずみの関係
注：▼は最大ねじりモーメント時のひずみ
図中の記号は軸方向鋼材番号

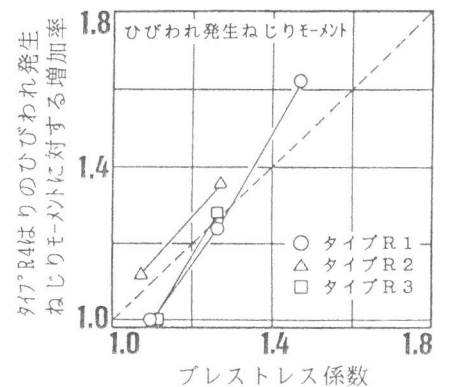


図-7 ひびわれ発生ねじりモーメントの増加率とプレストレス係数の関係

表-4 ひびわれ発生ねじりモーメント

供試体	σ_{pe}	コンクリート強度			γ	実験値(tf・cm)		理論値(tf・cm)	
		f'_c	f_t	f_b		正方向	負方向	Hsu式[3]	児島式[4]
R1-5	5.6	397	28	53	1.10	263.5 [1.00]	-276.5	361.3 (0.73)	226.2 (1.16)
R1-20	21.0	476	36	49	1.26	326.7 [1.24]	-352.5	382.7 (0.85)	279.6 (1.17)
R1-40	42.1	457	36	63	1.47	426.8 [1.62]	-455.4	574.0 (0.74)	374.2 (1.14)
R2-5	5.0	373	34	68	1.07	295.2 [1.12]	-260.2	451.0 (0.65)	273.8 (1.08)
R2-20	19.3	449	32	71	1.27	359.4 [1.36]	-281.9	558.9 (0.64)	318.7 (1.13)
R3-5	5.2	408	26	46	1.10	263.5 [1.00]	-260.2	313.6 (0.84)	203.4 (1.30)
R3-20	19.2	404	33	46	1.26	337.3 [1.28]	-352.5	359.2 (0.94)	259.9 (1.30)
R4	----	483	26	49	----	263.5 [1.00]	-216.9	303.7 (0.87)	190.6 (1.38)

σ_{pe} : 有効プレストレス (kgf/cm²)
 f'_c, f_t, f_b : 載荷試験時のコンクリートの圧縮強度, 引張強度, 曲げ強度
 γ : プレストレス係数 $\gamma = \sqrt{1 + (\sigma_{pe}/f_t)}$
 []: タイプR4に対する増加率
 (): 安全率=実験値(正方向)/理論値

表-5 終局ねじり耐力

供試体	γ	実験値 (tf・cm)	理論値 (tf・cm)			
			土木学会式		Hsu式 [3]	児島式 [4] ($\lambda=0.6$)
			$M_{t,cd}$	$M_{t,yd}$		
R1-5	1.10	279.1 [1.00]	397.5	581.6 (0.48)	458.5 (0.61)	373.9 (0.75)
R1-20	1.26	373.2 [1.34]	435.3	581.6 (0.64)	508.5 (0.73)	413.5 (0.90)
R1-40	1.47	455.4 [1.63]	426.5	581.6 (0.78)	556.4 (0.82)	463.0 (0.98)
R2-5	1.07	332.7 [1.00]	385.3	554.7 (0.60)	449.8 (0.74)	359.5 (0.93)
R2-20	1.27	359.4 [1.08]	422.7	554.7 (0.65)	505.7 (0.71)	385.2 (0.93)
R3-5	1.10	351.3 [1.00]	403.0	574.1 (0.61)	412.8 (0.85)	378.3 (0.93)
R3-20	1.26	417.0 [1.19]	401.0	574.1 (0.73)	448.6 (0.93)	435.5 (0.96)
R4	----	391.8	438.4	532.5 (0.74)	399.3 (0.98)	344.9 (1.14)

γ : プレストレス係数 λ : 抵抗係数
 []: 導入プレストレス 5kgf/cm²のほりに対する増加率
 (): 安全率=(実験値)/(理論値)

した。特に、P C鋼棒はプレストレス導入時のひずみ近傍で終局ねじり耐力に達する。P C鋼棒は導入ひずみ近傍まではねじりに対して抵抗するが、その後の荷重繰返しに伴うひずみ増加は変形に対して抵抗するのみでねじり耐力に対しては寄与しない。そのために、導入プレストレスが少ないP R Cはりの終局ねじり耐力の理論値は、常に危険側となる。

終局ねじり耐力の実験値と理論値の関係を図-10に示す。土木学会式はプレストレスの効果を考慮していないので、Hsu式と児島式に比較してかなり危険側の値を示す。多くのほりで終局ねじり耐力の実験値が腹部コンクリートの斜め圧縮耐力($M_{t,cd}$)より下回ったが、腹部コンクリートが斜め圧縮破壊したほりは観察されなかった。斜め曲げ理論によるHsu式[3]と立体トラス理論による児島式[4]は、ともに終局ねじり耐力をコンクリートと鋼材の和として求めることが一致している。しかし、終局ねじり耐力へのコンクリートの寄与分をHsu式は全断面に対して、児島式は内部コアに対して求めている。鋼材の寄与分を、Hsu式は横方向鉄筋に対して、児島式は横方向鉄筋と軸方向鋼材による耐力の小さい方を採用している。またプレストレスの効果も、Hsu式はコンクリートによるねじり耐力のみに加算しているのに対して、児島式はコンクリートばかりでなく鋼材にもその効果を考

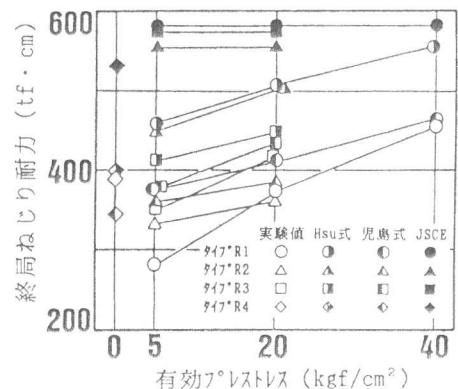


図-8 終局ねじり耐力と有効プレストレスの関係 (児島式は $\lambda=0.6$ の時)

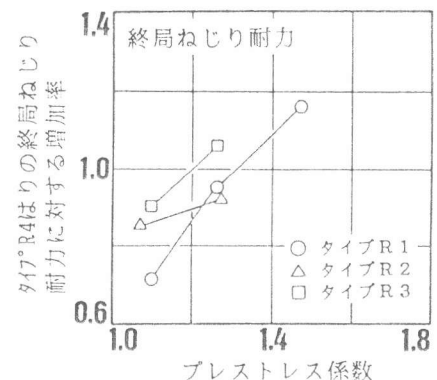


図-9 終局ねじり耐力の増加率とプレストレス係数の関係

慮している。しかし、児島式は鋼材によるだぼ作用を抵抗係数(λ)により考慮しているために、この係数の設定が終局ねじり耐力に大きな影響を及ぼす。抵抗係数が終局ねじり耐力に及ぼす影響を表-6に示す。R Cはりでは抵抗係数を0.6、P R Cはりでは0.5ぐらいにすると、実験値と理論値がよく一致する。

本実験で使用したはり断面は比較的大きいので終局ねじり耐力へのねじり有効断面積の影響は少ないものの、ねじり有効断面積を横方向鉄筋中心で求めた終局ねじり耐力は、軸方向鋼材中心で求めた場合より約15~20%大きい理論値を示した。

4. 結論

本研究で得られた結論は次のとおりである。

- (1) 土木学会「コンクリート標準示方書」のねじり耐力式における終局時の軸方向鋼材と横方向鉄筋のせん断流 q_1 と q_w がほぼ等しく、両者の鋼材比もほぼ等しい比較的大断面を有するP R C部材であっても、導入プレストレスの増加に伴い終局ねじり耐力は増加する。
- (2) P C鋼棒は、プレストレス導入時の緊張ひずみ近傍で終局ねじり耐力に達する。P C鋼棒は導入した緊張ひずみ近傍までねじりに抵抗するが、その後の荷重繰返しに伴うP C鋼棒ひずみの増加は変形に対して抵抗するのみで、耐力に対しては寄与しない。そのため、導入プレストレスの少ないP R C部材の終局耐力の理論値は、危険側になる。
- (3) 高強度せん断補強鉄筋は、最大ねじりモーメント時に非常に小さいひずみしか生じず、降伏していない。最終ループまでに数本の高強度せん断補強鉄筋が降伏するものの、全般的にひずみの増加が少なく、ねじりに対して必ずしも効果的に抵抗していない。

本研究は、平成2年度文部省科学研究費補助金により実施されたことを付記し、深謝致します。

参考文献

- [1] 児島孝之・高木宣章・池田光伸・上垣義明：純ねじりを受けるP R C部材の終局耐力に関する一実験、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.11、No.2、pp.363-368、1989.6
- [2] 児島孝之・高木宣章・上垣義明：P R C部材の終局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、Vol.12、No.2、pp.191-196、1990.6
- [3] Hsu：Torsion of Reinforced Concrete、Van Nostrand Reinhold Co.、pp.171-194、1984
- [4] 岡田清編：最新コンクリート工学、国民科学社、PP.100-106、1986

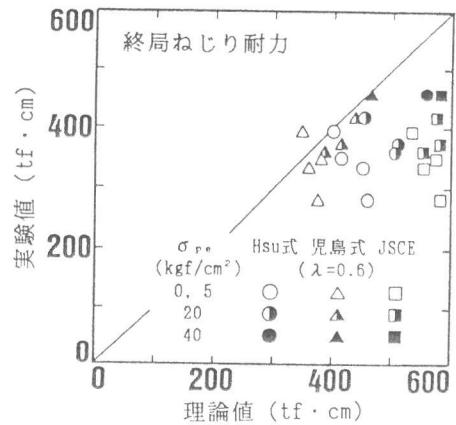


図-10 終局ねじり耐力の実験値と理論値の関係

表-6 抵抗係数が終局ねじり耐力に及ぼす影響

供試体	実験値 (tf·cm)	終局ねじり耐力 (tf·cm)			
		$\lambda=0.8$	$\lambda=0.6$	$\lambda=0.5$	$\lambda=0.4$
R1-5	279.1	475.9 L (0.59)	373.9 L (0.75)	323.0 L (0.86)	272.0 L (1.03)
R1-20	373.2	502.5 L (0.74)	413.5 L (0.90)	369.0 L (1.01)	324.5 L (1.15)
R1-40	455.4	539.2 L (0.84)	463.0 L (0.98)	424.9 L (1.07)	386.7 L (1.18)
R2-5	332.7	454.8 L (0.73)	359.5 L (0.93)	311.9 L (1.07)	264.2 L (1.26)
R2-20	359.4	465.5 L (0.77)	385.2 L (0.93)	345.0 L (1.04)	304.9 L (1.18)
R3-5	351.3	493.1 S (0.71)	378.3 S (0.93)	320.9 S (1.09)	263.5 S (1.33)
R3-20	417.0	535.8 L (0.78)	435.5 L (0.96)	372.0 S (1.12)	306.3 S (1.36)
R4	391.8	449.2 S (0.87)	344.9 S (1.14)	292.7 S (1.33)	240.5 S (1.63)

λ : 抵抗係数
L, S : 軸方向鋼材、横方向鉄筋によりねじり耐力が決定された意味