

論文

[2060] 純ねじりを受ける PRC 部材の終局耐力に関する一実験

正会員 児島孝之 (立命館大学理工学部)
 正会員〇高木宣章 (立命館大学理工学部)
 池田光伸 (立命館大学大学院)
 上垣義明 (立命館大学大学院)

1. はじめに

土木学会「コンクリート標準示方書」では、新たにねじりに関する条項が設けられ、プレストレストコンクリート (以下 PC) に関する規定も改定された。本示方書では、PC 部材の終局耐力を鋼材の降伏が先行する場合には、終局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 (以下 RC) 部材同様に求めて良いことが規定されている。しかし、ねじりを受ける PC 部材の鋼材量が比較的多い場合、あるいはプレストレスト鉄筋コンクリート (以下 PRC) 部材のねじり耐力を求める際の軸方向鋼材降伏時のせん断流 q_1 の算定法など不明な点が多い。従って、ねじりを受ける PC あるいは PRC 部材の終局耐力を、プレストレスの効果を無視することにより求めることは、必ずしも妥当な仮定ではないと考えられる。

本研究では、ねじりを受ける PRC 部材の合理的設計法確立のための基礎資料を得ることを目的として、軸方向鋼材量、横方向鉄筋量と緊張力を要因とした長方形断面を有する PRC 部材の一方向および正負交番純ねじり载荷実験を行なった。

2. 実験概要

軸方向鋼材量、横方向鉄筋量と緊張力を要因とした実験計画を表-1に示す。軸方向鋼材量のねじり耐力への効果を検討する PC はりをシリーズ 1 と 2、RC はりをシリーズ 3、シリーズ 3 の RC はりの上下に PC 鋼材を配置した PRC はりをシリーズ 4、シリーズ 3 の RC はりの中央に PC 鋼材を配置した PRC はりをシリーズ 5 とした。

シリーズ名の表示法を図-1に、配筋図の一例と各シリーズのはり断面を図-2に示す。供試体寸法は全て 150x240x2000mm である。軸方向鉄筋に D13(SD35)、横方向鉄筋に 2種類の D10(SD35)、PC 鋼棒に $\phi 7.4$ 、 $\phi 9.2$ 、 $\phi 21$ を使用した。使用鋼材の機械的性質を表-2と3に、コンクリートの諸強度を表-4に示す。ねじり载荷方法の概念図と载荷装置を各々図-3、4に示す。一方向および正負交番载荷とも、はりの両支点に取り付けた偏心载荷用アームで直接载荷することにより行なった。この

表-1 実験計画

シリーズ	q_1	q_w	PC 鋼棒	軸方向鉄筋	スターアップ	有効プレストレス量 (kgf/cm ²)
1	381.9	300.5	4- $\phi 7.4$	---	D10@90	0, 45
2	586.3	416.1	4- $\phi 9.2$	---	D10@65	0, 35, 70
3	308.3	300.5	---	4-D13	D10@90	0
4	499.3	416.1	2- $\phi 7.4$	4-D13	D10@65	0, 20
5	308.3	300.5	1- $\phi 21$	4-D13	D10@90	40, 80

$q_1 = \sum A_{t1} f_{1d} / u$, A_{t1} : 軸方向鋼材断面面積 f_{1d} : 軸方向鋼材の降伏強度
 u : 軸方向鉄筋の中心線の長さ
 $q_w = A_{tw} f_{wd} / s$, A_{tw} : 横方向鉄筋1本の断面面積 f_{wd} : 横方向鉄筋の降伏強度
 s : 横方向鉄筋の軸方向間隔

表-2 鉄筋の機械的性質

種類	降伏点応力 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)
D10(a)	3792	5433
D10(b)	3792	5316
D13	3772	5609

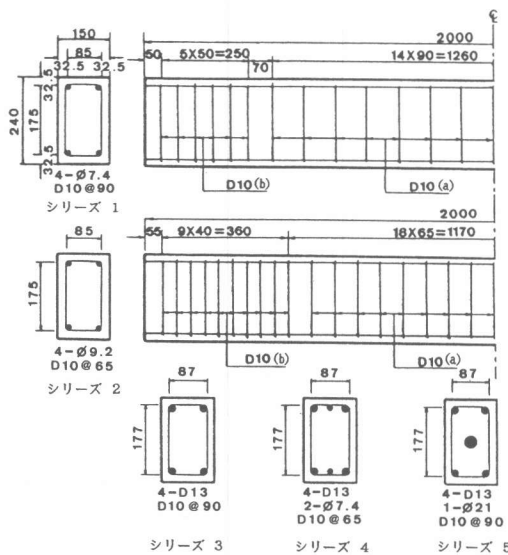
表-3 PC 鋼材の機械的性質

種類	降伏点応力 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)
異形棒 D種 1号 $\phi 7.4$	14800	15100
異形棒 D種 1号 $\phi 9.2$	14200	14800
丸棒 C種 1号 $\phi 21$	11700	12800

表-4 コンクリートの諸強度

圧縮強度	402
引張強度	33
曲げ強度	49
ヤング係数	3.65×10^5

単位: kgf/cm²



横方向鉄筋の長さは全シリーズとも
短辺： $b_0=110$ 長辺： $d_0=200$ mm

図-1 配筋図

載荷装置は試験機と載荷ビームの間にテフロンシートを用いており、ビームは容易に横方向に回転できるものである。偏心距離は、各シリーズとも 10cm である。載荷の正負交代の際、二又式センターホール型油圧ジャッキにより予めキャリブレーションを行なった P C 鋼棒を緊張（約 120kgf）し、ビームによるものと逆方向のねじりモーメントを与えることにより、はりが転倒することを避けた。変形が拘束されないように支点と載荷点に球座を、P C 鋼棒とジャッキ、載荷アームの間にボールベアリングを使用した。

正負交番ねじり載荷は、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 1×10^{-6} rad/cm の回転角まで載荷し、その後徐々に除荷し負のねじり載荷を同じ回転角まで行なった。その後は、回転角が 2、4、8、16、 32×10^{-6} rad/cm 毎に変位制御をし、各 1 回づつループさせはりを破壊させた。一方向ねじり載荷は、正負交番ねじり載荷と同様に、ねじり回転角による変位制御により、数回のループを描いた後破壊させた。

3. 実験結果および考察

3.1 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実験値と理論値を表-5 に、ひびわれ発生ねじりモーメントと有効プレストレス量の関係を図-5 に示す。各シリーズとも有効プレストレス量の増加に伴い、ひびわれ発生ねじりモーメントは増加した。シリーズ 1、2 の P C 部材では、プレストレスによる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 $\sqrt{1+(\sigma_p/f_t)}$ にほぼ等しかった。しかし、シリーズ 4、5 の PRC 部材では、その増加率はプレストレス係数より小さい傾向にあった。正負交番載荷時のひびわれ発生ねじりモーメント（一方向載荷時同様、最初に発生したひびわれ時のねじりモーメント）は、全てのシリーズで一方向載荷時より大きい値を示した。



図-2 シリーズの表示法

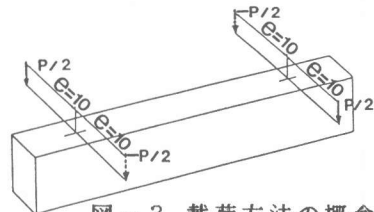


図-3 載荷方法の概念図

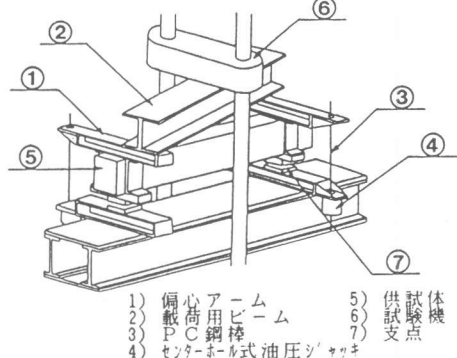


図-4 載荷装置

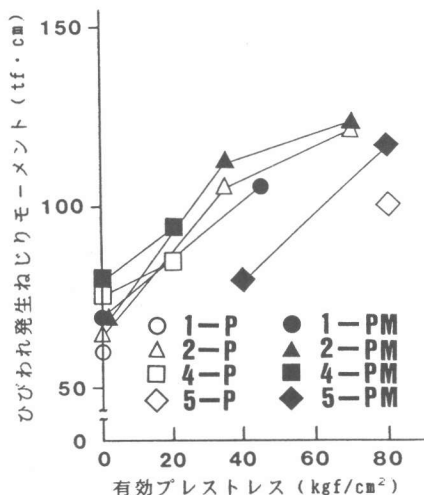


図-5 ひびわれ発生ねじりモーメント

表-5 ひびわれ発生ねじりモーメント

シリーズ	ひびわれ発生ねじりモーメント (tf・cm)			(実験値)/(理論値)		
	実験値 (1)	Hsu式 (2)	児島式 (3)	(1)/(2)	(1)/(3)	
1-	0P	60.0	75.0	54.9	0.85	1.09
	0PM	70.0	75.0	54.9	0.93	1.27
	45P	---	109.1	84.3	---	---
	45PM	105.0	109.1	84.3	0.96	1.25
2-	0P	65.0	75.0	54.9	0.87	1.17
	0PM	70.0	75.0	54.9	0.93	1.28
	35P	105.0	102.5	78.7	1.02	1.33
	35PM	113.8	102.5	78.7	1.11	1.45
	70P	120.0	124.1	96.9	0.97	1.24
	70PM	122.5	124.1	96.9	0.99	1.26
3-	P	---	75.0	54.9	---	---
	PM	73.8	75.0	54.9	0.98	1.34
4-	0P	75.0	75.0	54.9	1.00	1.37
	0PM	80.0	75.0	54.9	1.07	1.46
	20P	85.0	91.7	69.5	0.93	1.22
	20PM	95.0	91.7	69.5	1.04	1.37
5-40P	---	105.9	81.6	---	---	
	40PM	82.5	105.9	81.6	0.78	1.01
	80P	102.5	129.6	101.5	0.79	1.01
	80PM	117.5	129.6	101.5	0.91	1.16
	---	---	---	---	---	---

Hsu 式¹⁾は、全体的に危険側の値を示した。特に、はり中央にPC鋼棒を配置したシリーズ5の安全率は、0.78~0.91であった。児島式²⁾は、全体的に安全側の値(安全率 1.01~1.46)を示したが、シリーズ5では理論値と実験値はほぼ等しい値を示した。

3.2 終局ねじり耐力

終局ねじり耐力の実験値と理論値を表-6に、終局ねじり耐力と有効プレストレス量との関係を図-6に示す。一方向、正負交番载荷とも有効プレストレス量の増加に伴い、終局ねじり耐力は顕著に増加した。はり断面の中央にPC鋼棒を配置したシリーズ5における正負交番载荷時の終局ねじり耐力は、40kgf/cm²と80kgf/cm²のプレストレスを導入することにより同一断面であるシリーズ3より各々1.36、1.56倍の耐力を示した。シリーズ2のPC部材では、35kgf/cm²、70kgf/cm²のプレストレスを導入することにより一方向载荷時に各々1.52、1.69倍、正負交番载荷時には各々1.60、1.96倍の終局ねじり耐力を示した。シリーズ1と2の横方向鉄筋は降伏点に近いひずみを示したが、PC鋼材は降伏していないと考えられる。鋼材量が比較的多いPC部材では、終局時に横方向鉄筋は降伏点近くのひずみを示すが、PC鋼材は必ずしも降伏しておらず、またPC鋼材の応力レベルは導入プレストレス量に依存して変化する。そのため、終局ねじり耐力は、導入プレストレス量に大きく依存することになる。

シリーズ1と2のPC部材にプレストレスを導入しない時の終局ねじり耐力は、RC部材のシリーズ3より小さい値を示した。これは、鋼材の定着方法の相違によるものと考えられる。シリーズ2で70kgf/cm²のプレストレスを導入したはりシリーズ4でプレストレスを導入していないはりを除くと、正負交番载荷時の終局ねじり耐力は一方向载荷時より小さい値を示した。

土木学会の終局ねじり耐力式は、通常の場合には、設計上腹部コンクリートの斜め圧縮破壊耐力($M_{t, cud}$)が安全側に設定されているので問題ないが、断面の小さいRCはりあるいはPC鋼材を軸方向鋼材として用い、かつプレストレスを導入しない時や導入プレストレスが少ない時には、終局ねじり耐力が $M_{t, cud}$ を下回ることがあった。しかし、腹部コンクリートが斜め圧縮破壊したはり観察されなかった。

鋼材降伏時のねじり耐力は、ねじり有効断面積を横方向鉄筋中心線で囲まれた面積とする場合

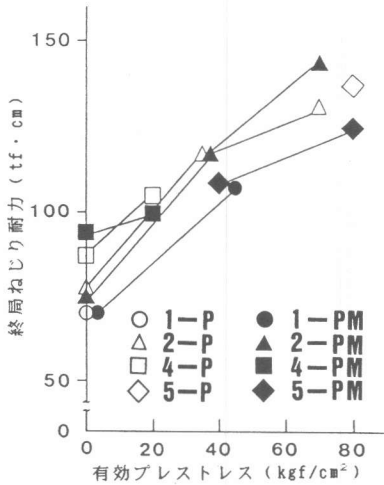


図-6 終局ねじり耐力

が多いが、隅角部に配置された軸方向鋼材の中心線で囲まれた面積とする場合もある。一般の土木構造物においてはこの差は大きくないが、実験室で行なう供試体で断面が小さい場合には、この差が無視できないこともある。ねじり有効断面積を横方向鉄筋中心で求めた時の終局ねじり耐力(M_{tyd})は、軸方向鋼材中心で

求めた時の終局ねじり耐力(M_{tyd}^*)より約 30~50% 大きい理論値を示した。本実験のようにはり断面が小さい時には、終局ねじり耐力に及ぼすねじり有効断面積の影響が極めて大きいので注意が必要である。土木学会の鋼材降伏時の M_{tyd} の耐力式、コンクリートと横方向鉄筋によるねじり耐力の和として求める Hsu 式、および横方向鉄筋を中心とする薄肉閉断面シェルと内部コアのねじり耐力の和として求める児島式は、いずれもねじり有効断面積を横方向鉄筋中心で求めているため、はり断面が小さく、鋼材量が比較的多い RC、PRC 部材の終局ねじり耐力を、かなり危険側に予測することになった。一方、ねじり有効断面積を軸方向鋼材中心で求めた各理論耐力は、いずれも全体的に危険側を示したが、横方向鋼材中心で求めた場合に比較すると、実験値に近い値が得られた。

しかし、PRC 部材でプレストレスを 20kgf/cm^2 導入したはり(40-20P、PM)では、ねじり有効断面積を軸方向鋼材中心で求めても、各理論値に対する実験値の比が、PC 部材より更に小さく危険側となった。これは、軸方向鋼材降伏時のせん断流(q_1)を、降伏強度の異なる鉄筋と PC 鋼棒の個々のせん断流を加算(但し、 $q_1 \leq 1.25 q_w$)して求めているためである。

3.3 ねじり回転角

ねじりモーメントと回転角の関係の一例を図-7に示す。RC 部材は、一般に載荷初期では線形あるいは紡錘形であり、載荷回数の増加に伴いスリップ現象を伴う逆 S 字形に移行する傾向が

表-6 終局ねじり耐力

シリーズ	終局ねじり耐力 (tf·cm)							
	実験値	JSCE M_{tyd}	JSCE M_{tyd}	Hsu式	児島式	JSCE M_{tyd}^*	Hsu式*	児島式*
1- OP	70.0	102.5 (0.68)	147.8 (0.47)	105.4 (0.66)	113.8 (0.62)	99.9 (0.70)	81.9 (0.85)	72.3 (0.97)
OPM	70.0	102.5 (0.68)	147.8 (0.47)	105.4 (0.66)	113.8 (0.62)	99.9 (0.70)	81.9 (0.85)	72.3 (0.97)
45P	---	102.5 (---)	147.8 (---)	130.5 (---)	151.2 (---)	99.9 (---)	107.1 (---)	111.1 (---)
45PM	107.5	102.5 (1.05)	147.8 (0.73)	130.5 (0.82)	151.2 (0.71)	99.9 (1.08)	107.1 (1.00)	111.1 (0.97)
2- OP	77.5	102.5 (0.76)	204.7 (0.38)	137.4 (0.56)	154.5 (0.50)	138.4 (0.56)	104.9 (0.74)	99.8 (0.78)
OPM	73.5	102.5 (0.72)	204.7 (0.36)	137.4 (0.53)	154.5 (0.48)	138.4 (0.53)	104.9 (0.70)	99.8 (0.74)
35P	117.5	102.5 (1.15)	204.7 (0.57)	157.7 (0.75)	198.1 (0.59)	138.4 (0.85)	125.2 (0.94)	143.2 (0.82)
35PM	117.5	102.5 (1.15)	204.7 (0.57)	157.7 (0.75)	198.1 (0.59)	138.4 (0.85)	125.2 (0.94)	143.2 (0.82)
70P	131.2	102.5 (1.28)	204.7 (0.64)	173.6 (0.76)	200.6 (0.65)	138.4 (0.95)	141.1 (0.93)	172.1 (0.76)
70PM	144.0	102.5 (1.40)	204.7 (0.70)	173.6 (0.83)	200.6 (0.72)	138.4 (1.04)	141.1 (1.02)	172.1 (0.84)
3- P	83.8	102.5 (0.82)	133.9 (0.63)	105.4 (0.80)	113.8 (0.74)	101.6 (0.82)	83.6 (1.00)	74.8 (1.12)
PM	80.0	102.5 (0.78)	133.9 (0.60)	105.4 (0.76)	113.8 (0.70)	101.6 (0.79)	83.6 (0.96)	74.8 (1.07)
4- OP	86.8	102.5 (0.85)	200.6 (0.43)	137.4 (0.63)	154.5 (0.56)	143.3 (0.61)	107.3 (0.81)	103.6 (0.84)
OPM	94.5	102.5 (0.92)	200.6 (0.47)	137.4 (0.69)	154.5 (0.61)	143.3 (0.66)	107.3 (0.88)	103.6 (0.91)
20P	105.0	102.5 (1.02)	200.6 (0.52)	149.7 (0.70)	176.6 (0.59)	143.3 (0.73)	119.6 (0.88)	131.3 (0.80)
20PM	100.0	102.5 (0.98)	200.6 (0.50)	149.7 (0.67)	176.6 (0.57)	143.3 (0.70)	119.6 (0.84)	131.3 (0.76)
5-40P	---	102.5 (---)	133.9 (---)	128.1 (---)	132.1 (---)	101.6 (---)	106.4 (---)	111.8 (---)
40PM	108.9	102.5 (1.06)	133.9 (0.81)	128.1 (0.85)	132.1 (0.82)	101.6 (1.07)	106.4 (1.02)	111.8 (0.97)
80P	137.5	102.5 (1.34)	133.9 (1.03)	145.6 (0.94)	149.5 (0.92)	101.6 (1.35)	123.8 (1.11)	134.1 (1.03)
80PM	125.0	102.5 (1.22)	133.9 (0.93)	145.6 (0.86)	149.5 (0.84)	101.6 (1.23)	123.8 (1.01)	134.1 (0.93)

注) * 印の終局ねじり耐力は、ねじり有効断面積を軸方向鋼材中心で求めた時の終局ねじり耐力(理論値)を示す。

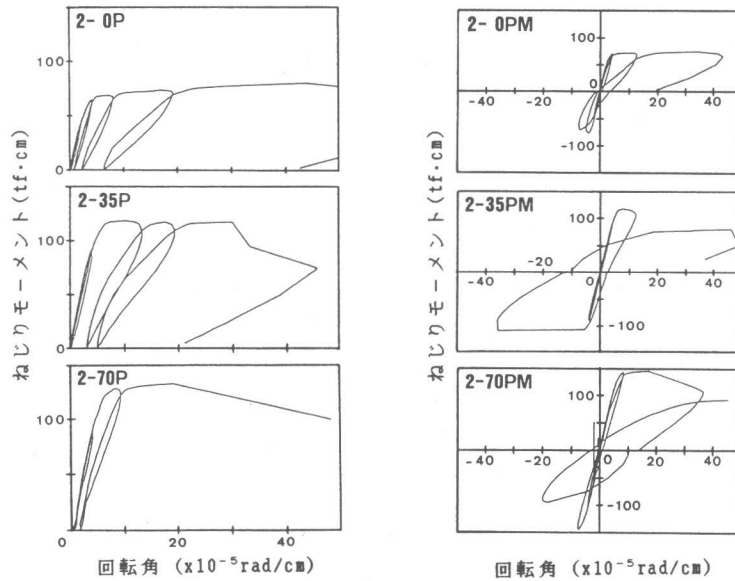


図-7 ねじりモーメントと回転角の関係

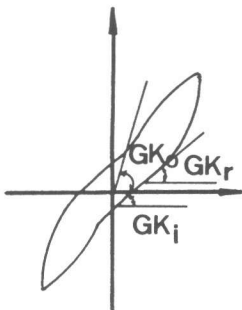


図-8 ねじり剛性の定義

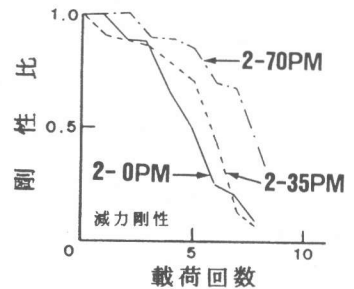
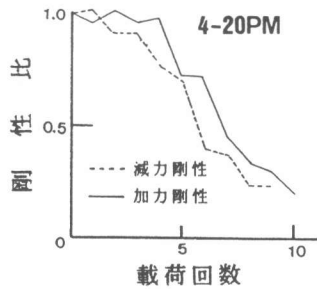


図-9 ねじり剛性比と繰返し載荷回数との関係

あるが、変形性能は靱性に富んでいる³⁾。プレストレスを導入すると、ねじりひびわれ発生までは、鋼材量、プレストレス量に無関係にほぼ線形である。しかし、ひびわれ発生後回転角が増加し、僅かに紡錘形に移行した後に急激な回転角の増大を伴い破壊する。導入プレスト量が多いほど、ひびわれ発生後の回転角の増加が急激であった。ねじりひびわれ発生後の回転角の増大は、一方向載荷時より正負交番載荷時に著しい傾向にあった。

3.4 ねじり剛性の低下

ねじり剛性の定義を図-8に、ねじり剛性比と繰返し載荷回数との一例を図-9に示す。剛性比は、ねじりモーメントと回転角の関係から、ひびわれ前のねじり剛性(初期ねじり剛性: GK_0)に対する各ループの減力時のねじり剛性 (GK_r) および加力時のねじり剛性 (GK_i) の比として定義する。ねじり剛性は、ループの2点の勾配を示す。RC部材では、減力時の剛性が加力時の剛性より通常大きい³⁾が、プレストレスを導入すると加力時の剛性が減力時より大きい傾向を示した。導入プレストレス量の増加に伴い剛性低下は小さくなるが、ひびわれ発生後の剛性低下はRC部材と同様急激で著しかった。

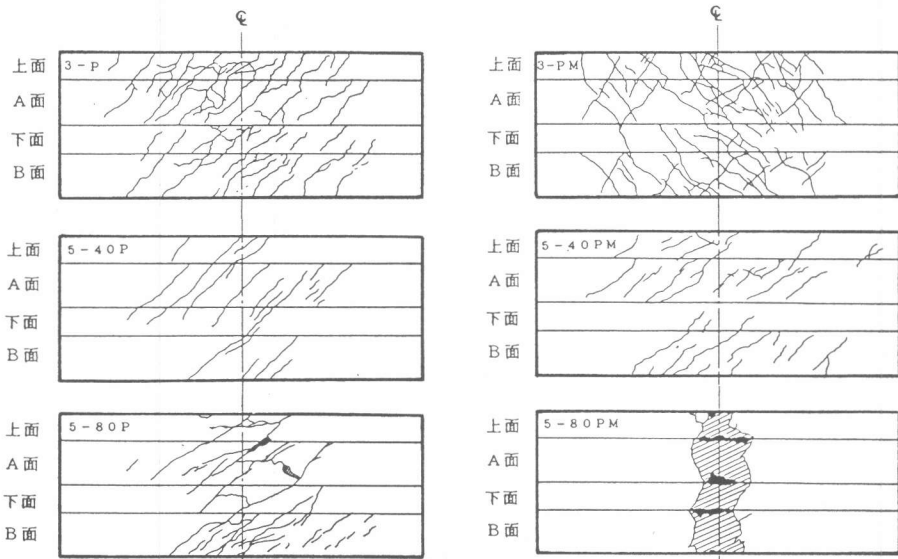


図-10 ひびわれ状況図

破壊状況の一例を図-10に示す。RC部材では、はり全体にひびわれが分散するのに対して、導入プレストレス量が大いだと、ひびわれははり中央部に集中する傾向が一方、正負交番荷とも観察された。PCあるいはPRC部材を正負交番荷すると、RC部材に比較して一方のひびわれが卓越する傾向が観察された。

4. 結論

本研究は、純ねじりを受けるPRC部材の一方および正負交番荷実験を行ない、終局ねじり耐力、復元力特性について検討を行なったものである。限られた実験データから得られた結果を以下に示す。

- (1) プレストレスを導入することにより、終局ねじり耐力は顕著に増大した。
- (2) ねじり有効断面積を横方向鉄筋中心で求めた時の終局ねじり耐力は、軸方向鋼材中心で求めた時の終局ねじり耐力より約30~50% 大きい理論値を示した。実験室で行なう供試体ではり断面が小さい時には、終局ねじり耐力に及ぼすねじり有効断面積の影響が極めて大きかった。
- (3) 土木学会のねじり耐力式は、通常の場合、設計上腹部コンクリートの斜め圧縮破壊耐力が安全側に設定されているので問題はないが、PC鋼材を軸方向鋼材として用い、かつ導入プレストレスが少ない時には、終局ねじり耐力が斜め圧縮破壊耐力を下回ることがあった。また、ねじり有効断面積を軸方向鋼材中心で求めた鋼材降伏時の終局ねじり耐力は、全体的に危険側の値を示したが、横方向鋼材中心で求めた場合に比較すると、実験値に近い値が得られた。

参考文献

- 1) Hsu : Torsion of Reinforced Concrete, Van Nostrand Reinhold Company, 1984, pp.171~204
- 2) 岡田 清編 : 最新コンクリート工学、1986、pp.99~111
- 3) 児島孝之、高木宣章、田中玲光 : 正負交番ねじりを受ける鉄筋コンクリートT形はりの終局強度に関する一実験、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、1986、pp.793~796