

純ねじりを受けるプレストレスト鉄筋コンクリートはりの終局耐力に関する一実験

立命館大学理工学部 正 員 児島 孝之 正 員 高木 宣章
立命館大学大学院 学生員 池田 光伸 学生員 〇上垣 義明

1. まえがき 土木学会「コンクリート標準示方書」では、プレストレストコンクリート（以下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）部材と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）部材の鋼材量が比較的多い場合には、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的資料を得ることを目的として、軸方向鋼材量、横方向鋼材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載荷実験を行った。

2. 実験概要 軸方向鋼材量、横方向鋼材量と緊張力を要因とした実験計画を表-1に、シリーズ名の表示方法を図-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。供試体寸法はすべて150×240×2000mmである。また、使用鉄筋(SD35)とPC鋼棒の機械的性質を表-2、3に、コンクリートの諸強度を表-4に示す。一方向および正負交番載荷は、はりの両支点に取り付けた偏心載荷用アームで直接載荷することにより行った。偏心距離は、各シリーズとも10cmである。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った。1ループ目は回転角が 1×10^{-6} rad/cm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。一方向ねじり載荷も、正負交番ねじり載荷と同様の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 (1) ひびわれ発生ねじりモーメント 各シリーズとも有効プレストレス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PC部材では、プレストレスによるひび

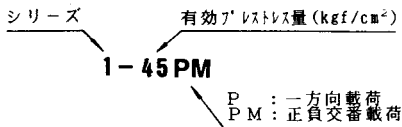


図-1 シリーズの表示方法

表-1 実験計画

シリーズ	q_1	q_u	PC鋼棒	軸方向鉄筋	スケーラップ	有効プレストレス量 (kgf/cm ²)
1	381.9	300.5	4-φ7.4	-----	D10@9	0, 45
2	586.3	416.1	4-φ9.2	-----	D10@6.5	0, 35, 70
3	308.3	300.5	-----	4-D13	D10@9	0
4	499.3	416.1	2-φ7.4	4-D13	D10@6.5	0, 20
5	308.3	300.5	1-φ21	4-D13	D10@9	40, 80

$$q_1 = \Sigma A_{ti} \cdot f_{ti} / u \quad q_u = A_{sv} \cdot f_{sv} / s$$

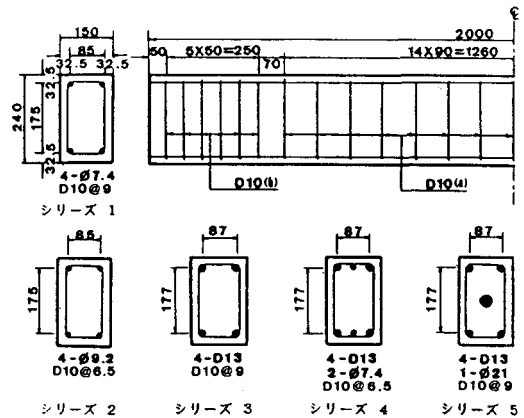


図-2 配筋図

横方向鉄筋の長さは全シリーズとも短辺: $b_o = 110$ mm、長辺: $d_o = 200$ mm

表-2 使用鉄筋の機械的性質

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 使用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φ7.4	14800	15100
異形棒D種1号φ9.2	14200	14800
丸棒 C種1号φ21	11700	12800

表-4 コンクリートの諸強度 (kgf/cm²)

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

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。正負交番載荷時のひびわれ発生ねじりモーメントは、全てのシリーズで一方方向載荷時より大きい値を示した。

(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-5に、終局ねじり耐力と有効プレストレスの関係を図-3に示す。一方方向、正負交番載荷とも有効プレストレスの増加に伴い終局ねじり耐力は顕著に増加した。はり断面中央にPC鋼棒を配置したシリーズ5の正負交番載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方向載荷時に各々1.52、1.69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。このように鋼材量が比較的多いときの終局ねじり耐力は、導入プレストレスに大きく依存している。また、2-70と4-0のはりを除くと、正負交番載荷時の終局ねじり耐力は一方方向載荷時より小さい値を示した。

土木学会のねじり耐力式は、通常の場合設計上、 $M_{t, \text{cud}}$ 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ときに耐力が $M_{t, \text{cud}}$ を下回ることがあった。

鋼材降伏時のねじり耐力の算定は、ねじり有効断面積を横方向鉄筋中心線によって囲まれた面積とする場合が多いが、隅角部に配置された軸方向鋼材の中心を結ぶ線で囲まれた面積とする場合もある。一般の土木構造物ではこの差は大きくないが、実験室で行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。本実験のはりについて、ねじり有効断面積を横方向鉄筋中心で求めたときの終局ねじり耐力($M_{t, \text{ud}}$)は、軸方向鋼材中心で求めたときの終局ねじり耐力($M_{t, \text{ud}}^*$)より約30~50%大きい値を示した。本実験のようにはり

断面が小さい場合には、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 $M_{t, \text{ud}}$ 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、いずれも有効断面積として横方向鉄筋の中心より求めているために、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となった。一方、有効断面積を軸方向鋼材中心より求めた場合には、各理論耐力は、いずれも全体的に危険側を示したが、横方向鉄筋中心に求めた場合に比べると実験値に近い値が得られた。したがって、本実験のような小断面の終局ねじり耐力を算定する場合は、有効断面積を軸方向鋼材の中心を結ぶ線で囲まれた面積とする方が好ましい。

表-5 終局ねじり耐力の実験値と理論値

シリーズ	終局ねじり耐力 (tf・cm)						(実験値) / (理論値)						
	実験値 (1)	JSCE $M_{t,cud}$	JSCE $M_{t,ud}$	$M_{t,ud}^*$ (2)	Hsu式 (3)	Hsu式 (3) [*]	児島式 (4)	児島式 (4) [*]	(1)/(2)	(1)/(3)	(1)/(3) [*]	(1)/(4)	(1)/(4) [*]
1- OP 0PM 45P 45PM	70.0	102.5	147.8	99.9	105.4	81.9	113.8	72.3	0.70	0.66	0.65	0.62	0.97
	70.0	-----	-----	-----	105.4	81.9	113.8	72.3	0.70	0.66	0.65	0.62	0.97
	45P	-----	-----	-----	130.5	107.1	151.2	111.1	-----	-----	-----	-----	-----
	45PM	107.5	-----	-----	130.5	107.1	151.2	111.1	1.08	0.82	1.00	0.71	0.97
2- OP 0PM 35P 35PM 70P 70PM	77.5	102.5	204.7	138.4	137.4	104.9	154.5	99.8	0.56	0.56	0.74	0.50	0.78
	73.5	-----	-----	-----	137.4	104.9	154.5	99.8	0.53	0.53	0.70	0.48	0.74
	35P	117.5	-----	-----	157.7	125.2	198.1	143.2	0.65	0.75	0.94	0.59	0.82
	35PM	117.5	-----	-----	157.7	125.2	198.1	143.2	0.65	0.75	0.94	0.59	0.82
	70P	131.2	-----	-----	173.6	141.1	200.6	172.1	0.95	0.76	0.93	0.65	0.76
	70PM	144.0	-----	-----	173.6	141.1	200.6	172.1	1.04	0.83	1.02	0.72	0.84
3- P PM	83.8	102.5	133.9	101.6	105.4	86.5	113.8	74.8	0.82	0.80	0.95	0.74	1.12
	80.0	-----	-----	-----	105.4	86.5	113.8	74.8	0.79	0.76	0.90	0.70	1.07
4- OP 0PM 20P 20PM	86.8	102.5	200.6	143.3	137.4	104.9	154.5	103.6	0.61	0.63	0.83	0.56	0.84
	84.5	-----	-----	-----	137.4	104.9	154.5	103.6	0.66	0.69	0.90	0.61	0.91
	20P	105.0	-----	-----	149.7	117.3	176.6	131.3	0.73	0.70	0.90	0.59	0.80
	20PM	100.0	-----	-----	149.7	117.3	176.6	131.3	0.70	0.67	0.86	0.57	0.76
5- 40P 40PM 80P 80PM	-----	102.5	133.9	101.6	128.1	104.7	132.1	111.8	-----	-----	-----	-----	-----
	40PM	106.9	-----	-----	128.1	104.9	132.1	111.8	1.07	0.85	1.04	0.82	0.97
	80P	137.5	-----	-----	145.6	122.1	149.5	134.1	1.35	0.94	1.13	0.92	1.03
	80PM	125.0	-----	-----	145.6	122.1	149.5	134.1	1.23	0.86	1.02	0.84	0.93

注) $M_{t, \text{ud}}^*$ 、Hsu式(3)^{*}、児島式(4)^{*}は、ねじり有効断面積を軸方向鋼材中心で求めたときの終局ねじり耐力

$$Hsu式: M_{tu} = \frac{b^2 h}{3} \cdot 2.4 \sqrt{f_c} \cdot (2.5 \sqrt{1 + 10 \sigma_p / f_c} - 1.5) + (0.66 + 0.33 h_o / b_o) \cdot \frac{b_o \cdot h_o \cdot A_{tw} \cdot f_{wy}}{s} \quad (lb \cdot in)$$

児島式: $M_{tu} = M_{tc} + M_{ts}$

$$M_{tc} = (1 - 2t/b) \cdot (1 - 2t/h) \cdot \gamma \cdot M_{tr}$$

$$M_{tr} = M_{te} + 1/4 \cdot (f_b / f_t - 1) \cdot (5 - f_b / f_t) \cdot (M_{tp} - M_{te})$$

$$M_{te} = \frac{1}{3 + 1.8 b/h} \cdot b^2 h f_t, \quad M_{tp} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{b}{3h}\right) \cdot b^2 h f_t$$

$$M_{ts} = 2 \lambda A_m \gamma \frac{A_{tw} \cdot f_{wy}}{s} \quad (\text{横方向鉄筋が降伏した場合})$$

$$M_{ts1} = 2 \lambda A_m \frac{A_{t1} \cdot f_{ly}}{\gamma \cdot u} + 2 A_m \frac{\sigma_p \cdot t}{\gamma} \quad (\text{軸方向鋼材が降伏した場合})$$

$$\gamma = \sqrt{1 + \sigma_p / f_t}, \quad A_m = b_o \cdot h_o \quad \text{-----} \quad (\text{ねじり有効断面積})$$

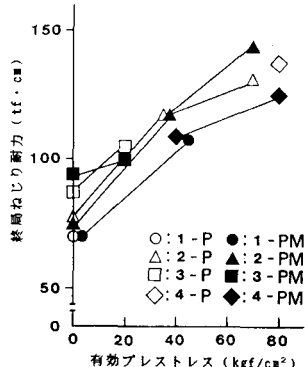


図-3 終局ねじり耐力