

論文 純ねじりを受ける PRC はりの終局耐力への軸方向緊張材の影響

采尾直久^{*1}・児島孝之^{*2}・高木宣章^{*3}・田部健一郎^{*4}

要旨：ヤング係数の異なる軸方向棒材(アラミド繊維棒材、炭素繊維棒材、P C 鋼より線)を緊張材とした P R C はりを作製し、一方向および正負交番の純ねじり載荷試験を行った。連続繊維を用いたはりではひびわれ発生ねじりモーメントから最大ねじりモーメントまでのねじりモーメントの増加が、P C 鋼より線を用いたはりに比較して非常に少なく、ねじりひびわれ発生後の挙動に連続繊維棒材のヤング係数が影響を及ぼしているものと考えられる。

キーワード：純ねじり、P R C はり、連続繊維棒材、ヤング係数、ストラット

1. はじめに

ねじりが設計上問題となるのは、地震時における非対称橋脚や立体ラーメン構造形式を採用した橋梁などである。わが国は、地震多発国である。都市部では制約条件が多いため、橋脚が一本の非対称高架橋も多くある。そのような橋脚は、地震時にせん断力だけでなくねじりモーメントも同時に受ける。このような場合、部材には一方向だけでなく正負交番の繰り返しねじりモーメントが作用する場合が多い。現在、土木学会の「コンクリート標準示方書」では、ねじりに関する項目が設けられている。しかし、コンクリート部材におけるねじり挙動には、不明な点が多い。終局ねじり耐力の算定方法も含め、終局限界状態、使用限界状態での変形性状など、明らかにすべき問題も数多くある。純ねじりを受けるコンクリート部材に関する長年の研究により、土木学会の終局ねじり耐力算定式の問題点として、終局ねじり耐力に及ぼすねじり有効断面積の影響

[1]、P R C 部材の終局ねじり耐力が、導入プレストレス量の影響を受け、導入プレストレス量が少ない時には、かなり危険側の値となる [2]、終局時の圧縮ストラットの角度と初期ひびわれの角度のバランスが終局時のねじり耐荷機構に及ぼす影響 [3]、などを指摘してきた。

本研究では、ヤング係数の異なる 3 種類の軸方向棒材(アラミド繊維棒材、炭素繊維棒材、P C 鋼より線)を用い、ひびわれ発生後のねじり変形量がねじり耐荷機構に及ぼす影響と、新素材を用いた P R C 部材の純ねじり性状について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 実験計画

実験計画を表-1に、使用鋼材の機械的性質を表-2に示す。緊張材としてヤング係数の異なる 3 種類の棒材(アラミド繊維棒材、炭素繊維棒材、P C 鋼より線)を用いた 3 タイプの供試体を作製した。プレストレスはプレテンション方式で導入し、P C 鋼より線を緊張材として用いた供試体では比較用としてポストテンション方式で導入した供試体も作製した。タイプ A F 供試体は軸

*1 京都府、工修(正会員)

*2 立命館大学教授 理工学部土木工学科、工博(正会員)

*3 立命館大学助教授 理工学部土木工学科、工博(正会員)

*4 島根県企業局、工修(正会員)

表-1 実験計画

タイプ	軸方向棒材	スターラップ	終局時のせん断流(kgf/cm)			σ_{pe} (kgf/cm ²)
			q _l	q _w	q _l /q _w	
AF6	アラミド	D6@50	523.0	221.7	2.36	40
AF10	繊維棒材	D10@100	523.0	287.3	1.82	40
CF6	炭素	D6@50	659.4	221.7	2.97	45
CF10	繊維棒材	D10@100	659.4	287.3	2.29	45
SWPRE6	PC鋼 より線	D6@50	636.7	221.7	2.87	50
SWPRE10		D10@100	636.7	287.3	2.22	50
SWPOS6		D6@50	636.7	221.7	2.87	50
SWPOS10		D10@100	636.7	287.3	2.22	50

表-2 使用材料の機械的性質

種類	記号	呼び径	公称断面積 (cm ²)	降伏点 (kgf/cm ²)	破断荷重 (kgf)	引張強度 (kgf/cm ²)	伸び (%)	ヤング係数 (kgf/cm ²)	ε_u (μ)
アラミド繊維棒材	FIBRA	11	0.897	—	13100	14600	2.6	6.92×10^5	21000
炭素繊維棒材	CFCC 1×7	12.5	0.760	—	17300	22800	1.6	1.43×10^6	15900
PC鋼より線	SWPR 7A	12.4	0.929	17100	17600	18900	7.0	1.98×10^6	10700
異形鉄筋	SD345	D10	0.713	4030	4190	5850	24.2	2.10×10^6	1920*
	SD295	D6	0.317	3800	1750	5530	15.8	2.10×10^6	1810*

*: 降伏ひずみ

方向緊張材としてアラミド繊維棒材を用いたもの、タイプC F供試体は炭素繊維棒材を用いたもの、タイプS W供試体はP C鋼より線を用いたものである。軸方向棒材は4本配置し、緊張力は軸方向棒材の引張強度の55%とした。緊張時の緊張力と軸方向棒材ひずみの関係および緊張時と載荷試験前の軸方向棒材ひずみの関係から、載荷試験時の軸方向棒材の緊張力を求め、プレテンション方式でプレストレスを導入した供試体の有効プレストレス量を計算した。供試体の表示方法を図-1に、供試体の配筋図の一例を図-2に示す。はり寸法は、プレテンション方式の供試体では25×35×240cm、ポストテンション方式の供試体では25×35×200cmとした。かぶりは全て2cmである。スターラップに異形鉄筋D6を用いた供試体とD10を用いた供試体を作製し、両者の軸方向鉄筋の終局時のせん断流 q_w が等しくなるようにスターラップを配置した。スターラップにD6を用いたものは、スターラップ間隔5cm、D10を用いたものは10cmである。

2.2 実験方法

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ねじりモーメントを与えた。試験スパンは125cm、偏心距離は25cmである。プ



図-1 供試体の表示方法

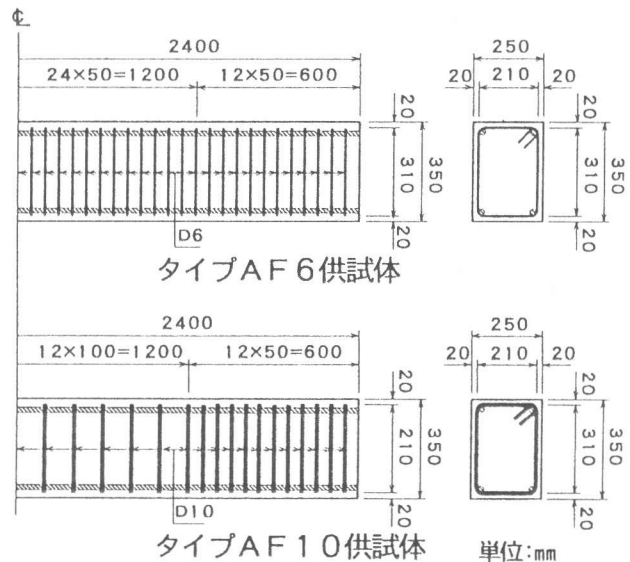


図-2 供試体の配筋図

レテンション方式で作製した供試体は一方向載荷と正負交番載荷で試験を行い、ポストテンション方式で作製した供試体は正負交番載荷のみ行った。載荷は1ループ目は、 $200(\text{tf}\cdot\text{cm})$ まで載荷し、2ループ目にひびわれを発生させ、その後ほぼ2倍ずつ回転角を増加させ、5ループ目に大変形させてはりを破壊させた。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。

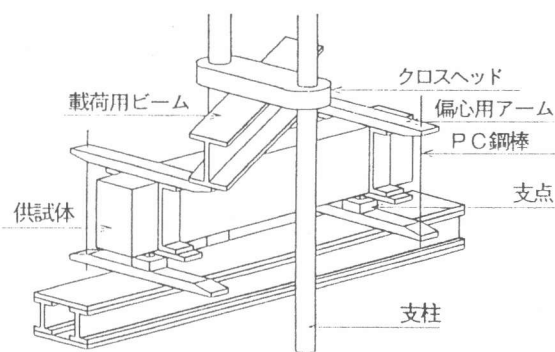


図-3 載荷装置

3. 実験結果および考察

3.1 ひびわれ性状

ひびわれ状況図の一例を図-4に示す。タイプAFとタイプCFのプレテンションPRC供試体、タイプSWのポストテンションPRC供試体(SWPOS)は、ひびわれ分散性が比較的良好で、コンクリートがねじりに対して効果的に抵抗しているものと考えられる。しかし、タイプSWのプレテンションPRC供試体(SWPRE)は全て、部材中央にひびわれが発生せず、端部で破壊した。これは、PC鋼より線を用いたプレテンションPRC供試体

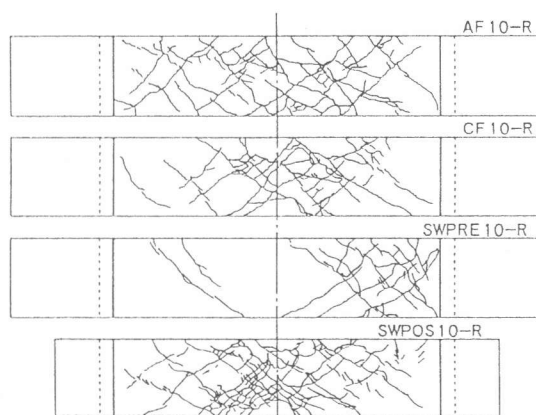


図-4 ひびわれ状況図

は長い定着長が必要なため、試験スパン端部で導入プレストレス量が減少したためと考えられる。全ての供試体とも部材が破壊する際には1本のひびわれが卓越し、かぶりコンクリートが激しく剥離した。

3.2 ねじり変形

ねじりモーメントとねじり回転角の関係の一例を図-5に示す。全ての供試体において、ひびわれ発生後のねじりモーメントの増加量に差はあるものの、最大ねじりモーメント時の変形量はほぼ等しくなった。プレテンションPRCはりでは、ひびわれ発生後のモーメント増加が、ポストテンションPRCはり(SWPOS)に比較して少ない。この傾向は、アラミド繊維棒材を用いたタイプAFはり、あるいは定着長が長いタイ

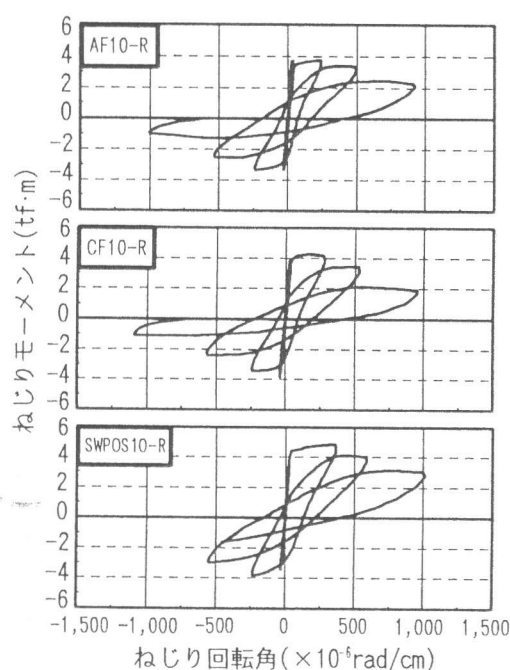


図-5 ねじりモーメントとねじり回転角の関係

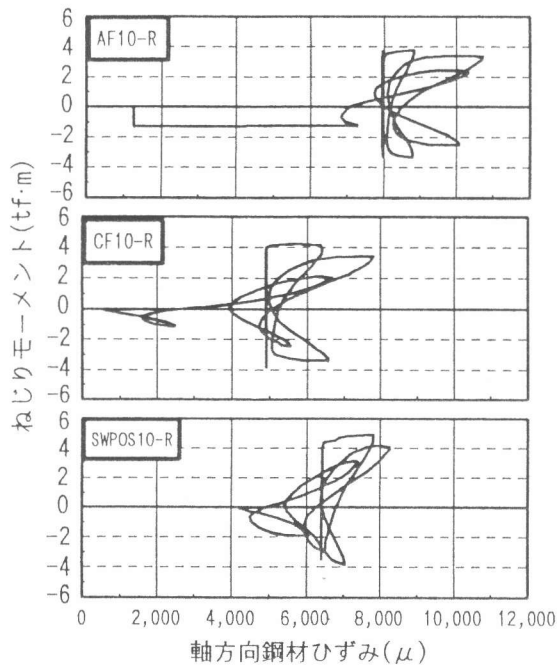


図-6 ねじりモーメントと軸方向棒材ひずみの関係

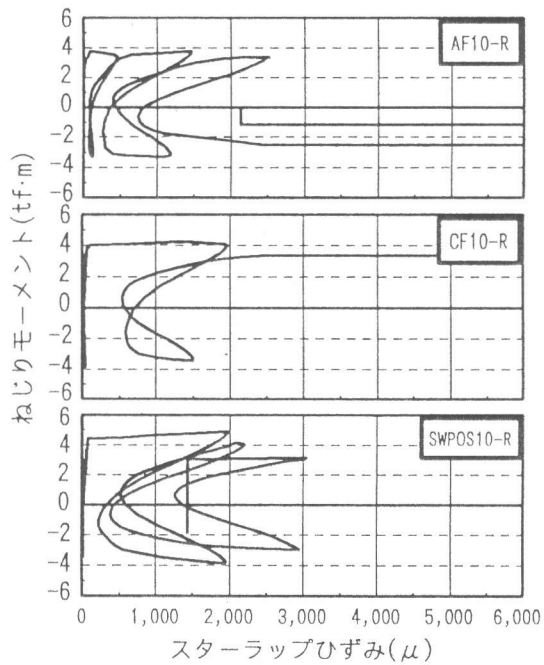


図-7 ねじりモーメントとスターラップひずみの関係

ブSWプレテンションPRCはりでは著しい。PC鋼より線を用いたポストテンションPRCはりのねじりモーメントとねじり回転角曲線の形状は紡錘形であるのに対して、連続繊維棒材を用いたプレテンションPRCはりでは逆S字形の形状である。またPC鋼棒を用いた同断面を有するポストテンションはりの最大ねじりモーメント時のねじり回転角は $400 \sim 500 \times 10^{-6} \text{ rad/cm}$ であった[3]のに対して、本試験では約 $200 \sim 250 \times 10^{-6} \text{ rad/cm}$ とかなり小さかった。そのため連続繊維棒材を用いたはりでは、ひびわれ発生から立体トラスへ移行する耐荷機構が十分に機能していないことが推察できる。

3.3 鋼材およびコンクリートのひずみ性状

ねじりモーメントと軸方向棒材ひずみの関係の一例を図-6に示す。連続繊維棒材を緊張材として用いたはり(タイプAF、CFはり)のプレストレス導入時の軸方向棒材ひずみはPC鋼より線を緊張材として用いたはりに比較するとばらつきが大きい。最大ねじりモーメント時の軸方向棒材ひずみは、プレストレス導入時より増加するものの、その増加量は小さい。全てのはりとも軸方向棒材の破断あるいは降伏は観察されなかった。

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-7に示す。最大ねじりモーメントに達するまでのスターラップひずみは、全てのはりとも非常に小さい。最大ねじりモーメントに達

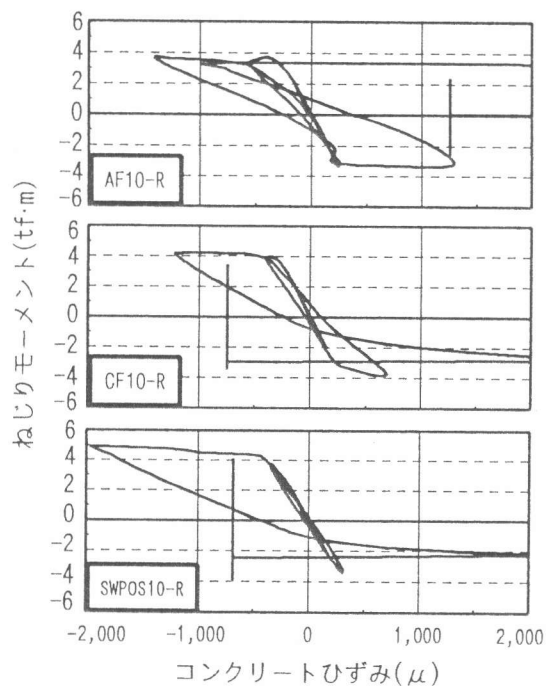


図-8 ねじりモーメントとコンクリートひずみの関係

すると、アラミド繊維棒材を用いたタイプA Fはり以外では、スターラップひずみが急激に増加し、降伏点ひずみに達する。タイプA Fはり、最大ねじりモーメント時にスターラップひずみが急激に増加するものの、降伏点ひずみに達しないスターラップが若干多く観察された。しかし、最終ループまでにスターラップは全て降伏した。

ねじりモーメントとコンクリートひずみの関係の一例を図-8に示す。連続繊維棒材を用いたはりのコンクリートの圧縮ひずみは、最大ねじりモーメント時あるいはそのループで1000~1500 μ 、P C鋼より線を用いたタイプS WのポストテンションP R Cはりでは1000~2000 μ であった。コンクリートの圧縮ひずみとひびわれ状況図から、連続繊維棒材を用いたはりにおいてもコンクリートストラットが圧縮斜材としてねじりに抵抗するものの、その効果はP C鋼より線を用いたタイプS WのポストテンションP R Cはりほど期待できない。

3.4 ひびわれ発生ねじりモーメント、終局ねじり耐力

ひびわれ発生ねじりモーメントと終局ねじり耐力を表-3に示す。式(1) [4] によるひびわれ

表-3 ひびわれ発生ねじりモーメント、終局ねじり耐力の実験値と理論値

供試体	σ_{pe} (kgf/cm ²)	コンクリートの諸強度 (kgf/cm ²)			ひびわれ発生ねじりモーメント				終局ねじり耐力					
		f _c	f _t	f _b	γ	実験値	式(1)	式(2)	実験値	M _{cu}	土木学会式(tf・cm)		式(1)	式(2)
							(tf・cm)	(tf・cm)			(*)	(*)	(tf・cm)	(tf・cm)
AF6-S	28.3	487	32.2	69.8	1.37	363	593 (0.61)	343 (1.06)	388	440	323 (1.20)	426 (0.91)	364 (1.07)	334 (1.16)
AF6-R	27.0	487	32.2	69.8	1.36	375	587 (0.64)	340 (1.10)	388	440	323 (1.20)	426 (0.91)	360 (1.08)	331 (1.17)
AF10-S	27.4	487	32.2	69.8	1.36	350	589 (0.59)	341 (1.03)	375	440	385 (0.97)	465 (0.81)	394 (0.95)	385 (0.97)
AF10-R	27.6	487	32.2	69.8	1.36	375	590 (0.64)	341 (1.10)	375	440	385 (0.97)	465 (0.81)	394 (0.95)	386 (0.97)
CF6-S	34.0	485	36.2	65.4	1.39	363	564 (0.64)	362 (1.00)	425	439	323 (1.32)	490 (0.87)	369 (1.15)	342 (1.24)
CF6-R	31.8	485	36.2	65.4	1.37	413	556 (0.74)	356 (1.16)	438	439	323 (1.36)	490 (0.87)	364 (1.20)	337 (1.30)
CF10-S	34.3	485	36.2	65.4	1.40	413	566 (0.73)	363 (1.14)	425	439	385 (1.10)	535 (0.79)	402 (1.06)	397 (1.07)
CF10-R	34.3	485	36.2	65.4	1.40	400	566 (0.71)	363 (1.10)	425	439	385 (1.10)	535 (0.79)	402 (1.06)	397 (1.07)
SWPRE6-S	41.5	544	38.8	85.2	1.44	375	760 (0.49)	436 (0.86)	413	465	323 (1.28)	462 (0.89)	394 (1.05)	364 (1.14)
SWPRE6-R	36.0	544	38.8	85.2	1.39	375	733 (0.51)	421 (0.89)	400	465	323 (1.24)	462 (0.87)	380 (1.05)	351 (1.14)
SWPRE10-S	42.6	544	38.8	85.2	1.45	363	765 (0.47)	439 (0.83)	400	465	385 (1.04)	513 (0.78)	428 (0.96)	423 (0.95)
SWPRE10-R	38.4	544	38.8	85.2	1.41	388	745 (0.52)	427 (0.91)	400	465	385 (1.04)	513 (0.78)	418 (0.93)	363 (1.10)
SWPOS6-R	45.3	544	38.8	85.2	1.47	363	777 (0.47)	446 (0.81)	488	465	323 (1.51)	462 (1.06)	403 (1.21)	372 (1.31)
SWPOS10-R	60.7	544	38.8	85.2	1.60	375	845 (0.44)	485 (0.77)	488	465	385 (1.27)	513 (0.95)	470 (1.04)	429 (1.14)

σ_{pe} : 有効プレストレス量(kgf/cm²), f'c, ft, fb: 載荷試験時のコンクリートの圧縮、曲げ、引張強度(kgf/cm²)

γ : プレストレス係数= $\sqrt{1+(\sigma_{pe}/ft)}$, Mtcu: 斜め圧縮破壊耐力= $4Kt\sqrt{f'c}$, $Kt=b^2d/(3.1+1.8b/d)$

(*)1: q1とqwの比を0.8 $\leq$ q1/qw $\leq$ 1.25で制限した理論値, (2): q1とqwの比を制限しない理論値, (): (実験値)/(理論値)

ひびわれ発生ねじりモーメント

式(1): Hsu式

$$Tcr = \gamma \cdot Tu \quad Tu = b^2 \cdot h(0.85fb)/3$$

式(2): 児島式

$$Tcr = \gamma \cdot Tup$$

$$Tup = Te + [(fb/ft) - 1][5 - (fb/ft)](Tp - Te)/4$$

$$Te = b^2 \cdot h \cdot ft / (3 + 1.8b/h)$$

$$Tp = (1/2)(1 - b/3h)b^2 \cdot h \cdot ft$$

終局ねじり耐力

式(1): Hsu式

$$Mtu = (b^2 \cdot h/3)(2.4\sqrt{f'c})(2.5\sqrt{1 + 10\sigma_{pe}/f'c} - 1.5) + (0.66 + 0.33h_e/b_e)t \cdot b_e \cdot h_e \cdot Atw \cdot fwy/s$$

式(2): 児島式

$$Mtu = Mtc + Mts \quad Mtc = (1 - 2t/b_e)^2(1 - 2t/h_e)Tcr$$

Mts=MtssとMtslの小さい方

$$Mtss = 2\lambda \cdot Am \cdot \gamma \cdot Atw \cdot fwy/s$$

$$Mtsl = (2\lambda \cdot Am \cdot \sum A1 \cdot fly/\gamma \cdot u) + (2Am \cdot \sigma_{pe} \cdot t/\gamma)$$

$$Am = b_e \cdot h_e \text{ (ねじり有効断面積)} \quad \lambda = 0.7 \text{ (抵抗係数)}$$

発生ねじりモーメントの計算値は全体的にかなり大きな値を示した。しかし、式(2)[5]は例外はあるものの良好な値を推定した。タイプA F供試体ではひびわれ発生荷重が最大ねじりモーメントとなるものもあり、全体的にひびわれ発生ねじりモーメントと最大ねじりモーメントがかなり近い値となった。タイプC F供試体は、タイプA Fに比較してねじりひびわれ発生後も幾分ねじりモーメントは増加するが、タイプSWPOS供試体に比較すると、ひびわれ発生からのねじりモーメントの増加は少ない。本試験で用いた軸方向棒材のヤング係数は、アラミド繊維棒材では約 $70 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 、炭素繊維棒材では約 $140 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 、P C鋼より線では約 $200 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ である。連続繊維棒材のヤング係数が小さいためにねじり変形が大きくなる。連続繊維棒材を緊張材に用いてプレストレスを導入することによりひびわれ発生ねじりモーメントは増加する。しかしひびわれ発生ねじりモーメントから最大ねじりモーメントまでの増加が非常に少ないことから、ねじりひびわれ発生後の挙動に連続繊維棒材のヤング係数が小さいことが影響を及ぼしているものと考えられる。

4. 結論

ヤング係数の異なる軸方向棒材を緊張材としたP R Cはりの純ねじり耐力の軸方向棒材への影響に関する検討を行った。得られた結果は次のとおりである。

(1)連続繊維棒材を用いたはりでは、ひびわれ発生から立体トラスへ移行する耐荷機構が十分に機能していないことが推察される。

(2)このことは、ひびわれ発生ねじりモーメントから最大ねじりモーメントまでのねじりモーメントの増加が非常に少ないことから、ねじりひびわれ発生後の挙動に連続繊維棒材のヤング係数が小さいことが影響を及ぼしているものと考えられる。

謝辞

本研究の供試体を作製するにあたり、ビール橋梁(株)の竹内正喜氏に多大な御協力頂きましたことを付記し、お礼申し上げます。

【参考文献】

- [1] 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、pp191-196、1990.6
- [2] 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、pp363-368、1989.6
- [3] 児島孝之・高木宣章・采尾直久:純ねじりを受けるP R Cはりの終局耐力へのプレストレスの影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.2、pp937-942、1994.6
- [4] Hsu:Torsion of Reinforced Concrete, Van Nostrand Company, 1984, pp.171~194
- [5] 岡田 清編:最新コンクリート工学、1986, pp.100~106