

論文

[2180] FRP 補強材を用いた PC 梁の曲げ・ねじり強さ

周平\*1・米倉亜州夫\*2・田沢栄一\*3・角 広幸\*4

1. まえがき

本研究は、炭素繊維 (CFRP) 又はアラミド繊維 (AFRP) ロッドを緊張材、軸方向補強筋及び横方向補強筋に用いた PC 梁が曲げとねじりとの組み合わせ荷重を受ける場合の特性について、プレストレス、軸方向補強筋量及び横方向補強筋量を変化させ、PC 鋼材及び鉄筋を用いた場合と比較検討し、この種の FRP ロッドを用いた PC 梁の設計上の資料を得る事を目的としたものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験では、表-1 に示すように、梁の軸方向補強筋に CFRP スtrand、CFRP ロッド及び AFRP ロッドを用いた。せん断補強筋 (横方向補強筋) には CFRP スターラップ及び AFRP ロッドをスパイラル状に連続成型したものを使用した。又、比較のため、PC 鋼棒及び鉄筋を用いた梁も作製した。鋼材の特性を表-2 に示す。コンクリートの配合は、早強ポルトランドセメントを使用し、大部分の PC 梁のプレストレス導入時 (材齢 7 日) のコンクリートの圧縮強度は 500 kgf/cm<sup>2</sup> 程度になるように定め、一部の PC 梁のプレストレス導入時のコンクリートの圧縮強度は 800 kgf/cm<sup>2</sup> とした。

表-1 FRP 緊張材及び補強材の品質

緊張材	直径 mm	断面積 mm <sup>2</sup>	弾性係数 kgf/cm <sup>2</sup>	破断強度 kgf/cm <sup>2</sup>	伸び率 %	
CFRP スtrand	φ25	290.9	1.32×10 <sup>6</sup>	19500	1.5	
AFRP ロッド	7φ×6	198.1	0.54×10 <sup>6</sup>	18000	3.3	
補強材	CFRP スターラップ	φ6	1.20×10 <sup>6</sup>	17000	1.3	
	CFRP ロッド	φ8	50.3	1.39×10 <sup>6</sup>	21500	1.3
	CFRP スtrand	φ25	290.9	1.32×10 <sup>6</sup>	19500	1.5
	AFRP スパイル筋	φ4	12.6	0.54×10 <sup>6</sup>	19000	3.3
AFRP スパイル筋	φ6	28.3	0.54×10 <sup>6</sup>	19000	3.3	
AFRP ロッド	φ7.4	43.0	0.54×10 <sup>6</sup>	19000	3.3	

表-2 鋼材の品質

品名	直径 mm	断面積 mm <sup>2</sup>	降伏強度 kgf/cm <sup>2</sup>	引張強度 kgf/cm <sup>2</sup>	伸び率 %
PC 鋼棒	φ23	423.8	11585	13071	—
SR-24	φ6	23.0	3870	5850	18
SR-24	φ9	54.1	3076	4548	30
SD-30	D13	121.0	3256	4660	26

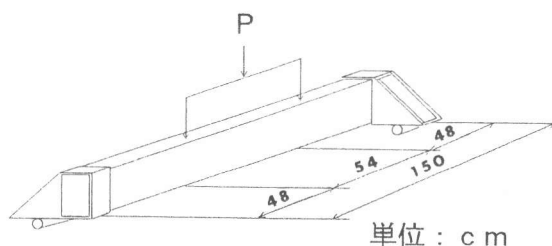


図-2 荷重方法

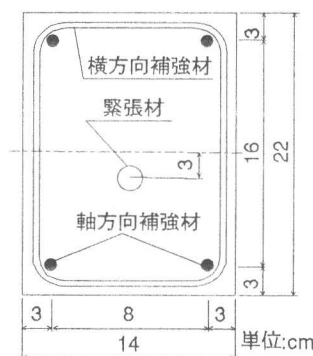


図-1 梁の断面寸法

- \* 1 広島大学大学院 工学研究科構造工学専攻、(正会員)
- \* 2 広島大学教授 工学部第 4 類 (建設系)、工博 (正会員)
- \* 3 広島大学教授 工学部第 4 類 (建設系)、工博 (正会員)
- \* 4 広島大学 工学部第 4 類

## 2. 2 供試体

梁供試体は表-3

に示す通りとした。又、図-1に示すように、梁の形状寸法はスパン150cmの矩形断面とし、緊張材を中心軸、または中心軸から3cmの位置に、軸方向補強筋を四隅に配置した。梁の純曲げ区間の軸方向補強率 ( $p_L = A_s / b \cdot h$ ,  $A_s$ : 軸方向補強筋の断面積,  $b$ : ウェブ幅,  $h$ : 部材高さ) は表-3に示す。横方向補強筋には、垂直鉄筋スターラップ、垂直CFRPスターラップ及びスパイラル状AFRPロッドを用いた。梁の純曲げ区間の横

方向補強率 ( $p_v = A_v \cdot l_c / b \cdot h \cdot s$ ,  $A_v$ : スターラップまたはスパイラル1本の断面積,  $l_c$ : スターラップまたはスパイラルの周長,  $s$ : 横方向補強筋の間隔) は表-3に示すとおりである。ポストテンション方式でプレストレスを導入後、グラウトを注入し、プレストレスは

梁の端部に取り付けられたロードセルで管理した。なお、せん断スパンの区間でねじり破壊を生じないように、この区間には純曲げ区間よりも十分スターラップを配置した。

## 2. 3 载荷試験

図-2に示すように、载荷は2点载荷とし、梁を緊張した後一週間(材齢14日)で行った。曲

表-3 梁の品質及び実験結果

補強材の種類	M <sub>T</sub> — M <sub>B</sub>	ア-ム長 (cm)	軸方向補強筋		横方向補強筋		P <sub>e</sub> kgf/cm <sup>2</sup>	ひび割れ発生荷重 (t)	最大荷重 (t)	
			直径	p <sub>L</sub> (%)	S <sub>M</sub> (cm)	直径				p <sub>v</sub> (%)
CFRP	0.3	57.0	φ8	0.65	11.0	φ6	0.47	—	2.0	6.42
			φ25	3.78	11.0	φ6	0.47	—	1.2	8.06
			φ8	0.65	11.0	φ6	0.47	93.5	6.0	10.35
			φ8	0.65	11.0	φ6	0.47	124.7	5.5	12.86
			φ8	0.65	11.0	φ6	0.47	125.6	6.0	11.98
			φ25	3.78	11.0	φ6	0.47	125.6	5.5	11.36
	1.2	14.3	φ8	0.65	11.0	φ6	0.47	92.8	2.0	3.00
			φ8	0.65	11.0	φ6	0.47	126.4	1.7	3.44
			φ8	0.65	11.0	φ6	0.47	—	1.6	1.94
			φ8	0.65	11.0	φ6	0.47	126.2	1.6	3.52
			φ8	0.65	4.0	φ6	1.29	117.5	1.6	4.38
			φ25	3.78	4.0	φ6	1.29	120.0	*2.2	*4.66
AFRP	0.3	57.0	φ7.4	0.56	7.0	φ6	0.83	—	1.1	6.87
			φ7.4	0.56	7.0	φ6	0.83	124.8	6.2	11.60
			φ7.4	0.56	4.0	φ4	1.45	115.0	7.0	12.45
			φ7.4	0.56	4.0	φ4	0.64	114.1	5.3	11.26
			3φ7.4	1.68	7.0	φ6	0.83	119.1	6.0	11.20
			3φ7.4	1.68	7.0	φ6	0.83	—	1.8	3.10
	1.2	14.3	φ7.4	0.56	7.0	φ6	0.83	121.5	1.8	3.10
			φ7.4	0.56	7.0	φ6	0.83	120.0	*2.0	*3.88
			φ7.4	1.68	7.0	φ6	0.83	—	0.7	1.16
			3φ7.4	1.68	7.0	φ6	0.83	117.2	1.7	3.00
			φ7.4	0.56	7.0	φ6	0.83	—	1.8	3.34
			φ7.4	0.56	7.0	φ6	0.83	—	2.0	4.30
鉄筋	0.3	57.0	D13	1.57	11.0	φ9	1.09	—	2.0	9.28
			D13	1.57	11.0	φ9	1.09	124.1	7.4	14.27
			D13	1.57	7.0	φ9	1.89	114.0	7.4	16.20
	1.2	14.3	D13	1.57	4.0	φ6	1.45	128.7	7.2	16.50
			D13	1.57	11.0	φ9	1.09	126.0	1.8	3.34
			D13	1.57	4.0	φ6	1.45	126.4	2.0	4.30
1.2	14.3	D13	1.57	7.0	φ9	1.89	124.1	2.1	4.36	
		D13	1.57	7.0	φ9	1.89	127.8	*2.2	*4.86	
		D13	1.57	7.0	φ9	1.89	—	—	—	

ここに、p<sub>L</sub>: 軸方向補強筋の補強率、p<sub>v</sub>: 横方向補強筋の補強率、S<sub>M</sub>: 横方向補強筋のピッチ、P<sub>e</sub>: 緊張材の中心における有効プレストレス、\*: 圧縮強度800kgf/cm<sup>2</sup>を有する供試体。緊張材: CFRP及びAFRPロッドを用いた梁は、それぞれφ25のCFRPストランド及び7φ6のAFRPロッドを、鉄筋の場合、φ23のPC鋼棒を使用した。偏心距離: No.1, No.2(中心)以外の梁にすべて3cmとした。



写真-1 AFRP, 軸径: 3φ7.4, 横径: φ6, P<sub>e</sub>=100kgf/cm<sup>2</sup>



写真-2 CFRP, 軸径: φ8, 横径: φ6, P<sub>e</sub>=100kgf/cm<sup>2</sup>

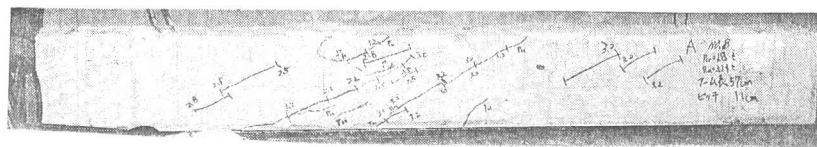


写真-3 steel, 軸径: D13, 横径: φ9, P<sub>e</sub>=100kgf/cm<sup>2</sup>

げとねじりを受ける区間で破壊させるため、梁のせん断区間を横方向補強筋で十分補強した。ねじり載荷治具のアーム長を14.3cm、57.0cmとし、ねじりモーメント ( $M_T$ ) と曲げモーメント ( $M_B$ ) の比率 ( $M_T/M_B$ ) = 0.3及び1.2とした。

### 3. 実験結果及び考察

載荷試験の結果を表-3に示す。

#### 3.1 ひび割れ発生状況

FRPロッドを用いた梁、又は鋼材を用いた梁はいずれもひび割れを発生する前に、弾性的な挙動を呈した。アーム長14.3cm、ねじりモーメントと曲げモーメントの比率 ( $M_T/M_B$ ) = 0.3の場合、3種類の梁はいずれも曲げ区間の側面に下縁からひび割れが発生し、荷重の増加に伴い、斜めに上昇した。その後、側面の中央または梁の上面にも斜めひび割れが発生した。 $M_T/M_B=1.2$ の場合、CFRP及びAFRPロッドかまたは鉄筋かを問わず、どんな種類の補強材を用いた梁でも、せん断スパン区間の側面に斜めひび割れが発生し始めた。その後、曲げ区間の側面にも斜めひび割れが発生し、そのひび割れが上縁と下縁に伸びていった。(写真-1, 2, 3を参照)

#### 3.2 ねじりひび割れ発生荷重及び終局耐力に及ぼす各要因の影響

##### 3.2.1 プレストレスの影響

図-3に示すよ

うに、CFRPロッド、AFRPロッドまたは鉄筋を補強材に用いた梁はいずれも、プレストレスを導入することによって、ひび割れ発生荷重及び耐力が大きくなった。

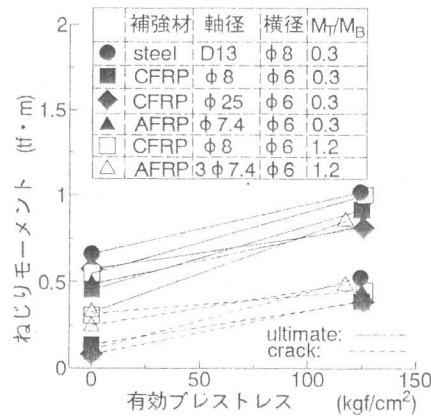


図-3 ひび割れ発生荷重及び終局耐力-有効プレストレス

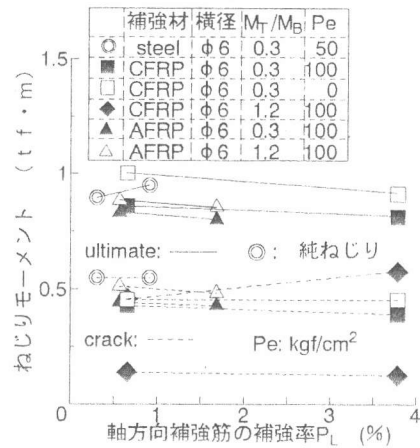


図-4 ひび割れ発生荷重及び終局耐力-軸方向補強率

##### 3.2.2 軸方向補強筋の補強率の影響

図-4に示すように、軸方向補強筋量の増加は、CFRPロッド、AFRPロッド及び鉄筋を補強材にした3種類の梁に対して、ひび割れ発生荷重の増大にはほとんど効果がなかった。一方、終局耐力は、

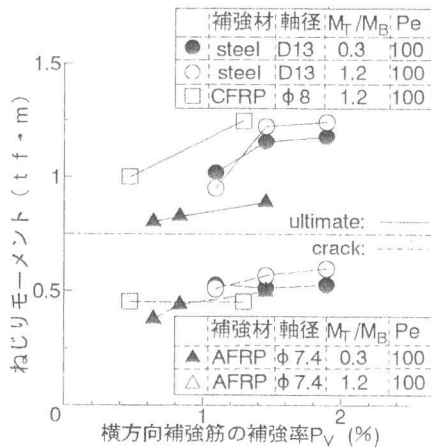


図-5 ひび割れ発生荷重及び終局耐力-横方向補強率

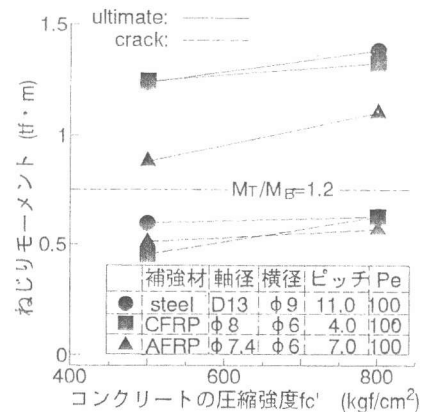


図-6 ひび割れ発生荷重及び終局耐力-コンクリートの強度

CFRP及びAFRPロッドを用いた梁は、軸補強筋量を増加しても増大せずに、やや下がった。このことは、CFRP及びAFRPロッドを用いた梁では、軸方向補強率が小さい場合、軸方向補強筋に、 $\phi 8$ の異形状のCFRPロッド及び $\phi 7.4$ の異形状AFRPロッドを使用し、軸補強率が大きい場合、 $\phi 25$ のCFRPストランド及び $\phi 7.4$ のAFRPロッドを3本で束ねた $3\phi 7.4$ のAFRPロッドを梁の四隅に配置したが、梁の破壊状況から見て、FRPロッドとコンクリートの付着が弱いので、コンクリートが剥がれたり、落下したためと思われる。又、CFRPストランド及びAFRPロッドが折れたりしたものもあった。一方、鉄筋の場合、軸方向鉄筋の鉄筋比を0.3%から0.9%に増やすと、終局ねじり耐力が上がった。

### 3. 2. 3 横方向補強筋の補強率の影響

図-5に示すように、 $M_T/M_B=0.3$ 及び $M_T/M_B=1.2$ の場合、横方向補強率を倍程度増加すると、FRPロッドを用いた梁のひび割れ発生荷重は、鉄筋を用いた場合よりやや小さい程度であった。一方、CFRPロッドを用いた梁の終局耐力は、横方向補強率の増加により増大したが、AFRPロッドを用いた場合、CFRPロッドを用いた梁より、スターラップ間隔が小さく、横補強率が大きいにもかかわらず、ねじり耐力が小さくなっている。これはAFRPのヤング係数が小さく、変形が大きくなるためと思われる。鉄筋を用いた梁の場合、横方向鉄筋の鉄筋比( $p_v$ )が1.09%から1.45%に増加すると、 $M_T/M_B=0.3$ 及び $M_T/M_B=1.2$ 両方とも、梁の終局耐力は大きくなったが、さらに、横方向鉄筋比を1.89%に増やすと、梁の破壊形式は、鉄筋の降伏からコンクリートの斜め圧縮破壊に変わって、終局耐力がほとんど増大しなかった。

### 3. 2. 4 コンクリート強度の影響

図-6に示すように、コンクリートの圧縮強度を増やすことにより、CFRPロッド、AFRPロッド及び鉄筋を用いた梁はいずれも、ひび割れ発生荷重及び終局耐力が増大した。又、図-5に示されているように、コンクリートの圧縮強度が約 $500\text{kgf/cm}^2$ の時、横方向鉄筋比を1.09%から1.45%に増やしても、梁の終局耐力は上がらなかったが、コンクリートの圧縮強度を $800\text{kgf/cm}^2$ に増やすと、梁の終局耐力が上昇した。コンクリートの強度の増加による終局耐力の増大は、ひび割れ発生荷重の増大より顕著であった。それは梁のコンクリートの圧縮強度は $500\text{kgf/cm}^2$ から $800\text{kgf/cm}^2$ に上がっても、コンクリートの引張強度が $40\text{kgf/cm}^2$ から $50\text{kgf/cm}^2$ までしか増大しなかったためと思われる。梁のひび割れ発生荷重はコンクリートの引張強度に関わり、一方、ねじり終局耐力は、梁の鉄筋が降伏しない限り、梁がコンクリートの斜め圧縮破壊になる場合もあるので、コンクリートの引張強度だけでなく圧縮強度に影響される。

## 3. 3 変形性状

### 3. 3. 1 曲げモーメント-たわみ関係

図-7には、 $M_T/M_B=0.3$ の曲げモーメント-たわみ関係を示す。CFRP及びAFRPロッドを用いた梁は、軸方向及び横方向補強筋の引張耐力が鉄筋の降伏荷重と同等またはそれ以上を持って、ねじり終局耐力が、プレストレスを導入した場合と導入しない場合とも、鉄筋で補強した梁の終局耐力より、やや低めになった。又、FRPロッド及び鉄筋を用いた梁の曲げモーメント-たわみ曲線の勾配(曲げ剛性)は、プレストレスの有無に関係せず、補強材の弾性係数が大きいほど、大きくなった。ひび割れ発生後、同一曲げモーメントにおいて、梁のたわみは

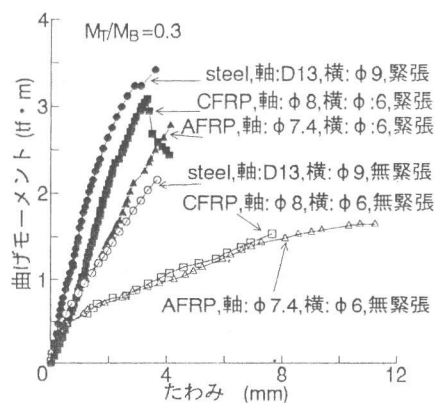


図-7 曲げモーメント-たわみ

補強材の弾性係数が小さい程大きくなった。プレストレスがない場合（鉄筋コンクリート）のたわみはPC梁に比べて著しく大きいことが認められ、この傾向はFRP梁の場合に著しい。又、CFRP及びAFRPロッドを用いた梁は、プレストレスを導入することによって、たわみが大きく抑制され、曲げ剛性を維持するのに有効であることが分かった。プレストレスを導入したCFRP梁の曲げ-たわみ曲線は鉄筋を補強材に用いたPC梁の曲線に非常に接近している。図-8に示すような $M_T/M_B=1.2$ の場合、曲げモーメント-たわみの曲線

は図-7に示しているものと同じような傾向が見られるが、さらに、コンクリートの強度を増やすことにより、曲げ剛性と終局耐力がやや増大している。これは、コンクリートの強度を高めることにより、コンクリートの弾性係数もやや増大し、梁の曲げ剛性（EI）への貢献が若干増大したと思われる。

### 3. 3. 2 ねじりモーメント-ねじれ角

図-9には、 $M_T/M_B=0.3$ のねじりモーメント-ねじれ角関係を示す。ひび割れが発生する前に、プレストレス導入の有無にかかわらず、FRPロッド及び鉄筋を用いた梁のねじれ角は、いずれも、ほぼ同じ勾配で直線的に増大している。ひび割れ発生後、補強材の弾性係数が小さいもの程、ねじり剛性が低下し、同一荷重において、AFRPロッド、CFRPロッド及び鉄筋を用いた梁の順にねじれ角が順次大きくなった。又、CFRP及びAFRPロッドを用いた梁は、プレストレスを導入することによって、ねじり剛性を維持するのに著しい効果があることが分かった。図-10には、 $M_T/M_B=1.2$ のねじりモーメント-ねじれ角関係を示す。CFRP及びAFRPロッドを用いた梁は、鉄筋を用いた梁と同じように、コンクリート強度を増やすことにより、ねじり剛性と終局耐力がやや増大したことが分かった。

### 3. 4 ひび割れ発生及び終局時における曲げとねじりの相関関係

図-11に示すように、CFRP及びAFRPロッドを用いた梁は、ねじりモーメントと曲げモーメントの比は0.3、1.2及び $\infty$ で、どの場合も、プレストレスを導入することによって、ひび割れ発生時、終局時のねじりモーメントと及び曲げモーメント（ $\infty$ の場合を除く）とも増大した。特に、 $M_T/M_B=0.3$ の場合は、 $M_T/M_B=1.2$ と $M_T/M_B=\infty$ の場合より、プレストレスの導入による曲げ終局耐力の増大は著しい。一方、プレストレスの導入により、終局ねじり耐力の増大は、終局曲げ耐力の増大よりも小さく、その増大の程度は $M_T/M_B$ の相違によらず、ほぼ同じである。これは、FRPロッドの繊維方向とプレストレスの導入方向が曲げの場合は一致しているが、ねじりの場合は、主引張応力の方向が繊維方向とプレストレスの方向と異なるためである。実構造物の場合、ねじりよりも曲げが卓越している場合がほとんどであるので、FRPロッドを用いた梁はねじりを受

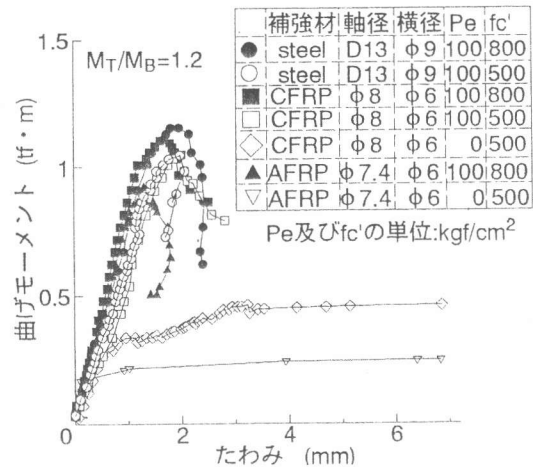


図-8 曲げモーメント-たわみ

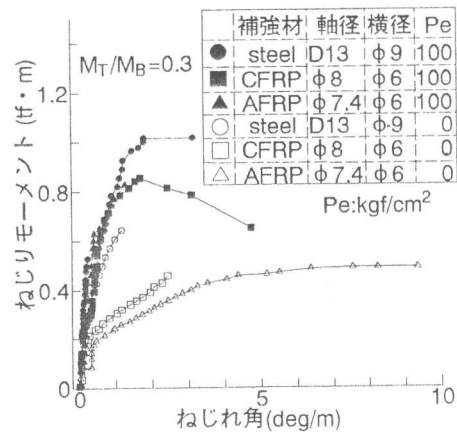


図-9 ねじりモーメント-ねじれ角

ける場合、補強効果はやや小さいけれども、実用できることを図-11は示唆している。

図-12に、終局時の曲げとねじりの相関関係を示す。FRPロッドを用いた梁は、鉄筋を用いた梁の場合と同様、曲げモーメントが卓越するほど、実測値とSwamy式

$$\left\{ \left( \frac{M_{tu}}{M_{tuo}} \right)^2 + \left( \frac{M_{bu}}{M_{buo}} \right)^2 \right.$$

$\left. = 1 \right\}$  による曲線とよく一致しているが、ねじりモーメントが卓越する場合は、実測値がSwamy式による曲線よりもやや小さくなった。 $M_{tuo}$ は、純ねじりを受ける時の終局ねじりモーメントであるが、本実験では、同じ補強材、補強率及び緊張力を持つ梁の場合の $M_{tuo}$ の実験値を使用した。 $M_{buo}$ は、純曲げを受ける時の終局曲げモーメント、本実験は、従来の理論式を使って求めた。 $M_{tu}$ 、 $M_{bu}$ ：曲げとねじり組み合わせ荷重を受ける時の終局ねじり及び曲げモーメントである。

#### 4. まとめ

1) プレストレス及びコンクリートの強度を増大することにより、FRPロッドを用いたPC梁は、ひび割れ発生荷重及び終局耐力を増大でき、曲げ剛性及びねじり剛性を維持するのに有効である。

2) FRPロッドを用いた梁で、曲げとねじりを受ける場合、プレストレスの導入により、曲げ耐力は著しく増大するが、ねじり耐力の増大は曲げの場合ほどではない。

3) FRPロッドを用いたPC梁では、ねじりと曲げとの組み合わせ荷重を受ける場合、曲げモーメントが卓越するほど、終局ねじりモーメント及び終局曲げモーメントの実験値は、Swamy式による曲線とよく一致したが、ねじりモーメントが卓越する場合は実験値の方が計算値よりやや小さくなった。

#### 5. あとがき

東京製鋼(株)および熊谷組よりCFRPの提供を、住友建設および帝人より、AFRPの提供を受けた。関係各位に御礼申し上げます。

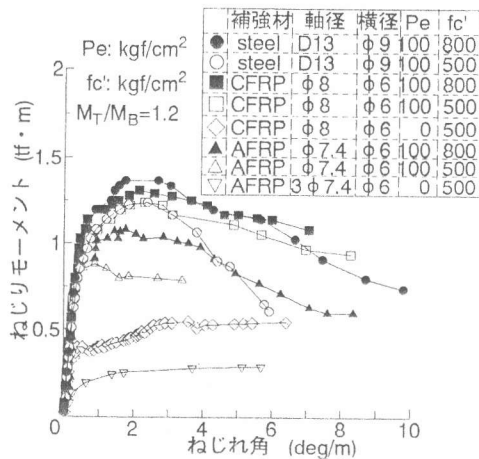


図-10 ねじりモーメント-ねじれ角に及ぼすコンクリートの強度の影響

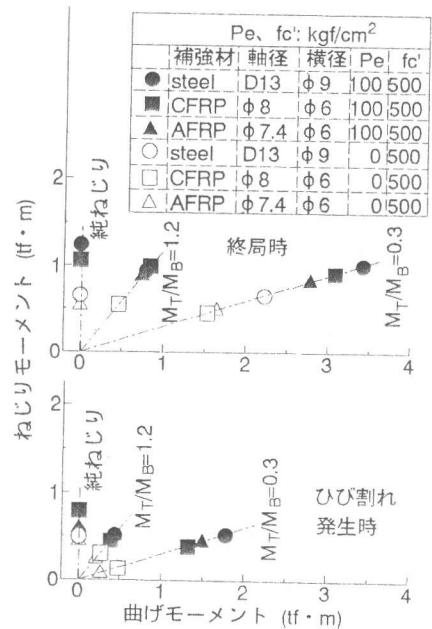


図-11 ねじりモーメントと曲げモーメントとの相関関係

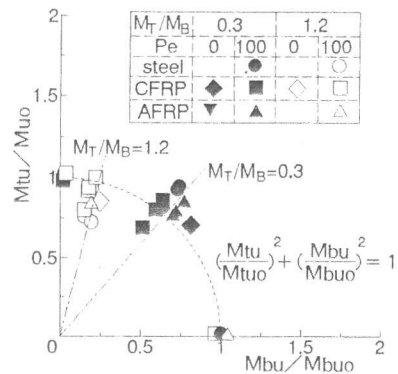


図-12 終局における曲げモーメント-ねじりモーメントとの相関関係