

報 告

[2186] FRP 棒材を用いたはりの力学特性に及ぼすかぶりの影響
について末岡英二^{*1}・中村亮太^{*2}・眞嶋光保^{*3}・新屋敷保^{*4}

1. はじめに

FRP 棒材（連続繊維棒材）は、軽量、高強度、高耐食性等の特長を持つことから RC 構造物や PC 構造物あるいは既存構造物の補強工法への有効利用が検討されている。その一つとして海洋環境等の厳しい腐食環境下でのかぶりの小さな構造物への適用も考えられている[1]。かぶり厚さは耐久性や耐火性の確保の上で必要であるばかりでなく、補強筋とコンクリートの付着性状においても重要な要因となる。特に FRP 棒材で補強した部材においては、FRP 棒材が鉄筋と比較して付着強度が小さいことや、弾性係数が小さいため部材のたわみも大きくなることから、特に力学的な観点からかぶりの検討が必要となる。本稿は、かぶりを数種類に変化させた FRP 棒材を用いたはり部材の曲げ載荷試験を行い、かぶりがあり部材の力学特性に及ぼす影響を調べた結果を報告するものである。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

はり部材作製に用いた FRP 棒材は、連続繊維として炭素繊維およびアラミド繊維の 2 種類とした。炭素繊維の成形方法はより線状と

組み紐状の 2 種類、アラミド繊維の成形方法は組み紐状の 1 種類とした。また、比較のために鉄筋（SD-295）を用いたはりも作製した。各補強筋の特性を表-1 に示す。コンクリートは水セメント比 50%、スランプ 12 cm のものとした。その強度特性を表-2 に示す。

2. 2 試験体諸元および実験ケース

試験体は図-1 に示すようにスパン 110 cm、 $a/d=2.58$ のはり部材であり、有効高さを一定とし、かぶりを 6 ~ 39 mm の 4 種類（断面の幅:10 cm、高さ 16.7 ~ 20 cm）に変化させた。試験体は各ケースで 2 体ずつ作製した。実験ケースを表-3 に示す。

表-1 補強筋の特性

繊維の種類	公称直径 (mm)	公称断面積 (mm ²)	引張強度 (kgf/mm ²)	弾性係数 (kgf/mm ²)	弾性伸び (%)
炭素(より線)	12.8	76.0	230	14,400	1.60
炭素(組み紐)	12.8	128.3	199	11,200	1.77
アラミド(組み紐)	12.9	130.1	161	6,930	2.33
鉄筋(SD295)	12.7	126.7	30	21,000	0.20

表-2 コンクリートの強度特性

試験体名	圧縮強度 (kgf/cm ²)	曲げ強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 $\times 10^6$ (kgf/cm ²)
STEEL	415	47.7	2.48
CFCC	423	41.0	2.61
FIBC	439	53.6	2.65
FIBA	432	48.0	2.55

表-3 実験ケース

試験体名	繊維の種類	かぶり (mm)	有効高さ (mm)	全高さ (mm)	補強筋比
STEEL-6	鉄筋	6	155	168	0.0163
STEEL-13		13		174	
STEEL-26		26		187	
STEEL-39		39		200	
CFCC-6	炭素 (より線)	6	155	168	0.0098
CFCC-13		13		174	
CFCC-26		26		187	
CFCC-39		39		200	
FIBC-6	炭素 (組み紐)	6	155	168	0.0166
FIBC-13		13		174	
FIBC-26		26		187	
FIBC-39		39		200	
FIBA-6	アラミド (組み紐)	6	155	168	0.0168
FIBA-13		13		174	
FIBA-26		26		187	
FIBA-39		39		200	

*1 東洋建設(株)鳴尾研究所 材料研究室 主任研究員、工修(正会員)

*2 東洋建設(株)鳴尾研究所 材料研究室 研究員(正会員)

*3 大阪市立大学 工学部助教授、工博(正会員)

*4 大阪市立大学 工学部

2. 3 試験方法および試験項目

曲げ載荷試験は対称 2 点載荷で行い、いずれの試験体もひび割れ発生時および耐荷力の計算値の1/2程度（FRP 試験体:5ton、鉄筋試験体:3ton）で一旦除荷して繰り返し載荷を行った後、破壊まで静的載荷した。載荷速度は概ね 0.75ton/分程度であった。計測は荷重、はりの変位、補強筋とはり上下縁のコンクリートのひずみ、およびひび割れ幅について行った。補強筋のひずみはスパン全域にわたって 15 箇所、ひび割れ幅は曲げ区間のみ測定した。

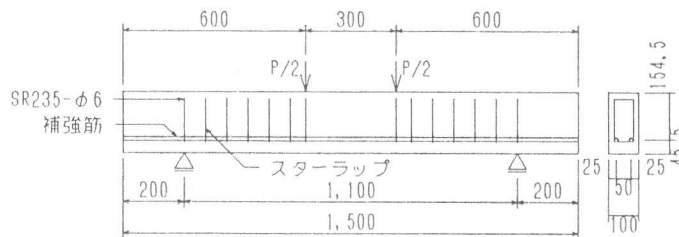


図-1 試験体諸元

3. 実験結果および考察

3. 1 破壊形式および耐荷力

試験結果一覧を表-4に示す。鉄筋を用いたはりでは鉄筋の降伏による曲げ破壊であった。FRP 棒材を用いたはりでは、RC 示方書による方法で求めた計算値では曲げ破壊が予想されたものも、既往の知見と同様斜め引張り破壊が先行したものが多かった[2][3]。なお、かぶり 39 mm の一部のはりでは曲げ圧縮破壊を起こしており、かぶりの小さいはりが斜め引張り破壊を起こしやすい傾向にあった。また、かぶりによる耐荷力の違いはあまり見られなかった。

表-4 試験結果一覧

試験体名	曲げひび割れ発生荷重 (tf)			最大ひび割れ間隔 (cm)		最大ひび割れ幅 (mm)		耐荷力 (tf)	曲げ耐荷力 (tf)	せん断耐荷力 (tf)	耐荷力	破壊モード
	実験値EX	計算値CU	EX/CU	実験値EX	計算値CU	実験値	実験値EX				EX/CU _{MIN}	
STEEL-6	0.75 0.66	1.42	0.53 0.46	6.0 5.0	5.7	0.16 0.19	5.30 5.43	5.44	9.95		0.97 1.00	鉄筋の降伏 鉄筋の降伏
STEEL-13	0.80 0.75	1.47	0.54 0.51	10.0 7.0	8.1	0.22 0.21	5.71 5.71				1.05 1.05	鉄筋の降伏 鉄筋の降伏
STEEL-26	0.65 0.76	1.59	0.41 0.48	8.0 7.0	13.3	0.41 0.21	5.83 5.71				1.07 1.05	鉄筋の降伏 鉄筋の降伏
STEEL-39	0.68 0.75	1.75	0.39 0.43	14.0 10.0	18.5	0.34 0.39	5.40 5.79				0.99 1.06	鉄筋の降伏 鉄筋の降伏
CFCC-6	0.76 0.99	1.06	0.72 0.93	7.0 7.0	5.7	1.65 1.07	9.41 10.39	10.30	9.98		0.94 1.04	斜め引張 斜め引張
CFCC-13	0.75 0.50	1.13	0.66 0.44	11.0 9.0	8.1	1.56 1.36	9.54 10.25				0.96 1.03	斜め引張 斜め引張
CFCC-26	1.07 0.78	1.26	0.85 0.62	10.0 10.0	13.3	1.01 2.12	8.99 8.83				0.90 0.88	斜め引張 斜め引張
CFCC-39	0.96 0.78	1.42	0.68 0.55	15.0 12.0	18.5	0.61 1.70	7.73 10.25				0.77 1.03	斜め引張 斜め引張
FIBC-6	1.23 0.96	1.42	0.87 0.68	8.0 9.0	5.7	0.69 0.61	10.08 9.25	11.31	10.04		1.00 0.92	斜め引張 斜め引張
FIBC-13	1.00 1.23	1.51	0.66 0.81	8.0 8.0	8.1	0.59 0.57	11.05 10.16				1.10 1.01	斜め引張 斜め引張
FIBC-26	1.21 1.11	1.68	0.72 0.66	12.0 10.0	13.3	1.05 1.02	10.31 10.45				1.03 1.04	斜め引張 斜め引張
FIBC-39	1.10 1.25	1.88	0.59 0.66	14.0 15.0	18.5	2.01 1.60	13.40 10.95				1.33 1.09	コンクリートの圧壊 斜め引張
FIBA-6	1.02 0.88	1.22	0.84 0.72	9.0 10.0	5.7	1.04 1.58	8.50 10.06	9.58	10.01		0.89 1.05	斜め引張 斜め引張
FIBA-13	1.25 1.10	1.30	0.96 0.85	12.0 13.0	8.1	1.34 1.70	9.18 10.27				0.96 1.07	斜め引張 斜め引張
FIBA-26	0.75 0.75	1.47	0.51 0.51	14.0 14.0	13.3	2.08 1.53	9.86 8.80				1.03 0.92	斜め引張 斜め引張
FIBA-39	1.23 0.95	1.65	0.75 0.58	20.0 18.0	18.5	3.18 2.72	11.46 10.88				1.20 1.14	コンクリートの圧壊 コンクリートの圧壊

3. 2 ひび割れ性状

はりのひび割れ発生状況を図-2に示す。曲げひび割れ発生荷重は、全断面を有効として求め

た計算値に比較してかなり小さな値となった。鉄筋を用いたはりには曲げひび割れが進行したが、FRP棒材を用いたはりにはせん断ひび割れが卓越した。また、底面におけるひび割れはFRP棒材を用いたはりにおいて、かぶりが大きい場合（かぶり26mm、39mm）には軸直角方向のみに発生したが、かぶりの小さい場合（かぶり6mm、13mm）においては、破壊直前に補強筋に沿ったひび割れが数本見られた。

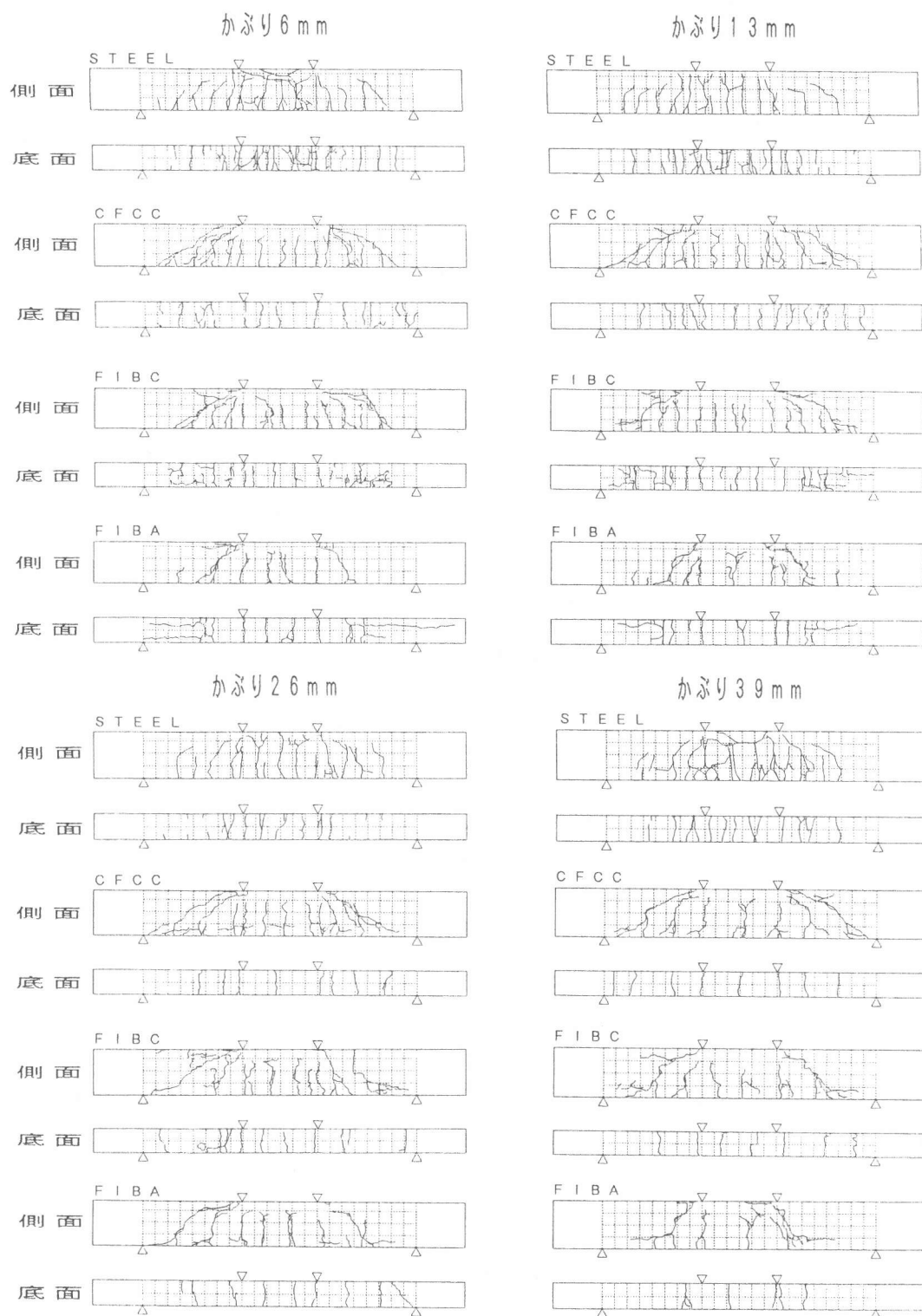


図-2 ひび割れ発生状況

かぶりとひび割れ幅およびひび割れ間隔の関係をそれぞれ図-3、図-4に示す。ここで鉄筋を用いたはりのひび割れ幅は、鉄筋の降伏前の値とした。FRP棒材を用いたはりのひび割れ幅は、FRP棒材のひずみが大

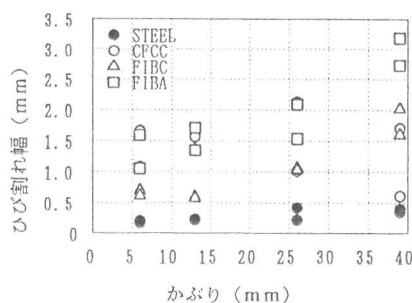


図-3 かぶりとひび割れ幅の関係

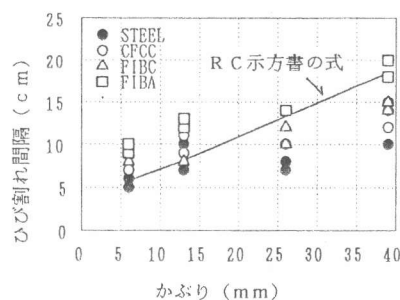


図-4 かぶりとひび割れ間隔の関係

きいために、鉄筋を用いたはりに比較して大きく、特に弾性係数の小さいアラミド繊維を用いたものが大きかった。かぶりによる違いはFRP棒材を用いたはりの方が顕著であり、特にアラミド繊維を用いたはりのかぶり39mmにおいては大きなひび割れ幅を示した。ひび割れ間隔はかぶりが小さくなるにつれて小さくなり、RC示方書におけるひび割れ幅算定式(式-1)におけるひび割れ間隔と比較するとFRPを用いたはりでも比較的良好に合っていた[4]。

$$w = k \{4c + 0.7(c_s - \phi)\} \left[\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{cs} \right] \quad (1)$$

- | | |
|--|---|
| w : ひび割れ幅(cm) | c : かぶり(cm) |
| k : 付着性状の影響を表す定数
異形鉄筋:1.0、丸鋼:1.3 | ϕ : 鋼材径(cm) |
| ε'_{cs} : コンクリートの乾燥収縮およびクリープによるひび割れの増加を考慮するための数値 | c_s : 鋼材の中心間隔(cm) |
| | σ_{se} : 鉄筋応力度の増加量(kgf/cm ²) |
| | E_s : 鋼材の弾性係数(kgf/cm ²) |

また、補強筋のひずみとひび割れ幅の関係をRC示方書の計算式(式-1)と比較して図-5に示す。ここで、補強筋のひずみとひび割れ幅の関係は、それぞれの最も近い測定点のデータを用いて調べた。なお、乾燥収縮等のひずみは考慮していない。鉄筋を用いたものはかぶりの大小に関わらずRC示方書の算定式と良く一致したが、

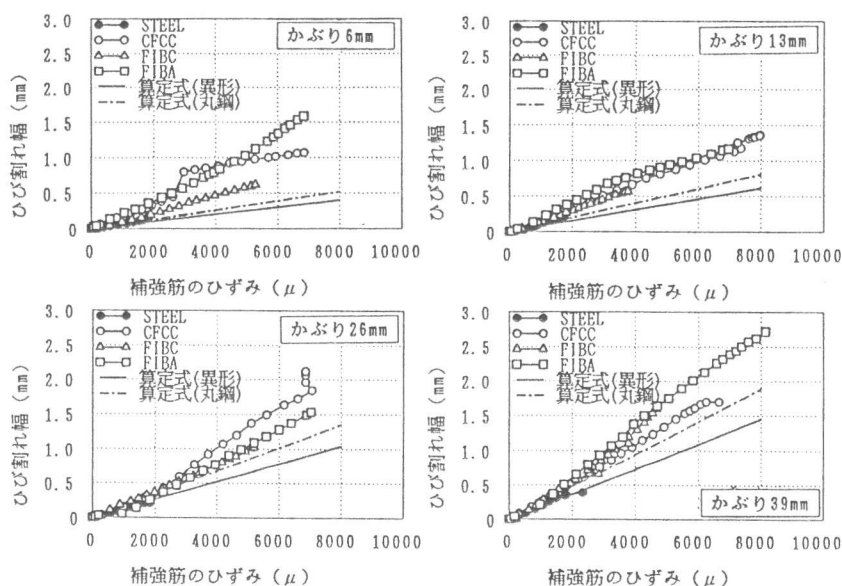


図-5 補強筋のひずみとひび割れ幅の関係

FRP棒材を用いたものは、かぶりが26mm、39mmにおいてはRC示方書の算定式におけ

る丸鋼の場合と比較的合ったものもあったが、概ねひび割れ幅が大きめであった。FRP棒材を用いた場合にRC示方書の算定式と比較的一致する場合もあるが[5]、今回の実験では概ね大きめであった。この主な原因として鉄筋とFRP棒材の付着性状の違いが考えられ、実験結果からFRP棒材の断面剛性やかぶりによっても補強筋のひずみとひび割れ幅の関係に相違が見られた。

3. 3 荷重-たわみ関係

荷重-たわみ曲線を図-6に示す。FRP棒材を用いたよりは鉄筋を用いたはりに比較して弾性係数が小さく、たわみが大きかったが、かぶりによる違いは見られず、ひび割れ発生後のかぶりによる剛性の大きな違いは見られなかった。

3. 4 補強筋のひずみ

各荷重ごとの補強筋のひずみ分布を図-7、8に示す。鉄筋のひずみは、かぶりの小さいはりの方が大きい傾向があったが、FRP棒材においては、弾性係数の大きいものでは若干その傾向が見られたが、弾性係数の小さいものや断面積の小さいものにおいてはあまり見られなかった。

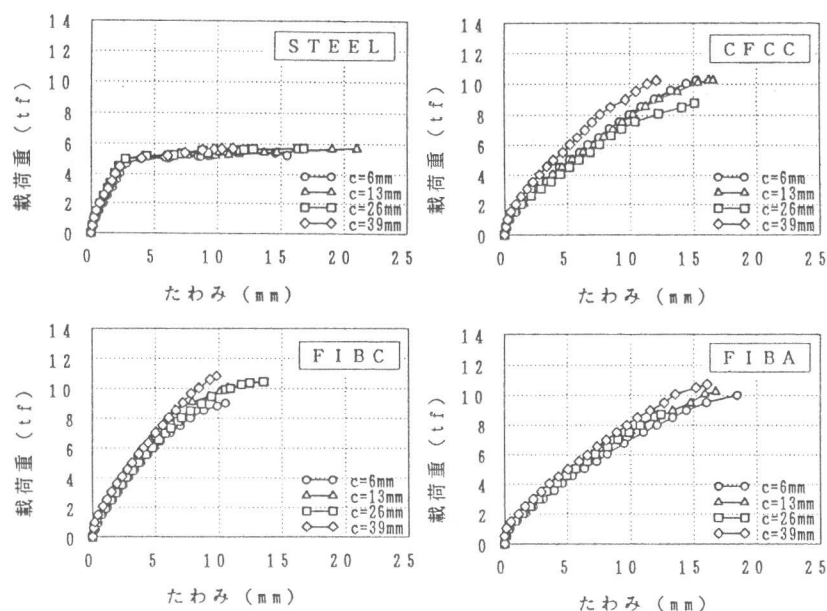


図-6 荷重-たわみ曲線

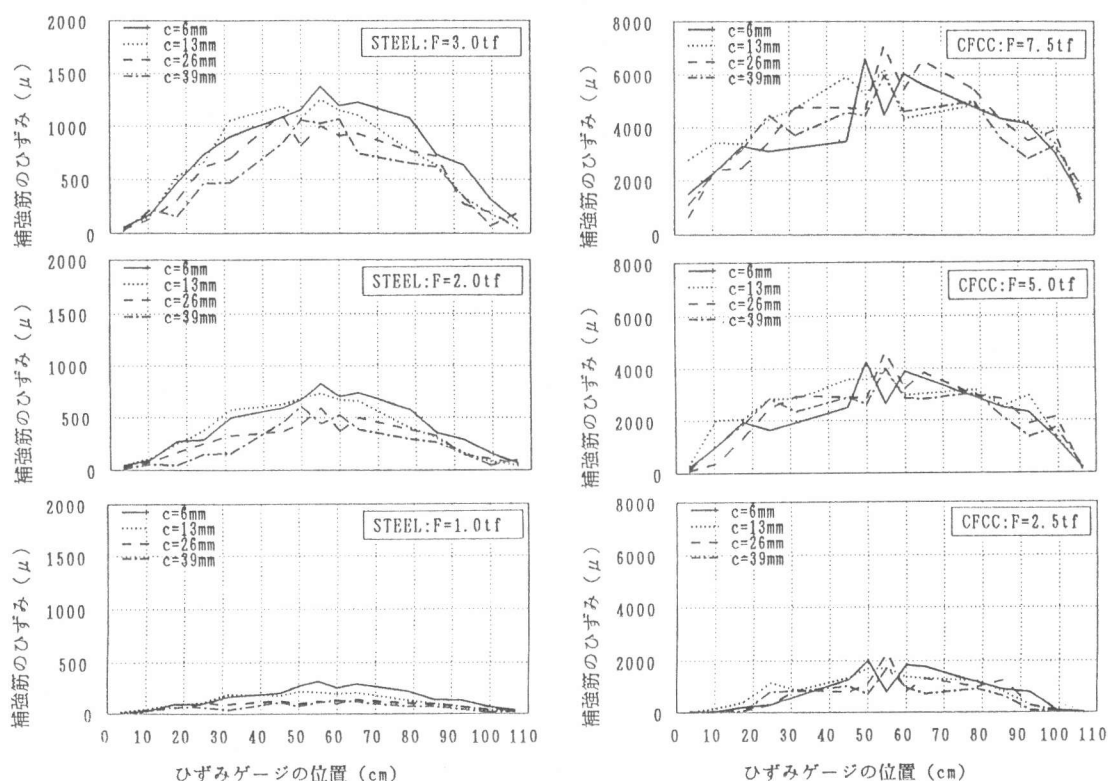


図-7 補強筋のひずみ (STEEL、CFCC)

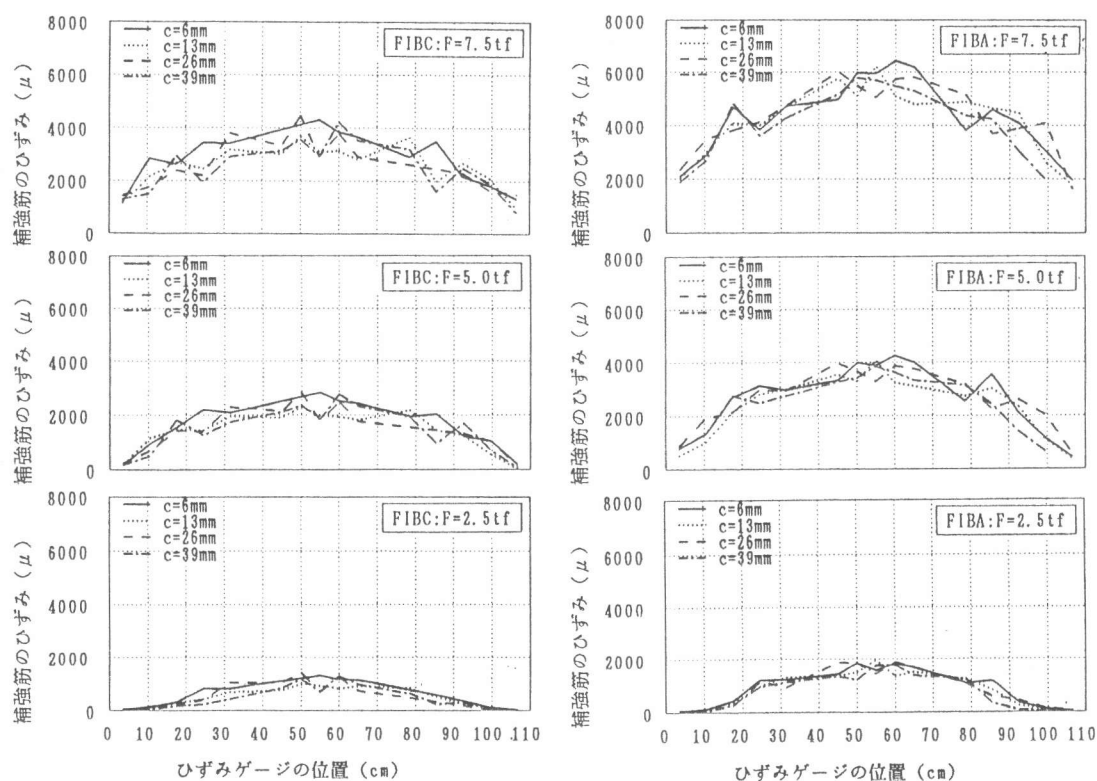


図-8 補強筋のひずみ (FIBRC、FIBA)

まとめ

- (1) FRP棒材を用いたはり、かぶりによる耐荷力や荷重-たわみ関係の違いはあまり見られなかった。破壊形式は概ね斜め引張り破壊であり、特にかぶりの小さい場合にその傾向が見られた。
- (2) かぶりが小さい場合 (今回の実験では6mm、13mm)、破壊前に補強筋に沿った軸方向のひび割れが若干発生した。
- (3) FRP棒材を用いたはりのひび割れ幅は、RC示方書における補強筋のひずみから算定する方法で求めた値と比較して大きな値となった。その主な原因として鉄筋とFRP棒材の材質や表面形状の違いによるコンクリートとの付着性状の相違が考えられた。また、実験結果から、かぶり厚さやFRP棒材の断面剛性等によっても若干の違いが見られた。
- (4) かぶりによる補強筋のひずみの大きな違いはなかったが、鉄筋や比較的大きな弾性係数のFRP棒材を用いた場合には、かぶりの大きなものに比べて小さい方が若干大きかった。

参考文献

- [1] 中畑雅司・安岡啓一・鹿籠雅純・酒井徳久・清宮理・福手勲:FRPを用いた合成梁の曲げ性状、連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関するシンポジウム講演論文報告集, pp. 143-148, 1992
- [2] コンクリート標準示方書 [平成3年版] 設計編, 土木学会, pp51-52, pp57-58
- [3] 田中正和・眞嶋光保:各種FRPロッドを用いたFRP筋コンクリートの曲げ挙動特性、連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関するシンポジウム講演論文報告集, pp. 129-134, 1992
- [4] コンクリート標準示方書 [平成3年版] 設計編, 土木学会, pp85-88
- [5] 鹿籠雅純・清宮理・山田昌郎・末岡英二:FRPを用いた合成梁の力学性状、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 2 pp. 679-684, 1992