

論文

[2122] 多段配筋を有する CFRP はりの曲げひび割れ性状

正会員○山本康之 (清水建設)
 正会員 丸山久一 (長岡技術科学大学)
 清水敬二 (長岡技術科学大学)
 大高昌彦 (長岡技術科学大学大学院)

1. はじめに

FRP ロッドは、引張剛性が鉄筋に比べて低いため、RC 部材において鉄筋の代替品として用いる場合、使用限界状態での曲げひび割れ幅が大きくなると予想され、水密性、気密性、そして美観において特にその制限が必要になると考えられる。一方、FRP ロッドを主筋に用いた RC 部材のより現実的な使用という観点から、FRP ロッドの多段配筋または FRP ロッドと鉄筋の多段配筋なども考えられる。

そこで本研究では、2次元格子状の CFRP ロッドを主筋に用いるとして、多段配筋とした場合のはりの曲げひび割れ性状を実験的に検討し、ひび割れ間隔、ひび割れ幅の算定方法を検討したものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

今回実験に使用した FRP ロッドは、PAN 系炭素繊維をビニルエステル樹脂で被覆し、20cm ピッチの 2次元格子状に成形したものである(以下 CFRP ロッドと記す)。表 1 に CFRP ロッドの力学特性を示す。コンクリートは呼び強度 300 kgf/cm² のレデーミクストコンクリートで、セメントは早強ポルトランドセメント、骨材は粗骨材の最大寸法 25mm のものを使用した。

2.2 供試体の形状

供試体の形状および寸法の一例を図 1 に、供試体の一覧を表 2 に示す。主たるパラメータは、①主筋比、②かぶり厚さ、③軸方向補強材の配筋状態(段数、主筋の材質、鉛直あき)、④断面形状である。なお、格子間隔は 20cm で一定とした。

2.3 載荷方法

図 2 に載荷装置を示す。載荷は変位制御の対称 2 点集中載荷とし、左右の荷重の差を

表-1 CFRP ロッドの力学特性

種類	断面積 (cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	破断ひずみ (%)
C 9	0.32	12006	9.4×10 ⁵	1.4
C 1 1	0.47	12012	9.4×10 ⁵	1.4
C 1 3	0.63	12012	9.4×10 ⁵	1.4
C 1 6	1.03	11964	9.4×10 ⁵	1.4
C 2 2	1.98	11987	9.4×10 ⁵	1.4

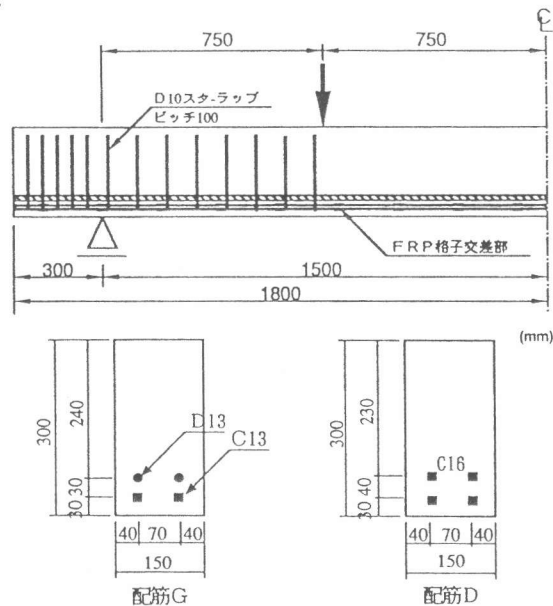


図-1 供試体の形状及び諸寸法

なくすため、荷重分配桁の下に相互をパイプで連結した油圧ジャッキを用いた。

また、軸方向の拘束をなくし、左右の変形を等しくするため、両端ともローラー支承とした。

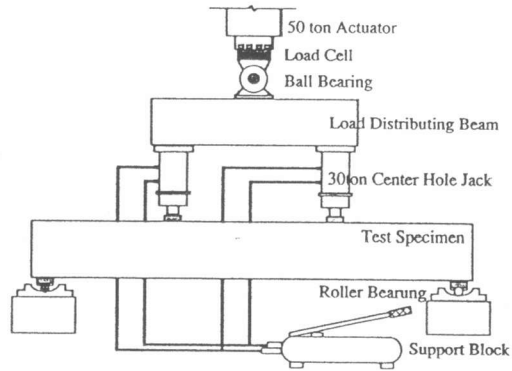


図-2 荷重装置

3. 実験結果および考察

3.1 破壊荷重

表3に、曲げひび割れ発生荷重、破壊荷重、平均ひび割れ間隔に関する実験結果を示す。算定値は、曲げひび割れ発生荷重は弾性計算により、曲げ破壊荷重については、断面分割法により求めた。終局は、最外縁のコンクリートひずみが0.35%に達するか、CFRPロッドのひずみが破断ひずみに達するかで定めたが、全てのケースがコンクリートひずみで終局に至った。

いずれも実験結果は計算値とよく一致している。

3.2 平均ひび割れ間隔

(1) 示方書の式との比較

表3に示す平均ひび割れ間隔 L_{ave} は、等曲げモーメント区間で定常状態になったものを対象とした。土木学会コンクリート標準示方書で定められている曲げひび割れ幅 w は、式(1)のようになっている。

$$w = k_1 \{4C + 0.7(C_s - \phi)\} \times (\epsilon_s + \epsilon'_{cs}) \quad (1)$$

表-2 供試体諸元

供試体名	配筋			はり高さ (mm)	有効高さ (mm)	主筋比 (%)	かぶり (mm)	配置間 距離(mm)	
	配筋状態	1段目	2段目						3段目
A	1段配筋	2-C22	—	—	292	250	1.05	35	—
B	1段配筋	2-C22	—	—	275	250	1.05	18	—
C	1段配筋	2-C22	—	—	325	250	1.05	68	—
D	2段配筋	2-C16	2-C16	—	300	250	1.10	25	40
E	2段配筋	2-C16	2-C16	—	300	250	1.10	35	20
F	2段配筋	2-C16	2-C16	—	300	250	1.10	15	60
G	2段配筋	2-C13	2-D13	—	300	250	1.01	25	30
H	2段配筋	2-C13	2-D13	—	300	250	1.01	15	45
I	2段配筋	2-C13	2-D13	—	300	250	1.01	35	15
J	1段配筋	2-C16	—	—	300	250	0.55	45	—
K	1段配筋	2-C13	—	—	185	150	0.56	26	—
L	2段配筋	2-C9	—	—	200	167	0.51	14	26
M	3段配筋	2-C13	2-C13	2-C13	300	250	1.01	25	20
N	3段配筋	2-C9	2-C9	2-D13	300	250	1.01	24	13
O	2段配筋	2-C11	2-C11	—	300	250	0.51	23	40
P	1段配筋	4-C22	—	—	600	500	0.53	93	—
Q	2段配筋	2-C16	2-C16	—	660	550	0.50	61	88

表-3 実験結果

供試体	圧縮強度 (kg/cm ²)	ひび割れ発生荷重 (tf)		破壊荷重 (tf)		平均ひび割れ 間隔 (cm)	破壊形式
		算定値	実験値	算定値	実験値		
A	309	2.5	2.6	15.2	14.7	24.1	曲げ圧縮
B	296	2.4	2.4	14.7	14.4	19.3	曲げ圧縮
C	338	2.6	2.1	16.0	14.3	37.2	曲げ圧縮
D	300	2.4	2.2	15.2	16.1	18.8	曲げ圧縮
E	309	2.5	2.1	15.4	15.3	19.8	曲げ圧縮
F	331	2.6	2.0	16.5	16.7	17.3	曲げ圧縮
G	331	2.6	2.0	13.6	13.9	11.8	曲げ圧縮
H	319	2.5	2.2	13.6	14.1	9.7	曲げ圧縮
I	240	2.1	1.7	11.2	13.0	12.7	曲げ圧縮
J	235	2.1	1.6	10.1	12.3	27.2	曲げ圧縮
K	300	0.9	1.0	4.3	4.5	17.4	曲げ圧縮
L	300	1.1	1.0	5.1	5.3	17.3	曲げ圧縮
M	309	2.5	2.6	15.1	15.3	14.6	曲げ圧縮
N	300	2.4	2.4	12.7	12.4	9.7	曲げ圧縮
O	278	2.3	2.1	11.5	12.0	19.5	曲げ圧縮
P	320	10.1	10.5	96.7	92.3	33.3	曲げ圧縮
Q	300	11.7	9.7	99.9	100.3	37.3	せん断

ここに、 k_1 ：鋼材の付着性状を表す定数、 C ：かぶり (cm)、 C_s ：鋼材の中心間隔 (cm)、 ϕ ：鋼材径 (cm)、 ε_s ：鋼材のひずみ、 ε'_{ce} ：乾燥収縮などの影響を考慮するための数値

本研究では、①1変数につき供試体は1体しかないこと、②等曲げ区間を比較的長くとっているため、曲げひび割れ本数は数本～10本程度入っていること、および③学会式を多段配筋の場合に拡張すること等の事情から、平均ひび割れ間隔を扱うのが最適と考えた。(1)式の k_1 $\{4C + 0.7(C_s - \phi)\}$ をひび割れ間隔と考えて実測値との適合を考えると、 $k_1=1.38$ の時に実測値と算定値の比が1.00となり、変動係数が15.30%であった。なお、用いたCFRPロッドは20cmピッチの格子を有することから、格子位置にひび割れが入り易い。しかし、ここでは付着メカニズムの詳細な検討はしないので、単純に統計的に k_1 を算定した。

(2) 鉛直方向配置間距離の関係

多段配筋における供試体においては既往の研究[1]より、最下段の鉄筋のかぶりだけではひび割れ間隔は決定できないことが述べられている。そこで2段目の主筋の大きさと鉛直あきの影響が、平均ひび割れ間隔にどのように関係してくるかを調べた。図3は2段配筋における供試体で、2段目の主筋が平均ひび割れ間隔に及ぼす影響を示している。これは図4に示すように、1段目から主筋重心位置までの距離 h_1 と、引張縁から主筋重心位置までの距離 h_2 との比 γ を横軸にとり、縦軸には1段目を対象にして式(1)で求めた値と実測値との差が、2段目の主筋が平均ひび割れ間隔に及ぼした値と考え、その値を図5に示す各パラメーターを用いて式(1)で計算した値で割った結果 η_n (n は段数)を示す。つまり2段目の主筋が平均ひび割れ間隔にどの程度影響を及ぼしたかを指標化した。これより2段目にFRPロッドを配置すると、鉄筋を配置した場合より平均ひび割れ間隔に及ぼす影響が小さいことが認められる。

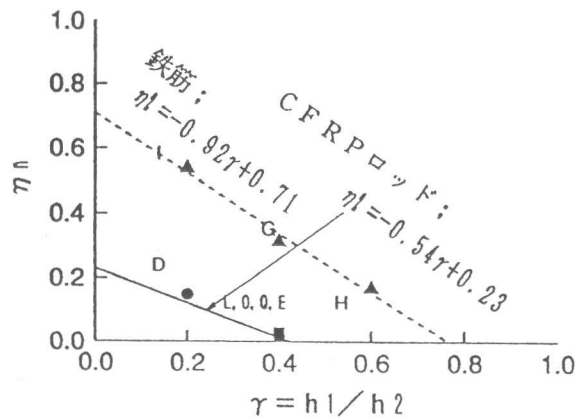


図-3 2段目の主筋が平均ひび割れ間隔に及ぼす影響～1段目FRPの場合

す各パラメーターを用いて式(1)で計算した値で割った結果 η_n (n は段数)を示す。つまり2段目の主筋が平均ひび割れ間隔にどの程度影響を及ぼしたかを指標化した。これより2段目にFRPロッドを配置すると、鉄筋を配置した場合より平均ひび割れ間隔に及ぼす影響が小さいことが認められる。

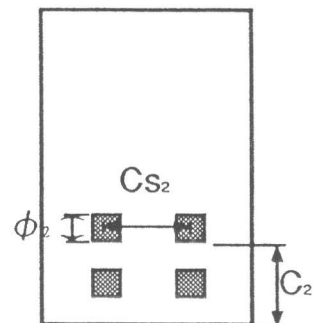
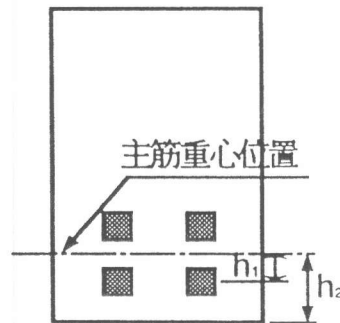


図-4 h_1 と h_2 の定義 図-5 C_2 、 C_{s2} 、 ϕ_2 の定義

4. 多段配筋を有するFRPはりの平均ひび割れ間隔算定

以上より、多段配筋を有するFRPはりにおいて、2段目の主筋の大きさ、鉛直あき、付着性状、横純間隔を考慮した平均ひび割れ間隔算定式を以下に示す。算定式は式(1)を拡張した形とした。

$$L_{avg} = k_1 \{4C + 0.7(CS - \phi)\} - \eta_2 \cdot l_{avg2} \quad (2)$$

ここに、 L_{avg} ：平均ひび割れ間隔(cm)

k_1 ：1段目の主筋の付着性状を表す定数；CFRPロッドの場合 $k_1 = 1.38$

γ ：1段目から主筋重心位置までの距離 h_1 と引張縁端から主筋重心位置までの距離 h_2 との比

$$\gamma = h_1 / h_2$$

η_2 ：2段目にFRPロッドを配置した場合； $\eta_2 = -0.54\gamma + 0.23$

2段目に異形鉄筋を配置した場合； $\eta_2 = -0.92\gamma + 0.71$

l_{avg2} ：2段目の主筋のみを対象として求めたひび割れ間隔(cm)；

$$l_{avg2} = k_2 \{4C_2 + 0.7(CS_2 - \phi_2)\}$$

k_2 ：2段目の主筋の付着性状を表す定数

C_2 ：2段目の主筋のかぶり(cm)

CS_2 ：" の中心間隔(cm)

ϕ_2 ：" の主筋径(cm)

今回は3段配筋の供試体が2体しかなかったため、3段目における η_3 を求めることはできなかった。なお、(2)式を適用した平均ひび割れ間隔の算定値と実測値との関係を図6に示す。16体の実測値と算定値の比で、平均値0.99、変動係数10.33%であった。

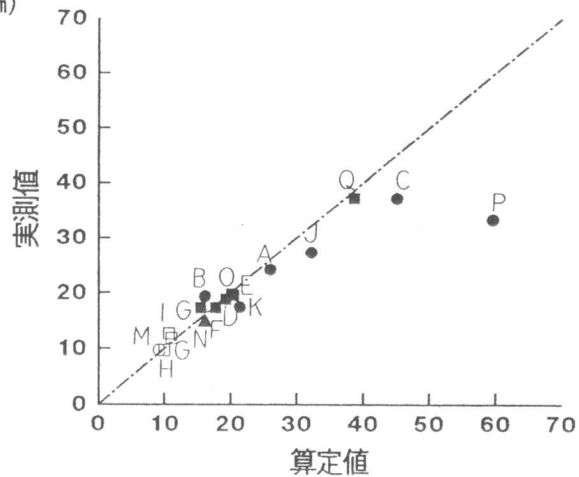


図-6 実測値と算定値の比較
～FRP多段配筋

5. 多段配筋を有するRCはりへの適用

鉄筋コンクリートはりの多段配筋について(2)式の適用性を調べた。図7に供試体の形状及び諸寸法を表4にその諸元を示す。なお(2)式の η_2 の値を求める式は、FRPロッドを引張側1段目に配置したケースであるため、図8に異形鉄筋を引張側縁端に配置した場合の、2段目以降の鉄筋が平均ひび割れ間隔に及ぼす影響 η_2 、 η_3 と、 γ の関係を調べた。

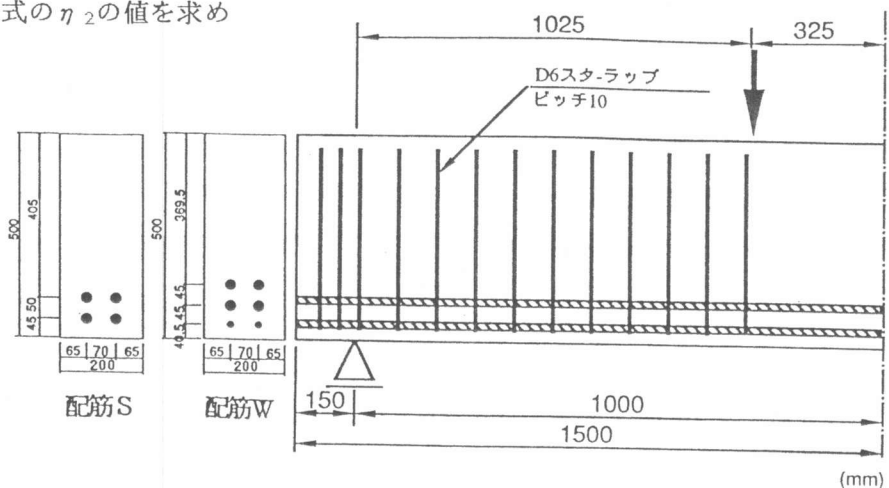


図-7 供試体の形状及び諸寸法

これより、2 段目以降にどの大きさの鉄筋が配置されても、これらの関係は一定の傾きを持つ直線で表されることが分かる。これらの直線の式を η_2 、 η_3 を用いて、(2) 式を適用して求めた平均ひび

表-4 供試体諸元

供試体名	配筋			はり高さ (mm)	有効高さ (mm)	主筋比 (%)	かぶり (mm)	配置間 距離(mm)	
	配筋状態	1 段目	2 段目						3 段目
R	2 段配筋	2-D16	2-D16	—	300	250	2.01	22	40
S	2 段配筋	2-D22	2-D22	—	500	430	1.85	34	50
T	2 段配筋	2-D19	2-D32	—	500	430	2.64	36	60
U	2 段配筋	2-D19	2-D32	—	500	430	2.64	61	26
V	2 段配筋	2-D6	2-D22	—	300	250	2.01	22	25
W	3 段配筋	2-D19	2-D22	2-D22	500	410	2.64	31	45
X	3 段配筋	2-D19	2-D22	2-D22	500	430	2.64	47	21

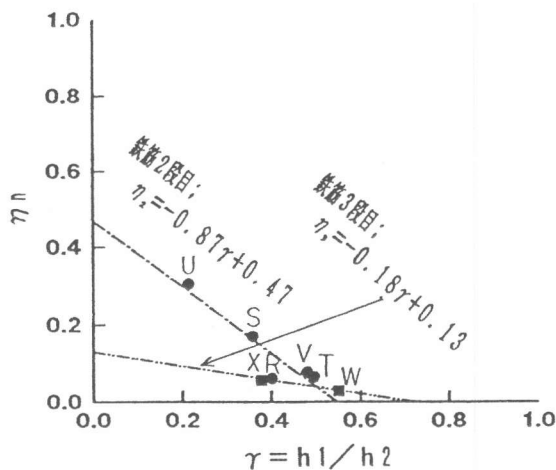


図-8 2 段目の主筋が平均ひび割れ間隔に及ぼす影響～1 段目鉄筋の場合

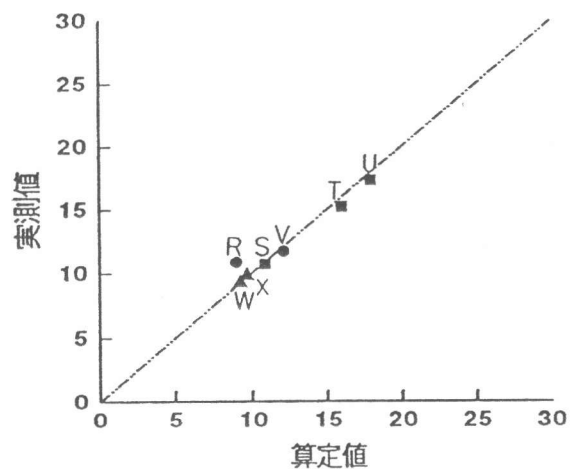
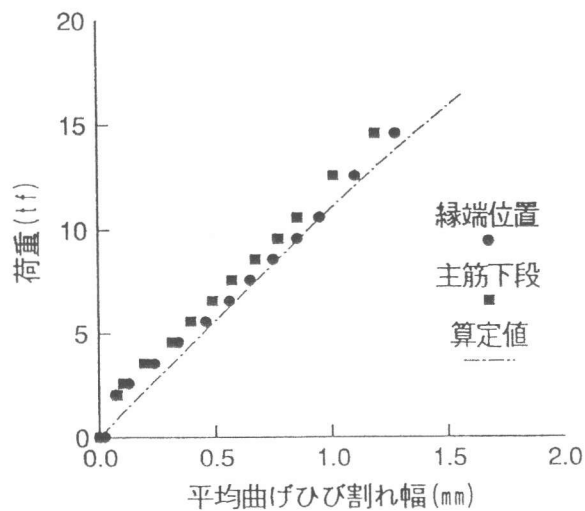


図-9 実測値と算定値の比較
～鉄筋多段配筋

割れ間隔の算定値と定常状態における平均ひび割れ間隔の実測値の関係を図9に示す。なお、7体の供試体に適用した結果は実測値と算定値の比で平均値1.00、変動係数8.11%であった。よって(2)式は鉄筋の多段配筋についても適用可能といえる。

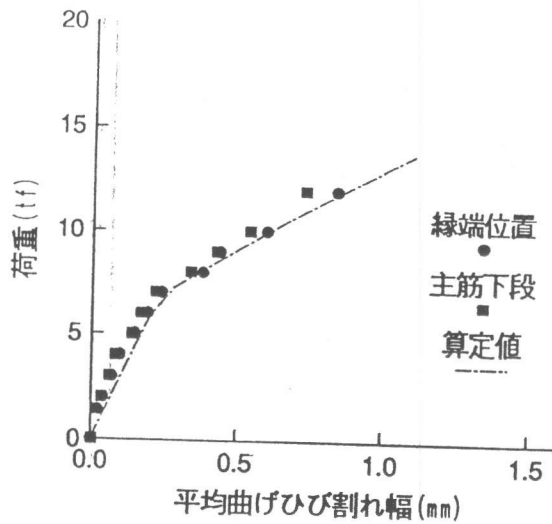
6. 多段配筋の平均ひび割れ幅算定

ひび割れ幅はひび割れ間隔と鋼材のひずみの積であるというひび割れ理論より、(2)式で求めた平均ひび割れ間隔と、断面分割法によって求めた最下段の主筋のひずみとの積で計算した平均ひび割れ幅の算定値と実測値との比較を図10(a)～(c)に示した。なお、曲げひび割れの発生から実験終了まで数時間であったので乾燥収縮等の影響を示す ϵ_{cs} は無視した。図10(a)は配筋FでFRPロッドの2段配筋、図10(b)は配筋Hで鉄筋とFRPロッドの2段配筋、図10(c)は配筋Wで鉄筋の3段配筋で、いず

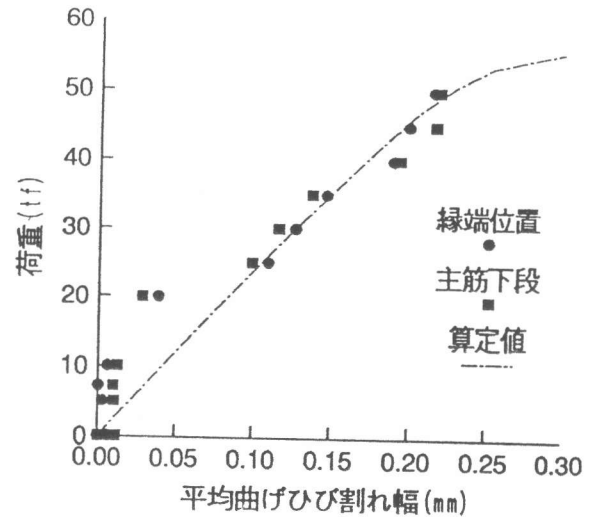


(a) 配筋F～FRP 2 段配筋
図-10 平均ひび割れ幅の算定値と実測値の比較

れの多段配筋も縁端位置において、算定値と実測値は良く一致しているといえる。



(b) 配筋H～FRP+鉄筋



(c) 配筋W～鉄筋3段配筋

図-10 平均ひび割れ幅の算定値と実測値の比較

7. 結論

本実験により得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 多段配筋を有するFRPはりの曲げ耐力は、断面分割法によって算定できる。
- (2) 本研究で提案した算定式は、FRPロッドの1段配筋、2段配筋および鉄筋とFRPロッドの2段混合配筋、さらに鉄筋の多段配筋においても、平均ひび割れ間隔および平均ひび割れ幅を求める上で有効である。

【謝辞】

本論文は筆者が長岡技術科学大学在籍時にとりまとめたもので、実験の遂行にあたって、大学院生の小林俊彦（当時）、趙唯堅、金倉正三諸氏および文部技官の中村祐剛氏に多大な協力を頂きました。また、CFRP等の材料については清水建設（株）の中辻氏にお世話になりました。ここに記して深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 酒井、丸山、清水、中村：多段配筋を有するコンクリートはりのひび割れ性状、コンクリート工学年次論文報告集、1991、pp259-264
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編、1991、10
- 3) 角田与史雄：鉄筋コンクリートの最大ひびわれ幅、コンクリートジャーナルVol. 8, No9, Sept. 1970
- 4) 岡村甫：コンクリート構造の限界状態設計法、共立出版