

論文 RC 梁の連続繊維シートによる曲げ補強に関する実験的研究

Sanjay PAREEK*¹ ・ 倉田 光春*² ・ 外山 隆吉*³

要旨：本研究では、5種類の炭素繊維シートおよび1種類のアラミド繊維シートで補強した鉄筋コンクリート(RC)梁の曲げ試験を行い、連続繊維シートの貼付け方法、梁の荷重-たわみ、断面の歪み分布、ひび割れおよび破壊状況、連続繊維シートの付着性並びに剛性を検討する。今回の実験では未経験者による連続繊維シートの貼付作業を施工条件とした付着性の影響を検討した。又、下地コンクリートと連続繊維シートの付着性を確認するために、破壊後の連続繊維シート状況を観察することによって施工評価を行った。上述の施工条件においても連続繊維シートによる曲げ補強の有無で比較すると、補強した試験体は降伏点荷重、最大荷重とも高くなり、RC梁の曲げ補強に有効であると確認した。

キーワード：連続繊維シート、剛性、歪み分布、破壊状況、凝集破壊、接着破壊、付着性

1. はじめに

近年、地震などの被害を受けた鉄筋コンクリート構造物や老朽・劣化した鉄筋コンクリート構造物の連続繊維シート(Continuous Fiberシート以降CFシートと称す)による補強工法が脚光を浴び、活発な研究開発とともに実用化が進められている¹⁾。この補強法は高強度を有するCFシートを既存のRC構造物のコンクリート表面に貼付するだけで補強効果が期待でき、軽量で、耐久性、施工性にも優れている。

しかし、CFシート補強による力学的挙動を把握するための基礎データが少なく、まだ不明な点が多い。本研究では、5種類の炭素繊維シートおよび1種類のアラミド繊維シートで補強した(RC)梁の曲げ試験を行い、CFシートの貼付方法、梁の荷重(P)-たわみ(δ)、断面の歪み分布、ひび割れおよび破壊状況、CFシートの付着性並びに剛性を検討する。さらに、本実験では、未経験者によるCFシートの貼付作業を行い、耐力に及ぼす影響とCFシートの付着性を検討するために破断後のCFシート破壊割合を測定し、その付着性を評価した。

2. 実験方法

2. 1 使用材料

表-1～3はRC梁の試験体作製に使用した鉄筋、コンクリートおよびCFシートの材料特性と表-4、5にはプライマーおよび含浸用樹脂の基本的性能を示す。

表-1 鉄筋の材料特性

鉄筋種類	降伏点 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)
主筋 D10	3491	4942	2.1×10^4
あばら筋 4φ		4264	

表-2 コンクリートの材料特性

レディミクストコンクリート			
コンクリート種類	呼び強度 (kgf/cm ²)	粗骨材最大寸法 (mm)	セメント種類
普通	210	20	N
	Fシリーズ	F S Iシリーズ	F S IIシリーズ
スランプ(cm)	15.0	18.0	15.5
圧縮強度(kgf/cm ²)	208	219	251

表-3 CF繊維シートの材料特性

シート名	種類	繊維重量 (g/m ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	シート厚さ (mm)
C-TY-2	炭素	200	34300	2.3×10^4	0.11
C-TY-3	炭素	300	34300	2.3×10^4	0.17
C-NS-2	炭素	200	35000	2.3×10^4	0.11
C-NS-3	炭素	300	35000	2.3×10^4	0.17
C-TN-3	炭素	300	30000	3.8×10^4	0.17
A-TJ	アラミド	350	34300	8.0×10^4	0.25

2. 2 試験体作製

図-1に試験体形状寸法と配筋を示す。梁試験体はせい20cm、幅12cmと梁長200cmとし

*1 日本大学助手 工学部建築学科 工博 (正会員)
 *2 日本大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)
 *3 日本大学助教授 工学部建築学科

た。試験体のコンクリートの設計基準強度は 210kgf/cm^2 であり、主筋に D10、あばら筋に D4 を使用した。引張鉄筋比は 0.68% である。本実験では全部で 21 体の試験体であり、3 回に分けて 7 体ずつ打込を行った。28 日間常温で養生した後、5 種類の炭素繊維シートおよび 1 種類のアラミド繊維シートの貼付を行った。図-2 に示すように試験体は引張側に CF シート 1 層で曲げ補強した F シリーズ、U 字型で拘束して曲げ補強した FS I シリーズおよび引張側に 2 層で曲げ補強した U 字型で拘束した FSII シリーズの 3 方法である。

2. 3 試験方法

CF シートの貼付後、7 日間常温で養生し、図-1 に示すようにアムスラー型万能試験機に設置し、単純梁形式の 2 点集中単調荷方式で一定速度で鉛直方向に荷重した。荷重は 10t のロードセルを用いて測定し、変位計による荷重点・中央変位、歪みゲージにより主筋、CF シートの歪み、コンクリートの歪みを測定した。

3. 実験結果および考察

3. 1 耐力

表-6、7 は F、FS I および FSII シリーズ試験体の曲げ耐力および剛性の実験結果一覧を示す。CF シートで補強したすべての試験体について、比較用シート無補強 RC 梁試験体(以降 Plain と称す)と比較すると、引張鉄筋降伏荷重時においては約 30~70%、最大耐力で約 50~150% 増加し、その補強効果は確認された。アラミド CF シート(A-TJ)除いて、実験値と計算値の比較は F、FS I および FSII シリーズにかかわらず、ほぼ一致あるいは上回った。さらに、引張側に 2 層補強した FSII シリーズ試験体はもっとも大きい値を示し Plain の約 1.7~2.4 倍程

表-4 プライマーの基本的性能

種類	成分		混合比(重量比)	比重	粘度(MPa·s)	可使時間(min)
	主剤	硬化剤				
T.Y	ビスフェノール A 型	変性脂肪族ポリアミン	3:1	1.12	690	60
NS			5:2	1.10	1800	60
TN	エポキシ樹脂		2:1	1.19	2000	50
T.J			2:1	1.16	1300	60

表-5 含浸用樹脂の基本的性能

種類	成分		混合比(重量比)	比重	粘度(MPa·s)	可使時間(min)
	主剤	硬化剤				
T.Y	ビスフェノール A 型	変性脂肪族ポリアミン	3:1	1.16	13700	60
NS			2:1	1.13	34000	60
TN	エポキシ樹脂		2:1	1.17	40000	50
T.J			2:1	1.16	2900	60

度である。CF シート補強試験体の剛性は、Plain に比べて初期剛性で 0.80~2.00 倍、2 次剛性で 1.08~1.86 倍、3 次剛性で 20~115 倍程度の値を示し、曲げひび割れ発生後の剛性は高まる。

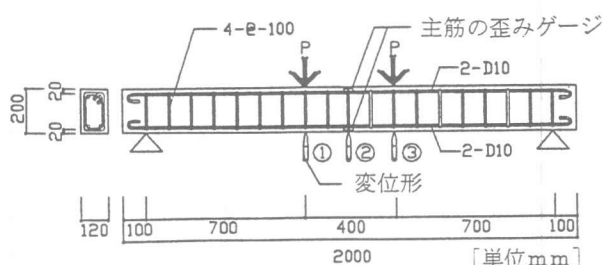


図-1 試験体形状および配筋図および荷重方法

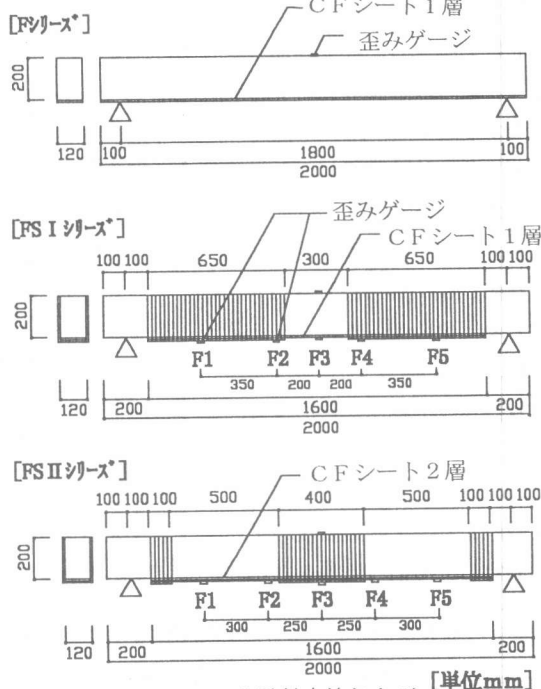


図-2 CF シート貼付方法および歪みゲージの貼付位置

表-6 F、FSIおよびFSII試験体の曲げ耐力

試験体名	シート 厚さ* (mm)	Fシリーズ**			FSIシリーズ			FSIIシリーズ		
		曲げ耐力(最大耐力)			曲げ耐力(最大耐力)			曲げ耐力(最大耐力)		
		実験値 (tf)	計算値 Q _{mu} (tf)	比較値 実/計	実験値 (tf)	計算値 Q _{mu} (tf)	比較値 実/計	実験値 (tf)	計算値 Q _{mu} (tf)	比較値 実/計
Plain		1.30	1.29	1.03	1.40	1.15	1.22	1.47	1.15	1.28
C-TY-2	0.11	2.30	2.08	1.10	2.15	1.79	1.20	2.55	2.44	1.05
C-TY-3	0.17	2.40	2.49	0.96	2.75	2.15	1.28	3.25	3.15	1.03
C-NS-2	0.11	2.40	2.08	1.15	2.15	1.81	1.19	2.55	2.47	1.03
C-NS-3	0.17	2.70	2.51	1.07	2.60	2.17	1.20	3.19	3.19	1.00
C-TN-3	0.17	3.10	2.33	1.33	2.55	2.02	1.26	3.49	2.90	1.20
A-TJ	0.25	2.50	3.05	0.82	2.80	2.62	1.07	2.91	4.09	0.71

*設計厚さは、強化繊維の断面積から算定した補強計算用のCFシート厚さです。 **参考のために掲載した。

Q_{mu}: CFシート補強曲げ耐力

$Q_{mu} = (0.9\sigma_y \cdot at \cdot ds + 2/3 \cdot 0.9 \cdot fat \cdot f_{\sigma u} \cdot df) a$

σ_y : 主筋降伏応力度

fat: CFシート断面積

at: 引張鉄筋断面積

$f_{\sigma u}$: CFシート降伏応力度

ds: 鉄筋有効梁せい

df: CFシートの圧縮端からの距離

表-7 F、FSIおよびFSII試験体の剛性

試験体名	シート 厚さ* (mm)	Fシリーズ			FSIシリーズ			FSIIシリーズ		
		剛性(tf/mm)			剛性(tf/mm)			剛性(tf/mm)		
		初期剛性 K _c	2次剛性 K _y	3次剛性 K _u	初期剛性 K _c	2次剛性 K _y	3次剛性 K _u	初期剛性 K _c	2次剛性 K _y	3次剛性 K _u
Plain		0.639	0.194	0.001	0.773	0.207	0.001	0.680	0.260	0.003
C-TY-2	0.11	0.992	0.201	0.039	0.914	0.300	0.040	0.957	0.392	0.081
C-TY-3	0.17	0.715	0.321	0.044	0.814	0.250	0.046	0.700	0.307	0.100
C-NS-2	0.11	1.182	0.220	0.055	0.967	0.364	0.038	0.719	0.296	0.055
C-NS-3	0.17	1.009	0.232	0.041	0.825	0.350	0.069	0.800	0.312	0.099
C-TN-3	0.17	0.680	0.323	0.079	0.825	0.330	0.090	0.807	0.307	0.115
A-TJ	0.25	0.646	0.226	0.028	0.636	0.386	0.033	1.120	0.283	0.046

*設計厚さは、強化繊維の断面積から算定した補強計算用のシート厚さです。

K: 剛性(実験値)

K_c: 曲げひび割れ発生時までの剛性

$K = Q/\delta$

K_y: K_cから主筋降伏時までの2次剛性

K_u: K_yから最大耐力時までの3次剛性

3. 2荷重-たわみ関係

図-3にF、FSIおよびFSIIシリーズ試験体の荷重(P)-中央たわみ(δ)関係を示す。最大耐力以降は、中央点変位が50mmになるまで試験を行った。Plainの試験体について、降伏時のたわみは約4mmで、最大荷重時にはたわみが約10mmに達する。CFシートの種類に関わらず、補強した試験体の降伏荷重時(主筋降伏時)のたわみは5~7mm程度であり、FSIIシリーズのC-TY-3、C-NS-3、C-TN-3およびA-TJが降伏時のたわみは著しく大きいことが分かる。CFシートで補強した試験体の中で、C-TN-3試験体がかつとも高い最大荷重、A-TJ試験体は荷重の上昇と共にたわみが上昇し、優れた伸び能力を示す。FSIIシリーズのC-TY、C-NS試験体の場合は貼付した2層CFシート中1層が破断すると、FSIシリーズの試験体と同様な曲線を描き、もう1層が破断するとPlainと同じ曲線を描いた。FSIのA-TJ試験体につ

いてはCFシートの破断は起きないが終局時にはFSIIのA-TJとほぼ同じ強度にまで上昇した。

3. 3破壊状況

図-4にF、FSIおよびFSII試験体の曲げ試験後のひび割れ図を示す。Plain試験体の場合、載荷点周辺に曲げひび割れが集中しており、曲げ破壊が生じた。CFシートで引張側のみ補強したFシリーズの試験体で大きな音と共に急激に引張側のコンクリートが破断し、広範囲にわたって引張側にひび割れが現れた。終局時にはすべての試験体とも貼付したCFシートが剥離した。CFシートで補強したFSIシリーズ試験体において、側面に貼付したCFシートで引張側のCFシートの伸びが拘束されることによって、載荷点間に高い応力の集中が生じ、載荷点間に曲げひび割れ、引張側および圧縮側コンクリートの凝集破壊(CFシートにコンクリートが付着したままコンクリートが破断すること)の発生と同時にCFシートが破断した。FS

IIシリーズ試験体の場合は、荷点間で U 字型で拘束することと引張側 2 層の CF シートを貼付することによって、曲げひび割れがおさえられ、せん断スパン間にせん断ひび割れが発生した。ほとんどの試験体の CF シートがせん断スパン間で破断して、破壊に至った。

図-5 には曲げ試験による引張側底面の破壊状況図を示す。F シリーズ試験体に関して荷点周辺でコンクリートの凝集破壊による CF シートとコンクリート間で完全な付着性が確認され、せん断スパン間で CF シートの接着破壊 (CF シートとコンクリートの間が剥離するこ

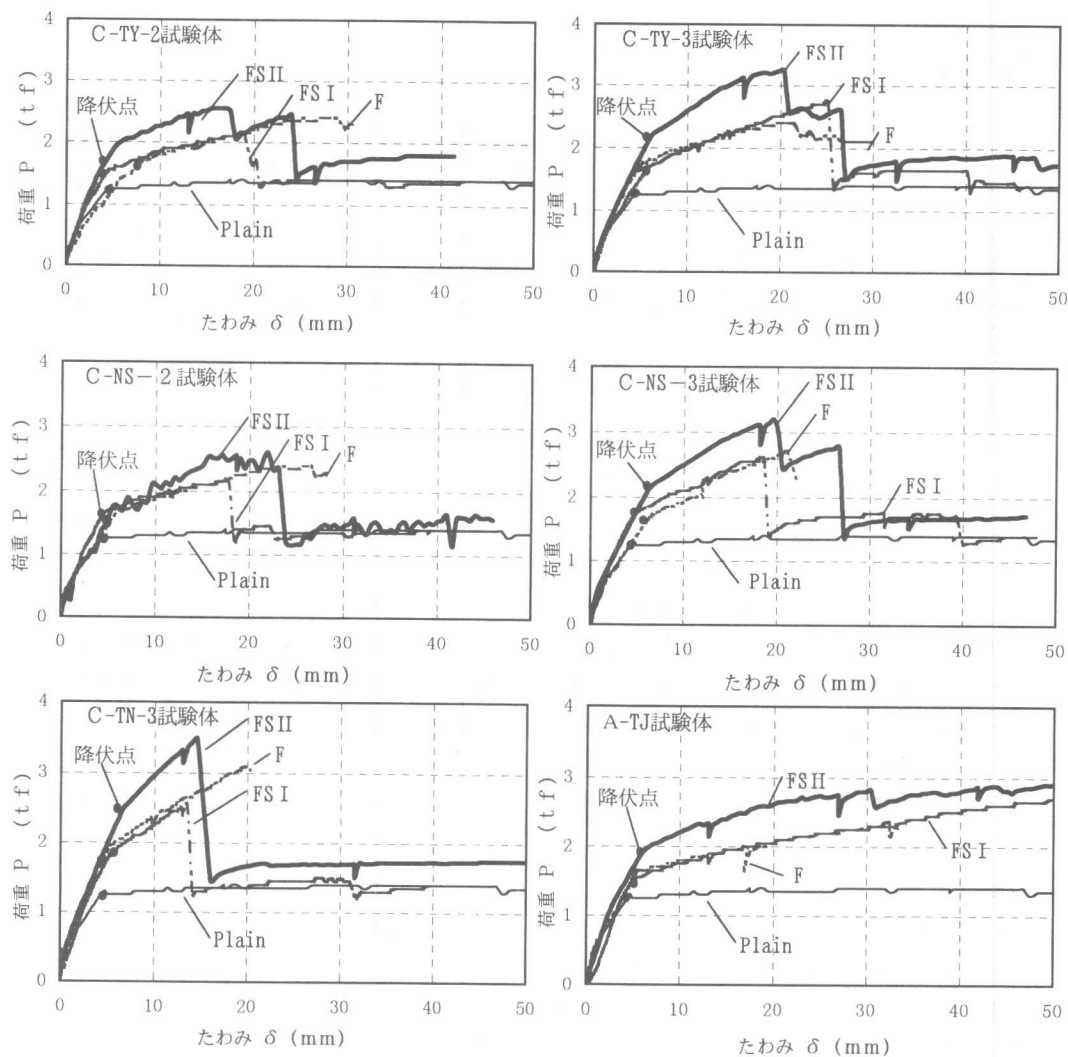


図-3 F、FSIおよびFSIIシリーズ試験体の荷重 (P) -たわみ (δ) 関係包絡線比較

と)も見られた。FS Iシリーズ試験体の場合は
 載荷点間での応力の集中に伴い、コンクリート
 の中の凝集破壊が生じ、CF シートが破断に至
 った。FSIIシリーズ試験体は載荷点間にCF シート
 で U 字型で拘束したため、応力の集中がせん断ス
 パン間に進展し、コンクリートの凝集破壊と同時にCF
 シートの破断が特徴であった。

図-6 には F、FS I および FS II 試験体にお
 ける引張側 CF シートの破壊割合を示す。F シ
 リーズの試験体の引張側CF シートが約20%コ

ンクリートの凝集破壊、約80%が接着破壊を表
 す。これは載荷点間に働く応力の集中に伴い起
 くるコンクリートの凝集破壊およびせん断ス
 パン間にせん断力による接着破壊と判断された。
 FS I および FSII シリーズは約80%がCF シー
 トの無剥離、10~20%がコンクリートの凝集破
 壊を示す。これは、未経験者が行った CF シー
 トの貼付作業でも良好な接着性が得られた結果
 と言える。

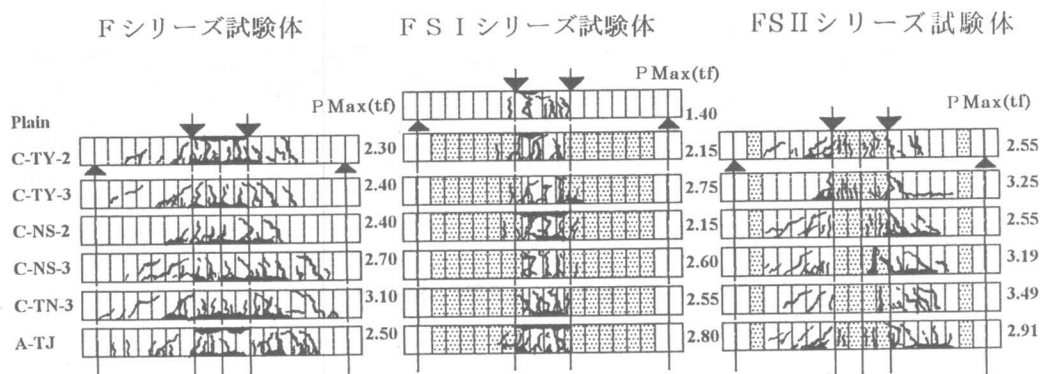


図-4 F、FS I および FS II 試験体の曲げ試験後のひび割れ図



図-5 曲げ試験による引張側底面の破壊状況図

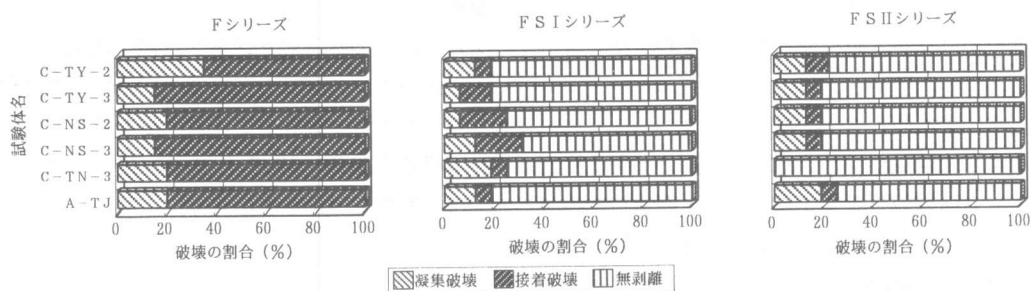


図-6 F、FS I および FS II 試験体における引張側底面の破壊の割合

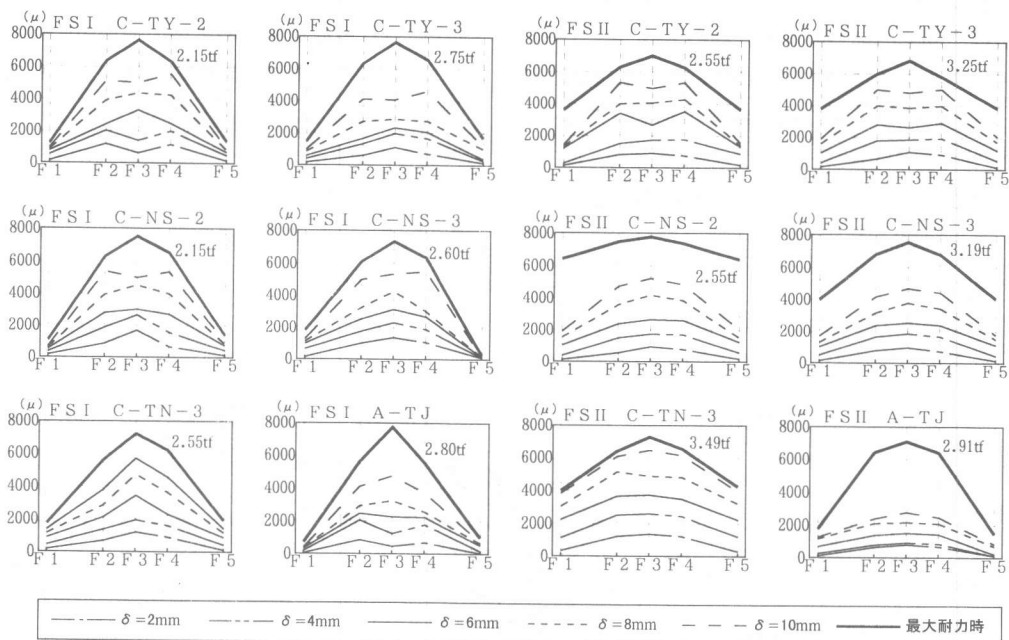


図-7 FSIおよびFSII試験体のCFシート歪み分布

3. 4CF シート歪み性状

FSIおよびFSII試験体の引張側のCFシートに貼付た歪みゲージによる $\delta = 2, 4, 6, 8, 10\text{mm}$ および最大荷重時に測定した歪みの分布を図-7に示す。FSIシリーズ試験体の場合は、載荷点間歪みの急激な勾配を付着応力度の分布と表し、CFシートの破断およびコンクリートの凝集破壊の原因として裏付けられる。FSIIシリーズ試験体における、載荷点間をCFシートでU字型に拘束したため、せん断スパン間においては、歪みの分布はなめらかな勾配であり、引張側のCFシートに全面に小さい付着応力度が分布していることがわかる。

4. まとめ

- (1) 連続繊維シート(CFシート)による曲げ補強の有無で比較すると、補強した試験体は降伏点荷重、最大荷重とも高くなり、RC梁の曲げ補強に有効であることを確認した。

- (2) CFシートであれば筋方向にU字型に拘束する場所によって破壊性状が異なり、付着応力度が歪み分布で推測できる。
- (3) 下地コンクリートとCFシートの付着性を確認するために、破壊後のCFシート状況を観察することによって施工評価を行うことができる。今回の実験で未経験者(学生諸君)によるCFシートの貼付施工作業によっても、かなり信頼性の高いデータが得られた。

参考文献

- 1) パネルディスカッション資料：連続繊維補強材のコンクリート構造への応用、新素材ファイバー補強小委員会、日本建築学会・構造委員会、1998年度日本建築学会大会(九州)、1998.9.