

論文 ハイブリッド連続繊維プレートによる梁の曲げ補強に関する実験的検討

王 忠明^{*1}・伊部 博^{*2}・城 攻^{*3}

要旨: CF及びAFを貼り合わせたハイブリッド連続繊維プレートで補強した梁型試験体の曲げ実験により、RC部材による組合せ連続繊維のハイブリッド効果及びハイブリッド繊維の曲げ補強効果を確認し、ハイブリッド補強材の梁部材に対する初期曲げ剛性、曲げ耐力、塑性率やエネルギー吸収能力の向上、及びひび割れ幅の低減等の効果を明らかにした。

キーワード: 連続繊維シート、ハイブリッド繊維補強プレート、梁、曲げ耐力、剛性、韌性

1. はじめに

既存コンクリート系建築物の構造部材に対する補強補修は、耐震性能の向上を目的とする耐震補強に限らず、増改築・用途変更または部材の老朽化による設計耐力の不足や耐久性向上への対応等の改修補強がある。補強目的も、せん断耐力や韌性の向上以外に、柱や梁・スラブの曲げ補強に及ぶ。補強工法のうち、自重の増加を少なくし、施工性も良い連続繊維素材を用いた例が多くなってきてている¹⁾。

しかし、連続繊維はこれまで建築の分野では一般的には使われていなかった材料であり、従来の設計・施工技術では対応できない面が多い。特に炭素繊維(CF)のような高弾性係数を有し、引張破断時の伸び能力が小さい材料で曲げ補強する場合には、部材が脆性的な破壊に繋がること、ガラス繊維(GF)やアラミド繊維(AF)のような低弾性係数の連続繊維による曲げ補強する場合に部材剛性の向上効果が小さく、鉄筋の降伏による部材の変形が過大になり、変形回復が不能になることが挙げられる。そのために、連続繊維による構造部材の曲げ補強への応用はせん断補強に比べて少なかった。

本研究では、これらの問題に対処して高性能の連続繊維材料をコンクリート構造の補強材として最

大限に活用するために、複数の連続繊維材料を組合せる「ハイブリッド繊維補強材料」の研究開発を行った。ハイブリッド繊維補強材は、例えば、相対的に伸びの大きなAFやGFに高弾性率のCFを付加したものであり、両者が補完し合うことによって従来の複合材料よりも優れた材料特性が得られ、目的に応じて設計することができれば望ましい²⁾。このようなハイブリッド繊維補強材料が開発されれば、高強度・軽量・耐腐食性及び施工利便性の長所に加えて、脆性的な耐力低下がなく、地震後にも残留変形が少ないとによって軽微な補修に留められる耐震性に優れた構造物への改修が期待できる。

本報では、ハイブリッド繊維補強工法の基礎的研究としてハイブリッド効果の顕著な連続繊維シートを用い、鉄筋コンクリート梁の曲げ補強実験を行ったものでその結果を報告し、ハイブリッド繊維補強の効果、力学的特徴と将来展望等について検討する。

2. ハイブリッド繊維補強材の性質

ハイブリッド繊維補強工法に適するハイブリッド繊維補強材の特性は、繊維素材の種類及びそれらの構成比や配列等の影響を受け、CF及びAFによるハイブリッド化繊維プレートの材料試験で確

*1 株コンステック 開発技術事業本部、工博（正会員）

*2 株コンステック 開発技術事業本部長、工博（正会員）

*3 北海道大学教授 大学院工学研究科、工博（正会員）

認された³⁾。梁実験に用いたハイブリッド連続繊維プレートの断面構成及び典型的な応力-ひずみ関係と、単独に用いたCF及びAFの応力-ひずみ関係との違いを図-1に示す。

単独繊維の応力-ひずみ関係が破断直前まで直線的であるが、ハイブリッド繊維補強材の場合には、3つの特徴がある。(1) 鉄筋の降伏棚に相当する非線形性が存在する。(2) CFの破断による初期破壊が生じる時のひずみがCFの終局ひずみより大きくなる。(3) 初期破壊後の応力低下がなく、ひずみがある程度増大した後に応力が再び上昇し、AFの終局ひずみに近い変形能力を示す。これらの特性は、耐震補強としての曲げ補強時には、鉄筋の塑性変形に似た性状が期待できる。すなわち、ハイブリッド繊維補強材で補強した構造部材には、ある範囲の大変形が発生しても脆性破壊がなく耐力低下も生じない韌性的な部材設計の可能性を示している。

3. 試験体及び実験の概要

3.1 試験材料

実験に使われたハイブリッド繊維補強材は、AFシートの間にCFシートを配列したもので、エポキシ樹脂(FR)で部材のコンクリート面に貼り付けている。AFシートにはアラミド1(AK)シート及びアラミド2(AT)シートがあり、各素材の力学的特性を表-1に示す。

3.2 試験体及び繊維補強

試験体は、実大に近い梁せいを有する鉄筋コンクリート造T形梁で、コンクリートの圧縮破壊や梁

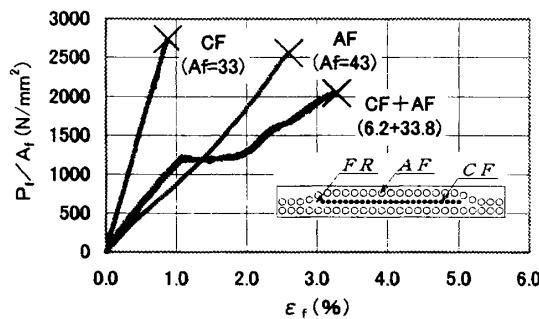


図-1 ハイブリッド繊維補強材の応力-ひずみ関係の比較 (A_f =全繊維断面積 mm²)

表-1 連続繊維の力学的特性

材料 種類	繊維目付 (g/m ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	破断ひずみ(%)
CF	203	390	3840	0.98
AK	282	123	2820	2.30
AT	235	78.5	3430	4.37
FR(接着樹脂)	2.33	46.5	—	—

表-2 鉄筋の力学的特性

鉄筋	弾性係数 (kN/mm ²)	降伏点 (N/mm ²)	降伏ひずみ (%)
SD295-D19	166	352	0.21
SD295-D16	175	332	0.19
SHD685-D10	187	723	0.40

のせん断破壊を生じないように断面寸法と配筋を定め、梁の主筋にSD295を、せん断補強筋に高強度のSHD685を使用した。鉄筋の材料試験結果を表-2に示す。試験体には調合強度が22.5 N/mm²のレディミクストコンクリートを用いた。

梁の下面をディスクサンダー等で研磨した後にプライマーを塗布し、さらにパテで不陸修正した。繊維シートをAF, CF, AFの順で3層に分けて接着材を貼付・含浸・脱泡し、1週間程度養生した。このようにして成形されたハイブリッド繊維補強(HFRP)プレートが、定着剥離破壊を生じさせないために、HFRPプレートの両端を梁端側面まで伸ばし、鋼板及びアンカーによって定着した。梁型試験体の断面寸法及び繊維補強設計の詳細を図-2及び表-3に示す。

3.3 載荷

梁の曲げ実験は2点加力単純支持方式で、750kNオーバーヘッドアクチュエーターを用い、一方向繰り返し載荷を行った。各梁の全スパン長さは2200mmであったが、両外側のシアスパン長さはBM3とBM4では600mm、BM5とBM6では750mmであった。

3.4 計測

実験の全過程で荷重は試験機のロードセルで、試験梁の中央及び載荷点位置のたわみは変位計で、主筋のひずみとそれと同じ断面における

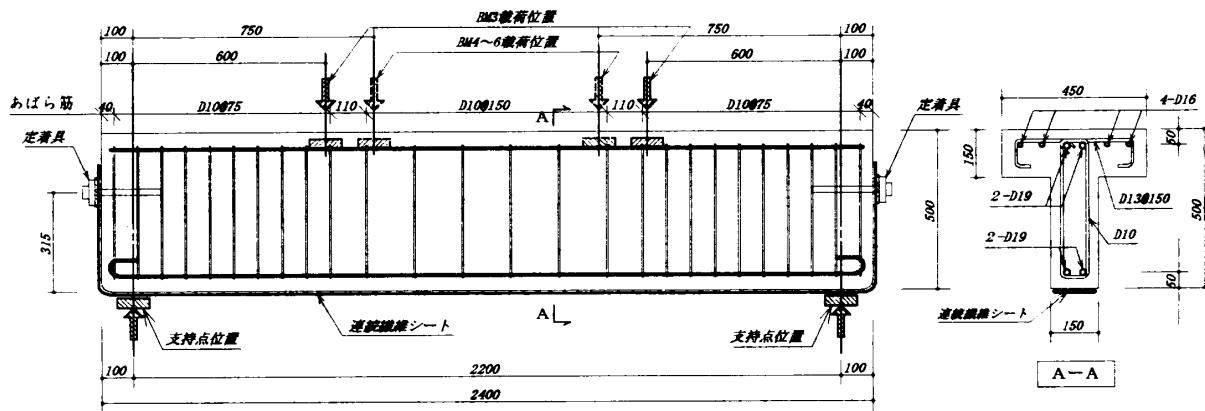


図-2 梁試験体の構造詳細

表-3 試験体の補強設計

試験体名	引張主筋 及び断面積 (mm ²)	CFシート		AFシート			CF構成比* $\beta_{CF}(\%)$
		層数×厚さ×幅 (mm)	断面積 (mm ²)	種類	層数×厚さ×幅 (mm)	断面積 (mm ²)	
BM4	2D19=570	—	—	—	—	—	—
BM3	2D19=570	1×0.11×50	5.50	AT	2×0.169×80	27.0	17
BM5	2D19=570	2×0.11×100	22.0	AT	3×0.169×140	87.9	20
BM6	2D19=570	2×0.11×100	22.0	AK	3×0.193×145	84.0	21

* $\beta_{CF} = CF \text{断面積} / (CF + AF) \text{断面積}$

表-4 梁試験体の主要な実験結果

試験体	コンクリート 強度 (N/mm ²)	補強率		曲げひび割れ時	鉄筋降伏時	プレート破断時			破壊形式	
		ζ_f (%)	η_f (%)			M_y (kN·m)	δ_m (mm)	M_u (kN·m)	δ_m (mm)	
BM4	22.9	—	—	16.8	0.22	81.4	4.04	—	—	(鉄筋降伏)
BM3	22.4	4.5	57	18.1	0.28	86.7	4.71	130.7	50.6	>2.64 シート破断
BM5	23.9	16.4	194	22.7	0.26	108.5	4.22	206.1	62.0	2.73 圧縮域破壊
BM6	23.1	20.0	162	20.7	0.25	112.1	4.36	173.1	19.4	1.20 シート破断

* δ_m は梁中央部の両端支点に対するたわみであり、比較するためにスパン長さ L とシアスパン長さ a が異なる BM3 梁のたわみを右式で換算した ($E_c I_0$: コンクリート断面の曲げ剛性)。

HFRP のひずみはひずみゲージで計測した。

4. ハイブリッド繊維補強梁の曲げ挙動

ハイブリッド繊維補強によって、鉄筋コンクリート梁の荷重-変形関係に影響を与え、梁の曲げ耐力及び剛性が明らかに向上了。梁の曲げ挙動は引張補強材の材料及び力学的特性に大いに影響される。連続繊維の補強効果を比較するために、補強 HFRP プレートに全繊維と引張鉄筋の引張剛

性の比 ($= \sum E_f \cdot A_f / E_s \cdot A_t$) を剛性補強率 ζ_f と定義し、両者の引張耐力の比 ($= \sum f_t \cdot A_f / f_y \cdot A_t$) を耐力補強率 η_f と定義する。試験梁の繊維補強率 ζ_f と η_f を、主な実験結果と共に表-4に示す。

4. 1 梁のひび割れ性状

主筋が降伏するまで、ハイブリッド繊維補強した梁の曲げひび割れパターンは、無補強のRC梁 BM4 と同様であった(図-3)。しかし、その後 HFRP プレート補強によって梁の曲げひび割れは、

特に引張鉄筋位置でより分散的になり、メインのひび割れ幅は無補強梁より小さくなつた。また、一本の曲げひび割れの中で現れる最大ひび割れ幅発生位置は、無補強梁で示される梁下面位置から梁のウェップ部に移つた。

4.2 破壊形式及び曲げ耐力

ハイブリッド繊維補強をした試験梁は、ひび割れ発生後に、剛性補強と耐力補強の効果が顕著に現れ、鉄筋降伏時の梁の曲げモーメントが無補強のBM4より大きくなり、さらに終局時には耐力補強率に応じた曲げ耐力補強効果が示された。

BM3梁は繊維耐力補強率 $\eta_f = 57\%$ で低く、耐力上の補強効果が小さかつたが、AT繊維の変形能力によって韌性効果は十分に発揮した。

BM5梁は繊維の耐力補強率 $\eta_f = 194\%$ で、梁の降伏モーメントが無補強RC梁より3割程度に増大した。その後、補強プレートの変形がCFの破壊ひずみを超えて、梁の曲げモーメントは低下するところがなく、変形が増大した。梁中央部のたわみ δ_m が62mmに近づくと、曲げひび割れ幅が2~3mmまで広がり、圧縮コンクリートの破壊が開始したがHFRPは破断しなかつた。

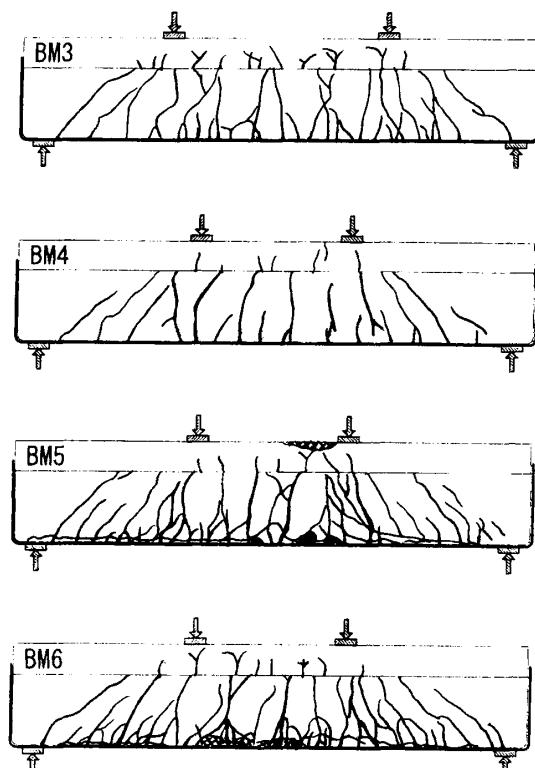


図-3 梁試験体のひび割れ及び破壊状態

繊維の剛性補強率 η_f と耐力補強率 η_f が共に大きいBM6は、耐力及び剛性の補強効果が大きかつたが、繊維ひずみがCF破壊ひずみを超えた時にHFRPプレートが破断したために、梁の曲げ耐力が急激に低下し、AKの韌性効果が発揮できなかつた。

4.3 荷重-たわみ曲線

通常の鉄筋コンクリート梁の荷重-たわみ関係は載荷開始～ひび割れ発生～鉄筋降伏～曲げ破壊のトリニアで近似できる。単独に繊維補強をした場合には、鉄筋降伏から繊維終局破断までの曲げモーメント上昇域を加えて4段階となる。ハイブリッド繊維補強した梁は、さらに2つの剛性変化点が加わる。すなわち、新しい4段目は補強繊維の変形がCFの終局ひずみに達した時にHFRPプレートが剛性変化して現れ、梁の曲げモーメントを維持して曲げ変形が増大した。5段目は補強繊維の変形の増大に伴いAFの耐力補強効果が発揮し始める点で、梁の曲げモーメントが再び上昇した。最後にAFの終局破断によるHFRPが破断し、梁の曲げ挙動は無補強時と同様になつた。

実験したハイブリッド繊維補強梁(図-4)のうち、BM6は繊維ひずみがCF破断ひずみに達した時点でHFRPプレートが破断したため、上述した荷重-たわみ曲線の4段目及び5段目に至らなかつた。他方、BM3は繊維ひずみが大きくなつてからプレートが破断し、荷重-たわみ曲線の各段階が前述の通りに現れた。BM5はプレートの破断が生じなかつたために、コンクリート破壊までHFRPの応力が維持できた。

4.4 繊維ひずみの分布曲線

連続繊維プレートの実測ひずみ分布を図-5に示す。梁端面のHFRPプレートは支持点の定着作用によって完全に止められ、プレートのひずみが小さかつた。変形が小さい場合に全域に亘ってプレートとコンクリートの付着がよく、シアスパン域でもプレートのひずみ分布は梁の曲げモーメント分布と同様の形になつていた。大変形に至ると、プレートの付着破壊による剥離が発生し、全域に亘つてプレートのひずみはほぼ均等の値を示した。

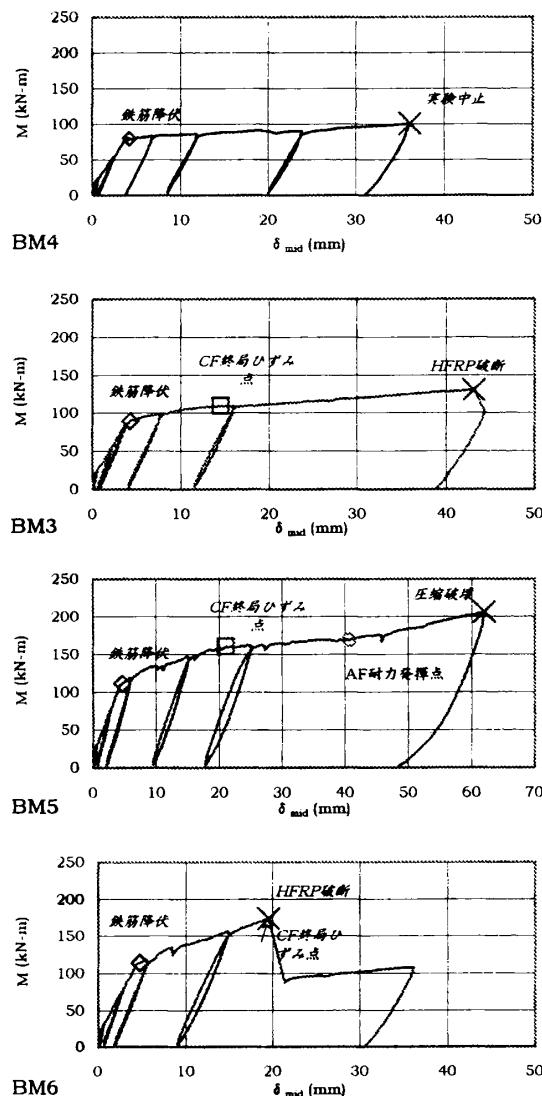


図-4 梁試験体の荷重-たわみ関係

5. ハイブリッド繊維の曲げ補強効果

5.1 曲げ耐力の向上

無補強のBM4梁と比べて、ハイブリッド繊維補強した梁の曲げ耐力は顕著に増大した(図-6)。鉄筋降伏時の曲げモーメント M_y は、各梁の繊維耐力補強率によって異なり、 $\eta_f = 57\%$ のBM3梁では1.06、 $\eta_f = 194\%$ のBM5及び162%BM6梁では1.33と1.38に増大した。

HFRPプレートが破断時の梁曲げモーメントは、BM4梁の降伏モーメントより、BM3梁では1.60、BM6梁では2.28に増大した。BM5梁は、曲げモーメントがBM4梁の2.53倍を超えても荷重を負担し続けた。これらの実験結果から、ハイブリッド繊維による曲げ耐力補強の有効性が確認できる。

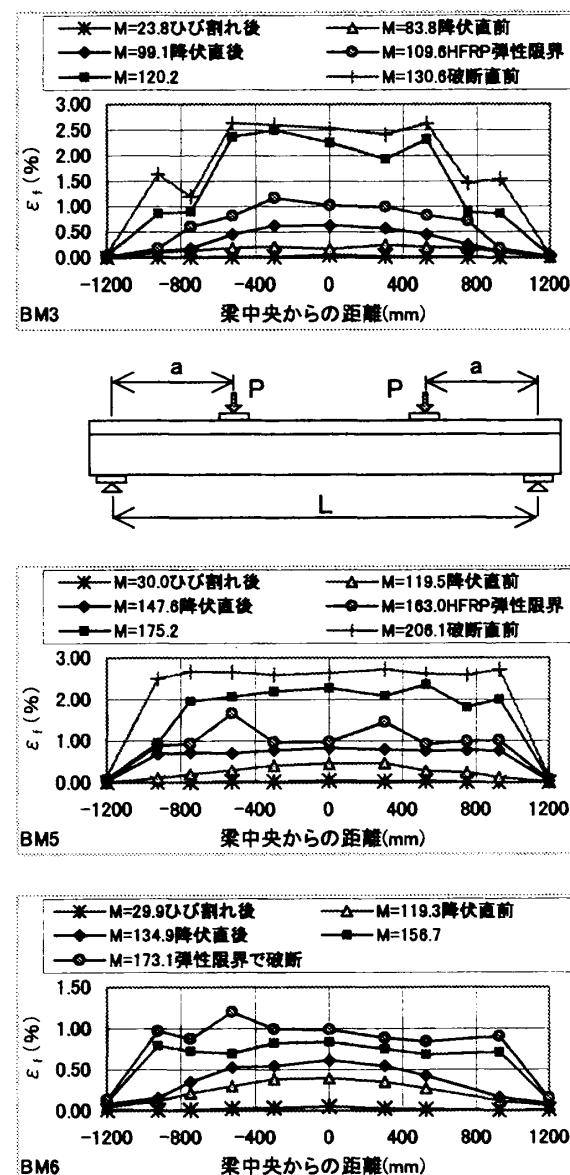


図-5 繊維ひずみの分布

5.2 部材剛性の増大

ハイブリッド繊維補強により梁剛性($K = Q/\delta$ で表す)の増大効果は、ひび割れ発生時1割程度であったが、その後、鉄筋降伏までは14~26%の剛性増大を示した。梁の剛性増大の効果と繊維の剛性補強率との関係を、図-7に示す。剛性補強率の増加による梁の剛性が若干大きくなる傾向が見えた。

5.3 塑性率の増大

梁の塑性率(最大耐力時曲げ変形の降伏時曲げ変形に対する比)は、CF+ATの組合せで補強したBM3梁では10.7、同様なBM5梁では14.7以

上となった。いずれもハイブリッド効果があつて、大きな韌性能を示した。CF+AKの組合せで補強したBM6梁は、CFの終局ひずみでHFRPプレート破断を生じて、塑性率が4.4であった。通常の単独使用によるCFシート補強の場合には、BM6梁のようにシート破断によって梁の曲げ耐力が急激に低下することになりやすい。これらの実験結果は、ハイブリッド化による繊維の構成等が梁の韌性能に大きな影響を及ぼすことを示している。

5.4 ひび割れ幅の低減効果

鉄筋降伏時に梁の純曲げ区間にある曲げひび割れ幅の総計の比較を図-8に示す。同様の梁曲げ応力レベルでのハイブリッド繊維補強によるひび割れ幅の低減効果が現れた。鉄筋降伏ま

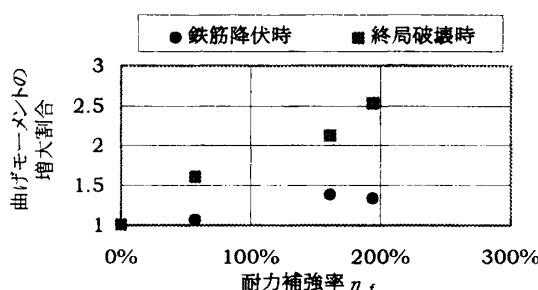


図-6 梁曲げ耐力と耐力補強率の関係

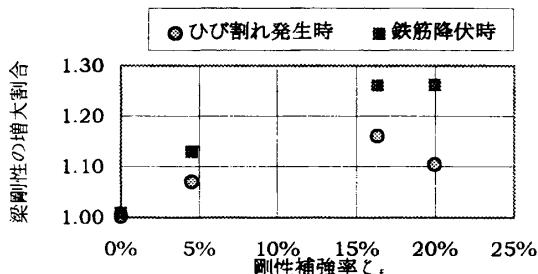


図-7 梁剛性と剛性補強率の関係

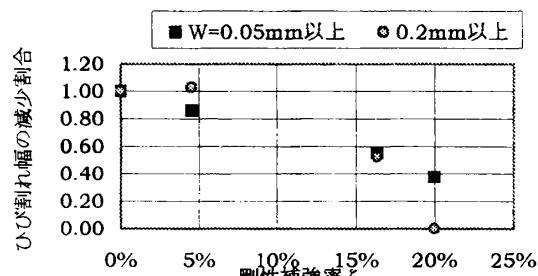


図-8 梁ひび割れ幅と剛性補強率の関係

で、ハイブリッド繊維補強した梁の曲げひび割れは、明らかに分散的になり、耐久性又は使用上無視できない曲げひび割れ幅の総計が無補強のRC梁よりかなり小さくなっていた。

6. 結 語

HFRPプレートによる鉄筋コンクリート梁の曲げ補強実験により、次のことが明らかにした。

- (1) 適切なCFとAFの組合せによるハイブリッド繊維補強を行った場合に、梁の荷重-変形関係に影響を与え、繊維の変形がCFの終局ひずみに達してもHFRPプレートは破断せず、その後の変形増大によってAFの耐力補強効果が発揮し始めて、梁の曲げモーメントが再び上昇する。そして、ハイブリッド繊維補強梁の降伏及び終局曲げ耐力が明らかに向上されたことが実験によって確認された。
- (2) ハイブリッド連続繊維で曲げ補強する場合には、梁の曲げ耐力と共に韌性能も向上させることができる。
- (3) ハイブリッド繊維補強によって、梁の剛性が若干増大する効果が認められた。
- (4) ハイブリッド繊維補強した梁の曲げひび割れは分散的になり、ひび割れの幅の総計が繊維の剛性補強率に応じて小さくなった。

謝 辞

本研究で使用した連続繊維材料を日鉄コンポジット㈱に提供して頂き、ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本建築防災協会：連続繊維補強材を用いた既存RC造及びSRC造建築物の耐震改修設計・施工指針, 1999. 9
- 2) 植村益次, 福田博：ハイブリッド繊維強化複合材, CMC, 1987
- 3) 伊部博, 王忠明, 城攻：ハイブリッド連続繊維補強材に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, 2001. 7