

論文

[2119] 炭素繊維補強材を用いたはり部材の曲げ靱性に関する基礎的研究

正会員○大野 定俊 (竹中技術研究所)  
 正会員 柿沢 忠弘 (竹中技術研究所)  
 正会員 岩清水 隆 (竹中技術研究所)  
 中井 唯喜 (竹中技術研究所)

1. はじめに

高強度の長繊維を樹脂で集束したFRP (長繊維補強材) をコンクリートの補強材として用いる研究が近年活発に行われるようになってきた。こうした新しい補強材は高強度であることや、錆びない、非磁性であるといった特長が高く評価されている。しかし、設計に関してはこうした補強材を用いた部材の曲げ性状が従来の曲げ理論によって予測できることが明らかになってきたものの、補強材が破断に至るまで弾性的に挙動することや補強材の剛性がそれほど高くないことなど従来のRCやPC部材の設計概念が通用しない点も見られる。例えば、破壊時の考え方も従来のRCやPCでは鋼材の降伏を前提としているのに対して、連続繊維補強部材に関してはまだ検討課題のひとつと考えられる。連続繊維補強部材では最大耐力時の破壊の進行が若干緩やかとなるコンクリートの圧壊を先行させるべきであるという報告[1]もあるが、経済性や合理性を考慮して補強材破断型の脆性的な部材破壊を前提とする利用方法があっても良いとする意見[2]もある。一方、補強材の付着をアンボンドにしたり、多段配筋することにより補強部材の変形挙動を変化させる試み[3]や、圧壊型の破壊をする補強部材の圧縮域を拘束することにより靱性を改善する研究[4][5]も実施されるようになってきた。しかし、構造物の靱性は設計対象に求められる要求性能に応じて確保されるべきであり、またその安全率等も議論されるべき課題である。

そこで、本研究ではプレストレス緊張力や補強材の付着性状を変化させた異なる曲げ性状を有する連続繊維補強部材を対象として、使用状態および終局状態のバランス、破壊性状および破壊に至るまでに吸収されるエネルギーについて検討すると共に、靱性との関連から設計上考慮されるべき事項について述べている。

2. 実験概要

実験に用いたはり試験体は図-1に示す小型の長方形断面はりで、長繊維補強材を用いたRC, PCおよびPRC部材としている。緊張材には全て炭素繊維FRPより線を用いており、引張補強材には炭

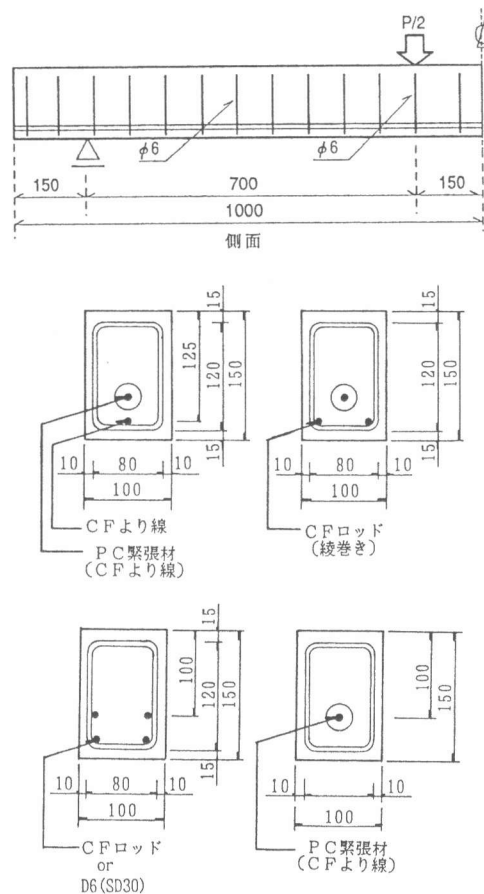


図-1 試験体寸法と荷重状況

表-2 実験計画表

番号	試験体名称	補強材種類				補強材比 (%)	付着の有無		PS 緊張量 (ton)	導入レベル*
		緊張材		引張補強材			緊張材	引張補強材		
		種類	断面積 (mm <sup>2</sup> )	種類	断面積 (mm <sup>2</sup> )					
1	RC-SD	—	—	D6(SD30)	126.7	1.13	—	有	—	—
2	CRC	—	—	CF綾巻ロッド	78.6	0.69	—	有	—	—
3	CPC69B	CFより線	55.7	—	—	0.56	有	無	6.9	0.7Pu
4	CPC58B									
5	CPC38B									
6	CPC58U									
7	CPRC24BB-YY	CFより線	30.4	CFより線	30.4	0.54	有	有	2.4	0.4Pu
8	CPRC24BB-YR			CF綾巻ロッド	39.3	—	無	有		
9	CPRC24UB-YR			—	—	—	—	—		
10	CPRC38BB-YY			CFより線	30.4	0.54	有	有	3.8	0.65 Pu
11	CPRC38BB-YR			CF綾巻ロッド	39.3	—	有			
12	CPRC38UB-YY			CFより線	30.4	0.54	無			
13	CPRC38UB-YR			CF綾巻ロッド	39.3	—	無			
14	CPRC38BU-YY			CFより線	30.4	0.54	有	一部無	—	—
15	CPRC38BU-YR			CF綾巻ロッド	39.3	—	有			
16	CPRC38UB-NET			CF綾巻ロッド	39.3	—	無			

\* 緊張材の公称破断荷重に対する初期プレストレス導入力の比率で示した。

\*\* はりの中央部分110cm区間の引張補強材の表面をテープで巻いて付着を切った。

素繊維FRPより線と炭素繊維FRP異形ロッドの2種類を用いた。各補強材の力学的性能および使用したコンクリートの強度特性をそれぞれ表-1と表-2に示す。実験要因はプレストレスの導入量、引張補強材の種類、緊張材および引張補強材の付着の有無等とし、表-3に示すような16種類の試験体について載荷実験を行った。ここで、表中の連続繊維補強材の断面積はFRPの樹脂を含む公称断面積として表している。また、No.1試験体はD6の異形鉄筋を用いた通常のRCはりであり、No.2試験体は連続繊維補強材を用いたRC、No.3~No.6が引張補強材のないPC部材、他はPRC部材である。No.16の試験体はNo.13と同じ試験体であるが、使用時の性状を改善するためにポリプロピレン繊維ネットで補強した厚さ5mmの永久型枠を用いている。載荷はスパン170cm、モーメントスパン30cmの一方向載荷とし、荷重、たわみ、緊張材のひずみ、ひびわれ幅等を計測した。

表-1 連続繊維補強材の引張特性

炭素繊維種類	公称破断荷重(kg)	弾性係数(kgf/mm <sup>2</sup> )
炭素繊維	9800 (φ10.5)	14,000
FRPより線	5800 (φ7.5)	
異形ロッド (綾巻)	3200 (φ5mm)	13,000

表-2 コンクリートの強度特性

材令	w/c	圧縮強度	弾性係数
28日	55%	346 kg/cm <sup>2</sup>	2.73 x10 <sup>5</sup> kg/cm <sup>2</sup>

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 ひびわれ性状

各試験体の載荷試験の試験結果を表-3に示す。また、図-2に各試験体のひびわれ状況を示した。ひびわれ発生荷重はコンクリートひずみゲージの値と目視による観察の両者から決定しているが、いずれの試験体も計算値とほぼ一致している。ひびわれ幅は試験体が小型なため、一般性に欠けると思われるが、使用荷重レベルを最大荷重の1/3程度と想定するとNo.2のCRC試験体を除くいずれの試験体もひびわれが発生していないか、発生したのも非常に微細なレベルにあり、



図-2 各試験体のひびわれ状況

使用時の問題はないものと考えられる。ひびわれの分散性は各試験体で異なっており、引張補強材のないPC部材 (No.3~No.6)と引張補強材の付着を一部カットしたPRC部材では、ひびわれ発生数が少なくなっている。とくに、アンボンドPCのCPC58Uはモーメントスパン近傍にのみひびわれが集中している。一方、引張補強材としてCFロッドを用いたものは良好なひびわれ分散性を示しており、従来のRC部材よりも小さなひびわれ間隔となっているが、終局時に近い段階になると補強材に沿った付着割裂ひびわれを誘発している。これは試験体の寸法やかぶりにも関連しているが、連続繊維補強材の付着確保の方式や付着強度と密接に関連しており、今後の検討課題であると思われる。一方、ポリプロピレン繊維補強の永久型枠を用いたNo.16試験体(CPRC38UB-NET)については、ひびわれ状況の図は示していないが、ひびわれは数mmから1cm以下の間隔で非常に細かく分散しており、使用時のひびわれ制限の点でも有利であると共に、設計時の使用範囲が広がるものと期待される。

### 3.2 終局荷重と破壊形式

図-3に各試験体の曲げ載荷時の荷重-変位曲線を示す。連続繊維補強材を用いた各試験体の荷重-変位関係は補強の形式と付着の有無によって異なっているが、形状は基本的に従来の研究

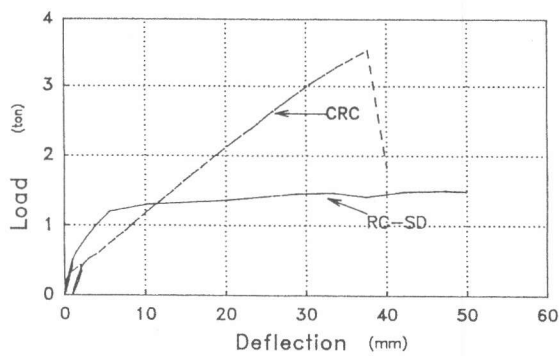
表-4 実験結果

番号	試験体 名称	ひびわれ 発生荷重 (ton)		最大荷重 (ton)		最大 荷重時 変位 (mm)	吸収エネルギー(10 <sup>2</sup> kg-cm)			破壊モード	
		実測値	計算値	実測値	計算値		最大 荷重 前	最大 荷重 以降	トータル	実験結果	計算による予測
1	RC-SD	0.52	0.43	1.49	1.26	49.91		66.6>	66.6>	鉄筋降伏後、圧壊	鉄筋降伏
2	CRC	0.42	0.43	3.60	2.65	—	80.3	0.0	80.3	補強材破断	補強材破断
3	CPC69B	1.27	1.37	2.95	2.62	21.99	51.0	7.0	58.0	緊張材破断+一部圧壊	緊張材破断
4	CPC58B	1.26	1.21	3.01	2.63	29.36	65.2	0.0	65.2	圧壊後、緊張材破断	緊張材破断+圧壊同時
5	CPC38B	0.97	0.94	2.07	1.60	23.76	36.9	0.0	36.9	緊張材破断	緊張材破断
6	CPC58U	1.06	1.21	1.57	1.84	21.36	29.4	30.6	60.0	圧壊	圧壊
7	CPRC24BB-YY	0.75	0.75	3.16	2.70	35.56	72.6	29.9	102.5	圧壊	圧壊
8	CPRC24BB-YR	0.77	0.75	3.68	2.77	40.27	91.1	4.0	95.1	補強材破断、一部圧壊	圧壊
9	CPRC24UB-YR	0.72	0.75	3.22	2.60	38.01	75.9	12.3	88.2	補強材・緊張材破断	圧壊
10	CPRC38BB-YY	0.97	0.94	3.20	2.50	32.70	71.5	40.3	111.8	緊張材・補強材破断	緊張材破断
11	CPRC38BB-YR	0.97	0.94	3.72	2.60	36.24	88.5	0.0	88.5	緊張材・補強材破断	圧壊、破断
12	CPRC38UB-YY	0.86	0.94	2.48	2.60	26.29	45.2	110.9	156.2	緊張材破断	圧壊
13	CPRC38UB-YR	0.82	0.94	3.20	2.60	38.41	81.1	11.1	92.2	緊張材破断+圧壊	圧壊
14	CPRC38BU-YY	0.87	0.94	2.63	2.30	25.32	45.6	49.4	95.0	緊張材破断	緊張材破断
15	CPRC38BU-YR	0.93	0.94	3.14	2.50	25.33	85.6	0.0	85.6	緊張材破断	緊張材破断
16	CPRC38UB-NET	1.17	0.94	3.42	2.60	36.23	91.6	4.6	96.2	緊張材破断	圧壊

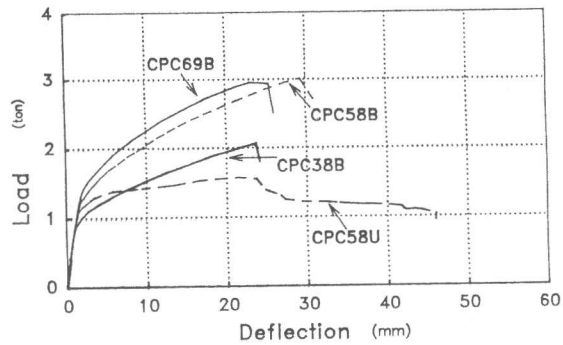
で報告されているものと大きな差はないと考えられる。ただし、CPRC24BB-YYとCPRC24BB-YR、CPRC38BB-YYとCPRC38BB-YR、CPRC38UB-YYとCPRC38UB-YR、CPRC38UB-YYとCPRC38UB-YRの組み合わせを比較すると、これらはほぼ同じ補強材量、補強形式にもかかわらず引張補強材として炭素繊維異形ロッドを用いた方が炭素繊維FRPより線を用いたものに比べ15~20%程度終局荷重が高くなっている。こうした差は両補強材の付着の差によるものと考えられるが、とくに付着特性の異なる2種類の補強材を用いると各補強材の応力分担が平面保持の仮定のもとに計算した結果と異なるかもしれない。

表-4に終局荷重の実験値と算定値の比較を示している。なお、終局荷重の算定は要素分割法を用いて計算しており、コンクリートの応力-ひずみ関係は梅村のe関数式によって表されるものとし、連続繊維補強材は破断まで弾性体として挙動すると仮定している。また、緊張材、引張補強材およびコンクリートのいずれかが最初に破壊ひずみに達したときを終局時として計算した。また、引張補強材および緊張材の付着がないものについては付着が切れている区間の平均ひずみを用いて計算を行っている。実験値と算定値とを比較すると算定値とは実験値に対してやや低い値(15~25%)を与える傾向にあったが、ほぼ傾向としては一致している。理由のひとつは連続繊維補強材および緊張材の強度値として公称破断荷重を用いていることが考えられる。

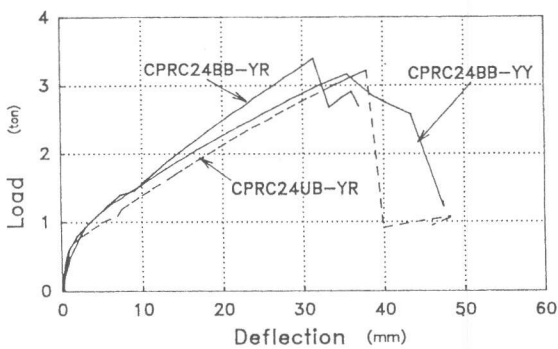
一方、本実験ではNo.1とNo.5以外は補強材の量を $q = P_f(\sigma_f / \sigma_{ck})$ の値が0.3程度となるように計画しており、破壊形式は釣合破壊状態に近い状態となっている。そのため、緊張材や補強材の付着の有無や配置の状況によって破壊形式が異なっている。表-3に計算によって予測される破壊形式と実験の結果を示している。両者は比較的良好に一致しているがPRC部材のうちで緊張材がアンボンドのものは予測と実験結果に差が見られる。原因は不明であるが緊張材の破断時のひずみの測定値が公称破断ひずみより小さいことから、何らかの局部応力が発生した可能性がある。一般に連続繊維補強部材では圧縮破壊形式の方が補強材破断よりも破壊の進行が若干緩やかであ



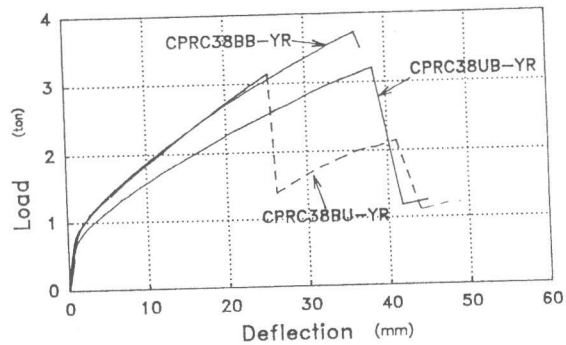
( a )



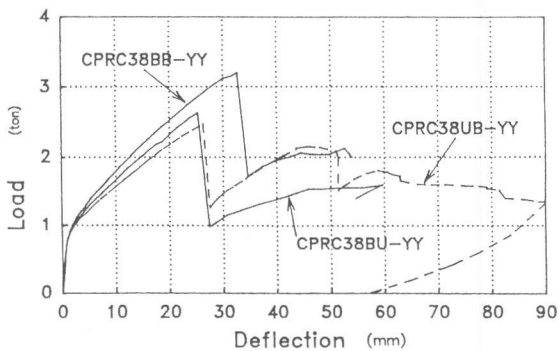
( b )



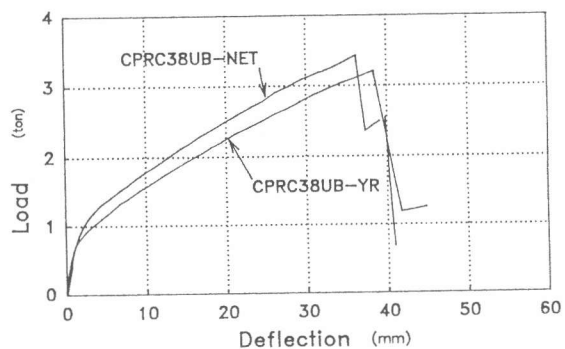
( c )



( d )



( e )



( f )

図-3 各試験体の荷重-変位曲線

るとされているが、釣合状態に比較的近い場合にはコンクリートの圧壊が進行中に補強材が破断するため(CPC69B,CPC58B)、実験および予測値とも圧縮破壊となっても図-3 (b)の荷重-変位関係から見る限り補強材破断と大きな差が見られない破壊形式となっている。このような点を考えると、圧縮破壊形式で少し緩やかな破壊させるためには釣合状態よりも補強材量に余裕を取る必要があると思われる。長期にわたる使用期間中の材料変化や補強材の破断強度のばらつきを考慮して、設計で破壊形式を特定することは困難な面もあり、経済的設計の点で問題がないわけではない。一方、P R C部材のなかで炭素繊維より線を引張補強材として用いたものは、緊張材が破断後もかなり大きな変形能を示しており、補強材の量や付着特性を調整することにより、こうした変形挙動をする部材を設計できる可能性を示している。

### 3.3 吸収エネルギー

設計上構造物に求められる靱性は構造物の種類や使用される状況によって異なると考えられる。また、設計上の靱性に対する安全率に対する議論も今後進められていく必要があるが、部材自身の靱性についても、これまで議論では必ずしも定量的な評価をしてきたとはいえない。そこで、表-3に各試験体について荷重-変位曲線によって囲まれる面積を吸収エネルギーとして表し、最大荷重までに吸収されるエネルギーと最大荷重以降に吸収されるエネルギーとに分けて示した。全吸収エネルギーを比較すると、本実験の範囲内では吸収エネルギーの値は破壊形式にあまり影響を受けなっていないようである。また、同様な補強材量でもPCよりもPRC部材の方がやや吸収エネルギーが大きくなり、使用時の変形やひびわれの制限の問題が厳しくないのであれば有利となる場合があると考えられる。最大耐力以降に吸収されるエネルギーを比較すると、本実験の場合、PC部材は緊張材のみを配置したので終局荷重でコンクリート圧壊後、緊張材が破断するとエネルギー吸収能は全くなくなってしまう。これに対して圧壊したアンボンドPCのCP C58Uは最大荷重以降にも最大荷重前と同程度のエネルギー吸収能を示している。また、PRC部材では緊張材の破断後もある程度のエネルギー吸収能を期待することができる。PRC部材では補強材に異なる付着特性のものを用いると、異形ロッドは最大荷重までの吸収エネルギーを増加させるのに対して、炭素繊維FRPより線を用いた場合には最大荷重以降の吸収エネルギーを増加させる傾向にある。このように補強方法によって種々のエネルギー吸収特性を持たせることは可能である。しかし、最大耐力以降のエネルギー吸収能を評価することは手法的にも容易でない上、設計上そうした領域まで含めて靱性を評価する意味については疑問な点もある。現状のレベルで連続繊維補強材で補強した曲げ部材の靱性を評価するのであれば、最大荷重に至るまでに吸収されるエネルギーで靱性を評価すべきであると考えられる。

### 4. まとめ

本研究ではプレストレス緊張力や補強材の付着性状を変化させた異なる曲げ性状を有する連続繊維補強部材を対象として、ひびわれ性状や破壊性状、とくに破壊に至るまでに吸収されるエネルギーについて実験的に検討すると共に、設計上考慮されるべき靱性との関連について議論した。その結果、補強形式に応じて破壊モードや変形挙動を変化すること、本実験の範囲内では吸収エネルギーの値は破壊形式にあまり影響を受けないこと、同様な補強材量でもPCよりもPRC部材の方がやや吸収エネルギーが大きくなることなどが明らかにされた。また、現状の連続繊維補強材に関する知識では、設計上は最大荷重に至るまでに吸収されるエネルギーで靱性を評価すべきであると考えられる。

#### 参考文献

- [1] 陸好、上原、町田：CFRPで補強したコンクリート部材の力学的性状および設計手法、コンクリート工学年次論文報告集 12-1, 1990, pp. 1117-1122
- [2] 中井、迎、浅井、熊谷：FRP緊張材を用いたプレストレスコンクリート梁の曲げ終局限界状態について、コンクリート工学年次論文報告集 13-2, 1991, pp. 749-754
- [3] 山本、丸山、清水、中村：CFRPを多段配筋に用いたコンクリート部材の曲げ性状、土木学会第46回学術講演会講演概要集, 1991, pp. 238-239
- [4] 小寺、丸山、伊東：CFRPロッドを用いたRCはりの圧縮破壊靱性の改善、土木学会第46回学術講演会講演概要集, 1991, pp. 242-243
- [5] 谷口、陸好、町田、喜多：FRPを用いたPC曲げ部材の破壊靱性改善に関する一提案、土木学会第46回学術講演会講演概要集, 1991, pp. 244-245