

# 超高強度繊維補強コンクリートと炭素繊維シートから成る合成部材に関する実験的研究

日大生産工(院)      ○瀬戸山満俊      日大生産工      木田 哲量  
 日大生産工      阿部 忠      日大生産工      澤野 利章  
 太平洋セメント(株)      片桐 誠

## 1. はじめに

コンクリート系材料は、部材重量の軽減や部材断面積の縮小などを目的とした改良・開発が進められている。その中でも、高強度を有し、靱性能にも優れている超高強度繊維補強コンクリート(Reactive Powder Concrete: 以下RPC)が注目されている。RPCは圧縮強度 $200\text{N/mm}^2$ 以上を有し、RPC中に配合されている高強度鋼繊維とコンクリートとの付着によりひび割れ発生後も応力が保持される<sup>1,2)</sup>、すなわち架橋効果により、優れた変形性能を有する材料である。

一方、炭素繊維シート(Carbon Fiber Sheet: 以下CFS)は、軽量かつ引張強度 $3000\text{N/mm}^2$ 以上を有する材料であり、CFSをコンクリート部材に貼付することで過大なひび割れの進展を抑制させ、耐力と靱性能の向上を図ることができる。

RPC材は基本的にはRPCのみで部材として十分対応できる複合材料であるが、RPCのみの構造材として用いることは無く、より耐力・靱性能を確保するために、RPC材にPC材を挿入した合成構造として使用されている。そこで、鉄筋と同様の引張抵抗機能をCFSに与えてRPC部材の引張側に貼付した合成構造(以下CFS・RPC)とすることにより、耐力および靱性能を向上させ、PCと合成した場合と比較してRPC部材の大幅な軽量化を図ることが可能であると考えられる。

そこで本研究では、RPC材およびCFS・RPC材の耐力、靱性能を評価するために、同一寸法のRCはり、RPCはり、CFS・RPCはり供試体を用いて、静荷重曲げ実験、移動荷重実験を行い、RCを基準供試体としてRPCはり、CFS・RPCはりの終局耐力、破壊メカニズム、変形性能について比較・検証した。

## 2. 供試体の材料および材料特性値

本実験ではRCはり、RPCはり、CFS・RPCは

Table 1 Material properties of RC

Compressive strength (N/mm <sup>2</sup> )	Reinforcing bar (SD295A, D16)		
	Yield strength (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	Elastic modulus (kN/mm <sup>2</sup> )
38.5	368	568	196

Table 2 Material properties of RPC (unit in N/mm<sup>2</sup>)

Compressive strength	Flexural strength
209.69	26.90

Table 3 Material properties of CFS

CFS	Weight (g/m <sup>2</sup> )	Design thickness (mm)	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	Elastic modulus (kN/mm <sup>2</sup> )
High strength CFS	202	0.111	4420	235

り供試体の3タイプを用いた。

(1) RC はり RC はり供試体のコンクリートには、普通ポルトランドセメントと最大寸法20mmの粗骨材を使用し、鉄筋にはSD295A、D16を使用した。材料特性値をTable 1に示す。

(2) RPC はり RPC はり供試体は、ポルトランドセメント、シリカフューム、珪砂粉末などの粉体をプレミックス配合したもの(太平洋セメント(株)、ダクトアルプレミックスDP-200)に減水剤、水および超高強度鋼繊維(0.2mm、長さL=15mm)を練り混ぜた混練物で作製したものである。ここで、RPCの材料特性値をTable 2に示す。

(3) CFS 材 CFSには厚さ0.111mmの高強度連続カーボンシートを用いることとし、その材料特性値をTable 3に示す。

## 3. 供試体寸法

(1) RC はり (RC-) 供試体の支間は200cmとし、幅30cm、高さ21cmとする。供試体の張り出し部は、鉄筋D16を使用することから定着長を考慮して40cmとし、全長280cmとする。鉄筋の配置はD16を引張側に3本、圧縮側に2本配置し、引張鉄筋の有効高さを17.2cmとする。なお、せん

*Experimental Study on Composite Member Which Consists of Reactive Powder Concrete and Carbon Fiber Sheet*

by Mitsutoshi SETOYAMA

Tetsukazu KIDA, Tadashi ABE, Toshiaki SAWANO and Makoto KATAGIRI

断補強鉄筋は配置しないものとする。RC はりの寸法および鉄筋の配置を Fig. 1(1)に示す。

(2) **RPC はり (RPC-)** RPC はりの寸法はRC はりと同様とする。したがって、支間長を 200cm，幅 30cm，高さ 21cm とする。なお，供試体の張り出し部は鉄筋を配置しないことから鉄筋の付着長を考慮する必要がないため 10cm とし，全長 220cm とする。RPC はりの寸法を Fig. 1(2)に示す。

(3) **CFS・RPC はり (CFS・RPC-)** CFS・RPC はりの寸法はRPC はりと同様である。供試体底面の下地処理は，RPC 表面をサンダーで平滑に仕上げた後，エポキシプライマーを塗布含浸させ，接着用含浸樹脂でシートを接着した。本実験における CFS の接着は，供試体底面の支間方向に 1 層貼付とした。CFS・RPC はりの寸法を Fig. 1(3)に示す。

#### 4. 実験方法

##### 4.1 静荷重曲げ実験 (S)

静荷重曲げ実験は，最大応力の生じる支間中央に輪荷重を載荷させた実験である。載荷方法は最大荷重を 5.0kN ずつ増加させ，最大荷重までの載荷と 0kN までの除荷を繰り返し行う漸増繰り返し載荷とした。

##### 4.2 移動荷重実験 (M)

移動荷重実験は，供試体が破壊に至るまで荷重増加と走行を繰り返す実験である。輪荷重の走行方法は，支間中央で車輪を停止させた状態から左支点へ走行させ，その後右支点を折り返して支間中央に停止させることとした。載荷方法は静荷重曲げ実験と同様に漸増繰り返しとし，最大荷重載荷後に輪荷重を 1 走行させてからたわみおよびひずみの計測を行った。なお，走行速度は 1 走行 4m を 18sec で走行する平均速度 0.22m/sec とした。

#### 5. 結果および考察

##### 5.1 実験耐力

本実験における実験耐力および各供試体の耐力比，また破壊モードを Table 4 に示す。

(1) **RC はり** RC はりは，静荷重による耐力は RC-S で 83.00kN であり，載荷位置（支間中央）で曲げ破壊となった。移動荷重に対する耐力は RC-M で 69.30kN となり，支間中央で荷重を増加中に曲げ破壊となった。静荷重に対する耐力と移動荷重に対する耐力との比は 0.83 となり，移動荷重が作用することにより 17%耐力が低下した。なお，RC はりの実験耐力を基準耐力として RPC はりおよび合成構造 CFS・RPC はりの耐力を比較して評価する。

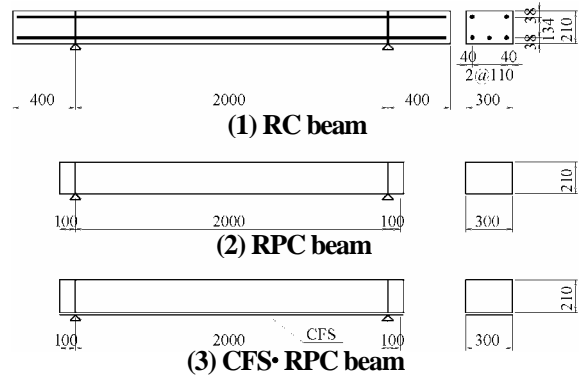


Fig. 1 Dimension of specimens and arrangement of rebar

Table 4 Comparison of load-carrying capacity

Specimen	Failure mode	Experiment (kN)	Strength rate
RC-S	Bending	83.00	
RC-M	Bending	69.30	0.83 (RC-M/RC-S)
RPC-S	Bending	120.85	1.46 (RPC-S/RC-S)
RPC-M	Bending	105.10	1.52 (RPC-M/RC-M)
			0.87 (RPC-M/RPC-S)
CFS・RPC-S	Bending	155.40	1.87 (CFS・RPC-S/RC-S)
			1.29 (CFS・RPC-S/RPC-S)
CFS・RPC-M	Bending	140.95	2.03 (CFS・RPC-M/RC-M)
			1.34 (CFS・RPC-M/RPC-M)
			0.91 (CFS・RPC-M/CFS・RPC-S)

(2) **RPC はり** RPC はりの耐力は，RPC-S で 120.85kN，RPC-M で 105.10kN であり，破壊モードは RPC-S，RPC-M とともに支間中央で荷重増加中に曲げ破壊となった。静荷重に対する耐力を RC-S と RPC-S とで比較すると，RPC-S の 1.46 倍の耐力が得られた。移動荷重が作用した場合の RC-M の耐力と RPC-M の耐力を比較すると，RPC-M は RC-M に比して 1.52 倍の耐力が得られた。以上のように，RPC はりは RC はりと比較して静荷重，移動荷重ともに高耐力を示した。これは，RPC 中に配合された高強度鋼繊維とマトリックスとの付着性能が優れていることが要因の一つである。次に，静荷重と移動荷重が作用した場合の耐力をそれぞれ比較すると，RPC-S と RPC-M の耐力との比は 0.87 となり，移動荷重が作用することにより 13%耐力が低下した。

(3) **CFS・RPC はり** CFS・RPC はりの静荷重に対する耐力は，CFS・RPC-S で 155.40kN，移動荷重の場合が CFS・RPC-M で 140.95kN である。静荷重に対する RC-S の耐力と CFS・RPC-S の耐力との比は，CFS・RPC-S が 1.87 倍の耐力を示した。また，RPC-S と CFS・RPC-S の耐力を比較すると

CFS・RPC-S が 1.29 倍の耐力が向上した。次に、移動荷重が作用した場合の RC-M と CFS・RPC-M の耐力を比較すると、CFS・RPC-M が 2.03 倍の耐力が向上した。また、RPC-M と CFS・RPC-M の耐力を比較すると、CFS・RPC-M が 1.34 倍の耐力向上が図られた。これらの結果は、RPC 中の鋼繊維による架橋効果に加えて、高引張強度を有する CFS を合成させたことで、耐力が向上したためである。次に、静荷重の耐力と移動荷重の耐力の比は 0.91 となり、RC はりの 17%、RPC はりの 13% に対して、CFS・RPC はりでは 9% 低減である。すなわち、CFS を合成させたことによって移動荷重が作用する場合の耐力が RPC はりと比較して 4% 改善されたことになる。

なお、破壊モードは、CFS・RPC-S、M とともに荷重増加中に CFS のはく離破壊となり、CFS の破断は見られない。

## 5.2 破壊メカニズム

本実験における供試体の終局時のひび割れ図を Fig. 2 に示す。なお Fig. 2 には、RPC はりおよび CFS・RPC はりともに微細なひび割れが多く発生したことから、ひび割れ発生区間の支間中央 150cm 付近までを表示し、RC はりにおいても同様な表示形式とした。また、破壊位置、ひび割れ位置を明確にするために、5cm 間隔の破線を供試体支間中央および下縁から併記した。

(1) RC はり RC-S におけるひび割れは Fig. 2(1)1) に示すように、支間中央に集中して発生し、荷重の増加に伴って、ひび割れは圧縮鉄筋の配置付近まで進展した。ひび割れは 5~15cm 間隔で発生し、最終的に荷重載荷位置から 45° の拡がりをもつ曲げ破壊に至った。また、RC-M におけるひ

び割れは Fig. 2(2)1) に示すように、荷重の移動の影響によって支間全体にわたって発生し、その間隔は 5cm~13cm であり、荷重の増加と走行を繰り返すことによって圧縮鉄筋付近まで進展した。破壊は支間中央で荷重を増加中に曲げ破壊となった。

(2) RPC はり RPC-S におけるひび割れ状況は Fig. 2(1)2) に示すように、載荷位置から支点方向 30cm の間に微小なひび割れが発生している。また、RPC-M の場合も Fig. 2(2)2) に示すように支間中央付近に集中して発生しているが、荷重が移動することにより支点方向にも分散されて発生している。RC はりに比してひび割れの発生量が多く、微小ひび割れが発生している。これは RPC 中に配合された鋼繊維による架橋効果によって応力が広範囲に分散されたためであると考えられる。

(3) CFS・RPC はり Fig. 2 に示すように、CFS・RPC-S、M とともに RPC-S、M と同様に複数の微小ひび割れが発生している。RPC はりのひび割れ状況と比較すると、両荷重の場合ともに CFS・RPC はりの方がより広範囲に微小ひび割れが生じている。これは、鋼繊維の架橋効果に加えて CFS のひび割れ分散効果<sup>3)</sup>によって RPC はりに生じる応力を分散させたためである。

## 5.3 最大荷重とたわみの関係

Fig. 3 に各供試体の支間中央部におけるたわみと最大荷重の関係を示す。

(1) RC はり RC はりは Fig. 3 に示すように荷重の増加に伴って徐々にたわみが増加し、その後、鉄筋の降伏によって大幅にたわみが増加している。なお、RC はりの終局時のたわみは、RC-S で 19.59mm、RC-M で 17.20mm である。

(2) RPC はり Fig. 3 より、RPC-S、RPC-M と

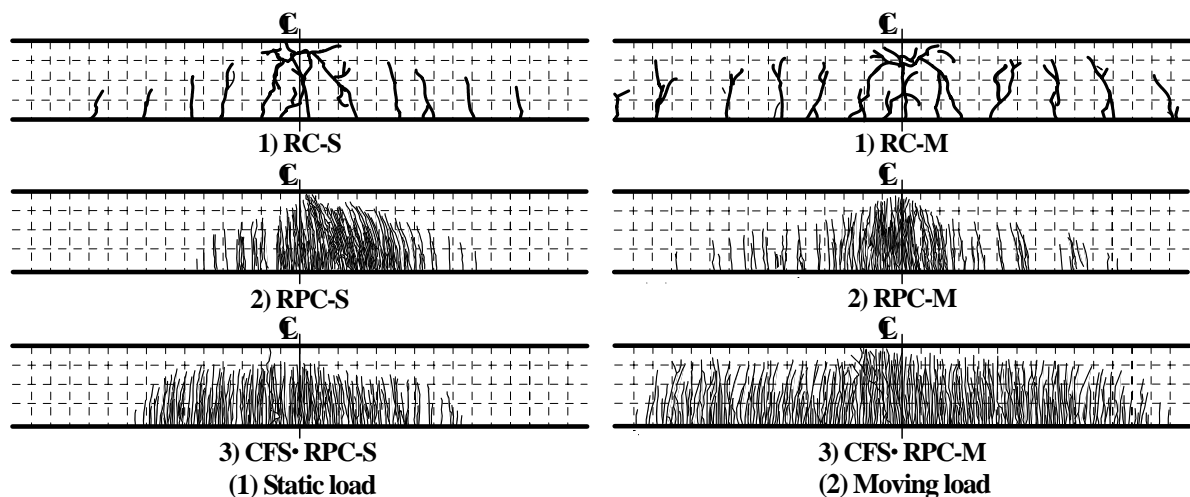


Fig. 2 Cracking pattern

もに荷重の増加につれてたわみがほぼ線形的に増加した後、たわみの増加率が大きくなっていることがわかる。これは、RPC 中の高強度鋼繊維の架橋効果によって耐力を保持したためである。次に、終局時のたわみは RPC-S で 9.14mm, RPC-M で 10.56mm である。これらのたわみを比較すると、RPC-M の方が大きい値を示していることがわかる。これは、5.2 で既述したように、移動荷重の作用によって微小ひび割れが支間全体に生じたためである。

ここで、RPC-S と RC-S, RPC-M と RC-M とで比較すると、Fig. 3 に示すように、RPC はりは RC はりに比べてたわみの増加率が非常に小さい。このことから RPC はりが RC はりよりも剛性が高いことがわかる。

(3) **CFS・RPC はり** CFS・RPC はりは、CFS・RPC-S, CFS・RPC-M とともに荷重の増加に伴い、RPC-S および RPC-M と近似した傾きでほぼ線形的にたわみが増加し、その後、たわみの増加率が大きくなっている。なお、CFS・RPC はりの終局時のたわみは CFS・RPC-S で 13.38mm, CFS・RPC-M で 19.48mm である。CFS・RPC-S と CFS・RPC-M とのたわみを比較すると、移動荷重実験の場合の方が大きな値を示している。これも RPC はりと同様に、移動荷重によって広範囲に応力が作用し、微小ひび割れが広範囲に発生したためである。

ここで、CFS・RPC-S と RPC-S, CFS・RPC-M と RPC-M とで比較する。まず、Fig. 3 に示すように、CFS・RPC-S, M とともに、たわみの増加率が小さいことがわかる。これは、CFS・RPC が高引張強度を有する CFS によって、破壊に対してより延性的に抵抗しているためである。すなわち、RPC はりに CFS を合成することによりたわみ値が大幅に改善されたことから靱性能が大幅に向上する結果となった。次に、終局時のたわみに着目して RPC はりと比較すると、両荷重の場合ともに CFS・RPC はりの方が大きい値を示していることがわかる。また、RC はりと比較するならば、CFS・RPC-M と RC-M とではほぼ同程度の値を示していることがわかる。すなわち、CFS・RPC はりは CFS によって RPC の靱性能を向上させ、鉄筋を有する部材と同程度の変形性能を示したことがわかる。

## 6. まとめ

(1) 各供試体の実験耐力は、静荷重曲げ実験、移動荷重実験でそれぞれ、RC はりで 83.00kN,

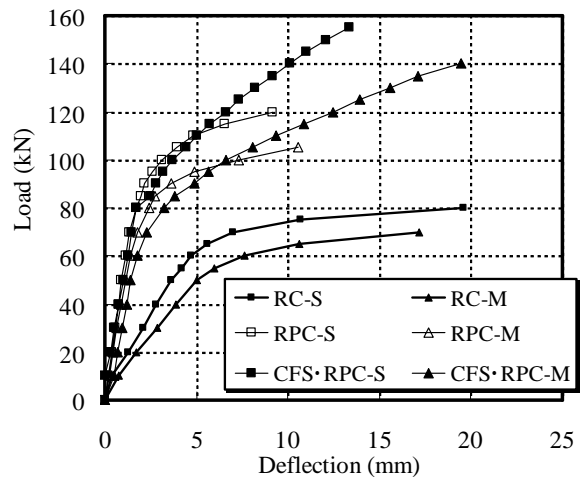


Fig. 3 Load-deflection relation

69.30kN, RPC はりで 120.85kN, 105.10kN, CFS・RPC はりで 155.40kN, 140.95kN となった。RC はりの耐力と比して、静荷重では RPC はりが 1.46 倍, CFS・RPC はりが 1.52 倍, 移動荷重では RPC はりが 1.87 倍, CFS・RPC はりで 2.03 倍となり、大幅に耐力が向上した。

(2) 移動荷重実験の耐力は静荷重曲げ実験の耐力に比して RC はり, RPC はり, CFS・RPC はりでそれぞれ 17%, 13%, 10% 低下した。RC はりの耐力低下率が最も大きいことから RPC が活荷重を受ける部材として実用性を有していると思われる。

(3) 供試体終局直前時のたわみは静荷重, 移動荷重でそれぞれ RPC はりが 9.14mm, 10.56mm, CFS・RPC はりが 13.38mm, 19.48mm となり, CFS・RPC はりの方が延性的な挙動を示した。したがって、CFS を合成したことで耐力が向上するとともに靱性能も大幅に向上した。

## 7. 謝辞

本研究を行うにあたり、炭素繊維シートのご提供を頂きました日鉄コンポジット (株) に厚くお礼を申し上げ、ここに付記して謝意を表します。

## 参考文献:

- 1) 西脇敬一ほか, 短繊維と繊維シートを併用した高靱性モルタルに関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, No.26, (2004), pp.1561-1566
- 2) 社団法人日本コンクリート工学協会, 高靱性セメント複合材料を知る・作る・使う, 高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書, (2002), pp.4-49
- 3) 木田哲量ほか, CFS 補強を施した RC はりの走行荷重に対する耐力と補強効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, (2002), pp.1447-1452