

高弾性炭素繊維シートのハイブリッド化による RC 梁の曲げ性能向上に関する研究

Enhancement of Flexural Performances through FRP Hybridization with High Modulus Type of Carbon Fibers

呉 智深*, 坂本 宏司**, 岩下健太郎***, 小林 朗****

Zhishen Wu, Kouji Sakamoto, Kentaro Iwashita, Akira Kobayashi

*正会員 工博, 茨城大学教授, 工学部都市システム工学科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

**正会員 工修 日鉄防蝕株式会社, エンジニアリング事業部 (〒101-0032 東京都千代田区岩本町2-11-9)

***正会員 工博 茨城大学SVBL研究員, 大学院理工学研究科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

****正会員 工修 日鉄コンポジット株式会社 (〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町3-8 (小原ビル))

The purpose of this study is to investigate the flexural strengthening effects of RC beams with hybrid FRP sheets consisting of high modulus type of continuous carbon fibers. Based on a preliminary hybrid design by following rules of mixture for the hybridization of high strength and modulus types of carbon fibers, the hybrid fiber sheets are used to strengthen RC beams. Throughout a series of investigations on beam specimens under three point bending, it is clarified that the hybrid fiber sheets consisting of high modulus type of carbon fibers as an externally bonded reinforcement can be used to enhance effectively. The service ability performances of structures such as cracking load and other resistance behavior, stiffness and steel yielding load etc.. Moreover, through a rational design of hybrid fiber sheets, the controlling of stress drops due to the gradual ruptures of fibers and the sufficient ductility by avoiding premature debonding can be realized practically. Finally, some indices for evaluating the strengthening effects with hybrid fiber sheets and the optimum mixture are also suggested and discussed in the paper.

Key Words: FRP sheets, hybrid, flexural strengthening, high modulus type of carbon fibers

キーワード: FRP シート, ハイブリッド化, 曲げ補強, 高弾性炭素繊維

1. はじめに

近年の都市インフラの老朽化や維持管理・地震防災に対する認識の高まりに伴い, 都市構造物の補修・補強技術の高度化が強く要求されている。そして, 高い比強度, 比剛性, 軽量, 高度な耐腐食性といった優れた性能を有する連続繊維シートによる接着補強技術が定着しつつある。しかしながら, 連続繊維シートの早期剥離により, 連続繊維シートの靱性が十分に発揮されないうちに, 構造物が終局破壊に至る可能性がある。また, 単一種類の連続繊維シートで補強した場合には, 構造物の使用性能である剛性やひび割れ抑制効果, そして鉄筋降伏荷重の向上効果が比較的小さい。以上の改善すべき点を鑑みて, 著者らは各種性能に優れる連続繊維シートを積層ハイブリッド化したシート(以下, ハイブリッドシート)の引張性能を究明してきた。そして, 引張部材レベルでは, 高弾性率, 高強度, 高伸度の性能を同時に有するハイブリッドシートを実現し, 評価指標を確立するに至った。また, 高弾性繊維や高強度繊維破断時に散逸する衝撃エネルギーの影響による荷重低下を制御するための指標を提案し, 実験的にその適用性を検証した。本研究では, 新たにハイブリッドシートで補強した RC 梁部材の 3 点曲げ試験を実施し, 過去の研究¹⁾にお

いて提案したハイブリッドシートの設計指標および制御指標の適用性を検証した。

2. ハイブリッドシートの積層構成の提案

2.1 ハイブリッド化の概念と原理

ハイブリッドシートの引張挙動を実験的に検証した過去の研究¹⁾から得られた引張応力とひずみの関係の概念図を図-1に示す。高弾性繊維をハイブリッド化することで鋼材より高い剛性が得られるが, 高弾性繊維シートの引張強度は高強度繊維シートの $1/2$ 程度なため, 高弾性繊維シートの破断が先行し, その直後に荷重が急激に低下する。また, 破断とともに衝撃エネルギーが散逸して残りの繊維に伝達するため, 高弾性繊維も同時に破断する場合もある。ただし, 残りの繊維量が十分にある場合や, 残りの繊維に PBO (Poly-para-phenylene-Benzo-bis-Oxazole) 繊維や高強度ポリエチレン繊維 (Dyneema) といった衝撃エネルギー吸収性能に優れる繊維を使用した場合には, 急激な荷重低下が抑えられることが実験的に示されている¹⁾。よって, ハイブリッドシートの積層構成を決定するにあたり, ①先に破断する連続繊維シートから散逸されるひずみエネルギーに対して, 残った連続繊維シートが十分に耐えられる

ようにすること、②先に破断する連続繊維シートの破断の瞬間に衝撃エネルギーが散逸し、これに伴う内部応力集中により生じる応力変動と強度低下を極力抑えること、という2つの条件に留意する必要がある。なお、前者の①は、ハイブリッド補強材に期待される強度・剛性を実現するために最低限必要となる複数種のシートの積層構成を材料力学における複合則により決定するものである(一例として2)。

また、後者の②は、高弾性繊維破断直後の応力低下の制御指標として、上記の複合則に従い求められる高弾性繊維破断直前の応力(f_y)と、そのときのひずみから求められる高強度繊維の受け持つことができる応力との差(応力低下量： σ_{dm})の関係($\lambda = \sigma_{dm}/f_y$)が提案されている¹⁾。

2.2 複合則に基づくハイブリッドシートの引張挙動

複合則(一例として2)により、2種類繊維を積層したハイブリッド複合材の平均応力 σ_L および弾性率 E_L を下式(1)、(2)のように示すことができる。

$$\sigma_L = \varepsilon (E_m A_m + E_s A_s) / A \quad (1)$$

$$E_L = (E_m A_m + E_s A_s) / A \quad (2)$$

ここで、高弾性繊維シートの剛性は E_m 、断面積は A_m とし、高強度繊維シートの剛性は E_s 、断面積は A_s とした。また、総面積を $A (=A_m + A_s)$ 、ハイブリッド複合材に生じるひずみを ε とする。なお、複合則ではハイブリッド材を構成する各種繊維に生じるひずみは一定とされており、剛性の異なる複数種の繊維の層間にはせん断応力の発生が想定されるが、一般に、連続繊維シート層間の接着せん断強度は各種繊維の破断強度を上回ることが知られており、過去の研究でも層間剥離はまったく生じなかったため、ここでは無視することにする。次に、(1)、(2)式により図-2での各区域(I、II、III)における引張挙動をまとめる。

2.3 各段階でのハイブリッドシートの引張挙動

(1) 高弾性繊維シートの破断開始直前までの引張挙動

ハイブリッドシートを引っ張り始めてから、高弾性繊維シートの破断開始直前まで(図-2ではIに対応)の引張応力および弾性率は以下の(3)、(4)式のように表せる。

$$\sigma_I = \varepsilon (E_m A_m + E_s A_s) / A \quad (3)$$

$$E_I = (E_m A_m + E_s A_s) / A \quad (4)$$

(2) 高弾性繊維シートの破断開始直後から高弾性繊維シートの完全破断までの引張挙動

高弾性繊維シートの破断後(図-2ではIIに対応)は全応力を残される高強度繊維シートのみで負担しなければならなくなるうえ、繊維材の破壊は脆性的なために急激な荷重低下が想定される。しかしながら、残される高強度繊維量が比較的多い場合には微小な荷重低下が断続的に生じ、応力-ひずみ関係の見かけ上、応力が一定となるように見える場合もある。このように、高弾性繊維破断後の引張挙動には、残される高強度繊維量によって2種類あることがわかっている¹⁾。また、後者の場合には散逸される衝撃エネルギーが比較的小さく、その影響も小さくなると推測される。

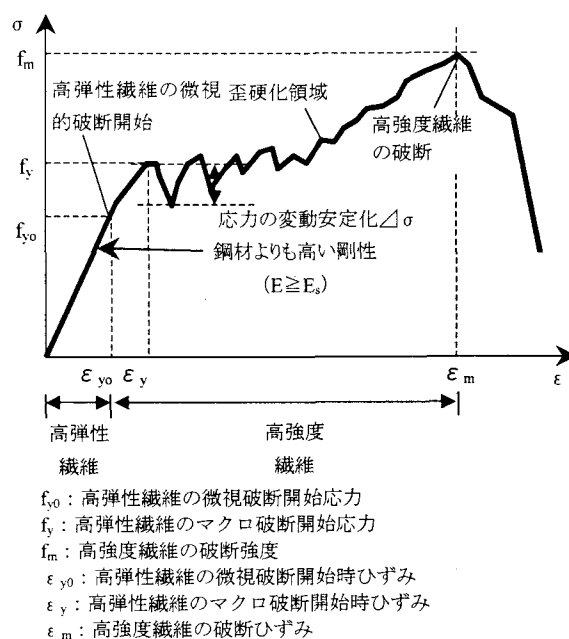


図-1 ハイブリッドシートの引張挙動の概念図

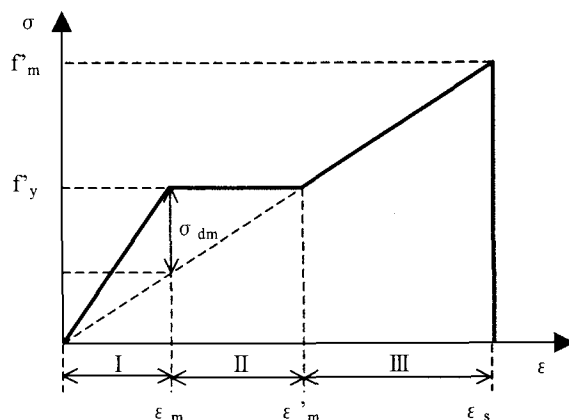


図-2 ハイブリッド補強材の設計概念図

f_y : 高弾性繊維の破断強度
 f_m : 高強度繊維の破断強度
 σ_{dm} : 高弾性繊維破断時に想定される応力低下量
 ε_m : 高弾性繊維破断時のひずみ
 ε'_m : 高弾性繊維破断後の高強度繊維破断応力荷重時のひずみ
 ε_s : 高強度繊維破断時のひずみ

(3) 高弾性繊維シートの完全破断後から高強度繊維シートの完全破断までの引張挙動

高弾性繊維シートの完全破断以降は高強度繊維シートのみが残されるため、残される高強度繊維に損傷や緩みが生じない場合には高強度繊維シートの引張挙動と同じと考えられる。よって、高弾性繊維シートの完全破断直後から高強度繊維シートの完全破断まで(図-2ではIIIに対応)の引張応力および弾性率は、高弾性繊維破断時に高強度繊維に損傷や緩みが生じない場合に限り、以下の(5)、(6)式のように表せる。

$$\sigma_{III} = \varepsilon E_s \quad (5)$$

$$E_{III} = E_s \quad (6)$$

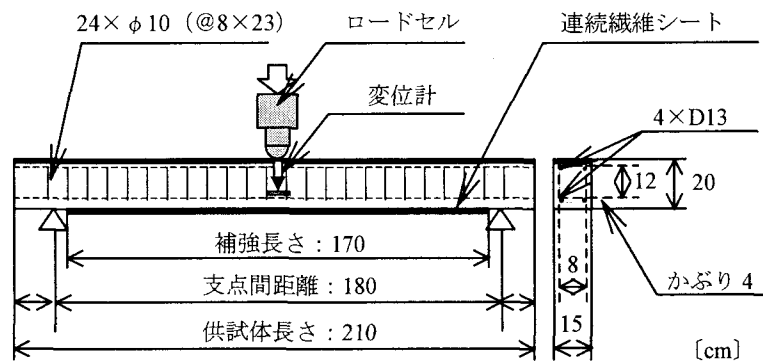


図-3 RC 梁部材の概要寸法

2.4 高弾性繊維シート破断時の荷重低下の制御指標

過去の研究¹⁾では、ハイブリッドシートの引張試験中における、高弾性繊維シート破断開始直後に生じる急激な荷重低下を制御するための指標（破断抵抗能力比）として、 $\lambda_1 = \sigma_{dm} / f_y$ と $\lambda_2 = \sigma_{dm} / f_m$ を提案している。ここで、 σ_{dm} は高弾性繊維破断開始直後の応力低下量、 f_y は高弾性繊維破断直前の引張応力、高強度繊維破断直前（最大荷重時）の引張応力 f_m である。

3. ハイブリッドシート補強 RC 梁部材製作と試験方法

3.1 RC 梁部材の寸法および形状

本研究では連続繊維シートの曲げ補強効果を検討することを目的としているため、考慮する最大量の連続繊維シートで曲げ補強してもせん断破壊が先行しないように断面寸法や鉄筋配置を設定する必要があった。外径は、全長 2100mm、梁せい 200mm、幅 150mm とし、引張・圧縮鉄筋には D13 の異形鉄筋を使用した。また、支点間隔は 1800mm とし、この両支点から 50mm 内側に入った 1700mm の範囲の梁底面に連続繊維シートを接着する。この梁の終局曲げ耐力はコンクリート標準示方書³⁾を参照して 42kN と算出される。この耐力を基準として、ハイブリッドシートで曲げ補強した場合に 200% を上限とする耐力上昇があるものと見込んで 126kN 以上のせん断耐力を持たせることにした。すなわち、80mm ごとに D10 の異形鉄筋をせん断補強筋として配置することにした（p.3、図-3）。なお、この場合と同示方書³⁾の算定式から算出されるせん断耐力は 141kN である。なお、かぶり厚さは通常の構造物を想定して、同示方書³⁾から 40mm とした。ここで、使用したコンクリート、主鉄筋、そして含浸・接着に使用したエポキシ樹脂の物性値を表-1 に示す。

3.2 ハイブリッドシートによる補強方法

RC 梁部材へのハイブリッドシートの接着工程を以下に説明する。まず、コンクリート表面をダイヤモンドサンダーで表面のモルタル部分や不陸部を削ってなだらかにした上で、アセトンで湿らせた布で表面に付着したコンクリート粉や油脂分を拭き取る。次に、エポキシプライマーを 0.4kg/m² の分量で塗布して常温環境下で 12 時間程度養生

表-1 使用材料の特性（設計値）

材料	特性	特性値
コンクリート	圧縮強度 (MPa)	50.3
	圧縮弾性率 (GPa)	33.1
	ポアソン比	0.13
主鉄筋 (SD295A, D13)	引張降伏強度 (MPa)	358
	破断強度 (MPa)	504
エポキシ樹脂	引張強度 (MPa)	51.9
	引張弾性率 (GPa)	3.43

表-2 供試体の一覧

供試体名	積層種類	積層数
無補強	なし	なし
C1	高強度炭素	1層
2C1	高強度炭素×2	2層
3C1	高強度炭素×3	3層
C1C7	高強度炭素/高弾性炭素	2層
1.5C1C7	高強度炭素×1.5/高弾性炭素	2.5層
2C1C7	高強度炭素×2/高弾性炭素	3層
2.5C1C7	高強度炭素×2.5/高弾性炭素	3.5層
P	PBO	1層
2P	PBO×2	2層
3P	PBO×3	3層
PC7	PBO/高弾性炭素	2層
1.5PC7	PBO×1.5/高弾性炭素	2.5層
2PC7	PBO×2/高弾性炭素	3層
2.5PC7	PBO×2.5/高弾性炭素	3.5層

し、表乾状態になったところで高弾性繊維シートを 0.4kg/m² のエポキシ樹脂で含浸・密着させ、その上にさらに同量のエポキシ樹脂で含浸した高強度繊維シートを密着させた状態で 7 日間程度、常温環境下で養生した。なお、1 種類の繊維シートを複数層接着する場合には、1 層につき 0.4kg/m² のエポキシ樹脂を使用した。

表-3 供試体の補強量

RC梁供試体名	補強断面積 (mm ²)	補強材の弾性率 (N/mm ²)	RC梁供試体名	補強断面積 (mm ²)	補強材の弾性率 (N/mm ²)
無補強	なし	なし			
C1	16.65	2.3×10^5	P	19.20	2.4×10^5
2C1	33.30		2P	38.40	
3C1	49.95		3P	57.60	
C1C7	38.10	4.05×10^5	PC7	40.65	3.98×10^5
1.5C1C7	46.43	3.73×10^5	1.5PC7	50.25	3.68×10^5
2C1C7	54.75	3.51×10^5	2PC7	59.85	3.48×10^5
2.5C1C7	63.08	3.35×10^5	2.5PC7	69.45	3.33×10^5

3.3 ハイブリッドシートの積層構成の設定

高弾性繊維シートには高弾性炭素繊維シート (C7) , 高強度繊維シートには高強度炭素繊維シート (C1) と高強度 PBO 連続繊維シート (P) を使用する. そして, RC 梁部材の補強仕様は, ①各種繊維シートを単一種類で接着, ②各種繊維シートを1層ずつ使用したハイブリッドシートを接着, ③各種繊維シートの割合を1:2, 1:3・・・と変化したハイブリッドシートを接着, を考慮して, 全 25 種とした (表-2). ここで, これらの仕様における引張弾性率と断面積を 2.2 の (1), (2)式から求めた (表-3). なお, 各種繊維シートの物性値には, 設計値を使用するよ

りも, N=10 程度の引張試験の平均値を使用する方が, 実際の引張弾性率に近い値が算定できることが過去の研究¹⁾からわかっていることから, 表-4 の引張試験の平均値を使用した. すると, 高弾性繊維シートの比率が大きいかほど引張弾性率が高いことがわかる. なお, 追記として, 表中の記号で C1C7, PC7 など単一種類シートの記号が連なっている場合には, ハイブリッドシートを意味しており, 構成する連続繊維シートの種類を示している. また, 各記号の前につく数字はそのシートの層数であり, 200g/m² 目付け, 150mm 幅のシートを1層の基準とした. なお, 1.5 層とは, 150mm 幅のシートを1層接着した上に 75mm 幅のシートを1層接着することを意味する.

3.4 荷重低下制御指標の算出

3.3 で設定した積層構成のハイブリッドシートの制御指標 λ_1 と λ_2 をそれぞれについて算出した (表-5). なお, 算定にあたり使用する各種繊維シートの引張強度は, 表-4 の各種繊維シートの引張試験結果から得られる平均引張強度とした. また, 計算時に使用する ε は, 表-4 に示した引張試験結果の平均引張応力を設計引張弾性率で除することによって得られるひずみとした. この算定結果から, 残される高強度繊維シートの層数が多いほど制御指標が小さいことがわかる. 一方, ハイブリッドシートで補強した RC 梁部材においても高弾性繊維シート破断時に荷重低下が生

表-4 各種連続繊維シートの引張試験結果

項目	No.	高弾性炭素繊維シート	高強度炭素繊維シート	PBO連続繊維シート
計測引張強度 (N/mm ²)	1	2763	4234	4418
	2	2740	4225	4073
	3	2394	4040	4500
	4	2459	4020	4139
	5	2507	4277	3875
	6	2874	4134	4361
	7	2339	4346	4185
	8	2614	4049	4148
	9	2825	4344	4547
	10	*	4654	*
	平均値	2613	4232	4250
設計引張強度 (N/mm ²)		1900	3400	3500
設計引張弾性率 (kN/mm ²)		540	230	240
設計伸び率 (%)		0.35	1.48	1.46

* 高弾性炭素繊維シートと PBO 連続繊維シートについては9本の試験を実施した.

表-5 荷重低下の制御指標の算定結果

層数		高弾性炭素繊維シート 破断直前の引張応力 f_y (N/mm ²)	高弾性炭素繊維シート 破断直後に想定される 応力低下量 σ_{dm} (N/mm ²)	ハイブリッドシートの引張 強度 f_m (N/mm ²)	$\lambda_1 = \sigma_{dm} / f_y$ (%)	$\lambda_2 = \sigma_{dm} / f_m$ (%)
1	高弾性炭素繊維シート					
	高強度炭素繊維シート					
	1	1957	845	4232	43	20
	1.5	1806	693	4232	38	16
	2	1701	588	4232	35	14
	2.5	1623	510	4232	31	12
	3	1564	451	4232	29	11

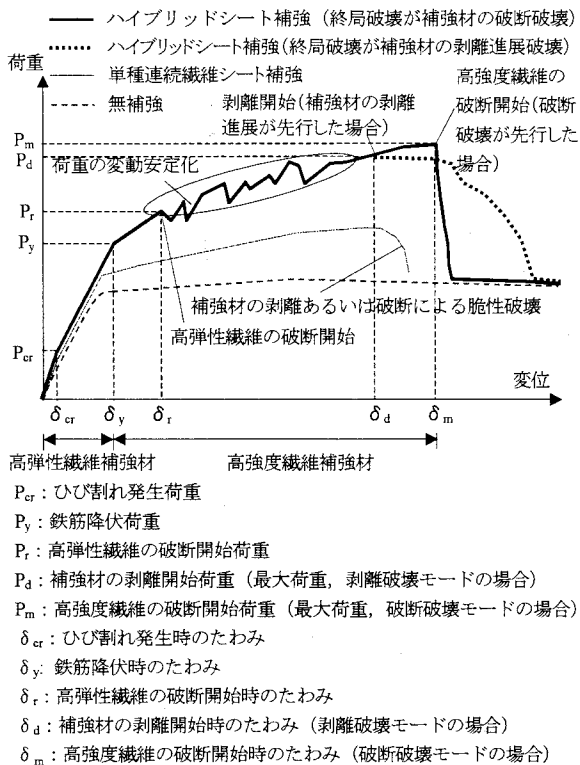


図-4 ハイブリッド補強材による補強効果の概念図

じることが推測される (図-4)。そこで、この荷重低下を制御する指標として、 $\Delta_1 = \angle P / P_y$ および $\Delta_2 = \angle P / P_m$ を提案する。ここで、 $\angle P$ は高弾性繊維シート破断に伴う荷重低下量、 P_y は破断開始直前の荷重、そして、 P_m は高強度繊維シート破断直前 (最大荷重時) の荷重である。これらの指標は、ハイブリッドシートによる補強量が大きいほど P_y や P_m が増加するため、 $\angle P$ のみでは評価できないことから考案したものである。

3.5 各種計測方法

載荷試験は支点間隔 1800mm の 3 点曲げで行い、載荷速度は 1kN/min、制御形式は荷重制御とした (図-3)。一方、測定項目は①50mm 変位計による荷重作用点 (梁のスパン中央) の変位計測、②長さ 5mm のひずみゲージによる引

表-6 試験結果の一覧

供試体名	ひび割れ発生荷重 (kN)	鉄筋降伏荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	最大荷重時変位 (mm)	破壊形状
無補強	12.80	35.47	42.42	13.10	A
C1	9.10	40.97	63.38	20.90	B
2C1	12.76	49.72	81.17	20.25	C
3C1	19.05	56.91	94.95	14.55	B
C1C7	9.23	52.18	71.71	17.89	F
1.5C1C7	11.15	53.14	77.12	16.41	D
2C1C7	13.00	61.50	86.53	19.21	C
2.5C1C7	13.03	62.55	96.05	25.84	B
P	13.50	41.07	68.08	17.06	E
2P	13.60	46.18	87.15	19.18	C
3P	19.05	55.10	97.58	19.03	B
PC7	13.06	50.07	78.13	15.54	F
1.5PC7	18.10	58.06	79.14	16.17	D
2PC7	13.15	61.07	94.01	24.97	C
2.5PC7	19.08	66.18	95.07	17.42	B

張鉄筋のひずみ計測、③長さ 5mm のひずみゲージによる FRP のひずみ計測、④計測長 100mm の π 型変位計による平均ひび割れ幅計測である (図-5)。

4. 試験結果

4.1 試験結果の一覧と破壊形式

載荷試験で得られた各供試体の初期ひび割れ発生荷重、鉄筋降伏荷重、最大荷重、最大荷重時の変位、および供試体の終局破壊形式を表-6 にまとめる。なお、表中の破壊形式はひび割れが発生し、さらに引張鉄筋の降伏後に生じる終局破壊形式を示したものであり、各記号の意味は以下に示す通りである。

A: コンクリートの圧縮破壊を伴う曲げ破壊

B: シートの剥離進展破壊

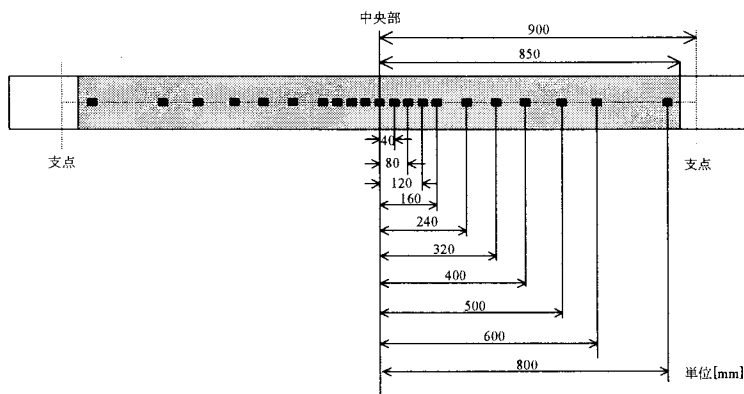
C: A+B のバランス破壊

D: シートの一部破断を伴う C

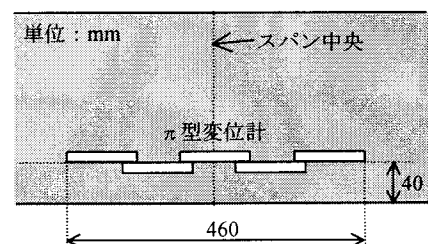
E: シートの破断破壊

F: A+E のバランス破壊

また、鉄筋降伏荷重は、引張鉄筋ひずみの計測値が降伏ひずみを越えた後で、荷重-変位の関係において、変位が急激に増加し始める時の荷重として、図-6 に表示した。



(a) FRP シートひずみゲージの設置位置
(RC 梁部材の下面図、灰色部がシート接着位置)



(b) π 型変位計の設置位置
(RC 梁部材の側面図)

図-5 ひずみゲージと π 型変位計の設置位置

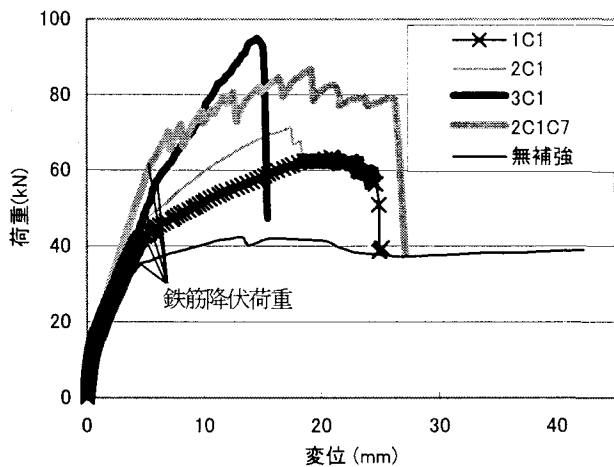


図-6 (a) 荷重-変位の関係 (主にC1)

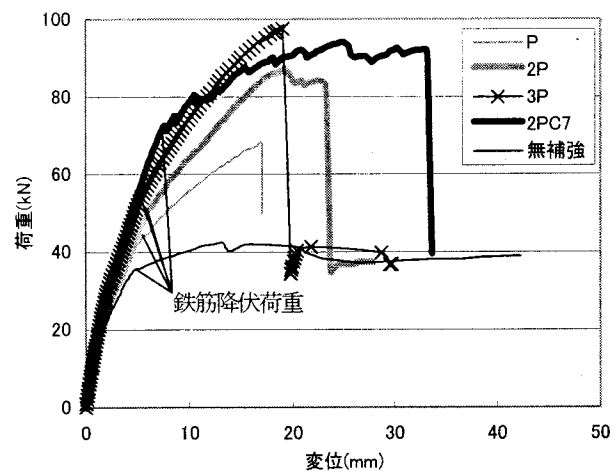


図-6 (c) 荷重-変位の関係 (主にP)

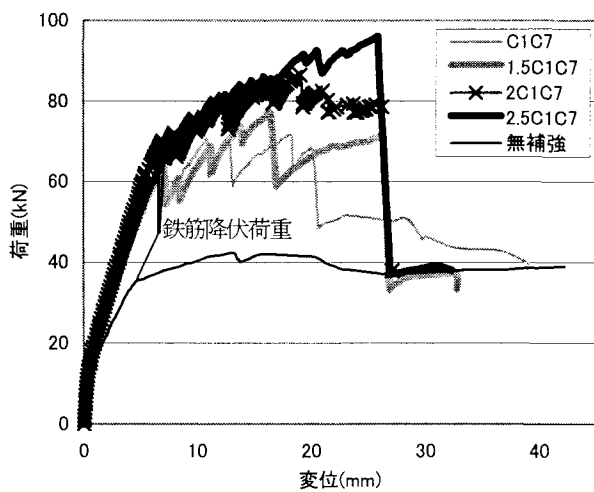


図-6 (b) 荷重-変位の関係 (主にC1C7)

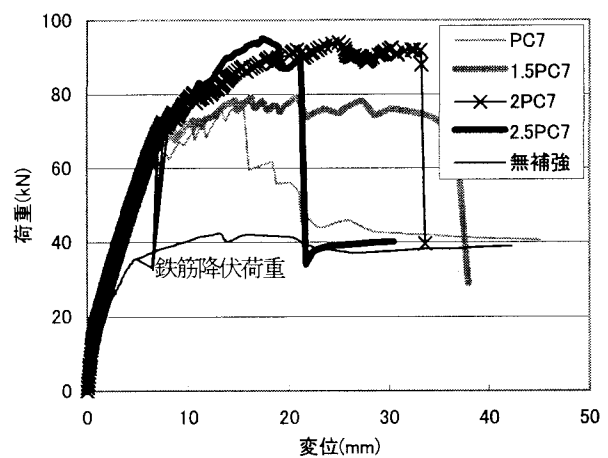


図-6 (d) 荷重-変位の関係 (主にPC7)

4.2 荷重-変位の関係

実験から得られた荷重-変位の関係をハイブリッドシートの連続繊維の組み合わせごとに図-6(a)～(d)に示す。単一種類の炭素繊維シートで補強した供試体（以下、補強材の種類で呼称する。すなわち、C1 供試体、2C1 供試体、3C1 供試体のように呼称する）では、いずれにおいても FRP シートの破断より剥離進展破壊が先行（2C1 供試体のみ圧縮破壊を伴った）しており、補強量がより大きい場合に主鉄筋降伏荷重と最大荷重がより大きいことから、同一破壊モードの上では補強量が大きいほど曲げ補強効果が大きくなることわかる。ただし、補強量が大きいほど早期に剥離が生じるため、終局破壊時の変位がより小さくなる傾向にある。一方、ハイブリッドシート補強供試体（1～2.5C1C7 供試体）でも、同様に補強量が大きいほど引張鉄筋降伏荷重と最大荷重がより大きい傾向が確認される。しかしながら、終局破壊時の変位は補強量が大きいほど増加していることがわかる。そこで、この原因を破壊モードと高弾性繊維シート破断時の荷重低下に注目して追求することにする。まず、破壊モードはC1C7 供試体が破断破壊、1.5C1C7 供試体が一部破断を伴う剥離破壊、2C1C7、

2.5C1C7 供試体では剥離破壊であり、C1 の層数が多いほど破断モードより剥離モードとなる傾向が確認される。次に、ハイブリッドシートで補強した供試体は主鉄筋降伏後に、荷重が微小に低下、上昇を繰り返す変動が見られる。これは、ここでのシートひずみの計測値が高弾性繊維の破断ひずみとほぼ同様なことから高弾性炭素繊維の段階的な破断に伴う反応であると推測される。ここで、載荷試験結果においては、C1C7 供試体 ($\lambda_1=43\%$, $\lambda_2=20\%$)、1.5C1C7 供試体 ($\lambda_1=38\%$, $\lambda_2=16\%$) で、この荷重の低下量が大きく、高強度炭素繊維の量が比較的多い 2C1C7 供試体 ($\lambda_1=35\%$, $\lambda_2=14\%$)、2.5C1C7 供試体 ($\lambda_1=31\%$, $\lambda_2=12\%$) では、荷重変動が小さいことがわかる。これらの荷重低下量を評価するために、 Λ_1 と Λ_2 をそれぞれの積層構成ケースごとに算出すると、C1C7 供試体で $\Lambda_1=18.2\%$, $\Lambda_2=17.0\%$ 、1.5C1C7 供試体で $\Lambda_1=13.8\%$, $\Lambda_2=11.3\%$ 、2C1C7 供試体で $\Lambda_1=5.6\%$, $\Lambda_2=4.5\%$ 、2.5C1C7 供試体で $\Lambda_1=1.2\%$, $\Lambda_2=0.9\%$ である。よって、C7 の層数に対する C1 の層数を増すことで荷重低下量が抑えられ、評価指標の Λ_1 と Λ_2 がより小さくなることが実験的に示された。以上から、ハイブリッドシートに含まれる高強度繊維量がより大きい場合の破壊モードの変化および高弾性繊維破断直後の荷重

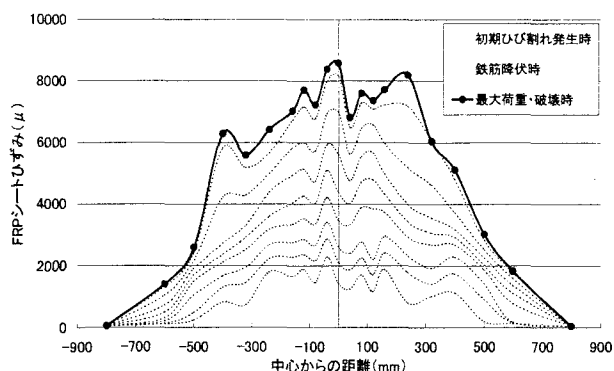


図-7(a) 各荷重レベルにおける3C1 供試体のFRP ひずみ分布 (補強材の一部破断を伴う剥離破壊)

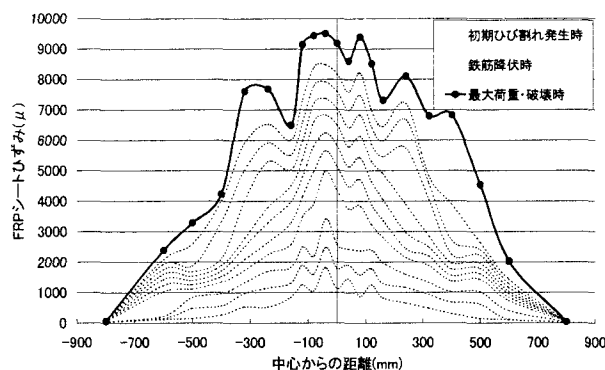


図-7(d) 各荷重レベルにおける3P 供試体の FRP ひずみ分布 (剥離破壊)

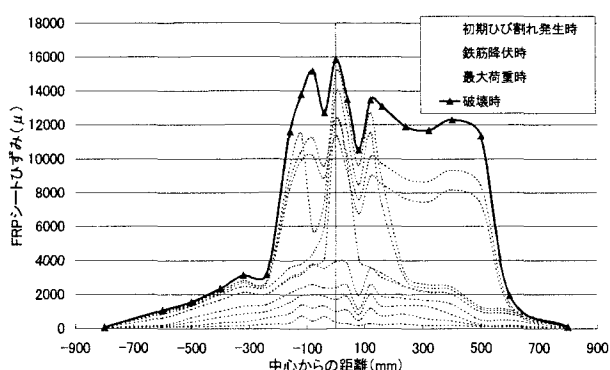


図-7(b) 各荷重レベルにおける1.5C1C7 供試体のFRP ひずみ分布 (剥離破壊)

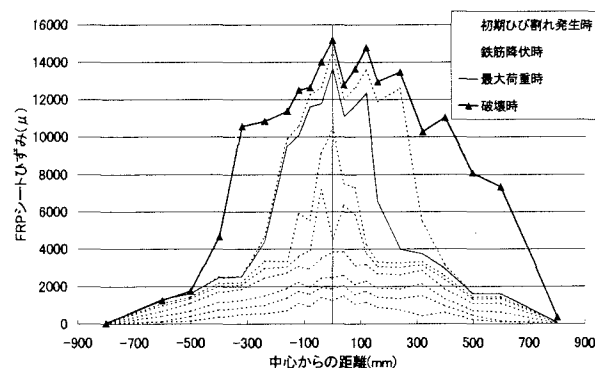


図-7(e) 各荷重レベルにおける1.5PC7 供試体のFRP ひずみ分布 (補強材の一部破断を伴う剥離破壊)

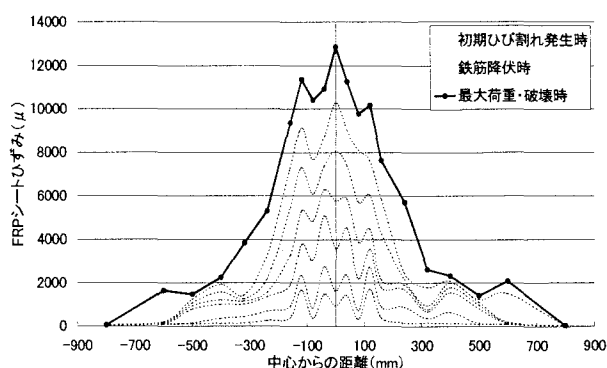


図-7(c) 各荷重レベルにおけるP 供試体のFRP ひずみ分布 (補強材の破断破壊)

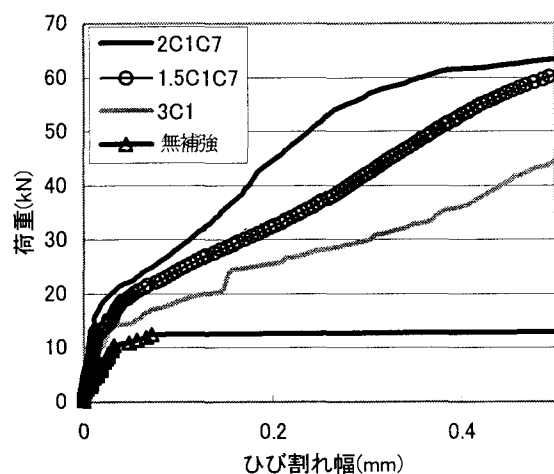


図-8 荷重-平均ひび割れ幅の関係

低下量の減少に伴う散逸する衝撃エネルギー量の低下により終局破壊時の変位がより大きくなったと考えられる。ただし、本実験で最も補強量が大きい2.5PC7 供試体では、2PC7 供試体に比べて終局破壊時の変位が小さくなっており、補強量が大きくなりすぎる場合には、変位を増加させる効果に限界があることも示された。なお、散逸する衝撃エネルギーの影響については4.5 (5) 靱性率で補足する。

4.3 連続繊維シートのひずみ分布

各供試体の連続繊維シートのひずみ分布図を図-7(a)～(e)に示す。P.4 の表-3 に示したように1.5C1C7 供試体と3C1 供試体では補強量が類似しているが、破壊形式が3C1

で剥離破壊なのに対し、1.5C1C7 供試体では補強材の一部破断を伴う剥離破壊なため、最大ひずみとひずみ分布が大きく異なる。すなわち、3C1 供試体では最大ひずみが8,500 μ 程度の台形状に分布しているが、1.5C1C7 供試体では補強材の一部破断が生じたスパン中央のひずみが16,000 μ に達しており、C1 シートの破断ひずみを達成している。また、その分布は比較的狭い範囲に集中した山形の形状であることがわかる。また、PBO 連続繊維シートを使用した1.5PC7 供試体と3P 供試体 (ほぼ同等の補強量) でも同様の結果が得られた。

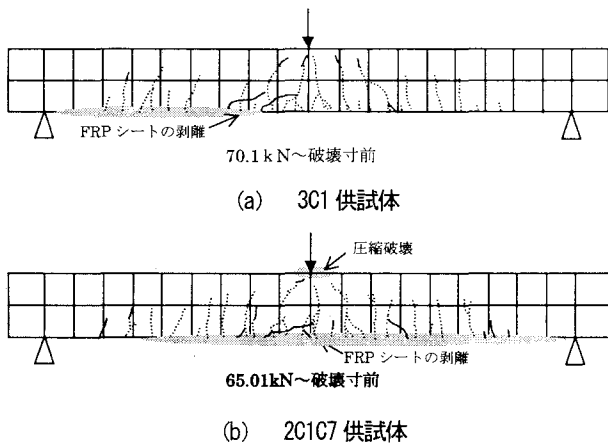


図-9 ひび割れ分布図

表-7 評価指標 鉄筋降伏耐力 (ひずみゲージより)

供試体名	C1	2C1	3C1	C1C7	1.5C1C7	2C1C7	2.5C1C7
評価指標 鉄筋降伏耐力	1.16	1.40	1.60	1.47	1.50	1.73	1.76
連続繊維シートの 断面剛性E×補強厚さt (kN/mm)	25.53	51.06	76.59	102.75	115.52	128.28	141.05
供試体名	P	2P	3P	PC7	1.5PC7	2PC7	2.5PC7
評価指標 鉄筋降伏耐力	1.16	1.30	1.55	1.41	1.64	1.72	1.87
連続繊維シートの 断面剛性E×補強厚さt (kN/mm)	30.72	61.44	92.16	107.94	123.30	138.66	154.02

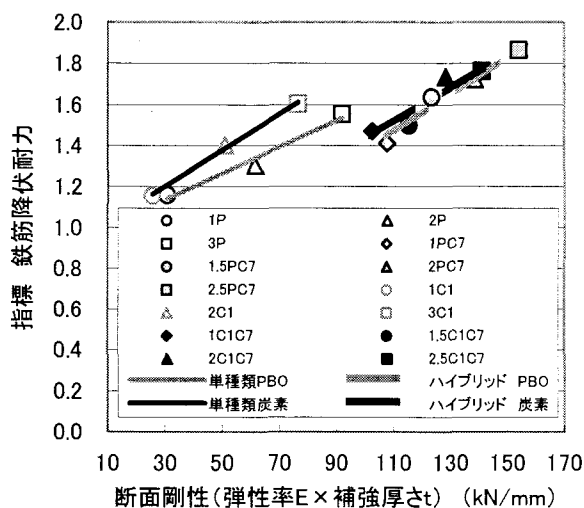


図-10 評価指標 鉄筋降伏耐力 (ひずみゲージより)

4.4 ひび割れ抑制効果に関する検討

各種供試体の荷重-平均ひび割れ幅の関係を図-8 に示す。なお、ひび割れ幅は吉澤らの研究⁵⁾を参照して、RC 梁側面の引張鉄筋高さに設置したπ型変位計の平均値で評価することにした。1.5C1C7 供試体と 3C1 供試体 (ほぼ同等の補強量) を比較すると、1.5C1C7 供試体のひび割れ幅の方が小さく、ひび割れがより大きく抑制されたことがわかる。また、図-9 に示した 2C1C7 供試体のひび割れ分布図

表-8 評価指標 鉄筋降伏耐力 (変曲点より)

供試体名	C1	2C1	3C1	C1C7	1.5C1C7	2C1C7	2.5C1C7
指標 鉄筋降伏耐力	1.18	1.33	1.56	1.72	1.78	1.81	1.92
連続繊維シートの 断面剛性E×補強厚さt (kN/mm)	25.53	51.06	76.59	102.75	115.52	128.28	141.05
供試体名	P	2P	3P	PC7	1.5PC7	2PC7	2.5PC7
指標 鉄筋降伏耐力	1.16	1.43	1.52	1.61	1.75	1.85	1.87
連続繊維シートの 断面剛性E×補強厚さt (kN/mm)	30.72	61.44	92.16	107.94	123.30	138.66	154.02

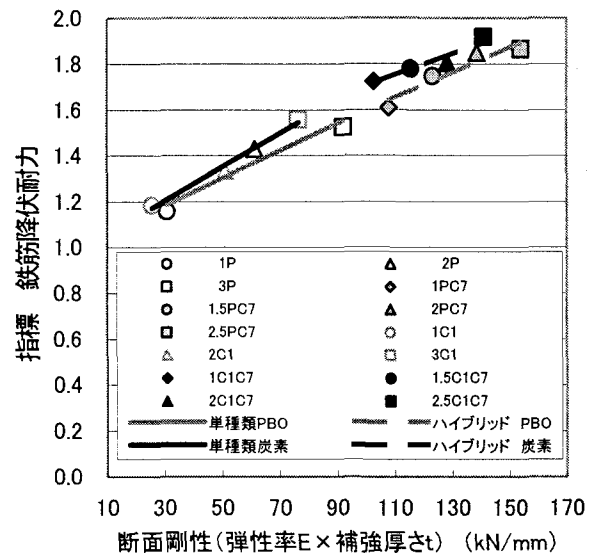


図-11 評価指標 鉄筋降伏耐力 (変曲点より)

から、3C1 供試体と比べてひび割れ本数が増加していることがわかる。

4.5 各種評価指標による検討

ハイブリッドシートにより接着補強した RC 梁部材の補強効果やハイブリッド化の効果を評価するために、以下の5つの指標を提案する。

- ①鉄筋降伏耐力：鉄筋降伏荷重／無補強供試体の鉄筋降伏荷重
- ②最大耐力：最大荷重／無補強供試体の最大荷重
- ③靱性率：終局破壊時の変位／鉄筋降伏時の変位
- ④補強材の靱性率：終局破壊時の最大シートひずみ／引張試験の平均破断ひずみ

ここで、終局破壊時の変位は、高強度繊維の破断開始後に、無補強供試体の最大荷重と同程度まで荷重が低下した時の変位とする。

(1) ひずみゲージの計測値を用いた鉄筋降伏荷重による評価

構造物の使用性能である鉄筋降伏荷重を評価する。なお、前に述べたように鉄筋降伏は引張鉄筋に設置したひずみゲージの計測値が引張鉄筋の降伏強度に到達した点として判定した。表-7 に各供試体の鉄筋降伏耐力を、図-10

表-9 評価指標 最大耐力

供試体名	C1	2C1	3C1	C1C7	1.5C1C7	2C1C7	2.5C1C7
指標 最大耐力	1.16	1.40	1.60	1.47	1.50	1.73	1.76
連続繊維シートの 引張強度 f_t ×補強厚さ t (kN/mm)	0.47	0.94	1.41	0.47	0.70	0.94	1.17
供試体名	P	2P	3P	PC7	1.5PC7	2PC7	2.5PC7
指標 最大耐力	1.16	1.30	1.55	1.41	1.64	1.72	1.87
連続繊維シートの 引張強度 f_t ×補強厚さ t (kN/mm)	0.53	1.06	1.60	0.53	0.80	1.06	1.33

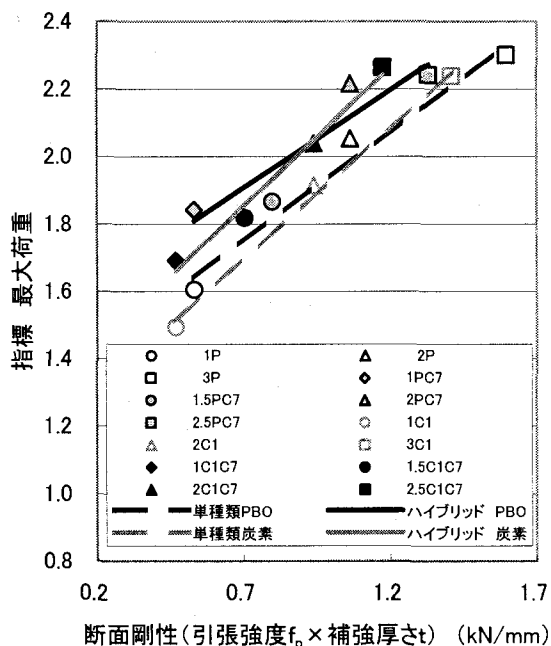


図-12 評価指標 最大耐力

に鉄筋降伏耐力と補強材の引張剛性の関係を示す。なお、ここで言う引張剛性とは、補強量を定量的に評価するために設定した指標であり、補強材の弾性率×厚さを意味する。この図から、引張剛性が大きいほど鉄筋降伏耐力が大きいことが確認できる。しかしながら、単一種類補強供試体とハイブリッド補強供試体の近似線は一直線上になく、実験の再現性がうまく得られていないことがわかる。この原因として、鉄筋ひずみを計測するひずみゲージの設置位置と鉄筋の降伏開始位置に若干のずれが生じたためと推測される。

(2) 荷重-変位の関係における変曲点に着目した鉄筋降伏荷重による評価

前に述べたように、鉄筋降伏荷重の判定にひずみゲージの計測値を使用した場合には鉄筋降伏計測のタイミングにずれが生じるため、ひずみゲージの計測値が引張鉄筋の降伏強度に到達した周辺で荷重-変位曲線の傾きが著しく変化する点(変曲点)を鉄筋降伏荷重と推定することとした。そして、表-8に各供試体の鉄筋降伏耐力を、図-11に鉄筋降伏耐力と補強材の引張剛性の関係を示す。すると、連続繊維シートの引張剛性が大きいほど、鉄筋降伏耐力

表-10 評価指標 靱性率

供試体名	1C1	2C1	3C1	1C1C7	1.5C1C7	2C1C7	2.5C1C7
指標 靱性率	3.67	5.01	4.09	3.34	7.88	7.13	4.55
引張強度×補強厚さ (kN/mm)	0.47	0.94	1.41	0.47	0.70	0.94	1.17
供試体名	1P	2P	3P	1PC7	1.5PC7	2PC7	2.5PC7
指標 靱性率	5.29	6.25	3.13	4.25	5.67	5.66	5.56
引張強度×補強厚さ (kN/mm)	0.53	1.06	1.60	0.53	0.80	1.06	1.33

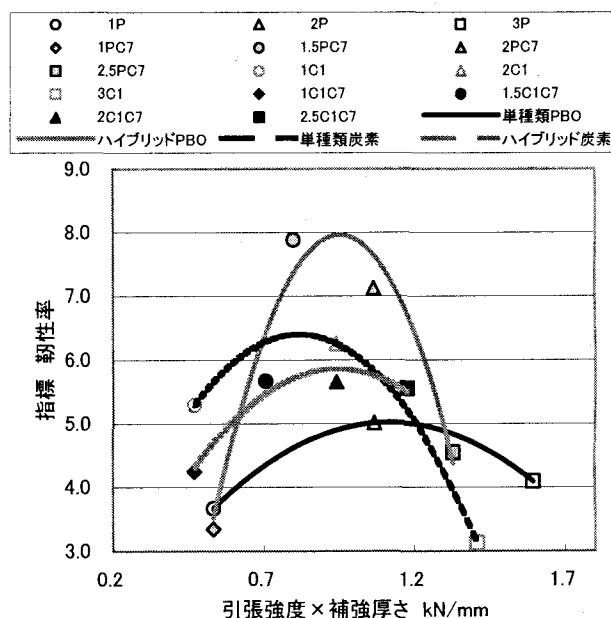


図-13 評価指標 靱性率

が大きいことが確認される。また、単一種類補強供試体とハイブリッド補強供試体の近似線は一直線上にあり、その関係はほぼ比例状態にあることがわかる。よって、補強材の引張剛性がより大きいほど、鉄筋降伏耐力がより大きくなることが実験的に示された。

(3) 最大荷重による評価

表-9に各供試体の最大耐力を、図-12に最大耐力と補強材の引張耐力の関係を示す。なお、ここで言う引張耐力とは、引張剛性と同様に補強量を定量的に評価するために設定した指標であり、補強材の引張強度×厚さを意味する。なお、最大荷重時には高弾性繊維シートは完全に破断しているため、補強材の引張耐力は高強度繊維のみで算出している。この図から、補強材の引張耐力が大きいほど、最大耐力がより大きいことが確認できる。また、最大耐力と補強材の引張耐力の関係における近似線は全てがほぼ一直線上に存在し、比例関係になっているように見える。さらに、ハイブリッドシート補強供試体では最大耐力がやや大きいように見える。

(4) 靱性率による評価

表-10に各供試体の靱性率を、図-13に靱性率と補強材の引張耐力の関係を示す。この図から、これらの近似線は上に凸の曲線形状なことがわかる。しかしながら、靱性

表-11 評価指標 補強材の靱性率

供試体名	C1	2C1	3C1	C1C7	1.5C1C7	2C1C7	2.5C1C7
指標 補強材の靱性率	0.77	0.72	0.60	0.98	0.95	0.84	0.72
連続繊維シート の引張強度 f_t ×補強厚さ t (kN/mm)	0.47	0.94	1.41	0.47	0.70	0.94	1.17
供試体名	P	2P	3P	PC7	1.5PC7	2PC7	2.5PC7
指標 補強材の靱性率	0.75	0.94	0.49	1.11	0.91	1.06	0.78
連続繊維シート の引張強度 f_t ×補強厚さ t (kN/mm)	0.53	1.06	1.60	0.53	0.80	1.06	1.33

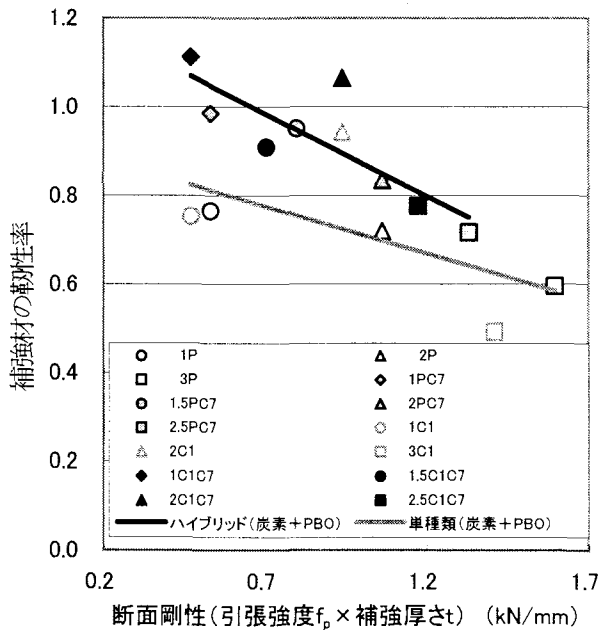


図-14 評価指標 補強材の靱性率

率と破壊形式には密接な関係があり、破断モードの供試体に比べて剥離モードの供試体では靱性率がより大きな値となることに注意が必要である。一方、補強材の引張耐力が0.6～1.0kN/mm付近では靱性率が大きく、それ以外の区域では比較的小さい値である。これは、引張耐力が0.6kN/mm未満では補強量が小さいために破断破壊が生じ、1.0kN/mm以上では補強量が大きすぎるために早期に剥離進展破壊に至るため、靱性率が小さくなったと考えられる。また、PBO繊維を含むハイブリッドシート補強供試体では靱性率の大幅な向上が見られる。これは、PBO連続繊維シートの高度な衝撃エネルギー吸収性能により高弾性繊維破断時の荷重低下がより有効に抑えられ、補強材に与える影響が緩和されたためと考えられる。

(5) 補強材の靱性率

表-11に各供試体の補強材の最大ひずみを、図-14に補強材の靱性率と補強材の引張耐力の関係を示す。補強材の靱性率と補強材の引張耐力の関係では、負の相関関係が見られる。これは、補強量が大きいほど早期に剥離が生じるためであると考えられる。一方、引張耐力が同量であっても、ハイブリッド化することにより補強材の靱性率がより

表-12 全評価指標

供試体名	指標		
	鉄筋降伏耐力 (変曲点より)	最大耐力	シートひずみ
1C1	1.18	1.49	0.75
2C1	1.33	1.91	0.94
3C1	1.56	2.24	0.49
1C1C7	1.72	1.69	1.11
1.5C1C7	1.78	1.82	0.91
2C1C7	1.81	2.04	1.06
2.5C1C7	1.92	2.26	0.78
1P	1.16	1.60	0.77
2P	1.43	2.05	0.72
3P	1.52	2.30	0.60
1PC7	1.61	1.84	0.98
1.5PC7	1.75	1.87	0.95
2PC7	1.85	2.22	0.84
2.5PC7	1.87	2.24	0.72

□鉄筋降伏耐力 ■最大耐力 ■補強材の靱性率

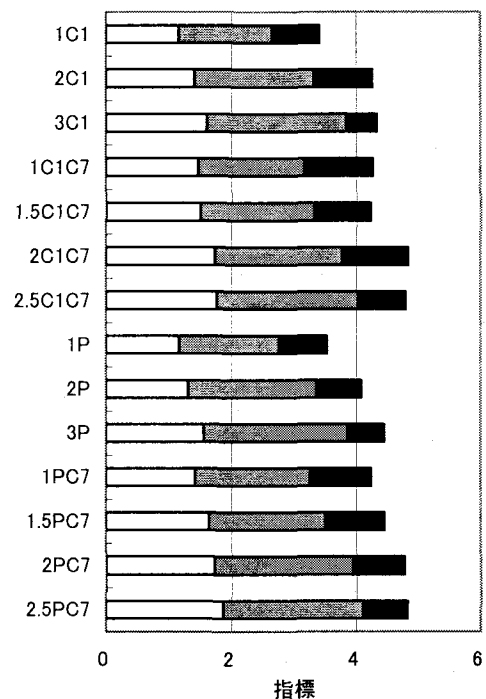


図-15 全評価指標

高い値となることが実験的に示された。その理由としては、前に述べたように、高弾性繊維破断時に散逸する衝撃エネルギーが減少し、影響が小さくなるためであると考えられる。

(6) 総合評価

表-12に各供試体の全指標の合計値を鉄筋降伏耐力、最大耐力、補強材の靱性率に分類して図-15に示す。この図から、各種指標値の合計は、終局破壊モードが補強材の剥離（一部コンクリート圧縮破壊を含む）モードの単一種類

補強供試体 (2C1, 3C1, 2P, 3P) と終局破壊モードが補強材の破断 (一部破断を含む) モードのハイブリッドシート補強供試体 (1C1C7, 1.5C1C7, 1PC7, 1.5PC7) では、ほぼ同程度の合計値であることがわかる。一方、終局破壊モードが補強材の剥離 (一部コンクリート圧縮破壊を含む) モードのハイブリッドシート補強供試体 (2C1C7, 2.5C1C7, 2PC7~2.5PC7) では、他の供試体に比べて比較的指標の合計値が高いことがわかる。よって、補強量をより大きくすることで、破断モードから剥離モードに変化し、各種評価指標値およびその合計値がより大きくなることわかる。

5. まとめ

本研究によって以下の結果が得られた。

(1) 連続繊維シートによる補強量がより大きい場合に、補強材のハイブリッド化の有無に関わらず、破壊モードが補強材の破断モードから剥離モード (あるいはコンクリート圧縮破壊) に変化し、鉄筋降伏耐力、最大耐力、靱性率といった評価指標がより大きくなることが実験的に確認された。

(2) 高弾性繊維破断時の荷重低下を制御する指標を提案し、この指標と積層構成の関係を実験的に究明した。その結果、高弾性繊維破断時に残される高強度繊維量をより大きくすることで、高弾性繊維破断時の荷重低下がより小さくなることが実験的に示された。なお、本研究で λ_1 を35%以下、 λ_2 を14%以下に設定したハイブリッドシートにより補強したRC梁の Δ_1 、 Δ_2 はともに5.6%以下と、比較的小さな値に抑えられた。

(3) ハイブリッドシート補強供試体では、ほぼ同等の補強量の単一種類繊維シートで補強した場合より平均ひび割れ幅が小さく、ひび割れ本数が増加することが実験的に示され、ひび割れがより大きく抑制されたことを示唆した。

(4) 高弾性繊維破断時の荷重低下が比較的小さい場合には、高弾性繊維破断時に散逸される衝撃エネルギーがより小さいため、接着界面に対する影響がより小さくなることが推測され、補強量が増加した場合にも終局破壊時の変位

がより増加するケースが実験的に示された。ただし、一方では補強量が大きくなりすぎる場合には、変位を増加させる効果に限界があることも示された。一方、衝撃エネルギー吸収性能に優れるPBO連続繊維シートを高強度繊維材に使用した場合に靱性率が増大するケースがあり、衝撃エネルギーの影響が実験的に明確となった。

(5) 断面剛性を基準として、ハイブリッドシート補強供試体の終局耐力は、単一種類繊維シートで補強した場合に比べてやや高い値となることが実験的に示された。

付録

本研究を行うにあたって、東洋紡績 (株) には PBO 繊維材料をご提供いただいた。ここに記して、厚く御礼申し上げるしだいである。

参考文献

- 1) 呉智深, 坂本宏司, 岩下健太郎, 岳清瑞: 連続繊維構造材のハイブリッド化に関する研究, 日本複合材料学会誌 (掲載決定)
- 2) Hull, D., Clyne, T. W., An introduction to Composite Materials, Second edition, Syndicate of the Cambridge University, Press, England, 1996
- 3) コンクリート標準示方書 [設計編], 土木学会, 1996
- 4) 土木学会: コンクリートライブラリー101, 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針, 2001
- 5) 吉澤弘之, 呉智深: 炭素繊維シート補強によるRC引張部材のひび割れ特性に関する研究, 土木学会論文集, No.613, V-42, pp.249-262, 1999
- 6) Wu, Z.S., Sakamoto, K., Niu, H. D., Shimada, M., Murakami, S., Strengthening effect of concrete flexural members retrofitted with hybrid FRP composites, Proc. of the third international conference on composites in infrastructure (ICCI'04), CD-ROM, California, USA, 2002

(2005年4月15日 受付)