論文　SFRP 補強された RC 構造物の耐荷力

高浜　達矢[*1]・大寺　一清[*2]・堤　忠彦[*3]・二羽　淳一郎[*4]

要旨：新しい補修・補強法として提案されている SFRP(Sprayed Fiber Reinforced Polymers：短繊維樹脂混合吹付け補強)工法を用いて，RC 構造物に対する補修・補強の効果を検討した。まず，SFRP 工法による RC 構造物の補修・補強を適用する際に適した材料を SFRP 単体の引張試験より選定した。選定した材料を用いて軸方向鉄筋比，せん断補強筋比の異なる RC はりに対して，吹付け形状を変化させて SFRP 補強を行った。SFRP 補強を行うことにより，耐荷力は最大で 1.57 倍となった。また,吹付け形状が耐力向上に及ぼす影響について検討し，RC 部材に対する SFRP 補強についての考え方を示した。

キーワード：SFRP 工法，樹脂，繊維長，吹付け形状，耐荷力

1. はじめに

近年，コンクリート構造物の劣化が顕在化してきたことや耐震設計の見直し等により，補修・補強が必要な状態にあると判断されるコンクリート構造物が多く存在するようになってきたと考えられる。我が国の財政状況を考慮すると，今後，新規に構造物を建設することは，次第に困難になっていくと考えられる。そこで，既存の構造物に対して補修･補強を行うとともに，効率の良い維持・管理を行って供用年数を増加させていかなければならない。現在，軽量・高強度である連続繊維シート補強や靭性の向上が期待できる鋼板接着工法など様々な補修・補強法が提案され，実用化されているが連続繊維シート工法には異方性，鋼板接着工法には腐食や施工性の面で問題点もあり，より安価で効率のよい手法の開発が期待されている。

このような背景の中で Banthia[1)] らによって SFRP 工法が提案された。この手法は，繊維補強の長所を活かしたものであり，短繊維を吹付けることことによって，異方性を除去することが可能であり，また材料非線形性を示すことも報告されている。短繊維の繊維長は使用するローリングカッターの刃の設置位置に応じて変化させることが可能であり，繊維長の増加に伴い，線形性が強く高強度な SFRP になることも報告されている。このように繊維長の変化によって，その性能を変化させることが可能であることは，大きな利点であると考えられる。また，吹付けることによって，広範囲への施工が容易になる点も長所の一つである。

現在までに，我が国において SFRP 工法が適用された事例はほとんどないが，SFRP 工法に期待される役割は今後大きくなると予想される。

本研究ではまず，SFRP 工法に適した材料の選定を行う。選定された材料を適用した SFRP 工法を軸方向鉄筋比，せん断補強鉄筋比の異なる RC はりに対して，吹付け形状を変化させて施工し，その補強効果についての検討を行うとともに，基本的な SFRP 補強の考え方を示すこととする。

2. SFRP 単体の引張試験

構造物の補修・補強を行う上で，材料非線形性を示すことは，構造物の靭性を向上させることができるという点で，非常に有効である。

SFRP 工法に使用する繊維としてグラスファイバー(Gf)を用い，繊維長を 26mm と一定にし

*1 東京工業大学大学院　理工学研究科土木工学専攻　修士(工学)　(正会員)
*2 東京工業大学大学院　理工学研究科土木工学専攻　(正会員)
*3 富士ピー・エス(株)技術本部設計部設計課長　博士(工学)
*4 東京工業大学大学院教授　理工学研究科土木工学専攻　工博　(正会員)

て樹脂を変化させることにより，より大きな非線形性を有する樹脂の選定を試みた。その後，繊維長を変化させ，使用する樹脂と繊維長の組合せを選定することとした。繊維の混入率は全ケースにおいて樹脂に対する体積比 30%で一定である。

2.1　樹脂の選定

樹脂は，ビニルエステル樹脂（Ve1），(Ve2)の 2 種類，不飽和ポリエステル樹脂(Pe)，および(Ve2)と(Pe)を同体積比率で混合したもの(PV)の計 4 種類とした。使用した繊維および樹脂の基礎的な材料物性値を**表-1** に示した。

繊維長はローリングカッターの構造上，13mm，26mm，52mm の 3 種類となる。最大の繊維長が 52mm であることから供試体平行部の幅を 60mm，長さを 80mm とし，JIS K 7054「ガラス強化プラスチックの引張試験方法」A 型試験片を参考に供試体形状を決定した(**図-1**)。供試体数は各 5 体とし，切出し方向を 72° ずつ回転させることで，異方性が著しくならないよう配慮した。ただし，樹脂「Ve1」は，供試体平行部が 26mm である昨年の研究結果 [2),3)]を利用している。

ひずみの測定は，ひずみゲージを用いて行い，供試体平行部中央と中央から±30mm の位置の計 3 点に貼付し，破断部に最も近い位置にあるひずみゲージの値を破断ひずみとして用いた。応力は，得られた荷重を破断面の面積を測定し，除することによって求めた。平行部で破断しなかった供試体に関しては検討に用いていない。

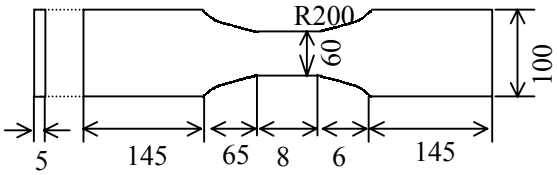

図-1　引張試験供試体（unit：mm）

表-1　繊維及び樹脂の材料物性値

材料名	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	伸び率 (%)
Gf	3500	74	4.8
Ve1	80.0	2.8	6.0
Ve2	80.0	3.1	3.2
Pe	17.6	0.7	85

繊維に Gf を用い，繊維長を 26mm と一定にし，樹脂を変化させた SFRP 単体の引張試験より得られた応力-ひずみ曲線を**図-2** に示す。また，計測されたそれぞれの SFRP の特性値を**表-2** に示す。ただし，ここで引張弾性係数は初期状態からひずみが 3000μまでの間の弾性係数とした。これらの結果から，以下のことが指摘できる。

- 高強度樹脂(Ve1,Ve2)を用いた場合，樹脂の伸び率の影響はあまり見られない。
- 樹脂を混合した場合，強度とひずみはそれぞれ弱いほうの樹脂の影響を受け，初期剛性は両者の中間をとる。
- 低強度の樹脂を用いることにより，SFRP の応力-ひずみ関係は非線形性を増す。
- 樹脂「Pe」を使用した SFRP が最も大きな破断ひずみを示す。

以上から今後の検討で用いる樹脂として不飽和ポリエステル樹脂「Pe」を選定した。

このような結果が得られた理由として，以下のことが考えられる。載荷の初期において，樹脂にひび割れは生じておらず，繊維と樹脂が付着した状態で引張力に対して抵抗していると考えられる。その後，荷重が増加するにつれ，繊

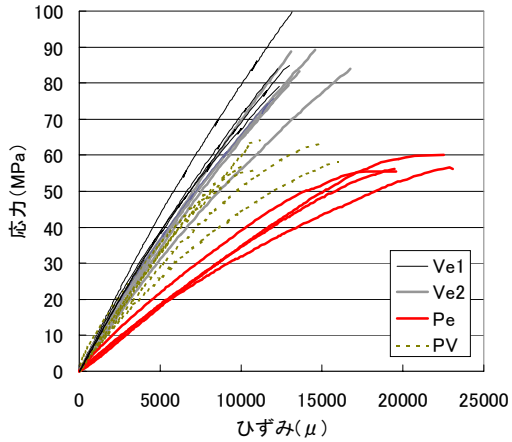

図-2　樹脂を変化させた SFRP の応力-ひずみ関係

表-2　樹脂を変化させた SFRP の引張特性値

樹脂名	平均引張強度(MPa)	平均最大ひずみ(μ)	引張弾性係数(MPa)
Ve1	84.9	14200	7300
Ve2	84.7	12500	7900
Pe	57.1	19400	4300
PV	59.9	12600	6700

維と樹脂間の付着が失われる。この際，低強度で弾性係数の低い樹脂を用いた場合は，荷重が低い段階から樹脂の変形が大きくなり,繊維はその変形に追随できなくなることが予想される。変形に追随できなくなった繊維は，樹脂との摩擦力によって応力を伝達することが予想される。高強度，高剛性の樹脂を用いた場合，樹脂の変形が小さくなるため，比較的大きな荷重まで繊維と樹脂は付着した状態で荷重に抵抗すると考えられる。その後，樹脂にひび割れが生じると，急激な応力の上昇が繊維に対して生じ，応力の集中した繊維が破断することによって破壊に至ると考えられる。

2.2　繊維長の選定

「Pe」を使用し，繊維の長さを変化させた際のSFRP 単体の引張特性について検討する。使用した試験体は**図-1** と同じであり，ひずみの測定法，応力の算出法も同様にして行った。樹脂に「Pe」を使用して，繊維長を変化させた引張試験から得られる SFRP 単体の応力-ひずみ曲線を**図-3** に示す。また，得られたそれぞれの特性値を**表-3** に示した。

これらの結果から以下のことが指摘できる。

- 繊維長が長くなるにつれ，引張強度が強くなる傾向にある。
- 繊維長 26mm のものが最も大きな変形性能を示す。
- 繊維長 52mm のケースでは応力-ひずみ曲線にばらつきが見られる。

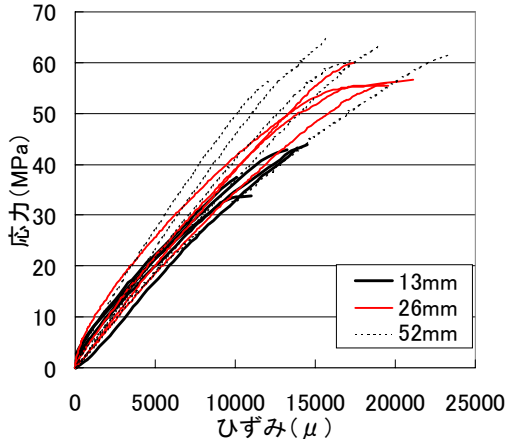

図-3　繊維長を変化させた SFRP の応力-ひずみ関係

表-3　繊維長を変化させた SFRP の引張特性

繊維長 (mm)	平均引張強度(MPa)	平均最大ひずみ(μ)	引張弾性係数(MPa)
13	40.3	12500	4300
26	57.1	19400	4300
52	61.2	16000	5000

以上から，SFRP に用いる繊維の長さを 26mm とした。

また，このような結果が得られた理由として，以下のことが考えられる。繊維が長くなることにより繊維と樹脂間での摩擦による応力伝達区間が増加し，多くの繊維が破断していく。一方，繊維が短い場合，伝達応力の増加に摩擦力が抵抗できずに，抜け出すものが多くなることによって非線形性が強くなる。しかし，繊維長 13mm の場合は，付着長が短すぎるため，繊維の抜出しが早期に発生してしまうため，強度が減少してしまう。この両者の破壊形態が混在する繊維長 26mm が非線形性を有しつつ，強度が大きく保てたと考える。繊維長が 52mm の SFRP の応力-ひずみ関係に大きなばらつきが見られる原因として，繊維の混入が体積比で行われているため，繊維長が長くなるにつれ，SFRP 内に混入される繊維の本数は減少すると考えられる。そのために，繊維方向のランダム性が減少し，異方性が発現しはじめたことが考えられる。

3.　SFRP 補強された RC はりの耐荷力

SFRP のような非線形性を有し，変形性能の大きな補強材において，その補強効果を活かすためには，補強材の終局状態まで被補強材との一体性を確保することが重要である。そのため，樹脂のコンクリートからの剥離に大きな抵抗を示すと考えられ，かつ実用的な表面処理方法として，サンドブラスト処理(3mm～5mm 程度)を行った。それにより吹付け面で粗骨材表面が露出する程度となった。

3.1　実験概要

2.1 で選定された樹脂と 2.2 で選定された繊維長を用い，曲げによる破壊を生じると予想さ

れるはり A，曲げ耐力とせん断耐力が同程度のはり B，せん断による破壊を生じると予想されるはり C の 3 種類に対して吹付けを行った。それぞれの供試体概要図を**図-4**，**図-5** に示す。ただし，C に関しては，B と軸方向鉄筋量が異なるのみなので併記した。吹付けの形状を**図-6** に，載荷状況を**写真-1** に，使用したコンクリートの示方配合を**表-4** に，使用した鉄筋の材料特性を**表-5** に示す。また，以後供試体名として，Aa3 のように（配筋種類）（吹付け形状）(吹付け厚さ)で呼ぶこととする。無補強の供試体に関しては，A0 などと表記する。底面への吹付けは支点による SFRP の拘束をなくすために，支点から 100mm 離れた部分までとし，支点には，はり軸方向の拘束を減じるために 2 枚のテフロンシートにグリスをはさんだ減摩パッドを使用した。

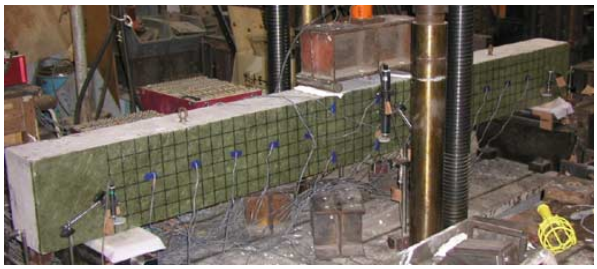

写真-1　実験状況

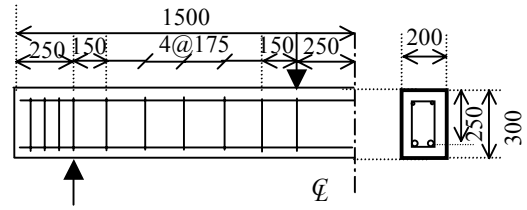

図-4　はり A 供試体概要図（unit：mm）

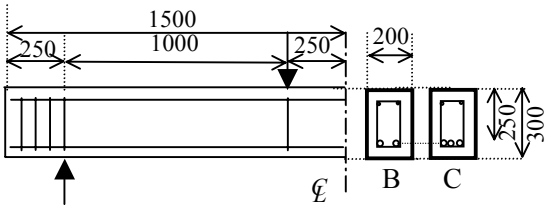

図-5　はり B,C 供試体概要図（unit：mm）

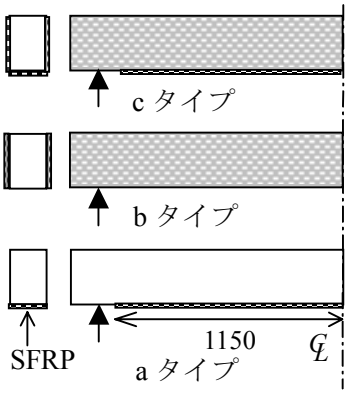

図-6 吹付け形状

3.2　実験結果

図-7～図-9 に RC はりの載荷実験より得られた荷重-変位曲線を示す。また，**写真-2～写真-4** に破壊状況の例を示した。**表-6** では，載荷試験より得られた(1)最大荷重，(2)最大荷重時変位，(3)降伏荷重，(4)無補強の供試体に対する耐荷力の比率，(5)最大荷重と降伏荷重の比(P_{max} / P_y)，(6)最大荷重 P_{max} と曲げ耐荷力，せん断耐荷力の算出値のうち，いずれか小さい方 P_{cal} の比(P_{max} /P_{cal})，(7)ひび割れ発生後の荷重-変位曲線の勾配(⊿1(kN/mm))，(8)鉄筋降伏後の荷重-変位曲線の勾配(⊿2(kN/mm))，および(9)破壊モードを示す。ただし，荷重の算出は平面保持と SFRP とコンクリート間の完全付着を仮定し，SFRP は引張にのみ抵抗し，圧縮に対しては無抵抗と仮定した。曲げに対しては，断面内の力の釣合条件を仮定した。せん断に対しては，45° 方向に斜めひび割れが生じ，斜めひび割れに沿った SFRP が破断するまでせん断力に抵抗できるとして，土木学会より提案されているせん断耐力の算定式[4]に付加することで算出した。

図-7～図-9，**表-6** を参考にすると，ひび割れ発生付近まで，SFRP はあまり補強効果を示さないが，ひび割れ発生後，その吹付け形状に応じて，降伏荷重，最大荷重を増加させる補強効果を発揮するようになることがわかる。

これは，SFRP 補強を施すことにより，ひび割れ発生箇所において，SFRP によるブリッジン

表-4　コンクリートの示方配合

G_{max} (mm)	W/C	s/a (%)	単位量(kg/m^3)					
			W	C	S		G	混和剤
					砕砂	川砂		
20	0.55	46.5	151	275	430	433	1016	2.61

表-5　使用鉄筋の材料特性

配筋	引張鉄筋 (SD345)	圧縮鉄筋 (SD295)	スターラップ (SD295)	軸方向 鉄筋比(%)	せん断補強 鉄筋比(%)
A	D16(406)	D10(370)	D6(374)	0.794	0.181
B	D22(396)	D10(370)	－	1.548	－
C	D22(396)	D10(370)	－	2.323	－

*表内の(　)は鉄筋の実測降伏強度(MPa)を示す

表-6　RC はり曲げ試験結果

供試体名	(1)最大荷重 P_{max}(kN)	(2)最大荷重時変位(mm)	(3)降伏荷重 P_y(kN)	(4)耐荷力比率(%)	(5)P_{max}/P_y	(6)P_{max}/P_{cal}	(7)⊿1 (kN/mm)	(8)⊿2 (kN/mm)	(9)破壊モード
A0	88.2	35.6	75.6	100	1.17	1.21	6.12	0.51	曲げ引張
Aa3	107.5	29.1	84.3	122	1.28	1.16	6.24	1.02	SFRP 破断
Aa5	127.4	37.6	93.9	144	1.36	1.20	9.44	1.18	SFRP 破断
Ac3	138.5	35.3	96.4	157	1.44	1.36	8.11	1.53	SFRP 破断
B0	144.6	27.6	129.5	100	1.12	1.13	13.3	0.6	曲げ引張
Ba3	160.0	18.4	141.7	111	1.13	1.25	14.1	1.46	曲げ降伏後の斜め引張
Bb3	158.4	24.0	138.6	110	1.14	1.16	13.3	1.02	SFRP 破断
Bc3	186.4	31.1	152.1	129	1.23	1.23	13.8	1.62	SFRP 破断
C0	170.2	8.4	—	100	—	1.15	17.3	—	斜め引張
Cb3	215.8	23.1	198.2	127	1.09	1.10	17.3	1.46	曲げ引張
Cc3	235.4	26.2	205.5	138	1.15	1.14	17.2	1.83	曲げ引張

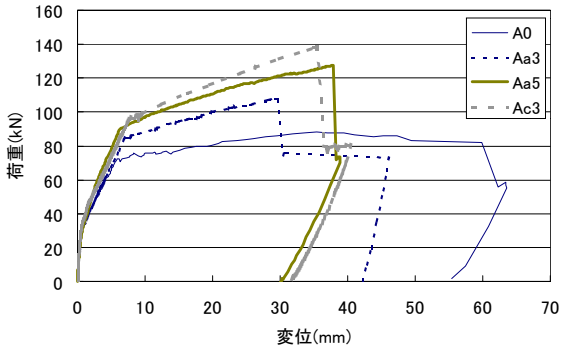

図-7　はり A 荷重-変位曲線

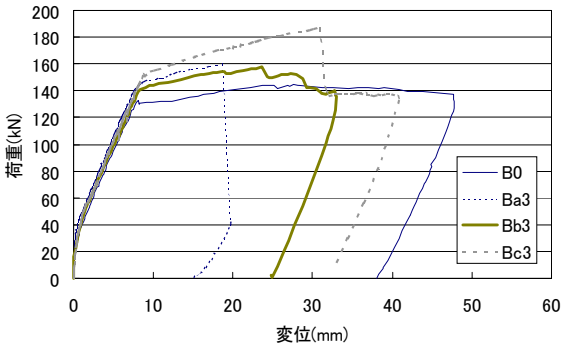

図-8　はり B 荷重-変位曲線

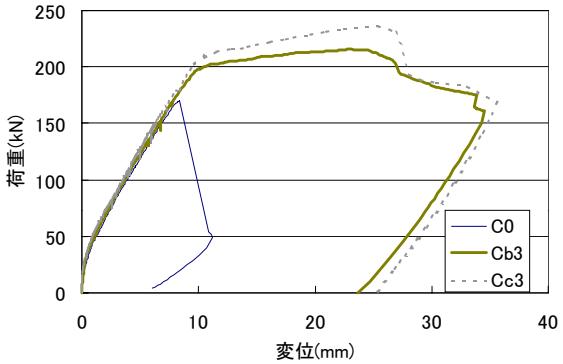

図-9　はり C 荷重-変位曲線

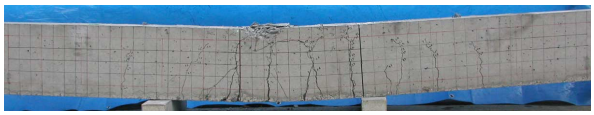
写真-2　A0 供試体破壊状況

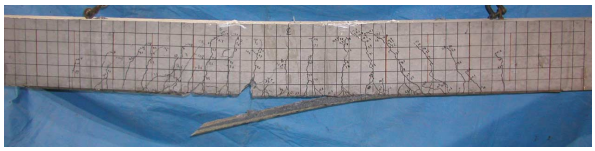
写真-3　Aa5 供試体破壊状況

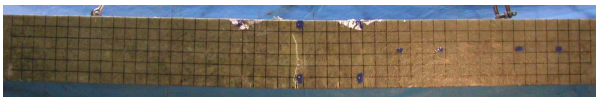
写真-4　Ab3 供試体破壊状況

グ効果が発生し，ひび割れ幅の拡大を抑制し，ひび割れを分散させる効果があったためではないかと考えられる(写真-2，写真-3)。

吹付け形状 a に関しては,鉄筋降伏後においてその補強効果を発揮し,荷重-変位曲線の勾配を増加させ,最大耐力を無補強と同程度の変位時において示した。ただし,Ba3 に関しては，鉄筋降伏後，SFRP の曲げ補強によって曲げ耐力が増加を続けたため，せん断耐力を上回り，結果的に斜め引張破壊を生じた。吹付け形状 b に関しては，側面に吹付けた SFRP の引張側の部分によって，補強なしのものに比べると若干の耐荷力の向上が確認された。最大荷重時には側面に吹付けられた SFRP の底面側から破断が生じ，徐々に荷重が減少しながら破断が進展して行った。また，破断の進展に伴い，中立軸が上昇し，最終的には圧縮部で破壊を生じた。吹付け形状 c に関しては，最大荷重時の変位が大きくなり，鉄筋降伏後の荷重の増加は他の吹き付け形状と比較して最大となった。また,無補強の供試体と吹付け形状 b の供試体の鉄筋降伏後の荷重-変位曲線の勾配は同じであるが，吹付け形状 a の供試体と吹付け形状 c の供試体の荷重-変位曲線の勾配は増加していることを考慮すると，底

面と側面に吹付けることによって，補強効果を上昇させる傾向があるものと考える。

また，吹付け形状 c に関しては，底面の SFRP に破断を生じると，それまで底面の SFRP で受け持たれていた引張力が急激に側面の SFRP に集中し，破断部分が急激に進展し，破壊に至った。SFRP が破断した後は，無補強供試体と同様の挙動をたどったため，載荷を終了した。

吹付け形状と補強効果に関しては，**表-6**(6)より予測精度が 1.10～1.36 と若干のばらつきを持った。しかし，無補強の供試体と同程度の予測ができており，仮定に大きな誤りはないと考える。また，軸方向鉄筋比が小さく，SFRP 補強効果が大きいものに関して，精度が低下した事に関しては，ブリッジング効果によるひび割れの分散・ひび割れ幅の低減により剛性が上昇した影響が大きいためであると考える。

4. SFRP 補強の考え方

4.1 SFRP 単体について

SFRP は，使用する繊維・樹脂によって，力学的性質を大きく変化させることが可能な補修・補強材である。しかし，その力学的な性質を材料の性質から理論的に求めることは，難しく SFRP 単体の試験を行うことにより，求めることとした。

4.2 SFRP 補強された RC 部材の耐荷力

SFRP 補強された RC 部材は曲げ，せん断に対して耐荷力の増加を示した。その耐荷力の予測は以下のようにして行うことができる。

・曲げに対して

(a)鉄筋降伏後の SFRP の破断，あるいは

(b)鉄筋降伏後のコンクリートの圧縮破壊時の

耐荷力を通常の曲げ理論より算出し,相対的に小さい耐荷力を示したものにより定める。

・せん断に対して

土木学会により提案されている式に SFRP によって負担されるせん断耐力(式(1))を付加することで，算出する。ただし，斜めひび割れは 45°方向に生じるものと仮定する。

$$V_{SFRP} = f_{SFRP} \cdot t \cdot z \qquad (1)$$

ここで，f_{SFRP} ：使用する SFRP と同一の繊維・繊維長・樹脂を使用した SFRP 単体の引張試験より求めた破断時応力，t ：断面におけるせん断補強用 SFRP の吹付け厚さの合計，z ：圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材図心までの距離で，一般に d/1.15 とする。

５．まとめ

本研究で用いた樹脂,繊維の組合せにおいて,

(1)低強度の樹脂を使用することにより，SFRP の非線形性を大きくすることができる。

(2)伸び率の大きい樹脂を使用した場合

・繊維長が長くなるにつれ,破断する繊維が増加することで線形性が強くなる。

・繊維長が短くなるにつれ,抜け出す繊維が増加することで強度が低下する。

・ある特定の繊維長の範囲において,破断と抜出しが適度に混合され，破断卓越型，抜出し卓越型と比較して最も大きな非線形性を示す。

(3)SFRP による RC 部材への補強は，曲げに対してもせん断に対しても，補強効果を示し，吹付けの形状を変化させることで，破壊モードをコントロールできる。

(4)SFRP 補強された RC 部材のせん断耐荷力は，土木学会式に SFRP の効果を付与することで安全側に算出することができる。

参考文献

1)Banthia, N. and Boyd, A.: Sprayed Fiber Reinforced Plastics for Repairs, Canadian J. of Civil Engineering, Special NCE-ISIS Issue, Vol. 27, pp.907-915, 2000

2)大寺一清：FRP 吹付けにより補強されたコンクリートの力学的特性，東京工業大学卒業論文，2002

3)高浜達矢，大寺一清，堤　忠彦，二羽淳一郎: SFRP により補強されたコンクリートの力学的特性，コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.1639-1644, 2002

4)土木学会：コンクリート標準示方書　[構造性能照査編]，pp.26, pp.58-72, 2002

5)日本コンクリート工学協会：連続繊維補強コンクリート研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，pp.36-42, 1997

6)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，pp.21-29, pp.228-229, 2000