

論文 SFRP により補強されたコンクリートの力学的特性

高浜 達矢^{*1}・大寺 一清^{*2}・堤 忠彦^{*3}・二羽 淳一郎^{*4}

要旨: グラスファイバー短繊維とビニルエステル樹脂を吹付けること(Sprayed Fiber Reinforced Plastic: SFRP)により補強されたコンクリートの力学的特性を, SFRP 単体の引張試験, SFRP 補強されたコンクリートの曲げ試験, SFRP 補強材とコンクリートの付着せん断試験, および圧縮試験を行うことにより明らかにした。また, 吹付ける繊維長の変化による力学的性状の変化を考察し, 繊維長が長いものほど補強効果が大きくなる傾向があることを示した。

キーワード: FRP, SFRP 補強, グラスファイバー短繊維, 繊維長

1. はじめに

兵庫県南部地震により高架橋やビルをはじめとする様々な構造物が被害を受けた。地震国である我が国において, このような規模の地震が再び起こることは否定できず, 既存構造物の耐震性を再評価し, 補修・補強する必要性が生じている。また, 高度成長期に建設されたインフラ施設の中には, 劣化が進行し, 補修・補強が必要となっている構造物も存在する。現在, コンクリート構造物に関する補修・補強工法としては, モルタル吹付け工法・鋼板巻立て工法・連続繊維シート巻立て工法などが挙げられる。しかし, モルタル吹付け工法は施工は容易であるが, 自重が大幅に増加するという問題点があり, 鋼板巻立て工法や連続繊維シート巻立て工法には補強効果は大きい, (1)施工条件が限定される, (2)規模の大きな装置を必要としコストが高いなどの問題点が挙げられる。そこで本研究では, これらの得失を考慮し, 短繊維を吹付けること (SFRP: Sprayed Fiber Reinforced Plastics)による補強を提案し, SFRP 単体, ならびに SFRP 補強されたコンクリートの基礎的な力学的特性を明らかにする。

2. 実験概要

本研究では, 短繊維としてグラスファイバー, 樹脂にはビニルエステル樹脂を選択した。その諸性状を表 - 1 に示す。

SFRP 単体, ならびに SFRP 補強されたコンクリートの基礎的な力学的特性を示すために, 本研究では(a)SFRP 単体の引張試験, (b)SFRP とコンクリートの付着せん断試験, (c) SFRP 補強されたコンクリートの曲げ試験, (d) 圧縮試験を行った。また, 本研究では吹付ける繊維の長さを変化させ, それによって生じる力学的性状の違いについても検討を行った。全試験において, 繊維混入率は樹脂に対する体積比で 20%とした。ただし, (b)の試験に関しては繊維長よりも樹脂によってその特性が決まると考えられるため, 繊維長は代表的な長さ一種類で行い, (c), (d)の試験に関しては, 比較のために無補強のものも試験した。供試体概要図を図 - 1 に示す。

表 - 1 諸物性値

	引張強さ (MPa)	引張伸び率 (%)	ヤング係数 (GPa)
ビニルエステル樹脂	80.0	4.6	3.0
グラスファイバー	3500	4.8	74.0

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 東京工業大学 土木工学科

*3 株式会社 富士ビ・エス 技術本部 設計部

*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)

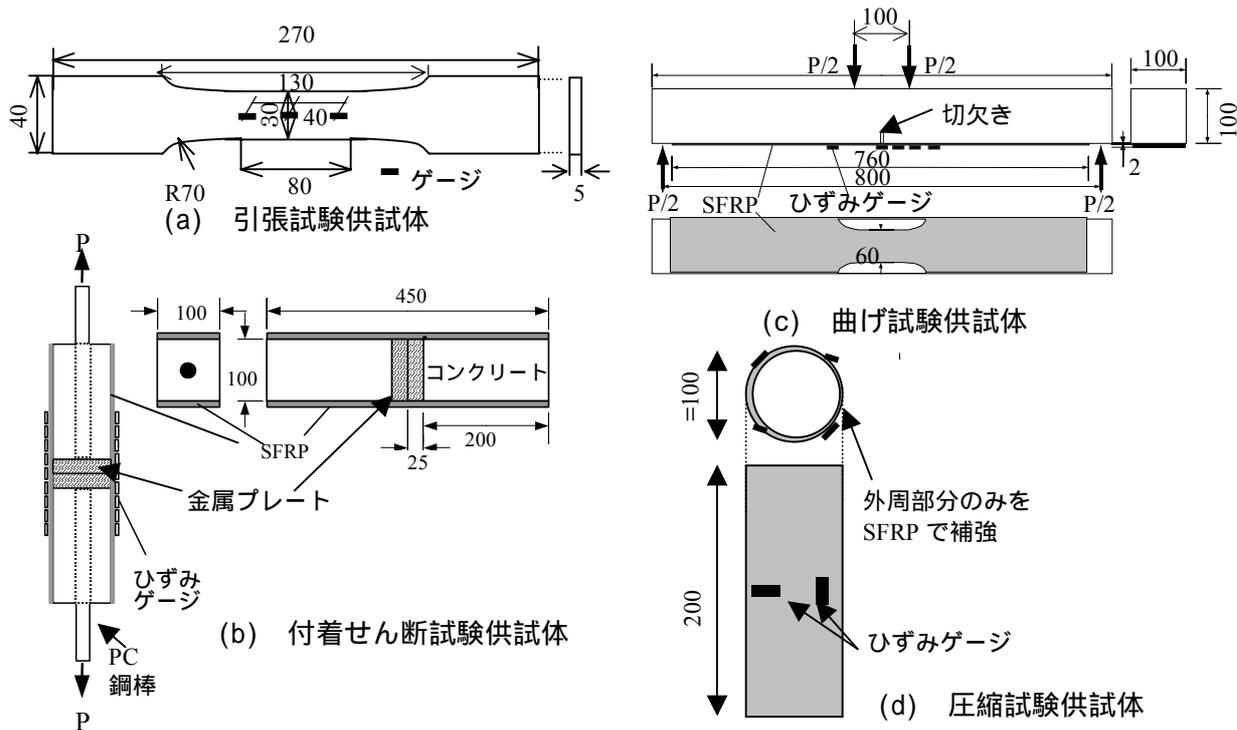


図 - 1 供試体概要図 (unit: mm)

FRP の吹付け状況を写真 - 1 に示す。短繊維の吹付けは、樹脂を送り出すノズル部に繊維を切断するローリングカッター(写真 - 2)を取りつけることによって行われる。樹脂とともに吹付けることで、繊維が様々な方向に飛散することが期待でき、全方向に対する補強効果が期待できる。繊維長は 52, 26, 13mm の 3 種類とし、切り替えはローリングカッターの刃を交換することで行った。カッターの刃の位置と繊維長の関係を図 - 2 に示す。

2.1 SFRP の引張試験

SFRP 本体の材料強度と、その厚さ・強度のばらつきを把握することを目的として行った。供試体寸法は JIS K 7054 「ガラス強化プラスチックの引張試験方法」の A 型試験片を参考にし、繊維長を考慮に入れて図 - 1(a) に示す形に決定した。供試体は、繊維分散による異方性を考慮するため、SFRP 板に放射状に 15 体作製し、そ

の中から任意の 8 体を選択して試験を行った。吹付け方向は下向きである。荷重の荷重速度は 0.3mm/min とし、ひずみゲージを平行部に 40mm 間隔に 3 枚貼付した。

2.2 付着せん断試験

SFRP(繊維長 26mm)について、付着せん断強度を把握することを目的とした。付着せん断試験は SFRP の吹付け厚さ 2mm, 3.5mm, 5mm の 3 種類について 2 体ずつ行った。あらかじめコンクリートに開けた孔を通して金属プレートに



写真 - 1 SFRP 吹付け状況

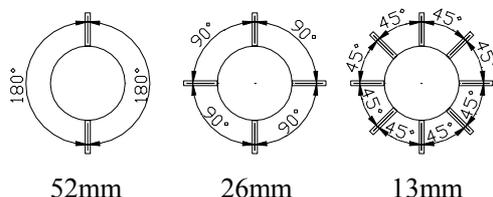


図 2 繊維長とローリングカッター



写真 - 2
ノズル先端部の
ローリングカッター

PC 鋼棒をねじ込み、両側に引張ることで付着面をせん断破壊させて行った。中央から 100mm までの区間に 25mm 間隔でゲージを貼付した。

2.3 曲げ試験

無筋コンクリートに SFRP 補強した場合の補強効果の把握を目的とした。剥離によって破壊に至るのではなく、繊維長の違いによる変化を確認するために、SFRP が破断して壊れるように、吹付け厚は 2mm 程度でダンベル状に吹付けた。JIS A 1106「コンクリートの曲げ強度試験方法」に準じて静的 4 点曲げ载荷を行い、荷重の载荷速度は 0.1mm/min とした。また、破断部を限定するために、スパン中央に切欠きを設け、ひずみゲージをスパン中央から 0mm, 30mm, 60mm, 100mm の位置に貼付した。

2.4 圧縮試験

無筋コンクリート円柱の側面に SFRP 補強した際の、圧縮に対する補強効果の把握を目的とした。吹付けは円柱供試体を立てた状態で行っている。吹付け対象である円柱供試体は 100mm であり、13mm ではその曲率に対して繊維が上手く付かない、52mm では対象が小さすぎて繊維が分散しきれないという施工上の理由から繊維長 26mm のみについて試験を行った。ひずみゲージを縦方向・横方向にそれぞれ 2ヶ所、対称な位置で貼付した。また、供試体の吸収エネルギーを算出するために変位計を対称に 4ヶ所に取り付け、無補強のものに関しては、繰返し载荷を行った。

以上で使用したコンクリートの配合を表 - 2 に示す。

3. 実験結果および考察

3.1 SFRP の引張試験

SFRP の引張試験より得られた応力 - ひずみ

関係を図 - 3 に示す。ひずみは 3 枚のひずみゲージのうち、破断面に最も近かったものを用い、応力は破断位置の断面積を用いて算出した。

図 - 3 より一般的に(1)繊維長が長いものほど、曲線が立つ傾向がある、(2)曲線は非線形性を帯びている、(3)繊維長 26mm がばらつきが少ないなどが特徴として挙げられる。SFRP の応力 - ひずみ関係にはばらつきが見られるが、これは、吹付けの厚さ管理が経験と高度な技術を要すること、繊維の混入量、混入方向が場所によって多少異なること、繊維長 52mm などのように供試体幅が繊維長より短いためにその効果を適切に評価できていない可能性もあるなど、供試体寸法、破断面積の評価方法による要因もあると考えられ、検討の必要がある。

引張試験供試体の厚さを、5mm 間隔で測定したところ、最大値約 6mm、最小値約 4mm、平均 4.8mm、標準偏差 0.3mm であった。図 - 4 に

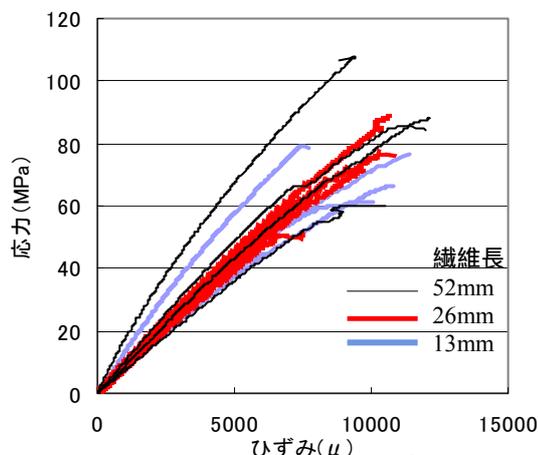


図 - 3 SFRP の応力 - ひずみ関係

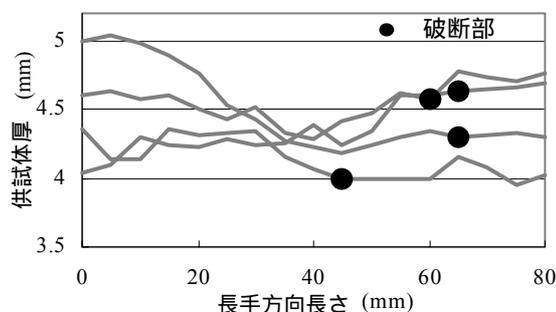


図 - 4 供試体厚と破断部の一例

表 - 2 示方配合表

G _{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
			W	C	S		G	混和剤 (AE 減水剤)
					砕砂	川砂		
20	55.0	46.5	151	275	430	433	1,016	2.61

供試体平行部の長手方向の厚さと破断位置の関係の一例を示す。図 - 4 によると、比較的薄い部分で破断しているが、破断部を正確に予測することは困難である。そこで、3 枚のゲージの中で最大のひずみを生じたケースの応力、ひずみを図 - 5 に示した。破断部における真のひずみは、ひずみゲージの値よりも大きな値を取ると予想される。破断面の状況を写真 - 3 に示す。破断面を観察すると、繊維長が長いものに関しても、繊維が抜けている様子はなく、繊維が破断して破壊に至っていると考えられる。繊維長が長くなるにつれて、平均の最大応力や最大ひずみが大きくなる理由としては、樹脂および繊維が完全付着の状態から、まず樹脂部にひび割れが入り、繊維を介して応力伝達が行われる。その際、繊維長の短いものの中には、十分に荷重に抵抗できるだけの付着長が取れないものがあり、抜け出してしまう繊維が多く存在すると考えられる。繊維長の長いものの中にも同様に、抜け出すものが存在するが、十分な付着長を持つものが多くなり、繊維が破断するまで荷重を受け持つことが出来るため、最大応力および最大ひずみが増加するものが増えるのではないかと考えられる。また 繊維長が短いものでは、ひずみの最大値の分布の幅が大きく、繊維が均質に分散しておらず、繊維の混入量の少ない箇所、十分な付着長が取れていない箇所破断が生じているものと考えられる。

3.2 付着せん断試験

試験に用いたコンクリートの圧縮強度、引張強度を表 - 3 に示す。

付着せん断試験において、任意の断面での SFRP に作用する引張力は、SFRP とコンクリート間の付着応力を介し、コンクリートに作用する圧縮力と釣合っている(図 - 6)。得られた荷重段階と供試体長手方向のひずみ分布の関係を図 - 7 に示す。これらの関係より次式が成り立つ。

$$\tau(x) = \frac{A_F}{b} \cdot \frac{d\sigma_F(x)}{dx} \quad (1)$$

ここで、 A_F : SFRP の断面積(mm²)、 σ_F : SFRP

の応力(MPa)、 τ : せん断応力(MPa)、 b : 奥行き(mm)を表す。

ここで、式(1)に必要な SFRP の応力変化は、図 - 7 のひずみ勾配を用いて、図 - 5 における SFRP の引張強度の平均と原点を結ぶ直線にひずみを代入することにより求めた。ただし、

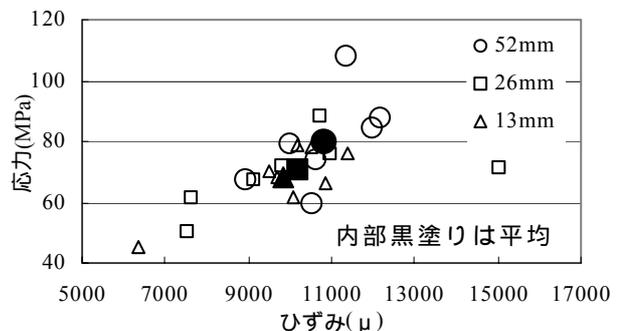


図 - 5 最大ひずみ - 応力関係



写真 - 3 SFRP 破断面
(左より繊維長 52mm, 26mm, 13mm)

表 - 3 コンクリート強度

試験番号	2.2	2.3, 2.4
圧縮強度(MPa)	41.4	47.2
引張強度(MPa)	3.47	3.17

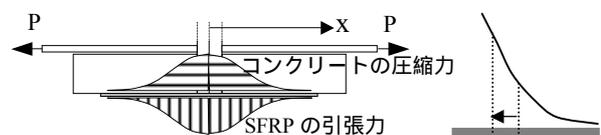


図 - 6 せん断力の伝達

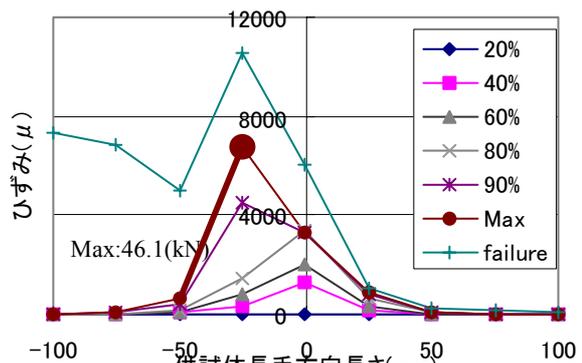


図 - 7 各荷重段階におけるひずみ分布

中央から ±25mm の範囲は金属プレート部であり、コンクリートとのせん断ではないので、範囲外とした。

式(1)より最大せん断応力は平均 8.04(MPa)となった。剥離が生じた後、最大荷重 46.1(kN)を SFRP のみで負担しているとすると、SFRP にはおよそ 64(MPa)の応力が生じていることとなる。引張試験の結果を考慮すると、70(MPa)付近で破断に至るため、これ以上薄い場合 SFRP が破断してしまうこととなる。本供試体の平均吹付け厚は、3.6mm であったこと、また、2mm 吹付け厚の供試体はすべて SFRP が破断したことなどから、吹付け厚は 3.5mm 以上であることが望ましいと考えられる。

また、図 - 7 のひずみ分布において、SFRP にひずみが生じるのは、剥離部より 50mm 程度であることが分かる。図 - 8 に荷重と中央部ひずみの関係を示す。荷重が最大値を示した後、中央部より剥離が生じ、ひずみが急激に伸びた後、荷重、ひずみともにほぼ一定の値を保ちながら、剥離が徐々に進行していく様子が見られる。写真 - 5 に破壊状況を示す。

3.3 曲げ試験

曲げ試験の荷重 - 変位関係の一例を図 - 9 に示す。供試体は、ダンベル部に若干の剥離が生じたものの、すべて SFRP 部で破断し、曲げによって破壊した(写真 - 6)。参考のため、繊維長 26mm で吹付け厚 5mm のケースも併記する。吹付け厚 5mm のものは、付着せん断試験同様、SFRP の剥離が徐々に進展し、斜めひび割れが卓越して破壊した。また、それぞれの繊維長での最大変位、最大荷重、破壊に至るまでに吸収したエネルギー $W(N \cdot m)$ を表 - 4 に示す。ただし、最大変位は破断時の変位である。

吹付け厚のばらつきによる差はあるが、繊維長が長くなるにつれ、荷重、変位、破壊エネルギーともに増加する傾向が見られる。また、吹付け厚を変化させることで、補強レベルを変化させることも可能であると考えられる。

曲げ試験において SFRP が破断して壊れる際、引張試験より、その破断強度を 70(MPa)、破断時のひずみを 9000(μ)、コンクリートのヤング係数を 25(GPa)とし、SFRP とコンクリートに平面保持を仮定し、コンクリートの引張強度を無視して破壊モーメントを算出する。

釣合の式に代入することにより、コンクリートの曲げ圧縮部の深さは 5.92(mm)、曲げモー

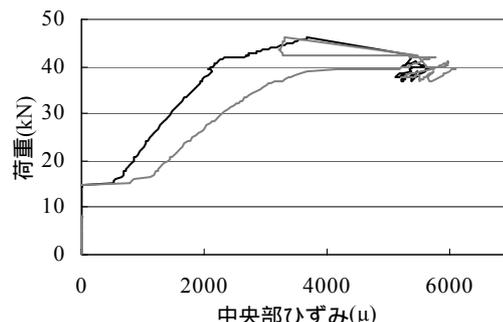


図 - 8 荷重 - 中央部ひずみ関係 (両面)



写真 - 5 付着せん断試験破壊状況 写真 - 6 曲げ試験破壊状況

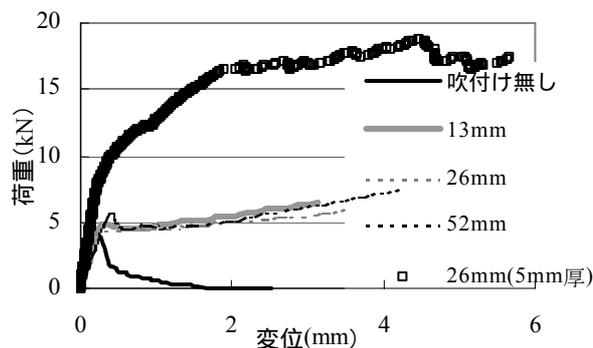


図 - 9 曲げ試験荷重 変位曲線

表 - 4 曲げ試験結果(3 体平均)

繊維長	補強なし	13mm	26mm	52mm
平均最大変位 (mm)	1.43	2.39	3.08	3.42
平均最大荷重 (kN)	3.54	6.01	6.02	6.89
W (N·m)	1.45	13.8	15.3	18.1

ントは 787.8(N・m) ,破断荷重は 4.5(kN)となる。仮定に含まれる誤差を考慮すれば、曲げの耐力もある程度予想することが出来る。実際には、SFRP が破断しないような吹付け厚とし、2.2 付着せん断試験の結果より、3.5mm 以上の吹付け厚が望ましいと考えられる。

3.4 圧縮試験

圧縮試験の荷重 - 変位曲線の一例を図 - 10 に示す。破壊後の供試体を写真 - 7 に示す。無補強の供試体の圧縮強度および破壊に至るまでに吸収したエネルギーは、47.2(MPa), 365.6(kN・m)であり、SFRP 補強された供試体は、83.7(MPa), 1391.3(kN・m)と約 1.8 倍の圧縮強度、約 4 倍のエネルギー吸収を示した。図 - 11 に無補強のケースでの最大荷重で無次元化した荷重とポアソン比の関係を示す。コンクリートの圧縮強度を超えるあたりから、すなわちコンクリートが圧縮破壊を起こし始めると、SFRP による拘束効果が顕著に現れ始め、横方向のひずみが急激に増加し、ついには破断に至る。破壊は SFRP 一部が急激に破断を起こし、その他の部分に関しては、剥離を生じていた。

4. まとめ

SFRP の基礎的な力学特性に関する実験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 繊維長が長い SFRP は、短いものより耐力に優れ、変形性も優れている傾向があり、要求されるレベルや施工性に応じて、使い分けることが出来る。
- (2) SFRP とコンクリートの付着はせん断変形に対しては比較的剥離を生じやすい傾向にある。
- (3) SFRP 補強されたコンクリートは曲げおよび圧縮に対して、大きなエネルギー吸収を示し、かつその補強効果および破壊形態をおおよそ予測することが出来る。
- (4) SFRP 補強は、一部に薄い部分があると、その部分から破壊してしまうので、厚さ管理が重要である。

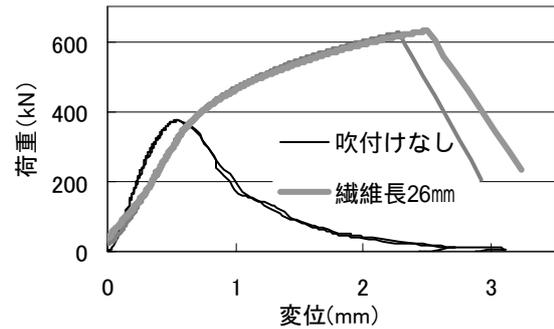


図 - 10 荷重 変位関係

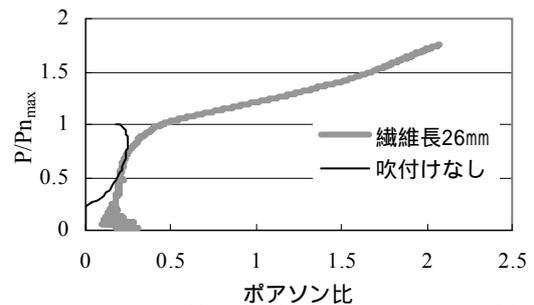


図 - 11 荷重割合 - ポアソン比関係



写真 - 7 供試体破壊状況

今後、実構造物への適用を考慮し、大型試験体での試験を行うとともに、異なる樹脂と繊維を用いた場合、及び異なる繊維長を組み合わせた場合での、SFRP の性状の変化を検討する予定である。

参考文献

- 1) Banthia, N. and Boyd, A.J., Sprayed Fiber Reinforced Plastics for Repairs, Canadian J. of Civil Engineering, in press, 2000
- 2) Banthia, N. Boyd, A.J. Johnson, M.M. Ross, S.L and Sexsmith, R.J., Sprayed Fiber Reinforced Polymers for Infrastructure Restoration, Proc. 2nd Inter. Conf. on Engineering Materials, 2001. Volume 2. pp.213~221
- 3) 土木学会：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, 2000. pp89~91