論文 SFRP とコンクリートの付着特性に関する研究

大寺 一清*1・高浜 達矢*2・堤 忠彦*3・二羽 淳一郎*4

要旨:SFRP(Sprayed Fiber Reinforced Plastics)とコンクリートの付着特性を把握することを目 的として付着せん断試験を行った。その結果,SFRP の断面剛性が増加すると剥離破壊が生 じること,SFRP の繊維長が長いほど付着強度および界面剥離エネルギーが増加するが,繊 維長 26mm で頭打ちになること,吹付け前のコンクリートの表面処理法をチッピングにする ことで付着強度および界面剥離エネルギーが大きく向上することが確認された。また,試験 から得られた付着応力-相対変位関係をモデル化し,付着せん断試験の有限要素解析を行っ た結果,荷重-変位関係に関して実験結果と概ね良い一致が得られた。 キーワード:SFRP,付着せん断試験,付着せん断強度,界面剥離エネルギー

1. はじめに

近年, コンクリート構造物の補修・補強工法 として, 軽量, 高強度, 施工の容易さ等の利点 から連続繊維シート接着補強法が多く採用され ているが、問題点として繊維の方向による材料 物性の異方性が挙げられる。この問題点を解決 する新手法として,繊維強化プラスチック吹付 け(SFRP: Sprayed Fiber Reinforced Plastic)による 補強が Banthia¹⁾らによって提案された。短繊維 が様々な方向に混在する SFRP は材料物性の異 方性が無い。この SFRP 補強が, 我が国で実構 造物に適用された例はまだ無いが、近い将来の 実用化に備えて,基礎的な力学特性を明らかに する必要がある。特に, SFRP 補強は連続繊維 シート補強と同様に、コンクリートとの界面で の剥離破壊が指摘されており, SFRP-コンクリ ート間の付着性状を把握することが重要である。

そこで、SFRP-コンクリート間に関して、付着せん断強度および界面剥離エネルギー等を用いて表される付着特性を把握することを目的に付着せん断試験を行った。そして、(1)SFRPの吹付け厚さの違い、(2)繊維長の違いによる

SFRP の弾性係数の違い,(3)コンクリートの表 面処理法の違い,が付着特性に及ぼす影響を検 討した。また,剥離破壊を生じた供試体から導 出した付着応力-相対変位関係をモデル化して, 付着せん断試験の有限要素解析を行い,実験結 果と比較して,その妥当性を検証した。

2. 試験概要

本研究では、グラスファイバーおよび不飽和 ポリエステル樹脂を混合した SFRP を用いた。 用いた材料の物性を**表-1**に示す。

SFRP は,繊維混入率 20%(体積比率), 吹付け 方向は下向きとした。また,繊維長は吹付け装 置のローリングカッターの構造上,13,26, 52mm の3 種類とした²⁾。

表-1 繊維及び樹脂の物性値

	引張強度 (MPa)	引張 伸び率 (%)	弹性係数 (GPa)
グラス ファイバー	3500	4.8	74.0
不飽和 ポリエステル 樹脂	17.6	85.0	0.7

*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 東京工業大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 (正会員) *3 株式会社 富士ピー・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)

2.1 SFRP の引張試験

本研究で使用した SFRP の応力-ひずみ関係 を得るために SFRP 単体の引張試験を行った。 試験は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、繊維長の 最大値が 52mm であることを考慮に入れ,図-1 に示す形状とした。供試体中央の平行部にひ ずみゲージを 30mm 間隔に 3 枚貼付し, 破断部 に最も近い位置で計測された値をひずみとして 用いた。また、供試体の厚さ図-1に示すよう に 5mm を目標に作製しているが、実際は若干 のばらつきがある。そのため,測定した荷重を, 試験終了後に測定した破断部断面積で除すこと により応力を算出した。試験のパラメータは繊 維長とし,各繊維長に対して5体の供試体を試 験した。試験は、変位制御式 300kN 試験機を用 いて行った。

2.2 付着せん断試験

試験に用いたコンクリートの強度を表-2,ま た供試体形状および寸法を図-2 に示す。試験 は、コンクリートに埋め込まれた鉄筋(D25)を引 張ることで SFRP に引張力を与えた。供試体中 央部で、鉄筋およびコンクリートは切断されて おり、荷重は両側面に吹付けられた SFRP のみ で伝達される。SFRP 表面にはひずみゲージを、

中央から 100mm までの区間に 20mm 間隔に 6 枚,150mm と 200mm の位置に 1 枚ずつ(計 8 枚) をそれぞれ両面に貼付した。また,供試体中央 には π ゲージを設置し,変位を測定した。供試 体の片側でのみ破壊するように,上部を定着端 として当て木を介して万力で固定した。試験の パラメータは SFRP の繊維長,吹付け厚さおよ びコンクリート表面処理法の違いとした。コン クリート表面処理の状況を写真-1 に,供試体 一覧を表-3 に示す。表-3 において,吹付け厚 さにばらつきが見られるが,これは,実際の吹 付け厚さは目標値と若干の誤差が出るため,ノ ギスを用いて SFRP の両面の厚さを 30mm 間隔 で測定し,平均したものである。試験は,荷重 制御式 1000kN 万能試験機を用いて行った。

表-2 コンクリート強度試験結果







|写真-1| コンクリート表面処理状況

表-3 付着せん断試験供試体一覧

供試体 No.	表面処理法	繊維長 (mm)	吹付け厚さ ()内は目標値 (mm)
301			4.62 (6)
302			4.13 (6)
303		26	2.75 (4)
304	チッピング	20	2.78 (4)
305			2.05 (2)
306			1.75 (2)
307		12	5.83 (6)
308		15	5.98 (6)
309		52	6.48 (6)
310		32	6.93 (6)
321	ワイヤー ブラッシング	26	4.35 (6)
322			4.11 (6)
323			2.30 (4)
324			2.65 (4)
325			2.33 (2)
326			2.25 (2)
327		13	5.59 (6)
328		13	5.17 (6)
329		52	6.59 (6)
330		32	6.17 (6)

試験結果および考察

3.1 引張試験から得られる SFRP の応カーひ ずみ関係

各ケース5体ずつのSFRPの引張試験から得 られた応カーひずみ関係を繊維長ごとに近似し, 図-3に示す。繊維長が短くなるに従い弾性係 数が低下し,応カーひずみ関係の非線形性が増 すことが確認できる。一方,強度は繊維長26mm で頭打ちになることがわかる。これらは、繊維 の定着長の差により、破断部において繊維の抜 出し、あるいは切断などそれぞれ異なるメカニ ズムが支配したためと考えられる。

SFRP 断面剛性(弾性係数×吹付け厚さ)や付 着応力の算出には SFRP の弾性係数が必要とな るが,剥離破壊を生じたほとんどの供試体で剥 離時に 4000~6000 µ 程度のひずみが計測され たことから,図-3 において,ひずみが 5000 µ までの部分を線形近似し,SFRP の弾性係数を 表-4 のように定め,以下の計算に用いた。

3.2 付着せん断試験における破壊状況および最大荷重

全ての付着せん断試験供試体より得られた SFRP 断面剛性,破壊形態,最大荷重を表-5 に 示す。ただし, 断面剛性を算出した際の吹付け 厚さには表-3 に示した両側面の平均厚さを用 いた。最大荷重と SFRP 断面剛性の関係を図-4, 剥離破壊を生じた供試体の SFRP 剥離面の状況 を写真-2に示す。図-4より,表面処理法の違 いに関わらず SFRP 断面剛性が増加するに従い 最大荷重が増加し、ある程度の SFRP 断面剛性 を超えると剥離破壊を生じることがわかる。ま た, 図-4 における実線と点線は表面処理法, 破壊形態の違いに着目した近似直線であるが, 同じ SFRP 断面剛性ではチッピング処理を行っ た供試体の方が、最大荷重が大きくなり付着性 能が向上していることがわかる。写真-2から も、チッピング処理を行った場合はワイヤーブ ラッシング処理の場合と比較して、SFRP の剥 離面に多くのコンクリートが付着しており、付 着性能が向上したことが確認できる。



表-5 破壊形態および最大荷重



写真-2 SFRP 剥離面

3.3 荷重-中央変位関係・ひずみ分布

付着せん断試験から得られた荷重一中央変位 関係の一例を図-5 に示す。剥離を生じた供試 体では繊維長が長いほど最大荷重および最大変 位が増加し,SFRP が破断した供試体では剛性 が低く出る傾向が見られたが,図-4 からもわ かるように,最大荷重は断面剛性に影響を受け る傾向が見られる。そこで,図-6 に,吹付け 厚さの影響を除外し,繊維長の影響のみを考慮 するために,剥離を生じた供試体に対して,最 大荷重を吹付け厚さで除した値と繊維長の関係 を示す。その結果,最大荷重に繊維長の違いに よる影響はほとんど見られなかった。

また,図-5中の△記号で示した状態(終局変 位の 70%の変位)のひずみ分布を図-7に示す。 SFRP が破断した供試体№306 は剥離した他の 供試体と比較して中央部でひずみが局所的に増 加し破断に至る様子が分かる。また,剥離が生 じた供試体では,中央に近い部分でひずみ分布 に凹凸が生じているものがあるが,これは SFRP の剥離面で,ひずみの値が低下する部分があっ たためと考えられる。

3.4 付着応力一相対変位関係

連続繊維シートーコンクリート間の付着応力 ー相対変位関係(以下 τ - δ 関係)導出方法³⁾を適 用することで,SFRP 表面のひずみ分布から SFRP の τ - δ 関係を導出した。

位置 *x* における付着応力 *τ*(*x*)は, SFRP 表面 のひずみ分布の勾配を用いて,式(1)より求めた。

$$\tau(x) = t_{SFRP}(x) \frac{d\sigma_{SFRP}(x)}{dx}$$

$$= t_{SFRP}(x) \cdot E_{SFRP} \frac{d\varepsilon_{SFRP}(x)}{dx}$$
(1)

ここで、 $\sigma_{SFRP}(x)$:位置xにおける SFRP の引張 応力(MPa)、 $t_{SFRP}(x)$:位置xにおける SFRP の厚 さ(mm)、 E_{SFRP} : SFRP の弾性係数(MPa)、 $\varepsilon_{SFRP}(x)$:位置xにおける SFRP のひずみ

また,位置xにおける相対変位 $\delta(x)$ は SFRP 端部から位置xまでのひずみ分布を積分し,式 (2)より求めた。

$$\delta(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon_{SFRP}(x) dx \tag{2}$$

ひずみ分布は, 図-7 のようにひずみゲージ による計測値を直線でつないで近似している。 従って、付着応力はその直線の傾き、相対変位 は直線下の面積から得られる。そして、2 つの 隣り合うゲージ貼付位置の中央の位置で $\tau-\delta$ 関係が得られる。具体的には、各供試体に対し て, 中央から 30, 50, 70mm の 3 箇所で $\tau-\delta$ 関係を得た。一例を図-8 に示す。 $\tau - \delta$ 関係は **図-8(a)**のように測定位置に依存せず一定と なるものもあれば, 図-8 (b) のようにばらつ くものも見られた。原因としては、SFRP の吹 付け厚さが位置によってばらつくこと、および 剥離面に付着したコンクリートの影響でひずみ が正確に計測できない領域が存在すること等が 挙げられる。本研究では、3 箇所のうち、平均 的な挙動を示した1箇所より得られた値をその 供試体の $\tau - \delta$ 関係として採用することにした。





5 4 30mm 50mm 70mm 3 (MPa) 2 Ъ 1 0 0.0 0.2 0.4 0.6 1.0 08 δ (mm) (b) 供試体No.308



表-6 に, 剥離破壊が生じた供試体の τ の最大 値から得られる付着強度, および τ - δ 曲線下の 面積と等価な界面剥離エネルギー(以下エネル ギー)を示す。ただし, τ が十分低下するまで計 測できなかった供試体に関しては, エネルギー は過小に評価した値となっている。

付着強度およびエネルギーは式(1)からもわ かるように吹付け厚さに影響を受ける。これら に対しても繊維長の影響のみを考慮するため, それぞれを吹付け厚さで除したものと繊維長の 関係を図-9, 図-10 に示す。繊維長 13mmの 場合と比較して、繊維長 26mm および 52mm の 場合の付着強度およびエネルギーが大きくなる が、繊維長が 26mm の場合と 52mm の場合の間 には大差は見られず、繊維長 26mm 程度以上で は付着強度およびエネルギーの増加はほとんど 期待できない。繊維長 52mm の各供試体は, SFRP 断面剛性に大差は見られないが(表-5), 付着強度およびエネルギーにはばらつきが大き い(表-6)。繊維長が 52mm まで長くなると, 吹 付けの際に繊維の分散性が悪くなり、供試体ご とに SFRP の力学特性のばらつきが大きくなっ たものと考えられる。この傾向は SFRP の引張 試験においても観察された。

以上,今回の試験パラメータの範囲内では, SFRP の応力-ひずみ関係および付着特性の両 面から総合的に判断して,SFRP に用いる繊維 長としては26mm が好ましいと考えられる。

また,表面処理法をチッピングにすることで, 繊維長に関わらず,単位吹付け厚さあたりの付 着強度が 0.1MPa/mm 程度,エネルギーが 0.05MPa程度増加することがわかる。付着強度 およびエネルギーの面から評価して,チッピン グ処理は大きな効果があることが確認された。

表-6 付着強度・界面剥離エネルギー



4. 有限要素解析

付着せん断試験から得たτ-δ関係の妥当性 を確認するため、供試体No.301 に対して付着せ ん断試験の有限要素解析を行った。解析には汎 用有限要素解析ソフト DIANA を用いた。

4.1 解析概要

図-11に要素分割図を示す。対称性を考慮し、 供試体の 1/4 を解析対象とした。SFRP と鉄筋は トラス要素、コンクリートは平面応力要素とし、 コンクリート要素と SFRP 要素の間に厚さ 1mm の界面要素を配置した。界面要素には構成則と して SFRP 接触面の接線方向にモデル化した τ $-\delta$ 関係(図-12 (a)),法線方向には Discrete Cracking モデル(図-12 (b))をそれぞれ適用し た。また、鉄筋とコンクリートは完全付着で一 体として挙動するものとした。SFRP 要素の断 面積は SFRP の幅(60mm)に表-3 に示した平均 厚さを乗じた値とし、コンクリートの諸特性に は実験値を適用した。解析は、変位制御で行っ た。

4.2 解析結果

解析から得られた荷重-コンクリート中央部 変位関係を実験値と比較したものを図-13 に 示す。実験では最大荷重後の挙動が計測されて いないが、荷重制御式の試験機を用いたため、 最大荷重において剥離が一気に進行したことに よる。最大荷重および最大荷重時変位ともに若 干のずれを生じているが、実験において、SFRP の断面積が軸方向に一定ではないこと、引張鉄 筋-コンクリート間に僅かに滑りが生じている 可能性があることを考慮に入れると、解析結果 は実験結果を概ね予測できていると思われる。

5. 結論

本研究から得られた結論を,以下にまとめる。

- SFRP の断面剛性がある程度増加すると 破壊形態が剥離破壊となる。
- (2) SFRP の繊維長が長い程,付着強度および エネルギーは大きくなるが,繊維長 26mm で頭打ちとなる。また,繊維長の違いに よる最大荷重への影響は見られない。
- (3) コンクリートの表面にチッピング処理を 行うと、ワイヤーブラッシング処理を行 った場合と比較して、単位吹付け厚さあ たり、付着強度が 0.1MPa/mm、エネルギ

ーが 0.05MPa 増加し,チッピング処理に より大きな効果が得られる。

(4) τ-δ関係をモデル化し、付着せん断試験
 の有限要素解析を行うことで、荷重-変
 位関係に関して実験結果と概ね良い一致
 を得ることができる。



参考文献

- Banthia, N. and Boyd, A.J., "Sprayed Fiber Reinforced Plastics for Repairs", *Canadian J.* of Civil Engineering, vol.27, pp.907-915, 2000
- 高浜達矢、大寺一清、堤 忠彦、二羽淳一郎:SFRP 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、2002.6
- 金久保利之ほか:連続繊維シートとコンク リートの局所付着応力-すべり量関係の提 案,コンクリート工学論文集, Vol.12, No.1, pp.33-43, 2001.1