論文 自己診断機能を有する FRP 複合材料のコンクリート構造物への適用 に関する研究

熊谷 仁志*1·杉田 稔*2·松原 秀彰*3·奥原 芳樹*4

要旨:筆者らは,導電性を有し電気抵抗がひずみにほぼ比例して変化する FRP(繊維強化 プラスチック)複合材料を開発した。この材料をシート状に成型したものを用いて,引張 試験およびコンクリートとの付着試験を行った。その結果,コンクリート構造物の補強材 料として適用した場合,優れたひび割れ診断機能を有していることが明らかになった。 **キーワード**:FRP,自己診断機能,付着,ひび割れ幅

1. はじめに

近年,連続繊維シートに樹脂を含浸させて接 着しコンクリート構造物を補強する工法が広く 採用され、設計および施工方法も確立されてき ている¹⁾。しかしながら、この工法では連続繊 維シートを接着することにより、コンクリート に入ったひび割れが直接観察できなくなるとい う問題がある。本研究では、導電性を付与した FRP(繊維強化プラスチック)を補強材料とし て使用することにより, ひび割れ発生などの損 傷を診断する,いわゆる自己診断材料システム を目指している。電気抵抗の変化により損傷を 診断するシステムは高度な計測装置を必要とし ないため非常に安価であり,既に炭素繊維束を 用いたセンサが開発されている^{2),3),4)}。今回使用 する材料は炭素粒子を連続繊維に含浸させたも ので、炭素繊維そのものよりもはるかに小さな ひずみレベルから導電性が変化するのが特長で あり、ひび割れ診断が可能となっている。

2. 導電性 FRP 複合材料

本研究に用いた導電性 FRP は、図-1のよう に導電層と絶縁層の2層構造から成る複合材料 である。導電層はビニルエステル樹脂に平均粒 子径 5μm の炭素粒子(フレーク状グラファイ ト)を体積比で 20%となるように混入した後, ガラス繊維に含浸および硬化させたものである。 炭素粒子の連続的な接触構造(パーコレーショ ン構造)が形成され導電性を有している。ひず みによってこの接触構造が変化し,電気抵抗が 変化する⁵⁾。絶縁層はガラス繊維に接着樹脂を 含浸させたものであり,実際には現場で施工さ れるものと考えられるが,今回の実験ではあら かじめ板状に成型したものを用いている。断面 寸法は概ね,導電層が厚さ1mm×幅10mm,絶 縁層が厚さ2mm×幅20mmである。



図-1 導電性 FRP 複合材料の概念図

*1 清水建設(株) 技術研究所主任研究員 工修 (正会員)
*2 (株)大崎総合研究所 代表取締役社長 工修 (正会員)
*3 (財)ファインセラミックスセンター 材料技術研究所主幹研究員 工博
*4 (財)ファインセラミックスセンター 材料技術研究所副主任研究員 工博

3. 引張試験

図-2に示すような試験片を3本製作し,引 張試験を行った。長さ250mmの導電性 FRP 複 合材料の両側65mmを外径34mm(内径25mm) の鋼管に挿入し,膨張材を充填してチャック掴 み部としている。試験片中央に検長50mmのク リップゲージを取り付けてひずみを,両端に導 電性接着剤を用いて銅線を取り付けて電気抵抗 を計測した。

表-1に導電性 FRP 複合材料の形状および 引張試験結果を,図-3に平均応力度とひずみ の関係およびひずみと抵抗変化率の関係を示す。 抵抗変化率ρは式(1)および式(2)で求められる。

$$\rho = (R - R_o) / R_o' \tag{1}$$

$$R_o' = R_o \cdot L' / L \tag{2}$$

ここで, *R*:電気抵抗計測値(Ω), *R_o*:電極間 の初期電気抵抗(Ω), *L*:電極間距離(mm), *L*': ひずみを受けている区間(mm), R_o' : ひずみを受けている区間の初期電気抵抗(Ω)である。引張試験では、掴み部内のひずみを無視し、ひずみを受けている区間 L'を定めている。

微小ひずみの範囲では電気抵抗の変化が小さ めとなる傾向はあるが,ひずみと抵抗変化率は 概ね比例関係にあることがわかる。



表-1 導電性 FRP 複合材料の形状および力学的特性

外形寸法 ^{*1}	導電部寸法	単位長さ 電気抵抗 (Ω/mm)	破断荷重	引張強度*2	弹性係数 ^{*2}	破断ひずみ
·····································	····································		(kN)	(N/mm^2)	(N/mm^2)	(%)
19×1.5	10×1.0	平 均 7.7 標準偏差 1.9	17.4	611	34650	1.86

*1: 厚さ 2mm に成型したものの接着面側を研磨して、厚さ 1.5mm とした

*2: 引張強度, 弾性係数は導電部と絶縁部の力学的特性が均一であるとして求めた値



図-3 引張試験結果

4. 付着試験

4.1 試験方法

図-4に示すように中央にスリットを設置し、
 全ネジボルト 4-M12 が埋め込まれた 100mm×
 100mm×500mm のコンクリート試験片の両側
 面に、導電性 FRP 複合材料をエポキシ樹脂で接

着し,付着試験(二面せん断試験)を行った。 試験片および試験結果の一覧を表-2に,試験 装置を写真-1に示す。FRPとコンクリートの 付着は,ある程度以上付着長が長くなっても付 着強度は増加しないことが知られている¹⁾。こ の影響を見るため,本試験では付着長をパラメ



記号	付着長 (mm)	全長 (mm)	最大荷重 試験結果 ^{*1} (kN)	最大荷重 計算値 ^{*2} (kN)	最大荷重時 ひび割れ幅 (mm)	抵抗変化率 試験結果 ^{*3} (%)	最大荷重時 ひずみ ^{*4} (%)
50-1 50-2 50-3	50	250	4.3 4.0 4.4	3.9	0.31 0.20 0.36	5.2 4.7 6.8	0.29 0.26 0.31
100-1 100-2 100-3	100	300	4.2 4.6 4.6	4.6	0.49 0.41 0.48	8.7 8.8 10.3	欠測 0.50 0.49
150-1 150-2 150-3	150	350	5.5 5.6 4.4	4.9	0.96 0.54 0.45	20.4 12.4 6.4	0.59 0.53 0.29
150U-1 150U-2 150U-3	150	400	4.8 5.6 4.7	4.9	0.81 1.17 0.88	19.0 25.4 17.5	0.44 0.54 0.51
200-1 200-2 200-3	200	400	4.2 5.2 4.5	4.9	0.27 0.93 0.78	5.6 25.6 18.2	0.40 0.45 0.45

*1:シート1枚当りの値(最大荷重×1/2)

*2:連続繊維補強コンクリート系構造設計施工指針案の付着強度式による

*3:ひずみを受けている区間 L'=100mm と仮定して求めた値

*4:貼付した複数のひずみゲージの中の最大値

ータ(50, 100, 150, 200mm)とし, 試験片を 各3本ずつ製作した。また中央部に剥離紙を付 け50mmのアンボンド区間を設けることによっ て付着長を150mmとした試験片も製作した(記 号150Uシリーズ)。スリットを跨ぐように変位 計を取り付け, 開口変位(ひび割れ幅)を計測 した。導電性 FRP 複合材料の表面には25mm 間 隔でひずみゲージを貼付し, ひずみを計測した。 使用したコンクリートの圧縮強度は47N/mm² であった。

4.2 試験結果

写真-2に試験片の破壊状況を,図-5に荷 重とひび割れ幅の関係を示す。スリット部にひ び割れが貫通すると、荷重の上昇に伴ってひび 割れ幅が増加していく。しかし、ひび割れ幅が 約 0.5mm を超えたころから荷重はほとんど上 昇せず、コンクリート表層の剥離が進展するよ うになり、最終的には付着長全体が剥離して破 壊に至った。一方,最大荷重時のひび割れ幅が 0.5mm 以下の試験片では、最大荷重に達すると 同時に、急激に荷重が低下した。アンボンドを 設けたことによる差異は認められなかった。図 -6にひび割れ幅と抵抗変化率の関係を示す。 抵抗変化率を求める際にひずみを受けている区 間L'は100mmとした。ひび割れ幅と抵抗変化 率は比例関係にあり、ひび割れ幅は図-3のひ ずみ回帰式ε=0.043ρにひずみを受けている区 間 100mm を乗じた値と良く一致している。



写真-2 破壊状況(付着長 200mm の例)



図-7 ひび割れ幅-ひずみ関係





図-9 ひずみ分布モデル

図-7にひび割れ幅と中央付近のひずみの関係を、図-8にひずみ分布の推移を示す。ひび割れ幅が約0.5mmを超えると(すなわち荷重の上昇が頭打ちになると),中央付近のひずみは約0.5%で一定となっている。ひび割れ幅が約0.5mmを超えた範囲では,ひずみが上昇するのではなく,ひずみを受けている区間が拡大してひび割れ幅が増大していることがわかる。これは前述のL'=100mmで一定として求めた値が良く一致していることとは符合していない。

そこで図-9のようなひずみ分布モデルを考 える。図-8のように正確には台形状のひずみ 分布となるが、ひび割れ幅を求めることに主眼 を置き、面積が等価になる矩形状のひずみ分布 に簡略化した。ひずみが上限値 ε_p =0.5% (ひび 割れ幅 $w = \varepsilon_p \times 100$ mm=0.5mm)に達するまでは ひずみを受けている区間は 100mm で一定とし (Step1)、 ε_p =0.5%に達するとひずみを受けてい る区間が拡大すると仮定する(Step2)。これらは 式(3)~式(5)のように表される。

$$w \leq 0.5$$

w

$$w = 0.043 \times (R - R_o) \cdot L / (100 \cdot R_o) \times 100$$
 (3)
 $w \ge 0.5$

$$=\varepsilon_{p}L'$$
(4)

$$L'=0.043 \times (R - R_o) \cdot L / (\varepsilon_p \cdot R_o)$$
(5)

式(3)~式(5)は、ひずみを受けている区間を 100mm とした抵抗変化率 ρ_{100} (式(7))を代入し て展開すると式(6)のようになり、結果的に同一 となる。したがって、図-6に示したようにひ び割れ幅に関係なく、ひび割れ幅と抵抗変化率 ρ_{100} は比例関係にあることが説明される。

$$w = 4.3\rho_{100}$$
(6)
$$\rho_{100} = (R - R_{o}) \cdot L / (100 \cdot R_{o})$$
(7)

図-10は最大荷重と付着長の関係である。試験結果と日本建築学会「連続繊維補強コンクリート系構造設計施工指針案」¹⁾による計算値は良く一致しており、付着長がある程度以上長くなると付着強度は一定値となることを良く表している。3章の引張試験において、同指針案による付着強度上限値(4.9kN)のときに、ひずみは0.46%であり、仮定したひずみ上限値 ε_p =0.5%は妥当であると言える。図-7および図-8に、





この簡略化ひずみ分布モデルを点線で示してい る。実験結果を概ねモデル化できている。

図-11 は全試験片の最大荷重時のひび割れ 幅と抵抗変化率の関係である。図-6と同様, ひび割れ幅と抵抗変化率は比例関係にあり,式 (6)と良く一致している。図-12 は全試験片の最 大荷重時のひび割れ幅と中央付近のひずみの関 係である。提案したモデルと同様に,ひび割れ 幅が約 0.5mm を超えると,ひずみは約 0.5%で 頭打ちとなっている。

5. まとめ

筆者らは,自己診断機能を持つ導電性 FRP 複 合材料を開発した。この材料を用いて,引張試 験およびコンクリートとの付着試験を行った。 その結果を以下に要約する。

- (1) 本研究の導電性 FRP 複合材料では、ひずみ と抵抗変化率は概ね比例関係にある。
- (2)付着強度については、試験結果と連続繊維 補強コンクリート系構造設計施工指針案に よる計算値は良く一致している。
- (3) ひび割れ幅と抵抗変化率は比例関係にある。
- (4) ひび割れ幅が約 0.5mm を超えると,ひび割れ付近の FRP のひずみは約 0.5%で一定となる。ひび割れ幅が約 0.5mm を超えた範囲では,ひずみが上昇するのではなく,ひずみを受けている区間が拡大してひび割れ幅が増大する。
- (5) 上記(3),(4)の関係をモデル化し、導電性 FRP 複合材料の電極間の電気抵抗の変化によっ て、ひび割れ幅を推定する方法を導いた。 なお、本研究は NEDO 基盤技術研究促進事業 「社会基盤構造物の安全維持管理のための自己 診断材料・修復材料の開発とそのシステム構築」

の一環として実施されたものである。

参考文献

- 1) 日本建築学会:連続繊維補強コンクリート系 構造設計施工指針案,2001
- 武藤範雄,柳田博明,杉田稔: CFGFRP コン クリート複合材料補強コンクリートの破壊 予知,セメント・コンクリート論文集, No.46, pp.790-795, 1992
- 8) 杉田稔:インテリジェント・コンクリート, コンクリート工学, Vol.32, No.7, pp.146-149, 1994.7
- 4) 石井清,稲田裕,杉村義広:炭素繊維東セン サの開発と性能評価,日本建築学会構造系論 文集,第557号,pp.129-136,2002.7
- Okuhara, Y., Shin, S.-G., Matsubara, H., Yanagida, H. and Takeda, N.: Development of Conductive FRP Containing Carbon Phase for Self-Diagnosis Structures, Proc. of SPIE, Vol. 4238, pp.314-322, 2001