

論文 センサー機能付き CFRP プレートの付着特性と電気抵抗に関する検討

立石 晶洋*1・佐藤 靖彦*2・高瀬 祐一*3

要旨： 構造物の補強とモニタリング用のセンサーを兼ねた FRP の適用を目的に、電極付き CFRP プレートを鉄筋コンクリートに接着した場合の部材の変形挙動と電気抵抗の関係性を確認した。電極付き CFRP プレートとコンクリートとの付着試験および補強されたコンクリートはりの曲げ試験を実施し、CFRP プレートの電気抵抗変化の傾向を示した。CFRP プレートの表面ひずみに比べ、CFRP プレートの電気抵抗の方が相対的に大きくなり、電気抵抗は表面ひずみに加え、付着応力-相対変位の関係の非線形性と関係があることが明らかとなった。

キーワード： CFRP プレート, 電気抵抗, 付着, 付着応力-相対変位

1. はじめに

繊維強化ポリマー（以下、FRP）を用いた補修・補強工法は約 30 年前から始められ、経年劣化した構造物、構造物の予防保全などに用いられてきた。現在、すべての構造物は、5 年に 1 度の点検が義務づけられており、FRP による補修・補強後も点検の必要がある。しかし、労働人口の減少、若手技術者への技術の伝承の難しさ、技能のばらつきなどが問題となっており、より簡便で、定量的な構造物のモニタリング手法が必要となっている。そこで、補修・補強となり、かつセンサーとしても活用可能な補強材、工法を開発するために、CFRP の導電性、電気抵抗に着目した試験を実施することとした。

炭素繊維強化ポリマー（以下、CFRP）をセンサーとして使用する技術は、産業機械分野において、CFRP 表面に電極を配置し電気抵抗を測定することで、CFRP 層内のはく離を電気抵抗の増加として検知する方法などが検討されてきた¹⁾。土木分野への適用は、CFRP スtrand シートによる鋼構造物の亀裂進展の検知について検討され、表面ひずみと概ね線形関係にあることから亀裂の進展の観察が可能であることが示されている²⁾。また、CFRP プレート緊張材による PC 鋼棒の破断の検知についても検討され、CFRP プレートの電気抵抗と表面ひずみの増加が線形的な関係であること、プレストレストコンクリートはり内の PC 鋼棒の緊張力の減少に対し、CFRP プレートの緊張力と電気抵抗が比例関係で増加することが確認されている³⁾。しかし、鉄筋コンクリート部材に発生するひび割れ発生時の電気抵抗の挙動や付着特性との関係については検討が行われていない。そこで本検討では、CFRP プレートとコンクリートの付着試験および補強した鉄筋コンクリートはりの曲げ試験を行い、

コンクリートに接着した場合の電気抵抗の変化の傾向を示し、CFRP プレートの付着特性と電気抵抗の関係および鉄筋コンクリートの曲げにともなう電気抵抗の変化について確認した。

2. 試験概要

2.1 付着試験

(1) 試験概略・使用材料

単一のひび割れに対する CFRP の電気抵抗の変化および

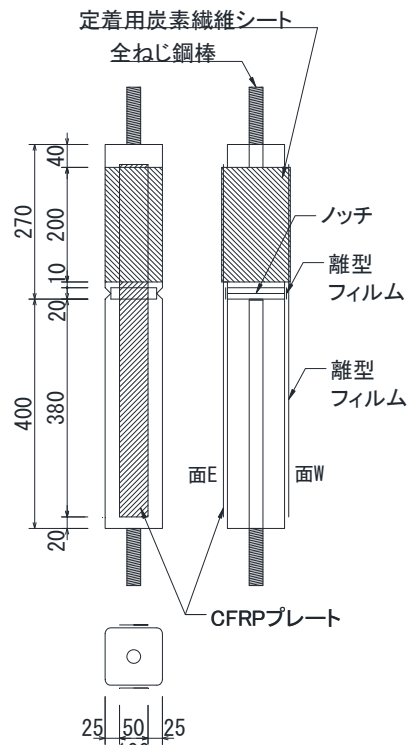


図-1 付着試験体概略

*1 日鉄ケミカル&マテリアル（株） コンポジット事業部 工修（正会員）

*2 早稲田大学 理工学術院創造理工学部社会環境工学科教授 博士(工学)（正会員）

*3 早稲田大学 創造理工学部社会環境工学科

び付着特性との関係を確認するために、CFRP の付着試験を実施した。付着試験は、連続繊維シートとコンクリートとの接着試験方法 (案) JSCE-E 545-2018 に準じて行い、図-1 に示すノッチを入れたコンクリート試験体 $100 \times 100 \times 670\text{mm}$ の両面に CFRP を貼付け、付着長は 380mm とした。試験は、両端の全ねじ鋼棒を 250kN 万能試験機の治具で把持し、引張力を作用させ行った。

使用した CFRP は、引抜き成形された幅 50mm 、厚さ 1mm の CFRP プレートとした。引抜き成形の CFRP プレートは繊維量、樹脂量、断面形状が長さ方向にほぼ均一となる材料であるため、電気抵抗が安定すると考え採用した。CFRP プレートの接着は、ディスクグラインダーでコンクリートの下地を処理し、プライマーを塗布、パテ状の接着剤で CFRP プレートを接着する工程で行った。使用した接着剤、CFRP プレートの緒元を表-1、表-2 にそれぞれ示す。使用したコンクリートは普通ポルトランドセメント、材齢 57 日での圧縮強度 21.7N/mm^2 であった。

表-1 接着剤物性 (単位: N/mm^2)

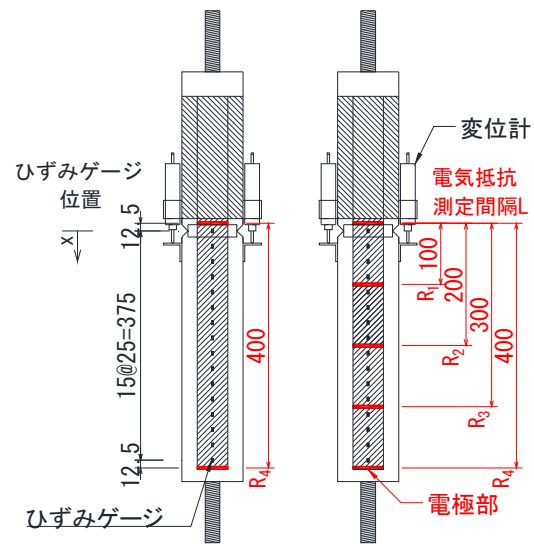
	接着強さ	圧縮強さ	圧縮弾性係数
プライマー	4.2	—	—
接着剤	3.3	78	5,350

表-2 CFRP プレート物性

幅 (mm)	厚さ (mm)	引張強度 (N/mm^2)	引張弾性係数 (N/mm^2)
50	1.0	3,377	173,000

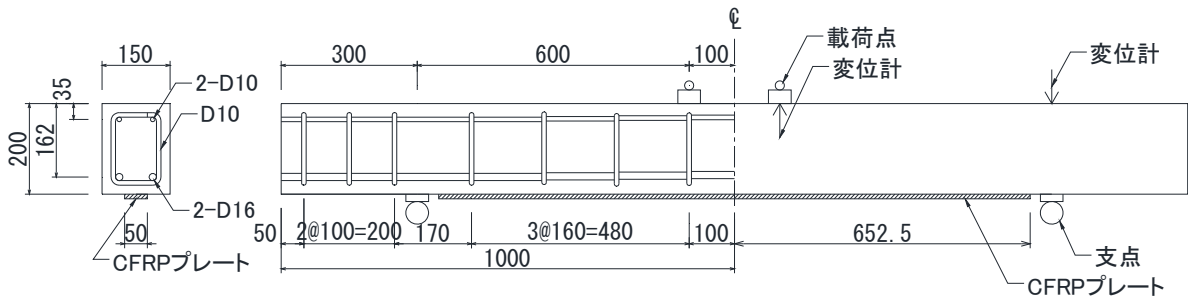
(2) 測定方法

CFRP プレートの電気抵抗の測定は、4 端子法とし、基本精度 0.006% 、最小分解能 $0.01 \times 10^{-6} \Omega$ の抵抗計を用い、CFRP プレート表面の電極と銅線をはんだで接続した。CFRP プレートの電極は図-2 に示す位置全周に施した。試験体数は 2 体とし、試験体 A1 の電気抵抗測定は 400mm ピッチのみとし、試験体 A2 は試験体中央を起点とし、距離の影響をパラメータとして、 100mm ずつ測定距離を伸ばして測定した。試験体 A1 はインターバル測定、試験体 A2 は荷重ステップごとに測定し、ひずみ分布との比較を行った。



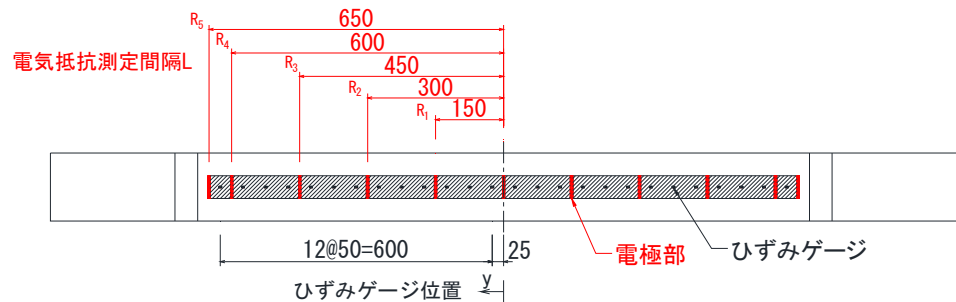
(a)試験体 A1 (b)試験体 A2

図-2 測定位置



(a)断面図

(b)側面図



(c)見上げ図

図-3 曲げ供試体概略

電気抵抗の実測値と比較する CFRP プレート表面のひずみは、検長 5mm のひずみゲージを 25mm ピッチで接着し、荷重、ひび割れ開口変位とともに静ひずみアンブ搭載のデータロガで測定した。

2.2 はり曲げ試験

(1) 試験概略・使用材料

曲げモーメントが作用するはり下面の CFRP プレートに対する電気抵抗の増減を確認するために、4 点曲げ試験を実施した。鉄筋コンクリートはりは、CFRP プレートのはく離破壊を想定し、せん断スパン比 3.7、補強後の引張補強筋比 1.8% の供試体とした。CFRP プレートの接着剤、使用材料は付着試験と同じものを用いた。

使用したコンクリートは普通ポルトランドセメント、試験時の圧縮強度は 35.4N/mm^2 であった。鉄筋は SD295 を用い、降伏強度は 357N/mm^2 であった。

(2) 測定方法

図-3 に CFRP プレートの電極位置、ひずみゲージの位置を示す。電気抵抗の測定は、供試体中央の電極を起点とし、起点電極と各電極間の抵抗を測定した。計測方法は、付着試験と同様とし、各載荷ステップごとに電気抵抗、CFRP のひずみ、鉄筋のひずみ、荷重、載荷点変位、支点上の変位を測定した。

3. 試験結果および考察

3.1 付着試験結果

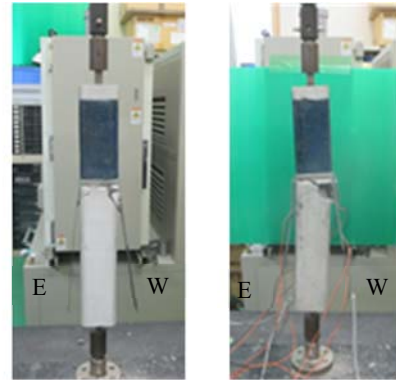
(1) 破壊状況

図-4 に破壊状況を示す。試験体 A1, A2 ともノッチ部でのひび割れ発生後、荷重、ひずみともに増加し、途中ノッチひび割れ部から距離 40mm~75mm の位置に伸びた斜めのひび割れによるブロック化を伴い最終的に CFRP プレートがはく離して破壊に至った。試験体 A1 は両面はく離、試験体 A2 は面 W のみのはく離であった。

(2) 試験体 A1 の電気抵抗の変化

試験体 A1 の面 W のひずみゲージの実測値すべての平均、ノッチからの距離 75mm と 150mm のひずみゲージの実測値と荷重の関係を図-5、面 W と面 E の荷重-電気抵抗 ΔR の関係を図-6 にそれぞれ示す。ノッチ部のひび割れ発生までは、ひずみ、電気抵抗とも小さく、ひび割れ発生後は、両者とも上に凸の曲線を示した。微小区間の測定となるひずみゲージでの測定の場合は、75mm 位置ではひび割れからのブロック化の影響によるひずみの増減の影響を受けていると思われるが、平均するとその影響は見られなかった。電気抵抗は概ねひずみの平均値と同様な傾向を示し、測定区間のひずみの状態を計測できると言える。

電気抵抗の精度や挙動を確認するために、電気抵抗を距離で除した値 $\Delta R/L$ (以下、電気抵抗率) と電気抵抗測



(a)試験体 A1 (b)試験体 A2

図-4 破壊状況

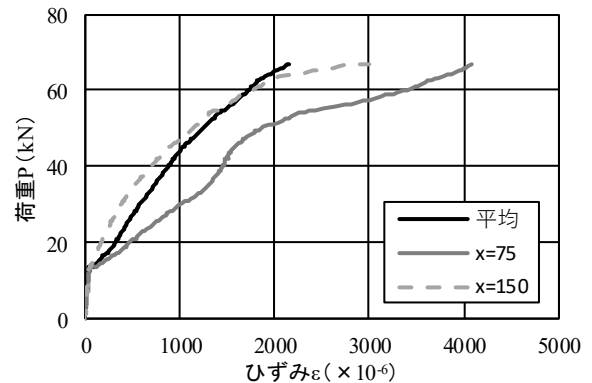


図-5 試験体 A1 荷重-ひずみ関係

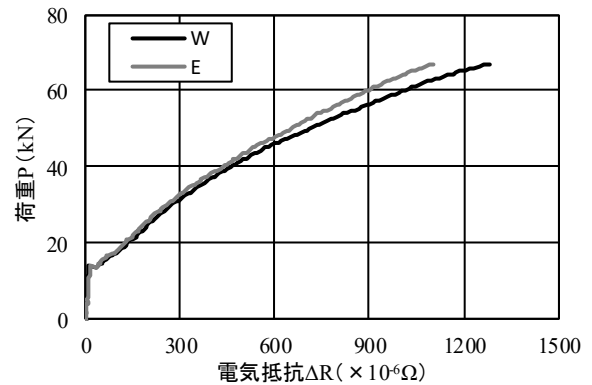


図-6 試験体 A1 荷重-電気抵抗関係

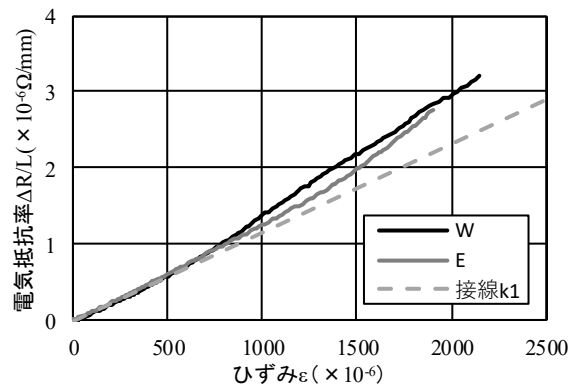


図-7 試験体 A1 電気抵抗率-ひずみ関係

定区間内のひずみの平均値の関係を図-7 に示す。図中にはひずみの平均値が 500×10^{-6} まで接線（傾き $k_1 = 0.00116 \times 10^{-6} \Omega/\text{mm}$ ）を挿入した。ひずみの平均値が 500μ までは $\Delta R/L$ とひずみの平均値は線形関係であった。しかし、 500×10^{-6} を超えてからは、電気抵抗の方がひずみの平均値に比べ増加する傾向にあった。

(3) 試験体 A2 の電気抵抗の変化

試験体 A2 では、電気抵抗の測定間隔を増やして測定したことから、ひずみ分布、付着応力、相対変位との関係を併せて整理することとした。

まず、試験体 A2 の各測定間隔での電気抵抗率 $\Delta R/L$ とひずみの平均値の関係を図-8 に示す。図中には試験体 A1 で得た接線（傾き k_1 ）を併せて示す。試験体 A1 と同様に、ひずみの平均値 500×10^{-6} までは概ねひずみと電気抵抗は線形関係にあり、 500×10^{-6} を超えてからは相対的に電気抵抗の増加が大きくなった。また、測定間隔によらず概ね同じ傾向を示した。

測定位置によるひずみとの差を確認するために荷重 20kN から 40kN の 100mm 区間の電気抵抗率 $(\Delta R_{n-1} - \Delta R_n) / 100\text{mm}$ を算出し、同じ測定区間のひずみの平均値と併せて図-9 に示す。縦軸第 1 軸と 2 軸は係数 k_1 で等価とした。ノッチからの距離 100mm から 400mmの間ではひずみの値とゲージとほぼ同じ傾向を示した。これは破壊まで概ね同じ傾向であった。一方で、0mm から 100mmの間は、荷重 20kN まではほぼ同じ傾向を示したが、それ以上の荷重では徐々に電気抵抗値が増加して乖離していく傾向を示した。

付着応力の非線形領域では、CFRP プレートとの界面のコンクリートに微細ひび割れが累積していると考えられる。コンクリートの微細なひび割れが、接着樹脂および CFRP 表層の微細ひび割れを発生させ、電流の流れる断面を減少させ、電気抵抗を増加させている可能性が考えられる。このことから、電気抵抗の増加は付着応力の非線形性と考え、任意位置の付着応力-相対変位の関係を確認した。付着応力は、隣り合うひずみゲージの実測値の差分に CFRP プレートの弾性係数と厚さを乗じて算出し、相対変位はひずみの実測値に測定ピッチを乗じて算出した⁴⁾。算出値は測定位置の中間点の値として示すこととした。図-10 に算出した付着応力-相対変位関係を示す。ノッチからの距離 0mm から 100mm 間の $x=87.5\text{mm}$ では図中矢印の位置で最大付着応力の極大点が発生していることが確認できた。この極大点は、荷重 22kN で発生しており、ひずみと電気抵抗が乖離し始める位置に相当する。さらに極大点以後も付着応力の線形的な増加は見られなかった。 $x=37.5\text{mm}$ の曲線も図中矢印の位置以前に非線形性を示し、矢印の位置以降から付着応力が低下する付着軟化を示していた。一方、100mm か

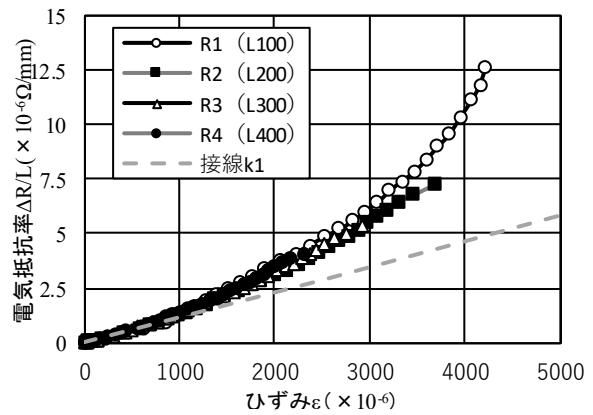


図-8 試験体 A2 電気抵抗率-ひずみ関係

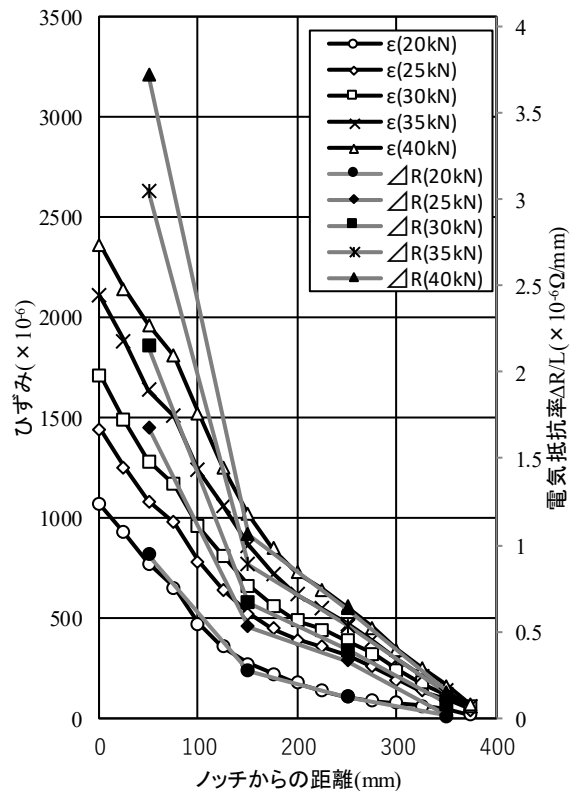


図-9 試験体 A2 ひずみおよび電気抵抗分布関係

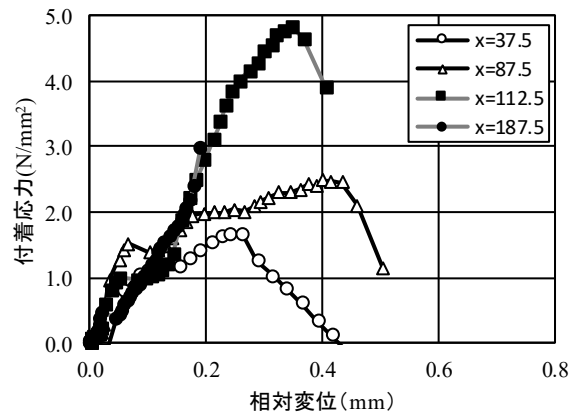


図-10 $x=0\sim 200\text{mm}$ 間付着応力-相対変位関係

ら 200mm の区間の付着応力-相対変位の関係 $x=112.5\text{mm}$ および $x=187.5\text{mm}$ は、ほぼ線形の関係があ

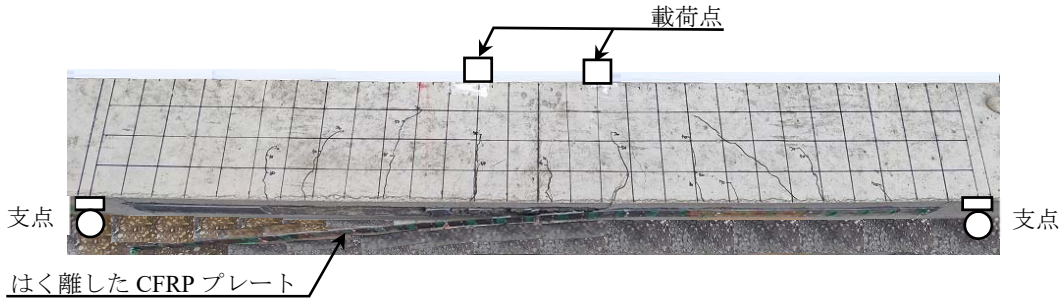


図-11 はり供試体破壊状況

り、弾性範囲であると考えられる。このことから、ノッチからの距離 0mm から 100mm 区間では、付着応力の非線形性の影響を受け、ひずみに比べ相対的に電気抵抗が増加したと考えられる。

3.2 はり曲げ試験結果

(1) 破壊状況

はり供試体の破壊状況を図-11、荷重-変位関係を図-12 にそれぞれ示す。荷重は荷重 30kN、50kN、70kN の時点で一度除荷し再度載荷した。はりの変状は、荷重 30kN で載荷点直下に曲げひび割れが発生し、その後せん断スパン内でも曲げひび割れが発生、曲げひび割れが進展し、荷重 81kN で主鉄筋降伏後、最大荷重 105kN で CFRP プレートが脆性的にはく離し、破壊に至る履歴であった。

(2) 電気抵抗による変形の検知

供試体中央から 75mm 位置と 325mm 位置の荷重-ひずみ関係を図-13、供試体中央から 150mm 間と中央から 650mm 間の荷重-電気抵抗率 $\Delta R/L$ 関係を図-14 にそれぞれ示す。CFRP プレート上のひずみは、曲げひび割れの発生後にひび割れ部のひずみが増加するため、荷重-ひずみ曲線の剛性が低下する傾向を示した。除荷載荷の曲線上でも、剛性の低下が明確に分かる。電気抵抗率も曲げひび割れ発生後の荷重-電気抵抗率曲線の剛性の低下がみられ、破壊に至る直前の電気抵抗率の伸びが大きいことが見て取れる。本はり供試体は CFRP プレートのはく離破壊に至っていることから、付着の非線形性の影響をとらえているものと考えられる。しかし、電気抵抗の除荷載荷の曲線では、ひずみと異なり、剛性の低下は顕著には見られず、ひずみに比べ相対的に塑性成分が大きいように見える。CFRP プレートの電気抵抗を測定しているため、CFRP プレートの材料としてのヒステリシス特性の影響を受けているものと考えられ、その結果、電気抵抗の塑性成分が大きくなっているものと考えられる。CFRP をセンサーに適用するためには、CFRP のヒステリシスについて検討する必要があると考えられる。

次に、ひずみゲージと電気抵抗の差を確認するために、荷重と測定区間のひずみの平均値の関係および電気抵抗

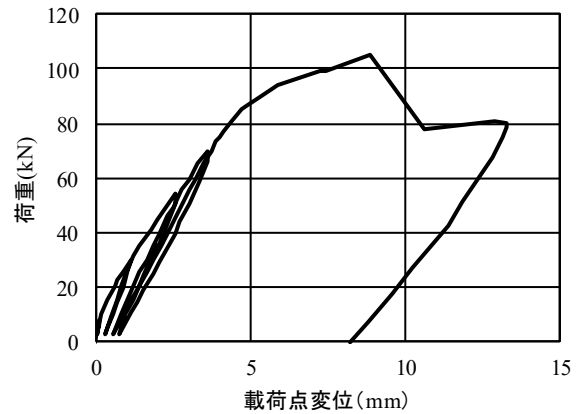


図-12 荷重-変位関係

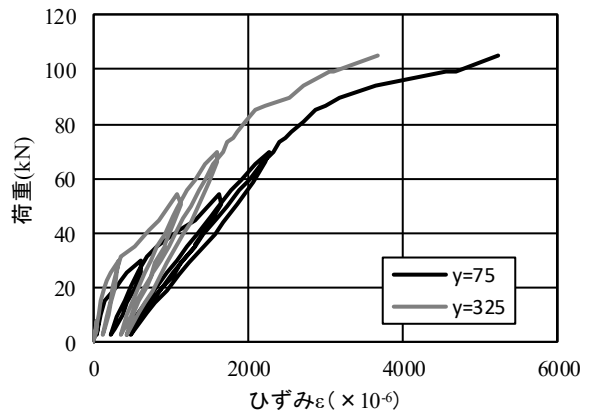


図-13 荷重-CFRP ひずみ関係

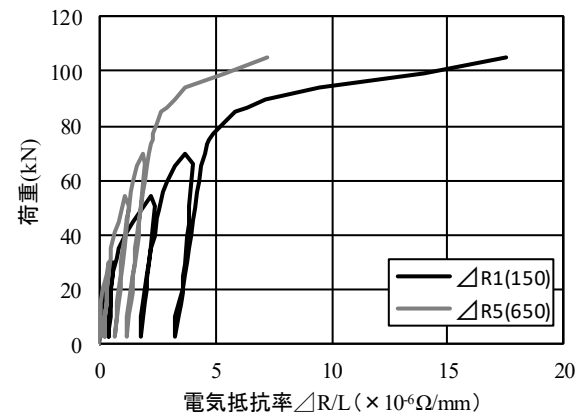


図-14 荷重-電気抵抗率関係

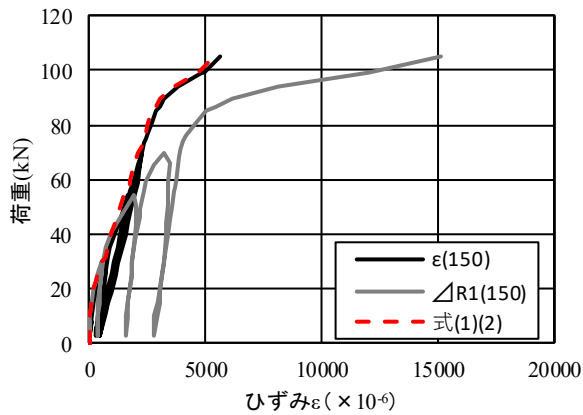


図-15 荷重-電気抵抗率関係 R₁ (L150)

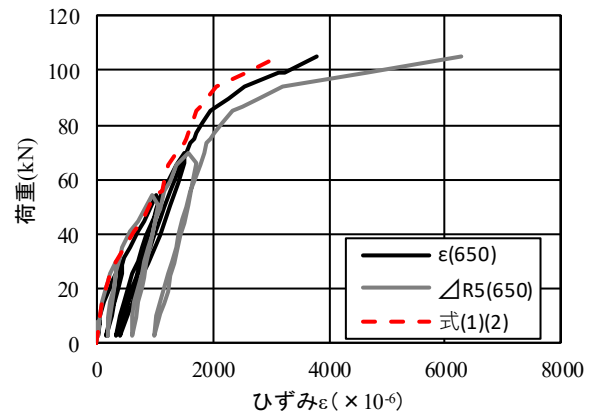


図-16 荷重-電気抵抗率関係 R₅ (L650)

率 $\Delta R/L$ を付着試験体 A1 で得られた係数 k_1 で除して算出した荷重-ひずみ関係と併せて、測定間隔 150mm の荷重-ひずみ関係を図-15、650mm の関係を図-16 にそれぞれ示す。測定間隔 150mm では概ね荷重 50kN まで一致しており、650mm では 70kN まで一致した。さらに測定間隔 150mm の荷重 50kN のときのひずみの平均値は 1600μ 、測定区間 650mm の荷重 70kN のひずみの平均値は 1500μ であった。荷重およびひずみの小さい範囲つまり付着特性が弾性範囲ではひずみと電気抵抗は線形的な関係を示すと考えられる。

さらに、付着試験体 A2 の測定区間 100mm の曲線 R₁ で得られた測定区間のひずみの平均値と電気抵抗率の関係の近似式(1)と(2)を用いて、電気抵抗率 $\Delta R/L$ を補正した曲線を図-16、図-17 にそれぞれ破線として示す。

$\Delta R/L < 0.58$ ($\epsilon < 500 \times 10^{-6}$) のとき、

$$\epsilon = \frac{1}{k_1} (\Delta R/L) \quad (1)$$

$\Delta R/L \geq 0.58$ ($\epsilon \geq 500 \times 10^{-6}$)

$$\epsilon = 500 + 733(\Delta R/L - 0.58)^{0.67} \quad (2)$$

ここで、 k_1 : 係数 ($=0.00116 \times 10^{-6} \Omega/\text{mm}$)、 $\Delta R/L$: 電気抵抗率 ($\times 10^{-6} \Omega/\text{mm}$)、 ϵ : ひずみ平均値 ($\times 10^{-6}$)

補正した荷重-電気抵抗率の包絡線は、測定区間 150mm、650mm の場合も概ねひずみの平均値と一致していると言える。このことから、電気抵抗は表面のひずみに加え、付着試験のひずみと電気抵抗の乖離から得られた電気抵抗の増加の影響を考慮することで、部材の電気抵抗の変化をひずみとして推定できると言える。部材での電気抵抗の測定は、表面ひずみに対する電気抵抗の相対的な増加を検出することにより、付着状態つまり CFRP プレートのはく離の予兆を測定できる可能性が考えられる。表面ひずみから付着応力-相対変位関係の非線形性を検知するには多数のひずみゲージを必要とするが、電気抵抗の測定においては、測定 1 区間のみの抵抗値の増加を検知することで可能になると考えられる。

4. まとめ

センサーとなる電極を CFRP プレートに取付け、付着試験およびはりの曲げ試験を実施し、電気抵抗の変化を測定した。結果、以下の知見を得た。

- (1) 付着試験で得られた CFRP プレートの電気抵抗とひずみの関係から、ひずみ 500×10^{-6} 以下の範囲では電気抵抗とひずみは線形的な関係を示した。 500×10^{-6} 以上の範囲ではひずみに比べ相対的に電気抵抗の増加が大きくなった。
- (2) 付着試験のひび割れ側でひずみに比べ相対的に電気抵抗の増加が大きく、端部側ではひずみの増加と電気抵抗の増加の傾向は同じであった。この傾向は付着応力-相対変位関係の非線形性の挙動がみられる範囲と見られない範囲で一致した。
- (3) 曲げ試験の電気抵抗とひずみの増加傾向も付着試験と同様に、荷重の低い範囲で一致し、荷重が大きくなるにつれて相対的に電気抵抗の増加が大きくなった。

参考文献

- 1) 小曲一臣, 轟章, 島村佳伸, 小林秀男: 電気抵抗変化を用いた CFRP マトリックス割れの検知, 材料, Vol.53, No.9, pp.962-966, 2004.9
- 2) 田中幹基, 松本大樹, 秀熊佑哉, 小林朗, 宮下剛: 鋼部材の補修と状態把握を可能とする CFRP ストランドセンサの基礎研究, 土木学会第 70 回年次学術講演会, I-006, 2015.9
- 3) 立石晶洋, 金海鈺, 立神久雄, 萩原直樹: 炭素繊維プレート緊張材を用いた PC 鋼材破断による PC 桁の変状モニタリングに関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, 2017
- 4) 佐藤靖彦, 浅野靖幸, 上田多門: 炭素繊維シートの付着機構に関する基礎研究, 土木学会論文集, No.648/V-47, pp.71-87, 2000.5