

報告 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

立石 晶洋*1・金海 鉦*2・立神 久雄*3・萩原 直樹*4

要旨: プレストレストコンクリート橋では、グラウト充填不良に起因してPC鋼材が腐食し、破断に至る事例が報告されている。鋼材破断に対するモニタリングの重要性が高まっているが、センサーのみを新規に設置する費用の課題がある。本研究では、炭素繊維からなるプレート材にセンサー機能を付加し、補強用緊張材とモニタリングを兼ね備えたシステムを開発することを目的に、実橋に用いられるCFRP緊張材を用いたPCはり補強、PCはりのプレストレスの解放再緊張を行った。試験では、CFRP緊張材の電気抵抗、FBGセンサーによるひずみを測定し、PCはりのプレストレスの解放再緊張時のひずみを検出できることを確認した。

キーワード: CFRP緊張材, PC鋼材破断, モニタリング, 電気抵抗, FBGセンサー

1. はじめに

既設のプレストレストコンクリート（以下、PC）橋において、PCグラウト技術の未熟さなどから、PCグラウトが完全に充填されておらずPC鋼材の破断が報告されている¹⁾²⁾。シース内の空隙率が少ない状況にあるPC鋼材においては、PCグラウトの充填不足の割合が高い。また、橋面防水施工がされる前のPC橋においては、凍結防止剤の影響で上縁定着のPC鋼材が破断する確率が高い。これを踏まえ、高速道路株式会社の設計要領第二集「橋梁保全編」³⁾では、変状が疑われるPC橋、変状が確認されているPC橋、主PC鋼材を上縁定着しているPC橋はフェールセーフおよびモニタリングの観点からケーブル方式のPC鋼材の追加配置を行うものとする事が記されている。そこで、炭素繊維のひずみによる電気抵抗変化に着目したモニタリング工法について検討することとした。

近年、炭素繊維シート、炭素繊維強化ポリマー（以下、CFRP）プレートは、構造物の補修・補強材料として適用されてきた。中でもCFRPプレートを用いた緊張補強工法のCFRPプレート緊張補強工法は、CFRP緊張材のプレストレスと緊張材の接着により、PC桁にも有効な補強工法として適用されてきた。CFRPプレート緊張補強工法は緊張力を導入する補強工法であるから、PC鋼材破断進行による耐荷力低下を補うフェールセーフの条件を満たしていることに加え、CFRPプレート緊張補強工法で使用するCFRP緊張材の炭素繊維は、導電性材料、ひずみにより電気抵抗が変化する材料としても知られ、ひずみ測定、CFRP層間のはく離検知などの検討が行われてきた⁴⁾⁵⁾。しかし、実橋補強レベルでの検討とそれを用

いた温度変化の影響を考慮した検討は行われていない。そこで本検討では、CFRP緊張材の緊張時の抵抗変化や温度特性を明らかにするとともに、PC鋼材破断時に検出が必要なひずみ量を推定し、はり供試体をCFRP緊張材で補強した際のCFRP緊張材の電気抵抗によるひずみの検知能力について確認した。

加えて、測定は光ファイバーに回折格子を刻んだFiber Bragg Gratingsセンサー（以下、FBGセンサー）を用いたモニタリングシステムについても検討した。FBGセンサーは、1本の光ファイバー上に複数の回折格子を設けることができ、配置が容易であること、接触抵抗の影響が小さいこと、耐久性が高いことから長期的なモニタリングに有用と考えられる。複数の指標でPC鋼材の破断を検知することも想定し、FBGセンサーについても検討した。

2. PC鋼材破断時の発生ひずみの推定

実橋におけるPC鋼材破断時の主桁の発生ひずみを確認するために、モデル橋の曲げモーメントに対する応力度を算定した。本モデル橋は、昭和40年代に建設されたポストテンション方式単純T桁橋の一等橋（TL-20）、桁長20.765m、支間長19.965mとし、PC鋼材は12φ7が7

表-1 モデル橋の断面力（単位：kN-m）

	設計荷重	曲げモーメント
死荷重	主桁自重	603.81
	場所打ちコンクリート	81.19
	橋面荷重	173.65
活荷重		858.65

*1 新日鉄住金マテリアルズ（株） コンポジットカンパニー（正会員）

*2 （株）国際建設技術研究所 技術部（正会員）

*3 ドーピー建設工業（株） 技術部（正会員）

*4 （株）高速道路総合技術研究所 橋梁研究室（正会員）

本配置されているとした。また、コンクリートの設計基準強度 40.0N/mm^2 、弾性係数 $31,000\text{N/mm}^2$ と仮定した。モデル橋の概略を図-1、断面力を表-1 に示す。PC 鋼材の破断は、上縁定着されている C2, C3, C4 が破断すると想定し、破断した PC 鋼材は G1 桁に単位軸力を載荷した場合の影響値を考慮したプレストレスを用いた。破断前、2 本破断、3 本破断した 3 ケースの応力度算定結果を表-2 に示す。

表-2 設計荷重時の発生応力度

ケース	破断前	2 本破断	3 本破断
死荷重		5.34 /-8.64	
活荷重		4.24 /-6.96	
有効プレストレス	-2.96 /16.51	-2.55 /14.25	-2.35 /13.11
合成	6.62 /0.91	7.03 /-1.35	7.23 /-2.49

(上縁/下縁, 単位 : N/mm^2 , 引張 : 負)

計算結果から道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編の許容応力度- 1.5N/mm^2 について照査すると、PC 鋼材が 3 本破断した場合にコンクリート下縁の許容応力度を越える結果となった。

本モデル橋において CFRP プレート緊張補強工法は、1 層の補強によりコンクリート下縁の引張応力度を 1.2N/mm^2 改善することが可能である。また、本工法は補強による耐力低下の補完に加え、PC 鋼材の破断と許容応力度の超過分のひずみを検知したのち、同じ箇所を重ねて配置できる追加補強可能なシステムである。本検討では桁への補完耐力を考慮し、PC 鋼材が 3 本破断した場合の検知が可能となるシステムを開発することを目標とした。PC 鋼材 3 本破断時の下縁コンクリートのひずみは 109.6×10^{-6} であった。

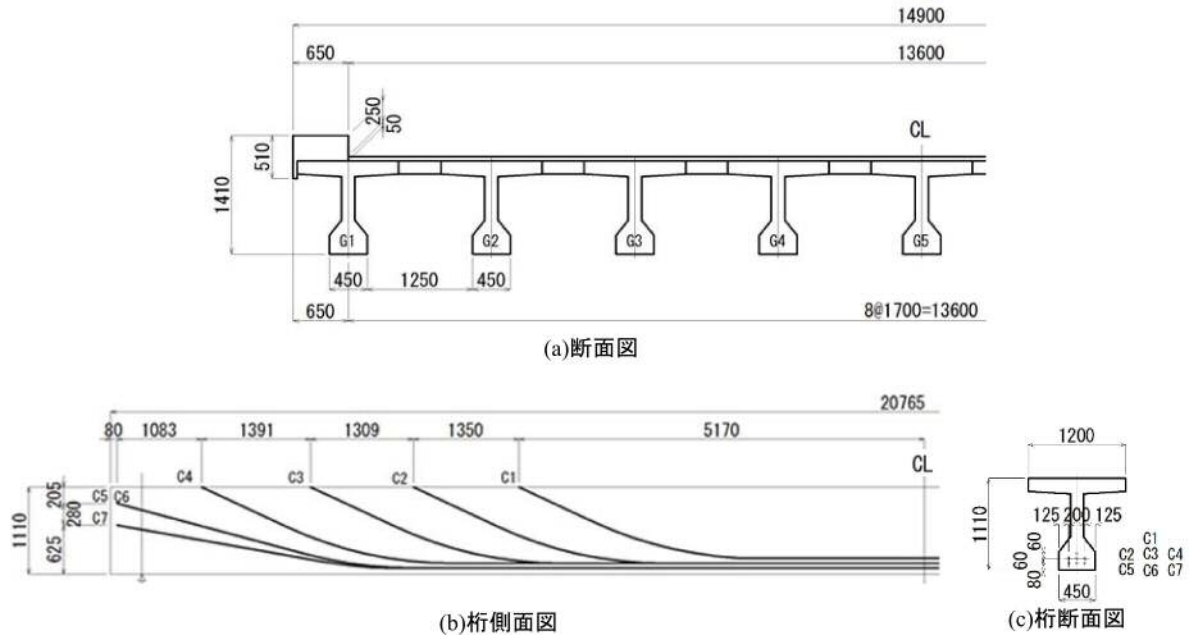


図-1 モデル橋概略

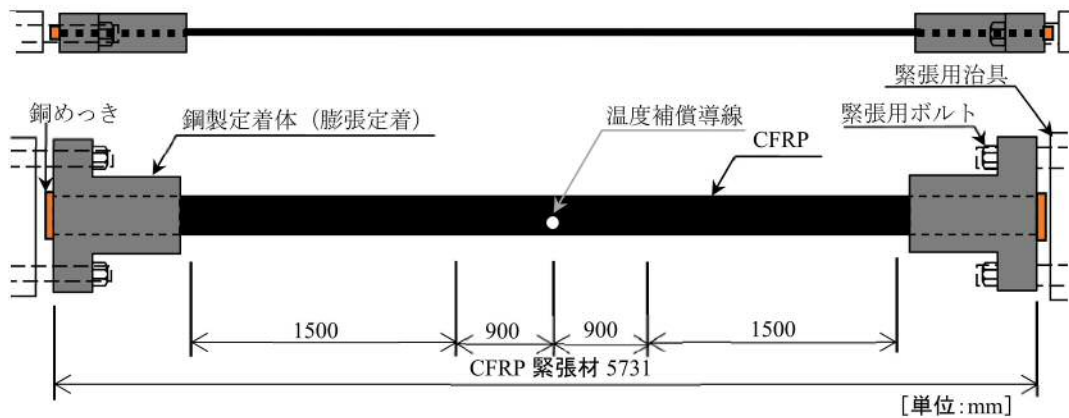


図-2 CFRP 緊張材

3. CFRP 緊張材の電気抵抗特性の確認

3.1 使用材料 (CFRP 緊張材)

本試験で用いた CFRP 緊張材を図-2 に示す。両端に CFRP プレートで膨張材で定着した鋼制定着体を有し、鋼制定着体と緊張治具をボルトで締結して引張力を負荷する構造となっている。CFRP プレートは厚さ 3mm、幅 75mm、鋼制定着体端部までの長さ 5,731mm のものを用いた。表面にはガラス繊維強化ポリマーの保護層を有する。CFRP プレートの物性を表-3 に示す。

3.2 電気抵抗測定方法

本検討では CFRP 緊張材の電気抵抗を測定するために鋼制定着体の端部の CFRP に銅めっきを施し、電極を形成した。電気抵抗の測定は、4 端子法とし、基本確度 0.006%、最小分解能 $0.01 \times 10^{-6} \Omega$ の抵抗計を用いた。

試験は、CFRP 緊張材を緊張フレーム内に設置し、緊張治具をセンターホールジャッキに接続し、漸増荷重を行った。測定項目は電気抵抗に加え、ロードセル荷重値、図-2 に示す CFRP プレート中央の温度とした。

また、CFRP 緊張材の温度による影響を確認するため、昼夜の寒暖差による 2 パターンの温度環境下で測定した。

3.3 電気抵抗測定結果

図-3、表-4 にロードセル荷重値と CFRP 緊張材の電気抵抗の測定結果をそれぞれ示す。結果、CFRP 温度が低い方が電気抵抗は増加した。また、図-3 および表-4 の初期から最大荷重間の割線の傾きを算出した値から 32.6℃と 23.5℃間では電気抵抗の傾きに差は見られなかった。室温範囲では電気抵抗の傾きに与える影響は小さいと考えられる。図-3 の 32.6℃の荷重 190-200kN の範

囲で電気抵抗の傾きを算出したところ、電気抵抗の接線の傾きは $16.0876 \text{ kN/m}\Omega$ であった。接線の傾きは荷重とともに微増する傾向にあり、CFRP 緊張材の電気抵抗は検知したい荷重範囲、つまり CFRP 緊張材の緊張力近傍

表-3 CFRP プレート物性

公称断面積	引張耐力	弾性係数
225mm ²	425kN	106kN/mm ²

表-4 電気抵抗測定結果

CFRP 温度 ℃	初期抵抗 mΩ	最大荷重時		抵抗傾き kN/mΩ
		荷重 kN	抵抗 mΩ	
32.6	861.9	298.5	879.6	16.8853
23.5	864.9	295.0	882.5	16.8353

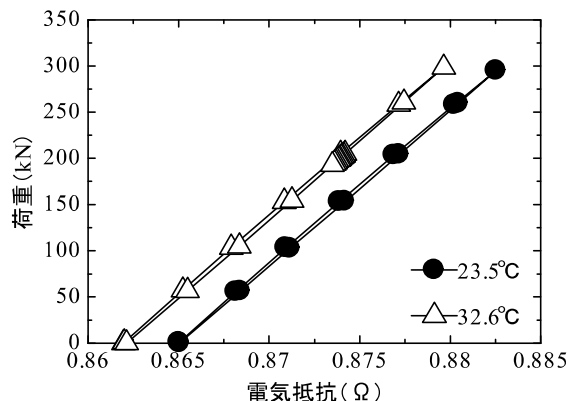


図-3 電気抵抗測定結果

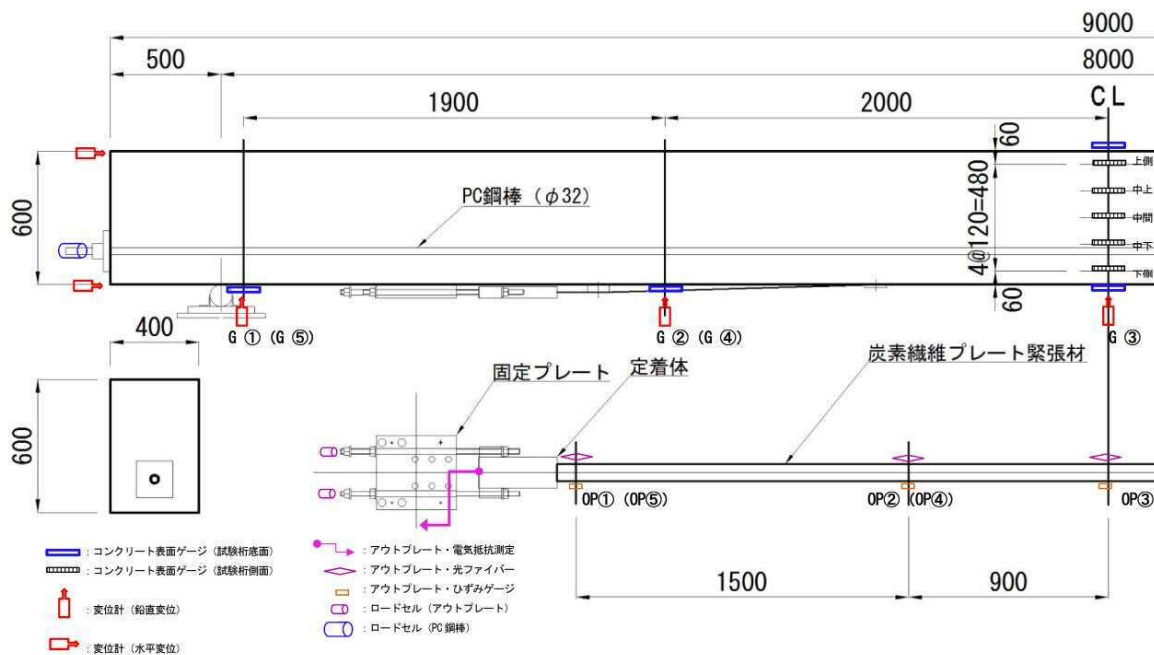


図-4 はり供試体寸法と測定位置

で算出することで、精度が向上すると考えられる。ここで、本 CFRP 緊張材の電気抵抗の抵抗の傾きと温度の影響を考慮し、電気抵抗 ΔRM に温度の影響を考慮した温度係数 K_t を加えた電気抵抗をひずみへの変換式 (1) を提案する。本変換式を 4 章はり試験での温度補正に用いた。

$$\varepsilon_{RM} = \frac{(\Delta RM + K_t \cdot \Delta T) K_1}{A_{op} \cdot E_{op}} \quad (1)$$

ここで、 ε_{RM} : 電気抵抗換算ひずみ, ΔRM : 電気抵抗測定値(mΩ), K_t : 温度係数 (=0.3338mΩ/°C), ΔT : 炭素繊維プレート表面温度測定値, K_1 : 炭素繊維プレートの荷重と電気抵抗傾き (190-210kN 解放再緊張接線の傾き 16.0876kN/mΩ), A_{op} : CFRP プレートの公称断面積 (=225 mm²), E_{op} : CFRP プレートの弾性係数実測値(=106kN/mm²)

4. はり試験

4.1 試験概略

はり試験は、CFRP 緊張材を補強した状態で、PC 鋼棒の緊張力を解放して、PC 鋼棒の破断を模擬し、CFRP 緊張材の電気抵抗と FBG センサーによる CFRP 表面のひずみを測定して、それぞれのひずみの検知能力を確認した。

CFRP 緊張材によるモニタリング確認試験は、図-4 に示す幅 400mm、高さ 600mm、長さ 9.0m の鉄筋コンクリートのはり供試体を作製し、上縁から 450mm に配置した PC 鋼棒 (φ32) の緊張力をセンターホールジャッキで解放することで PC 鋼材の破断状況を再現する試験とした。

CFRP 緊張材は、PC 鋼棒に緊張力 490kN を導入した状態ではり下面へ設置した。CFRP プレート緊張補強工法における CFRP 緊張材は、緊張後躯体に接着する工法であるが、接着による抵抗の変化の有無の確認、図-4 に示すように鋼製定着体の厚さ分の偏向による供試体長さ方向のひずみ分布と電気抵抗値への影響を確認するため、CFRP 緊張材の接着前後に PC 鋼棒の解放、再緊張を行った。CFRP 緊張材の緊張力は 205kN とした。CFRP 緊張材の緊張時におけるコンクリートへの導入応力は、上縁で 1.71 N/mm² (引張)、下縁 3.42 N/mm² (圧縮) である。

PC 鋼棒の緊張力の解放、再緊張は CFRP 緊張の接着前後にそれぞれ 2 回実施し、PC 鋼棒の緊張力の 10% ごとに測定を実施した。PC 鋼棒のロードセル荷重値、ひずみゲージによるコンクリート表面のひずみと CFRP 表面のひずみ、CFRP 表面温度を静ひずみアンプ搭載のデータログで測定し、CFRP 緊張材の電気抵抗を 3 章と同じ抵抗計、FBG センサーを光ファイバー測定器で同期を取りながら測定した。FBG センサーは非金属被覆の接着型でゲージ長 10mm のものを用いた。ただし、FBG センサー

表-5 CFRP 緊張材の緊張後の CFRP 発生ひずみ (×10⁻⁶)

測点	OP①	OP②	OP③	OP④	OP⑤
CFRP ひずみ	9807	8404	10195	8259	8998
平均①~⑤	9133				
平均②~④	8953				

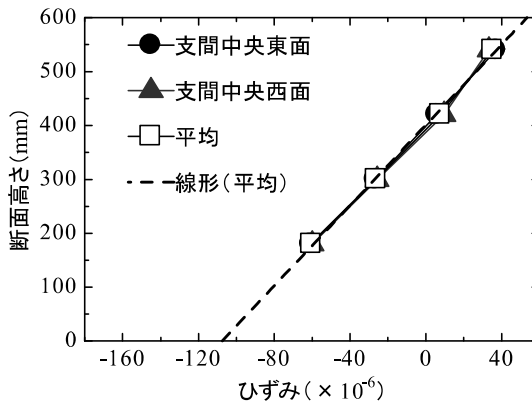


図-5 CFRP 緊張材設置直後のコンクリート断面ひずみ分布 (CFRP 緊張材接着前)

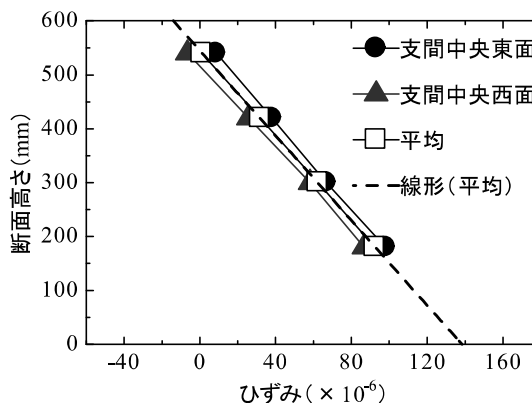


図-6 PC 鋼棒緊張解放後のコンクリート断面ひずみ分布 (CFRP 緊張材接着前)

の測定可能範囲は約 $5,000 \times 10^{-6}$ であることから、CFRP 緊張材を緊張後に接着して、CFRP 緊張材をコンクリートへ接着した後のみ測定した。図-4 に各計測機器の計測位置も示した。

4.2 CFRP 緊張材の接着前の試験結果

(1) CFRP 緊張材の設置結果 (接着前)

CFRP 緊張材の緊張時における CFRP 表面のひずみの発生状況は表-5 に示すように、8,250 から $10,200 \times 10^{-6}$ の範囲にあった。支間中央のコンクリートの発生ひずみを図-5 に示す。これより、平均応力は、上縁で 1.86 N/mm² (引張)、下縁で 3.74 N/mm² (圧縮) であり、設計値に比べて上縁および下縁側で約 9% 大きい、これは実緊張力が 210kN で約 5% 大きく、実偏心量も設計値に比べて約 10% 程度大きかったことに起因していると考えら

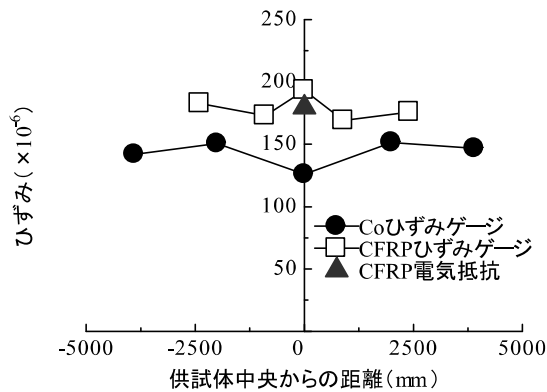


図-7 PC 鋼棒解放後のひずみ分布 (接着前)

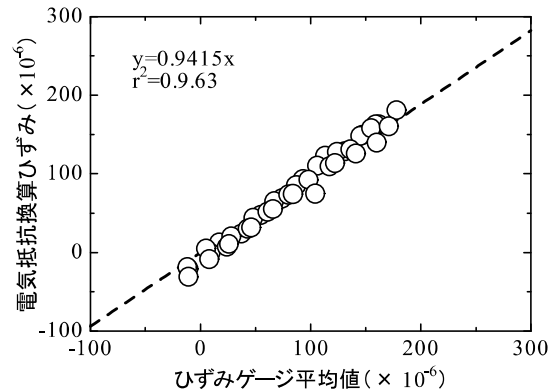


図-8 ひずみゲージによるひずみと電気抵抗ひずみ関係 (CFRP 緊張材接着前)

れ、特異な性状ではなかったと考えられる。

(2) PC 鋼棒緊張力の解放・再緊張試験結果 (接着前)

PC 鋼棒緊張力解放前を 0 とした支間中央における解放後のコンクリートひずみの変化量は、図-6 に示すように上縁で -14×10^{-6} (圧縮)、下縁で 138×10^{-6} (引張)となった。供試体下面の長さ方向の各測定方法、箇所のひずみ分布を図-7 に示す。式(1)を用いて換算した電気抵抗ひずみは供試体中央にプロットした。PC 鋼棒緊張力解放に伴う CFRP 緊張材のひずみゲージで測定したひずみは、 $169 \sim 193 \times 10^{-6}$ の範囲にあった。コンクリート表面のひずみに比べ、CFRP 表面のひずみが大きくなった。これは CFRP 緊張材の接着前でコンクリート下面より下側に配置しているためと考えられる。電気抵抗換算ひずみとひずみゲージで測定した値は同等であった。電気抵抗でも同等の測定が行えるといえる。

また、図-8 に解放、再緊張中の電気抵抗換算ひずみとひずみゲージで測定したひずみの平均値の関係を示す。両ひずみの関係は、線形関係にあるといえる。CFRP 緊張材の電気抵抗測定では温度の影響を受けることが 3 章で明らかになった。今回の測定では測定開始から測定終了まで温度変化が 1.5°C あったが、3.3 節式 (1) の温度の影響を考慮した変換を用いることで、測定精度はひずみゲージと同等になると考えられる。

4.3 CFRP 緊張材接着後の試験結果

(1) CFRP 緊張材の設置結果 (接着後)

本試験は、CFRP 緊張材の実橋施工条件下での PC 鋼棒の緊張力喪失に伴う応力特性の確認を目的として実施したものであり、PC 鋼棒緊張状態下 (490kN) で炭素繊維プレートを緊張 (205kN)・接着し、所定の養生後に PC 鋼棒の緊張力の解放・再緊張を行った。なお、PC 鋼棒の緊張力の解放・再緊張は、CFRP 緊張材の接着前と同様に 2 回繰り返した。PC 鋼棒の緊張力解放に伴う支間中央におけるコンクリートひずみの変化は、図-9 に示すように上縁で -13×10^{-6} (圧縮) 下縁で 139×10^{-6} (引張)

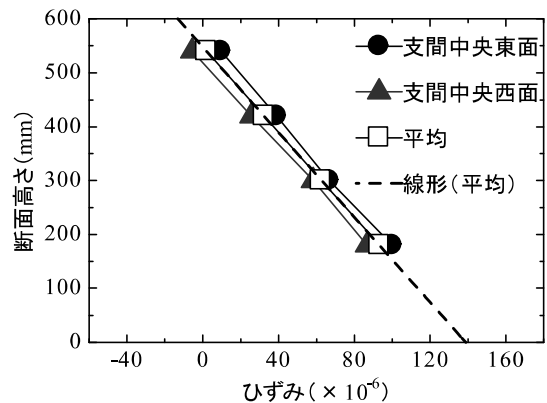


図-9 PC 鋼棒緊張解放後のコンクリートひずみ分布 (CFRP 緊張材接着後)

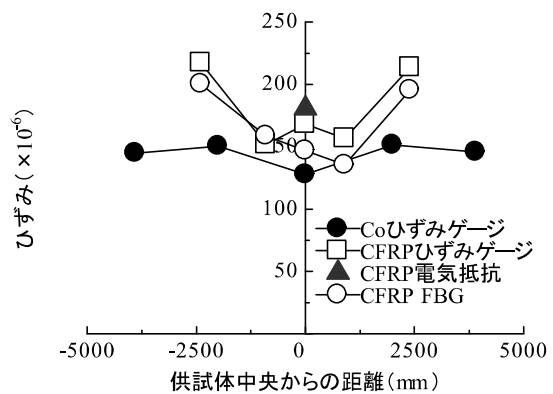


図-10 PC 鋼棒解放後のひずみ分布 (接着後)

となった。

(2) PC 鋼棒緊張力の解放・再緊張試験結果 (接着後)

接着後の PC 鋼棒の緊張力解放に伴う供試体下面の長さ方向の各測定方法、箇所のひずみ分布を図-10 に示す。ひずみゲージで測定した CFRP 緊張材の PC 鋼棒緊張力解放前後のひずみ差は $152 \sim 217 \times 10^{-6}$ の範囲にあった。CFRP 緊張材端部近傍で値が大きくなっているが、これ

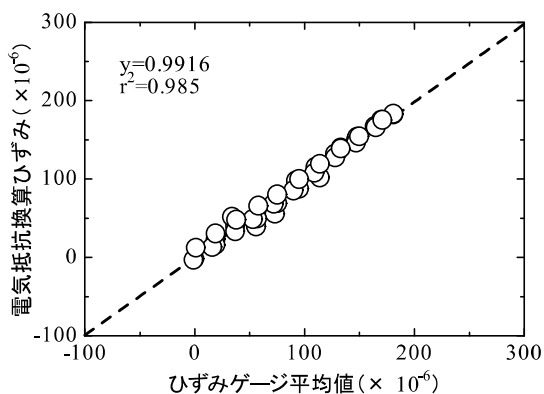


図-11 ひずみゲージによるひずみと電気抵抗換算ひずみの関係 (CFRP 緊張材接着後)

は CFRP 緊張材を接着するため偏向していることに起因すると考えられる。偏向していない支間中央側 3 点は CFRP 緊張材を接着しているため、コンクリートのひずみと同等の値を示した。CFRP 緊張材の平均ひずみは、約 180×10^{-6} であり、接着前とほぼ一致した。FBG センサーの測定結果もひずみゲージと同等のひずみを検出しており、FBG センサーもひずみゲージと同様に測定箇所の局所的なひずみを測定するのに適しているといえる。また各測定点で比較すると FBG センサーとひずみゲージのひずみの差は 10% 未満であることから、FBG センサーを適用したひずみ計測法は PC 鋼棒の緊張力の低下に伴うひずみの変化を有意的に捉えることが可能な手法であると考えられる。一方で電気抵抗換算ひずみはひずみゲージの CFRP 表面ひずみの平均値と同等であった。CFRP 緊張材全長のひずみを表しているためといえる。また、接着前と同じ結果を示し、CFRP 緊張材のコンクリートへの接着、偏向の影響は見られなかった。

電気抵抗換算ひずみとひずみゲージによるひずみの平均値の関係を図-11 に示す。CFRP 緊張材の電気抵抗換算ひずみは、接着前と同様にひずみゲージによる計測結果とほぼ線形関係にあった。CFRP 緊張材の接着前の状態での電気抵抗換算ひずみの実効性が確認されており、実構造物に適用する接着条件においても PC 鋼棒の緊張力 (490kN) の解放に伴って発生する $0 \sim 200 \times 10^{-6}$ の増加ひずみを検出することが可能であることがわかった。

5. まとめ

CFRP プレートを用いた緊張補強工法は PC 桁橋の補強工法として既に確立された工法であり、今回の試験で

は、CFRP 緊張材を補強材としてフェールセーフとして適用することに加えて、モニタリング用センサーとしての活用の可否を検討した。本検討の範囲で得られた知見を以下に示す。

- (1) CFRP 緊張材の電気抵抗は温度が低下すると抵抗が増加した。また、CFRP 緊張材の荷重 (引張力) と電気抵抗の傾きは、温度によらず一定であった。
- (2) 温度の影響を考慮したひずみを電気抵抗に換算する式を用いては供試体の PC 鋼棒緊張力の解放時に発生する CFRP 緊張材のひずみを算出した結果、ひずみゲージで測定した平均ひずみと線形の関係を得た。このことから CFRP 緊張材は電気抵抗の変化を検出して実効性のあるひずみセンサーとして適用できると考える。
- (3) FBG センサーによるひずみ測定もひずみゲージを用いた測定結果と同等の精度で測定可能であることがわかった。
- (4) PC 桁の内部緊張材の張力が低下すると、桁の外側に設置した CFRP 緊張材の張力が増加し、CFRP プレートのひずみの増加は CFRP プレートの電気抵抗の変化、FBG センサーのいずれでも検知することが可能であった。

以上より、CFRP 緊張材が PC 桁の内部緊張材の破断に対するモニタリング用のセンサーとして適用できる可能性が示唆された。

参考文献

- 1) プレストレストコンクリート工学会：既設ポストテンション橋の PC 鋼材調査および補修・補強指針，2016.9
- 2) プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC 構造物の維持保全 -PC 橋の予防保全に向けて-，2010.3
- 3) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：設計要領第二集橋梁保全編，2016.8
- 4) 武藤範雄，柳田博明，宮山 勝，中辻照幸，杉田 稔，大塚 靖：CFGFRP 複合材料の電気抵抗測定による破壊予知，日本複合材料学会誌，18，4，pp.144-150，1992
- 5) 小曲一臣，轟 章，島村佳伸，小林英男：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