

# 論文 FRP を用いたひび割れセンサの開発に関する実験的研究

平石 陽一\*1・堀本 歴\*2・小出 宜央\*3・大垣 賀津雄\*4

**要旨:** 本研究では、コンクリート部材に生じたひび割れを跨ぐように FRP 製プレート貼付け、ひび割れの拡大に伴って FRP 製プレートが変色することにより、ひび割れの拡大を際立たせ、比較的離れた場所からでも目視による検知を可能とする、ひび割れセンサの開発可能性について検討した。その結果、比較的簡易に施工が可能であり、1mm 程度のひび割れが 2mm~6mm 程度に進展する過程を検知するひび割れセンサの可能性を見出した。

**キーワード:** コンクリート、ひび割れ幅、FRP、点検、診断、センサ

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート部材（以下 RC 部材）に生じたひび割れは、劣化因子の進入を加速させ耐久性を低下させる可能性がある。また既発生のひび割れの拡大は、構造物の耐力低下に誘起する場合もある。したがって、ひび割れの進展状況を把握することは、RC 部材を適切に維持管理する上で重要な点検項目の一つであると考えられる。一般的な RC 部材に生じたひび割れの検査方法としては、近接目視による検査が広く使用されている。この方法は、足場の設置が必要である他、時間および労力を費やす場合が多く、また検査結果に個人差が生じやすい等の問題がある。そのような背景からもひび割れの発生あるいは、その進展を検知する技術が多く開発されている<sup>1), 2)</sup>。それらの技術では、特殊な工事や特別な装置を必要とする場合が多い。また、計測や評価に専門の知識を有する技術者が必要となる場合もある。

著者らは、これまでに多軸繊維シートやそれを用いた繊維強化プラスチック（以下 FRP）によって、RC 部材を補強する手法について検討している<sup>3), 4), 5)</sup>。その取組みの中で多軸繊維シートの種類およびそれを包含する樹脂を適切に設定することにより、基材の力学性能をある程度コントロールできることを確認していた。また、応力の集中した箇所を外観の変化を生じさせることが出来ることも確認していた<sup>6)</sup>。

以上の背景から本研究では、コンクリート部材に生じたひび割れが進展する過程を、比較的離れた位置からでも簡易に目視検知できるセンサについて実験的に検討した。このセンサは、既発生のひび割れを跨ぐように FRP プレート貼付け、ひび割れの拡大に伴い FRP プレートが変色することにより、そのひび割れの進行度合いを検知するものである。開発するセンサの条件として、①比

較的簡易に施工できること、②1mm 程度のひび割れが 2~6mm 程度に拡大する過程を確認できること、③専門の知識を有する技術者以外でも簡易に確認できることを挙げた。

まず第 2 章では、簡便な実験的検討により、ひび割れ拡大検知の可能性および材料選定を行うことを目的として、モルタル板を用いた実験を実施した。第 3 章では、第 2 章で選定した材料をコンクリート試験体に適用し、センサの性能を確認するとともに使用材料と性能の関係を検討した。第 4 章では、ひび割れ幅の拡大による FRP 製プレートの変色状態に関して、離れた位置からでの目視観察を容易にするための検討を行った。

## 2. センサの材料選定

### 2.1 実験内容

#### (1) 供試体

実験供試体の概要および試験方法を図-1 に示す。また、センサの施工手順を図-2 に示す。実験供試体は、1mm のひび割れを有する 40×120mm（厚さ 10mm）のモルタル板に 20×50mm（厚さ 0.6mm）の FRP プレートを樹脂により貼付けて作製した。その際には、供試体毎で FRP プレートとモルタル間の付着力に違いが生じないように、下地モルタル表面の研磨および汚れの除去を行い、十分に下地を調整した後に FRP プレートを貼付けた。製造した供試体端部から引張試験機で引張力（1mm/min）を加えることにより、ひび割れ幅を拡大させた。

#### (2) 実験ケース

実験ケースを表-1 に、FRP プレートの材料特性を表-2 に示す。ひび割れの拡大に伴い、FRP プレートが伸長しその変形により変色することでひび割れセンサとしての性能を発揮させることを狙い、FRP プレートの弾

\*1 倉敷紡績（株） 技術研究所 研究員 博（工）（正会員）

\*2 倉敷紡績（株） 技術研究所 研究員 修（工）（正会員）

\*3 川崎重工業（株） 営業推進本部 市場開発部 上級専門職

\*4 川崎重工業（株） 営業推進本部 市場開発部 副部長 工博

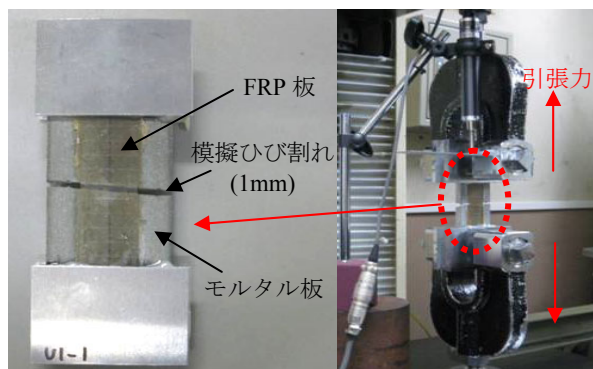


図-1 実験概要

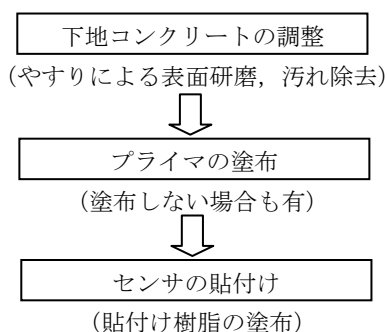


図-2 施工手順

性係数、破断伸びに着目して実験ケースを設定した。すなわち、FRP プレート用繊維基材としては、ガラス繊維を適用することとし、その繊維の配向を荷重軸方向のタイプ ( $0^\circ$  方向) および荷重軸方向に対して斜めに配向させたタイプ ( $\pm 45^\circ$ ) について検討した (図-3)。さらに、マトリックス樹脂についてもメタクリル酸メチル (以下 MMA)、不飽和ポリエステル (以下 UP) の 2 種類を用いた。マトリックス樹脂の違いは、樹脂種類の違いに着目したものではなく、FRP プレートの材料特性を制御するためのものである。すなわち、MMA を用いた

表-1 実験ケース (材料選定段階)

No.	FRP プレート		プライマ	貼付け樹脂
	構成樹脂	繊維方向		
1-1	MMA	$\pm 45^\circ$	有	MMA
1-2			無	
1-3			無	
2-1	UP	$0^\circ$	有	MMA
2-2			無	
2-3			無	
3-1	UP	$\pm 45^\circ$	有	MMA
3-2			無	
3-3			無	

表-2 FRP プレートの力学性能

No.	厚さ (mm)	FRP の力学特性		
		引張弾性率 (GPa)	引張強度 (MPa)	破断伸び (%)
1-1~3	0.6	1.8	28.2	11.3
2-1~3	0.6	19.3	355.6	2.9
3-1~3	0.5	5.9	68.3	8.6

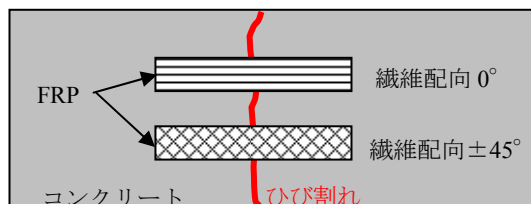


図-3 繊維配向

No.1-1~3 の FRP プレートの引張弾性率は 1.8GPa、UP を用いた No. 3-1~3 は、5.9GPa である (表-2)。

また、FRP プレートをコンクリートに接着させる際のプライマの適用有無もパラメータとした。これは、ひび割れの拡大に伴い FRP プレートがはく離することによる変色の程度を検討することを目的として、コンクリートとの付着力を変えたものである。

さらに、FRP プレートをコンクリートに接着する貼付け樹脂についても MMA およびエポキシ樹脂 (以下 EP) の 2 種類について検討した。これもマトリックス樹脂と同様に樹脂の種類でなく、樹脂の材料特性 (破断伸び) に着目したものである。すなわち、MMA の破断伸びは 60%、EP は 3% である。

## 2.2 実験結果および考察

ひび割れの拡大に伴うセンサの変色状況の例 (ひび割れ 3mm 拡大時) を図-4 に示す。No.1-2、3-2 では、ひび割れを中心としてひび割れを跨ぐ範囲で FRP プレートが変色していることが確認できる。このような目視による評価と打音検査で◎、○、△、×の 4 種類に判定した。まとめた結果を表-3 に示す。(◎: はく離, 変色ともに多い, ○: はく離, 変色ともに発生, △: はく離または変色のどちらかが発生, ×: はく離, 変色ともに発生せず)。これらの実験結果より、供試体 No.1-1、1-2、3-1、3-2 等の伸び性能の高い設計の FRP (破断伸び: 約 10%) および貼付け樹脂 (破断伸び: 60%) を使用した場合にひび割れの拡大が誇張 (変色) されやすかった。これは、変色が FRP 内部の繊維と樹脂間に生じたずれや樹脂の微細なひび割れの発生によるものであり、伸び性能の高い実験ケースでそれらが顕著に現れたためであると考えられる。一方で、FRP プレートの繊維配向がひび割れを跨いで直行する No.2-1~2-3 については、FRP 自身の剛性が高く、ひび割れ幅の拡大に対して補強材料のような挙動を示し、供試体に用いたモルタル断面の剛性に勝り、

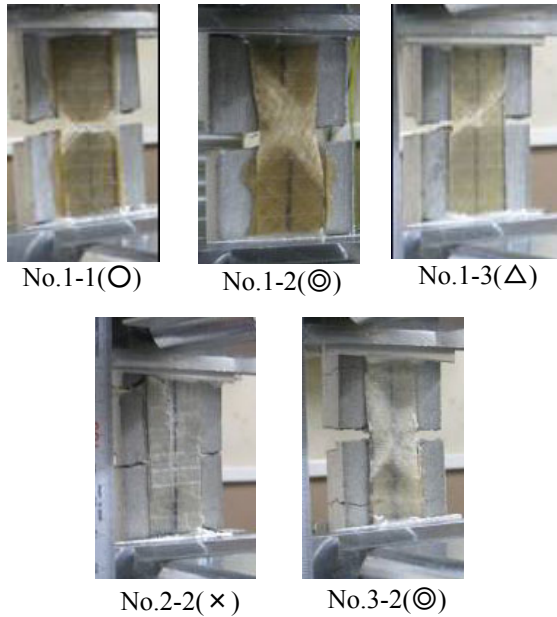


図-4 実験結果（ひび割れ 3mm 進展時）

表-3 評価（材料選定段階）

No.	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3
評価	○	◎	△	△	×	△	◎	◎	○

モルタル供試体が初期ひび割れとは別の場所で破断する結果となった。なお、今回の実験の範囲では、プライマがセンサの性能に及ぼす影響は、確認されなかった。

FRP の破断伸び、貼付け樹脂の破断伸びおよび評価結果の関係を図-5 に示す。図中のカッコ内の記号は、各点の評価結果を示している。この図からも FRP および貼付け樹脂の伸び性能が高い場合に、ひび割れの拡大を検知しやすいことが確認できる。即ち FRP の伸び性能が高い場合にひび割れの拡大を誇張しやすい傾向があり、貼付け樹脂の伸び性能よりも繊維基材の伸び性能がセンサの誇張程度に影響を及ぼしやすい可能性があると考えられる。

以上より、FRP の特性や貼付け樹脂を適切に設定することにより、FRP をはく離、変色させ、ひび割れを検知できることがわかった。

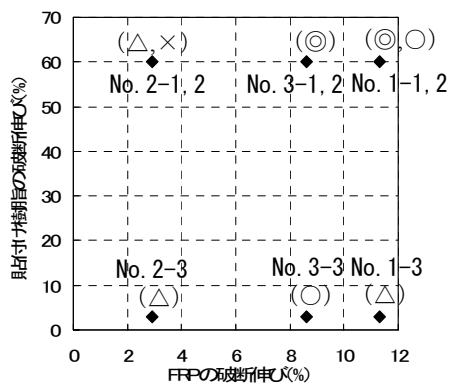


図-5 評価結果と破断伸びの関係

### 3. センサの性能評価

#### 3.1 実験内容

##### (1) 供試体

表-4 に実験供試体に使用したコンクリートの配合を示す。図-6, 7 に供試体の概要および試験の状況を示す。ひび割れの拡大は、100×100×200mm のコンクリートブロックを突合わせた両引き供試体を用いた。供試体には、引張試験機により引張力を加えるためのボルトが埋設されている。ボルトが埋設されたコンクリート片を付き合わせ、その間を 1mm に設定し、ひび割れを模擬し 40×200mm（厚さ 0.6mm）の FRP プレート（厚さ 0.6mm）を貼付けた。試験では、コンクリート 4 面のひび割れ模擬部にセンサを施工し、引張（ひび割れの拡大）に伴う、ひび割れセンサの変化を確認した（試験引張速度：0.5mm/min）。

##### (2) 実験ケース

実験ケースを表-5 に示す。第 2 章で実施したモルタルでの実験結果を踏まえて、伸び性能に優れた材料を主に選定した。なお、使用する FRP プレートの材料特性は、第 2 章に示したとおりである。

#### 3.2 実験結果および考察

##### (1) センサの性能評価

ひび割れの拡大に伴うセンサの変色状況の例（ひび割れ 2mm 拡大時）を図-8 に示す。また、評価結果のまとめを表-6 に示す。表中の評価は、第 2 章と同様にひび割れ幅の拡大に伴い生じる FRP プレートのはく離および変色に着目し、目視および打音検査により確認した。

表-4 母材コンクリートの配合

W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	Gmax (mm)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
				W	C	S	G
60	6	46	20	175	292	780	926

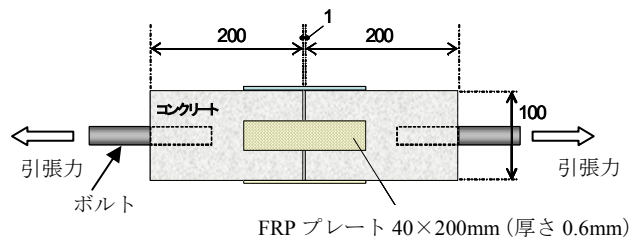


図-6 実験供試体



図-7 実験状況

表-5 実験ケース（性能評価段階）

No.	FRP プレート			プライマ	貼付け樹脂	
	構成樹脂	繊維方向	破断伸び (%)		樹脂種類	破断伸び (%)
4-1	MMA	±45°	11.3	有	MMA	60
4-2				無		
4-3				無	EP	3
5-1	UP	0°	2.9	無	MMA	60
5-2		±45°	8.6	有	MMA	
5-3				無		

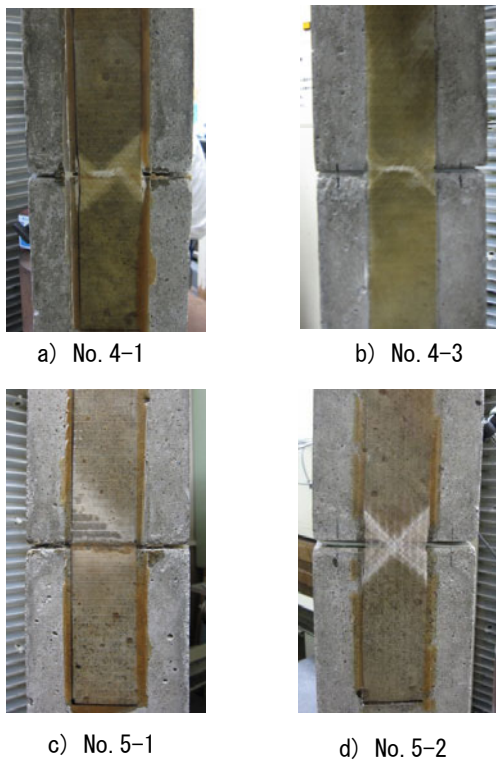


図-8 実験結果（ひび割れ2mm進展時）

表-6 評価結果（性能評価段階）

No.	4-1	4-2	4-3	5-1	5-2	5-3
評価	○	◎	×	△	◎	◎

これらの実験結果より、No.4-3、No.5-1を除く全てのケースでははく離および変色が生じ、ひび割れが検知されやすいことが確認された。この結果は、第2章のモルタル試験と同様の傾向であり、これにより伸び性能の高いFRPプレートおよび貼付け樹脂の使用が、ひび割れ拡大の誇張に有効であることが確認された。ここでNo.5-1は、はく離のみが進行する他のケースと異なる結果であった。これは、伸び性能が低く高弾性のFRPプレートを使用したことにより、FRPプレートに変色が生じる応力に到達する前に、母材コンクリートとの付着せん断力の限界に到達したためであると考えられる。

プライマの有無の検討に関して、今回の実験ケースでは、繊維基材が±45°で弾性率が小さく破断伸びが大きいケースのみを対象とした。その結果、弾性率の小さいFRPプレートを貼付けた場合は、FRPプレート自身の伸びによる変色に支配的で、はく離による変色に影響を及ぼすと考えられるプライマの有無の効果は確認されなかった。

ひび割れ幅の拡大によるFRPプレートの変色は、FRPプレート自身の変色、貼付け樹脂のはく離による変色、あるいはその両方によって生じることが確認された。今回の実験の範囲では、FRPプレートの弾性率が高い場合にははく離による変色が優先して生じ、弾性率が低い場合は、FRPプレート自身の伸びによる変色が優先して生じた。したがって、FRPプレートの弾性率およびコンクリートの付着力を適切に設定することにより、FRP自身の変色とはく離による変色の両者による変色を引き出すことができ、ひび割れの拡大を顕著に検知することができることがわかった。

(2) ひび割れ幅の拡大幅と変色面積の関係

実験ケース No.5-2 のひび割れの拡大幅と変色面積の関係を図-9に示す。この図より、ひび割れの拡大に伴い変色面積が増加することが確認できる。またその関係は、ほぼ線形関係にあり、ひび割れ幅が1mm拡大すると変色面積が約250mm<sup>2</sup>拡大することも確認できる。

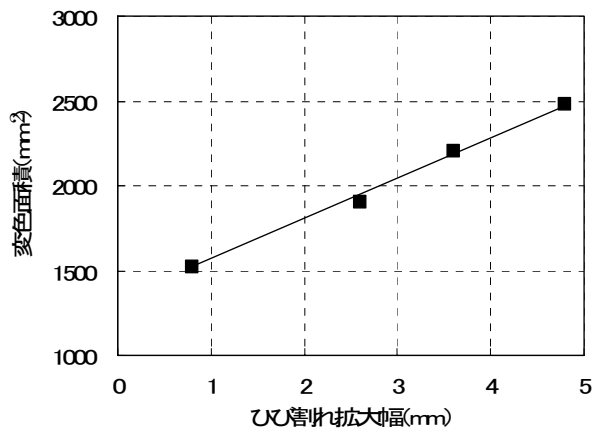


図-9 ひび割れ拡大幅と変色面積の関係

以上より、センサに生じた変色面積を測定することによりひび割れ幅を推定できる可能性があることがわかった。ただし、センサに生じる変色は、コンクリートの表面状態やセンサの施工状況により変動する可能性があり、それらの影響を考慮した適用方法の確立が今後の検討課題である。

#### 4. 誇張程度の改良

##### 4.1 実験内容

###### (1) 概要

センサを実部材に適用した際には、比較的離れた位置から点検することも想定され、視覚的に変色を際立たせることが重要であると考えられる。第2章および第3章の検討において、ほぼ無色透明なFRPプレートの変色は、コンクリートの表面（うすい灰色）に対して目立ちにくく、貼付け樹脂に茶色の半透明樹脂を適用することで比較の変色が際立つ傾向がみられた。したがって、樹脂色を変更することにより、これまで以上に変色を際立たせることができる可能性がある。

以上を踏まえて、FRP構成樹脂および貼付け樹脂を顔料により着色した際の、ひび割れ拡大時の変色状況を確認した。

###### (2) 実験ケース

実験ケースを表-7に示す。実験に使用する顔料により着色したFRPプレートを図-10に示す。なお、ベースとなるFRPセンサは第2章および第3章で良好な結果が得られた伸び性能に優れたFRPプレートを使用した（繊維：±45°，樹脂：不飽和ポリエステル，No.5-2の構成）。使用したコンクリート供試体および実験方法は、第3章と同様である。コンクリート供試体に引張力を与え、模擬ひび割れの拡大に伴う、センサの変色状況を確認した。

表-7 実験ケース（誇張段階）

No.	FRP構成樹脂	貼付け樹脂
6-1	透明	ピンク
6-2	透明	黒
6-3	ピンク	透明
6-4	黒	透明



図-10 顔料により着色したFRPプレート

#### 4.2 実験結果および考察

実験結果を図-11に示す。また、第3章で最も誇張されていた従来のセンサの変色状況は図-8 d)に示すとおりである。これらの写真より、FRPセンサを着色したNo.6-3およびNo.6-4は、従来のセンサと比較して変色が目立ちにくくなっていることが確認できる。一方、貼付け樹脂を着色したNo.6-1およびNo.6-2のケースは、従来のセンサより変色の程度がより明確に現れていることが確認できる。特に、黒色に着色した貼付け樹脂のNo.6-2のケースが変色を際立たせた。

以上より、樹脂色を変更することにより、これまで以上に変色を際立たせることができることがわかった。

#### 5. まとめ

本研究で得られた結果をまとめて、以下に示す。

- (1) コンクリートに生じたひび割れの幅が拡大する過程を誇張し、比較的離れた場所からでも目視による検知が可能となるFRPを用いたセンサの適用の可能性を見出した。このセンサは、比較的簡易に施工ができ1mm程度のひび割れが2mm～6mm程度に拡大する過程をとらえることができる特徴を有する。
- (2) FRPを用いたひび割れセンサは、FRPの構成および貼付け樹脂種類によって性能が大きく変化することがわかった。本研究の範囲では、伸び性能に優れたFRP（破断伸びが10%程度）および貼付け樹脂（破断伸びが60%程度）を使用することにより、ひび割れを検知しやすいといえる。



a) No. 6-1



b) No. 6-2



c) No. 6-3



d) No. 6-4

図-11 実験結果（ひび割れ2mm進展時）

- (3) FRP を用いた本センサのひび割れの拡大に伴い生じる変色箇所面積は、拡大するひび割れ幅とほぼ線形関係にあり、ひび割れの拡大に伴い増加することがわかった。このことから、ひび割れ幅を推定することができるといえる。
- (4) ひび割れの拡大による FRP を用いた本センサの変色状況は、センサを貼付ける樹脂の色により大きく変化することがわかった。本研究の範囲内では、黒色が誇張しやすい傾向であった。

#### 参考文献

- 1) 網野貴彦, 羽瀧貴士, 石川正顕, 小川浩二: 導電性カーボンを使用したひび割れモニタリング材料の研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1793-1798, 2003
- 2) 川端雄一郎, 徐超男, 小野大輔, 岩波光保, 李シンシュ, 上野直広, 加藤絵万: 暗視野下におけるコンクリートのひび割れ検出への応力発光センサの適用, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, pp.509-510, 2010
- 3) 堀本歴, 宮里心一, 保倉篤: 多軸繊維シートによるコンクリート部材の補強に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.343-348, 2005
- 4) 堀本歴, 星野章仁, 宮里心一, 上原子晶久: 多軸炭素繊維シートによる RC 梁のせん断補強に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.1513-1518, 2008
- 5) 大垣賀津雄, 堀本歴, 国松俊郎, 若林伸介, 大久保藤和, 中野博文: GFRP によるゴムラテックスモルタル合成鋼床版の主桁直上ひび割れ対策, 第 3 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム論文報告集, pp.113-120, 2009
- 6) 堀本歴, 星野章仁, 宮里心一, 上原子晶久: 炭素繊維と有機繊維とのハイブリッド多軸繊維シートによる RC 梁のせん断補強に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.1345-1350, 2009