

# PC 構造物のひび割れを検出する技術

## — 最大開口幅の履歴を表示する FRP 製センサー —

平石 陽一\*1・酒井 修平\*2・西岡 幹雄\*3・国枝 稔\*4

コンクリート構造物の変状を検知し、合理的な維持管理を行う際には、ひび割れの動的外力による変動の有無や、今後経時的に進展していくかを判断することが重要である。しかしながら、一般的に広く実施されている目視による点検は、点検時のひび割れ幅を測定するものであり、重車両通過などによる一時的に大きな荷重が作用した際に生じる最大のひび割れ幅は、把握しにくいと考えられる。とくに、PC 構造物においては応力状態によってひび割れが開閉する可能性が高く、最大のひび割れ幅を把握しにくいと考えられる。そこで、荷重載荷時の最大のひび割れ幅が履歴として残り、目視により簡易に確認できる FRP 製のひび割れセンサーを開発し、PC や RC の複数の実構造物に適用した。開発したセンサーは、0.2 mm 以上のひび割れの拡大およびその進展を検知できる。また、点検時にはセンサーの変色の有無を観察するだけであり、専門技術者や特別な装置を必要としない。

本稿では、FRP 製ひび割れセンサーの材料選定時の検討や実構造物への適用事例などについて報告する。

キーワード：維持管理、点検、プレストレストコンクリート、ひび割れ、センサー、FRP

### 1. はじめに

コンクリート構造物において、ひび割れの発生および進展状況を把握することは、構造物を適切に維持管理するうえで重要な点検項目の一つであると考えられる。コンクリート構造物に生じたひび割れの調査方法としては、近接目視による調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ほか、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などの問題がある。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(例えば1, 2)。しかしながらそれらの技術では、特殊な工事や特別な装置を必要とする場合が多く、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った。

PC 構造物に生じるひび割れは、耐力が著しく低下している場合などを除き、動的な一時的な荷重が作用した場合にのみ開口し、荷重が除荷された後は閉塞することが予想される。したがって、点検時に発見、測定したひび割れは、必ずしも最大の開口幅を示しているとはいえず、開口幅の履歴は、把握しにくかった。このようなひび割れの開口幅の履歴を捉えるためには、センサーやデータロガーを用いて継続的に測定する必要がある、コストなどの観点からも実現が難しい場合もある。

以上を踏まえて、簡易に施工ができ、PC 構造物の構造ひび割れの発生、およびその拡大(開口変位: 0.2 ~ 0.6 mm)を離れた場所からでも目視観察することができる FRP (Fiber Reinforced Polymer) 製のひび割れセンサー

を開発した。本稿では、FRP 製ひび割れセンサーの材料選定時の検討や実構造物への適用事例などについて報告する。

### 2. センサーの概要

写真 - 1 に FRP 製センサーを示す。センサーは、繊維シートに樹脂を含浸させた板であり、専用接着剤を用いてコンクリート表面に貼り付けて使用する。ひび割れが拡大すると、ひび割れ部を中心にひび割れの幅以上の数センチの範囲で白い変色が生じ、ひび割れの拡大を際立たせる(図 - 1)。それにより、ひび割れの拡大を離れた場所からでも目視により観察することが可能となる。この変色は、ひび割れの拡大に伴いひび割れ近傍の FRP 内の繊維に引張力が加わり、それを包含する樹脂との間にずれや微細なひび割れが引き起こされ、光の透過性が変化することにより生じるものである。また変色は、ひび割れ幅が 0.2 mm 拡大した時点で生じ、0.6 mm まで変色面積が増大してい

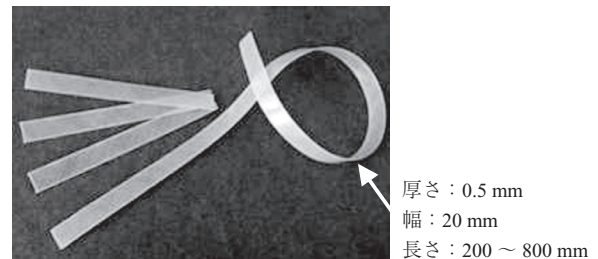


写真 - 1 センサー (FRP)

\*1 Yoichi HIRAISHI: 倉敷紡績(株) 技術研究所

\*2 Shuhei SAKAI: 中日本高速道路(株) 名古屋支社 岐阜工事事務所

\*3 Mikio NISHIOKA: 中日本高速技術マーケティング(株)

\*4 Minoru KUNIEDA: 岐阜大学 工学部 (前 名古屋大学大学院 工学研究科)

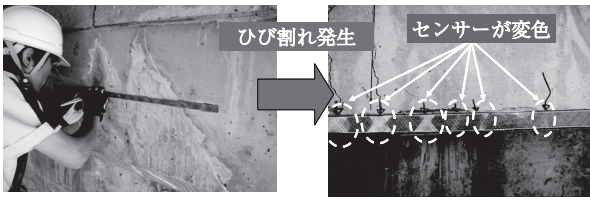


図 - 1 発生する変色

く (図 - 2)。したがって、ひび割れ幅の拡大を追跡することも可能である。また、センサーに生じる変色は不可逆であるため、ひび割れ閉塞後も最大開口幅を履歴として残すことができる特徴を有する。

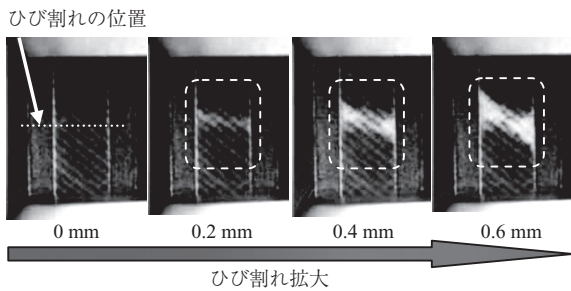


図 - 2 ひび割れの拡大に伴う変色の変化

### 3. FRP の構成材料に関する検討<sup>3)</sup>

#### 3.1 構成材料と検出性能の関係

##### (1) 実験概要

図 - 3 に供試体概要を示す。40 × 120 mm (厚さ 10 mm) のモルタル板に 20 × 120 mm の FRP 製センサーを樹脂により貼り付けて作製した。引張試験機を用いて供試体両端から引張力を加え、切欠き部に発生するひび割れの拡大に伴うセンサーの変色状況を確認した。なお、引張速度は 0.05 mm/min とした。

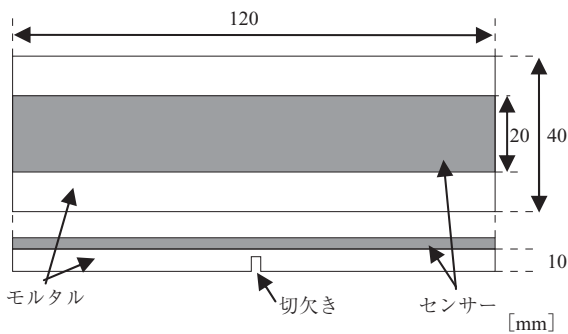


図 - 3 供試体概要

表 - 1 に実験に使用した FRP 製センサーの構成を示す。本センサーは、ひび割れの拡大に伴い伸長し、その変形により変色することで性能を発揮する。そこで、繊維種類およびマトリクス樹脂を変化させパラメトリックに検討した。なお、マトリクス樹脂は、事前に実施した予備実験を踏まえて不飽和ポリエステル (以下 UP) を用いることとした。また、FRP を構成する繊維基材は、荷重軸方向に対

表 - 1 FRP センサーの構成

No.	繊維基材			マトリクス樹脂
	種類	配向	目付け (g/m <sup>2</sup> )	種類
1	ガラス	± 45°	220	UP 低弾性
2				UP 高弾性
3	UP 低弾性			
4	UP 高弾性			
5	UP 低弾性			
6	UP 高弾性			

して繊維を斜め (+45°/-45°) に配向するように配置した。

##### (2) 実験結果および考察

センサーの評価として、センサーが変色を開始したひび割れ幅と、0.1 mm 拡大ごとの変色状況を目視により確認した。

実験結果の例として、ケース No.1, No.5 および No.6 のひび割れが 0.3 mm および 0.5 mm まで拡大した際の状況を写真 - 2 ~ 4 に示す。No.1 は、0.2 mm で変色を開始後、ひび割れ幅が 0.5 mm に達した時点でも変色箇所で大きな変化が生じていないことが確認できる。一方、No.5 では、0.2 mm で変色を開始後、ひび割れ幅が 0.3 mm に達した時点で部分的にはっきりと変色し、その後ひび割れの拡大に伴い反応面積が増大し、0.5 mm 拡大時には、広範囲にわたりはっきりと変色していることが確認できる。No.6 は、

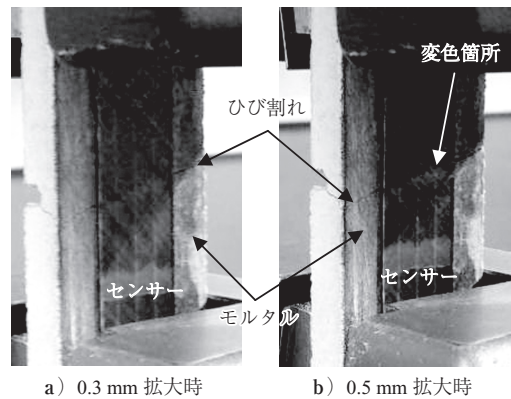


写真 - 2 センサーの変色状況 (No.1)

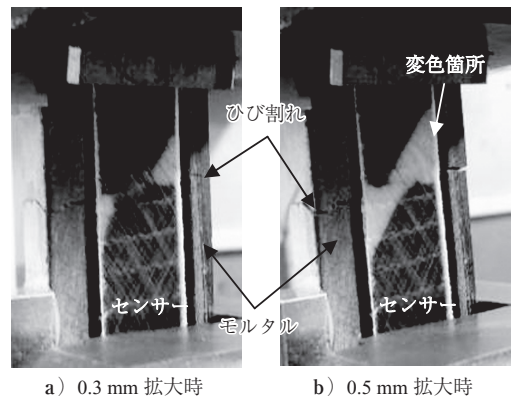


写真 - 3 センサーの変色状況 (No.5)

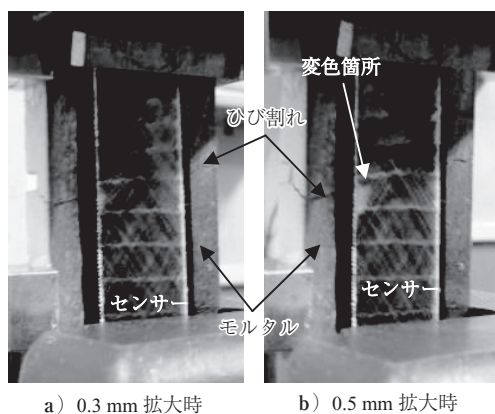


写真 - 4 センサーの変色状況 (No.6)

0.2 mm で変色を開始後、ひび割れ幅が 0.5 mm に達した時点で部分的にはっきりと変色しているものの、広範囲にわたっては変色していないことが確認できる。

実験結果のまとめ、および実験時に確認された各センサーの弾性率を表 - 2 に示す。なお、表中の変色状況の判定は、ひび割れが 0.5 mm 拡大した際のものである (◎: 広範囲ではっきり変色, ○: はっきり変色, △: 変色, ×: 変色無し)。表中の弾性率は引張試験時の荷重 - 変位曲線から算出した。算出に用いた箇所を図 - 4 に示す。弾性率は、母材モルタル破断後のセンサーが荷重を負担していると考えられる箇所から算出した (図中の点線内)。表 - 2 より、センサーが変色を開始するひび割れ幅はすべてのケースで 0.15 ~ 0.2 mm であり、今回の実験の範囲では構成材料の違いが検出感度に及ぼす影響は小さいと考えられた。また、各供試体によってモルタル板に生じるひび割

表 - 2 実験結果のまとめ

No.	実験結果		弾性率 (GPa)
	変色開始ひび割れ幅	変色状況	
1	0.2	△	13.3
2	0.2	△	15.1
3	0.2	◎	4.3
4	0.15	◎	3.1
5	0.2	◎	1.6
6	0.2	○	6.0

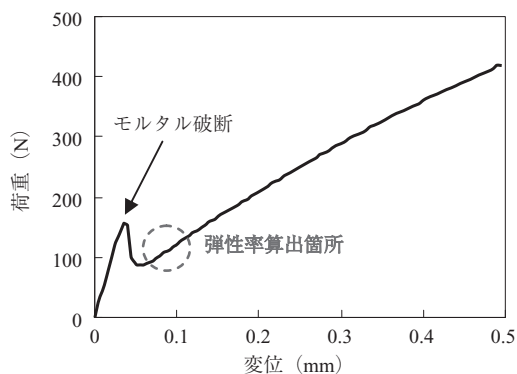


図 - 4 弾性率の算出箇所 (No.6)

れの角度に違いがあったが、それによる検出感度の変化は確認されなかった。センサーのひび割れ開口幅 0.5 mm 時における変色の状況は、ポリエチレン繊維やビニロン繊維を用いた No.3 ~ 6 で良好な反応を示し、ガラス繊維を用いた No.1 ~ 2 は、マトリクス樹脂の違いにかかわらず低い反応であった。これらは、本センサーが 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り変色するものであり、繊維種類の違いによる樹脂との付着力の違いなどが影響したためであると考えられる。また、各実験ケースの変色状況と弾性率の関係に着目すると、ここでも 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が生じやすい弾性率の低いケースで良好な反応を示していることが確認できる。

次に FRP 製センサーを構成する繊維と樹脂の割合をあらゆる繊維体積含有率が検出感度に及ぼす影響を確認するため、実験ケース No.5 (ビニロン/UP 低弾性) の繊維体積含有率を変化させた FRP センサーを製造し、変色を開始するひび割れ幅を確認した。繊維体積含有率と変色を開始するひび割れ幅の関係を図 - 5 に示す。なお、表 - 1 の No.5 は繊維体積含有率 = 45 % のものである。この図より、同一の材料構成であれば繊維体積含有率が高くなるほど、微細なひび割れで変色する傾向にあることが確認できる。センサーに生じる変色は、FRP が弾性域から非弾性域に移行する際に開始するものであり、繊維体積含有率が高いほど非弾性域に移行する変形量が小さいため、このような傾向になったと考えられる。

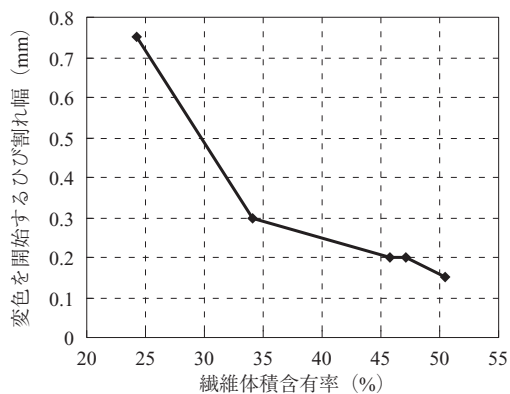


図 - 5 繊維体積含有率と検知感度の関係

検討するセンサーの条件として挙げていた 0.2 mm のひび割れを検出するためには、繊維体積含有率 = 45 % 以上とする必要があることがわかった。

### 3.2 センサーの速度依存性

車両通行などによる動的な荷重が作用する環境下では、ひび割れが一時的に開閉することが確認されている<sup>4)</sup>。したがってセンサーには、一時的に高速で開閉するひび割れ幅を検出する能力が求められる。以上を踏まえて、PC 橋にて確認されているひび割れ開閉速度下でのセンサーの検出能力を確認した。

#### (1) 実験概要

実験ケースは、3.1 節で良好な反応を示した No.3 ~ 6



のセンサーとした。

供試体および試験方法は、3.1節と同様である。試験速度は既往の文献4)を参考にし、120 mm/min (以下高速と呼ぶ)とした。これは、道路橋床版でのひび割れで実際に生じる可能性がある程度 ( $\pm 0.5$  mm, 2 Hz) である。試験では、ひび割れ幅が0.5 mm 拡大するまで引張力を加えた。また、比較のために試験速度を0.05 mm/min (以下低速と呼ぶ)の供試体も作製した。

(2) 実験結果

高速または低速の引張力を加えた際のセンサーの変色状況の例を写真-5に示す。すべての実験ケースにおいて、速度の違いによると考えられる変色の違いは、確認されなかった。これより、今回実施したケースの材料の組合せでは、センサーの能力に速度依存性がないものと考えられた。

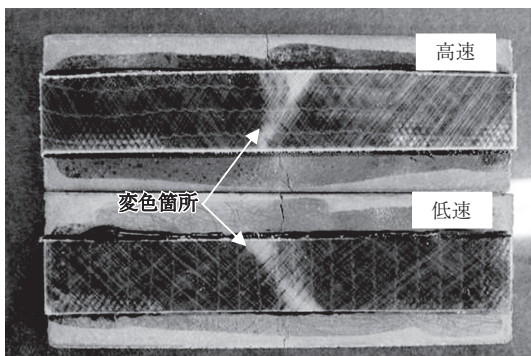


写真-5 変色状況の例 (No.5, ひび割れ幅: 0.5 mm)

3.3 センサーの耐久性

屋外環境で適用するセンサーには、高い耐久性が求められる。センサーの耐久性を確認するため、促進耐候性試験および温冷繰返し試験を実施した。

(1) 促進耐候性試験

試験には、JIS B 7753 に示されるサンシャインウェザーメーター試験機を用いた。JSCE-K 511-2010 に準じて、波長300-700 nmの光を3000時間連続照射し、センサーの外観および性能の変化を確認した。なお光の照射中は、102分経過毎に18分間の水の噴霧が実施されている。また、試験機内の温湿度は、水が噴霧されていない時に、ブラックパネルが63 ± 3℃, 50% RHとなるよう制御されている。なお、サンシャインウェザーメーター試験機による3000時間の暴露は、一般的な屋外環境で5年以上に相当すると考えられている<sup>5,6)</sup>。実験ケースを表-3に示す。

実験ケースは、3.1節および3.2節の結果を踏まえて、表-1のNo.3~6とし、耐候性塗料の有無の影響を確認した。使用した耐候性塗料の仕様などを表-4に示す。耐候性塗料は、あらかじめ規定した量をハケにより塗布した。また耐候性塗料塗布後は、規定の時間養生を行なった。外観変化の例として、3000時間暴露後のNo.5の状況を写真-6に示す。この写真より耐候性塗料を塗布していないケースでは、劣化が進行し白化が生じていることが確認できる。一方耐候性塗料を塗布したケースでは、劣化による変色は確認されなかった。これらは、すべてのケー

表-3 実験ケース

No.	繊維基材	マトリクス樹脂	耐候性塗料
3-1	ポリエチレン	UP 低弾性	有
-2			無
4-1		UP 高弾性	有
-2			無
5-1	ビニロン	UP 低弾性	有
-2			無
6-1		UP 高弾性	有
-2			無

表-4 耐候性塗料の仕様等

塗料	規定塗布量 (g/m <sup>2</sup> )	塗布厚 (μm)	塗布後養生時間 [20℃] (min)
アクリル系	220	10	20

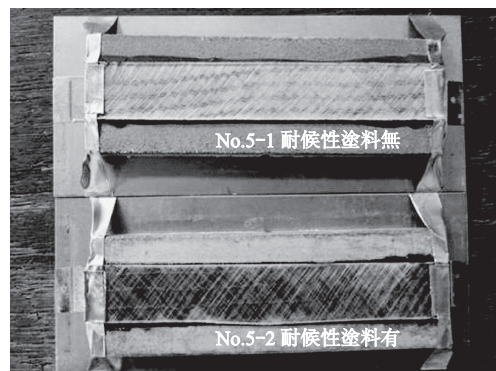


写真-6 外観変化の例 (No.5)

スにおいて同様の傾向であった。

次に外観変化が生じなかった、耐候性塗料を塗布したケースのセンサーの性能を確認するため、3.1節で実施した引張試験を実施した。実験結果の例として、0.5 mmまでひび割れを拡大した際のNo.5の状況を写真-7に示す。この写真より、0.5 mmのひび割れの拡大により、広範囲にわたりはっきりと変色しており、促進試験後のセンサーの性能に変化が無いことが確認できる。

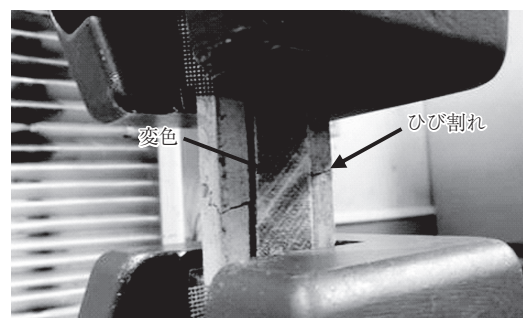


写真-7 性能確認結果の例 (No.5)

以上より、耐候性塗料を塗布することにより、3000時間の促進試験後も検知性能を有していることがわかった。

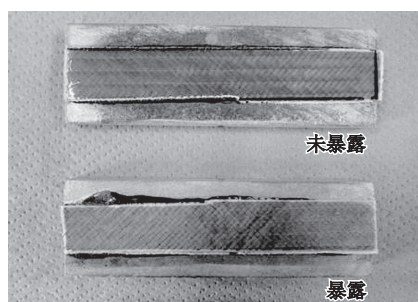
(2) 温冷繰返し試験



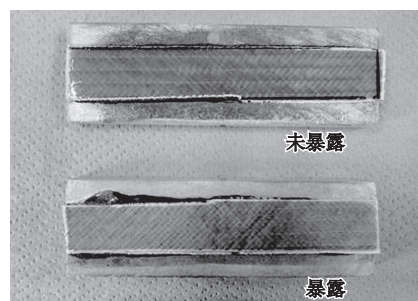
水に接する環境や温冷繰り返し環境下でのセンサーの耐久性を確認するため、NEXCO 試験法 425-2004（はく落防止の耐久性試験方法）を参考にし、温冷繰り返し試験を実施した<sup>7)</sup>。

供試体は、3.1～3.3と同様である。実験ケースは、3.1～3.3の結果を踏まえ、耐候性塗料を塗布した表-3のNo.4-1とNo.5-1の2種類とした。作製した供試体は、-30℃の恒温器中で3時間冷却し、次いで60℃の温水中で3時間負荷を与えた後に、20℃気中で18時間保持し、この24時間を1サイクルとする操作を30サイクル繰り返した。

30サイクル後のセンサーの状況を写真-8に示す。なお写真中には、比較のため未暴露品も示した。実験結果より、ポリエチレンを用いたNo.4-1において白化が生じていることが確認できる。これは、ポリエチレンの線膨張係数がマイナスであり、-30℃冷却時にマトリクス樹脂間でひずみが生じ、センサーに変色が生じたためであると考えられる。なお、ビニロンを用いたNo.5-1では、白色化などの変化は確認されなかった。



a) No.4-1 (ポリエチレン)



b) No.5-1 (ビニロン)

写真-8 30サイクル後の状況

以上より、繊維基材にビニロン、マトリクス樹脂にUP低弾性を用いた材料構成のセンサーに耐候性塗料を塗布した仕様が高い耐久性を有することがわかった。

#### 4. PC および RC はり供試体を用いた検証<sup>3)</sup>

センサーをはりの曲げひび割れ部に適用した際の性能を確認するため、PC はり供試体での検証を行った。また、比較のため、RC はり供試体も準備し、同様の試験を実施した。さらに、屋外暴露後の性能の変化も確認するため、同様のPC はり供試体を愛知県名古屋市に所在する名古屋大学の構内にて1年間暴露し、性能の変化も確認した。なお、適用するセンサーは、3章の結果を踏まえNo.5とし

た。

#### 4.1 実験概要

実験の状況を写真-9に示す。センサーの貼付け位置を図-6に示す。100×200×1800mmのRC(D10を2本配置)およびPC(φ13)はり供試体を用いた。センサーは、供試体の引張が生じる下縁側に施工し、2点荷重(スパン:1400mm, 等曲げ幅:300mm, 変位制御:0.05mm/min)によりひび割れ幅を拡大させ、ひび割れ幅0.1mm拡大ごとにセンサーの反応状況を確認した。なお、RC はりは、ひび割れ幅が3mm拡大するまで荷重し、PC はりは0.6mm拡大するまで荷重した。供試体下面3箇所にπ型変位計を取り付けてひび割れ開口幅をモニタリングした。実験ケースを表-5に示す。実験ケースA、CおよびDは、健全な状態のはりにセンサーを貼付けて、荷重によるひび割れの発生および拡大を検知する検証とした。実験ケースBは、あらかじめひび割れを導入し、ひび割れの有る部位にセンサーを貼付けて荷重によるひび割れの拡大を検知する検証とした。なお、実験ケースBで導入したひび割れは、除荷後の残留開口幅が0.16mmであった。

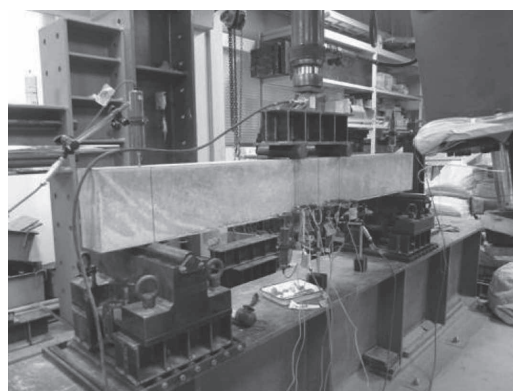


写真-9 実験の状況

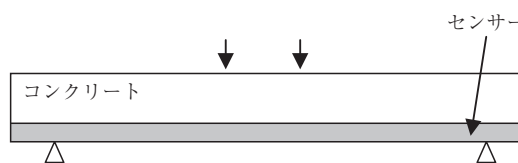


図-6 センサーの貼付け位置

表-5 実験ケース

記号	供試体	仕様
A	RC	ひび割れ無
B	PC	ひび割れ有
C		ひび割れ無
D		屋外暴露

#### 4.2 実験結果

##### (1) RC 供試体

実験ケースAのひび割れが0.2mmおよび0.5mmまで拡大した際のセンサーの状況を写真-10に示す。この写

真より、ひび割れが0.2 mm 拡大した際に変色を開始し、0.5 mm 拡大時に広い範囲ではっきりと変色していることが確認できる。

次に実験ケース A の最大のひび割れ幅が 3 mm まで拡大

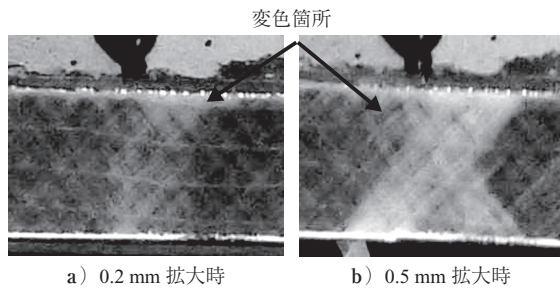


写真 - 10 ケース A の変色状況

した際のセンサーの反応状況を写真 - 11 に示す。この写真より、複数生じたひび割れに対して、ひび割れ開口幅に応じた変色を示し、発生したすべてのひび割れを検出していることが確認できる。

(2) PC 供試体

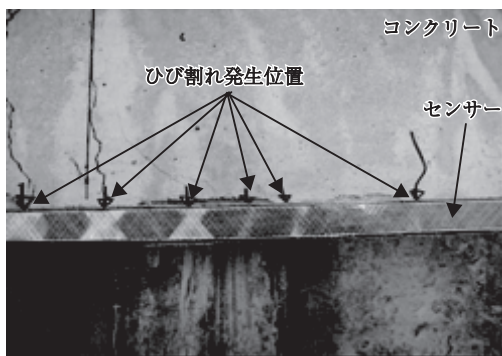


写真 - 11 ケース A の変色状況（最大開口幅 3 mm 時）

実験ケース B および C のひび割れが 0.2 mm および 0.5 mm まで拡大した際の変色の状況を写真 - 12, 13 に示す。この写真より、施工時のひび割れの有無にかかわらず、ひび割れが 0.2 mm 拡大した際に変色を開始し、0.5 mm 拡大時に広い範囲ではっきりと変色していることが確認できる。次に実験ケース C でひび割れを 0.5 mm まで拡大させた後に除荷し、ひび割れが 0.02 mm まで閉塞した際のセンサーの状況を写真 - 14 に示す。この写真より、ひび割れ閉塞後も最大開口幅に応じて生じた変色を履歴として残していることが確認できる。

(3) PC 屋外暴露供試体

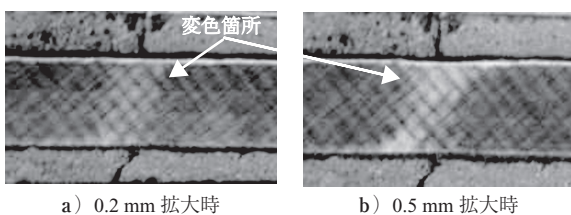


写真 - 12 ケース B の変色状況（ひび割れ有）

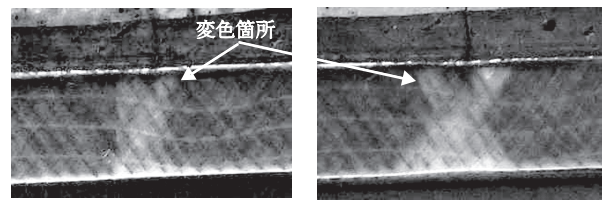


写真 - 13 ケース C の変色状況（ひび割れ無）

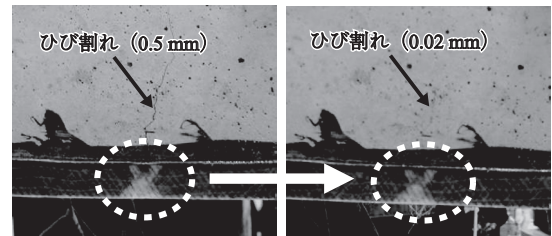


写真 - 14 ひび割れが拡大した履歴

実験ケース D のひび割れが 0.2 mm および 0.5 mm まで拡大した際の変色の状況を写真 - 15 に示す。この写真より、ひび割れが 0.2 mm 拡大した際に変色を開始し、0.5 mm 拡大時に広い範囲ではっきりと変色していることが確認でき、屋外暴露による性能の低下が無いことが確認できる。

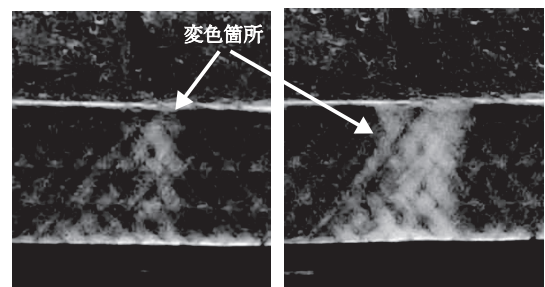


写真 - 15 ケース D の変色状況（屋外暴露）

5. 実構造物への適用 B)

表 - 6 に適用実績の例を示す。これまでに複数の構造物へ適用している。適用の目的は、構造物によって異なり PC 構造物の維持管理や RC 構造物の品質管理などがある。

表 - 6 適用実績

構造物			適用目的
構造	管理者	分類	
PC	高速道路	既設	構造ひび割れの観察
			補修・補強後の観察
RC	地方自治体	新設	構造ひび割れの観察
	高速道路		ASR ひび割れの観察
			供用開始後の観察
			建設中の品質管理

※その他、十数箇所の構造物に施工



本章では、代表的な事例を紹介する。

### 5.1 PC (PRC, PC 外ケーブル補強) 構造物への適用

#### (1) PRC 構造物に生じた構造ひび割れのモニタリング

図 - 7 にセンサーの適用状況を示す。橋梁の箱桁内の RC 部材である鉛直リブや鋼とコンクリートの接合部周辺のウェブに発生したひび割れのモニタリングのためにセンサーが適用された。なお、施工後のセンサーは定期的にモニタリングされており、センサーが明確に検出する 0.2 mm 以上のひび割れの拡大は確認されていない。

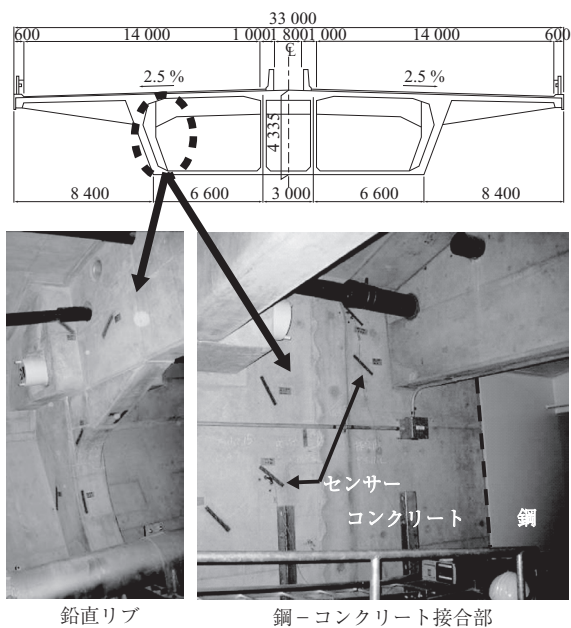


図 - 7 センサーの適用状況【5.1(1)】

#### (2) PC 外ケーブル補強された構造物のモニタリング

写真 - 16 にセンサーの適用状況を示す。適用した構造物は、橋梁であり冬期の凍結防止剤の散布などによる影響から鉄筋腐食が生じていたため、断面修復、電気防食、および外ケーブルを用いた補強が施されている。それらの補修・補強効果が維持されていることを確認するための一つの指標としてひび割れの開閉口が着目され、センサーが適用された。適用部位は、桁支間中央の下面やウェブ、外ケーブル定着部周辺などである。なお、施工後のセンサーは定期的にモニタリングされており、センサーが明確に検出する 0.2 mm 以上のひび割れの拡大は確認されていない。

### 5.2 RC 構造物への適用

#### (1) ASR により生じたひび割れのモニタリング

写真 - 17 にセンサーの適用状況を示す。橋梁の橋脚において、ASR (アルカリシリカ反応) が主要原因と推定されるひび割れにセンサーが適用された。センサー適用後は、ひび割れの拡大をモニタリングし、残存膨張の有無を判定する一つの指標として使用される。センサーを適用する際は、ひび割れ周辺に析出した ASR ゲルを研磨により除去し、その後施工した。亀甲状に複数のひび割れが発生していたことから、広範囲の変状を把握できるように、長尺のセンサーを複数のひび割れを跨ぐように施工した。なお、施

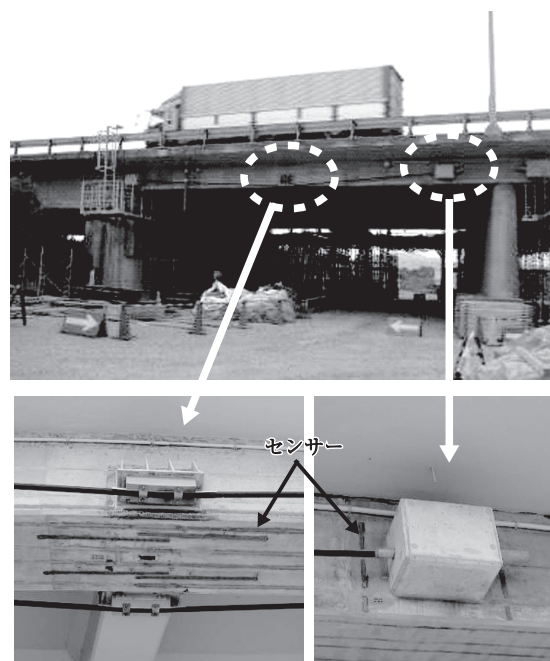
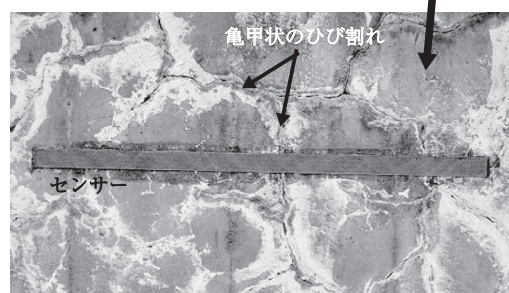


写真 - 16 センサーの適用状況【5.1(2)】



写真 - 17 ASR への適用【5.2(1)】



工後のセンサーは定期的にモニタリングされており、センサーが明確に検出する 0.2 mm 以上のひび割れの拡大は確認されていない。

#### (2) 供用開始後に発生するひび割れのモニタリング

写真 - 18 にセンサーの適用状況を示す。適用した構造物は、建設中の橋梁である。供用開始後に車両荷重などが作用した際のひび割れの発生を把握するためにセンサーが適用された。適用された箇所は、ストラット部材 (圧縮力が作用する部材) を支える基部などであった。なお、供用開始前でありひび割れの発生は確認されていない。

#### (3) 建設中に発生するひび割れのモニタリング

写真 - 19 にセンサーの適用状況を示す。建設中の橋梁のコンクリート床版に発生が懸念されるひび割れを検知す



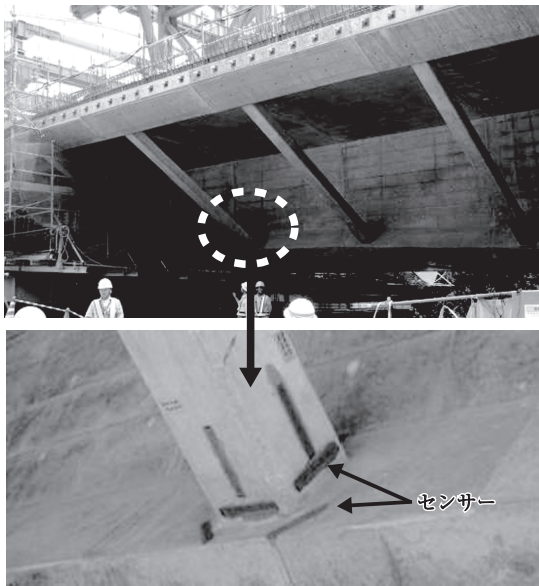


写真 - 18 センサーの適用状況【5.2(2)】

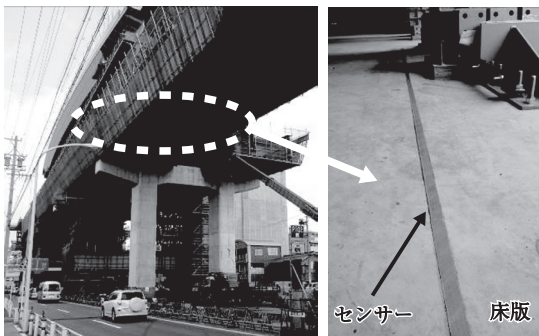


写真 - 19 センサーの適用状況【5.2(3)】

るためにセンサーが適用された。この橋梁では、施工上の制約から先行して打設されたコンクリート床版上にて、重量物が移動することが決定していた。重量物の移動に伴い、曲げモーメントが作用し、コンクリート床版にひび割れが発生する可能性があった。事前の検討により、有害とされる幅のひび割れの発生には至らないと判断されたが、発生した場合にでも迅速に対策が施せるよう、ひび割れの管理のために約 50 m のセンサーが適用された。なお、この工事ではすでに重量物の移動を終えており、センサーを用いて有害なひび割れが発生しなかったことが速やかに判断できたことから、工事の次工程に進んでいるとのことであった。

## 6. ま と め

本稿では、簡易に施工ができ、PC をはじめとするコンクリート部材のひび割れの発生、およびその拡大を離れた場所から目視観察することができる FRP 製のひび割れセンサーの構成材料に関する検討や実構造物への適用事例を紹介した。得られた結果などをまとめ、以下に示す。

- (1) FRP の構成を適切に設定することにより、ひび割れ幅が 0.2 mm 拡大した時点で変色し、0.6 mm までのひび割

れ幅の拡大を追跡できるセンサーを設計できることが確認された。

- (2) FRP を構成する繊維基材の体積含有率は、変色を開始する感度に影響を及ぼすことが確認された。すなわち、体積含有率が高いほど検出感度を高め、0.2 mm のひび割れを検出するためには、45 % 以上とする必要があることが確認された。
- (3) 本センサーは、PC 橋にて確認されている程度の一時的な速いひび割れの拡大でも、ひび割れの拡大が遅い場合と同様の反応を示し、速度依存性が無いことが確認された。また、PC はり供試体を用いた検証により、ひび割れが閉塞してもひび割れの最大開口幅を履歴として残すことができることも確認された。
- (4) 促進耐候性試験および温冷繰返し試験の結果から、本センサーに耐候性塗料を塗布することにより、一般的な屋外環境下にて 5 年以上耐えうる耐久性を有することが確認された。
- (5) 複数の実構造物への適用により、さまざまなコンクリート構造物に適用でき、また施工性に問題が無いことが確認された。

本稿で紹介したセンサーは、名古屋大学、NEXCO 中日本、川崎重工業、および倉敷紡績が共同で開発したものである。元 NEXCO 中日本（現 中日本高速技術マーケティング）上東氏、川崎重工業小出氏をはじめ開発関係者各位には、多大なるご尽力をいただいた。ここに記し、謝意を表す。

## 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, 小野大輔, 李シンシュ, 川崎悦子, 岩波光保, 加藤絵万, 上野直広, 徐 超男: 応力発光センサによる暗視野下におけるコンクリートのひび割れ検出に関する基礎的研究, 土木学会論文集, Vol.67, No.3, pp.430-435, 2011
- 3) 平石陽一, 酒井修平, 小出宜央, 堀本 歴, 国枝 稔: ひび割れの最大開口幅履歴を表示するセンサの感度評価に関する研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.12, pp.127-134, 2012
- 4) 国枝 稔, 撫養啓祐, 中村 光: 表面被覆材のひび割れ追従性評価のための動的ひび割れ幅変動の計測, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1573-1578, 2005
- 5) 竹内博幸, 和田高清, 中村 充, 中川輝雄: 外壁用塗料の耐候性能評価に関する研究その 28, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1229-1230, 1994
- 6) 渡邊康則, 加藤完二, 矢野瑞穂, 三浦勇雄: 外壁用塗料の耐候性能評価に関する研究その 23, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1219-1220, 1994
- 7) 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: NEXCO 試験方法 第 4 編構造関係試験方法, pp.46-47, 2011
- 8) 平石陽一: コンクリート部材のひび割れを検出する技術, 土木技術, Vol.68, No.5, pp.38-43, 2013

【2013 年 11 月 5 日受付】