

# 報告 導電材料を用いたひびわれ検知システムの開発

橋 直毅<sup>\*1</sup>・仲山 貴司<sup>\*1</sup>・千葉 卓也<sup>\*2</sup>・西村 司<sup>\*3</sup>

**要旨:** コンクリート面に発生するひびわれを簡易に、自動的に検知するコンクリートのひびわれ検知システムを開発した。この方法は、導電材料を用いる方法であり、コンクリート表面に貼り付け、コンクリートにひびわれが入ると同時に破断され、電気を通さなくなることを利用してひびわれを検知する手法である。本稿では、導電材料を用いたひびわれ検知システムの基礎性能および耐久性能、コンクリート構造物への適用事例を報告する。

**キーワード:** ひびわれ, モニタリング, 導電材料

## 1. はじめに

コンクリート構造物に生じるひびわれは、構造物の耐力・耐久性などの諸性能を低下させる大きな要因の一つとされる。したがって、構造物を維持し、管理してゆく上で、ひびわれの進展状況を知ることは極めて重要である。

一般に、ひびわれの検査方法は、目視が主体で、非常に時間と労力を伴い、見落とされやすい。また、検査者個人の感覚のばらつきにより、健全度結果に差異を生じることも多いといわれる。一方、鉄道構造物等の検査において、全般検査<sup>1)</sup>は2年周期が基本であるが、変状が生じて性能が低下した場合、変状の進行性を細かく経時観測することが必要な場合がある。また、施

工の影響により近接構造物に有害な影響を与えることが考えられる場合、施工中において隣接構造物の変状を常時監視することが必要である。

これらの課題や要求に対して、確実に、簡易に、かつリアルタイムに、コンクリート表面に進行するひびわれを監視するひびわれ検知システムを開発してきた。

本稿においては、ひびわれ検知システムの基本性能、耐久性および供用中のコンクリート構造物（鉄道トンネル）への適用事例についてとりまとめた。

## 2. ひびわれ検知システムの原理

ひびわれ検知システムの原理を図-1に示す。

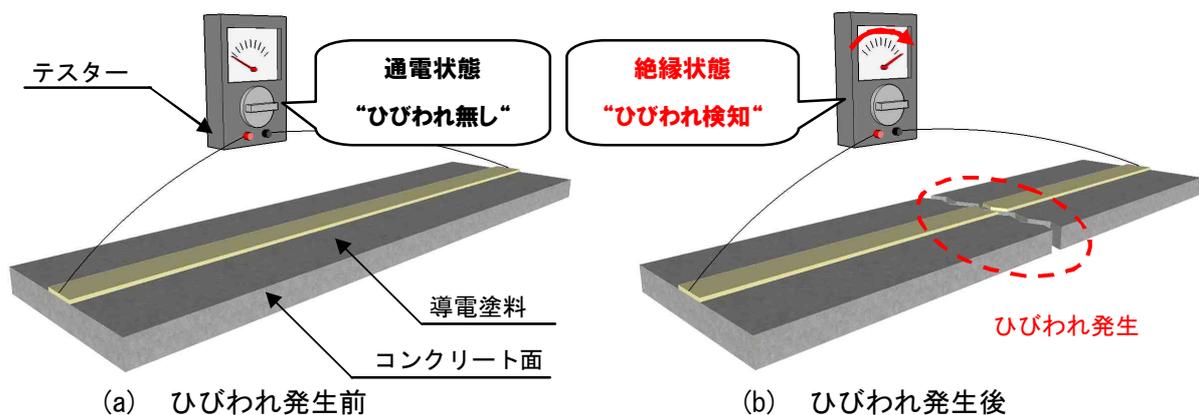
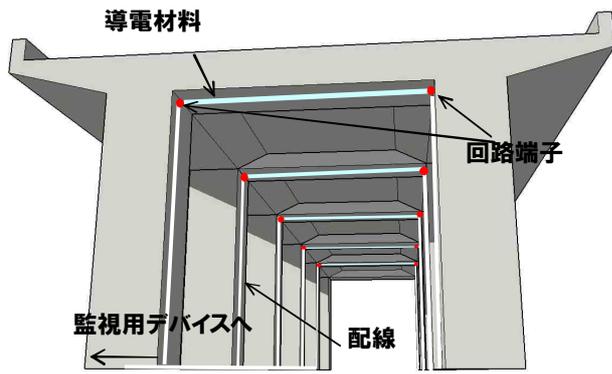


図-1 ひびわれ検知システムの原理

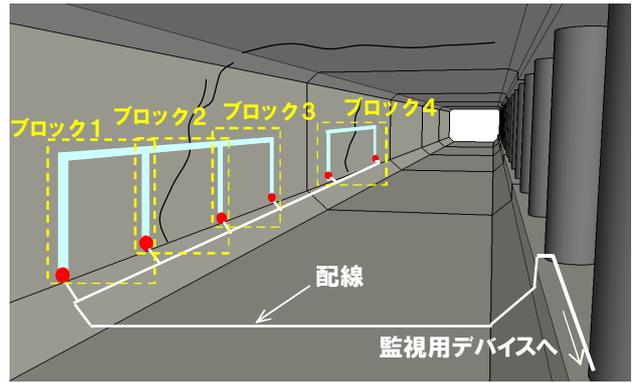
\*1 財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 トンネル 研究員 (正会員)

\*2 株式会社横河技術情報 M&S部 技術グループ (非会員)

\*3 藤倉化成株式会社 開発研究所 電子材料事業部 技術部 (非会員)



(a) 高架橋ラーメンへの適用例



(b) 開削トンネルく体への適用例

図-2 ひびわれ検知システムの適用パターン例

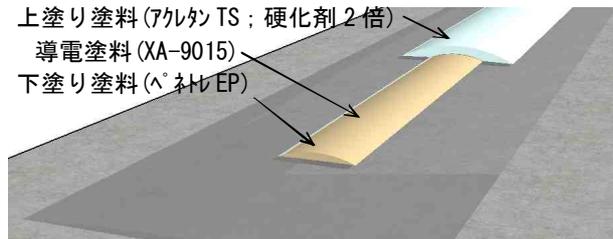


図-3 導電塗料の構造

コンクリート表面に導電性を有する塗料（以下、導電塗料）を帯状に塗布し、両端に電圧をかけると、導電塗料は抵抗値が低いために電流が流れる（図-1(a)）。一方、導電塗料を塗布した箇所において、コンクリート表面にひびわれが発生すると、導電塗料もひびわれ箇所でも破断され、抵抗値が無大となり、電気が流れなくなる（図-1(b)）。さらに、回路の抵抗値をリアルタイムに測定することにより、コンクリート面に生じるひびわれを監視することができる。

コンクリート構造物においてひびわれ検知システムを導入する場合、ひびわれの進展を監視したい面に対し、図-2に示すようなパターンを回路を描き、各回路の端子に対して通電センサーに接続させ、そのセンサーから抵抗値の信号を監視用デバイスに伝送することによりリアルタイム監視が可能になる。また、検知したい面が広範囲であれば、図-2(b)に示すように、回路を細かい複数のブロックに分割し、各回路に通電センサーを取り付けることにより、ひびわれが発生する位置をブロック単位で特定することが可能である。

表-1 導電塗料の材料選定

	導電性 フィラー	抵抗値 [Ω/cm]	下塗との 密着性	上塗との 密着性
XA-9015	Ag	10 <sup>-5</sup>	○	○
FE-107	Ag-Cu	10 <sup>-4</sup>	△	○
FN-101	Ni	10 <sup>-3</sup>	×	○
XC-12	C	10 <sup>-2</sup>	○	○

表-2 下塗り塗料の材料選定

	成分	母材との 密着性	導電塗料 との密着性	絶縁性
ペネトレEP	エポキシ	○	○	○
セラミオン プライマ	エポキシ	○	×	○
アクリル TS	アクリル	○	×	○
トンクリート プライマ	塩化ビニル	×	×	○

表-3 上塗り塗料の材料選定

	成分	下塗との 密着性	切れ易さ	防水性
アクリル TS	アクリル	○	△	○
アクリル TS 硬化剤 2倍	アクリル	○	○	○
メタラック C	アクリル	×	—	○
セラミオン HB	アクリルシリコン	○	△	○

### 3. 導電塗料の塗装構造

本システムは、導電塗料のひびわれ発生前後の抵抗値から、ひびわれの発生を判定するために、導電塗料の抵抗値とひび割れ発生後の抵抗値（絶縁抵抗値）に明確な差が存在する必要がある。また、この導電塗料の性質を現場におい

て長期にわたって維持するためには、導電塗料を温度や湿度等の環境条件等の外的な影響を遮断させる上塗り塗料、通電性を有するコンクリート表面と導電塗料の絶縁状態を維持し、コンクリート面に付着させる下塗り塗料（絶縁塗料）の3層構造とするのが望ましいものとした（図-3参照）。

導電塗料の素材としては、表-1に示すように、銅、ニッケル、カーボン、銀の4種類、上塗り塗料の素材を表-2に示すような4種類、下塗り塗料の素材として表-3に示すような4種類を候補として挙げた。上塗り塗料、導電塗料、下塗り塗料は、付着試験、抵抗値測定および耐水試験を試行錯誤的に行い、上塗り塗料にはアクリル樹脂が主成分のアクレタン TS(硬化剤2倍)、導電塗料には銀が主成分のXA-9015、下塗り塗料(絶縁塗料)にはエポキシ樹脂が主成分のペネトレEPに選定した。

#### 4. 基礎性能試験

##### 4.1 検知感度

本システムは、ひびわれの進展の有無を「○」、「×」のみで判定する。そのため、ひびわれ幅を定量的に示すことはできない。しかし、あまりにも微細なひびわれを検知することは、構造物を管理する上では、好ましいことではなく、0.2~1.0mm程度のひびわれ幅に達したときに検知できる性能を有することが適切である<sup>2)</sup>。そこで、本システムのひびわれ検知時のひびわれ幅を把握するために、引張試験によりコンクリート表面に強制的にひびわれを発生させ、ひびわれ幅と導電塗料の抵抗値の関係を調べた。

図-4に示すように、ひびわれが供試体中央部に発生するように、内部に欠陥を入れ、その部分にひび割れ変位計を設置した。また、ひびわれ幅の経時観測を行うため、鉄筋を供試体の中央に配置し、鉄筋の両端に引張荷重を与えることで、鉄筋の引張りずみを与えて、表面のひびわれ幅をゆっくりと増大させた。図-5に引張試験状況を示す。

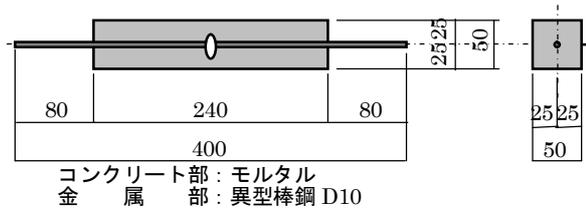


図-4 引張試験用供試体



図-5 引張試験状況

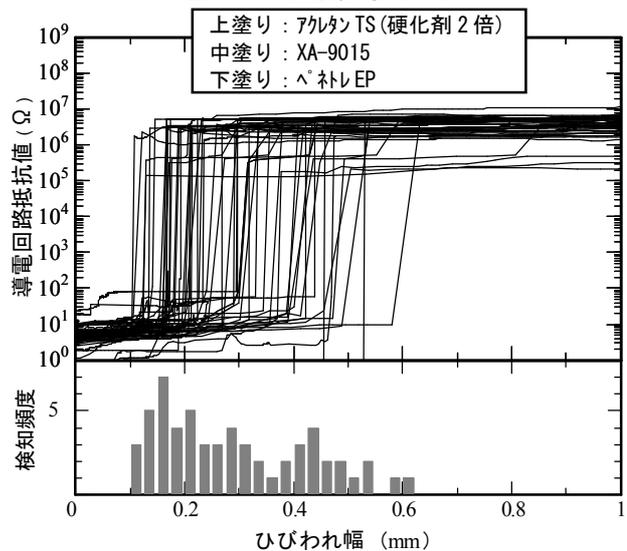
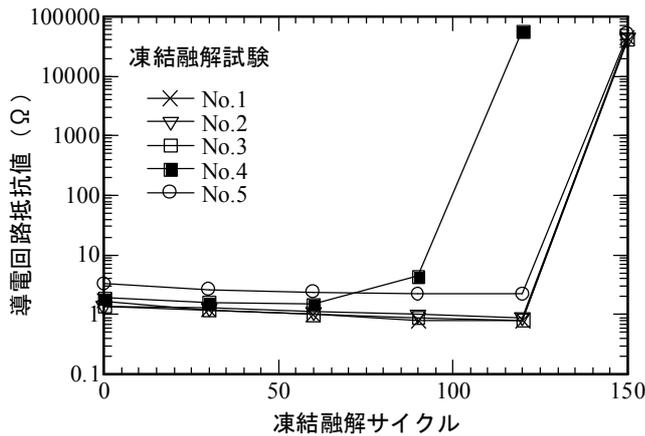


図-6 ひびわれ検知感度

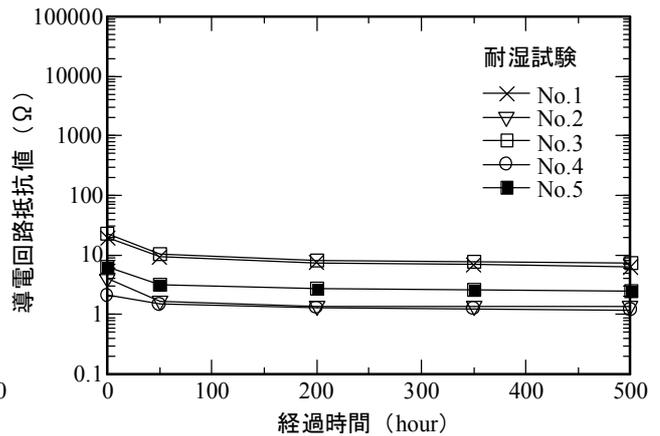
図-3で決定した導電材料を塗布幅10mmとして設置した場合の供試体の引張試験結果を図-6に示す。徐々にひびわれ幅を増大させると、0.1~0.6mm程度に達したとき導電塗料の抵抗値が $1.0 \times 10^6 \Omega$ 以上の値に急増する。本システムでは、0.1~0.6mm程度のひびわれ幅が進展すると検知できることがわかった。

##### 4.2 耐久性

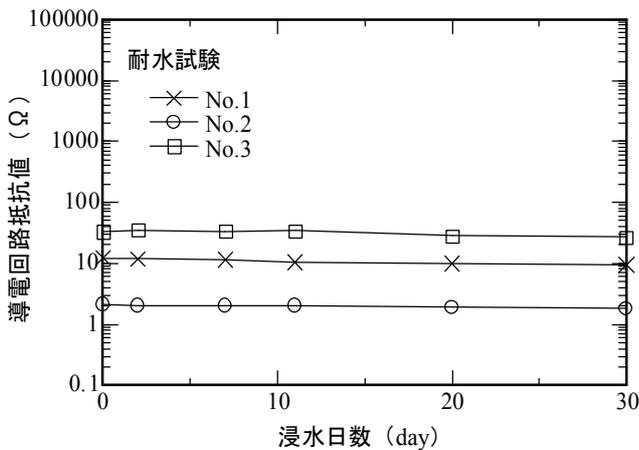
本システムの耐久性を検討するために、図-4に示す供試体に対して、図-3に示す塗装構造で塗布をして、以下に示すような耐久性試験を実施した。



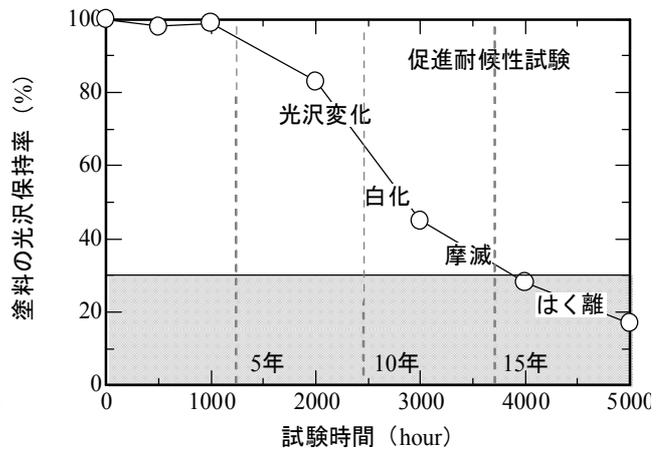
(a) 凍結融解試験結果



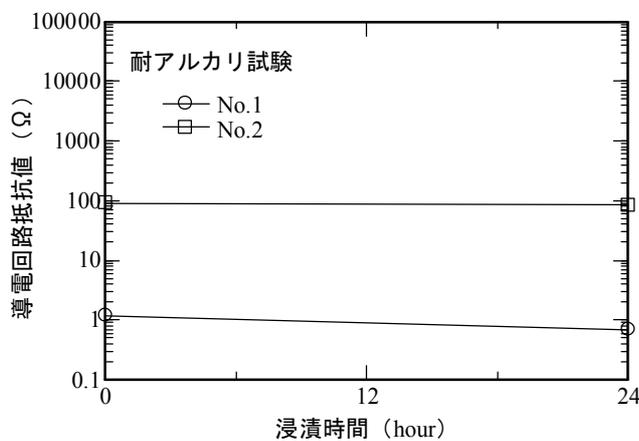
(b) 耐湿試験結果



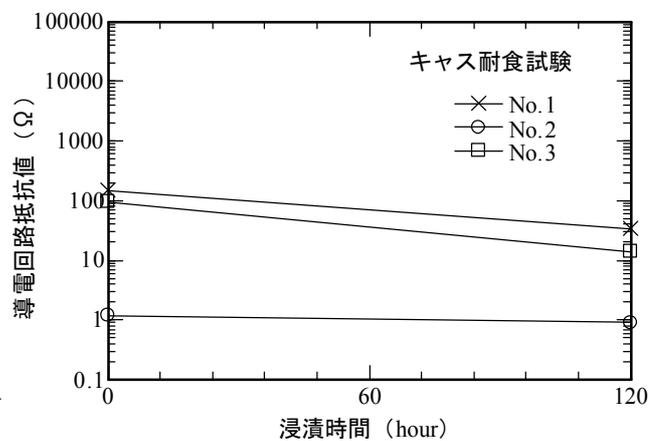
(c) 耐水試験結果



(d) 促進耐候性試験結果



(e) 耐アルカリ試験結果



(f) キヤス耐食試験結果

図-7 導電塗料の各耐久試験結果

(1) 凍結融解

導電回路の凍結融解に対する耐久性を確認するために、JIS A 6204に基づく凍結融解試験を実施した。図-7(a)に試験結果を示す。90 サイクルを超過すると抵抗値が増大する可能性が高くなることがわかった。回路が絶縁状態になった原因は、凍結融解の作用により供試体表面がスケーリングに起こし、導電回路もモルタルと共

に剥がれ落ちたためである。そのため、本システムは、ひびわれのみならず、コンクリート表面に生じる損傷をも検知できることがわかった。

(2) 高温多湿

導電回路の高温多湿の影響を把握するために、耐湿試験として気温 49℃、湿度 98%RH の試験機内に 500 時間 (約 20 日間) 放置した。そのときの抵抗値の結果を図-7(b)に示す。過度の高

温多湿状況下において、20日間放置した状態でも抵抗値に大きな変動はないことがわかった。

### (3) 浸水

導電回路の浸水による影響を把握するために、常温での水槽内に浸水させた状態での抵抗値測定を行った結果を図-7(c)に示す。結果は、抵抗値の変動はほとんど見られず、1ヶ月程度浸水しても問題がないことがわかった。

### (4) 紫外線

導電塗料の紫外線に対する耐久性を把握するために、促進耐候性試験(サンシャインウェザオメータを使用)を実施し、塗料の光沢変化率を測定し、劣化状況を調査した。光沢保持率とは60°鏡面光沢を測定し、暴露前の値を100%として表示したものであり、30%に至ると塗料の塗替えが必要とされる。なお、本促進試験は約250~300時間の試験時間で屋外自然暴露の約1年相当とみなされる。

試験結果を図-7(d)に示す。塗料の光沢保持率は、屋外自然暴露の状態ですら約15年経過すると塗り替えが必要とされる30%以下の値となることがわかった。

### (5) アルカリ

アルカリに対する影響を把握するため、JIS A 6909に基づいて、供試体に対し、飽和消石灰水溶液へ24時間浸漬させた前

後の外観調査、抵抗値の変化を測定した。

図-7(e)に結果を示す。初期の抵抗値から下がる傾向にあり、外観にも変化はなく、アルカリに対しては問題がないものと判断できる。

### (6) 酸

酸に対する影響を把握するため、JIS H 8681に基づいて、キャス耐食試験を行った。

キャス耐食試験は、塩化ナトリウム50g/l、塩化第2銅0.26g/l、pH=3の水溶液を温度50℃中へ噴霧した中へ供試体を120時間放置し、外観及び抵抗値を確認するものである。

図-7(f)に結果を示す。塗膜にはわずかに変色が見られたが、抵抗値は下がる傾向にあり、酸に対して問題はないものと判断できた。

## 5. 鉄道トンネルへの適用事例

鉄道トンネルにおいて平成16年12月から平成18年12月末まで計測を実施した事例を示す。

対象トンネルは、経年約50年の鉄道トンネルの横坑で、図-8に示すように、実験的にひびわれ誘発目地、実際の維持管理を目的とした既存

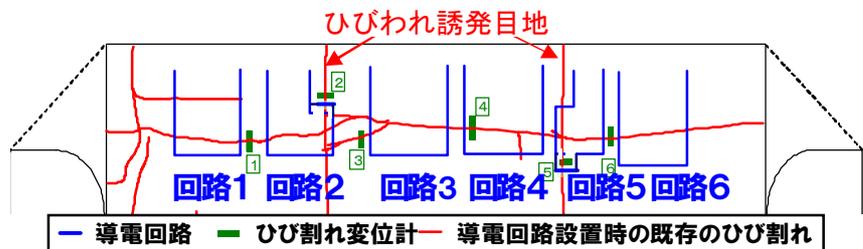


図-8 鉄道トンネル展開図(回路パターン図)

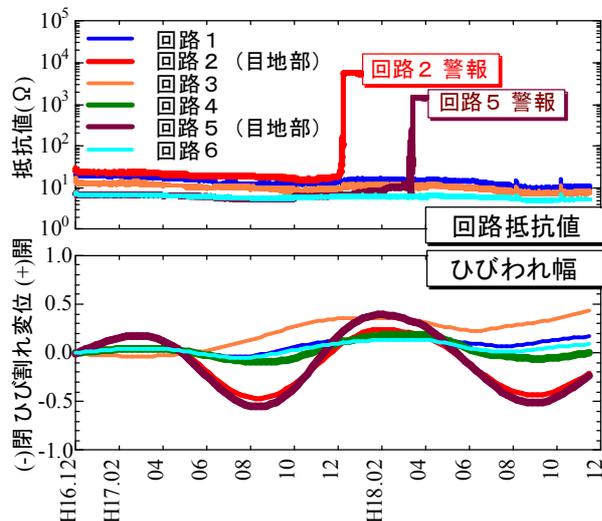


図-9 各回路のモニタリング状況

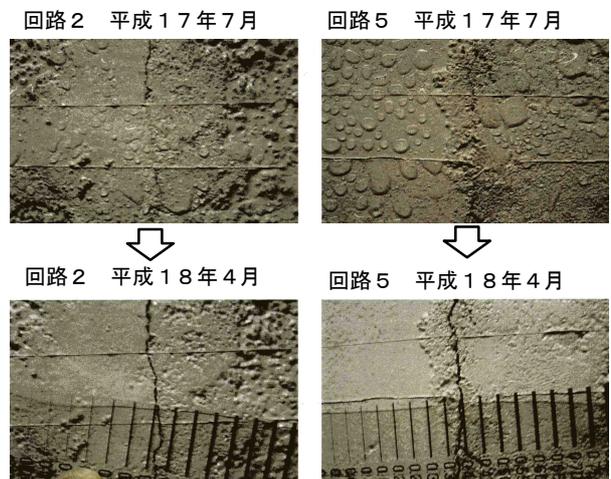


図-10 ひびわれの確認状況

のひびわれが大きい箇所を選定し、導電回路を施工した。

モニタリング結果を図-9に示す。なお、図中のひびわれ幅は平成16年12月からの増分量であり、正が開く方向、負が閉じる方向である。

回路2、5を除いた全回路では、計測開始から約2年間、ひびわれ幅の変化も小さく、各回路の抵抗値は小さい値で安定していた。

一方、回路2では、平成18年1月に抵抗値が $1.0 \times 10^4 \Omega$ までに急激に増大し、通電不可能となった。目視により、回路2のひびわれ誘発目地部において、前回測定時の平成17年10月から0.4mm程度開いている状態をクラックスケールにて確認した(図-9)。

また、回路5については、平成18年4月に抵抗値が $1.0 \times 10^3 \Omega$ を超過するまで急激に増大した。目視により、回路5のひびわれ誘発目地部において、ひびわれの進展が確認できた(図-9)。

なお、回路3について、年間0.1mm程度のひびわれの進展が確認できる。現在では、本システムによって現況では検知されていないが、将来検知することが考えられる。

ところで、例年、6~8月にかけては、トンネル内湿度が100%に達し、コンクリート表面は結露に覆われた状態となったが、特にデータに変動はなかった。結露の状況は図-10の平成17年7月(回路5)の写真からも観察でき、トンネル坑内の粉塵、列車走行による風圧だけでなく、結露などの水分に対して、全く問題がなかった。

以上のように、実トンネル内の環境において長期計測を行うことによって、導電塗料が耐久性を有することを実証できた。

## 6. おわりに

導電塗料によるひびわれ検知システムにおいて、ひびわれ検知性能試験、各種耐久試験および現場計測によって、コンクリート表面に生じたひびわれを簡易に捉えることができ、十分に現場レベルで活用できることがわかった。

以下に、本システムについてまとめると、

- ① ひびわれの発生および進展を抵抗値の測定により、On-Offで簡易に判定できる。
- ② ひびわれ検知感度は、0.1~0.6mm程度である。
- ③ コンクリート構造物の維持管理を行う上で十分な耐久性を有する。
- ④ トンネル内の粉塵、列車風圧、水分に対して、問題ない。

今後は、計測実績を増やすことによりひびわれ検知精度の更なる向上させ、また、ひびわれの位置をも適切に特定できる塗布パターンの検討を行う予定である。

本研究は、財団法人鉄道総合技術研究所、株式会社横河技術情報および藤倉化成株式会社による共同研究として実施している。

## 参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等 維持管理標準・同解説（構造物編） トンネル，p.12-15，2007.1
- 2) 日本コンクリート工学協会編：コンクリートのひびわれ調査，補修・補強指針-2003-，pp.61-74，2003.6
- 3) 小西真治，建山和由，毛利豊重：導電塗料によるひび割れ検知システムに関する基礎的研究，土木学会第57回年次学術講演会，VI-212，pp.423-424，2002.9
- 4) 田辺将樹・小島芳之・横尾正幸・染矢佳奈恵・皆川昶男・西村司：導電塗料を用いたひび割れ検知システムの研究，第40回地盤工学会研究発表会，地盤工学会，pp.121-122，2005.7
- 5) 橘直毅，小島芳之，仲山貴司，永田考，西村司：導電塗料を用いたひび割れ検知システムの研究，No.136 地下空間開発における調査・計測に関するシンポジウム発表論文集，地盤工学会，pp.33-38，2006.5
- 6) N.TACHIBANA, Y.KOJIMA, T. NAKAYAMA, M.TANABE : "Tunnel Monitoring System using the Optical Fiber Sensor or the Electric Conductible Paint", Abstracts, 7th World Congress Railway Research, p.283, 2006.6