

道路橋床版防水層の健全性評価システムの開発

榎園 正義・橋本 雅行

1. はじめに

近年、橋梁やトンネル等に代表されるインフラ構造物の老朽化が社会問題となっており、モニタリングによる状態監視や健全性の評価が重要な課題となっている。現在は、予防保全の重要性が認識されている中で、各種の課題解決に向けた多くの取り組みが異分野技術の利用を含め活発に行われている。

道路橋のコンクリート床版における床版防水層の維持管理においては、アスファルト舗装とコンクリート床版に挟まれた部分に位置することから直接的に目視等により点検する事は不可能である。そのため床版防水層のモニタリング手法としては、一般に路面（舗装の変状）や降雨後に床版下面の状態（防水層の機能喪失に伴う漏水）を目視で観察する間接的な方法を実施しているが、防水層の維持管理における点検や調査の面からも、供用中の路線において防水層の健全性を非破壊で確実に評価できる検査技術の開発が望まれている。

本稿では、舗装とコンクリート床版との電気抵抗の変化に着目した計測システムを考案し、床版防水層の防水効果の有無を非破壊で評価する手法の開発に向けた実験的研究^{1)~3)}を行った結果の概要について報告するものである。

2. 実験概要

(1) 防水層の防水効果判定システムの原理

防水層の防水効果（健全性）判定システムの原理を図-1に示す。

道路橋床版は、コンクリート床版、防水層およびアスファルト舗装の三層一体の構造となっており、水等の劣化因子をコンクリート床版に到達させないことを基本としている。また、各構造部材の材料を電気抵抗に着目し整理すると、表-1に示すとおりとなっており、表中①と④は電気を比較的良く通す半導体で、②と③は電気を全く通さない絶縁体である。ここで、アスファルト舗装上面からのひび割れが発生・成長し、次いで防水層が損傷した場合には、損傷箇所から水分

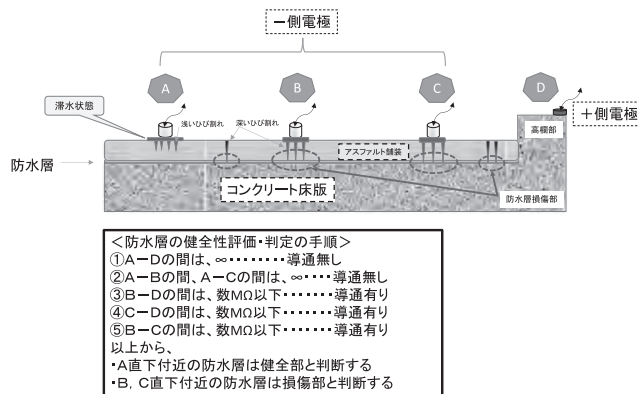


図-1 防水効果判定システムの原理

表-1 材料の種類と電気抵抗の目安

材料の種類	電気抵抗の目安
①コンクリート床版	数十 k Ω ～ 数 M Ω
②防水層（塗膜系、シート系）	2000 M Ω 以上の絶縁体
③アスファルト舗装	2000 M Ω 以上の絶縁体
④雨水等の水	数十 k Ω 程度

が浸入することから、電気の導通が容易となり、電気抵抗値が極端に低下することで防水機能の喪失が検知可能と考えた。

- ・図中 A は、供用時の負荷により、アスファルト舗装上面に発生した浅いひび割れ状態の電極を示す。
- ・図中 B は、舗装上面からのひび割れが成長し、防水層が損傷した状態の電極を示す。
- ・図中 C は、B と同様に防水層が損傷し、防水性能が低下した状態の電極を示す。
- ・図中 D は、高欄部コンクリートに固定設置状態の電極を示す。

ただし、ここで測定対象とする電気抵抗とは、一般的な固定抵抗とは異なり、雨水等の液体やコンクリート構造物等の特殊な材料を対象としていることから、表面抵抗や体積抵抗であり、印加する電圧によって電気抵抗の測定値は変動するものと考えられる。

(2) 計測システム開発のコンセプト

計測システム開発のコンセプトは、次のとおりとした。

- ①低抵抗値から 600 M Ω 程度の高抵抗まで、レンジ

切換無しで測定できること。

- ②再現性のある安定した測定結果が得られること。
- ③印加電圧が比較的安く、安全に使用できること。
- ④軽量、小型で屋外での取扱いが容易であること。

(3) 電気抵抗測定器の選定と主な仕様

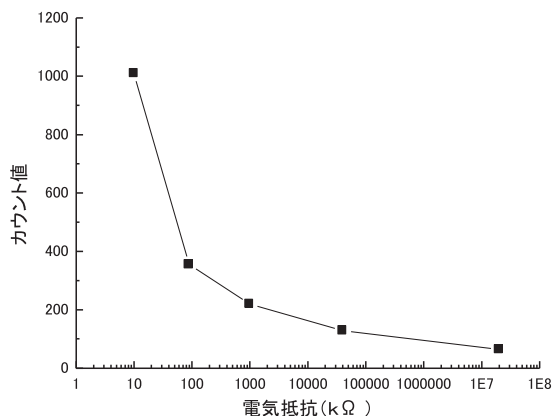
測定対象が特殊な材料であることから、印加する試験電圧によって電気抵抗の測定値が変化する可能性がある。そのため、試験電圧の違いによる測定器の適用性を確認する必要があることから、下記の①から④に示す印加電圧や機能の異なる市販の電気抵抗測定器 3 機種と電気抵抗式の水分計（電気抵抗換算値）1 機種の合計 4 機種の要素実験結果を基に適用性を検討し、この中から機種 B を選定した。さらに、機種 B に適合する電極延長用の特殊アダプターと専用電極を新たに開発することとした。

- ①機種 A：デジタルマルチメータ
(DT4281, 印加電圧：4.5 V 以下, 最大 600 MΩ)
- ②機種 B：電気抵抗式水分計
(HI-100, 印加電圧：20 V)
- ③機種 C：絶縁抵抗試験器
(ST5520, 印加電圧 25 ～ 1000 V, 最大 2000 MΩ)
- ④機種 D：超絶縁抵抗計（商用電源 100 V 仕様）
(SM-8220, 印加電圧：10 ～ 1000 V)

なお、機種 B（道路橋床版用電気抵抗式水分計⁴⁾）を選定した理由は、印加電圧が低いにもかかわらず、レンジ切換え無しでカウント値（最小 10 ～ 最大 990）表示が可能だからである。これは電気抵抗に換算すると図—2 に示すように最小値 10 (約 820 GΩ) から最大値 990 (約 10 kΩ) と極めて測定範囲が広い唯一の機種である。

(4) 実験内容

本研究では「要素実験」、「基礎実験」および「検証実験」の 3 段階で実験を行い、本稿では基礎実験と検証



図—2 カウント値と電気抵抗の関係（機種 B）

証実験の概要について以下に述べる。なお、要素実験では前述 (3) に示す 4 種類の電気抵抗測定器を用いて、電極部に使用する水の種類に関する実験、アスファルト舗装面上ひび割れの判別に関する実験、各種防水層を有する床版および防水床版の舗装上面側からの適用可能性の評価を行っている。

3. 基礎実験

(1) 目的

機種 B（電気抵抗式水分計）を用いて現地での計測を想定し、実物大コンクリート構造物での測定距離が計測値に及ぼす影響を把握するための基礎実験を行った。

(2) 実験概要

(a) 試験体

実物大のコンクリート構造物として、以下の 2 種類の試験体を使用した（写真—1 参照）。



(a) PC 桁試験体全景（室内） (b) コンクリート舗装全景
写真—1 コンクリート構造物の計測状況

- ① PC 桁試験体（全長約 18 m, 端部～ 10 m の区間）
- ② コンクリート舗装（延長 10 m 区間）

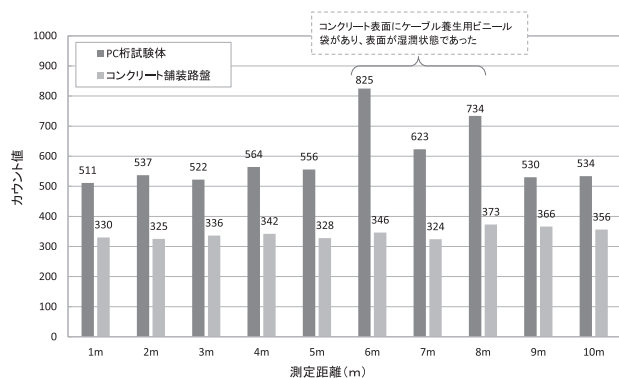
(b) 測定方法と測定条件

測定方法は、機種 B の片側を固定側の電極＋とし、もう一方を移動側の電極－として 1 ～ 10 m までの測線区間を 1 m ピッチで計測した。また、測定条件として、両電極部の下面には布を設置した上に界面活性剤入りの水を十分に散布し、測定するコンクリート表面と電極間を湿潤状態とした。

(3) 実験結果

(a) PC 桁試験体

室内に仮設置された PC 桁試験体の桁軸方向のカウント値は、図—3 に示すように測定距離 1 ～ 10 m の区間は 511 ～ 825 の範囲と大きく、PC 桁コンクリート表面は含水した導通状態であると考えられる。また、測定距離とカウント値との間には相関は認められない。特に、測定距離 6 ～ 8 m 区間のカウント値が 625 ～ 825 と局部的に高くなっている。この要因としては、



図—3 コンクリート構造物の測定距離とカウント値の関係

この範囲には配線ケーブル養生用のビニール袋が設置されており、計測時に移動したため、この範囲の表面は変色していたことから、部分的に結露した（湿潤）状態となっていたものと考えられる。

以上のことから、室内に仮設置されている PC 桁コンクリート表面のカウント値は 511 ～ 564 の範囲となったが、測定距離とカウント値との間には相関は無く、測定距離の影響は認められない。

(b) コンクリート舗装（図—3 参照）

屋外で晴天が 3 日以上続いて乾燥したコンクリート舗装上のカウント値は、コンクリート舗装の測定距離 1 ～ 10 m 区間では、カウント値は 324 ～ 373 の範囲でほぼ均一な値となり、測定距離とカウント値との間に相関は認められない。また、コンクリート舗装の測定距離 4.8 m、9.7 m の 2 箇所コンクリート打継ぎの目地部があるが、その影響は認められない。

(4) まとめ

実物大のコンクリート構造物を用いて電極を設置する測定距離が電気抵抗（カウント値）に及ぼす影響を確認する実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- ①屋内設置の PC 桁試験体のカウント値は 511 ～ 825 と高く、屋外で乾燥状態のコンクリート舗装のカウント値は 324 ～ 373 と低い結果となった。
- ②両試験体ともに、測定距離とカウント値（電気抵抗換算値）との間には相関が無く、測定対象がコンクリートであれば電極間の測定距離の影響を受けずに計測が可能であることが確認された。

4. 検証実験 I

(1) 目的

防水層が敷設されている実橋からの切出し床版を対象として、アスファルト舗装上面と床版コンクリートとの間の電気抵抗の変化を測定することで、防水効果

の有無を判定可能かどうかの確認実験を行った。また、電気抵抗値に大きな変化のある箇所から採取したコアを用いて、防水性能を確認するため防水性試験Ⅱ⁵⁾による検証実験を行った。

(2) 実験概要

(a) 試験体（No.1 ～ No.3 の 3 体）

種類の異なる防水層が敷設されている表—2 に示す切出し床版試験体 3 体（2.2 m × 4.5 m）を使用した。

表—2 切出し床版試験体の種類

試験体	防水層の種類別	負荷の履歴	床版上面の状況
床版 No.1	塗膜系（従来型）	供用後（負荷有り）	・施工目地部 ・ひび割れ部 ・貫通穴部
床版 No.2	シート系（従来型）	供用後（負荷有り）	・ひび割れ部
床版 No.3	シート系（高機能型）	防水工試験施工（負荷無し）	・防水層のみ ・コンクリート部 ・削孔部

(b) 測定項目と測定方法

1) 電気抵抗（カウント値）

コンクリート面を固定側の電極+とし、もう一方を移動側の電極-として、アスファルト舗装上面を横断方向に 0 ～ 4.5 m までの測定区間を 0.5 m ピッチでカウント値の測定を行った。また、計測ではアスファルト舗装の一般部の他に、施工目地部、ひび割れ部、およびコンクリート部等に注目した測点を設定した。

2) 防水性試験Ⅱ

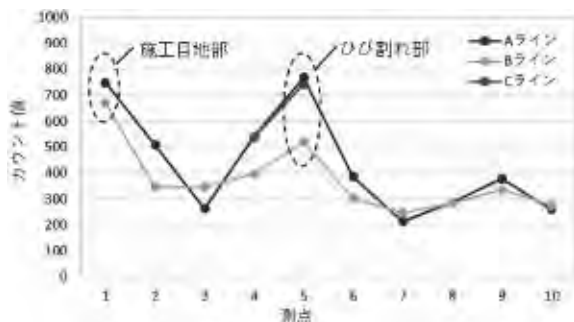
カウント値が大きく異なる箇所においてコアを採取し、この採取したコアを用いて「道路橋床版防水便覧」で規定されている防水性試験Ⅱを実施し、防水性能を確認した。

(3) 実験結果と考察

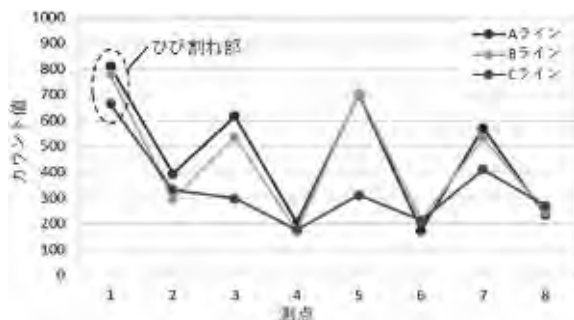
(a) 電気抵抗（機種 B によるカウント値）

切出し床版 3 体の各測線（A ～ C ライン）とカウント値との関係を図—4 に、各床版の測定状況例を写真—2 に示す。カウント値は、

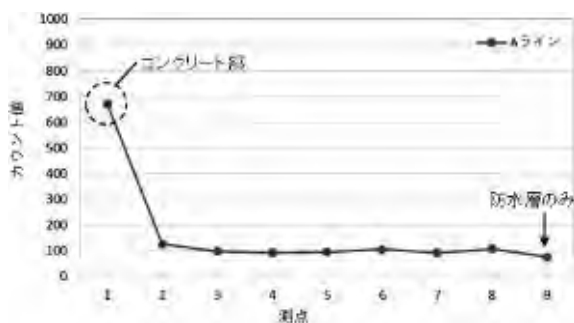
- ①床版 No.1（塗膜系；従来型）の舗装一般部は、214 ～ 540、施工目地部では 670 ～ 749、さらにひび割れ部では 520 ～ 768 と大きく、全体的に防水性能は低下し導通した状態と推定される。特に、変状部では大きくなる傾向がある。
- ②床版 No.2（シート系；従来型）は、部分補修箇所の施工目地部に入ったひび割れ部では、664 ～ 810 と非常に大きく、防水性能は低下し導通した



(a) 床版 No.1 (供用後; 負荷有り)

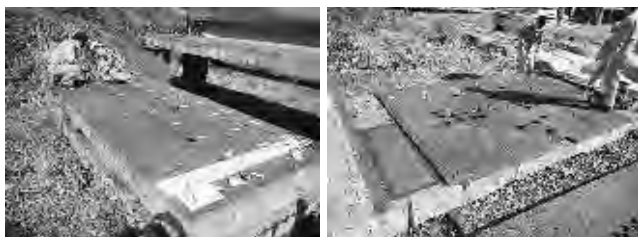


(b) 床版 No.2 (供用後; 負荷有り)



(c) 床版 No.3 (未供用; 負荷無し)

図—4 測点位置とカウント値の関係



(a) 床版 No.1 (供用後; 負荷有り) (b) 床版 No.3 (未供用; 負荷無し)

写真—2 カウント値の測定状況

状態と考えられる。また、舗装一般部のカウント値は、174～707の範囲と変化が大きく、測点によって防水性能に差があるものと考えられる。

- ③床版 No.3 (シート系; 高機能タイプ) は、防水層上 (測点9) のカウント値が77と非常に小さく、防水性能を有していると考えられる。また、舗装一般部のカウント値は、92～107 (測点2は127) と非常に小さく、防水性能は良好と考えられる。なお、防水層の無いコンクリート部のカウント値は、672と導通状態の非常に大きな値を示す結果となった。

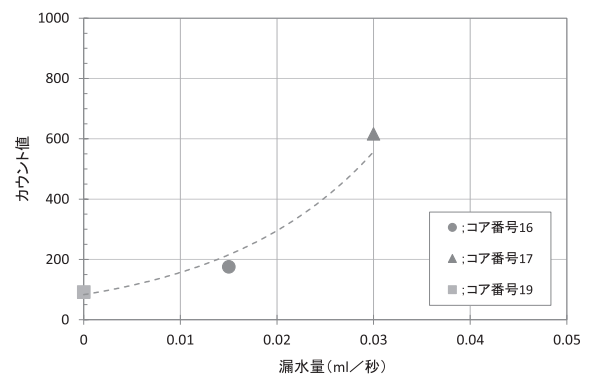
以上から、防水層の防水性能が「良好」な場合のカウント値のしきい値は100以下が妥当と判断される。

(b) 防水性試験Ⅱ

切出し床版からカウント値の異なるコア3体を採取 ($\phi 100$) した。採取したコアのカウント値と防水性試験Ⅱの結果を表—3に示す。また、採取コアの防水性試験Ⅱの結果による減水量から時間 (s) 当たりの漏水量に換算し、漏水量 (ml/秒) とカウント値との関係を図—5に示す。

表—3 コア試験体とカウント値の測定結果

試験体	コア (位置)	カウント値	漏水確認結果
No.2	No.16 (C4)	176	漏水無し
	No.17 (A3)	616	漏水有り
No.3	No.19 (A7)	92	漏水無し



図—5 漏水量とカウント値との関係

コア番号16 (カウント値176, 漏水無し) の減水量は10分間で約9mlであり0.015ml/秒, コア番号17 (カウント値616, 漏水有り) の減水量は5分間で約9mlであることから0.03ml/秒となる。また、コア番号19 (カウント値92, 漏水無し) の減水量は短時間であれば0ml/秒と考えられる。その結果、サンプル数は少ないものの漏水量とカウント値の間には、正の相関があり、カウント値が小さいと漏水は無く、カウント値が大きいと漏水量が増加する傾向が確認され、防水性能 (効果) をカウント値により判定することが可能であると判断できる。

(4) まとめ

本検証実験の結果、防水性試験Ⅱの漏水量とカウント値との関係には正の相関があり、カウント値が小さいと漏水は少なく、カウント値が大きいと漏水量が増加する傾向が確認された。したがって、道路橋床版防水工の防水性能をカウント値の変化で評価する方法は短時間で、且つ簡易に防水層の健全性を評価できることから極めて有効である。

また、防水層の防水性能が低下し、コンクリート間と導通している湿潤状態のカウント値は250～400で、さらに防水性能が喪失して滞水状態の場合は400～990の範囲と考えられる。現段階での防水層の健全性評価の目安として、カウント値で暫定的に評価した結果例を表—4に示す。

表—4 防水層の健全性評価の目安（暫定）

防水層の状態	カウント値の目安									
① 健全 (損傷なし)	10	100								
② やや健全		100	200							
③ やや不良			200	250						
④ 不良 (湿潤状態)				250	400					
⑤ 損傷大 (滞水状態)					400					990
	電気抵抗式水分計（カウント値）									

5. 検証実験Ⅱ

(1) 目的

防水層（高機能型）が敷設されている切出し床版の防水層を対象として、防水層の欠陥部（ピンホール、或は損傷）のサイズとコンクリート床版のカウント値の変化を測定することで、欠陥部のサイズによる違いを検出可能かどうかの検証実験を行った。

(2) 実験概要

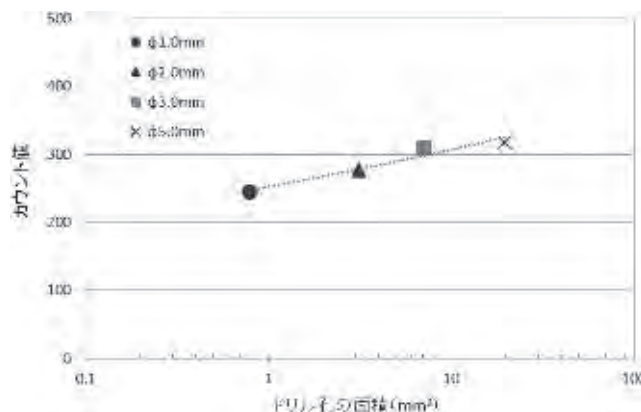
高機能型の防水層が敷設されている表—2の切出し床版 No.3の防水層の上面から、防水層上にドリル（孔径 ϕ 1.0～ ϕ 5.0 mm）により損傷を与え、ドリル径とカウント値の変化を測定し、欠陥部のサイズによる影響を把握する実験を行った。

(3) 実験結果と考察

防水層上のドリル径とカウント値の測定結果を図—6に示す。この図から、ドリル径 ϕ 1.0 mmでカウント値は245、 ϕ 2.0 mmで277、 ϕ 3.0 mmで310、および ϕ 5.0 mmでは305～317とドリル径が大きくなるにつれて、カウント値も増大しており、正の相関が認められる。したがって、カウント値から欠陥部のサイズが推定可能と考えられる。

6. おわりに

本研究においては、道路橋床版のアスファルト舗装



図—6 ドリル直径（孔の面積）とカウント値の関係

上面とコンクリート床版との間の電気抵抗（カウント値）を測定することで、防水層の防水効果（健全性）を評価する新たな非破壊検査方法を提案した。その結果、現地から切出した床版アスファルト舗装上面から非破壊で防水層の防水効果を調査することが可能であり、防水層の健全性評価に有効であることを確認した。

今後は、ここで開発した防水層の評価システムを既設、或は新設の実橋梁において活用し、現場における測定方法や測定条件等の標準化を行うことによって、より精度の高い健全性評価を行うことが可能となり、防水層の性能向上に寄与するものと考えている。

JICMA

《参考文献》

- 1) 三浦康治, 榎園正義, 長尾千瑛: 道路橋床版防水層の健全性評価システムに関する実験的研究, 土木学会第73回年次学術講演会, CS8-021, pp.41-42, 2018
- 2) 榎園正義, 橋本雅行, 長尾千瑛, 豊田雄介: 床版防水層の防水性評価に関する実験的研究, 日本非破壊検査協会平成30年度秋期講演大会, pp.119-122, 2018
- 3) 三浦康治, 榎園正義, 日向正, 勝呂翔平: 床版防水層の健全性評価システムに関する実験的研究, 日本非破壊検査協会2019年度秋季大会, pp.43-46, 2019
- 4) 谷倉泉, 榎園正義, 後藤昭彦: 床版防水工における水分計の適用性に関する研究, 構造工学論文集, vol.59, pp.1112-1123, 2013.3
- 5) ㈱日本道路協会: 道路橋床版防水便覧, 平成19年3月

【筆者紹介】

榎園 正義 (えのきぞの まさよし)
(一社) 日本建設機械施工協会
施工技術総合研究所
研究第二部 次長



橋本 雅行 (はしもと まさゆき)
(一社) 日本建設機械施工協会
施工技術総合研究所
研究第二部 主任研究員

