

研 究 報 告

令和 8 年 4 月 23 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 神奈川大学 建築が学部建築学科

氏 名 : 朱牟田 善治

研究課題名 : デジタルツイン・IoT センシング技術を用いた水管橋の劣化診断・予測

助成金額 : 100 万円

研究実施期間 : 自 令和 7 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 8 年 3 月 31 日

デジタルツイン・IoT センシング技術を用いた水管橋の劣化診断・予測

Diagnosis and Prediction of Deterioration of Water Pipe Bridges

Using Digital Twin/IoT Sensing Technology

神奈川大学建築学部建築学科 教授 朱牟田善治

（研究計画ないし研究手法の概略）

1. はじめに

2021年10月に和歌山県で六十谷水管橋が落橋した事故を受け、水管橋の高経年化対策は急務となっている。しかし現状では、補修すべき部位を合理的に特定できず、適切な維持管理が行われていない水管橋も多い。

本研究では、水管橋の補修優先順位を決めるために、劣化環境と劣化状態を同時に計測できるセンシングシステムを試作し、得られたデータから劣化のボトルネックとなる部位を特定する手法の構築を目的とした。

対象として、阪神水道企業団、神戸市水道局、そして異なる環境条件をもつ新潟市が管理する実際の水管橋で計測実験を実施した。収集したデータをもとに、以下の3点について評価するためのセンシングシステムを構築した結果を示す。

- (1) 塗膜劣化の診断
- (2) センサネットワークシステムによる計測と変化抽出
- (3) デジタルツイン構築による水管橋の劣化特性分析

2. 研究方法と成果の概要

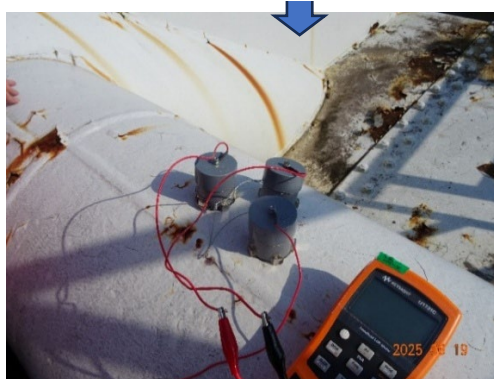
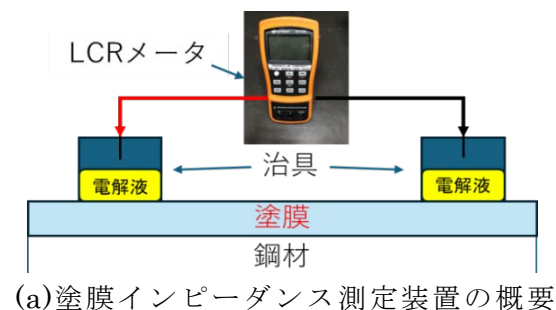
(1) 塗膜劣化の診断

本研究では、図1に示すセンシングシステムを構築し、塗膜劣化が顕著な実水管橋の変曲部を主なターゲットとして塗膜の交流インピーダンス（以下、塗膜インピーダンス）を測定した。塗膜インピーダンスの測定は、塗膜の劣化度合いで変化する塗膜内の空隙の多少によってインピーダンス値が変化することに着目する。図1(a)に、塗膜インピーダンスの測定システムの基本概念を示す。塗膜インピーダンスは、塗膜内に電解液を充填させ、塗膜内部の空隙量に応じて変化する交流インピーダンス値を計測する原理に基づく。測定装置として、図1(b)、図1(c)に示す2つのシステムを試作した。

図1(b)は、電解液を筒状デバイス内部に充填し、塗膜表面へ圧着させる方式の測定装置である（筒タイプ）。この方式は、絶えず電解液を塗膜表面に供給させながら、電極を通じて塗膜インピーダンス値を継続的に計測することが可能である。電解液を充填した筒上のデバイスをネオジム電池で水管橋塗膜部の表面に圧着させて、継続的に電解液を塗膜表面から供給しながら、塗膜インピーダンスを計測する。

これに対し、図1(c)は電解液を流布した水管橋塗膜部に、直接、電解質パッドを貼り付けることにより、塗膜インピーダンスを計測する装置である（電解質パッドタイプ）。塗膜インピーダンスは、両タイプともに、携帯型のLCRメータ（キーサイト社製U1731C）を用い、100Hzから1000Hzの間で交流試験信号を変化させて、塗膜インピーダンスを測定した。

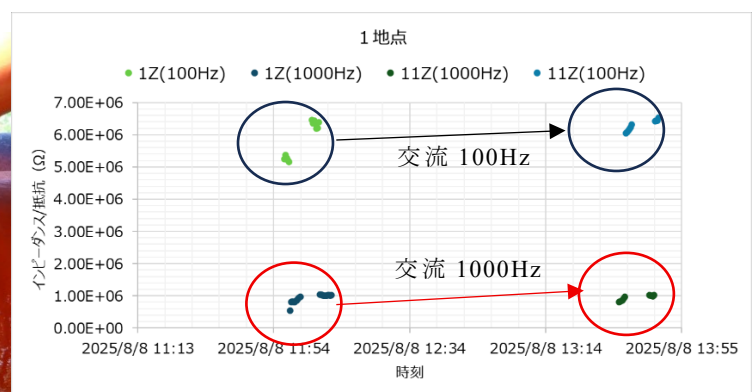
図 2 は、図 1(b)のデバイスタイプを用いて 100 Hz と 1000 Hz の測定結果を比較したものである。同図は、高い周波数となる 1000Hz の方が、低い周波数の 100Hz に比べて、時間差を設けた測定において変動が小さく、塗膜インピーダンス値を測定できることを例示している。ただし、研究期間内に複数の水管橋を対象として同様な測定実験を行い、再現性を検証した結果、100Hz と 1000 Hz では、測定時間、塗膜材料、および気象環境の違い（温湿度など）によって、塗膜インピーダンス値が変化することが明らかとなった。加えて、電解液を筒状デバイス内部に充填し、塗膜表面へ圧着させる従来方式は、圧着レベルを一定に保つために時間と技術を要するという課題が明らかとなった。これに対し、図 1(c)に示した電解質パッドタイプの測定装置は、①簡単に装着でき圧着時の不安定性を大幅に改善できること、②塗膜表面への圧着作業が大幅に簡略化され、試験範囲内では、用途によって従来方式とほぼ同等の測定性能が得られることなどを確認した。今後は、適用条件をさらに精査し、塗膜劣化診断の測定装置として実用化に向けた検証を進める。



(b)試作センサ 1（筒タイプ）

(c)試作センサ 2（電導質パッドタイプ）

図 1 塗膜インピーダンス測定システムの概要とその測定例



(a)測定箇所

(b)塗膜隠避ダンスの周波数を変えた計測結果

図 2 塗膜インピーダンスの測定例

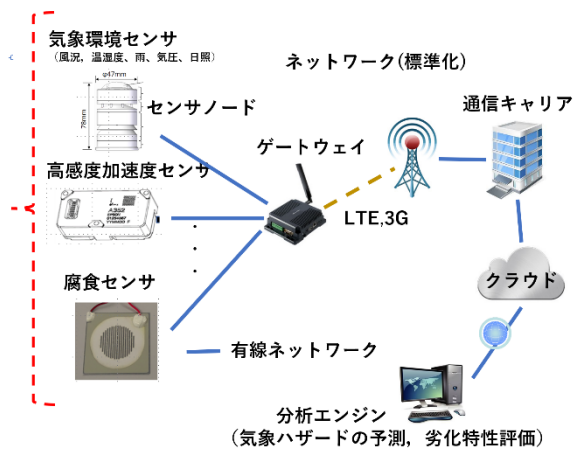
(2) センサネットワークシステムによる計測と変化抽出

定点に設置された長期振動データを用いて、腐食などの緩慢な劣化を検出することをねらいとしてセンサネットワークシステムを実水管橋に設置し、その変化抽出を試みた。試作したセンサネットワークシステムは、太陽光と二次電池を用いて自立的に電源を確保し、振動に加え、環境負荷となる温湿度、風況、日射、漏水(降水浸透)、塩分量など複数の物理量を同時に計測することを可能とする自立型マルチセンシングシステムとしての機能を有する。図 3 は、試作システムを実水管橋に設置した例とセンサネットワークの概念図を示す。有線により、温湿度などを計測する環境センサ、高感度加速度センサ、および ACM センサ（大気腐食モニタリングセンサ）をゲートウェイにつなぎ、LTE 通信回線を使ってクラウドサーバへ定期時間ごとに送信するシステム構成とした。本システムにより、クライアント端末からサーバにアクセスし、蓄積されたセンサ情報を即時的に取得することが可能である。

図 4 に、環境センサ、加速度センサ、および ACM センサを水管橋に設置した例を示す。環境センサは三菱電機社製の気象環境センサユニット（ENVDT2：試作品）を活用し、I2C 通信方式により、8 つの物理量（雨量、照度、UV、気流（風向、風速）、温度、湿度、気圧、加速度）を同時計測・収集・蓄積することが可能である。加速度センサは、気象環境と設備の振動特性の変化をとらえるために、高感度加速度センサ（M-A352:エプソン社製）を設置した。腐食などの緩慢な劣化を振動特性の変化から検出することをねらいとしている。ACM センサは、JIS 規格に基づくシュリンクス社製の Zn-Ag 型を活用し、励起電流の計測に加え、湿度から塩分付着量に換算し、対象地点の腐食環境をモニタリングすることを狙いとしている。ゲートウェイとなるボードコンピュータは、近年様々なタイプを用途により組み替えることが可能である。本研究では、Linux（Raspbian）で稼働する Raspberry Pi を用い、複数のセンサからの計測データを受信・蓄積するセンシングデバイス機能とクラウドに送信するゲートウェイ機能を搭載した。クラウドサーバは、このボードコンピュータからデータを受信するとともに、SSH（セキュアシェル）サーバの機能を実装している。観測現場で不測のシステム不具合が生じたら、クライアント端末から SSH 接続でゲートウェイに接続し、センサ動作点検やシステム再起動ができる。また、遠隔からサンプリング間隔を変更することも可能である。

図 5 に本センサネットワークを用いて、温度上昇によって水管橋の水管橋特有の「熱膨張による軸方向の拘束変化」を捉えた事例を示す。同図は、図 4 のセンサネットワークシステムを用いて、温度が異なる時系列波形のうち水管橋の短軸（X 方向）と橋軸（Y 方向）の温度変化による固有振動数の変化と、その振幅値を比較して示す。具体的には、できるだけ震源の影響を取り除くために、温度（気温）ごとに加速度データ（微動観測データ）の時系列（サンプリング周波数：200Hz、単位：mG）を平均化し、ランダム振動のアンサンブル平均を作成し、フーリエ変換した結果を示している。このうち、図 5 は、フーリエ振幅のピーク値の固有振動数とその振幅値をそれぞれ重ねて示す。特に、図 5(b)の橋軸方向の振幅値（オレンジの△）に着目すると、振幅値が温度に応じて減少する傾向を示している。このような傾向は、短軸方向（図 5(a)）には見られない。これは、温度が高くなると管が伸び、軸方向の拘束力（軸力）が増えるためと推察できる。軸力が増えると、支承の摩擦、ゴム支承に内部摩擦、管と桁の接触部の摩擦、管内の水の粘性抵抗などを増加させ、減衰（damping）を増やす方向に働き、FFT によるピーク振幅を低下させる可能性が高くなると考えられる。また、図 5(b)は、高温時のみに、卓越した高次モードが出現することを示している。これは、

軸力増加に伴い、高次モードの隆起条件が変化し、高次モードが卓越しやすくなり、高周波数側にピークが出現したためと推察できる。このように提案システムにより典型的な水管橋の振動特性の変化を把握できることを明らかにした。



(a) 試作システムの概要



(b) 試作システムの設置例

図3 試作したセンシングシステムの概要



(a) 環境センサ

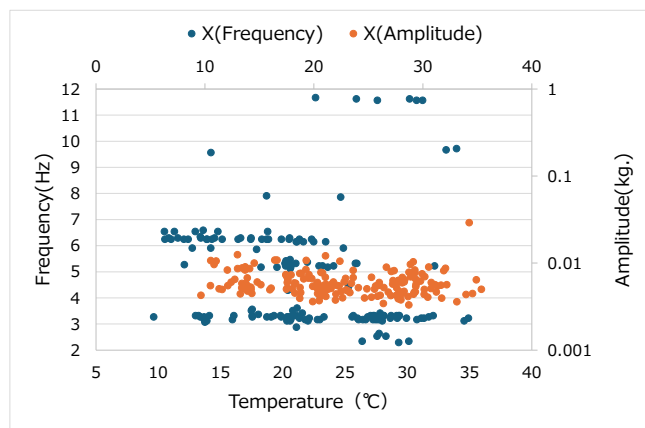


(b) 加速度センサー

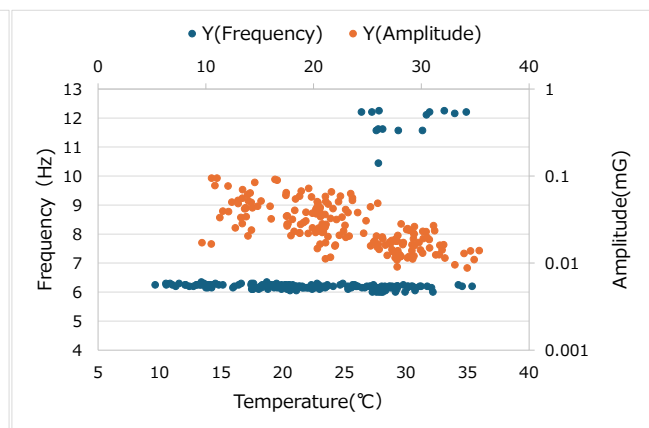


(c) ACM センサ

図4 水管橋に設置したセンサー



(a) X成分の振動特性（短軸方向）



(b) Y成分の振動特性（橋軸方向）

図5 温度変化による振動特性の変化

(3) デジタルツイン構築による水管橋の劣化特性分析

本研究では、典型的な水管橋の構造であるパイプビーム形式を例として、デジタルツイン環

境を構築し、計測波形の解析と FEM 解析を実施した。デジタルツインとは、実構造物の計測データを用いて数値解析モデルを構築・更新し、現実の状態をデジタル空間上に再現する技術である。本研究では、図 4 に示すセンシングデータを、インターネットを通じて即時にクライアント PC に送信し、波形解析結果と FEM 解析結果とを比較検証できるような環境を整えた。図 6 は、支間長 30.5m、口径 $\phi 2130$ の水管橋を例として、固有値解析を実施したときの 1 次モード、2 次モードのモード図を示す。現場計測を実施した加速度波形を分析して固有振動数を抽出した結果と、クライアント端末で実施した固有値解析と FEM 解析を即時的に比較することを可能とする。このように、センサネットワークとデジタル解析環境をつなぐデジタルツイン環境を整え、鋼材劣化が水管橋の構造全体に与える影響をシミュレーションし、落橋につながる劣化部位を特定する事例分析が可能であることを明らかにした。

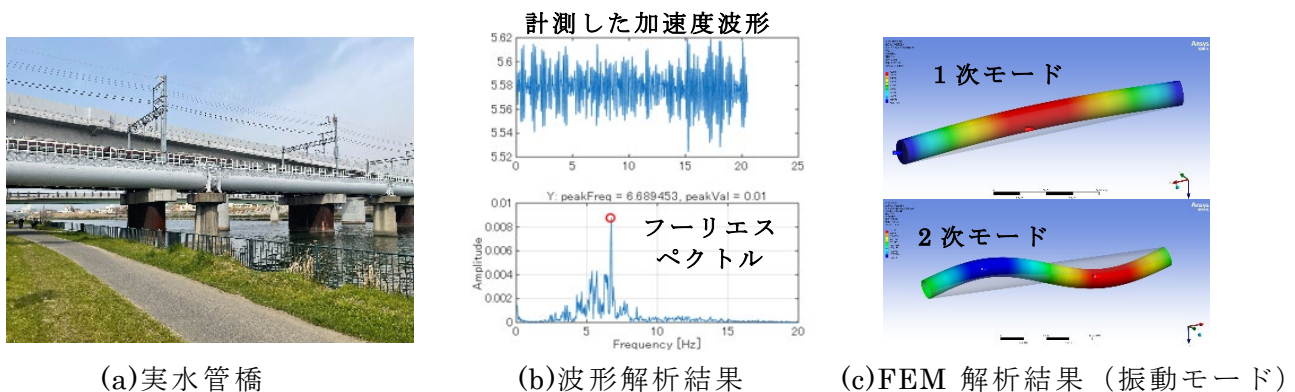


図 6 デジタルツイン環境による水管橋分析事例（パイプビーム形式）

3. まとめ

本研究では、水管橋の塗膜劣化および構造劣化を多角的に診断するため、塗膜インピーダンス計測、センサネットワークによる長期モニタリング、さらにデジタルツイン解析を組み合わせたシステムを構築した。まず塗膜劣化診断では、電解液を用いた交流インピーダンス測定システムを試作し、筒タイプと電解質パッドタイプの 2 方式を比較した。その結果、電荷質パッド方式は装着が容易で圧着のばらつきが小さく、従来方式と同等の測定性能を示すことを確認した。次に、太陽光発電と二次電池を備えた自立型センサネットワークを実橋に設置し、複数の物理量を長期取得した。取得データの解析から、温度上昇に伴う軸方向拘束力の増加が振動特性に影響し、固有振動数や減衰の変化として現れることを明らかにした。さらに、計測データを即時に FEM 解析と照合できるデジタルツイン環境を構築し、劣化が構造全体へ及ぼす影響をシミュレーション可能とした。これらにより、水管橋の劣化診断を高精度化するための基盤技術を提示した。

【学術論文】

- なし、2026 年度中に、国内学会に投稿予定

【学会発表】

- 落合努，朱牟田善治，長谷川延広：水管橋の振動特性変動要因の基礎的分析—気温による振動特性の変化—，第 16 回インフラ・ライフラインシンポジウム減災対策シンポジウム講演論文集，土木学会地震工学委員会，pp. 195-197, 2026. 3.