

道路橋の維持管理方法の省力化・合理化に関する研究

(指導期間 令和6年4月～令和7年3月)

研究室名 橋梁研究室

氏 名 恵良 将主

1. まえがき

限られた資源で道路構造物の管理を行うことを考えれば、措置が望ましいと考えられる橋であっても詳細な調査や対策の着手が遅れる場合も想定される。そこで、性能は回復させないまでも進行を遅らせる程度の対応や、落橋等最悪の事態が避けられるような応急的な対応までは行う一方で、状態に更なる変化があれば通行を制限するなどの対応ができるように、常時状態を監視することで、他の橋の修繕を優先する場合も出てくると考えられる。

このような場合、監視する箇所や、変位やひずみなどの監視する指標・閾値は、詳細な調査にまで着手できない中で限られた情報から設定せざるを得ない。そこで、監視の確実性を高めるためには、限られた情報から定める閾値のみに頼ることなく、時々刻々変化する計測結果から状態の変化の兆候を探すことも考えられ、AI の活用への期待もある。

そこで、監視における AI の活用の可能性を調べるために、損傷を受けた実橋の観測結果を AI に学習させ、状態の変化を検知することを試みた。

2. 対象橋梁の管理概要

対象とした橋梁は、橋長 300m の PC4 径間連続箱桁橋である。供用後 38 年目において、第一径間を中心に、PC ケーブルの破断や広範囲での腐食が確認された。調査が順次進められ、道路管理者は架け替えを決定し、現在では架け替えが完了している。架け替えまでの約 10 年間、突発的な落橋を防ぐための対策は行われたものの、損傷を有したまま、モニタリング下で供用された。

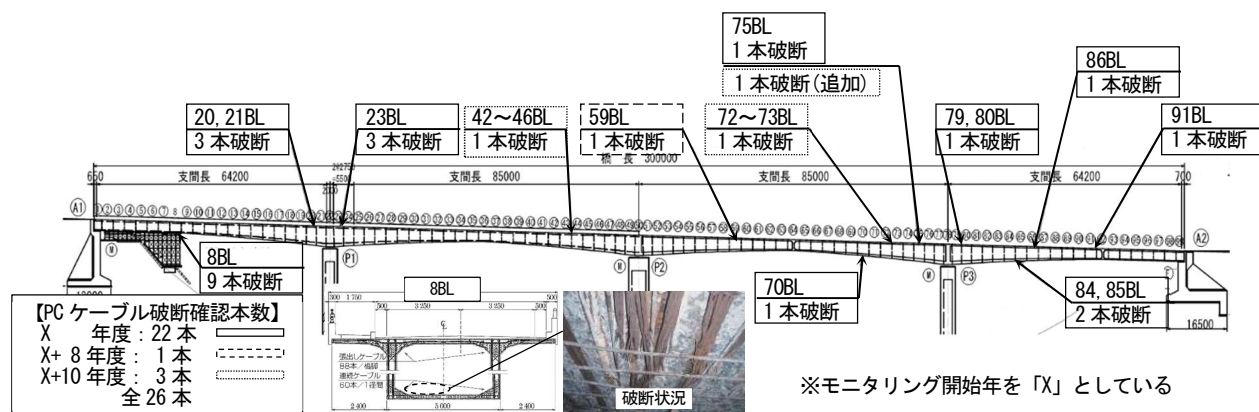
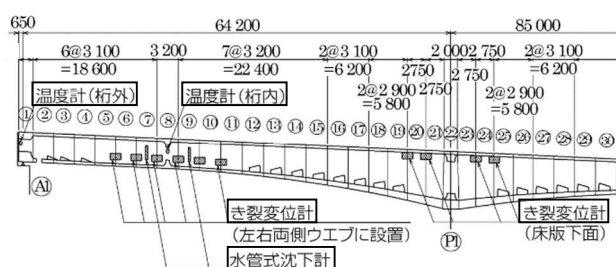


図-1 PC ケーブル破断状況

モニタリングの概要を図-2,3に示す。図-3に、第一径間第7ブロックでのたわみ量（沈下計）の計測値を示す。本図では、モニタリング開始年をX年としている。図中横線は、FEM解析を用いて、径間全長にわたって断面内すべてのPCケーブルの断面積の割合を一律に減少させたときの計算値である。そして、道路管理者は、黒い破線で示すように、毎年なたわみ量計測値を外挿して予測値を更新し、横線と比較していた。

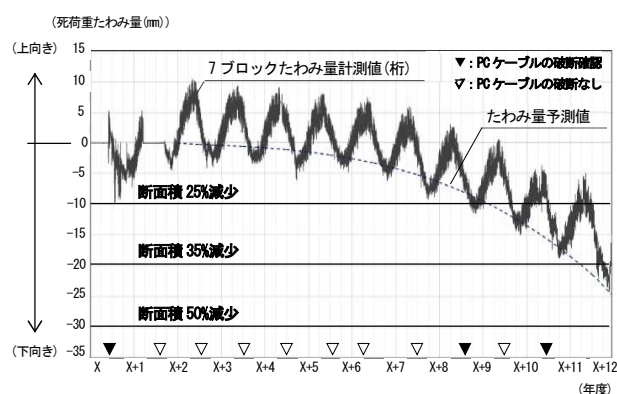
しかし現実の腐食は必ずしも断面内、又は、全長にわたって一様ではない。セグメントの継目など、いずれかの断面で局所的に進行することも考えられ、計算値以上に局所的には腐食量が多い断面が存在し得る。そこで、実際の管理では、部分的ではあっても毎年度、下床版又はウェブに設けた調査孔から内視鏡カメラをシース内に挿入してケーブルの状態を調査していた。調査の結果、図-1,3下に示すように断続的に様々な箇所で破断が確認された。



計測装置	計測内容	計測対象
水管式沈下計	たわみ量	桁、床版
き裂変位計	目地開き量	桁、床版(セグメント)
温度計	温度測定	桁内外

※PCケーブルの破断が多かった第一径間を中心に実施

図-2 モニタリング内容と計測位置



※モニタリング開始年を「X」としている

図-3 たわみ量（沈下計）の計測値

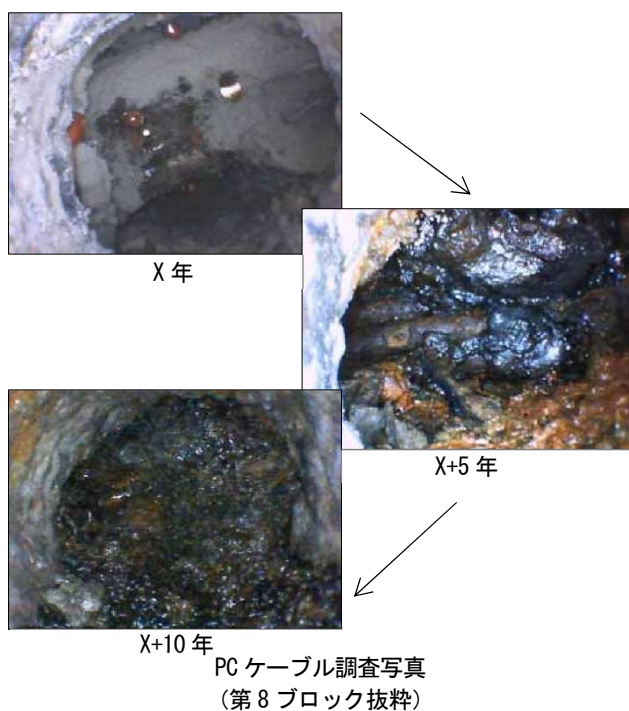
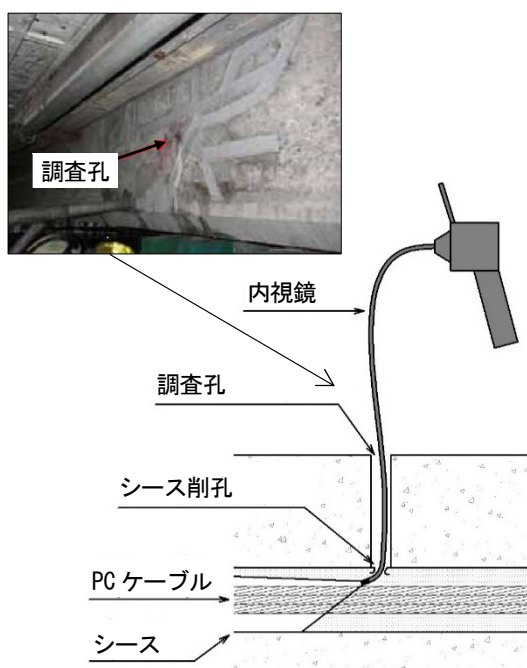


図-4 PCケーブル内視鏡調査概要

加えて、**図-5**に示すように、温度変化とセグメント継目間の目地開き量の履歴ループ形状も分析されていた。その結果、箇所毎に挙動にばらつきが見られた。そして、箇所によっては、PC 桁のような直線的な履歴性状から、RC 桁のような逆 S 字状やループ形状に見えるような性状への変化が見られた。

以上から、X+10 年目からは、特殊車両の通行の制限や追加の補強が行われた。結果としては、架け替えまでの間、無事供用されたものの、監視の閾値の設定には課題を残したとも言える。しかし、詳細な非破壊検査が開発されたとしても状態の把握には限界があり、損傷が大きい場合、調査・構造計算に頼るだけとはならないことも想定される。

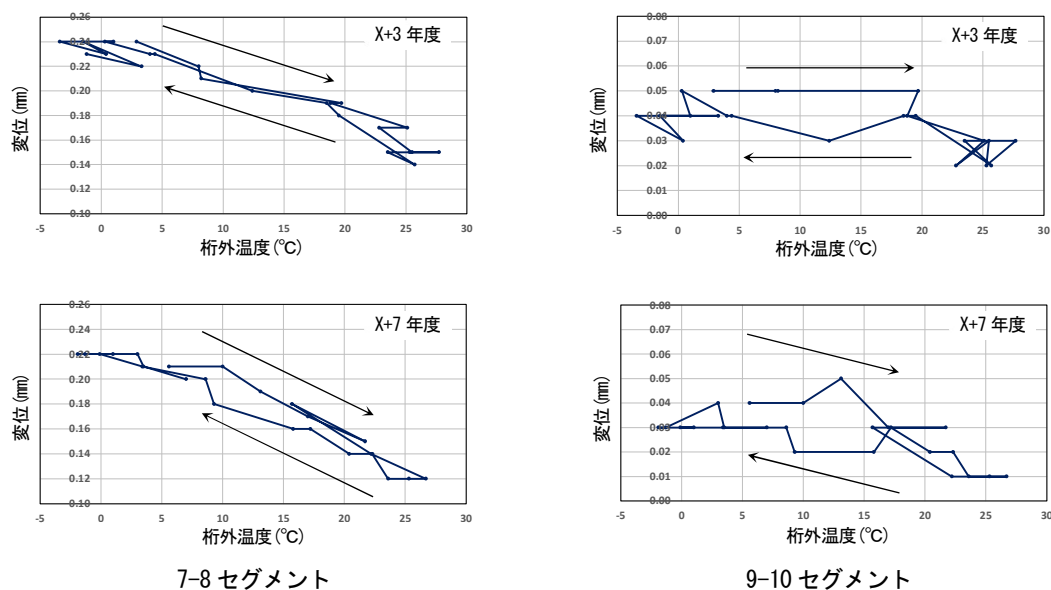


図-5 セグメントの温度-目地開きの履歴

3. AI による異常検知の試行

3. 1 分析方法・手法の選定

試行にあたっては、最も単純に、各時刻歴データ内で異常を検知することを試みることにした。異常検知のための予測モデルは、斜面防災やダム管理などの他分野でも適用が試された、LSTM (Long Short Term Model、**図-6**) により構築した。予測モデル構築手順を**図-7**に示す。1 か月前までの時系列データを学習させ、その後の 1 か月のデータが予測値と適合するかどうかを調べる。

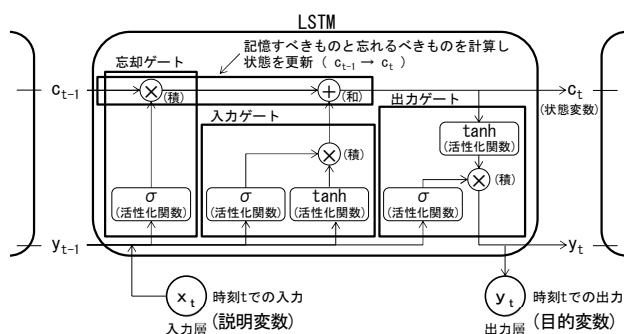


図-6 LSTM モデルの概要

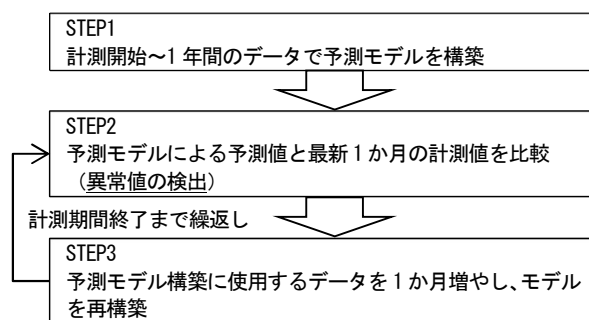


図-7 予測モデルの構築手順

3. 2 分析結果

第一径間第7ブロック及び第9ブロックのたわみ量を目的変数（出力値）とした。予測にあたっては、目的変数となるたわみ量と説明変数（入力値）となる桁内温度を学習させた。説明変数とは目的変数に対して何らかの原因となっている変数を言い、温度は、計測も容易であり、かつ、自動車の走行に比べてもある程度定常的に変化する量であることから選択した。学習後は説明変数である桁内温度のみ入力すれば、目的変数であるたわみ量の予測値が出力される。

第7ブロックのたわみ量の予測値と計測値の比較を図-8 から図-10 に示す。図-8 から図-10 は、緊張力が低下しPC 桁からRC 桁のような挙動に変化したと考えられる時期（図-9）、それよりも前（図-8）、図-9 よりも後で、更に緊張力が低下しRC 桁化が進行していると考えられる時期（図-10）の3時期に対応する。グラフの波線（濃い線）は予測値、直線（薄い線）は観測値を示している。

図-9 では、X+6 年末ごろから予測値と観測値がずれ、たわみ量の増加が予測値よりも大きかった。

図-10 でも、X+10 年1 月以降の予測値と観測値にずれが見られ、これ以後の期間でPC ケーブルの破断が生じていた可能性を疑うことができそうである。図-3 下を見ると、図-10 の結果と符合するように、実際にもケーブルの破断が確認されている。

履歴形状がPC 桁特有の直線状の形状であった時期の結果である図-8 においても、X+3 年7 月末の予測値と観測値にずれが見られる。図-3 下に示すように、ケーブルの破断は確認されていないものの、図-9, 10 の結果からは、ケーブルに含まれる素線の破断進行が疑える。

第9ブロックのたわみ量の予測値と計測値の比較を図-11 から図-13 に示す。比較時期は第7ブロックと同様の3時期としている。

第9ブロックにおいては、第7ブロックでずれが見られた「X+3 年」及び「X+7 年」では、ずれは見られなかった（図-11, 12）。一方、「X+10 年」では第7ブロック同様ずれが見られた（図-13）。

結果の差異について、PC ケーブルの破断状況に着目する。PC ケーブルの破断は第7ブロックに近い位置で生じており、位置が近いことにより第7ブロックの方が緊張力の低下が大きかったとすると、たわみ量の差をずれとして捉えられた可能性がある。一方で、近接した箇所でも差が生じるということは、ひとつのデータのみで状態を判断した場合には変化の兆候を見逃す可能性があるとも言える。

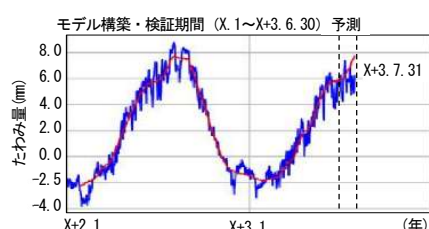


図-8 たわみ量の予測値と計測値の比較
(第7ブロック, X+3.7.31 時点)

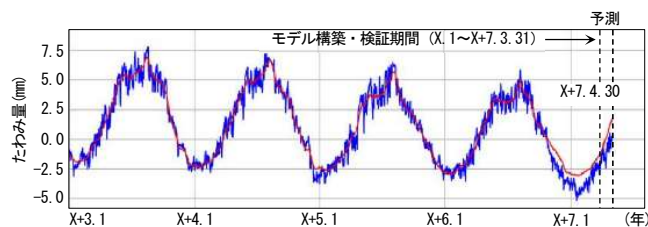
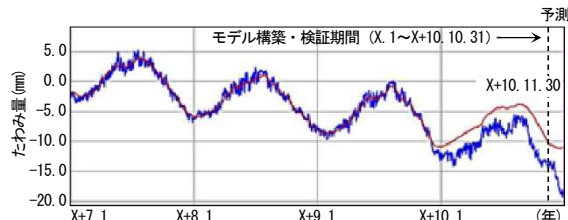
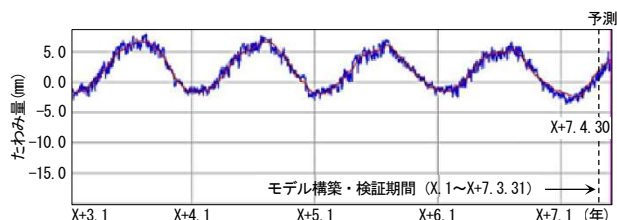
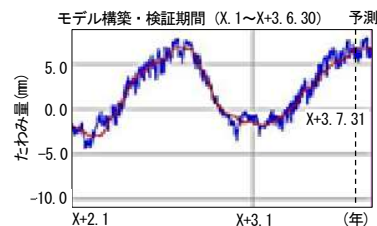
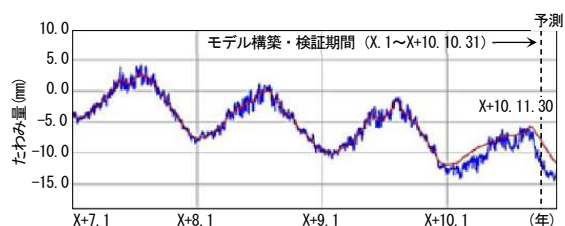


図-9 たわみ量の予測値と計測値の比較
(第7ブロック, X+7.4.30 時点)



き裂変位計について、桁内温度を説明変数とし、セグメントの目地開き量を目的変数として同様の分析を行った。以上をまとめた結果を表-1 に示す。たとえば、10-11 セグメントでは、X+6 年以降、連続して異常の兆候が示されている。セグメント箇所は内視鏡カメラによる PC ケーブルの状態の調査は行われていない。しかし、上述のとおりたわみ量の予測値の分析からは、AI を用いた分析が有効であると考えられるため、素線の破断が断続的に繰り返されていた可能性が推測される。モニタリングと詳細調査を組みあわせ、都度、モニタリング結果の解釈を繰り返していくことで、モニタリングを用いた管理の有効性が向上させられると考えられる。

表-1 き裂変位計 異常検出結果一覧

[illegible]

□ : 異常（予測値と計測値のずれ）が確認された月

4. 結 論

モニタリングデータから異常を分析する方法として、AI 技術の活用が期待できることが分かった。

実際に本橋でも行われたように、橋の状態の評価には様々なデータや調査結果を突き合わせた工学的な判断が必要である一方、たとえば詳細な調査の必要性を判定するうえで、この程度の AI の活用でも参考になると考えられるものであった。活用においては、状態の変化を見逃さないために複数のデータを分析する必要があると考えられる。なお、本研究においては単純に時刻歴データで分析を行ったが、様々なデータを複合的に扱い、データどうしの関係性も含めて分析を行った場合には異なる結果が得られる可能性がある。そのため、関係性を考慮した場合などの分析が進められることが期待される。

5. 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、ご指導いただきました白戸室長をはじめ、橋梁研究室並びに道路構造物研究部の皆様に深く感謝の意を表します。

所属 協同エンジニアリング株式会社