

## 報告

## ASR を対象とした劣化要因判定の AI 点検システム

橘吉宏\*, 古村崇\*, 四津敬子\*\*, 野村昌弘\*, 金山健一\*\*\*, 橋本洋一\*\*\*

\* 博(工学), (株)フルテック (〒932-0031 富山県小矢部市岡 312)

\*\* (株)フルテック (〒932-0031 富山県小矢部市岡 312)

\*\*\* (株)インテック先端技術研究所 (〒933-8777 富山県高岡市京田 626-1)

橋梁点検時における床版の ASR 発生の判定は、亀甲状のひびわれやハンチでのひびわれの有無、ASR ゲルの滲出の有無、地覆部の ASR ゲルの滲出を伴うひびわれの有無などの情報によるが、一般に高度な専門家の知識を有する。本文は、損傷情報に加え、周辺環境に関する情報も加味した学習データから AI モデルを生成し、ASR 発生の有無の判定を行うシステムについて、その内容と適用例について報告する。

キーワード: ASR, 点検, 人口知能, コンクリート部材

## 1. はじめに

令和 6 年 3 月に道路橋定期点検要領が改定され、報告様式の見直しが行われた。主な変更点は、「健全性の診断の区分」の根拠の一部となる技術的評価として、「活荷重」、「地震」、「豪雨・出水」等に対する性能評価の記入、措置の考え方に大きく影響する特定事象の有無の記入である。特定事象とは、「疲労」、「塩害」、「アルカリ骨材反応」(以下、ASR)、「洗堀」、「防食機能低下」であり、健全性の診断の区分の決定にどう影響したのかの記録を、適宜残すことが求められている。

特定事象のうち ASR の有無については、初期段階では外観的な変状からはその判断は難しく、机上調査による対象地域の地層や岩体調査からの ASR の可能性の検討や、近隣の構造物での ASR 発生から可能性の検討を行うことが基本となる。また、ASR で床版下面に変状が生じた場合、疲労によるひびわれと混同しやすいため、亀甲状のひびわれの有無や荷重作用の少ないハンチでのひびわれの有無、張出し床版側面のひびわれ、あるいは、地覆部などに ASR ゲルの滲出を伴うひびわれの発生の情報が ASR の有無の判定の参考となり<sup>1)</sup>、一般には、専門知識を有する技術者の知見により判定される。

このような専門知識を有する技術者の判定に対して、最近では AI による一次判定が可能になってきている<sup>2)</sup>。AI による判定は、ASR の有無を AI に学習させ、学習済みモデルに条件を入力することで、専門家でなくても即座

に判定することができる利点を有する。本報告は、橋梁点検時に作成する損傷図を利用することを前提にした AI で ASR の有無を一次判定するシステムについて、システムの構造および学習データの作成方法を説明し、ASR を生じた実橋床版に適用した結果について報告する。

## 2. ASR により損傷を受けた RC 床版

## 2.1 ASR により損傷を受けたコンクリート構造の特徴

コンクリートの ASR は、コンクリート中のアルカリ性の強い溶液に骨材に含まれる反応性シリカが溶解して、溶解物が集合して ASR ゲルを形成し、この ASR ゲルが吸水膨張する現象である。ASR によるひびわれは、吸水膨張により生じ、ひびわれ発生状況は内部拘束や外部拘束の影響を受ける。この給水膨張は、コンクリート内部の相対湿度が限度以上になったときに生じ、相対湿度 80%が ASR 発生の限界相対湿度であり、85%以上で膨張量は急激に増大することが確認されている<sup>3)</sup>。実構造で表面付近のコンクリートは相対湿度が 80%程度で、表面から 10cm のコンクリート内部では 90%を超えることが報告されている<sup>4)</sup>。

内部拘束によるひびわれは、主に相対湿度による膨張量の差で生じるひびわれであり、亀甲状のひびわれが特徴的である。一方、外部ひびわれは、主桁や横桁などの床版の拘束条件に影響し、様々なひびわれ発生のパターンがある。

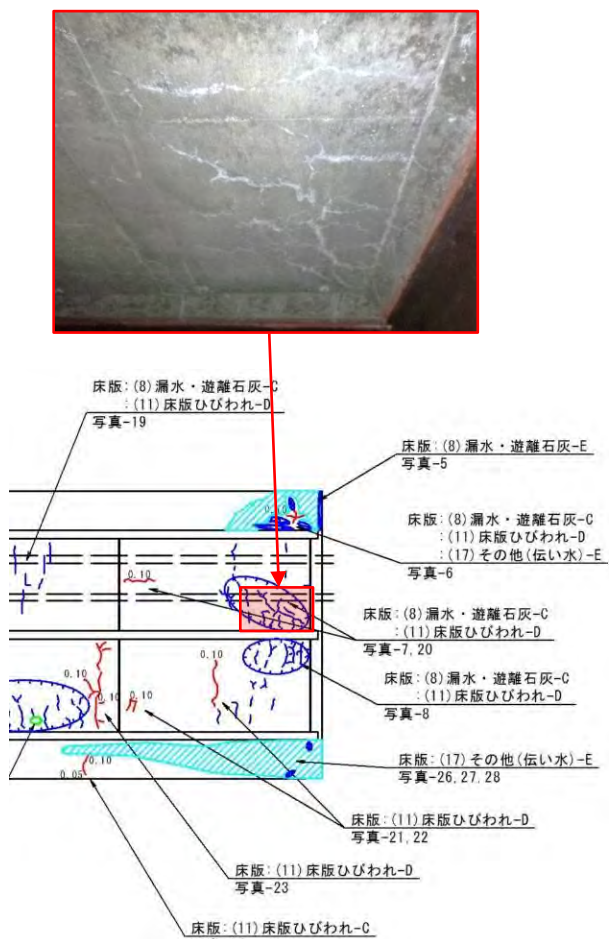


図-1 支間部での損傷状況と損傷図の例

## 2.2 損傷状況と記録

橋梁点検は、まず、橋梁の全体写真を撮影し、重要な部分や損傷が確認された箇所や潜在的に損傷が予測された箇所について、近接撮影を行う。撮影された箇所は明確に識別され、これを基に損傷図が作成される。損傷図には、ひびわれに加え、剥離、鉄筋露出、遊離石灰、漏水などの情報が記入され、写真の記録や診断結果などを含めて点検調査としてまとめられる。図-1, 2は、ASRを生じた床版の近接撮影とその部位の損傷図を示した例である。図-1は支間部、図-2は張出部である。図-1の例では、桁端部に遊離石灰を伴う亀甲状ひびわれが認められ、橋軸直角方向のひびわれも混在する。また、図-2に示す例では、亀甲状のひびわれは必ずしも規則正しいものではなく、橋軸方向のひびわれが連なることが特徴的である。このような損傷状況に対して、専門知識を有する技術者の知見によりASRの有無が判定される。

## 3. 劣化要因判定のAIシステム

上記のような技術者判定に対して、AIシステムによる判定を試みた。ここでは、AIシステムについて説明する。

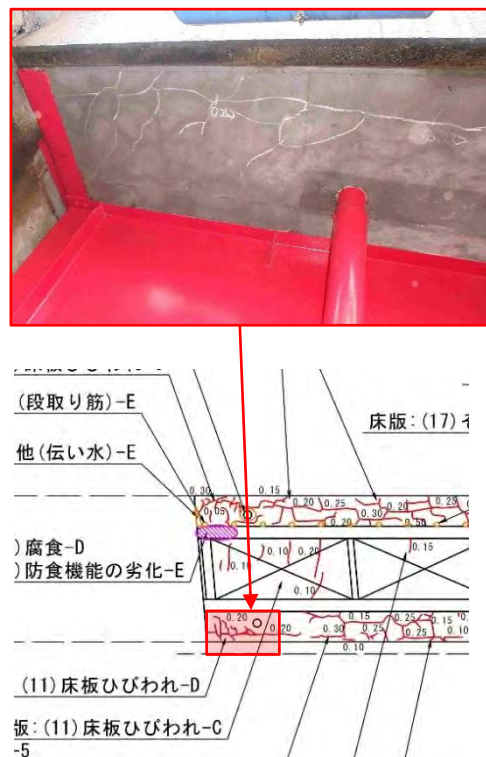


図-2 張出部での損傷状況と損傷図の例

### 3.1 学習モデルの作成方法<sup>5)</sup>

AIシステムでは、図-3に示すように、正解のある学習データを入力として与え、学習モデルが作成される。ここで、学習モデル作成処理として、機械学習による方法を選択した。

具体的なモデルとしてはリッジ回帰を選択し、ASR発生の有無の確率モデルとするため、式(1)のロジスティックシグモイド関数をリンク関数として用いた。この関数は、図-4に示すように、確率としての0~1の値であり、1.0に近いとASRの発生の確率が大きい特性を有する。ただし、ASRの可能性が高いと判断するしきい値は、必ずしも0.5ではなく、状況に応じて適宜変更することができる。この関数では、構造物の情報が説明変数Xとリッジ回帰の回帰係数Bで表される。

$$P = [1 + \exp\{-(B_0 + B_1 \cdot X_1 + B_2 \cdot X_2 + \dots + B_n \cdot X_n)\}]^{-1} \quad \text{式(1)}$$



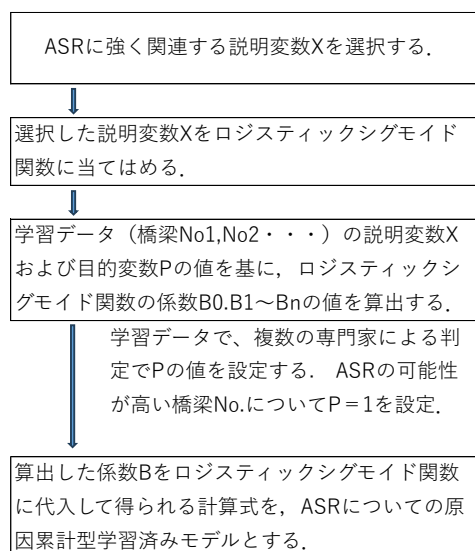
図-3 学習モデルの生成



図-4 ロジスティックシグモイド関数の確率モデル

表ー1 説明変数 X と回帰係数 B

番号	説明変数名	変数X	係数B
1	桁下条件(河川or陸)	1 or 0	B1
2	海岸からの距離(100mまで)	1 or 0	B2
3	海岸からの距離(100m~300m)	1 or 0	B3
4	海岸からの距離(300mを超える)	1 or 0	B4
5	補修・補強材の損傷程度 c	1 or 0	B5
6	補修・補強材の損傷程度 e	1 or 0	B6
7	最大ひび割れ幅	mm	B7
8	ひび割れ間隔	m	B8
9	最大ひび割れ密度	m/m2	B9
10	ひび割れの形状・角度／亀甲状	1 or 0	B10
11	ひび割れの形状・角度／格子状	1 or 0	B11
12	ひび割れの形状・角度／1方向(橋軸方向)	1 or 0	B12
13	ひび割れの形状・角度／1方向(橋軸直角方向)	1 or 0	B13
14	ひび割れの形状・角度／2方向	1 or 0	B14
15	漏水・遊離石灰／ひび割れからの遊離石灰の有無	1 or 0	B15
16	漏水・遊離石灰／ひび割れからの錆汁の有無	1 or 0	B16
17	変色の有無／エフロレッセンスおよび白華	1 or 0	B17
18	変色の有無／コンクリート表面の錆汁の滲出	1 or 0	B18
19	ポップアウトの有無	1 or 0	B19
20	うき(損傷程度e)の部材に対する割合	%	B20
21	剥離・鉄筋露出／剥離の有無	1 or 0	B21
22	剥離・鉄筋露出／鉄筋露出の有無	1 or 0	B22
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.

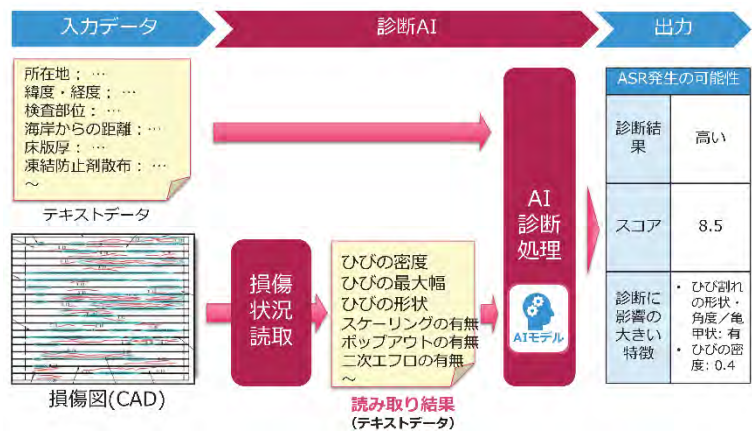


図ー5 学習モデルの生成手順

ASR が発生している可能性の有無を目的変数(関数 P)として、学習データにリッジ回帰を適用した。ここで、表ー1 に説明変数の一部を示す。図ー5 に、リッジ回帰による学習モデルの生成手順を示す。

最初に、ASR に関連する説明変数を選択する。学習モデルを作成するにあたり、説明変数の組合せの選択により AI の評価指標が変化する。評価指標のひとつである正解率が 80%以上となるように説明変数の選択を行った。ここで学習データとして、富山、秋田、能登地方の橋梁で、229 件のデータを収集し、著者らのうち学位を有する 3 名で ASR 有無の判定を行い、点検調査書の記録を基に学習データの説明変数 X の設定を行った。その後、リッジ回帰の回帰係数 B が算出されて、ASR に関する判定理由の解釈がしやすい学習モデルとなる。

なお、図ー5 に示す手順は、床版に加え、下部工やコンクリート主桁に対しても適用可能であり、それぞれの構



図ー6 AI システムのイメージ

造部位で学習モデルが生成されている。

### 3.2 AI による劣化要因の判定

生成された学習モデルに対して、図ー6 に示すように、構造物の情報を入力して、判定結果が出力される。構造物の情報として、CAD データとして作成される損傷図から(例えば前出の図ー1, 2)、特定のルールに従って、損傷情報を解析して、損傷特徴量を自動算出するサブシステムを整備している<sup>6)</sup>。このサブシステムでは、主桁と対傾構で囲まれた範囲を一つのパネル単位として分割し、自動算出にあたり分割されたパネル毎に損傷情報の解析を行うこととしている。ただし、表ー1 の No.1~No.4 に示すような説明変数は、点検調査から読み取る必要がある。

入力データに対して、AI 判定モデルによる診断処理がなされ、判定結果が出力される。判定結果は、目的変数(関数 P)と関係するスコアとして、その 10 倍の値が表示され、さらに ASR の可能性とスコアに影響の大きい説明変数名が表示される。この表示された説明変数名が、ASR 判定の理由として利用できるようになっている。

## 4. 実橋におけるシステム適用例

ASR により損傷を生じた床版に対して、本システムを適用した結果について報告する。

### 4.1 対象とした橋梁

対象とした橋梁の床版には、床版の耐久性を保持する目的で、高靱性繊維補強コンクリートで橋面コンクリート舗装による補修が行われた床版である。床版下面の状況と損傷図を図ー7 に示す。床版下面に白色析出物が認められたが、橋軸直角方向のひびわれが多く発生していた。橋台には ASR が疑われるひびわれが発生しており床版にも ASR が疑われたため詳細調査を実施した。ASR に対する詳細調査として、床版からコアを採取して、ゲルフルオレッセンス法による ASR ゲルの確認、圧縮強



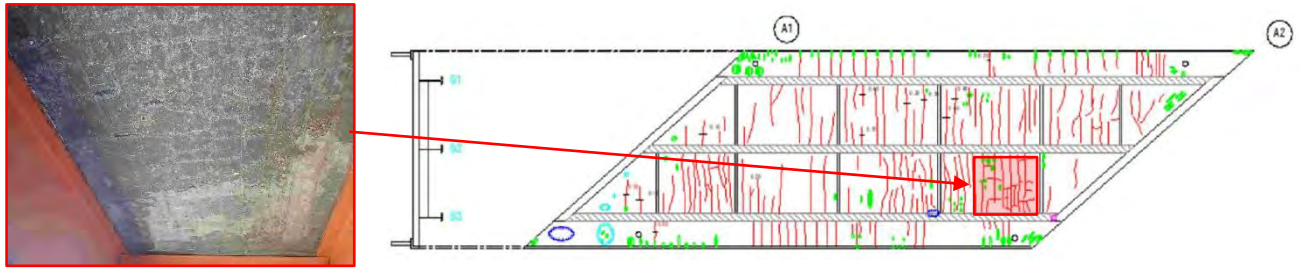


図-7 学習済みモデルに適用した床版の損傷状況と損傷図

度と静弾性係数の測定を実施している。コアの採取は、床版支間中央部と水が溜まりやすい張出部の2箇所としている。

図-7は、ゲルフルオレッセンス法によるASRゲルの確認結果である。ゲルフルオレッセンス法では、特殊配合試薬をコンクリート試験片に塗布し、暗室で紫外線を照射すると、ASR反応が生じたゲル部分が緑色に発光する。図-8は張出部でのASRゲルの発色であり、支間部でも同様に発色が認められゲルが検出された。表-2は圧縮強度と静弾性係数の測定結果である。圧縮強度は、建設当時の床版の設計基準強度である $18\text{N/mm}^2$ を上回っているものの、静弾性係数は張出部で $8.1\text{kN/mm}^2$ であり、健全なコンクリートに比べ約1/3に低下していた。詳細調査の結果、ASRゲルの確認と特徴的な静弾性係数の低下<sup>7)</sup>がみられたことから、劣化要因としてASRを判定した。

表-2 圧縮強度と静弾性係数

コア位置	圧縮強度 $\text{N/mm}^2$	静弾性係数 $\text{kN/mm}^2$
張出部	21.6	8.1
支間部	34.5	26.8

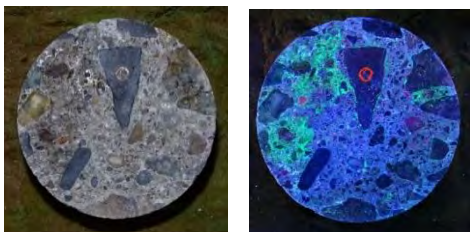


図-8 ゲルフルオレッセンス法によるASRゲルの検出

#### 4.2 AIの適用結果

図-7に示す損傷図をシステムに入力して、AIによる判定を行った。その判定結果を表-3に示す。

AIスコア7.1はASR発生の可能性が高いとの判定であり、判定理由に大きく影響した事象として、橋軸方向のひびわれがあること、ひびわれ密度が大きいことなどが出力された。

表-3 判定結果の出力

診断項目	AI診断結果	AIスコア	AI診断理由(影響結果に影響の大きい特徴)
ASR発生の可能性(AI)	高い	7.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>・「ひび割れの形状・角度/1方向(X方向→橋軸方向)」あり: 3.2</li> <li>・最大ひび割れ密度: 1.6</li> <li>・「ひび割れの形状・角度/2方向」あり: 0.7</li> <li>・剥離・鉄筋露出/鉄筋露出の有無 あり: 0.6</li> <li>・「ひび割れの形状・角度/1方向(Y方向→橋軸垂直方向)」あり: 0.3</li> <li>・「漏水・遊離石灰/ひび割れからの遊離石灰の有無」あり: 0.1</li> </ul>

#### 5. まとめ

橋梁定期点検で特定事象として扱われるASRについて、その発生有無の判定を行うAIシステムについて説明および適用例を示した。橋梁の定期点検では、最終的には、技術者による判定および診断がなされるが、AIによる判定結果は、数値や判定理由が記録に残せ、技術者が診断を行う上で有用な情報となる。このようなAI技術を用いることで、今後の点検技術のさらなる合理化および高度化につながるものと期待できる。

#### 参考文献

- 1) 橘吉宏；既設床版における技術，橋梁と基礎，2020-8,pp.27-30,2020.
- 2) 例えばNETIS：KK-230058-A，NETIS：HR-210002-A
- 3) 鍵本広之，川村満紀；大型コンクリート円柱内部における湿度およびひずみ測定によるASR表面ひび割れ発生過程の解明，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.201-211,2009.
- 4) 有馬直秀，石川祐一，青山實伸，川村満紀；実際のASR劣化部材におけるひび割れ発生過程，コンクリート工学年次論文集，Vol.36,No.1，pp.979-984,2013.
- 5) 特開 2023-104482
- 6) 特開 2023-115969
- 7) 野村昌弘，青山實伸，平俊勝，鳥居和之；北陸地方における道路構造物のASRによる損傷事例とその評価手法，コンクリート工学論文集，13巻，3号，pp.105-114,2002.

(2024年7月12日受付)