

論文 コンクリート高架橋の変状未発生部位の劣化リスク評価に向けた かぶり厚さと表層品質指標に関する一検討

阿部 睦樹*¹・岸 利治*²

要旨：コンクリート高架橋の変状の多くは、鉄筋腐食によるコンクリートの剥離剥落である。本研究は、高架橋の変状未発生箇所の劣化リスクを評価することを主眼とし、過去の検査データによる変状発生部位の把握と、鉄筋腐食による剥離剥落に影響がある支配的要因を統計手法を用いて分析し、劣化リスク評価における着眼点を明らかにした。また、かぶり厚さと中性化の経時的な関係性を考察した。

キーワード：維持管理、かぶり、中性化、流水試験、吸水試験、回帰分析

1. はじめに

東日本旅客鉄道株式会社のコンクリート橋は、7 割以上が経年 30 年以上となっており、経年の増加に伴い変状数量も増加している。そのため今後は、優先順位を決めた予防保全的な取り組みが重要となる。ここで、コンクリート高架橋（以下「高架橋」と称す。）の変状未発生箇所の劣化リスクを変状の発生以前に評価することができれば、対象となる構造物・部位の優先順位の決定に大いに資すると考えられる。

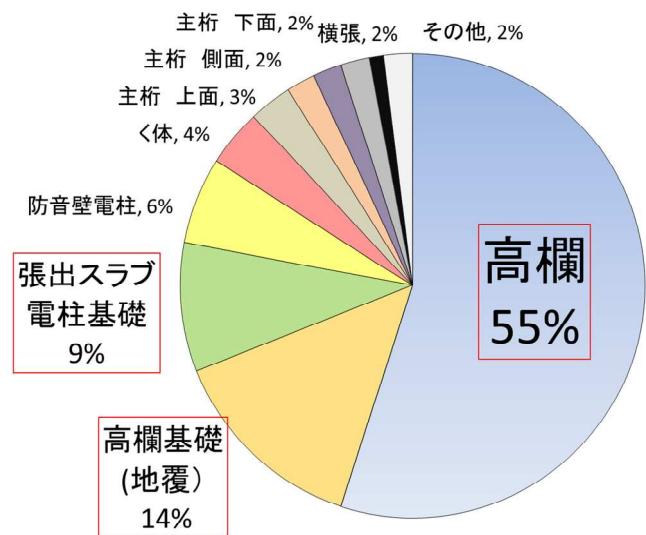
高架橋の変状の多くは、鉄筋腐食によるコンクリートの剥離剥落（以下「剥離剥落」と称す。）である。そこで、将来の検査における着眼点の提案を行うことを目的に、まず、過去の検査データから高架橋で変状が多く発生する部位を把握した。次に、剥離剥落に影響を与える要因を統計手法を用いて把握した。具体的には、石橋らの研究¹⁾で指摘されている「かぶり（厚さ）、中性化残り、雨水の影響」の 3 つの要因が剥離剥落に与える影響の程度を統計手法を用いて把握した。なお、石橋らの研究では、雨水の影響を雨掛かりの有無に区分して論じているが、本研究では、雨水の影響の程度を表す指標として、物質透過性を代表する指標であるコンクリートへの水の浸透しやすさを用いた。コンクリートへの水の浸透しやすさを評価する方法としては、流水試験²⁾と吸水試験³⁾を採用した。そして、かぶり（厚さ）、中性化深さ（中性化残り）、流水距離、吸水係数の各指標を用いて統計分析を行い、それぞれの指標が剥離剥落に与える影響の程度について検討した。

2. 検証方法

2.1 高架橋変状部位の把握

過去の検査データを集積している土木構造物管理システムにより、高架橋の剥離剥落の変状部位を把握した。その結果、高欄、高欄基礎、張出スラブ・電柱基礎の順

に変状が多いことが分かった。（図－1）。この傾向は、ほぼ石橋らの研究¹⁾で指摘されている内容と同じである。



図－1 高架橋変状部位

2.2 剥離剥落要因の把握

近い将来に変状が発生するであろう箇所を特定するためには、現状における変状の有無と各種要因との因果関係を明らかにする必要がある。そこで、変状が多い部位に焦点を当て、剥離剥落に対する各種要因の影響の程度について検討する。「かぶり、中性化残り、水の浸透しやすさ」の各データを現地試験により収集するため、検査記録を用いて、現時点で高欄、高欄基礎、張出スラブ・電柱基礎に鉄筋腐食や剥離剥落が発生しており、塩害などの影響を受けない内陸部の一般的な環境下における、高架橋を無作為に抽出した。その後、現地確認を行い、変状箇所と健全箇所（変状未発生箇所）が近接しており、各試験を実施できる高架橋を対象箇所として選定した（写真－1）。また、対象箇所近郊には、既に鉄筋腐食が発生し、断面補修を実施した箇所があったことから、補

*1 東日本旅客鉄道（株）長野支社 長野土木技術センター 助役（正会員）

*2 東京大学生産技術研究所 人間・社会系部門 教授（正会員）

修箇所の健全性を確認するため調査対象とした。実施した試験は、(1) かぶり（厚さ）測定、(2) 中性化深さ測定、(3) 流水試験、吸水試験である。また、試験箇所は雨掛りを受ける箇所とした。



写真-1 高架橋試験箇所

3. 実地検証

(1) かぶり厚さ

高架橋の剥離剥落箇所のかぶり（厚さ）は、スケールを用いてかぶり（厚さ）が最小となる箇所を計測した。健全箇所の計測方法は、電磁誘導法であるプロフォーメーターを用い、配力筋3本のかぶり（厚さ）を計測し最小値を調査箇所のかぶり（厚さ）とした。

(2) 中性化深さ

中性化深さは、ドリル法により実施した。剥離剥落箇所の測定は、剥離剥落範囲の外縁付近とし3箇所を削孔し（削孔箇所の間隔は5cm程度に統一）その平均値を採用した。健全箇所の削孔は、鉄筋位置を調査した後に剥落箇所と同条件で3箇所の平均値とした。

(3) 水の浸透しやすさ

水の浸透しやすさは流水試験と吸水試験により測定した。それぞれの試験方法を下記に述べる。

a) 流水試験

流水試験（写真-2）は、少量の水をコンクリート表面に滴下させた時の流下距離を測定する試験である。試験方法は、測定箇所に専用の治具を設置し、デジタルマイクロピペットから滴下する水量を15μl、時間間隔を60秒とし、1測定箇所あたり滴下回数を5回とした。測定箇所は、剥離剥落箇所の外縁付近3測点とし平均値を採用した。健全箇所は、表面の凹凸や気泡跡の少ない箇所とした。また、荻原らの研究⁴⁾において、流水試験は、コンクリート内部含水率が低い場合、具体的には1日以内に降雨が無い場合に適用可能であるとの知見が示されていることから、これら条件に合致した試験箇所でデータを採取した。

b) 吸水試験

吸水試験（写真-3）は、コンクリート表面に設置し

たカップ（φ100）を水で満たして水位の減少から吸水特性を、評価する試験であり、本研究では、酒井らの研究⁵⁾で提案されている式(1)に示す吸水換算指標としての管半径により評価した。測定箇所は、剥離剥落箇所の外縁付近を基本とし、2測点を測定してその平均値を採用した。健全箇所は表面の凹凸や気泡跡の少ない箇所とした。

$$r = \frac{6\mu t}{\gamma \cos \theta} \left[\frac{\Delta x}{\Delta t} \right]^2 \quad (1)$$

r :管半径, γ :界面張力, t :浸潤に要する時間,
 θ :接触角, μ :粘性係数, x 浸潤距離



写真-2 流水試験

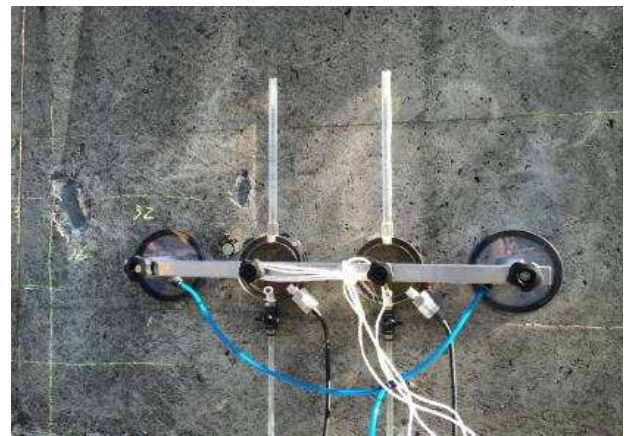


写真-3 吸水試験

4. 測定結果と変状要因分析

4.1 測定結果

図-2, 3, 4に各試験結果を示す。図-2は、かぶり（厚さ）と中性化深さの関係を表している。図線1はかぶり（厚さ）と中性化深さが等しい位置であることを示しており、これより左に位置するものは、かぶり（厚さ）よりも中性化が進行していることを意味している。図線2は、かぶり（厚さ）に対して中性化残りが10mmの位置であることを示している。これは、一般的に言われている鉄筋腐食発生

境界である。この線より左に位置すると、鉄筋の不動態皮膜が破壊され、鉄筋が腐食すると言われている。しかし、図線1や図線2のような斜め45度の線で、変状の有無が明確に区別できているというわけではない。かぶり（厚さ）図線3が変状の発生の有無の境界として有意であるようにも見える。また、図中のA群に着目すると、図線2より左に変状なしのマーカがある一方で、図線2より右に変状ありのマーカがある。したがって、一般的に言われているように、かぶりが薄く中性化が進行しているものは変状発生のリスクが高いようにも見えるが、かぶりが薄く中性化が進行しているにも拘わらず変状が発生していない箇所も見受けられることから、従来の解釈には再検討の余地があるようにも思われる。

図-3は流水試験により求めた流水距離とかぶり（厚さ）の関係である。変状の有無に対しては、やはりかぶり（厚さ）図線4が支配的であることは図-2と同様の傾向であるが、ここで注目すべきは、図-2とは異なり、変状の有無の間に右下がりの明確な境界（図線5）が認められることである。図-2ではA群の2点の間に逆転が見られたが、図-3ではA群の2点の逆転は解消されており、右下がりの斜め線（図線5）が変状の有無の境界線として明確に認められる。このことから、主たる支配要因であるかぶり（厚さ）に表層の緻密さの指標である流水試験距離を加味することで、変状の発生リスクをより適切に評価できるのではないかと考えられる。また、変状の発生は、かぶりが薄く水が浸透しやすいものから、右下がりの図線6が時間の経過とともに右上にシフトするように進行してきたものと推察され、B群として表記した変状未発生箇所が次に変状が発生するリスクが高い変状予備軍と考えられる。このように、当該時点での変状の有無を区別するのみならず、時間の経過に伴って、これまでの変状がどのような順序で生じ、今後どのような順序で発生するのかが推定できれば、対象の優先順位付けをする上で極めて有用である。

図-4は、かぶり（厚さ）と吸水試験結果の関係である。かぶり（厚さ）図線7が、変状の発生の有無の境界として有意であることは明らかであるが、吸水試験の測定数が少ないために、本研究の範囲では吸水試験結果がかぶり（厚さ）を補完する情報として有意であるかどうかの判断はできない。なお、補修箇所の健全性については、かぶり（厚さ）が十分に確保されており、結果として各試験データにおいても健全性は高いと考えられ、変状の発生リスクは低いと推察される。

4.2 統計分析

測定データを基に変状要因を分析するため、多変量解析を実施した。多変量解析では、複数の定量的変数から何らかの結果を予測することや、結果への定量的変数の

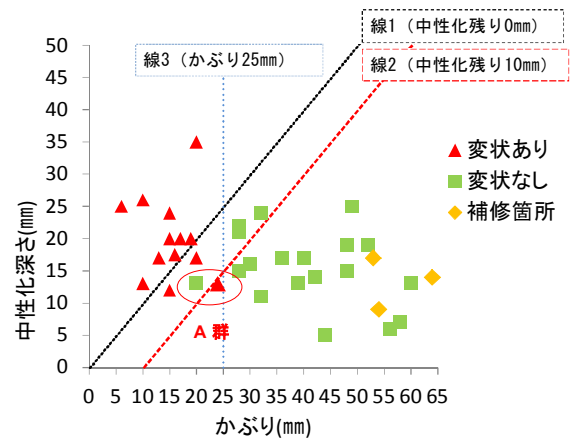


図-2 かぶりと中性化の関係

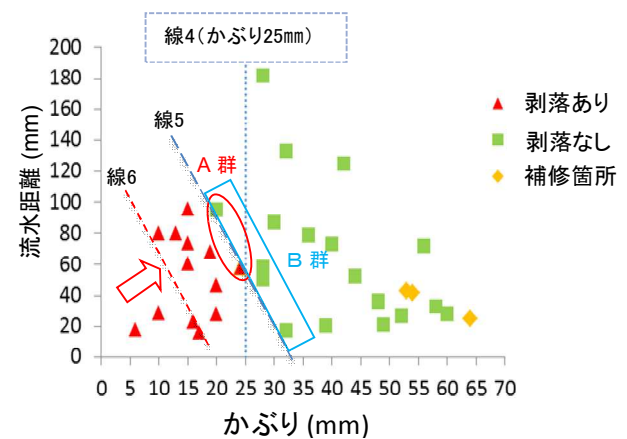


図-3 かぶりと流水距離の関係

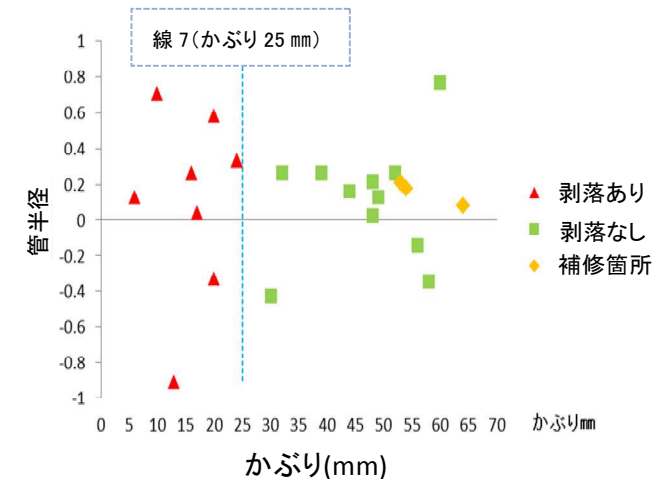


図-4 かぶりと吸水換算指標(管半径)の関係

影響力を分析することができる。今回の分析では、結果を「変状あり、変状なし」の定性的変数とし「かぶり（厚さ）、中性化深さ（中性化残り）、流水試験、吸水試験」を結果に影響を与える定量的変数とした。なお、今回の分析では、定性的変数に対する定量的変数の影響度合いを求めるため、ロジスティック回帰分析を行った。ロジスティック回帰分析は発生確率を予測する手法であり、

0 か 1 のような 2 値の定性的変数に対して、定量的変数の影響を分析する場合に最適な手法とされている。ロジスティック回帰分析に用いる数式を式 (2) に示す。影響力は、オッズ比と、その信頼性を表す P 値 (有意差) により判断した。P 値の基準は一般的に用いられている有意水準 5% 以下とし、P 値が最も小さい定量的変数を、劣化リスクを評価するうえで重要視すべき要因と考えた。

$$\log \frac{p(\mathbf{x})}{1-p(\mathbf{x})} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_r x_r \quad (2)$$

$$\frac{p(\mathbf{x})}{1-p(\mathbf{x})} = \text{オッズ比} \quad p(\mathbf{x}) = \text{発生確率}$$

$$\beta_0 \beta_1 \beta_2 \beta_r = \text{定数}$$

$$x_1, x_2 = \text{定量的変数 (変状要因のデータ)}$$

4.3 統計結果

ロジスティック回帰分析を用いて変状要因を統計分析した結果を表-1 示す。単独要因による変状有無の判断では、かぶり (厚さ) がかなり有意な指標であることが明らかとなったが、中性化深さ、流水試験結果、吸水試験結果は単独では変状の有無を判定できないことが分かった。次に、かぶり (厚さ) に他のもう一つの指標を加味した 2 つの要因による変状の有無の判断を行ったところ、かぶり (厚さ) に流水距離を加味した場合が最も有意であることが明らかとなった。かぶり (厚さ) に中性化深さを加味した中性化残りも、かぶり (厚さ) 単独よりも有意であったが、かぶり (厚さ) に流水距離を加味した場合には及ばなかった。これらの傾向から、剥離剥落に支配的な影響を与えているのはかぶり (厚さ) であるが、これを補完する二次情報として何らかの表層品質評価を加味することで、より確度の高い劣化リスク評価が可能になるものと考えられる。

表-1 統計分析結果

変状要因	有意差 (P<0.05)
かぶり厚さ + 流水距離	0.0020
中性化残り (かぶり厚さ - 中性化深さ)	0.0028
かぶり厚さ	0.0069
水の浸透しやすさ (流水試験)	0.1073
中性化深さ	0.7091
吸水試験	0.9564

5. かぶり (厚さ) と中性化深さの関係性について

図-5 は、永野らの研究において、かぶり (厚さ) と中性化深さの関係と変状の有無との相関を示したものである⁶⁾。ここでも、中性化が進行していなくてもかぶり (厚さ) が小さければ変状は生じ (A 点)、反対に中性化が進んでもかぶり (厚さ) が大きければ変状が生じない (B 点) 場合があることが示されている。図-2 で認められた逆転事例が、永野らの異なる測定でも確認されて

いることから、これまで剥離剥落に大きな影響を及ぼすと考えられてきた中性化の関与については改めて精査する必要があると考えるに至った。そこで、剥離剥落とかぶり (厚さ)・中性化深さおよび雨掛かりの有無との相関について包括的に検討した石橋らの研究¹⁾を改めて詳細に確認することとした。

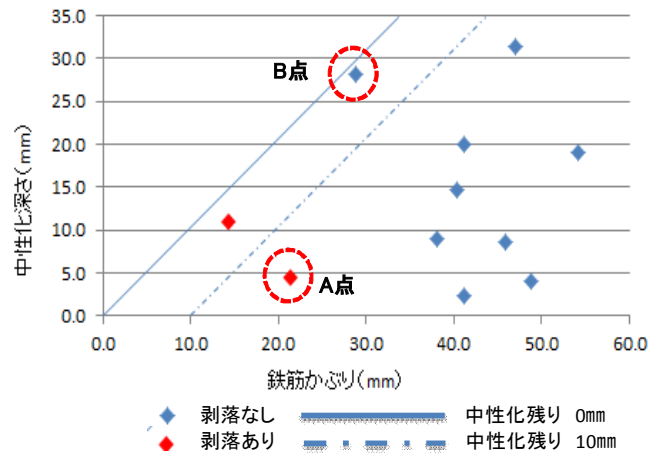


図-5 かぶりと中性化の関係

図-6 は、雨水等の影響を受ける箇所 (左図) と雨水等の影響を受けない箇所 (右図) に区分して、かぶり (厚さ) (横軸) と中性化深さ (縦軸) の関係図上に、剥落箇所 (黒塗りマーカー) と無剥落箇所 (白抜きマーカー) を色分けして表示した石橋らのデータである¹⁾。この研究では、対象データとした「1965 年以降に建設された高架橋等において」と前置きしたうえで、「鉄筋の腐食膨張圧によるコンクリート片の剥落が生じるのは、おおむね雨水等の影響を受ける箇所で中性化残り 10mm であり、雨水等の影響を受けない箇所では中性化が鉄筋位置に達し、かつかぶりが極端に小さい場合である」と述べている。雨水等の影響を受けるか受けないかが、剥離剥落が多発するか否かに決定的な影響を与えていることを明確に示したことは特筆に値する。すなわち、かぶり (厚さ) が適切に確保されていれば、雨水等がコンクリート中に浸透しない限り剥離剥落が生じることはないと解釈することができる。ただし、雨水の影響を受ける箇所での中性化が剥落に与える影響については、従来の解釈を大よそ踏襲しているものと考えられる。しかし、無剥落箇所 (白抜きマーカー) に注目して図-6 を別の視点から見ると、雨水等の影響を受けない箇所 (右図) はもとより、雨水等の影響を受ける箇所 (左図) でも、中性化が相当に進んでいるにもかかわらず剥落が生じていない箇所も相当数存在しており、注目すべき事実といえる。雨水の影響を受ける箇所で、中性化残りが 10mm を切っただけでなく、鉄筋位置まで中性化が到達しているにもかかわらず、未だ剥落が生じていない箇所が多数存在しているのは何故か。そのようなデータには、かぶり厚さ

が20mm未満のものも多く、かぶりが極端に厚いわけではない。恐らくは、雨水等の影響を受ける箇所であっても、鉄筋位置までは水が中々浸透しない場合に剥落が生じていないことが考えられるが、少なくとも中性化が鉄筋の腐食を直接支配する要因ではないことは確かだと考えられる。そこで、剥離剥落に対する中性化の関与について改めて考える。

中性化には、乾燥しやすい環境下であれば、コンクリートの粗密性により中性化の進行が決まるという特徴と、雨水等の影響を受ける箇所では、中性化の進行は抑制されるという特徴がある。ここで、剥離剥落が頻発する雨水等の影響を受ける箇所では、中性化は逆に抑制されているという土木学会コンクリート標準示方書の耐久性照査⁷⁾においても考慮されている事実は重要である。すなわち、中性化の進行は空隙構造の粗密を介して鉄筋腐食の直接的な因子となる水の浸入程度とある程度の間接的な正の相関を有している一方で、雨水等の影響によってコンクリートが湿っているほど中性化は進行しないという負の相関（逆の相関）も有していることになる。したがって、図-6の左図の剥落箇所（黒塗りマーカー）だけに着目すれば、剥落箇所と中性化残りとの間に高い相関があるように見えなくもないが、これは、中性化深さが空隙構造の粗密を介して水の浸入程度とある程度の間接的な正の相関を有しているからに過ぎないと捉えるべきと思われる。このことは、参考文献⁸⁾の総論においても指摘されている。また、土木学会コンクリート標準示方書の耐久性照査⁷⁾では、中性化の進行は、雨水の影響がある場所では、雨水の影響がない箇所に比べて1.6倍程度鈍くなる（遅くなる）としている。したがって、中性化の進行が空隙構造の粗密を介して水の浸入程度とある程度の間接的な正の相関を有しているとしても、雨水等の影響を受ける箇所（図-6左図）において、中性化深さとかぶり（厚さ）の1:1対応関係を表す斜め45度の

直線を剥落箇所と無剥落箇所の境界と考えるのは、負の相関も有する中性化の関与を過大に見積もり過ぎではないかと考えられる。そこで、中性化の関与を1.6で除すことで割り引いた図線1（仮想線）を考えてみる。このような斜線を剥落の有無の境界として考えることの妥当性は今後検証する必要があるが、少なくともこのような境界線が経年の増加に伴って図の左方から右方へとシフトして、調査時点の状況に至っているものと考えられる。なお、このように剥落の有無の境界が拡大するのは、コンクリート中に水が頻繁に浸入する箇所に限った話であり、雨水等の影響を受ける箇所でも、水が容易に侵入できない状況では、中性化が進行しても剥離剥落に至らない状況が考えられる。これは、中性化を引き起こす気体（CO₂）と腐食を引き起こす液体（水）の空隙への侵入し易さの相違によるものと考えられる。

6. まとめ

- (1) 既設高架橋では、高欄、高欄基礎、張出スラブ・電柱基礎の順で変状が多い。
- (2) 高架橋の変状に対する支配的な要因は、かぶり（厚さ）であり、高架橋の変状予備軍のリスク評価においては、かぶり（厚さ）を対象とした調査が効果的である。
- (3) 変状未発生箇所の劣化リスク評価にとっては、微破壊試験によって中性化深さだけを把握してもほとんど意味がなく、非破壊試験によりかぶり厚さを把握する方が構造物に与えるダメージもなく有効である。
- (4) 本検討においては、変状の主たる支配要因であるかぶり（厚さ）に加えて、適切な方法により取得された表層品質の良否を二次情報として加味することにより、変状未発生箇所のリスク評価の信頼性は向上すると考えられ、かぶり厚さに中性化

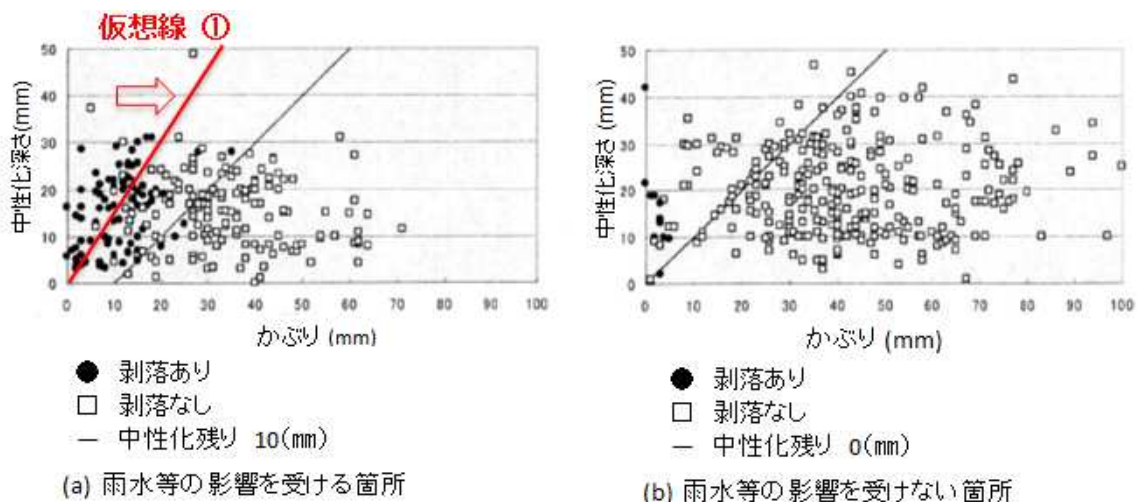


図-6 コンクリート高架橋等における、かぶり・中性化・雨水影響と剥落の関係

深さを加味した中性化残りよりも、かぶり厚さに水の浸透しやすさを直接反映した流水試験による表層品質評価を加味した方が、より確度の高い劣化リスク評価となると考えられる。

- (5) 本検討により、一般的な環境下で雨水等の影響を受ける高架橋では、中性化残り 10mm の 45 度のラインは、鉄筋腐食による剥離剥落の明確な判定基準となっておらず、判定基準ラインの妥当性や閾値について再考する必要があると考えられる。

高架橋の維持管理においては、支配的要因であるかぶりに着目することが重要であり、これからの高架橋の劣化リスク指標として相応しく、それらの調査を記録に残しデータベース化することで、効果的な維持管理に繋がれると考える。

参考文献

- 1) 石橋忠良, 古谷時春, 浜崎直行, 鈴木博人: 高架橋等からのコンクリート片剥落に関する調査研究, 土木学会論文集 NO.711V56, pp.125-134, 2002.8
- 2) 菊地健人, 岸利治: コンクリート表層品質の簡易判定手法としての繰り返し流水試験の安定性向上に関する検討, コンクリート工学年次論文集 Vol.35, No.1, pp.1873-1878, 2013
- 3) 林和彦, 細田暁: コンクリート実構造物に適用できる表面吸水試験方法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1769-1774, 2011
- 4) 荻原裕貴: 水に着目したコンクリート構造物の耐久性に関する研究, 東日本旅客鉄道株式会社技術アカデミー研究論文集, 東日本旅客鉄道株式会社, 2013
- 5) 酒井雄也, 岸利治: コンクリートの物質移動抵抗性を代表する空隙指標の確立と検証, 高速道路と自動車 Vol.57, No.10, pp.28-34, 2014.10
- 6) 永野匡敏, 岸利治: 鉄道高架橋における鉄筋かぶりおよび中性化深さの実態と変状発生との相関新幹線高架橋の維持管理手法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.1483-1488, 2016
- 7) 土木学会: コンクリート標準示方書・設計編, 公益社団法人土木学会, pp.148, 2013.3
- 8) コンクリート構造物の補修・補強編集委員会: 一実例で見る思想と実践ーコンクリート構造物の補修・補強, 株式会社産業技術センター, pp.13-17, 2016.4