

橋梁下部構造の予防保全に向けた診断技術の開発 ～下部構造の塩害と洗掘の予防保全～

堀内智司・中浦慎之介・行藤晋也・桐山孝晴

1. はじめに

全国の道路橋では、建設後50年を経過する割合が2033年には63%まで増加する¹⁾など老朽化による不具合事例の増加が懸念されている。さらに、近年、災害が激甚化・広域化・高頻度化し、例えば、令和元年台風第19号等では、橋梁下部構造が洗掘被害を受けて、長期間にわたり道路が通行止めとなって集落の孤立が発生した。地中構造物である下部構造を補修するには、コストや時間がかかる大規模な施工となることから、未然に損傷リスクに対処することが重要であり、計画的な予防保全が必要である。

そこで、本報では、橋梁下部構造の予防保全を図るため、熟練技術者の暗黙知や既往の点検データ等を基に、損傷の進展メカニズムを整理し、点検における着目点や措置の方針等を体系化する「診断セット」²⁾を検討した結果について紹介する。なお、これらの成果は診断AI²⁾の構築に取り入れることとしている。また、本報では参考文献²⁾で定義する用語を用いている。

2. 下部構造の診断セットの検討

2.1 下部構造の診断セット

表-1に示す主な損傷の種類にあわせて、下部構造の診断セットを作成する。損傷の種類には、躯体の材料に起因する損傷と、周辺環境（地盤・河川）に起因する損傷の大きく2つがあり、それぞれ、塩害や洗掘等の損傷が分類される。

また、その他の損傷として、地震に起因する損傷や、施工・設計に起因する損傷が考えられる。これらは、経年的に進展しない又は固有条件等の理由により発生するものであるが、維持管理の際に他の損傷と誤診断しないようにするため、あわせて整理を行う。

2.2 診断セットの検討内容

2.1で示した各損傷について、既往の知見や点検データ等を基に、熟練技術者のヒアリング結果も踏まえ、次の内容を取り入れた診断セットを作成した。

①進展メカニズム

②点検、診断の着目点と措置の方針

③損傷及び原因の特定に必要な情報 等

特に②は、進行段階を判断する「診断」と、それに対する方針として「措置方針」を整理したものであり、「措置方針」では、予防保全に繋がる「長寿命化（損傷原因の除去等により元の状態(健康体)に戻すこと）」のタイミングを提案している。

表-1 下部構造の診断セットが対象とする損傷

<躯体の材料に起因する損傷>	<周辺環境(地盤・河川)に起因する損傷>
1. 塩害 1.1 飛来塩分に起因する塩害 1.2 凍結防止剤に起因する塩害 1.3 初期内在塩に起因する塩害 2. アルカリシリカ反応 3. 凍害	4. 洗掘 5. 地すべり 6. 側方流動 <その他の損傷> ・地震に起因する損傷 ・施工・設計に起因する損傷

3. 下部構造の診断セットの検討結果

診断セットの内、損傷事例や被災事例（写真-1）の多い塩害と洗掘について以下で説明する。



(塩害等の損傷事例)³⁾ (洗掘の被災事例)⁴⁾
写真-1 下部構造の損傷や被災事例

3.1 塩害に対する下部構造の診断セット

発生メカニズムの観点で次の3種類を整理した。

- a)飛来塩分に起因する塩害
- b)凍結防止剤に起因する塩害
- c)初期内在塩に起因する塩害

各損傷において、損傷事例の多い部材毎に診断セットを作成した。具体的には、2014年～2018年の直轄管理橋梁の定期点検で対策区分C判定（速やかに補修を行う必要があるという判定）以上となった点検部材数を確認した結果、橋脚梁部等の割合が多く、これらの部材を対象とした。

(1)進展メカニズム

塩害の進展メカニズムについて段階毎に整理した。ここでは、塩分供給ルートが大きく異なる、a)飛来塩分に起因する塩害と、c)初期内在塩に起因す

る塩害の2種類を取り上げた。

a) 飛来塩分に起因する塩害について図-1に進展メカニズムを示す。これは架橋地点が海岸線から近距離の位置にあり潮風等の影響を受けやすい橋梁において多く見られる損傷である。コンクリート表面から塩化物イオン濃度が増加し、内部の鉄筋位置の塩分濃度がある一定以上（腐食発生限界値。例えば 1.2kg/m^3 ⁵⁾）となると鉄筋が腐食し、腐食による膨張に伴って、コンクリート表面がひび割れ剥離する現象である。ここで、図-1に示すように、コンクリートの表面ひび割れ形状はコンクリートのかぶり厚によって異なり、下部構造では上部構造と比較してかぶりが厚いため、鉄筋に沿ったひび割れよりも、コンクリート内部でひび割れが繋がって表面全体が剥離するおそれがある。

一方、c) 内在塩に起因する塩害について図-2に進展メカニズムを示す。塩化物イオン量総量規制(0.3kg/m^3)に関する通達が発出される1984年以前の構造物では、除塩が不十分な海砂や、塩化物を含む混和剤をコンクリート材料として使用していたことから塩害が発生する場合がある。大気中の二酸化炭素によりコンクリート表面の中性化が進行することで、鉄筋位置でのコンクリート内部の塩化物イオンの濃縮が進み、鉄筋の腐食が発生して鉄筋に沿ったひび割れが発生する現象である。このように、塩分の供給ルートによって進展メカニズムが異なることがわかる。

(2) 点検、診断の着目点と措置の方針

a) 飛来塩分に起因する塩害について表-2に示す。鉄筋位置における塩化物イオン濃度が腐食発生限界値を超過すると塩害が進行してしまい、比較的大規模な対策が必要となる。そのため、表面被覆等の比較的軽微な対策により長寿命化に繋げていくためには、塩化物イオン濃度が 1.2kg/m^3 未滿かつ将来予測でも 1.2kg/m^3 を超えない段階で措置すべき事が予防保全の観点からは重要である。

一方、c) 内在塩に起因する塩害について表-3に示す。外観変状が無い場合でも、既に内在塩があることから長寿命化は難しく、中性化により塩害が更に進行しないように表面被覆等により延命（損傷原因の完全な除去が困難なため、損傷の進行をコントロールして橋をより長く使うこと）する措置となる。

このように、塩分の供給ルートにより、措置方針(表-2の「長寿命化」と表-3の「延命」等)や予防

保全に繋がる段階(表-2のみ1~3-1の段階であれば予防保全に繋がる)が異なることがわかる。

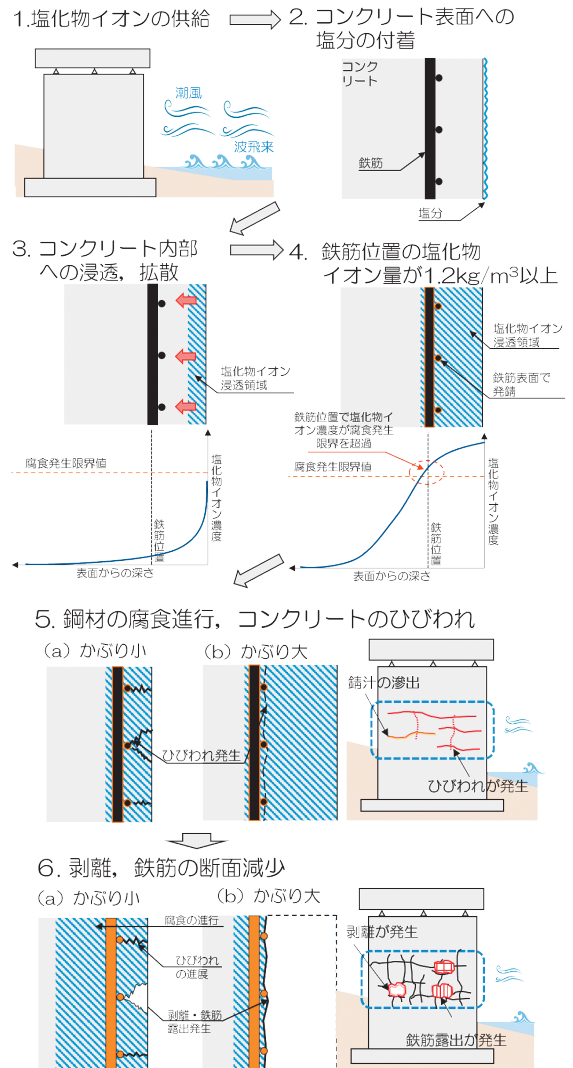


図-1 飛来塩分に起因する塩害の進展メカニズム

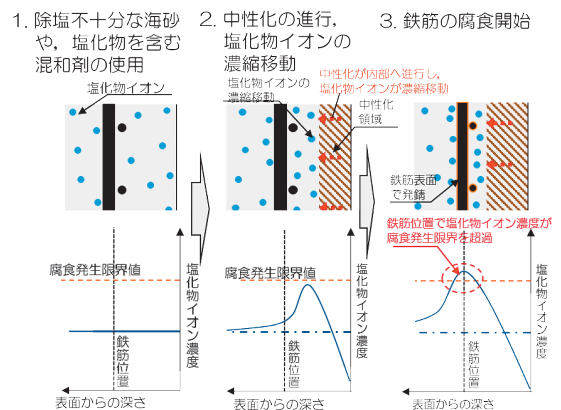


図-2 初期内在塩に起因する塩害の進展メカニズム

3.2 洗掘に対する下部構造の診断セット

洗掘は侵食作用の一つで、流水により河床等が削り崩され、河川内の橋脚等の構造物の支持力が低下して沈下・傾斜等の変状がみられる現象である。洗掘の進行速度は、橋梁側の要因と河川側の条件に

表-2 飛来塩分に起因する塩害に対する点検診断の着目点と措置の方針

変状の状況		点検における着目点	診断に必要な詳細調査	診断の決め手となる情報(措置方針の判断根拠)	措置の方針	工法例	
外観変状 無し	1. 塩化物イオンの供給 2. 塩分の付着	—	—	—	長寿命化(塩化物イオンの遮断)	表面被覆、含浸	
	コンクリート内部への浸透、拡散	3-1. 将来劣化なし	• 塩害防止対策の有無(表面被覆、防食鉄筋など)	• 塩化物イオン含有量試験(ドリル、コア採取)	• 鉄筋位置における塩化物イオン量が鉄筋の腐食発生限界値1.2kg/m ³ *1未満かつ将来予測でも1.2kg/m ³ を超えない	長寿命化(塩化物イオンの遮断)	表面被覆、含浸
		3-2. 将来劣化あり			• 鉄筋位置における塩化物イオン量が鉄筋の腐食発生限界値1.2kg/m ³ 未満かつ将来予測でも1.2kg/m ³ を超える	延命(塩化物イオンの浸透低減・抑制、鉄筋の防食)	表面被覆、含浸、電気防食※2
	鉄筋位置の塩化物イオン量が1.2kg/m ³ 以上	4-1. 鉄筋錆未発生	• 塩化物イオン含有量試験(ドリル、コア採取) • はつり調査	• 鉄筋位置における塩化物イオン量が鉄筋の腐食発生限界値1.2kg/m ³ 以上	延命(塩化物イオンの除去)	部分打替え、鉄筋防錆、電気防食※2	
4-2. 鉄筋錆発生		• 鉄筋位置における塩化物イオン量が鉄筋の腐食発生限界値1.2kg/m ³ 以上 • 鉄筋に錆が発生している		延命(塩化物イオンの除去)	部分打替え、鉄筋防錆、電気防食※2		
外観変状 有り	5. 鉄筋腐食進行、ひびわれの発生 6. 剥離、鉄筋の断面減少	• コンクリートのひびわれ • 鋼材腐食による錆汁 • コンクリートの浮き、剥離 • 鉄筋の断面減少	— • はつり調査※3	• 鉄筋に沿ったひびわれが発生 • 過去の点検データから変状が進展している • 浮き、剥離の発生 • 鉄筋が露出している • 鉄筋の断面減少	延命(塩化物イオンの除去) 延命または危機管理(補強、更新)	部分打替え、鉄筋防錆、電気防食※2 補強、解体・撤去	

注1) 上表の青字は、塩害特定点検が過去に実施されている場合の情報である。
 注2) 飛沫帯等の水がかりのある箇所への電気防食の適用については、採用適否や設置方法(回路分け等)について注意が必要である。
 注3) 断面減少が確認できるまで鉄筋露出が進行している場合は、「はつり調査」は必ずしも必要ではない。

表-3 内在塩に起因する塩害に対する点検診断の着目点と措置の方針

変状の状況		点検における着目点	診断に必要な詳細調査	診断の決め手となる情報(措置方針の判断根拠)	措置の方針	工法例
外観変状 無し	1. 除塩がなされていないか不十分な海砂や、塩化物を含む混和剤(硬化促進成分)の使用	—	—	—	延命(中性化の進行防止)	表面被覆
	2. 中性化の進行、塩化物イオンの濃縮移動	—	—	—	—	—
	3. 鉄筋の腐食開始	—	—	—	延命(塩化物イオンの除去)	部分打替え※2、電気防食
外観変状 有り	4. コンクリートのひびわれ 5. 剥離、鉄筋の断面減少	• コンクリートのひびわれ • 鋼材腐食による錆汁 • コンクリートの浮き、剥離 • 鉄筋の断面減少	— • はつり調査※3	• 鉄筋に沿ったひびわれが発生 • 過去の点検データから変状が進展している • 浮き、剥離の発生 • 鉄筋が露出している • 鉄筋の断面減少	延命(塩化物イオンの除去) 延命または危機管理(補強、更新)	部分打替え※2、電気防食 補強、解体・撤去

注1) 初期内在塩に対して中性化の進行防止として表面被覆を実施することは、必ずしも効果を期待できるものではない。建設後早期(弱材齢時)に内在塩が発見し塩分濃縮が進行していないことも確認できている場合や、塩分濃縮が進行した箇所に対して部分打替えを実施して打替え後のコンクリートに対して中性化の進行を防止する場合等、採用には十分検討が必要である。(製造段階で内部の塩化物イオン濃度が腐食発生限界値を超えている場合は、メカニズム3に該当するため対象外)
 注2) コンクリート表面からの深さ方向に詳細調査を実施したうえで、中性化により塩分濃縮が進行している箇所のはつり取りが可能な場合のみ効果が期待できる。再塩化防止のため鉄筋防錆や表面被覆を実施するのがよい。
 注3) 断面減少が確認できるまで鉄筋露出が進行している場合は、「はつり調査」は必ずしも必要ではない。

表-4 洗掘に対する点検診断の着目点と措置の方針

変状の状況	点検における着目点	診断に必要な詳細調査	診断の決め手となる情報	措置の方針	工法例
①橋台・橋脚基部で土被りの減少、フーチングの一部露出	洗掘	洗掘調査 • 範囲や深さ	濁水時に橋台・橋脚周辺に土被りの減少やフーチングの部分的な露出等が見られる	早急な措置は不要※1	傾斜計、沈下計等
②橋台・橋脚基部で洗掘が進行	洗掘	洗掘調査 • 範囲や深さ	濁水時に橋台・橋脚周辺に明らかな洗掘が見られる 過年度の点検調査からの進行	早急な措置は不要※1	傾斜計、沈下計等
③橋台・橋脚基部で洗掘でフーチング上面が露出	洗掘	洗掘調査 • 範囲や深さ	濁水時に橋台・橋脚のフーチング上面の露出が見られ、詳細調査により洗掘の進行が確認される	方針①：早急な措置は不要※1 方針②：延命	方針①：②と同様 方針②：根固め工 護床工
④橋台・橋脚基部で洗掘でフーチング側面が露出	洗掘	洗掘調査 • 範囲や深さ	濁水時に橋台・橋脚のフーチング側面の露出が見られる	方針①：早急な措置は不要※1 方針②：延命	方針①：②と同様 方針②：根固め工 護床工
⑤橋台・橋脚基部で洗掘でフーチング下面が露出	洗掘 伸縮装置・支承・桁遊間の異常 下部構造の沈下・傾斜	洗掘調査 • 範囲や深さ	濁水時に橋台・橋脚のフーチング下面の露出が見られる	危機管理	根固め工・護床工
⑥不安定化による橋台、橋脚の沈下・移動・傾斜	⑤と同様。	洗掘調査 • 範囲や深さ	下部構造(橋台・橋脚)に対して、沈下・傾斜の状況が見られる。 橋台背面の土工部において、路面の沈下等の損傷が見られる。	危機管理	根固め工・護床工 桁端部の改良 基礎の補強 背面7'0-7'0部の復旧

※1：出水期後や水害等の偶発的な作用によって損傷が進み、的確な判断が出来るようなタイミングで実施。

【措置方針の凡例】※河川管理者とも連携
 方針①：変状の状況や情報に基づく、標準的な措置の方針。
 方針②：進行性が高いと判断される場合の、措置の方針。

よっても異なり、それに対応して措置方針も異なってくる。例えば、橋梁側の要因としては、1976年の河川管理施設等構造令制定以前は河積阻害率や橋脚基礎の根入れに関する規定がなく河川に応じた対応としていたため、それ以前の橋脚では洗掘リスクが高い場合があると考えられる。また、河川側の条件としては、滞筋の変化や固定化、河床低下などによっても、洗掘が進行するリスクが高いと考えられる。

(1)進展メカニズム

局所洗掘のメカニズムについて図-3に整理した。直接基礎の場合では、特にフーチング側面が露出してフーチング下面まで達した段階で、フーチング下面にある地盤が掘られ、急激な支持力不足や下部構造の沈下や傾斜等が発生する。

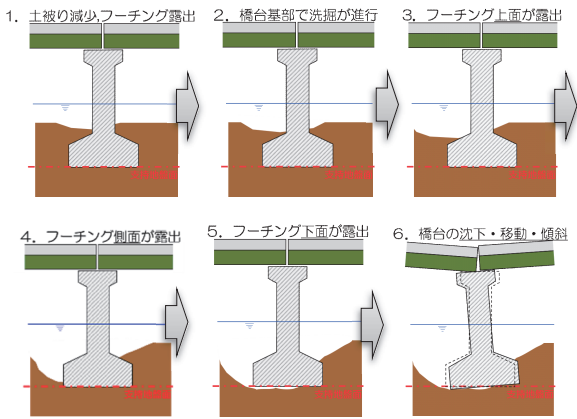


図-3 橋脚における洗掘の進展メカニズム

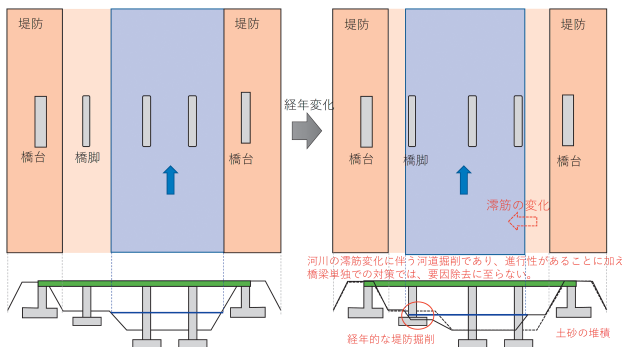


図-4 河川の流りの変化による橋梁への影響

(2)点検、診断の着目点と措置の方針

メカニズムに応じた診断及び措置方針を表-4に示す。措置方針の決定にあたっては、過去の点検結果との比較により、進行性があるかどうかの判断が重要であり、進行性が高くフーチング上面が露出している場合には早期に根固め工等の延命の対策が必要になる。また、河川側の観点も重要であり、河川線形に起因する河床低下や河川の流りの変化・固定(図-4)がある場合には、洗掘が発生するリスクや落橋リスクも高いと考えられるため、河川管理者を交えた協議を行うことが望ましい。

フーチング下面が露出すると急激に支持力不足等が発生することから、フーチングが露出しない状態に留めることが重要である。しかし、河川内では常に洗掘が進行することから、道路管理者のみでは対応が難しく、河川管理者と連携して予防保全に繋がる対策を検討することが必要である。

4. まとめ

本報では、橋梁下部構造における予防保全に向けて、損傷事例や被災事例の多い塩害と洗掘の進展メカニズムと点検診断の着目点を中心に紹介した。今後、洗掘に対して、局所洗掘だけでなく、河川の流りの変化に伴う進展メカニズムの解明や、河川管理者と連携した予防保全に繋がる対策を検討する予定である。なお、本研究は「AIを活用した道路橋メンテナンスの効率化に関する共同研究」の取組みの一つであり、関係各位に感謝する。

参考文献

- 1) 国土交通省：国土交通白書、国交省HP、2021.7
- 2) 澤田守、江口康平、石田雅博：道路橋の予防保全に向けた総合診断と診断AIシステムの研究開発、土木技術資料、第63巻、第10号、pp.8~11、2021
- 3) 国土交通省国土技術政策総合研究所：コンクリート橋の塩害対策資料集(第3回塩害調査)国総研資料第711号、2012.12
- 4) 国土交通省道路局：道路橋定期点検要領、2019.2
- 5) 国土交通省道路局：コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領(案)、2004.3

堀内智司



土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 主任研究員
HORIUCHI Satoshi

中浦慎之介



研究当時 土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 交流研究員、現(株)エイト日本技術開発
NAKAURA Shinnosuke

行藤晋也



土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 交流研究員
YUKITO Shinya

桐山孝晴



土木研究所構造物メンテナンス研究センター 耐震研究監
KIRIYAMA Takaharu