

AI を活用した道路橋メンテナンスの効率化
に関する共同研究報告書 (I - 1)
－橋梁診断支援 AI システムの開発－

令和 5 年 10 月

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

診断 AI 開発グループ

Copyright © (2023) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

AI を活用した道路橋メンテナンスの効率化 に関する共同研究報告書 (I -1) ー橋梁診断支援 AI システムの開発ー

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
診断 AI 開発グループ

要旨

「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」(平成 30～令和 5 年度)の診断 AI 開発グループでは、メンテナンスサイクルをより実効性のあるものとするため、特に技術力を要する診断の信頼性を向上させることを目的として、共同研究参加者及び招へい研究員が有する診断における知識や思考方法を基にしたエキスパートシステムである橋梁診断支援 AI システムの開発に取り組んでいる。本報告では、令和 3 年度までに開発した橋梁診断支援 AI システム Ver.1.0 に関連して、開発に必要とする診断の考え方やその基となる技術情報、システムの開発内容及び機能要件(案)などを紹介する。

キーワード：道路橋、維持管理、定期点検、エキスパートシステム

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 参加者一覧

国立研究開発法人土木研究所 a,b,c
アジア航測株式会社 a,b,c
アジア航測株式会社・*株式会社イクシス c・*富士電機株式会社 b,c
茨城県 a,b
株式会社エイト日本技術開発 a,c
一般財団法人橋梁調査会 a,c
*Global Walkers 株式会社 c
*首都高技術株式会社 c
一般財団法人首都高速道路技術センター a,c
大日本コンサルタント株式会社 a,b,c
*株式会社デンソー c・*株式会社岩崎 c
富山市 a,b
ニチレキ株式会社 b
株式会社日本海コンサルタント a,c
日本工営株式会社 a,c
*日本無線株式会社 b
株式会社ニュージェック a,c
パシフィックコンサルタンツ株式会社 a,c
*株式会社日立製作所 a,c
株式会社福山コンサルタント a,c
株式会社復建技術コンサルタント b
富士通株式会社 a,c
*株式会社まざらん a
三菱電機株式会社 a,c
八千代エンジニアリング株式会社 a,c
*国立研究開発法人理化学研究所 c

注1) a~cは、次のとおり、所属する開発グループを示す。

a 診断 AI 開発グループ、b 点検 AI (床版の土砂化等) 開発グループ、c 点検 AI (画像解析) 開発グループ
注2) ※は、令和3年度までの参加者を示す。

参加者名簿

国立研究開発法人土木研究所	構造物メンテナンス研究センター	西川 和廣	H30.9～R4.3
	〃	金澤 文彦	H30.9～
	〃	桐山 孝晴	H30.9～
	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	星隈 順一	R3.7～
	〃	石田 雅博	H30.9～
	〃	大住 道生	H30.9～
	〃	澤田 守	H30.9～
	〃	上仙 靖	H30.9～R4.3
	〃	田中 良樹	H30.9～
	〃	大島 義信	H30.9～R2.3
	〃	廣江 亜紀子	H30.9～R2.3
	〃	森本 智弘	H30.9～H31.3
	〃	松本 直士	H30.9～R2.3
	〃	遠藤 正史	H30.9～R2.3
	〃	野田 翼	H30.9～R2.5
	〃	末宗 利隆	H31.4～R2.3
	〃	塚崎 翔太	H31.4～R3.3
	〃	余野 智哉	H31.4～R2.6
	〃	二宮 智大	H31.4～R2.7
	〃	増田 隆宏	H31.4～R2.7
	〃	中浦 慎之介	H31.4～R3.4
	〃	堀内 智司	H31.4～R4.3
	〃	坂本 佳也	H31.4～R4.3
	〃	吉田 英二	H31.4～
	〃	江口 康平	H31.4～R4.3
	〃	小野 健太	H31.4～
	〃	峰 穂高	R1.5～R2.4
	〃	大西 孝典	R1.7～R3.9
	〃	篠田 隆作	R2.4～R4.3
	〃	高橋 実	R2.4～
	〃	藤木 裕二	R2.4～
	〃	飯島 翔一	R2.4～
	〃	夏堀 格	R2.4～
	〃	小林 巧	R2.4～
	〃	岩谷 祐太	R2.7～
	〃	菅原 達也	R2.7～
	〃	行藤 晋也	R2.8～R4.7
	〃	竹内 彩	R3.4～
	〃	佐藤 純弥	R3.4～
	〃	大西 達也	R3.10～
	〃	藤田 智弘	R4.4～
	〃	西原 知彦	R4.4～
	〃	田中 一徳	R4.4～
	〃	瀧本 耕大	R4.4～
	〃	川井 菜緒	R4.8～
	技術推進本部先端技術チーム	新田 恭士	H30.9～R2.3
	〃	森川 博邦	R2.4～R4.3
	〃	田中 洋一	H30.9～H31.3
	〃	服部 達也	H31.4～R3.3
	〃	茂木 正晴	R3.4～R4.3
	〃	下川 光治	H30.10～R3.3
	〃	榎本 真美	H30.10～R3.3
	〃	二宮 建	H31.4～R4.3
	先端材料資源研究センター材料資源研究グループ	古賀 裕久	H30.9～R4.3
	〃	中村 英佑	H30.9～H31.6

国立研究開発法人土木研究所	先端材料資源研究センター材料資源研究グループ	櫻庭 浩樹	H30.9～R4.3	
	〃	加藤 祐哉	H30.9～H31.6	
	〃	小沢 拓弥	R2.4～R4.3	
	〃	小田部 貴憲	H31.4～R3.3	
	〃	角田 貴也	R3.7～R4.3	
	アジア航測株式会社	地質・地盤研究グループ	尾西 恭亮	H30.9～
		社会インフラマネジメント事業部	山田 晴利	H30.9～
		社会インフラマネジメント事業部事業推進室	長尾 孝幸	H30.9～
		社会インフラマネジメント事業部社会インフラ技術部社会インフラ技術二課	藤ヶ崎 聡	H30.9～
		〃	高 恒	H30.12～
		社会インフラマネジメント事業部 PPP/PFI 推進室	高野 裕司	H30.9～
		社会インフラマネジメント事業部東北インフラ技術部	青柳 健二	H30.9～
		社会インフラマネジメント事業部中部インフラ技術部	森 淳二郎	H30.12～
		社会インフラマネジメント事業部中部インフラ技術部社会インフラ技術一課	中川 善士郎	H30.12～
		社会基盤システム開発センター	水上 幸治	R2.4～
社会基盤システム開発センター先端技術研究所計測技術研究所		下川 光治	R3.4～	
事業統括部事業戦略部道路プロジェクト		松井 晋	H30.9～	
事業統括部事業戦略部技術戦略室		中澤 明寛	H30.9～	
〃		佐野 実可子	H30.9～	
株式会社イクシス		Technology Div. AI & DataService Team	山崎 一也	H30.9～R4.3
	代表取締役	山崎 文敬	H30.9～R4.3	
	Technology Div. R&D Team	中山 錬	H30.9～R4.3	
	Technology Div. Product Team	阿部 翔太郎	H30.9～R4.3	
	Technology Div. R&D Team	野田 道広	H30.9～R3.8	
	Technology Div. AI & DataService Team	乾 文雄	H30.9～R2.8	
	〃	友正 常雄	H30.9～R2.8	
	〃	菅野 廣一郎	H30.9～R3.8	
	富士電機株式会社	営業本部営業統括室セールスプロモーション部	笛木 豊	H30.9～R4.3
		〃	大賀 英治	H30.9～R4.3
		技術開発本部先端技術研究所エネルギー技術研究センターセンシング技術研究部	矢尾 博信	H31.4～R4.3
		〃	工藤 高裕	H30.9～R4.3
		〃	仲村 慎吾	H31.4～R4.3
		技術開発本部デジタルイノベーション研究所 AI ソリューションセンターAI 研究部	浅野 貴正	H30.9～R4.3
		〃	竹内 豊	H30.9～R4.3
技術開発本部先端技術研究所エネルギー技術研究センター電気エネルギー技術研究部		土井 達也	H31.4～R2.3	
茨城県		土木部道路維持課	石川 昭	H30.9～H31.3
		〃	長山 公信	H31.4～R2.3
		〃	柏崎 元治	R2.4～R4.3
		〃	橋本 則保	R4.4～
		〃	大塚 将司	R3.4～R4.3
		〃	安重 克巳	R4.4～
		〃	坂本 裕司	H30.9～H31.3
	〃	大和田 康文	H30.9～H31.3	
	〃	笠森 裕史	H31.4～R3.3	
	〃	深谷 健	R31.4～R2.3	
	〃	鴨志田 龍	R2.4～R4.3	
	〃	仙波 正樹	R4.4～	
	株式会社エイト日本技術開発	インフラ保全事業部 中部支社	美藤 友郎	H30.9～
		インフラ保全事業部 東京支社	松本 直樹	H30.9～
		〃	松村 翔	H30.9～
インフラ保全事業部		則竹 義辰	H30.9～	
インフラ保全事業部 中部支社		小野 裕一	R2.8～	
インフラ保全事業部 中国支社		菖蒲迫 正之	H30.9～	
〃		高木 正行	H30.9～	

一般財団法人橋梁調査会	調査部	山本 和利	H30.9～	
	企画部	平安山 良和	H30.9～R2.3	
Global Walkers 株式会社 首都高技術株式会社	〃	石井 豊	H30.9～	
	取締役 CTO	樋口 未来	H30.9～R4.3	
	技師長	永田 佳文	H30.9～R3.2	
	構造管理部東京西管理課	遠藤 重紀	R1.4～R4.3	
	構造管理部東京東管理課	布施 光弘	H30.9～R4.3	
	〃	白石 有佳	R2.4～R4.3	
	〃	新村 祐一	R2.4～R4.3	
	〃	富田 大樹	R2.4～R4.3	
	構造管理部神奈川管理課	金子 英樹	R2.4～R4.3	
	インフラデジタル部インフラパトロール課	紺野 康二	H30.9～R4.3	
	〃	高野 淳	R1.9～R4.3	
	一般財団法人首都高速道路技術センター	審議役	八崎 弘昌	H30.9～
		〃	眞仁田 裕	H30.9～
〃		田嶋 仁志	H30.9～R2.6	
〃		御嶽 讓	R2.7～	
構造技術部コンクリート構造技術課		佐藤 祐輔	H30.9～	
〃		山田 将憲	H30.9～	
情報技術部土木情報技術課		繪嶋 武史	H30.9～	
構造技術研究所第一構造研究開発室		青木 聡	H30.9～	
構造技術研究所第二構造研究開発室		張 広鋒	H30.9～	
デジタル・イノベーション研究所第一 DI 研究開発室		小原 誠	H30.9～	
デジタル・イノベーション研究所第二 DI 研究開発室		日ヶ丸 幸俊	H30.9～R3.9	
大日本コンサルタント株式会社		インフラ技術研究所	平山 博	H30.9～
		インフラ技術研究所技術開発部	横山 広	H30.9～
	インフラ技術研究所技術開発部保全エンジニアリング研究室	牧 祐之	H30.9～	
	〃	小林 大	H30.9～	
	インフラ技術研究所技術開発部 ICT ソリューション室	龍田 斉	H30.9～	
株式会社デンソー	まちづくりシステム開発部 UAV ソリューション事業推進室	河内山 聡	H30.9～R3.3	
	〃	加藤 直也	H30.9～R4.3	
	〃	山崎 浩二	H30.9～R3.3	
	〃	吉川 覚	R2.4～R4.3	
	〃	光田 徹治	R2.4～R4.3	
	〃	大杉 拓也	R3.9～R4.3	
	〃	後藤 紫郁	H30.9～R4.3	
株式会社岩崎	企画開発部	眞柄 毅	H30.9～H31.1	
	〃	山本 紀彦	H30.9～R4.3	
	〃	村瀬 翔吾	H30.9～H31.1	
	〃	河井 大地	H30.9～R4.3	
	〃	植野 芳彦	H30.9～	
	〃	杉谷 真司	H30.9～R3.3	
	〃	宇津 徳浩	H30.9～R3.3	
富山市	政策参与	黒崎 智治	R2.4～	
	建設部道路構造保全対策課	酒井 陽介	R3.4～	
	〃	藤田 博樹	R3.4～	
	〃	湯野 和樹	R4.4～	
	〃	那珂 通大	H30.9～	
	〃	永塚 竜也	H30.9～R1.9	
	〃	佐藤 和久	H30.9～	
ニチレキ株式会社	道路エンジニアリング部調査課	喜多 敏春	H30.9～	
	中部支店技術課	安藤 正幸	H30.9～	
株式会社日本海コンサルタント	道路エンジニアリング部調査課	浦田 孔二	H30.9～	
	常務取締役	塩土 圭介	H30.9～	
	道路事業本部 兼 AI技術室	多田 徳夫	H30.9～	
	技術事業本部	眞島 俊光	H30.9～R3.3	
	社会事業本部 計画研究室 兼 AI技術室	形屋 陽一郎	H30.9～	
	技術事業本部 システム開発部 兼 AI技術室	末松 雅隆	H30.9～R3.3	
	社会事業本部 計画研究室	町口 敦志	H30.9～	
	道路事業本部 道路交通部 兼 AI技術室	中谷 明弘	H30.9～	
	技術事業本部 橋梁技術部			
	技術事業本部 橋梁技術部 兼 AI技術室			
	技術事業本部 システム開発部 兼 AI技術室			

日本工営株式会社	鉄道事業部	藤原 鉄朗	H30.9～
	交通運輸事業本部	松山 公年	H30.9～
	中央研究所技術開発センター	新聞 友祐	H30.9～
	〃	中津井 邦喜	H30.9～
	中央研究所先端研究センター	中野 雅章	H30.9～
	〃	古木 宏和	R2.1～
	人材・技術統括部	秋山 成央	H30.9～
	社会システム事業部統合情報技術部	沼田 祐助	R1.4～
	道路事業部道路インフラマネジメント部	渡邊 大智	R2.4～
	ソリューション事業部事業企画開発部	南方 秀之	H30.9～R4.3
日本無線株式会社	交通インフラ技術部道路情報システムグループ	土屋 功	R2.4～R4.3
	〃	増田 亮	H30.9～R4.3
	技術開発本部研究開発部新領域開発グループ	島田 尚	H30.9～R4.3
	〃	大西 喬之	H31.4～R4.3
	〃	轟 勇人	R2.4～R4.3
	国内技術本部交通・都市部門 道路グループ	白 星保	H30.10～
	国内技術本部交通・都市部門 道路グループ 橋梁チーム	入倉 雅人	H30.10～
	〃	橋本 欣也	H30.10～
	交通基盤事業本部インフラマネジメント部橋梁保全室	中澤 治郎	H30.9～
	交通基盤事業本部	安田 亨	H30.9～
パシフィックコンサルタンツ株式会社	交通基盤事業本部インフラマネジメント部橋梁保全室	森 康晴	H30.9～
	〃	芳賀 堯	H30.9～
	交通基盤事業本部インフラマネジメント部インフラ経営室	福澤 伸彦	H30.9～
	〃	仁野 元太	H30.9～R2.3
	交通基盤事業本部インフラマネジメント部トンネル室	重田 佳幸	H30.9～
	〃	山本 秀樹	H30.9～
	交通基盤事業本部インフラマネジメント部橋梁保全室	樋口 裕治	H30.9～
	交通基盤事業本部インフラマネジメント部インフラ経営室	田中 伸幸	H30.9～
	DS 事業本部情報事業部	川城 研吾	H30.9～
	〃	榎本 真美	R3.4～
株式会社日立製作所	環境事業部情報システムエンジニアリング部	古山 昇晃	H30.9～R4.3
	〃	宮崎 剛	H30.9～R4.3
	〃	佐藤 啓香	H30.9～R4.3
	〃	田中 俊和	R2.4～R4.3
	社会イノベーション事業推進本部サステナブルインフラマネジメント部	柿本 真吾	H30.9～R4.3
	〃	増田 真也	H30.9～R2.3
	社会ソリューション第一営業本部 営業第一部	中村 有輝	H30.9～R4.3
	インフラマネジメント事業部	宮村 正樹	H30.9～
	〃	青島 亘佐	H30.9～
	〃	徳永 皓平	H30.9～
株式会社復建技術コンサルタント	構造技術部東京技術一課	唐木 正史	H30.9～
	〃	石川 雄貴	H30.9～
	〃	塚本 美咲	R3.4～
	社会システム事業本部 防災システム事業部	田嶋 聡司	H30.9～
	〃	早川 誠	R1.7～
	〃	長谷川 英司	R3.1～
	〃	立脇 正敬	R3.1～
	〃	荒川 博史	H30.9～R3.9
	〃	菊地 英幸	H30.9～
	〃	渡部 勇	H30.9～
富士通株式会社	研究本部 先端融合技術研究所	長谷 一也	H30.9～R1.7
	デジタルフロント事業本部 デジタルビジネス事業部 ビジネストランスフォーメーション推進室	根岸 仁	H30.9～R1.7
	デジタルフロント事業本部 デジタルイノベーション推進統括部	長澤 卓也	H30.9～R1.7
	〃	塚田 真希	H30.9～R2.3
	〃	西垣 重臣	H30.9～R3.12
	取締役	中田 雅文	H30.9～R4.3
	神戸製作所社会システム基盤技術部	松田 幸成	H30.9～R2.3
	情報技術総合研究所知能情報処理技術部知能情報応用技術グループ		
	〃		
	〃		
株式会社まざらん			
三菱電機株式会社			

三菱電機株式会社	先端技術総合研究所機械システム技術部構造強度信頼性グループ	葉名 紀彦	H30.9～R2.3
	社会環境事業部社会システム第二部	細野 秀人	R2.4～R4.3
	神戸製作所社会システム基盤技術部	佐久嶋 拓	R2.4～R4.3
株式会社八千代エンジニアリング	〃	眞鍋 七海	R2.4～R4.3
	事業統括本部社会マネジメント室	中島 道浩	H30.9～
	〃	野田 一弘	H30.9～
	事業統括本部国内事業部構造・橋梁部	関口 斉治	H30.9～
	技術創発研究所 AI 解析研究室	安野 貴人	H30.9～
国立研究開発法人理化学研究所	事業統括本部国内事業部構造・橋梁部	綱島 隆将	R4.4～
	革新知能統合研究センターインフラロボット管理チーム	岡谷 貴之	H30.9～R4.3
	〃	大野 和則	H30.9～R4.3
	〃	岡田 佳都	H30.9～R4.3
	〃	菅沼 雅徳	H30.9～R4.3

注) 期間は本共同研究における担当期間を示す。H: 平成, R: 令和

目 次

第1章 はじめに	1-1
1.1 研究の目的	1-1
1.2 共同研究体制	1-2
1.3 各グループの研究概要	1-3
1.4 本共同研究報告書の位置づけと構成	1-6
第2章 診断の基本的な考え方	2-1
2.1 はじめに	2-1
2.2 予防保全に向けた診断の考え方	2-1
2.3 論理的な思考プロセス	2-5
第3章 診断セット	3-1
3.1 診断セットの概要	3-1
3.2 RC床版	3-4
3.3 床版橋上部構造	3-14
3.4 PC桁	3-26
3.5 RC桁	3-43
3.6 RC溝橋	3-50
3.7 鋼桁	3-57
3.8 鋼トラス	3-71
3.9 橋台・橋脚	3-77
3.10 基礎	3-88
3.11 支承部	3-98
3.12 伸縮装置.....	3-114
3.13 排水装置.....	3-133
第4章 橋梁診断支援 AI システム	4-1
4.1 橋梁診断支援 AI システムの概要	4-1
4.2 橋梁診断支援 AI システムの検証	4-10
第5章 橋梁診断支援 AI システムの機能要件（案）	5-1
5.1 機能要件とは	5-1
5.2 機能要件（案）の構成	5-2

第6章 まとめ 6-1

謝辞

第1章 はじめに

1.1 研究の目的

近年、社会インフラの老朽化が問題となる一方で、維持管理コストの増加や橋梁に関する専門知識を持った熟練技術者の減少などの問題が顕在化している。そのため、点検や診断の支援など、橋梁維持管理の信頼性向上を実現する技術開発が必要とされており、その解決策の一つとして AI (Artificial Intelligence) 技術に着目して、メンテナンスサイクルにおける点検・診断・措置の信頼性向上を目指し、研究開発に取り組んだ。

このような背景から、本共同研究は、診断のために必要な知識と技能を有する技術者が不足する地方公共団体における診断業務を支援するための診断支援技術 (診断 AI) の開発、RC 床版の土砂化の予防保全のための非破壊検査技術と AI による機械学習を用いた点検支援技術 (点検 AI (床版の土砂化等)) の開発、及び UAV (Unmanned Aerial Vehicle) 等を用いて取得した変状情報などの点検記録を画像解析により効率的に整理することができる点検支援技術 (点検 AI (画像解析)) の開発を目的としている。

共同研究発足時の第1回全体会議の状況を写真 1-1-1 に示す。



写真 1-1-1 第1回全体会議 (平成30年10月)

1.2 共同研究体制

本共同研究は、診断AI開発グループ、点検AI（床版の土砂化等）開発グループ、点検AI（画像解析）開発グループの3つのグループに分かれて、平成30年度から令和3年度の間、それぞれの研究に取り組んだ（図1-2-1）。茨城県と富山市は、道路管理者として現場のニーズを提供すること及び現地調査等の際のフィールドを提供することを目的に、各グループの研究に参加した。

診断AI開発グループと点検AI（床版の土砂化等）開発グループは、構成事業者を一部変更した上で、令和5年度まで共同研究を延長し、引き続き、それぞれの研究に取り組んでいる。

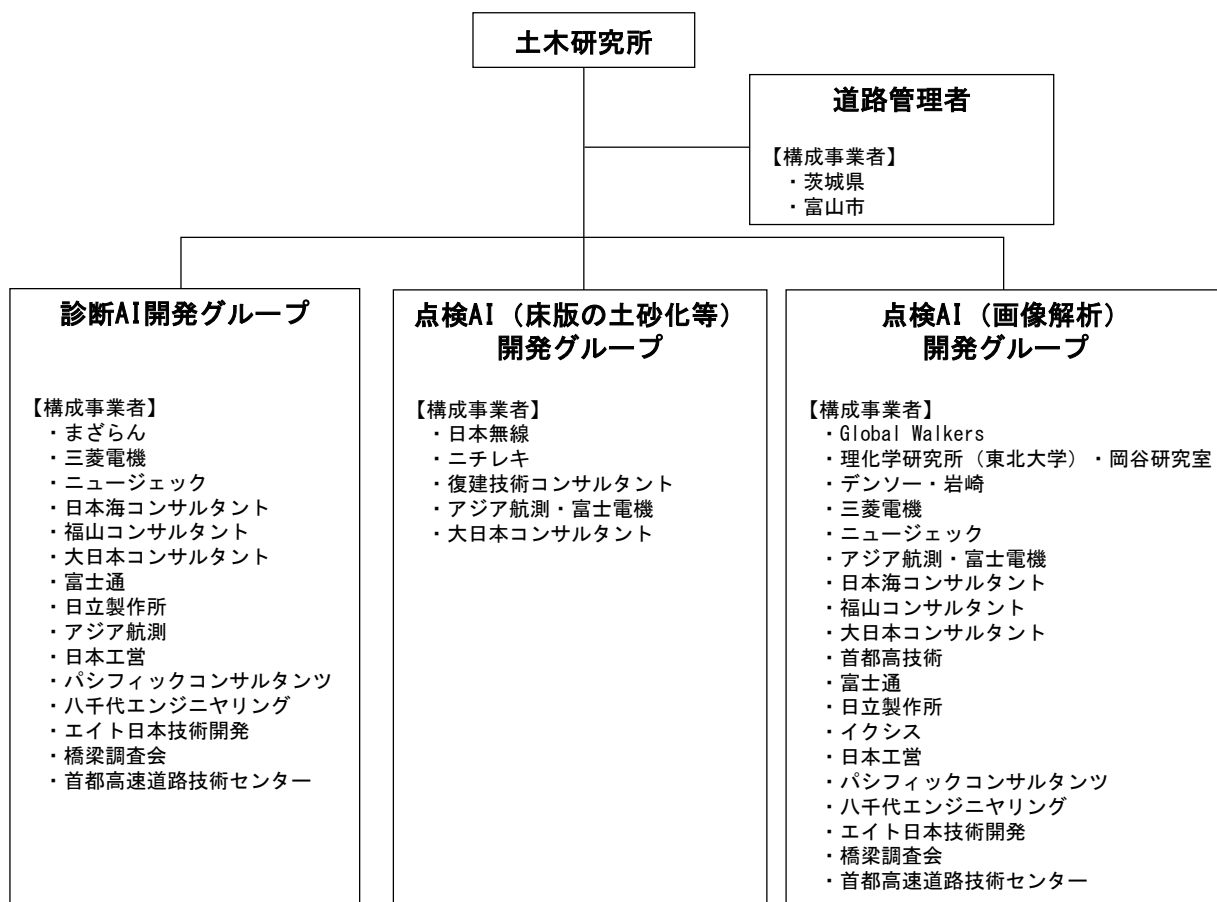


図1-2-1 共同研究体制（平成30年度～令和3年度）

1.3 各グループの研究概要

1.3.1 診断AI 開発グループの研究概要

診断 AI 開発グループでは、メンテナンスサイクルをより実効性のあるものとするため、特に技術力を要する診断の信頼性を向上させることを目的として、共同研究参加者及び招へい 研究員が有する診断における知識や思考方法を基にした AI を活用した橋梁診断支援 AI システム（以下、「診断 AI システム」という。）の開発に取り組んだり。診断 AI システムとは、橋梁の台帳情報や点検情報等を入力することで、対象となる橋梁の診断結果とその理由及び措置方針を提示するシステムである（写真 1-3-1、図 1-3-1）。

診断では、その診断結果に至った具体的な説明が求められることから、診断 AI システムの AI にはエキスパートシステムを採用している。招へい 研究員と議論（写真 1-3-2）を行いながら、診断における知識や思考方法をフローチャート化した診断のロジックを作成し、それを順次システム化することで、令和 3 年度には、対応可能な症例は限定されているものの、橋種の約 9 割を対象とする診断 AI システム Ver.1.0 を構築した。

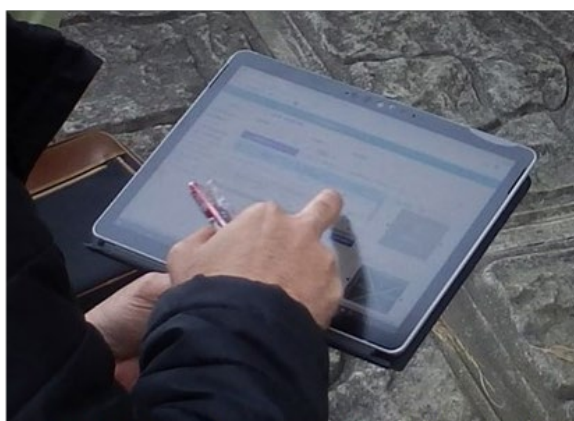


写真 1-3-1 診断 AI システムの使用状況



図 1-3-1 診断結果出力画面の例



写真 1-3-2 共同研究参加者及び招へい 研究員で構成される検討会

1.3.2 点検 AI（床版の土砂化等）開発グループの研究概要

点検 AI（床版の土砂化等）開発グループでは、床版の土砂化という損傷に対して、予防保全を可能とするための非破壊検査技術に関する研究に取り組んだ。床版の土砂化は、床版上面に生じる損傷であり、従来の橋梁下面からの目視点検では、損傷が進行するまで発見が難しく、予防保全的な対応が困難である。その土砂化の発生原因は、舗装の下に入った水と輪荷重の影響によるものと考えられているため、舗装の下の滞水の有無を確認できる技術が必要となる²⁾。

そこで、実橋や模型供試体を対象に、各種非破壊検査技術（写真 1-3-3～1-3-7）を用いた舗装下の滞水検知の適用性の確認を行った。特に、電磁波レーダを用いた手法では、床版上面に滞水がある場合とない場合を比較すると、比誘電率の違いにより滞水がある場合の方が反射波の振幅が大きくなる特徴を利用して滞水の有無を判断可能であることを確認した。また、AI による機械学習を用いて、電磁波レーダの計測結果から床版上面の滞水を自動推定する学習モデルを構築した。

なお、この研究は、内閣府の「官民研究開発投資拡大プログラム（PRISM）」を活用しながら進めたものである。



写真 1-3-3 ハンディ式
電磁波レーダ



写真 1-3-4 カート式
電磁波レーダ



写真 1-3-5 超音波探査



写真 1-3-6 車載式電磁波レーダ



写真 1-3-7 MMS (Mobile Mapping System)
計測

1.3.3 点検AI（画像解析）開発グループの研究概要

点検AI（画像解析）開発グループでは、安全かつ効率的な橋梁点検を遂行するための支援技術に関する研究に取り組んだ。道路橋の点検時に変状等の取得を効率的に行ううえで、点検技術者への安全確保や足場・交通規制、取得された点検情報の整理について合理化・省人化を図るための点検支援技術（図 1-3-2）が求められる³⁾。

そこで、安全かつ効率的な点検や診断で必要となる情報の取得、将来の計画的な維持管理に必要となる情報を効率的な取得の支援を目的とし、UAV (Unmanned Aerial Vehicle) 等の点検ロボットによる点検支援技術、取得された情報を立体的・直感的に把握するための3次元モデルの活用、床版等の広範囲に発生するひび割れや漏水・遊離石灰等の変状情報等を効率的に整理するための点検AI（画像解析技術）、取得された変状等の情報の効率的なデータ格納技術について研究開発を進めた。

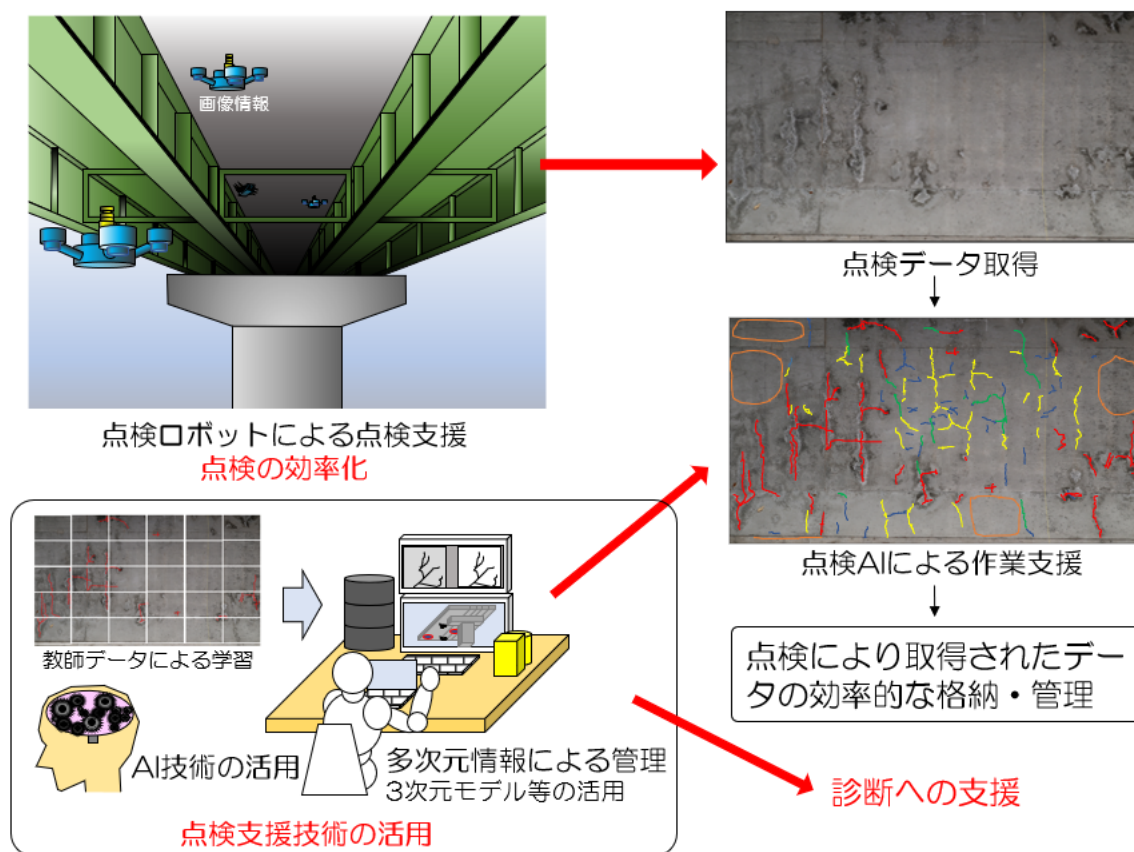


図 1-3-2 点検ロボット及び画像解析技術の活用による点検支援技術のイメージ

1.4 本共同研究報告書の位置づけと構成

本共同研究報告書は、診断AI開発グループにおいて、平成30年度から令和3年度までに取り組んだ橋梁診断支援AIシステム Ver.1.0の開発に関する研究成果をまとめたものである。

第1章では、本共同研究の背景・目的・研究体制、及び各開発グループの研究概要を紹介する。

第2章では、診断の基本的な考え方と診断における留意点等を紹介するとともに、本報告書の中で使用する用語の中には一部独自のものがあるため、その用語の定義を合わせて紹介する。

第3章では、橋梁の部材・損傷ごとの劣化のメカニズムに応じた点検・診断・措置の一連の技術情報を整理したものを診断セットと称しているが、今回作成した診断セットの一例を部材毎に紹介する。

第4章では、橋梁診断支援AIシステムの概要を紹介した上で、これまでに行ったシステムの検証結果と明らかとなった改善点などを紹介する。

第5章では、橋梁診断支援AIシステムの機能要件（案）の一部を紹介する。

第6章では、得られた研究成果のまとめを紹介する。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 藤木裕二、岩谷祐太、田中良樹、石田雅博：RC 床版の土砂化の予防保全に向けた技術開発、土木技術資料、第 63 巻、第 10 号、pp.20-23、2021.
- 3) 茂木正晴、二宮建、森川博邦：効率的な道路橋点検手法と点検 AI システムの研究開発、土木技術資料、第 63 巻、第 10 号、pp.28-33、2021.

第2章 診断の基本的な考え方

2.1 はじめに

道路橋の老朽化が進む中、維持管理・更新コストを可能な限り抑制し持続的にインフラ機能を確保するためには、予防保全の推進などによる橋の長寿命化を図ることが重要であり、「第5次社会資本整備重点計画（令和3年5月閣議決定）」では、予防保全型インフラメンテナンスへの本格転換が明記されている。また、現状では、既に損傷が進行した橋も存在しているため、これらの橋に対して、再劣化や早期劣化のない適切な措置を進めながら、予防保全を進めていく必要がある。

今後、予防保全型メンテナンスへの転換を図っていくためには、予算面の課題の他に技術的な面では、点検、診断、措置、記録からなるメンテナンスサイクル（図2-1-1）において、適切なタイミング及び方針の下で措置が行われるよう診断することが重要である。メンテナンスサイクルにおける「診断」は、点検等で把握した各種の情報に基づき総合的に判断する必要があり、特に高度な専門技術が求められる。

本章では、予防保全型メンテナンスの推進と、損傷が既に進行した橋に対して再劣化や早期劣化のない適切な措置の推進に資すると考えられる診断の基本的な考え方、留意点等を整理した結果を示す。

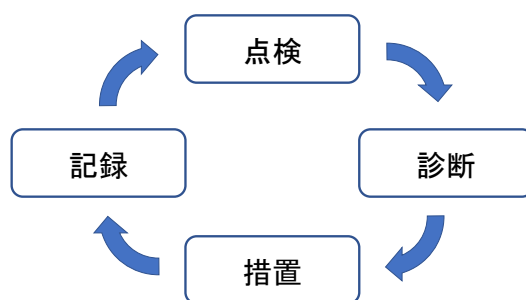


図2-1-1 メンテナンスサイクル

2.2 予防保全に向けた診断の考え方

橋は供用開始後、外力作用の影響、環境作用の影響、その他の各種の原因によって、損傷（橋の性能を低下させる根源となる現象（人であれば疾患に相当）が発生・進行し、その結果、様々な変状（通常とは異なる状態または前回点検時から変化が生じた状態）が生じる。

道路橋の点検、診断、措置のプロセスでは、図2-2-1に示す通り変状を適切に把握して記録し、損傷と原因を特定したうえで状態を評価し、原因の除去を含めて補修補強を行うことが基本となる。損傷及び原因の特定が不完全だと早期劣化等の原因になるため、診断の際にはこれらの特定が特に重要となる。このため、詳細調査の必要性を判断し、実施した調査結果を踏まえ損傷及びその原因を絞り込むことが求められる。

橋に生じる損傷及び原因の分類の例を図2-2-2に示す。ここでは、損傷の主な原因を、外力作用や環境作用等の繰返し作用又は持続作用、地震や衝突等の一過性の作用（稀に作用する大きな作用）、設計・施工の不良に分類した上で、これらが原因となり生じる損傷について、橋に直接的に影響を及ぼす損傷と地盤を介して橋に影響を及ぼす損傷に区分し、具体的な損傷を例示している。

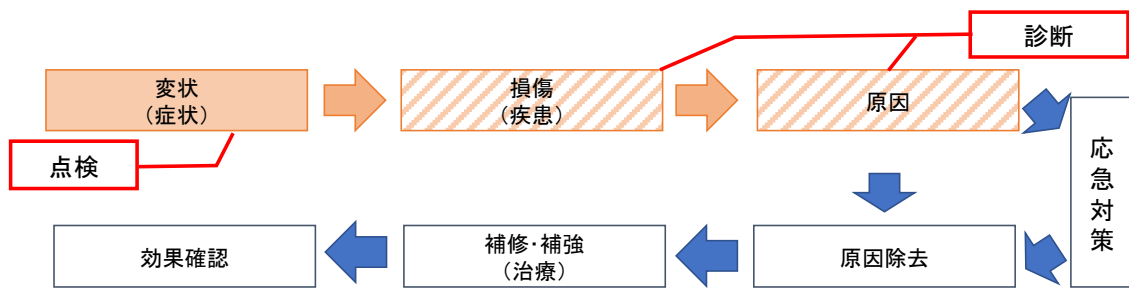


図 2-2-1 点検・診断・措置の基本的なプロセス

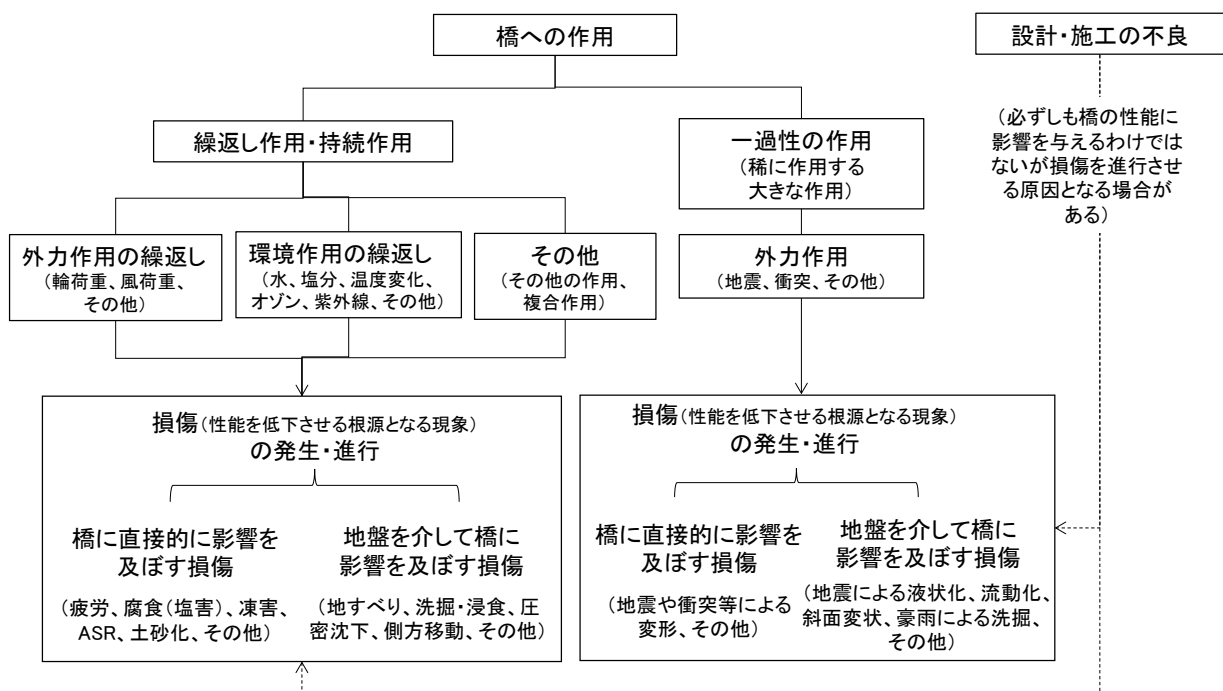


図 2-2-2 橋の機能低下に影響を及ぼす主な損傷及び原因の分類

地震や衝突等の稀に作用する大きな外力によって生じる損傷は、地震や衝突等が生じた後に行われる臨時の点検の結果を踏まえて、措置の必要性を判断し、適切な措置をすることが基本となる。橋を長く使うためには、特に、外力作用や環境作用等の繰返し作用により経年的に進行する損傷をできるだけ早期に発見し、損傷原因を除去して損傷が進行しないようにするための措置を行い、健全な状態に戻すことが求められる。損傷が進行すると損傷原因の除去が困難となる場合や、補修のコストの増加等につながる場合が多いことから、早い段階での原因除去を含めた予防保全措置を行い、長寿命化を図ることが重要となる。この段階を超えると、健全な状態に戻すことが困難となるが多くなるため、損傷の進行スピードをできるだけ遅くして架け替えまでの時間を確保するための延命措置が必要となる。さらに損傷が進行した場合には、危機管理とセットでの措置が求められる。

診断では、現況から次回の定期点検に至る期間までの状態評価を行い、措置の必要性判断が求められる一

方、できるだけ長く橋を使っていく観点から、橋の状態に応じた措置方針の判断や信頼性が確認された措置工法の例示を行うことも重要と考えられる。道路橋定期点検要領^リにおいて、定期点検で行う健全性の診断は、「次回点検までの措置の必要性についての所見を示す。また、そのとき所見の内容を法令に規定されているとおり分類する」こととされている。他方、本報告書で用いる「診断」の用語は、損傷及びその原因を特定し、損傷の進行性等を踏まえ、次回点検までの措置の必要性だけでなく、措置方針等を含めた所見を示すこととして用いる。

本報告書で用いる措置方針の定義を表 2-2-1 に示す。適切な措置を選択するためには、「長寿命化」・「延命」・「危機管理」の措置方針の判断が重要と考え、これら3つを基本的な措置方針として定義した。その上で、損傷が生じていない又は損傷が軽微な場合等では措置が不要と判断できる場合もあるため、「損傷なし」及び「早急な措置は不要」を加えている。また、損傷が著しく緊急的な措置が必要と判断する必要がある場合もあるため「緊急措置」を加え、それぞれ定義した。

診断は、図 2-2-3 に示すように点検等で把握した現況及び過去の変状等の情報、構造形式や交通量や周辺環境等使用条件、過去の補修や災害履歴等の情報の他、必要に応じて詳細調査を行い、その結果を知識と技能に基づき総合的に判断するものである。具体的には、損傷及びその原因の推定と、次回点検までの損傷の進行性の推定等をした上で、現況から次回定期点検に至るまでの期間の橋の状態評価を行う。また、損傷の進行性の判断は、前回の点検時との変状の比較とともに、損傷原因の影響などを考慮する必要があり、損傷の進行性を判断するにあたり追跡調査やモニタリングを行うことが効果的な場合がある。

表 2-2-1 措置方針の定義

用語	定義
損傷なし	健全な状態 [*] であり、措置を行う必要はない。
早急な措置は不要	損傷が軽微な段階であり、次回の定期点検までに急いで措置を行う必要はない。
長寿命化	損傷原因の除去（支障のない程度に原因を部分的に除去することを含む）、損傷部分の補修により、健全な状態に戻すこと。
延命	損傷の原因の完全な除去は困難であるため行わず、補修などを行うことで損傷の進行をコントロールする。
危機管理	損傷の進行の確実なコントロールができない状態で、モニタリング等を行いながら供用する。
緊急措置	通行規制や緊急的な補修等を直ちに行う。

※設計時に想定した性能が確保されている状態。

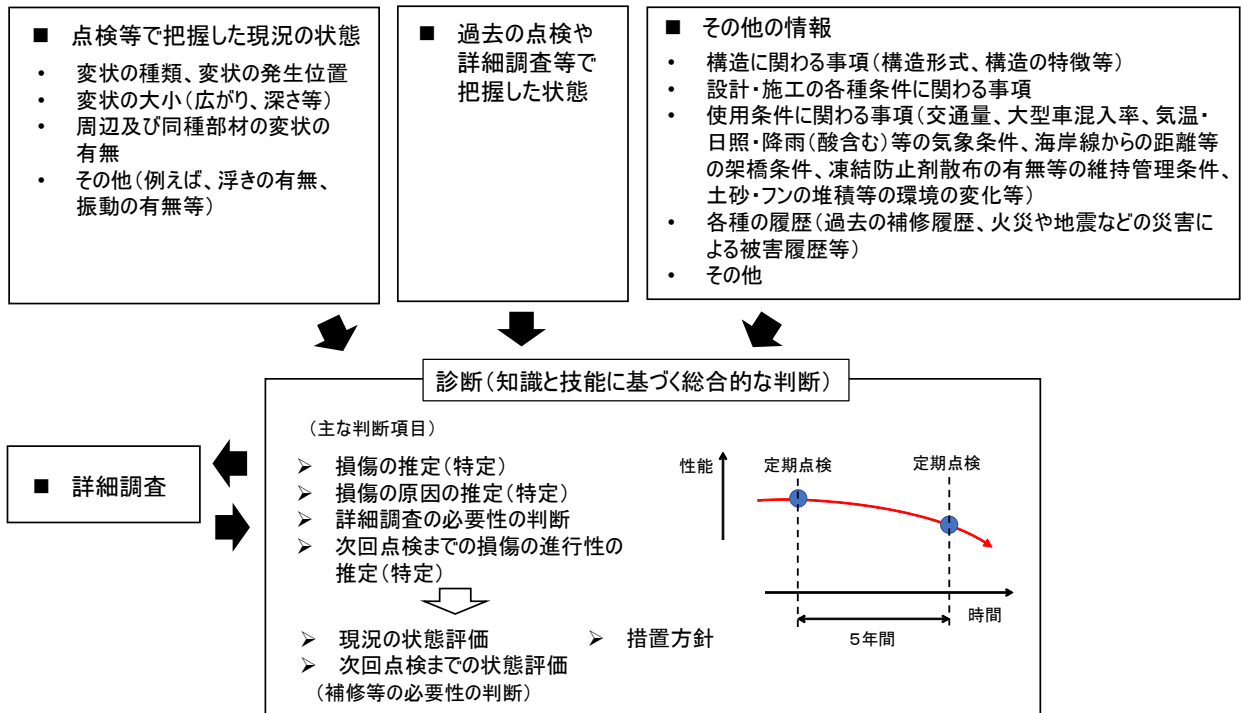


図 2-2-3 点検で把握が必要な情報と診断における主な判断項目

診断では、多様な条件下の中でこれらの判断を求められるが、それぞれに対して定量的な判断指標とその閾値を設定することは一般的に難しく、知識と技能を有する技術者の総合的な判断が求められている。このような実状の中、診断の信頼性を高めていくためには、診断に必要とされる知識と技能をできるだけ明確化し、それらをさらにアップデートしていくことが有効なアプローチの1つとして考えられる。特に、予防保全の推進や早期劣化・再劣化を防止するためには、橋に生じる損傷のメカニズム(何が原因でどのように損傷が進行するのか)を明らかにすることが重要と考えられる。さらに、長寿命化、延命、危機管理等が必要となる段階を区分するための考え方を整理し、それぞれの段階を特定するための点検方法及び診断の考え方や、それぞれの段階において効果が期待できる措置の工法例等を一連で整理することが重要と考えられる。本報告書では、橋に生じる損傷のメカニズム・点検・診断・措置の一連の技術情報を「診断セット」と称して、代表的な部材・損傷を対象にまとめた。その主な結果については3.に示しており、参考にすることができる。なお、損傷の進行過程を区分する必要性が低い部材は、損傷メカニズムの詳細は整理していない。例えば、排水装置は、措置方針の判断を排水機能の低下を示唆する変状によって行うことが通常であり、損傷の詳細な進行過程は区分していない。

2.3 論理的な思考プロセス

診断は、必要な知識と技能を有する技術者が各種の情報に基づき総合的に判断するものである。診断における主な判断項目は前述の通りであり、診断に必要な知識と技能を有する技術者は、できるだけ誤診をしないよう論理的な思考プロセスで判断する必要がある。

橋単位での診断所見が求められるものの橋単位の状態を直接評価することは困難なため、一般には、橋を構成する、上部構造・下部構造・上下部接続部に分類し、さらにそれら構造を構成する部材に分類し、部材毎に診断する。損傷が著しく進行している又は損傷の進行が著しく早く、時間的な猶予がない場合には、緊急措置が必要となるため、まず緊急措置の必要性判断を行うことが一般的である。その上で、予防保全の推進や早期劣化・再劣化を防止するためには、**図 2-3-1** に示すように部材毎に損傷及びその損傷の原因を絞り込んで特定するプロセスと、措置方針を適切に選択した上で各種の条件に応じて具体的な措置方法を選択していくプロセスが重要となる。また、措置の必要性や時期を判断するため、現況から次回点検に至るまで状態評価を適切に行う必要がある。以下に、診断における主な判断項目に対し、思考プロセスや留意点等をまとめた結果を示す。

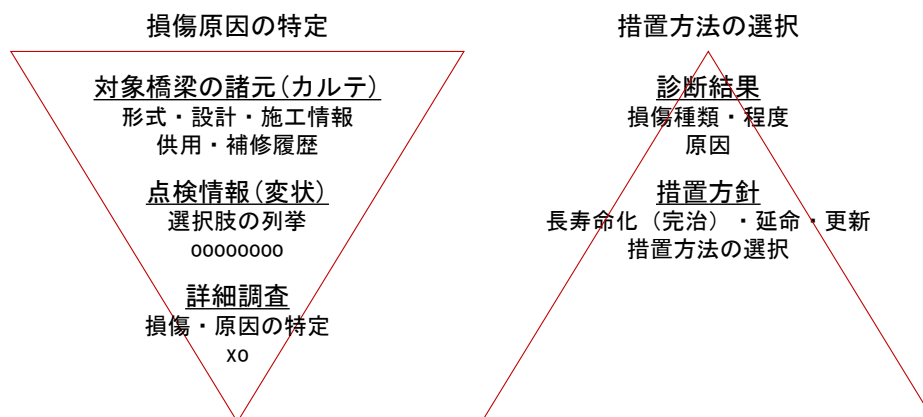


図 2-3-1 論理的な診断の基本プロセス

(1) 損傷及び原因の推定

診断に必要な知識と技能を有する技術者は、対象橋梁の諸元や架橋環境条件、補修履歴、過去の点検記録等の情報をまず確認し、その後、点検で確認された変状から部材に生じている可能性のある損傷やその原因を列挙する。特定や絞り込みを行う上で情報が不足する場合には、詳細調査を行う。その際、必ずしも一つに特定する必要は無く、完全に否定できない選択肢は消去せずに絞り込みを行うことが重要となる。

損傷の原因は、**図 2-2-2** に示した外力作用や環境作用等の繰返し作用又は持続作用、地震や衝突等の一過性の作用、設計・施工の不良の他、間接的な原因を含めると図中に示した以外にも様々なものが原因となり得る。なお、設計・施工不良は損傷の原因となる場合があるが、損傷に影響を及ぼさず景観の面などからも支障とならない場合には、措置不要と判断することができる場合があるため、適切に見極めることが求められる。

前述のとおり、橋の長寿命化のためには、外力作用や環境作用の繰返しが直接的な原因となって生じる損傷とその原因を早期に推定することが求められる。損傷及び原因の推定の確からしさを高めるためには、推定した損傷やその原因に対して矛盾が生じていないことや、推定の確からしさを裏付けとなる事実を確認しながら絞り込みを行うことが重要となる。例えば、RC床版の疲労は、古い基準で設計され床版厚や鉄筋量が少ない場合や大型車交通量が多い場合に生じやすいため、RC床版の変状の情報とあわせてこれらの情報を適切に組み合わせて絞り込みを行う。補修補強の履歴等の机上で把握できる情報も、損傷及び原因の絞り込みにおいて有用であり、適切に情報を取得・整理することが重要である。また、長寿命化を図る上では、橋への水の浸入を防ぐことが重要となるため、水が原因となって生じた損傷や変状の発生位置等の情報を取得・整理し、水の浸入経路も含めて推定することも重要である。

その他、部材毎に損傷及び原因を推定するにあたっては、当該部材の変状等の情報だけではなく、橋の各部材の変状等の情報を組み合わせて推定することも重要となる。図2-3-2に部材の変状が他部材の損傷及び原因の推定に活用できる例を示す。図中で例示しているように、上部構造と下部構造を接続する又は跨って設置される伸縮装置、支承部、防護柵等は、下部構造や上部構造に何かしらの損傷が生じた場合、その影響がこれら部材の変状として現れる場合がある。地すべりなどの地盤を介して橋に影響を及ぼす損傷については直接的に損傷を特定することが難しい場合があるため、その兆候を示す間接的な情報を取得し組み合わせて、損傷及び原因を推定することが重要である。例えば周辺地盤の地すべりが原因で伸縮装置の遊間異常が生じている際、原因を特定せず伸縮装置を更新した場合には、同じように遊間異常が再発する可能性が高いため留意する必要がある。

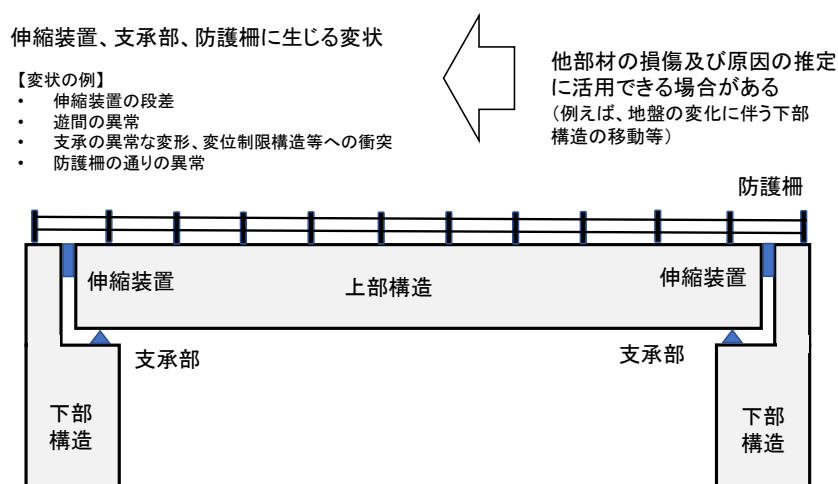


図2-3-2 部材の変状が他部材の損傷及び原因の推定に活用できる例

(2) 現況から次回点検に至るまでの状態評価と措置の必要性等の判断

橋単位の状態を直接評価することは困難なため、前述のように部材単位で状態評価をするのが一般的である。部材には、荷重伝達機能の他に、例えば支承などは、水平変位や回転への追従機能など複数の機能が求められる場合がある。橋を構成する部材・付属物等の例と部材・付属物等に求められる機能の例を図 2-3-3 に示す。部材の状態評価にあたっては、部材に求められる機能を明確化した上で、機能に応じて状態を評価することが重要である。部材の荷重伝達機能に対する状態評価にあたっては、変状が生じている部位の応力状態や変状が耐荷力に及ぼす影響等を適切に考慮することが重要である。断面欠損等の変状が生じて、発生応力が小さい場合や、耐荷力への影響が相対的に小さい部位、建設時の設計の際に安全余裕が大きい部位等では、補修補強が必要ないと判断できることがある。また、現況の状態評価だけでなく、次回の点検時までの状態評価を行い、措置の必要性や時期を判断する必要がある。損傷の進行性や次回点検までに損傷が進行した場合の影響を考慮することが求められる。その際には、部材・損傷ごとに、一般的と考えられる損傷の進行順序が参考になると考えられる。

部材の損傷は、その他の部材の損傷の原因となり橋全体の機能に影響を及ぼすことがあるため、当該部材だけでなく他部材への影響も考慮する必要がある。例えば、伸縮装置の止水機能が失われ、漏水が生じると、それが主桁端部の防食機能の劣化や腐食の原因となるため、主桁端部の損傷の程度や影響等も考慮した上で、伸縮装置の措置の必要性や時期を判断する必要がある。また、例えば、支承の水平変位や回転への追従機能が低下した場合、支承の取り付け部周辺に損傷が生じる場合がある。しかし、支承の水平変位や回転の追従機能が低下しても、小規模な橋では支承に生じる変位量や回転量が小さいため、影響が相対的に小さく損傷が生じにくい。このように、部材の機能低下が橋全体や他部材に及ぼす影響は、橋の構造形式、支間長などの諸元、周辺の部材の種類や状態などによっても異なることに留意して個別に検討する必要がある。

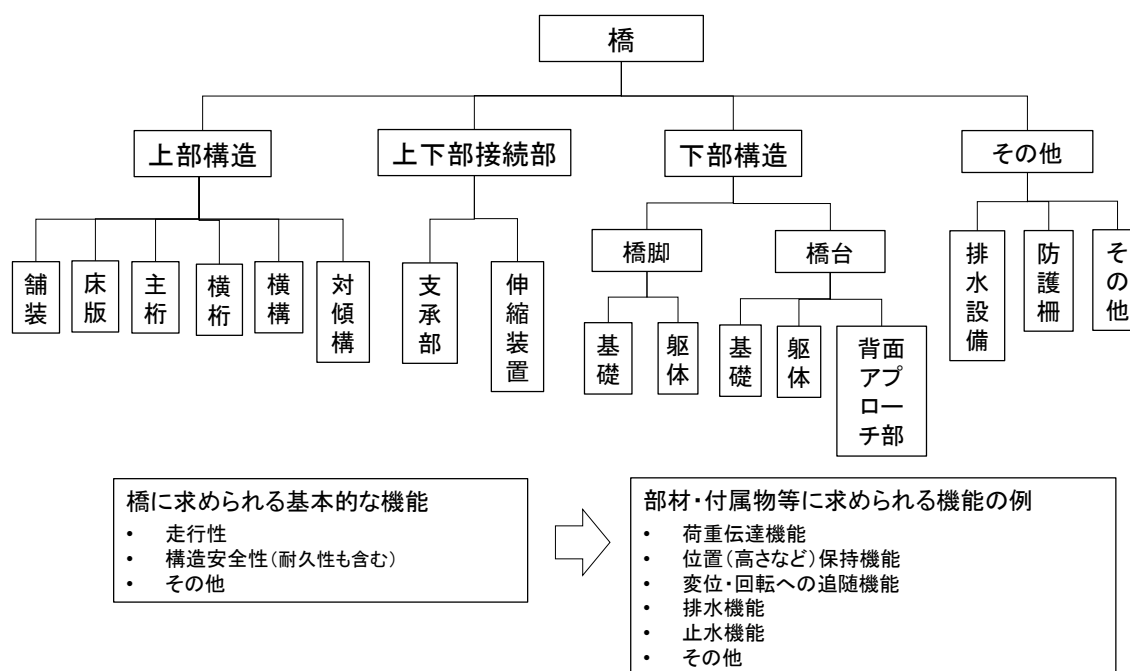


図 2-3-3 橋を構成する部材・付属物等の例と部材・付属物等に求められる機能の例

このように、部材に求められる機能の明確化、機能に応じた部材の現況及び次回点検までの状態評価、当該部材の損傷が橋全体や他部材に与える影響の推定等の一連の検討プロセスを経て、部材ごとに措置の必要性や時期について判断することが重要である。

(3) 措置方針に応じた措置工法の選定

損傷やその原因を特定した後、損傷のメカニズムに対応した措置方法を選択していくこととなる。その際、損傷の原因を完全に又は部分的に取り除き健全な状態に戻す「長寿命化」のための措置を目指すのか、損傷の原因を完全に排除することは困難であるため損傷の進行をできるだけ遅らせて今のレベルで長く使う「延命」の措置とするのか、「危機管理」とセットで措置するのか等の措置方針を決めることが重要である。その方針に基づき、架橋環境条件、交通規制などの施工が可能な時期や期間、それらの条件から選定された施工方法等における制約条件など、各種の条件に基づき、効果が発揮される具体的な措置方法を選択していくこととなり、このような論理的なプロセスで検討することが重要となる。なお、道路や橋の機能をできるだけ合理的に確保していくためには、補修補強だけでなく橋の架け替え等の選択肢もあり、例えば、延命措置を継続的に行うためのコストが非常に大きくなる場合などでは、橋の架け替えの判断を行うことも求められる。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路橋定期点検要領、2019.

第3章 診断セット

3.1 診断セットの概要

メンテナンスサイクルを確実にかつ円滑に実施していくためには、橋に生じる損傷のメカニズムを明らかにし、そのメカニズムに応じて、点検で何をどの精度で検知し、何を根拠に損傷や原因の特定等の診断を行い、どのような措置の方針とするべきか等、一連で整理することが重要となる。そこで、橋に生じる損傷のメカニズムや点検で取得すべき情報・詳細調査・診断の決め手となる情報・措置方針や工法例の一連の技術情報を「診断セット」と称して、体系的な整理を行った。診断セットを構成する項目の概要を表3-1-1に示す。診断セットでは、措置方針や工法例についても整理しており、診断に必要な詳細調査では措置方針等を示すために必要な調査も含めている。

AI（エキスパートシステム）に学習させるために、橋に生じるすべての損傷・劣化メカニズムを整理する必要があるが、解明ができていない場合にはデータ等から仮説を立て、診断セットとしてまとめている。整理に当たっては、共同研究参加者及び招へい研究員で議論を行い、経験に基づく暗黙知も含め診断セットに反映している。

診断セットは表3-1-2に示す部材・損傷種類について作成しており、緑着色した部材・損傷については次節以降で詳細を説明する。損傷種類は例えばRC床版の土砂化であれば、さらに細分化し「輪荷重による土砂化」、「凍害による土砂化」、「凍結防止剤による土砂化」、「アルカリシリカ反応（ASR）による土砂化」という形で要因毎に作成している。

表3-1-1 診断セットの構成

項目	内容
損傷メカニズム	何が原因で、損傷がどのように進行し、終局的にどうなるのかを図とともに解説した情報
点検における着目点	損傷の進行過程を特定するために必要な点検で着目する変状とその検知方法
診断に必要な詳細調査	損傷及び原因の特定、損傷の進行程度及び措置方針の判断に必要な詳細調査
診断の決め手となる情報	損傷及び原因の特定、損傷の進行程度及び措置方針の判断の決め手となる情報
措置の方針	長寿命化、延命、危機管理、緊急措置等の区分
工法例	措置の方針に応じた対策の例

表 3-1-2 診断セットの構成(1/2)

部材	損傷種類	部材	損傷種類		
RC 床版	疲労	鋼トラス	ボルトの遅れ破壊		
	土砂化		その他の損傷		
	塩害	橋台・橋脚	塩害		
	張出し部特有の損傷		アルカリシリカ反応(ASR)		
	その他の損傷		凍害		
床版橋上部工	塩害	基礎	洗堀		
	アルカリシリカ反応(ASR)		地すべり		
	凍害		側方流動		
	土砂化	支承	オゾン劣化		
	連結桁に特有の損傷		腐食		
	中空床版に特有の損傷		凍害		
	その他の損傷		ボルトの緩み		
PCT 桁	塩害	RC 溝橋	パッド型ゴム支承に特有の損傷 (ズレ・逸脱)		
	アルカリシリカ反応(ASR)		遊間不足・片当り		
	凍害		沓座モルタル内の空隙		
	連結桁に特有の損傷		縁端距離の不足		
	その他の損傷		下部構造の移動に起因する損傷		
RCT 桁	塩害		その他の損傷	地震に起因する損傷	
	アルカリシリカ反応(ASR)			伸縮装置	腐食
	凍害				疲労、摩耗等
	その他の損傷				走行繰返しによる隙間の形成
RC 溝橋	塩害		鋼桁	止水材の劣化	
	沈下	地震・側方流動			
	浸食	その他の損傷			
	その他の損傷	排水装置		腐食	
鋼桁	腐食		割れ		
	疲労	鋼トラス	疲労		
	ボルトの遅れ破壊				
	その他の損傷				

※ 緑着色した部材・損傷については次節以降で説明する。

表 3-1-2 診断セットの構成 (2/2)

部材	損傷種類
排水装置	ゴム、プラスチックの劣化
	伸縮異常
	その他の損傷

3.2 RC床版

3.2.1 一般

床版は、橋を通行する自動車などの荷重を直接支持し、それを直接又は床組を介して主桁に伝達させる部材である。床版形式には、RC床版、PC床版、鋼コンクリート合成床版、鋼床版などがあるが、ここでは、既設橋の中で最も多くを占めるRC床版を対象とする。

3.2.2 RC床版に生じる損傷

(1) 基本的な分類

これまで道路橋のRC床版の損傷は、大型車の繰り返し走行に起因する疲労損傷が多くを占めてきた。しかし近年では、路面からの水あるいは凍結防止剤の塩分を含む水がRC床版に浸入して、床版上面が土砂化（砂利化）した事例や、塩害、凍害、アルカリシリカ反応（以下、ASR）が複合的に関係していると疑われる損傷事例が報告されている。しかし、複合的な損傷の厳密な特定は困難であり、ここでは、措置方法の違いに着目して損傷の分類を行った。図3-2-1にRC床版の代表的な損傷の分類を示す。

RC床版の代表的な損傷として、疲労、土砂化、外来塩（飛来塩）による塩害、内在塩による塩害の4つに分類した。疲労は、損傷の主な原因が輪荷重の繰り返し作用であり、床版下面からひび割れが進行し床版剛性が低下するため、床版剛性を回復する措置が基本となる。一方、土砂化は、床版上面から損傷が進行する。塩害、凍害、ASRなどと複合的に生じる場合があるが、損傷の主な原因が床版上面からの水や塩分の浸入と考えられるため、土砂化が軽微な段階では、床版上面からの水や塩分の浸入の防止が基本となる。外来塩（飛来塩）による塩害は、塩分浸透が軽微な段階では床版表面からの塩分の浸透の防止等が措置の基本となる。内在塩による塩害は、塩分を含むコンクリートの除去等が基本となる。このため、この4つに分類し、さらに床版張出し部では、一般部と構造的な違いから特有の損傷が生じるため、この4つとは別に、張出し部特有の損傷として分類した。

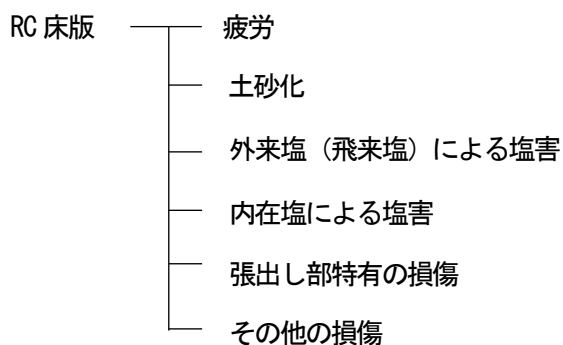


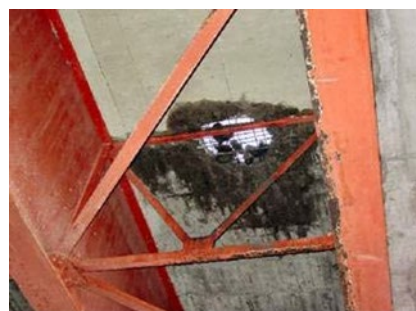
図3-2-1 RC床版に生じる損傷の基本的な分類

(2) 疲労

疲労は、輪荷重の繰り返し作用が原因で生じ、床版下面側からひび割れが発生し進展することで最終的には抜け落ちに至る損傷である。図 3-2-2 に RC 床版の疲労による損傷を例示する。措置としては、床版の剛性回復が基本となる。床版張出し部は、輪荷重による作用の影響が小さいことから疲労損傷は生じにくい。



1) 床版下面の格子状のひび割れ



2) 床版コンクリートの抜け落ち

図 3-2-2 RC 床版の疲労の事例

(3) 土砂化

土砂化は、床版への水や塩分の浸入が主な原因で生じると考えられており、床版上面側からコンクリートの土砂化（砂利化）が進行し、最終的には抜け落ちに至る損傷である。措置としては、コンクリートの土砂化が軽微な段階では、床版上面からの水や塩分等の浸入の防止、土砂化が進行した段階では、床版上面からの水や塩分等の浸入の防止に加えて床版の剛性回復が基本となる。土砂化の進行には、輪荷重、凍害、凍結防止剤による塩害、ASR が影響を及ぼす場合があり、複合的に進行する場合もあると考えられる。ただし、措置方法としては、上述のように基本的に床版上面からの水や塩分等の浸入を防止することとなることや、現時点で複合的な損傷の扱いを明確に示すことは困難なことから、表 3-2-1 に示すように土砂化の損傷の中に、輪荷重、凍害、凍結防止剤による塩害、ASR に細分類し、土砂化（輪荷重）、土砂化（凍害）、土砂化（凍結防止剤による塩害）、土砂化（ASR）として示すこととした。図 3-2-3 に RC 床版の土砂化による損傷を例示する。

表 3-2-1 RC 床版の土砂化の細分類

損傷	主な要因による分類
土砂化	輪荷重
	凍害
	凍結防止剤による塩害
	ASR



1) 舗装のひび割れ



2) 床版コンクリート上面の土砂化

図 3-2-3 RC 床版の土砂化の事例

(4) 外来塩（飛来塩）による塩害

飛来塩による塩害は、海から飛来する塩分が主な原因で床版内部の鉄筋の腐食が生じ、コンクリートのうきや剥離等が生じる損傷であり、塩分浸透が軽微な段階の措置としては、コンクリート表面からの塩分浸透の防止（表面被覆又は含浸）が基本となる。

(5) 内在塩による塩害

初期内在塩による塩害は、建設時に塩分を含んだ混和剤または海砂の使用により、建設当初から鉄筋の腐食が生じ、コンクリートのうきや剥離等が生じる損傷である。措置としては、変状が全体的・広範囲で生じている場合には、床版の全面的な取替えが基本となる。

(6) 張出し部特有の損傷

水切り部等のかぶりが相対的に少ない部位では、塩分の影響がなくても鉄筋の腐食が生じ、コンクリートのうきや剥離が生じる場合がある。また、床版張り出し部では雨水が直接かかることや、地覆や床版側面等を伝ってコンクリート表面に水が供給され、かつ、日射の影響も受けやすいことから、寒冷地では凍害が生じる場合がある。

(7) その他の損傷

かぶり不足や締固め不良等の製作・施工不良によって水等の劣化因子が容易にコンクリート内に浸透し鉄筋腐食やコンクリートの剥落などの変状が生じる場合がある。

3.2.3 疲労のメカニズムと措置方針

疲労は、輪荷重の繰り返し作用が主な原因で生じる損傷である。このため、大型車交通量が多いほど疲労が生じやすい。また、RC 床版は、昭和 40 年代から疲労対策として技術基準の見直しがされてきている。古い基準で作られた RC 床版は、最新の基準で作られたものと比べ床版厚が薄く配力鉄筋が少ないため、疲労損傷が生じやすい。その他、舗装の切削オーバーレイの際に床版上面のかぶりが減り、床版厚が小さくなる場合がある。そのような場合には、古い基準で作られた薄い床版と同様、疲労が生じやすい。また、床版

上面から水が浸入すると、ひび割れ面のすりみがきが促進されることにより、損傷の進行が相対的に早くなる。このため、診断にあたっては、床版防水工の有無について確認するとともに、床版内への水の浸入の影響を考慮する必要がある。

図3-2-4にRC床版の疲労の代表的な損傷過程を示す。また、表3-2-2に診断セットを示す。コンクリートの打設後、乾燥収縮により床版にひび割れが生じる場合がある。舗装前に雨水が浸透したことにより生じたひび割れに沿った漏水・遊離石灰は、舗装後に乾けば問題ないため、適切に見極める必要がある。供用開始後、輪荷重の影響により床版下面に橋軸方向又は橋軸直角方向に曲げひび割れが生じる。図中では、橋軸方向の曲げひび割れが生じた後に、橋軸直角方向の曲げひび割れが生じる順番を示しているが、どちらが先行するかは、構造条件・荷重条件等によって異なる。その後、ひび割れが進展し、格子状のひび割れが形成される。全面的に格子状のひび割れが生じている場合は、疲労損傷として判定できる場合が多い。格子状のひび割れであっても、特定の部位のみに局所的に生じている場合には、輪荷重による疲労ではなく他の原因の可能性も考えられる。例えば、コンクリートの品質、過去の補修の際の既設部位との弾性係数の差などが考えられ、原因を推定した上で、措置方針や工法を選定することが望ましい。

ひび割れが格間で全面的に格子を形成しており、格子の大きさは床版厚程度より大きい（約0.2～0.5m）4)の段階で、格子状のひび割れ発生位置で漏水・遊離石灰を併発していない条件であれば、曲げ補強による効果を得ることができると考えられる。しかし、4)の段階で、漏水・遊離石灰を併発している場合には、雨水が床版上面から浸透していること、また、貫通ひび割れが生じていることが疑われるため、一般にせん断補強が必要となると考えられる。また、ひび割れが格子を形成し、格子の大きさは短辺が床版厚程度以下（約0.2m）の箇所が複数ある5)の段階は、格子密度が飽和状態となり、貫通ひび割れが生じる可能性があるため、補修補強までの時間を考慮すると一般にせん断補強が必要となると考えられる。せん断抵抗の回復のための補強方法の1つとして、上面増厚が挙げられるが、目地部の防水、既設床版との付着性、増厚部のコンクリートの変形性能に対して十分注意する必要があり、再劣化するリスクを考慮し、床版部分打替え又は床版全面取替えも検討することが望ましい。貫通ひび割れが増加する6)の段階では、床版の抜け落ちまでの時間が少なくなっているため、危機管理しながら対応することが望ましい。特に、床版下面の密な格子状のひび割れから顕著な漏水・遊離石灰が生じている場合等では、せん断耐力を喪失している可能性が高いため、緊急措置が望ましい。なお、床版の打替えのため撤去する場合、主桁の設計が床版の剛性を見込んだ合成桁なのか、見込んでいない非合成桁なのかを確認するとともに、施工ステップに応じて安全性が確保されるように留意する必要がある。

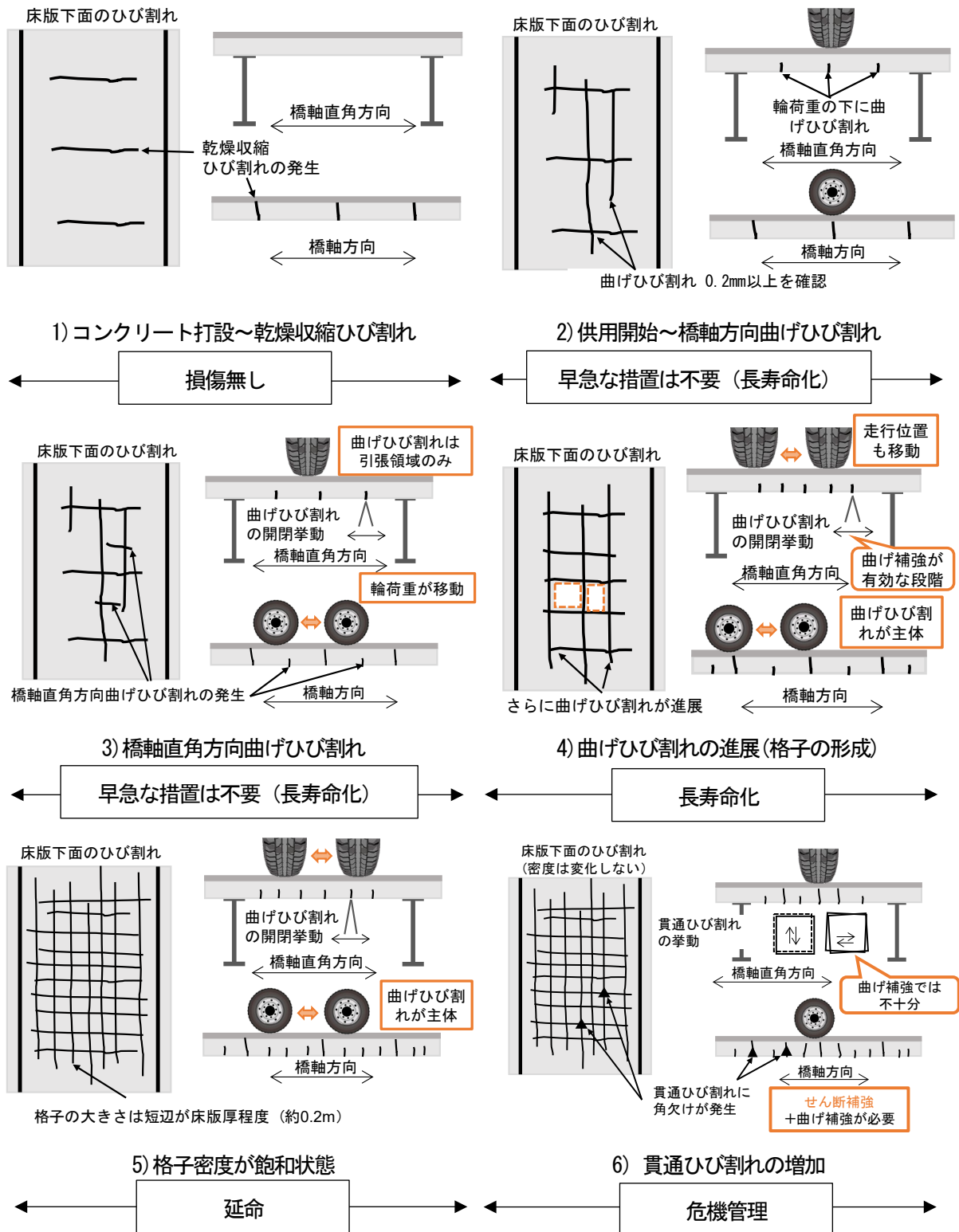
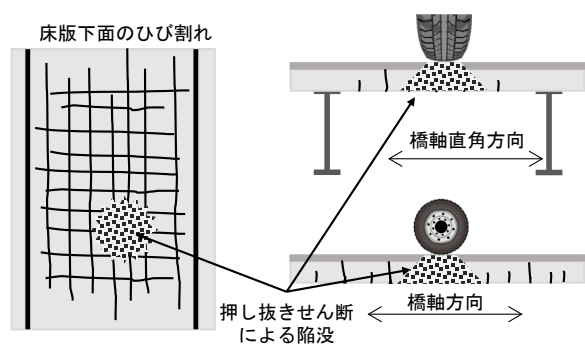


図 3-2-4 RC 床版の疲労の代表的な損傷過程 (1/2)



7) 押し抜きせん断破壊 (陥没)

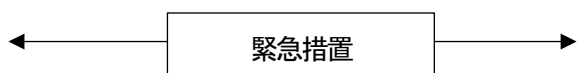


図 3-2-4 RC 床版の疲労の代表的な損傷過程 (2/2)

表 3-2-2 RC 床版の疲労の診断セット

メカニズム	点検における着目点 (定期点検)	診断に必要な詳細調査	診断の決め手となる情報	追加情報		措置の方針	工法例	
外観変状 有り	1.乾燥収縮によるひび割れが発生	・床版下面のひび割れ	—	・ひび割れは橋軸直角方向のみ	—		損傷無し	損傷無し
	2.乾燥収縮によるひびわれに加え、橋軸方向に曲げひび割れが発生	・床版下面のひび割れ	—	・橋軸方向に幅0.2mm以上のひび割れ (格子は形成されていない)	—		早急な措置は不要または長寿命化 (遮水 ^{注5})	床版防水等の遮水対策 ^{注5}
	3.乾燥収縮や橋軸方向の曲げモーメントによるひびわれに加え、橋軸直角方向に曲げひび割れが発生	・床版下面のひび割れ	—	・橋軸方向に幅0.2mm以上のひび割れ (格子は形成されていない)	—		長寿命化 (曲げ補強) + 遮水 ^{注5}	部分的な炭素繊維接着 ^{注2} + 床版防水 ^{注5}
	4.ひび割れが格子状 (亀甲状) に進展	・床版下面のひび割れ、漏水・遊離石灰	—	・幅0.2mm以上のひび割れが複数の格子を形成し、格子の大きさは床版厚程度より大きい (約0.2~0.5m) ^{注6}	局部的 ^{注8}	前回点検から格子状のひび割れが進行 (増加・進展) していない 前回点検から格子状のひび割れが進行 (増加・進展)	延命 (曲げ補強+せん断補強) または床版更新 ^{注1} + 遮水 ^{注5}	炭素繊維接着 ^{注2} + 床版防水 ^{注5}
				全面的	格子状のひび割れ位置で漏水・遊離石灰を併発していない 格子状のひび割れ位置で漏水・遊離石灰を併発している	延命 (曲げ補強+せん断補強) または床版更新 ^{注1} + 遮水 ^{注5}		
5.格子密度が飽和状態	・床版下面のひび割れとその間隔 (密度)	—	・幅0.2mm以上のひび割れが格子を形成し、格子の大きさは短辺が床版厚程度以下 (約0.2m) の箇所を複数確認	局部的 ^{注8}	—		延命 (曲げ補強+せん断補強) または床版更新 ^{注1} + 遮水 ^{注5}	部分的な炭素繊維接着 ^{注2} 、 ^{注3} + 上面増厚 ^{注4} or 床版部分打替え ^{注7} + 床版防水 ^{注5}
				全面的	—			炭素繊維接着 ^{注2} 、 ^{注3} + 上面増厚 ^{注4} or 床版部分打替え ^{注7} or 床版全面取替え ^{注7} + 床版防水 ^{注5}
6.貫通ひび割れの増加	ひび割れの角欠け (角落ち)	外観で判別できない場合、削孔+孔内の観察	・幅0.2mm以上の密な格子状のひび割れに連続した角欠け (角落ち)	密な格子状のひび割れ発生位置で漏水・遊離石灰が生じていない	・前回点検からひび割れの角欠け (角落ち) が進行していない ・前回点検時からひび割れの角欠け (角落ち) が進行している ・床版下面の角欠け (角落ち) が著しく、ある範囲で一体性を失っている	危機管理 (規制+敷鋼板+床版更新)	床版部分打替え ^{注7} or 床版全面取替え ^{注7}	
					・床版下面の密な格子状のひび割れから顕著な漏水・遊離石灰が生じている	緊急措置 (規制+敷鋼板+床版更新)		
7.抜け落ちの発生	—	—	・押し抜きせん断による陥没の発生	—		—		

注1 ひび割れ密度が飽和し貫通ひび割れが増加した段階で、路線重要度が高い場合には床版取替が望ましい。
 注2 炭素繊維接着と合わせてひび割れ補修が有効となるのは、ひび割れ補修によって一体化が可能な場合であることに注意する。
 注3 応急復旧として炭素繊維接着を実施する場合もあるが、部分打替えなどの本対策を別途検討する。
 注4 上面増厚実施時は、目地部の防水、既設床版との付着性、増厚部のコンクリートの変形性能に注意が必要である。
 注5 漏水・遊離石灰が確認された場合、床版防水がされていない場合
 注6 複数の格子状のひび割れ (閉じたブロック) が形成され、かつ、漏水・遊離石灰が確認された場合には、ひび割れが貫通している可能性があるため曲げ補強+せん断補強が必要 (又は更新)。
 注7 主桁の桁形式 (合成桁/非合成桁) によっては床版撤去時の応力度に注意が必要である。
 注8 疲労以外の原因の可能性があり、例えば、伸縮装置付近、歩車道境界付近など、どの部位に局所的に発生しているかに応じて原因が異なる場合がある。また、部分的に材料や施工品質が悪い等が原因の可能性がある。発生している部位に応じて、原因を推定した上で、措置方針や工法を選定することが望ましい。

3.2.4 土砂化のメカニズムと措置方針

土砂化は、床版への水や塩分の浸入が主な原因となり、床版の上面側からコンクリートの土砂化が進行し、最終的には抜け落ちに至る損傷である。代表的な損傷過程として、**図3-2-5**に凍結防止剤の浸入に起因したRC床版の土砂化の損傷過程、**表3-2-3**に診断セットを示す。

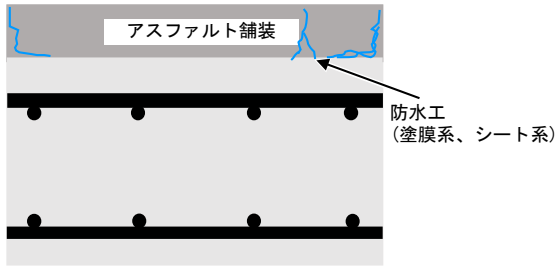
1990年代のスパイクタイヤの禁止以降、凍結防止剤の散布量が増加しており、国内の広い範囲で散布されている。診断にあたっては、凍結防止剤の散布の有無と床版防水工の有無について把握することが望ましい。床版防水工の止水機能は経年劣化により損失する恐れがあるため、前回床版防水工を実施してからの経過年数も把握することが望ましい。水と凍結防止剤に含まれる塩化物イオンは、舗装の施工目地や伸縮装置、地覆境界、舗装のひび割れ等から床版内部に浸入する。水が床版コンクリート内に浸透すると、輪荷重の繰り返し作用の影響を受けて、床版上面から土砂化が進行するとともに、床版内に浸入した塩化物イオンの濃度が上側鉄筋位置で発錆限界を超えることで、鉄筋に腐食が生じる。その後、かぶりコンクリートのうき・剥離が生じ、かぶりコンクリートの土砂化がさらに進行する。土砂化は徐々に深層化し、滞水層がある場合には輪荷重により大きな水圧が発生するなどして陥没が生じる。ただし、実際には様々なパターンで損傷が進行するものと考えられるため、上記は一例を示したものである。

2)の上側鉄筋の腐食が発生する段階から3)のかぶりコンクリートがうきや剥離を生じる段階となると、床版防水工だけでなく床版自体に対する補修補強が必要となる。土砂化が生じている部位をはつり断面修復を行う方法を適用する場合、はつる範囲の適切な設定や、断面修復部の変形性能を既設コンクリートに合わせるなど慎重に検討しなければ再劣化の可能性があるため、床版の部分打替えについても検討するのがよい。いずれにおいても、このような措置はコストがかかるため、できるだけ1)の段階で、床版に水が浸入しないための措置を行い、長寿命化を図ることが望ましい。

外観目視により舗装の異常や床版下面、排水ます周辺からの漏水の有無等を把握することで、1)の段階を把握できる可能性もあるが、より定量的に把握する方法として電磁波レーダを用いた方法がある^り。本方法は、滞水が生じた状態や床版上面が破砕された状態において電磁波の反射強度が健全部と異なる特性に着目して状態把握を行うことができる。この方法を活用して、できるだけ早期に土砂化の原因となる水の浸入の有無や土砂化の初期の段階を把握し、床版防水等の予防保全をすることで、長寿命化を図ることができるものと考えられる。

床版土砂化は床版の上面から進行することから、舗装の異常や舗装の異常箇所土砂噴出が生じている場合は、土砂化が疑われる。上側鉄筋下面まで土砂化が進行し、その直下に遊離石灰が生じている場合には、抜け落ちまでの猶予がなく、緊急的な措置が必要となる場合があるため、留意する必要がある。

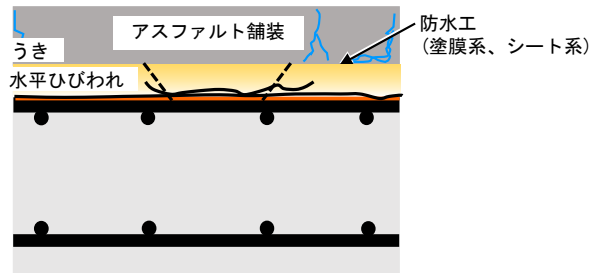
舗装のひび割れ等から水と凍結防止剤に含まれる塩化物イオンが浸入。



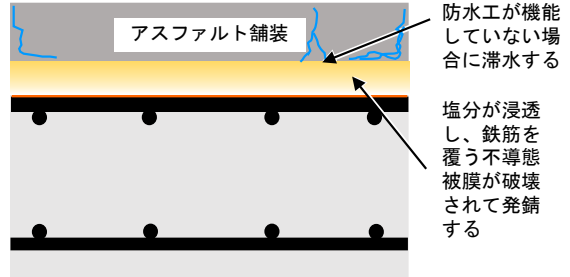
1) 凍結防止剤を含む路面からの漏水

長寿命化

上側鉄筋位置で水平ひびわれやうきが発生。



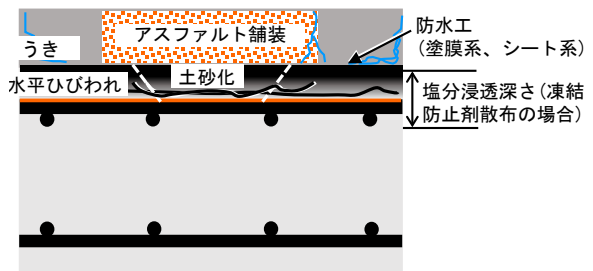
上側鉄筋位置での塩化物イオン濃度が発錆限界を超え、鉄筋の腐食が発生。



2) 上側鉄筋の腐食発生

延命

上側鉄筋かぶりの土砂化により舗装にクモの巣状のひびわれ等の異常が発生。

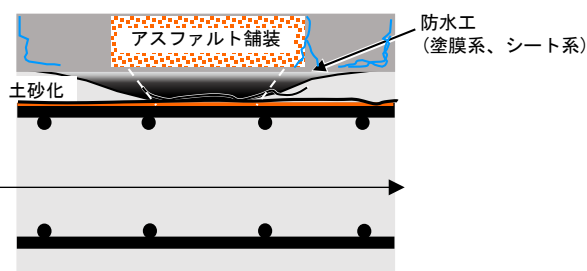


3) かぶりコンクリートのうき剥離

延命

4) かぶりコンクリートの土砂化

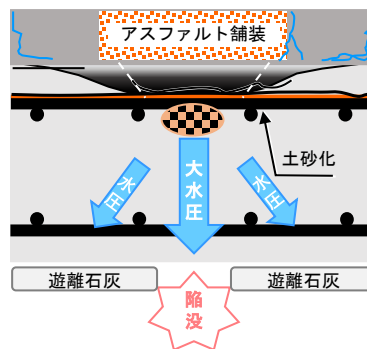
土砂化が上側鉄筋下面までに達する。



5) 深層土砂化

延命

床版の抜け落ちの発生。



6) 陥没

緊急措置

図 3-2-5 RC 床版の土砂化（凍結防止剤による塩害）の損傷過程

表 3-2-3 RC 床版の土砂化（凍結防止剤による塩害）の診断セット

メカニズム	点検における着目点 (定期点検)	診断に必要な 詳細調査	診断の決め手となる情報	追加情報	措置の方針	工法例					
1.凍結防止剤を含む路面からの漏水	<ul style="list-style-type: none"> 床版下面、排水ます周辺からの漏水 凍結防止剤の散布 舗装下の滞水（電磁波レーダ調査）^{注7} 	<ul style="list-style-type: none"> 電磁波レーダ縦断面図の確認 	<ul style="list-style-type: none"> 凍結防止剤散布有り 床版下面の漏水跡 縦断面図の舗装と床版の境界が一樣ではない 	-	長寿命化（遮水）	床版防水工					
2.上側鉄筋の腐食発生							<ul style="list-style-type: none"> 電磁波レーダ縦断面図の確認 	<ul style="list-style-type: none"> 縦断面図の舗装と床版の境界が一樣ではない 錆汁などの腐食の痕跡で推定する 	-	延命（塩分の除去または更新 ^{注3} ）	床版防水工 + 断面修復工 ^{注1、注2} or 床版部分打替え ^{注6}
3.かぶりコンクリートの剥離							<ul style="list-style-type: none"> 外観で判別できない場合、削孔+孔内の観察 電磁波レーダ縦断面図の確認 	<ul style="list-style-type: none"> 舗装の異常（はがれ、蜘蛛の巣状のクラック、ポットホール） 縦断面図の舗装と床版の境界が一樣ではない 錆汁などの腐食の痕跡で推定する 			
4.かぶりコンクリートの土砂化	<ul style="list-style-type: none"> 舗装に異常が生じる場合がある 床版下面、排水ます周辺からの漏水 舗装の異常箇所での土砂噴出 凍結防止剤の散布 舗装下の滞水（電磁波レーダ調査）^{注7} 	<ul style="list-style-type: none"> 電磁波レーダ縦断面図の確認 外観で判別できない場合、削孔+孔内の観察 	<ul style="list-style-type: none"> 舗装の異常（はがれ、蜘蛛の巣状のクラック、ポットホール） 上側鉄筋に著しい腐食 舗装の異常が発生している箇所から土砂が噴出 縦断面図の舗装と床版の境界が乱れている 	-	<ul style="list-style-type: none"> 舗装の補修箇所にも再劣化 舗装の異常が発生している直下の床版下面に遊離石灰 	延命+走行性の確保 ^{注4} （舗装または床版の更新）					
5.深層土砂化							<ul style="list-style-type: none"> 床版上側鉄筋程度までの深い土砂化 舗装の異常が発生している直下の床版下面に遊離石灰 舗装の土砂噴出口や床版下面から錆汁が滲出する場合もある 縦断面図の舗装と床版の境界が乱れている 	-	<ul style="list-style-type: none"> 氷柱状の遊離石灰が析出している場合は更なる進行が懸念されるためより緊急性が高い 	緊急措置 ^{注5} （規制+敷鋼板+床版更新）	
6.陥没	-	-	<ul style="list-style-type: none"> 抜け落ちの発生 	-							

注1 床版上面から断面修復を実施する際には、ウォータージェットによりはつり、断面修復部の変形性能を既設コンクリートに合わせる事が重要である。必要に応じて、床版上面専用の断面修復材の使用を検討する。

注2 床版上面への断面修復は緊急措置と考え、早期に再劣化の可能性がある。なお、早期の再劣化を防止するためには床版厚さ方向のはつり深さが重要だが、その目安は今後の研究にて検討予定である。

注3 補修箇所の再劣化が頻発し、路線重要度も高い場合には、床版取替が望ましい。

注4 走行性に影響を与える舗装の異常が発生している場合には通行規制が必要となる。

注5 上側鉄筋下面まで土砂化が進行し、その直下に遊離石灰が生じている場合には、抜け落ちまでの猶予がなく、緊急対応が必要となる。

注6 主桁の桁形式（合成桁/非合成桁）によっては床版撤去時の応力度に注意が必要である。

注7 定期点検の点検項目ではないが、便宜上、「点検における着目点」に記載している。

※措置の方針と工法例は管理レベル：高の橋梁に対するものを示す（管理レベル：中と低の措置方針と工法例は検討中）。

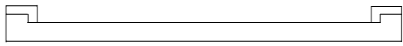
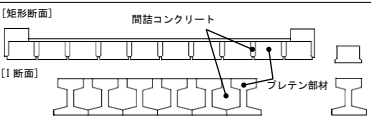


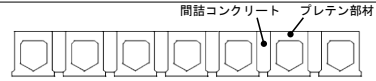
※措置は原則床版の補修補強の実施によらず水の浸入を止めることが基本であり遮水対策を行う必要がある。

3.3 床版橋上部構造

3.3.1 一般

床版橋は、桁と床版の機能が一体化した版構造を有している上路式の上部構造である。この版構造は、相対する2辺が支持され、他の2辺が自由な構造であり、構造形式はプレストレスの有無および内空部の有無等の断面形状の違いによって分類することができる。表3-3-1に床版橋の主な構造形式一覧を示す。

表3-3-1 床版橋の主な構造形式一覧

プレストレスの有無	緊張方式	中空部分の有無	構造形式・図
RC構造	-	中空部分 なし ↓ 中実床版橋	RC中実床版橋 
PC構造	ポストテンション方式		RC中実床版橋 (上図) PCI桁床版橋 (下図) 
	プレテンション方式		
RC構造	-	中空部分 あり ↓ 中空床版橋	RC中空床版橋 
PC構造	ポストテンション方式		ポステン中空床版橋 (場所打ち) 
	プレテンション方式		プレテン中空床版橋 

PC構造の特徴としては、PC鋼材を部材断面内部に配置する内ケーブル構造と外部に配置する外ケーブル構造に分類できる。また、プレストレスの導入の方向としては、緊張方式によらず橋軸方向および橋軸直角方向に分類できる。ここでは、従来用いられている内ケーブル構造を概説する。

内ケーブル構造におけるPC鋼材の緊張方式は、ポストテンション方式とプレテンション方式に分類できる。ポストテンション方式は、コンクリート部材が硬化した後に、その内部に設けられたシースに配置されたPC鋼材を緊張するもので、緊張力の導入は主としてPC定着具を使って行われる。一方、プレテンション方式は、設備のあるPC工場で作製されるもので、PC鋼材をあらかじめ所定の力、位置に緊張しておき、これにコンクリートを打込み、これが硬化した後に緊張力を解放してプレストレス力が与えられる。

断面形状としては、中実床版橋に対し、中空床版橋は自重を軽減するために内空部分を設けたものである。一般に、支間長が10mより小さい場合は中実床版橋、支間長が10mより長い場合は中空床版橋が用いられることが多い。特に、中空床版橋は、RC中空床版橋やポステン中空床版橋(場所打ち)と、プレテン中空床版橋の製作方法による違いから、損傷が異なる。前者は中空部分、いわゆるボイド部を金属製の円筒型枠を用いて製作する一方で、後者は工場において、内空部分、いわゆるホロー部を発泡スチロール製の円筒埋設型枠を用いて製作する。そのため、コンクリートの打設後、RC中空床版橋及びポステン中空床版橋は金属製の円筒型枠が断面に残る。この違いから、コンクリート打設中のボイドの浮き上がり等により、ボイド上面のコンクリートかぶりが薄くなった部分等を起点として、床版上面から円筒型枠内に雨水が浸入するという過

去の事例もある。ここでは、床版橋を対象に、このような構造形式ごとの違いなどに着目した損傷の分類やメカニズムなどを整理した。以降に詳細を示す。

3.3.2 床版橋に生じる損傷

(1) 基本的な分類

図3-3-1に床版橋の代表的な損傷を示す。代表的な損傷は、塩害、アルカリシリカ反応（ASR）、凍害、土砂化、連結桁に特有の損傷、中空床版橋に特有の損傷とし、これらに該当しないものはその他の損傷として分類した。床版橋は、桁と床版の機能を担い、桁とRC床版に生じる損傷と同様の損傷が生じるものと考えられるが、RC床版と比較すれば版厚は厚くなるため疲労損傷までは相対的に生じにくいと考えられる。中空床版橋でボイドの浮き上がりにより上面側の厚さが薄い場合、陥没が生じる事例などがあり、このような損傷は特有の構造条件で生じる損傷と区分した。複合的な損傷として、たとえばASRと塩害、凍害と塩害が生じ得るものの、ここではそれぞれ区分して整理している。さらに、それぞれの損傷に対して、措置の観点から細かく分類した結果については、(2)以降に示す。

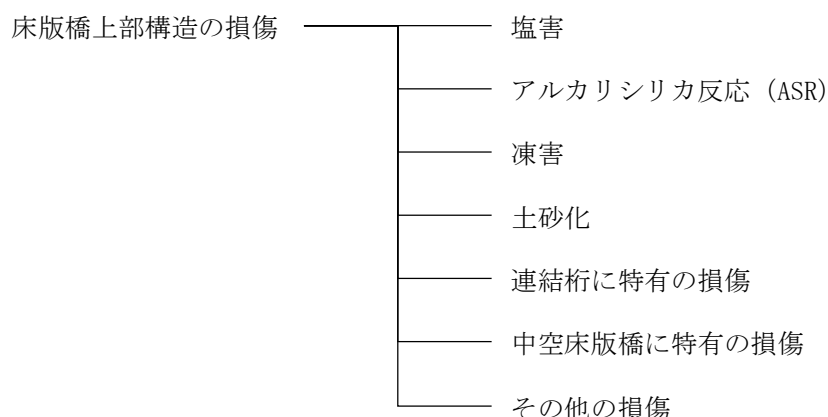


図3-3-1 床版橋に生じる損傷の基本的な分類

(2) 塩害

塩害は、塩化物イオンの作用によりコンクリート中の鋼材を保護している不動態被膜が破壊され、酸素と水の供給により鉄筋が腐食し膨張することで、コンクリートのひび割れや剥離などが生じる現象である。この不動態被膜の破壊メカニズムには諸説あるが、塩化物溶液中では鋼材が活性溶解し、腐食する可能性が高くなるためといわれている。ここでは、塩化物イオンの供給経路の違いから、外来塩と初期内在塩に分類した。表3-3-2に分類を示す。

外来塩は、海からの飛来塩による塩害と凍結防止剤散布による塩害に分類した。飛来塩による塩害は、主として海水を含んだ海風によって桁表面に付着する塩分がコンクリート内部に浸透し、鋼材腐食、鋼材破断に至る損傷である。塩分浸透が軽微な段階では、措置はコンクリート表面からの塩分浸透防止（表面被覆又は含浸）である。一方で、凍結防止剤による塩害は、凍結防止剤を含んだ水の供給経路によって措置が異な

る。そのため、代表的な水の供給経路として、①伸縮装置からの漏水、②路面からの漏水、③縦目地部からの漏水の3つに分類し、それぞれの損傷箇所に応じた損傷メカニズムおよび措置方針を整理した。図3-3-2に水の供給経路を示す。なお、縦目地は道路方向に平行につくられる目地である。たとえば、縦目地は拡幅等によって増設された橋と既設橋の間に設けられる。凍結防止剤による塩害は路面からの漏水等が要因のため、措置は橋面防水の設置による防水・止水対策が基本となる。

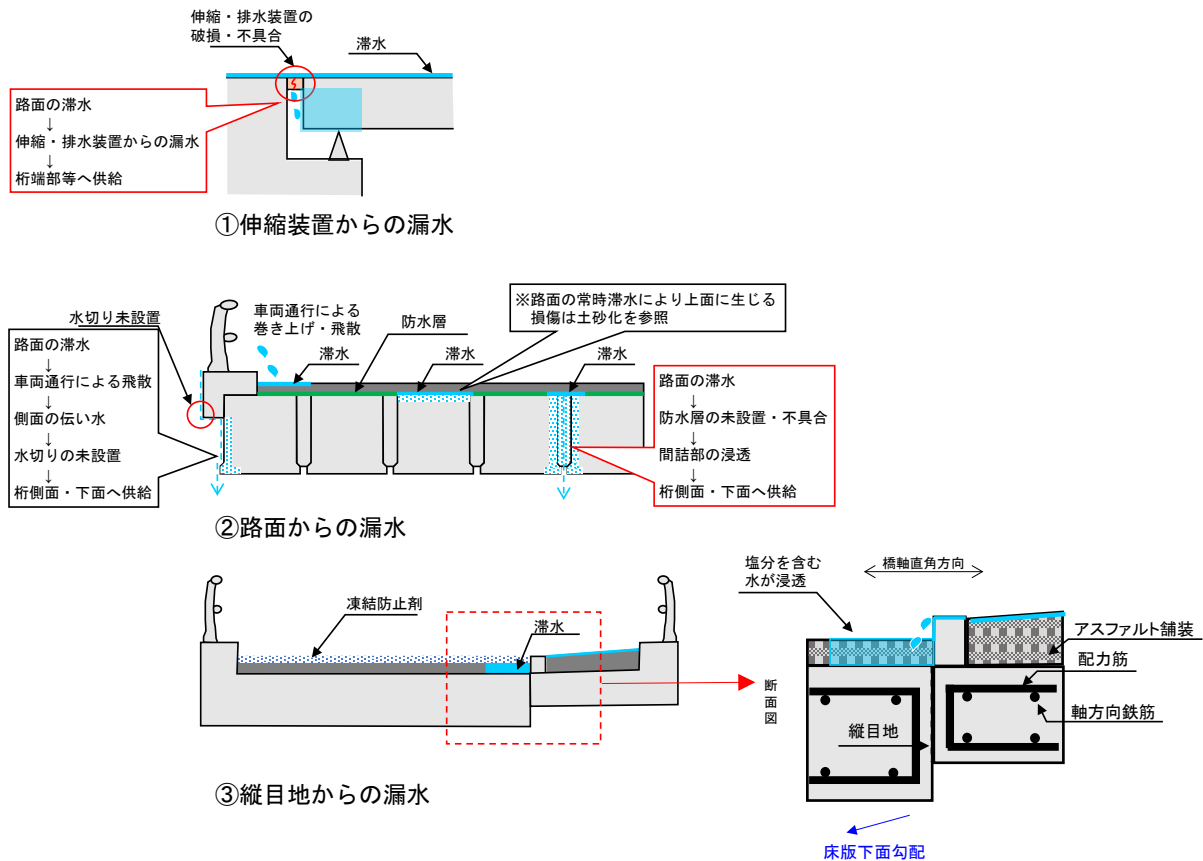


図3-3-2 水の供給経路

初期内在塩による塩害は、塩分を含んだ混和剤または海砂の使用により、建設当初からコンクリート中に多量の塩分が含まれていたことによって生じる損傷である。主桁が工場製作の場合、初期内在塩による塩害は生じる可能性はほぼない。ただし、現地で主桁を作製するケースもある。この場合、初期内在塩を含むコンクリートが用いられる可能性があることから主桁の初期内在塩による塩害は生じる可能性がある。この損傷は、「コンクリート中の塩分総量規制」(1986年)以前に生じる場合がある。措置としては鋼材腐食の進行抑制が基本となる。表3-3-2における各損傷の例を図3-3-3に示す。

表 3-3-2 塩害による損傷の細分類

損傷	塩化物イオンの供給経路による分類		水の供給経路による分類
塩害	外来塩による 塩害	飛来塩による塩害	—
		凍結防止剤による塩害	伸縮装置からの漏水
			路面からの漏水
	初期内在塩による塩害	—	



1) 飛来塩による変状



2) 凍結防止剤による変状

図 3-3-3 塩害による変状例

(3) ASR

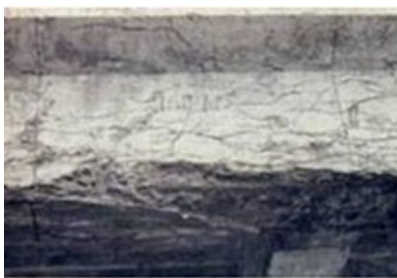
ASR は、アルカリ骨材反応性鉱物を含有する骨材（反応性骨材）がコンクリート中の高いアルカリ性を示す水溶液と反応して膨張することによって、コンクリートがひび割れ、さらには水や塩化物イオン等の劣化因子が浸透し鋼材腐食または破断といった変状が生じる現象である。アルカリ骨材反応性を有する鉱物は、一般にガラス質、シリカ鉱物、石英である。このような鉱物を含有する反応性骨材は全国幅広い地域に分布している。1980 年頃に ASR が顕在化したため、1986 年に JISA5308-1986「レディーミクストコンクリート」アルカリ骨材反応に関する骨材の試験方法および判定基準、ならびにアルカリ骨材反応抑制対策の方法が規定された。基本的に ASR は、アルカリ骨材反応性鉱物が含まれるコンクリート中に水が供給されて生じるため、水の浸入の抑制が措置の基本となる。その上で、ASR により発生したひび割れが耐久性上有害となる場合にはひび割れに対する措置が必要となる。図 3-3-4 に ASR による変状例を示す。



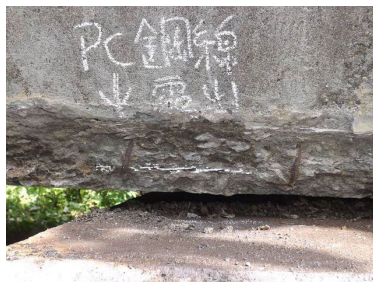
図 3-3-4 ASR による変状例 (PC 鋼材または鉄筋に沿ったひび割れ)

(4) 凍害

凍害は、コンクリート内の水分が凍結する際に生じる圧力が、外気温の上昇による融解と外気温の低下による凍結を繰り返す度に作用し、コンクリート表層に微細ひび割れ、スケーリング、ポップアウトが生じる現象である。この圧力は、コンクリート内の水分が凍結時に 9 %程度体積膨張することによって発生する膨張圧と、凍結によってコンクリート内部のアルカリ濃度が上昇し濃度勾配が生じて発生する浸透圧の 2 つの複合作用であると考えられている。コンクリート中へ水が浸入し、温度変化によって凍結融解が生じることで凍害は発生するため、水の浸入抑制などの措置が基本となる。なお、スケーリングはコンクリート表層が薄片状に剝離剥落する変状であり、ポップアウトは骨材部分のコンクリート表面が円錐状に剝離する変状である。ここでは、凍結融解を繰り返す状況から鉄筋露出に至る一連の損傷過程を想定した。図 3-3-5 に凍害による変状を示す。



1) 微細ひび割れ



2) スケーリング



3) ポップアウト

図 3-3-5 凍害による変状例

(5) 土砂化

土砂化は、3.2.2(3)に示す通りである。表3-3-3に分類を示す。土砂化による変状の例を図3-3-6に示す。

表3-3-3 土砂化による損傷の細分類

損傷	主な要因による分類
土砂化	輪荷重
	凍害
	凍結防止剤による塩害
	ASR



図3-3-6 土砂化による変状例

(6) 連結桁に特有の損傷

連結桁は、プレテンション桁を単純桁として架設し、中間支点上で場所打ちコンクリートを用いて RC 構造で連結することにより、連続桁とする構造形式である。連結桁では、コンクリートの硬化後、クリープ、乾燥収縮による桁の上向き方向の変形が連結部において拘束されることによって桁下面にひび割れが生じることがある。図3-3-7に変状を示す。竣工後、数年程度でクリープが終了した以降はひび割れが進展しない。生じたひび割れに水や塩分が浸入し、耐久性上有害となる場合には、必ずしもひび割れ注入に限定されないものの、内部鋼材の腐食が生じないような措置が必要となる。なお、図3-3-7に示す事例はプレテンT桁の事例であり、実状としては床版橋でこのようなひび割れが生じる事例は少ない。



図 3-3-7 連結桁の変状例

(7) 中空床版橋に特有の損傷

中空断面の床版橋では、橋面から供給される水や塩分が内空部分に浸透し滞水し、滞水した部分から鋼材腐食、コンクリートのひび割れさらには鋼材の破断に至る場合がある。先述のとおり、RC 中空床版橋およびポステン中空床版橋は金属製型枠が断面内にあるため、滞水する過程で、型枠の腐食が生じる可能性がある。そのため、RC 中空床版橋およびポステン中空床版橋はプレテン中空床版橋と区分した。中空床版はボイド下面の低勾配側に水抜き孔を設けることが一般的である。しかし、水抜き孔が設けられていない場合や水抜き穴に閉塞・変形等が生じている場合、滞水が生じ構造物の耐久性に影響を与える。点検時には水抜き孔に異常がないことを確認するとともにボイド内部の状態を把握することも求められる。表 3-3-4 に細分類を示す。また、図 3-3-8 に中空床版橋において滞水が生じた例を示す。

表 3-3-4 中空床版橋に特有の損傷の細分類

損傷	主な要因による分類	構造形式による分類
中空床版橋 に特有の損 傷	中空部分の滞水	プレテン中空床版橋
		RC 中空床版橋、ポステン中空床版橋（場所打ち）
	ボイド管の浮き上がりによるかぶり不足や床版厚不足による陥没	RC 中空床版橋、ポステン中空床版橋（場所打ち）



図 3-3-8 ポステン中空床版橋の滞水による変状の例²⁾

ポステン中空床版橋では、コンクリート打設時の中空型枠の浮き上がりや変形によりボイド管が浮き上がり、ボイド上面の鉄筋を押し上げることで鉄筋のかぶり不足や床版厚の不足が生じる場合がある。活荷重に対する耐荷力が不足し、床版のひび割れや抜け落ちが生じる場合があるため留意する必要がある。図 3-3-9 に陥没の例を示す。

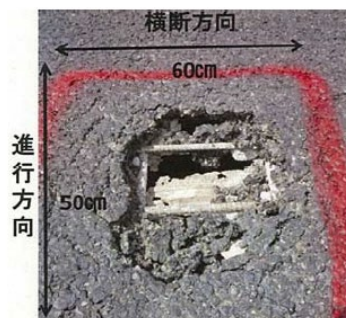


図 3-3-9 陥没の例²⁾

(8) その他の損傷

かぶり不足や充填不足等の製作・施工不良によって水等の劣化因子が容易にコンクリート内に浸透し鉄筋腐食やコンクリートの剝落などの変状が生じる場合がある。かぶり不足は、塩害対策指針が1984年に発刊される前の旧基準が適用されている場合や組立筋をかぶりに見込まない場合に生じることがある。図 3-3-10 に変状例を示す。



図3-3-10 製作・施工不良による変状例

また、防水・排水工不良により、橋面からの漏水、滞水が生じ遊離石灰などの変状及び鉄筋の腐食やコンクリートの剥落など変状が生じる場合がある。図3-3-11 に変状例を示す。



図3-3-11 防水・排水工不良による変状例

以上の損傷原因のうち、凍害の損傷メカニズムや措置方針の考え方の基本については3.3.3に示す。

3.3.3 凍害のメカニズムと措置方針

凍害は、先述のとおり、コンクリート内の水分が凍結する際に生じる圧力が、凍結融解を繰り返すたびに作用し、コンクリート表層に微細ひび割れ、スケーリング、ポップアウトが生じる現象である。図3-3-12に水の供給経路を示す。床版橋の端部において伸縮装置または排水装置の破損や不具合がある場合や床版橋側面が雨かかり等をうける場合に水がコンクリートに供給される。主に寒冷地において、日射を受ける面（遮蔽物のない橋の南側の側面や外桁の最外面）で凍結融解が繰り返し発生しやすい。

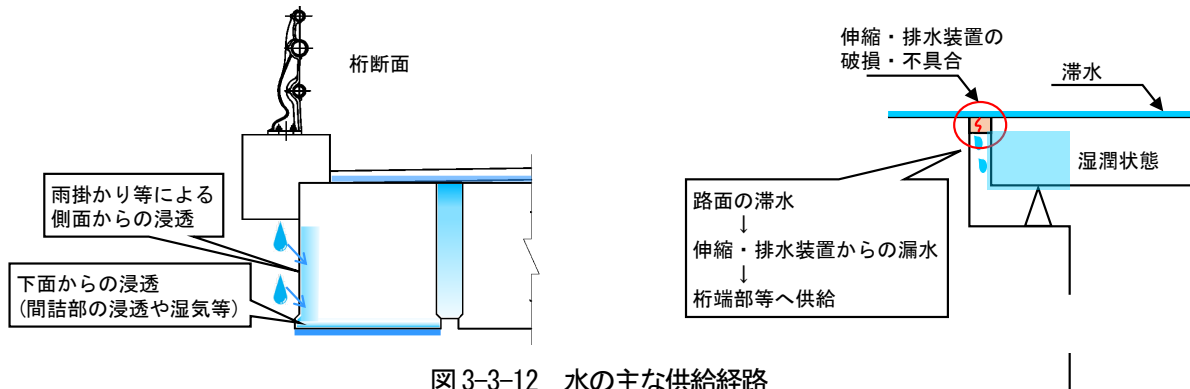


図3-3-12 水の主な供給経路

凍害の損傷メカニズムや措置方針の考え方について、床版橋の凍害の代表的な損傷過程を図 3-3-13 に、診断セットを表 3-3-5 に示す。段階 1)において、コンクリート表層の水分が凍結融解を繰り返し、段階 2)において微細ひび割れ、スケーリングまたはポップアウトが生じる。微細ひび割れおよびスケーリングは、表層のセメントペースト部分が水分を吸水し凍結によって膨張して生じる一方、ポップアウトは吸水性の高い骨材が水分を吸収して凍結し膨張することによって生じる。次に、段階 3)において、段階 2)の変状が進行することによって、骨材の露出や剥落の発生、鋼材の露出が生じるとした。これまで、凍害により鋼材の腐食や破断に至るような事例はほとんどみられない。そのため、ここでは段階 3)以降のメカニズムや措置方針などは記載していないが、損傷が進行し鋼材の腐食や破断等が生じた場合には、詳細調査を行い個別に検討する必要がある。措置方針については、損傷の原因がコンクリートへの水の浸入と温度変化による凍結融解であることから、水の浸入経路を特定し、経路に応じて橋面防水工の設置、表面被覆または表面含浸工法の適用、伸縮・排水装置の止水・排水機能の回復等の改良を行うことが基本となる。ここでは、長寿命化措置として、段階 1)では水の浸入抑制の措置を行うことを基本とし、段階 2)から段階 3)では、段階 1)の措置の他、延命措置として、部分打替えやひび割れ補修を行うことを基本とした。なお、凍害が生じている場合に必ずしも措置が必要となるわけではない。部位や程度に応じて橋の機能に与える影響を考慮して措置の必要性を個別に検討する必要がある。

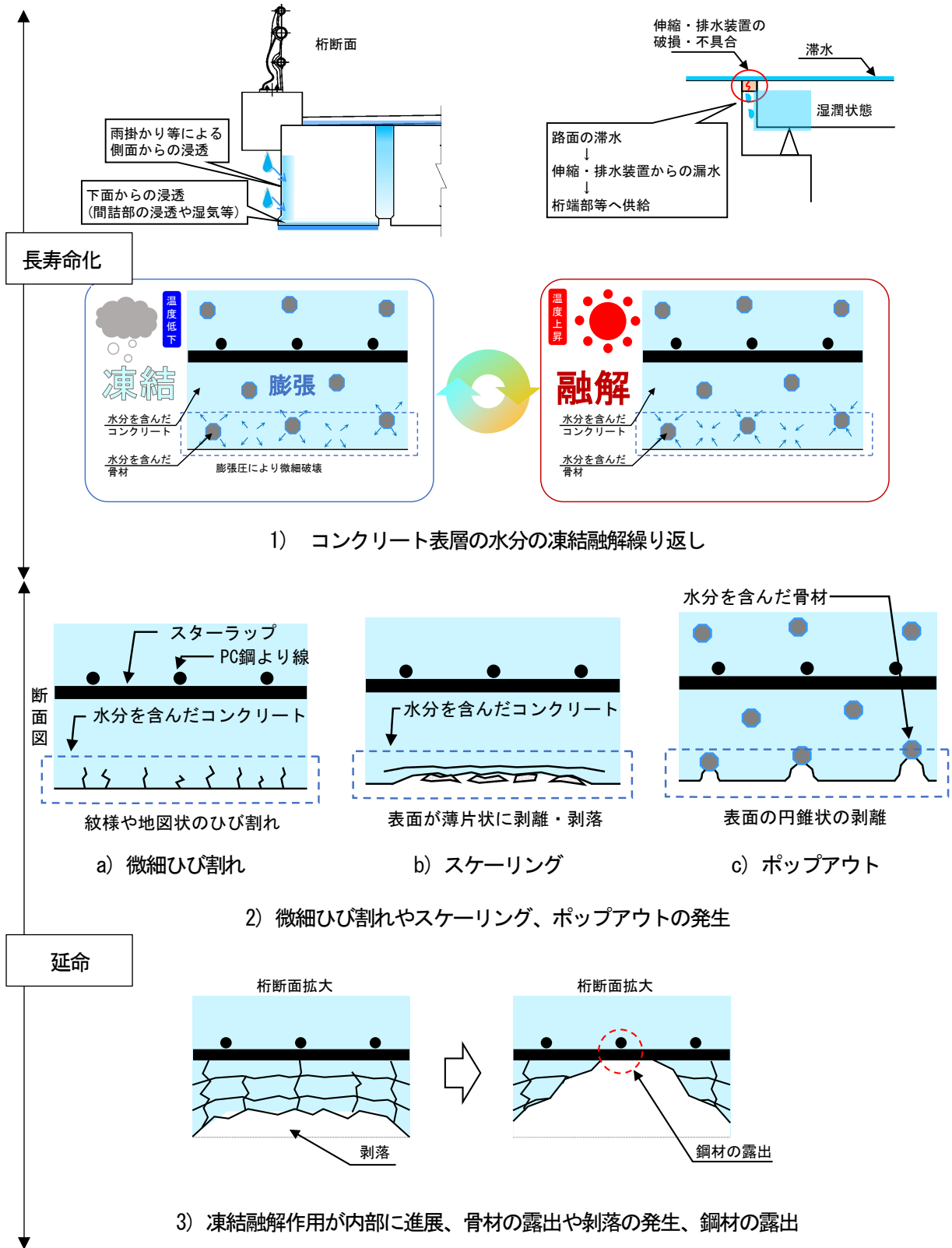


図 3-3-13 床版橋の凍害の代表的な損傷過程

表 3-3-5 床版橋の凍害の診断セット

メカニズム		点検における 着目点 (定期点検)	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.コンクリート表層の水分の凍結融解繰り返し	・漏水跡	—	・漏水跡を確認	長寿命化（遮水）	伸縮・排水装置の改良、橋面防水、表面被覆or含浸
	2.微細ひび割れやスケーリング、ポップアウトの発生	・表面のひび割れやスケーリング、ポップアウト	—	・コンクリート表面にひび割れやスケーリング、ポップアウトが発生	延命（遮水）	伸縮・排水装置の改良、橋面防水、表面被覆or含浸、ひび割れ補修
外観変状 有り	3.凍結融解作用が内部に進展、骨材の露出や剥落の発生、鋼材の露出	・骨材の露出、コンクリートの浮き、はく落 ・鋼材露出	—	・骨材の露出やかぶりコンクリートの浮き・剥落が発生 ・鋼材の露出が発生	延命（劣化部の除去）	橋面防水、表面被覆or含浸、部分打替え・鋼材防錆

3.4 PC 桁

3.4.1 一般

PC 桁は、プレストレスを導入したコンクリート部材でコンクリートが全断面で抵抗することを前提としており、主として曲げモーメントとそれに伴うせん断力などを伝達する役割を担う部材である。たとえば T 桁橋であれば、支間方向（橋軸方向）に主桁を配置し、上フランジ間及び横桁部に場所打ちコンクリートを打設し、主桁同士を横締めによって一体化した構造の上部構造形式である。この他に桁の断面形状の違いにより、I 桁橋、箱桁橋に分類される。

PC 構造の特徴としては、大きく PC 鋼材を部材断面内部に配置する内ケーブル構造と外部に配置する外ケーブル構造に分類される。また、プレストレスの導入の方向としては、緊張方式によらず橋軸方向および橋軸直角方向に分類できる。ここでは、従来用いられている内ケーブル構造を概説する。

内ケーブル構造における PC 鋼材の緊張方式は、ポストテンション方式とプレテンション方式に分類される。ポストテンション方式は、コンクリート部材が硬化した後に、その内部に設けられたシースに配置された PC 鋼材を緊張するもので、緊張力の確保は主として PC 定着具を使って行われる。一方、プレテンション方式は、設備のある PC 工場のみ製作が可能なるもので、PC 鋼材をあらかじめ所定の力、位置に緊張しておき、これにコンクリートを打込み、これが硬化した後に緊張力を解放してプレストレス力が与えられる。緊張方式の違いにより、ポストテンション方式では PC 定着具、シースおよびグラウトを有するが、プレテンション方式ではそれらを有さないという特徴がある。

ポストテンション方式を用いた PC 桁は、建設省標準設計において 1993 年まで合理的に PC 鋼材を配置するために、主桁上縁部に箱抜きを設け、PC 鋼材の約半分を定着する構造、いわゆる上縁定着構造が用いられていた。しかし、シース内にグラウトの充填不足が生じている場合に、凍結防止剤（凍結抑制剤）を含んだ水が上縁定着部から PC シース内に浸入したことによって PC 鋼材の腐食が発生したことを契機とし、1994 年以降はすべて桁端部に PC 鋼材が定着されるようになった。

このような定着位置の違いの他、主に塩害、アルカリシリカ反応（ASR）や凍害による被害を受け、鉄筋、PC 鋼材やシースの仕様、PC グラウト、かぶりや橋面防水工の規定が多岐にわたって改良されてきた。図 3-4-1 に各種材料の仕様または基準や学会図書等の変遷の概要を示す。なお、必ずしも設計、年代で種別が区分できるものではなくあくまで参考情報である。

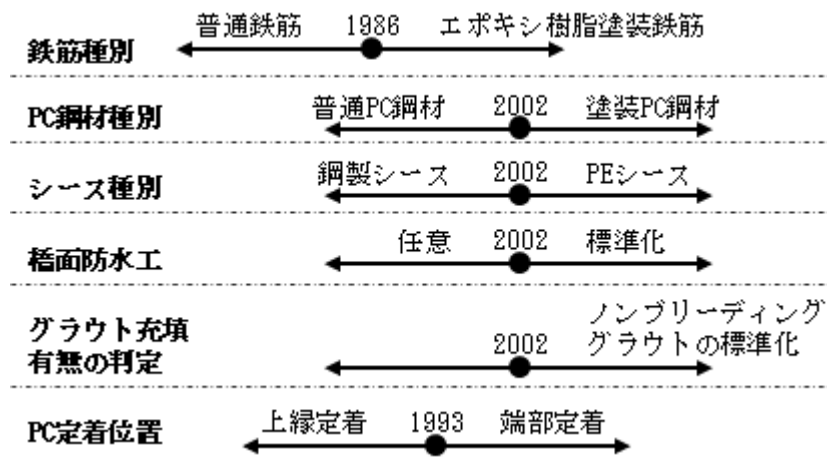


図 3-4-1 PC 桁の各種材料の仕様・基準の変遷

防食法は、過去の損傷実態等を踏まえて改良されてきており、塩害により内部鋼材の腐食や破断のリスクはこれらの条件によって異なる。このため、設計・施工時の図書や過去の調書記録等から防食に係る事項を確認しておくことが望ましい。ここでは、図 3-4-1 に示す変遷をもとに、鋼材腐食のリスクが相対的に高い、以下の条件のいずれかに該当する PC 桁の主桁を想定した。

- i. 2002 年以前の普通鉄筋、普通 PC 鋼材、鋼製シースを使用し、ノンブリーディンググラウトを使用していない PC 桁
- ii. 1986 年以降から 2002 年以前のエポキシ樹脂塗装鉄筋、普通 PC 鋼材、鋼製シースを使用し、ノンブリーディンググラウトを使用していない PC 桁
- iii. 1993 年以前の上縁定着された PC 桁

なお、設計図書（設計条件表、図面、数量）、施工図書（図面、数量）や点検調書から、ノンブリーディンググラウト、PE シース、重防食鋼材の適用が確認された場合、本検討では塩害による変状は生じないと想定した。

構造形式は T 桁、緊張方式はポストテンション方式およびプレテンション方式を対象とした。以下、ポストテンション方式 T 桁橋をポステン T 桁、プレテンション方式 T 桁橋をプレテン T 桁として示す。以降、損傷の分類やメカニズムなどを示す。

3.4.2 PC 桁に生じる損傷

(1) 基本的な分類

図 3-4-2 に PC 桁の代表的な損傷を示す。図 3-4-2 に示すように、代表的な損傷は、塩害、ASR、凍害、連結桁に特有の損傷、その他の損傷とした。塩害については、飛来塩による塩害、凍結防止剤散布による塩害、内在塩による塩害に分類した。それぞれの損傷について措置の観点から細かく分類した結果を(2)以降に示す。

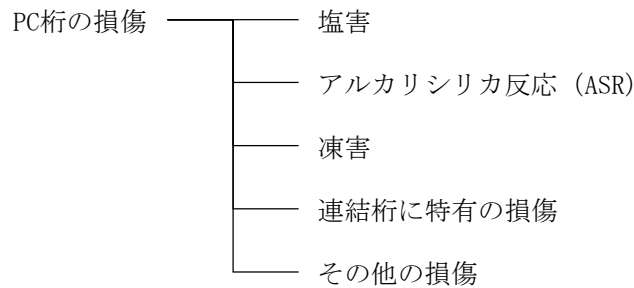


図3-4-2 PC 桁の代表的な損傷

(2) 塩害

塩害は、塩化物イオンの作用により鋼材を保護している不動態被膜が破壊され、酸素と水分の供給により鉄筋が腐食し膨張することで、コンクリートのひび割れ、剥離などの変状が生じる現象である。ここでは、塩化物イオンの供給経路の違いから、外来塩と初期内在塩に分類した。また、グラウトの充填状況や重防食鋼材の使用有無によって損傷の過程が異なるため、PC 桁の使用材料によって分類した。表 3-4-1 にポステン桁の分類を、表 3-4-2 にプレテン桁の分類を示す。

外来塩は、飛来塩によるものと凍結防止剤散布によるものに分類した。飛来塩による塩害は、主として海水を含んだ海風によって桁表面に付着する塩分がコンクリート内部に浸透し、鋼材腐食、鋼材破断に至る一連の損傷である。使用材料は、グラウト充填の有無で区分した。さらに、鋼材腐食する材料が異なることから、エポキシ樹脂塗装鉄筋および普通 PC 鋼材が使用された状態、ならびに普通鉄筋および普通 PC 鋼材が使用された状態を分類した。塩分浸透が軽微な段階では、措置はコンクリート表面からの塩分浸透防止（表面被覆又は含浸）である。

一方で、凍結防止剤による塩害は、凍結防止剤を含んだ水の供給経路によって変状が生じる箇所が異なり、措置も異なることから代表的な①伸縮装置からの漏水による桁端部の損傷、②上縁定着部のグラウト充填不足による損傷、③横締め部のグラウト充填不足による損傷の3つを想定した。凍結防止剤による塩害は路面からの漏水等が要因のため、措置は橋面防水の設置による防水止水対策が基本となる。それぞれの損傷箇所に応じた損傷メカニズムおよび措置方針を整理した。

初期内在塩による塩害は、塩分を含んだ混和剤または海砂の使用によって建設当初からコンクリート中に多量の塩分が含まれていることによって生じる塩害である。主桁が工場製作の場合、初期内在塩による塩害が生じる可能性は限りなく低い。ただし、現地で主桁を作製するケースもある。この場合、初期内在塩を含むコンクリートが用いられる可能性があることから主桁の初期内在塩による塩害は生じる場合がある。また、間詰部は現場練りのコンクリートを用いるため、初期内在塩を含んだコンクリートを用いている可能性がある。そのため、初期内在塩による塩害は、一般部と間詰部の2つに分類した。この損傷は、「コンクリート中の塩分総量規制」（1986年）以前に生じる場合がある。措置としては鋼材腐食の進行抑制が基本となる。各損傷の例を図3-4-3に示す。

表 3-4-1 塩害の分類（ポステン桁）

損傷	塩化物イオンの供給経路による分類		部位による分類又は水の供給経路による分類	使用材料による分類	
塩害	外来塩による塩害	飛来塩による塩害	一般部	ノンブリーディンググラウト未使用 (グラウト充填不足)	普通鉄筋
					エポキシ樹脂塗装鉄筋
				ノンブリーディンググラウト (グラウト充填)	普通鉄筋
					エポキシ樹脂塗装鉄筋
	凍結防止剤による塩害	伸縮装置からの漏水による桁端部の損傷	普通鉄筋	エポキシ樹脂塗装鉄筋	
				上縁定着部のグラウト充填不足による損傷	
			横締め部のグラウト充填不足による損傷		ノンブリーディンググラウト未使用
初期内在塩による塩害		一般部	-		
		間詰部	-		

表 3-4-2 塩害の分類（プレテン桁）

損傷	塩化物イオンの供給経路による分類		部位による分類又は水の供給経路による分類	使用材料による分類	
塩害	外来塩による塩害	飛来塩による塩害	一般部	普通鉄筋	
				エポキシ樹脂塗装鉄筋	
			凍結防止剤による塩害	伸縮装置からの漏水による桁端部の損傷	普通鉄筋
	エポキシ樹脂塗装鉄筋				
	横締め部のグラウト充填不足による損傷		ノンブリーディンググラウト未使用		
初期内在塩による塩害		一般部	-		
		間詰部	-		



1) 飛来塩による変状



2) 凍結防止剤による変状

図 3-4-3 塩害事例

(3) アルカリシリカ反応 (ASR)

3.3.2(3)と同様である。

(4) 凍害

3.3.2(4)と同様である。

(5) 連結桁に特有の損傷

3.3.2(6)と同様である。図 3-4-4 に変状例を示す。



図 3-4-4 連結桁の変状例

(6) その他の損傷

かぶり不足や充填不足等の製作・施工不良によって水等の劣化因子が容易にコンクリート内に浸透し鉄筋腐食やコンクリートの剥落などの変状が生じる場合がある。かぶり不足は、塩害対策指針が発刊される前の旧基準が適用されている場合や組立筋をかぶりに見込まない場合に生じることがある。図3-4-5に変状例を示す。



1) かぶり不足

2) 充填不足

図3-4-5 製作・施工不良による変状例

また、防水・排水工不良により、橋面からの漏水、滞水が生じ遊離石灰などの変状及び鉄筋の腐食やコンクリートの剥落など変状が生じる場合がある。図3-4-6に変状例を示す。



1) 伸縮装置の排水工不良

2) 床版防水工未設置

3) 排水工不良

図3-4-6 防水・排水工不良による変状例

以上の損傷のうち、飛来塩による塩害について、損傷メカニズムと措置方針の考え方の基本を3.4.3および3.4.4に示す。

3.4.3 ポステンT桁の飛来塩による塩害のメカニズムと措置方針

ここでは、ポステンT桁を対象にグラウト充填不足の場合の飛来塩による塩害を示す。飛来塩による塩害は、先述のとおり、酸素、水および塩化物イオンがコンクリート内に浸透し、鋼材が腐食、破断に至る損傷である。図3-4-7に主な水および飛来塩の供給経路を示す。主に海風によって塩分がコンクリート表面に付着することでコンクリートに塩化物イオンが浸透する。ポステンT桁の場合、飛来塩が耳桁の外側で洗い流されることが多い一方で、耳桁内側は海風が滞留するため付着塩分量が多くなる傾向があるので注意が必要である。塩化物イオンは外観目視により確認できない。塩化物イオンが鋼材位置において腐食発生限界濃度まで達すると不動態被膜が破壊され、鋼材が腐食し膨張する。そして、コンクリートのひび割れ、うき、剥離、錆汁などの外観変状が生じる。ひび割れの入り方は部材の形状や配筋によって異なるが、鋼材に沿った直線的なひび割れとなることが多い。外観変状が生じた時には既に内部の塩化物イオン量が腐食を生じさせるのに十分な量に達しているため、この時点で塩害を未然に防ぐことは困難である。したがって、塩害を未然に防ぐ予防保全を実施するためには塩化物イオン量を確認する必要がある。そこで、ここでは、診断を行う前にコンクリート橋の塩害に関する特定点検要領（案）³⁾（以下、特定点検）によってコンクリート内部の塩化物イオン量を確認することを前提としている。

特定点検では、コア削孔またはドリル削孔によってまず下部構造の塩化物イオン量を調査する。この塩化物イオン量が 1.0 kg/m^3 以上のとき、上部構造の塩化物イオン量を調査する。この時、調査時点の塩化物イオン量と10年後の塩化物イオン量を試算する。特定点検は、この試算をもとに対策区分を判定するものである。ここでは、この対策区分の判定の基準に準じて、損傷メカニズムを整理した。この前提によって、外観変状が生じない時、すなわち鋼材の錆が発生しない状態を判断できるものとし、措置方針は腐食の原因となる水や塩分の供給をできるだけ抑えることを基本とした。一方で、外観変状が生じた時、すなわち鋼材の錆が発生したときの措置は、鋼材腐食の進行を抑えることを基本とした。

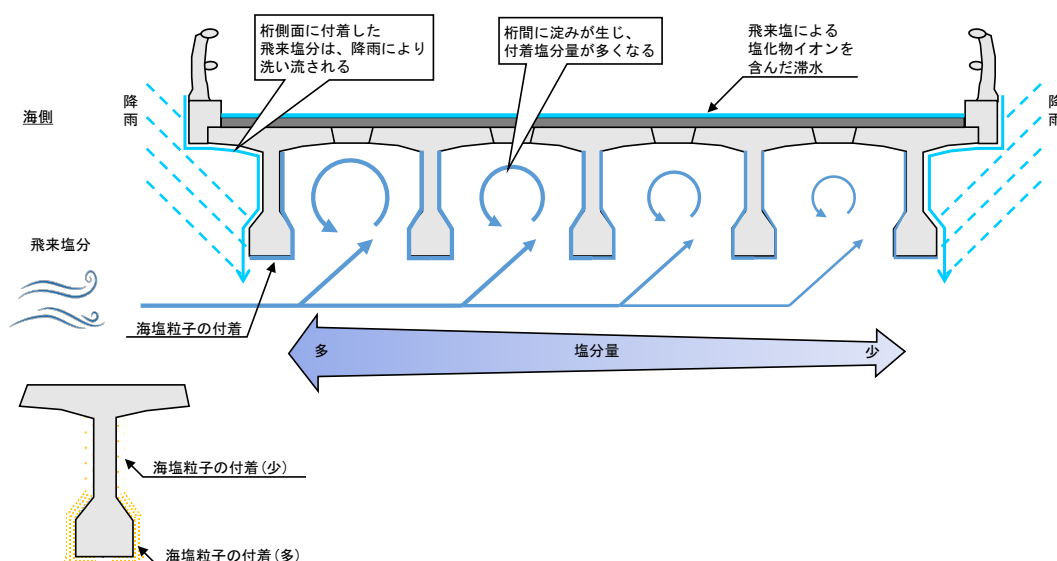


図3-4-7 水および塩分の主な供給経路

ポステンT桁の飛来塩による塩害の損傷メカニズムを図3-4-8に、診断セットを図3-4-9に示す。なお、ここでは、ノンブリーディンググラウトを使用せず、グラウト充填不足が生じている場合について述べる。グラウト充填不足の箇所では、PC鋼材にはグラウトに接していない部分に不動態被膜が形成されない。ここでは、この箇所が、不動態被膜が形成される鉄筋より先行して腐食が進行すると想定した。なお、グラウト充填不足が生じていた場合、必ずしもPC鋼材が鉄筋より先に腐食するとは限らない点に留意する必要がある。

段階1)において飛来塩分により塩化物イオンが供給され、段階2)で徐々にコンクリート表面に塩分が付着し、段階3)で塩化物イオンが徐々に浸透する。この塩化物イオン量が上部構造のPC鋼材位置において、 1.2 kg/m^3 に達する前の時点を段階3)とした。コンクリート中に塩分がさらに浸透し、その塩分により腐食して生じるシースの孔等から、塩分がシース内に浸入してPC鋼材位置の塩化物イオン量が 1.2 kg/m^3 以上に達するときを段階4)とし、その時のPC鋼材の錆の発生有無によってさらに分類した。なお、鋼製シース以外でも塩分が浸透する可能性があることに留意する必要がある。段階4-1)は、錆は生じておらず、PC鋼材の不動態被膜が失われた状態とした。段階4-2)は、PC鋼材に錆が発生した状態とした。その後、段階5)では、PC鋼材の腐食による断面減少が生じた状態とした。この段階では、鉄筋腐食は発生せず内部のPC鋼材のみが腐食している状態を想定しており、錆汁がにじみだしている場合はあるものの、外観変状が生じていない場合がある。次の鉄筋が腐食する段階を6)とし、この段階では、鉄筋に沿ったコンクリートのひび割れ、剥離などが生じる。コンクリートの剥落が進み露出した鋼材は外気に曝されるためさらに腐食が進行する。最後、段階7)では、腐食が進み鋼材破断が生じ、複数本の鋼材の破断に至り、この段階では支間中央に曲げひび割れやたわみの増加が生じる場合がある。

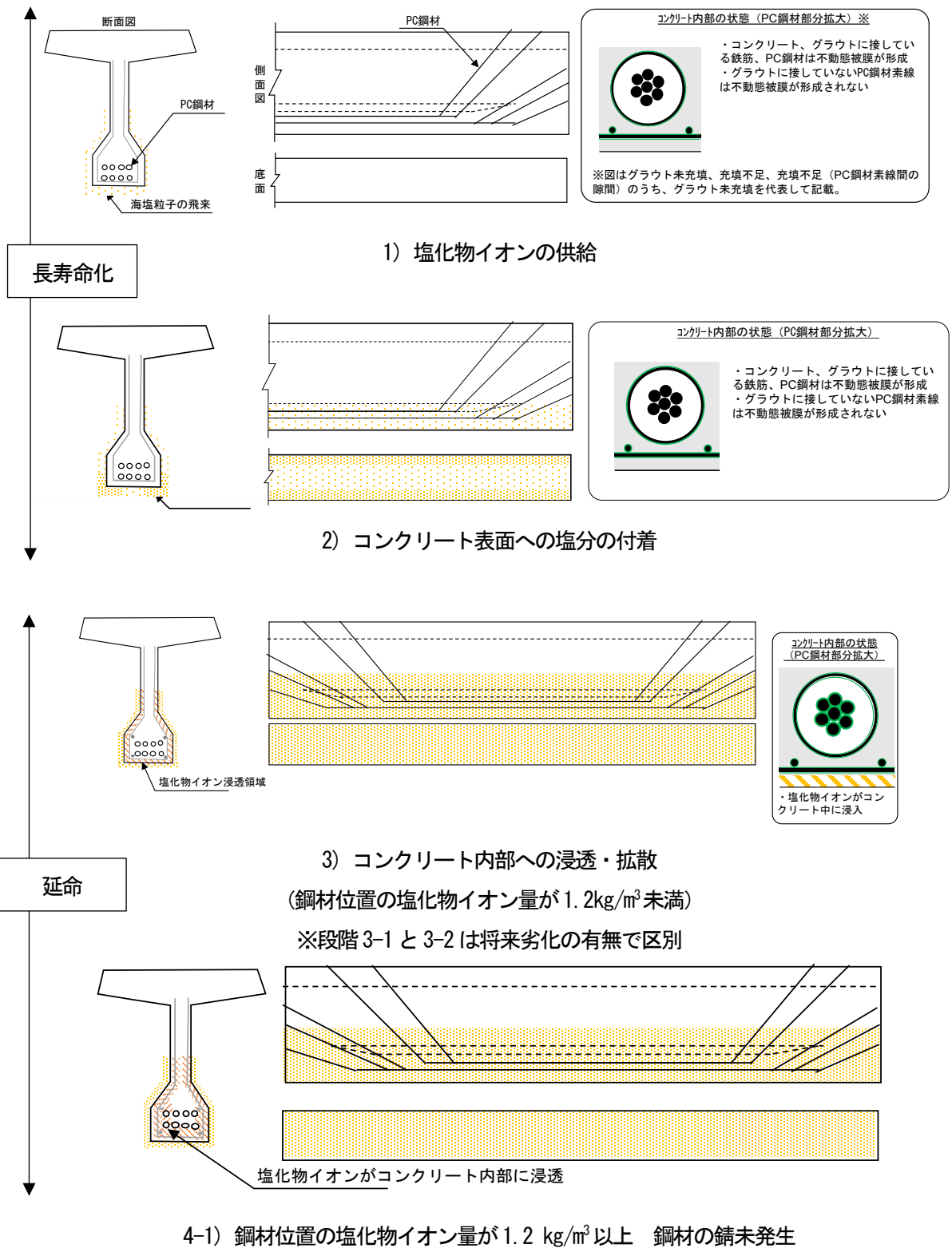


図 3-4-8 ポステン T 桁の飛来塩による塩害の代表的な損傷過程 (1/2)

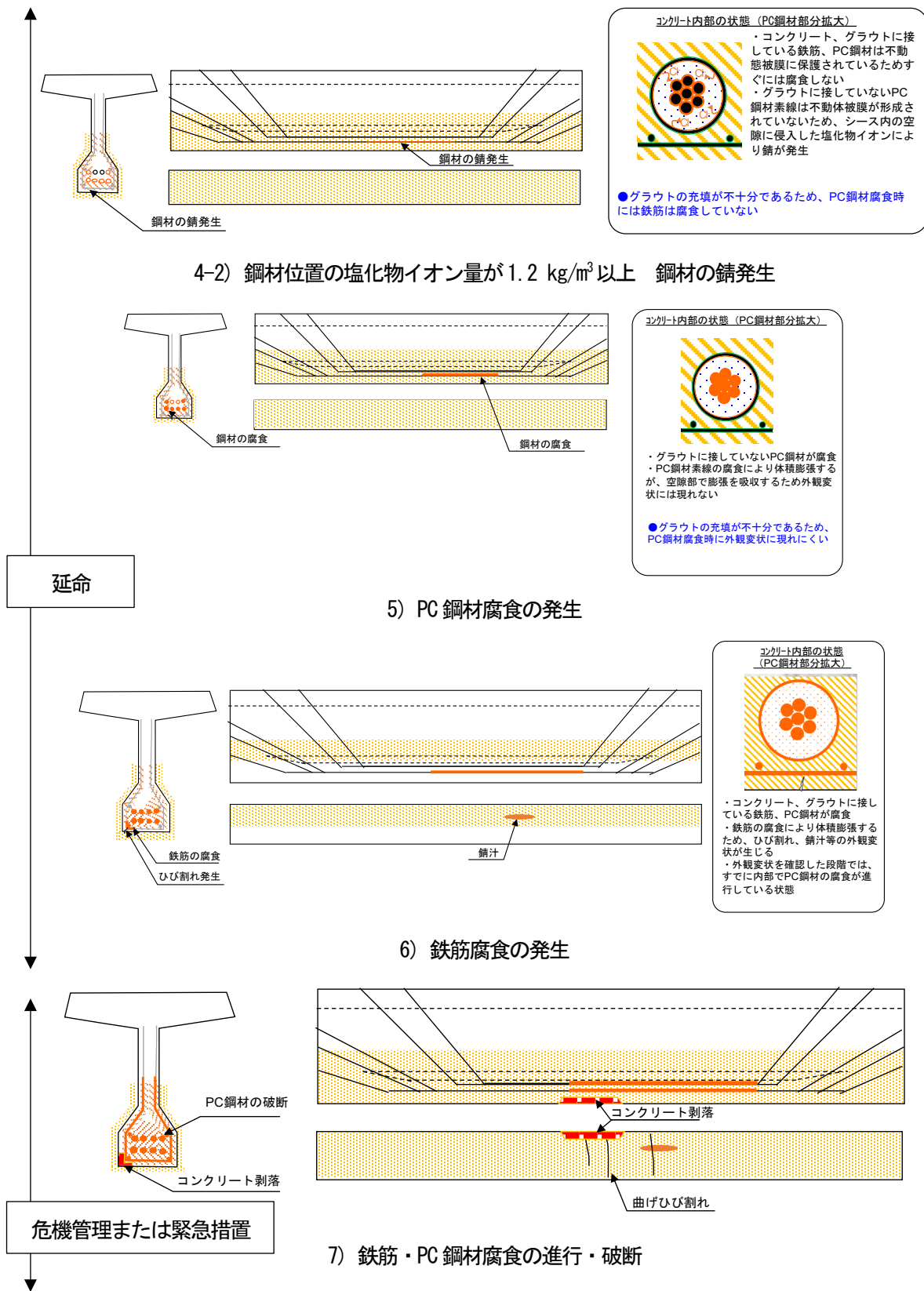


図 3-4-8 ポス텐 T 桁の飛来塩による塩害の代表的な損傷過程 (2/2)

表 3-4-3 ポステンT桁の飛来塩による塩害の診断セット

メカニズム		点検における 着目点 (定期点検)	診断に必須 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	—	<ul style="list-style-type: none"> 塩化物イオン含有量調査（ドリルコア）※塩害特定点検で実施 	<ul style="list-style-type: none"> 下部構造の上部構造のかぶりに相当する深さの塩化物イオン量が1.0kg/m³以上かつ上部構造かぶり範囲の塩化物イオン量が微量混入 	延命 (遮塩、鋼材の防食)	表面被覆or含浸 【PC鋼材に対して】 グラウト再充填	
	2.コンクリート表面への塩分						
	コンクリート内部への浸透・拡散（鋼材位置の塩化物イオン量が1.2kg/m ³ 未満）	3-1.将来劣化なし		<ul style="list-style-type: none"> 塩害防止対策の有無（表面被覆、防食鉄筋など） 	<ul style="list-style-type: none"> 上部構造最外縁鋼材位置の塩化物イオン量が1.2kg/m³未満かつ将来予測で10年以内に1.2kg/m³を超えない 	延命 (遮塩、鋼材の防食)	表面被覆or含浸 【PC鋼材に対して】 グラウト再充填
		3-2.将来劣化あり					
	鋼材位置の塩化物イオン量が1.2kg/m ³ 以上	4-1.鋼材の錆未発生		—	<ul style="list-style-type: none"> 上部構造最外縁鋼材位置の塩化物イオン量が鋼材腐食発生限界1.2kg/m³以上 	延命 (鋼材の防食)	電気防食 【PC鋼材に対して】 グラウト再充填 電気防食
4-2.鋼材の錆発生							
5.鋼材腐食の発生	<ul style="list-style-type: none"> 錆汁が滲み出すことがある 	<ul style="list-style-type: none"> 塩化物イオン含有量調査（ドリルコア）※塩害特定点検で実施 はつり調査、コア・ドリル削孔調査（錆汁の発生が確認された場合） 	<ul style="list-style-type: none"> 上部構造最外縁鋼材位置の塩化物イオン量が鋼材腐食発生限界1.2kg/m³以上 コンクリート内部で鋼材の腐食が発生（外観変状には現れない） 錆汁が生じることもある（内部で鋼材腐食が進行している兆候） 	延命 (鋼材の防食)	電気防食		
外 観 変 状 有 り	6.鉄筋腐食の発生	<ul style="list-style-type: none"> 鉄筋に沿ったひび割れ（錆汁を伴う場合もある） 	<ul style="list-style-type: none"> はつり調査、コア・ドリル削孔調査（鉄筋が露出していない場合） 	<ul style="list-style-type: none"> 鉄筋に沿ったひび割れが発生（錆汁を伴う場合もある） 	延命 (鋼材の防食)	電気防食	
	7.鉄筋・鋼材腐食の進行	<ul style="list-style-type: none"> 複数本の鋼材破断 曲げひび割れ 	—	<ul style="list-style-type: none"> 複数本の鋼材に破断が発生 支間中央に曲げひび割れが発生 	危機管理 緊急措置（損傷が複数本の桁に発生等）※詳細調査を行い個別に検討	モタリソグベント設置 交通規制 架替え 通行止め ベント設置 架替え	

表 3-4-3 において、図 3-4-8 に示す損傷メカニズムに応じた点検の着目点、必要な詳細調査、決め手となる情報、措置方針および工法例を示している。図 3-4-8 に示す段階3)において、特定点検の10年後の塩化物イオン量が1.2 kg/m³を境界値として段階3-1)と段階3-2)に分類した。なお、腐食発生限界は一般に1.2 kg/m³～2.5kg/m³とされているが、塩害特定点検に準じて腐食発生限界は1.2 kg/m³とした。措置方針について、延命措置として、段階1)から段階3-1)までは塩分または水分の浸透を抑制する目的で表面被覆または表面含浸工法を行うこと、およびグラウト再充填が基本となる。一方で、段階3-2)から段階6)までは、すでにコンクリート内部に腐食発生に足りうる塩化物イオン量が存在していることから、延命措置として、鉄筋腐

食の抑制に効果的な電気防食工法を適用することが基本となる。なお、架替えまでの延命措置であり、電気防食に要するコストやその他のリスクを踏まえ、架替えの計画等を検討することが望ましい。損傷過程の最後である段階7)においては、すでに耐荷力が著しく低下している段階であることから、危機管理または緊急措置が必要であると想定し、モニタリング、ベントの設置、交通規制、通行止め、架け替えを行うことが基本となる。

以上はポステンT桁における塩害の損傷メカニズムや措置方針の詳細について飛来塩による塩害の代表例を含めて示したが、飛来塩の他、凍結防止剤による塩害および初期内在塩による塩害についても同様の整理を行っている。以下にはその概略を示す。

凍結防止剤による塩害のうち、1)伸縮装置からの漏水による損傷、2)上縁定着部のグラウト充填不足による損傷、3)横締め部のグラウト充填不足による損傷について概説する。

1)伸縮装置からの漏水による損傷

伸縮装置から凍結防止剤を含んだ水が漏水して、桁端部のコンクリート内に浸透し、鉄筋が腐食することによって桁と支承が接合している部分のコンクリートが剥落するまでの損傷過程を想定した。鉄筋腐食が生じる前の長寿命化措置は、伸縮部からの漏水を防ぐための伸縮・排水装置の改良を基本とした。一方で、鉄筋腐食が生じた後の延命措置は、伸縮・排水装置の改良をした上で、部分打換えおよび鉄筋防錆を行うことを基本とした。なお、ここでの部分打換えは、桁と支承の接合部の形状の復旧が目的であり、かぶり確保によるさらなる塩分浸透抑制を目的とした塩害対策ではない点に注意が必要である。桁端部は、狭隘な空間での施工となるため、変状を確認すること自体が困難な場合がある。このような場合、有効な変状の確認方法、工法を個別に検討する必要がある。

2)上縁定着部のグラウト充填不足による損傷

上縁定着部のグラウト充填不足部分に凍結防止剤を含んだ水が流入し、PC鋼材の腐食、破断に至るまでの損傷過程を想定した。先述のとおり、上縁定着はポステンT桁で1993年まで用いられていた。上縁定着が採用されていない場合は、2002年に標準化されたノンブリーディンググラウトが使用されていないことから、グラウト充填不足が生じている場合がある。また、充填不足箇所路面から水が供給され水が溜まっている場合やブリーディング水が生じている場合がある。PC鋼材が腐食するまでの長寿命化措置は、路面からの水の流入を防止するための橋面防水工、グースアスファルトの適用、グラウトの再充填を行うことを基本とした。PC鋼材が腐食した際、シーズに沿ってひび割れが生じるという特徴がある。このような変状が確認された場合、延命措置は、シーズの水抜き、グラウトの再充填等を基本とした。なお、寒冷地では、凍結によって同様のひび割れが生じることがある。このような場合は、詳細調査などを行った上で、個別に検討する必要がある。

3)横締め部のグラウト充填不足による損傷

横締め部のグラウト充填不足部分に凍結防止剤を含んだ水が流入し、PC鋼材の腐食、破断、抜け出しに至るまでの損傷過程を想定した。PC鋼材の腐食が生じる前の長寿命化措置は、橋面からの水の流入を防ぐため、橋面防水を行うことを基本とし、鋼材腐食が発生した後の延命措置は、突出防止の鉄板等の設置を行うことを基本とした。PC鋼材腐食が発生したとき、特に1971年（昭和46年）以前のT桁は上フラン

ジ側面が鉛直となっていることから間詰床版の抜け落ちが生じる可能性があるため、抜け落ち対策も必要である。なお、PC 鋼材が抜け出した後の対策は個別に検討する必要がある。

次に、初期内在塩による塩害について概説する。初期内在塩による塩害は、先述のとおり、洗浄不十分な海砂や、塩化物イオンを含む混和剤の使用により、コンクリート内部にすでに塩分が多く存在しているために生じる塩害である。ここでは、初期内在塩の使用から中性化による塩分濃縮を経て、鋼材が一斉腐食し、コンクリートのひび割れ、鋼材の破断に至る過程を想定した。一般的に初期内在塩による塩害は損傷が確認された後に詳細調査によって判明するため、長寿命化措置を行うことは困難である。ただし、同時期に建設された周辺橋梁で初期内在塩による塩害が発生した時は、全数調査等により発見できる可能性がある。このような状況を想定して、長寿命化措置は、基本的に困難であるが軽微な状態で損傷の特定ができた場合は、中性化の進行を抑制するために表面被覆または表面含浸、腐食を抑制するために電気防食を行う方法が考えられる。一方で鋼材腐食が発生した後の延命措置は、電気防食を行う方法が考えられる。ただし、初期内在塩に対しては、外からの劣化因子の遮断を目的とされる表面被覆や表面含浸は効果が期待できないので留意する必要がある。なお、変状が全面的・広範囲で生じている場合は架替えを検討し、架替えまでの延命措置として断面修復についても検討するのがよい。

3.4.4 プレテンT桁の飛来塩による塩害のメカニズムと措置方針

プレテンT桁の飛来塩による塩害の水および飛来塩の供給経路は図3-4-7と同様である。また、コンクリート内部の塩化物イオンの状態を把握するために、3.4.3と同様、特定点検によってコンクリート内部の塩化物イオン濃度を測定することを前提としている。

3.4.3では、グラウト充填不足を前提として最外縁鉄筋よりもPC鋼材の腐食が先行すると想定したが、プレテンT桁の主方向PC鋼材はグラウトがないため、表面からの塩分浸透に応じて腐食が進行するものとして整理した。また、プレテンT桁は、ポステンT桁に比べて、断面内に配筋されるPC鋼材本数が多いという特徴がある。この違いにより、延命措置として用いる鋼材腐食の抑制を目的とした電気防食工法では、コンクリートの深部にある鋼材に電極を配置することが困難であるため、鋼材腐食の抑制効果が限定的・部分的となる。ここでは、このような点に留意しながら一連の情報を整理した。

プレテンT桁の飛来塩による塩害の損傷メカニズムを図3-4-9に、診断セットを表3-4-4に示す。基本的に1)~3)の段階は3.4.3と同様である。塩分がさらに浸透し、塩化物イオン量が 1.2kg/m^3 以上に達するときを段階4)とし、錆の発生有無によってさらに分類した。段階4-1)において、鉄筋およびPC鋼材の錆は生じておらず、不動態被膜が失われた状態とした。段階4-2)では、鉄筋およびPC鋼材に錆が発生する。段階5)では、錆汁がにじみだしている場合はあるものの、鉄筋およびPC鋼材の腐食が進行し、鉄筋およびPC鋼材に沿ったひび割れが生じる場合がある。次の段階6)では、鉄筋およびPC鋼材の腐食が進行し、コンクリートの剝離剝落が生じる場合がある。この時点では、段階5)に比べて、PC鋼材の断面積が減少することによって破断が生じる場合がある。また、コンクリートの剝落が進み露出した鋼材は外気に曝されるためさらに腐食が進行する。最後、段階7)では、3.4.3と同様に、腐食が進み鋼材破断が生じ、複数本の鋼材の破断に至るまでの段階であり、この段階では支間中央に曲げひび割れやたわみの増加が生じる場合がある。

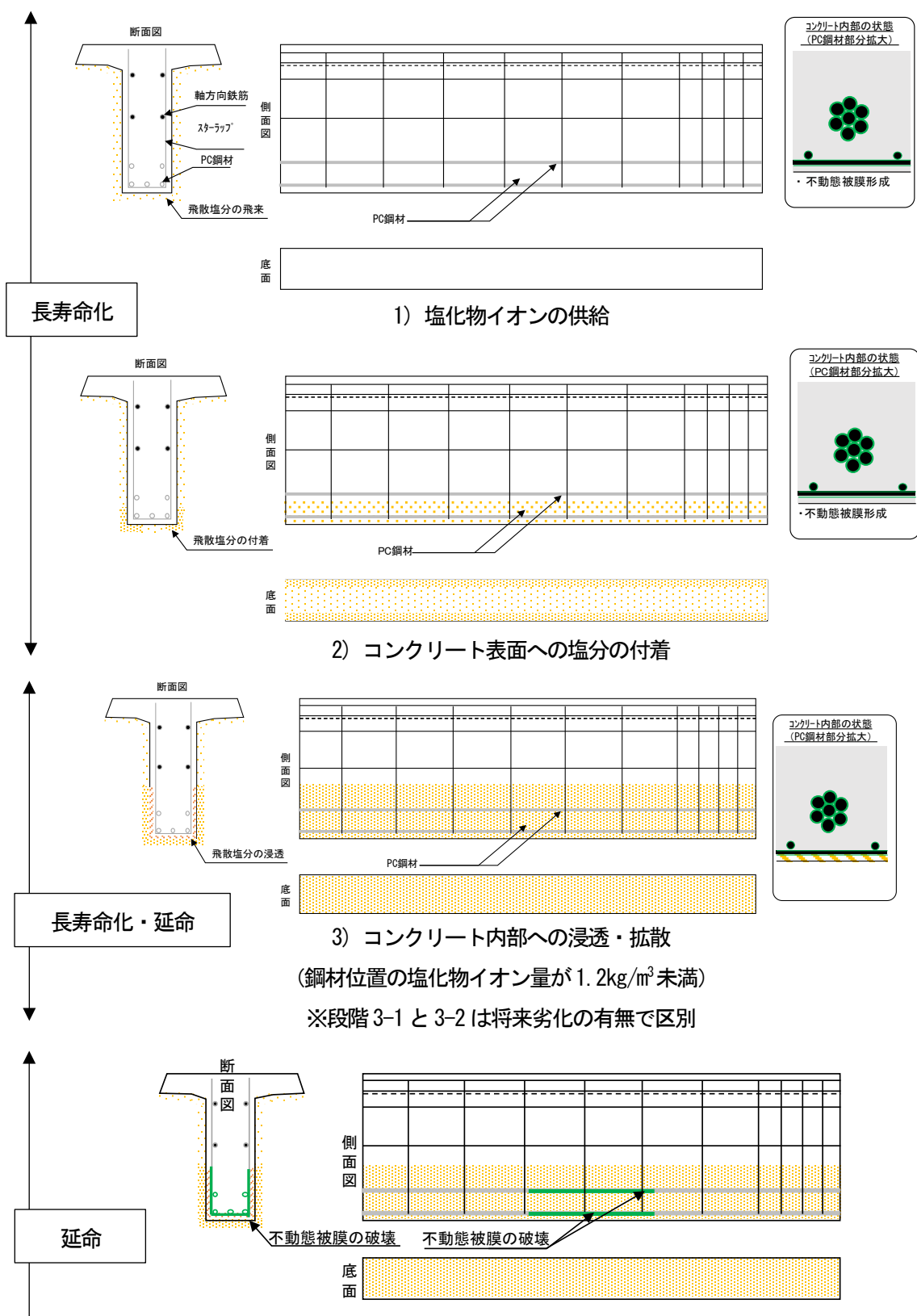


図 3-4-9 プレテンT桁の飛来塩による塩害の代表的な損傷過程 (1/2)

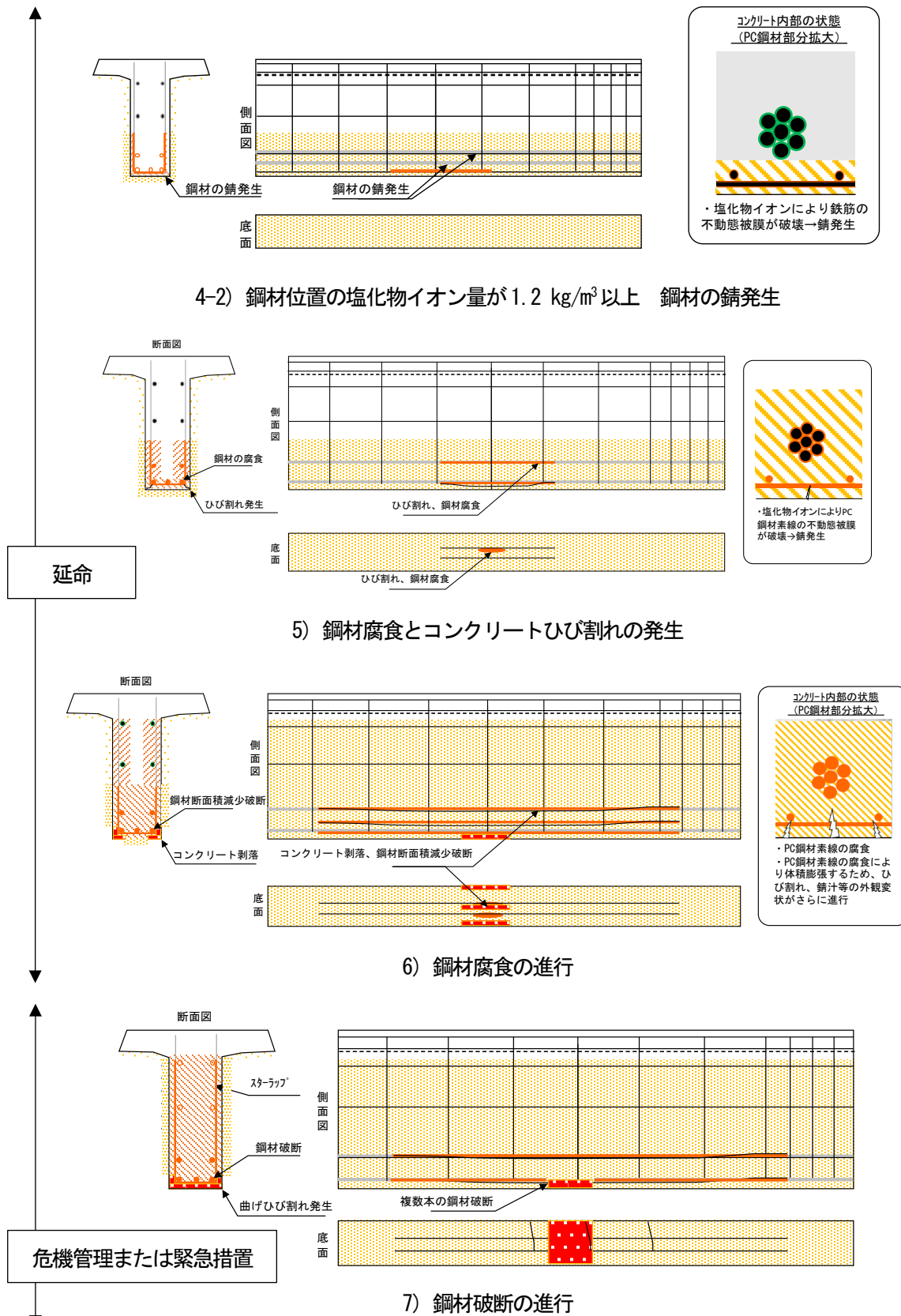


図 3-4-9 プレテンT桁の飛来塩による塩害の代表的な損傷過程 (2/2)

表 3-4-4 プレテン T 桁の飛来塩による塩害の診断セット

メカニズム		点検における 着目点 (定期点検)	診断に 必須な 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	—	• 塩化物イオン含有 量調査 (ドリル、 コア) ※塩害特 定点検で実施	• 下部構造の上部構 造のかぶりに相当 する深さの塩化物イ オン量が1.0kg/m ³ 以 上かつ上部構造か ぶり範囲の塩化物イ オン量が微量混入	長寿命化 (遮塩)	表面被覆or 含浸	
	2.コンクリート表面への塩分の 付着						
	コンクリート内 部への浸透・拡散 (鋼材位置 の塩化物イオン量 が1.2kg/m ³ 未満)	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)	• 上部構造最外縁鋼 材位置の塩化物イ オン量が1.2kg/m ³ 未 満かつ将来予測で10 年以内に1.2kg/m ³ を超えない	長寿命化 (遮塩)	表面被覆or 含浸	
		3-2.将来劣化 あり					• 上部構造最外縁鋼 材位置の塩化物イ オン量が1.2kg/m ³ 未 満かつ将来予測で10 年以内に1.2kg/m ³ を超える
	鋼材位置 の塩化物イ オン量が 1.2kg/m ³ 以上	4-1.鋼材の錆 未発生	—	• はつり調査、コア・ドリル削孔調 査 (ひび割れに錆汁が生じていない場 合)	• 上部構造最外縁鋼 材位置の塩化物イ オン量が鋼材腐食発生 限界1.2kg/m ³ 以上	延命 (鋼材の防食)	電気防食
		4-2.鋼材の錆 発生					
	5.鋼材腐食と コンクリート ひび割れの発生	• 鋼材に沿った コンクリートのひび 割れ (錆汁を伴う場合もある)	• はつり調査、コア・ドリル削孔調 査 (ひび割れに錆汁が生じていない場 合)	• 鋼材に沿ったひび 割れが発生 (錆汁 を伴う場合もある) • 鋼材の腐食が発生			
外観変状 有り	6.鋼材腐食の進行	• 鋼材の断面積 減少、破断 • コンクリートの浮き、 剥落 • 腐食鋼材の露出	• はつり調査、コア・ドリル削孔調 査 (鋼材が露 出していない 場合)	• かぶりコンクリートの浮 き、剥落が発生 • 腐食鋼材の露出が 発生 • 鋼材の断面積減少、 破断が発生	延命 (鋼材の防食)	電気防食	
	7.鋼材破断の進行	• 複数本の鋼材 破断 • 曲げひび割れ	—	• 複数本の鋼材に破 断が発生 • 支間中央に曲げひ び割れが発生	危機管理 緊急措置 (損傷が 複数本の桁に発生 等) ※詳細調査を 行い個別に検討	モルタル、 ペント設置、 交通規制、 架替え 通行止め、 ペント設置、 架替え	

ポステン T 桁と同様に、表 3-4-4 において、図 3-4-9 に示す損傷メカニズムに応じた点検の着目点、必要な詳細調査、決め手となる情報、措置方針および工法例を示している。図 3-4-9 に示す段階 3)において、特定点検の 10 年後の塩化物イオン量が 1.2 kg/m³ を境界値として表 3-4-4 では段階 3-1)と段階 3-2)に措置方針を分類した。措置方針について、長寿命化措置として、段階 1)から段階 3-1)までは塩分または水分の

浸透を抑制する目的で表面被覆または表面含浸工法を行うことが基本となる。一方で、段階3-2)から段階6)までは、3.4.3と同様に、すでにコンクリート内部に腐食発生に足りうる塩化物イオン量が存在していることから、延命措置として、鉄筋腐食の抑制に効果的な電気防食工法を適用することが基本となる。ただし、先述のとおり、電気防食工法の効果は限定的・部分的であることから、表面被覆または表面含浸を行い劣化の進行を抑制しつつ、個別に架け替えを検討する必要がある。最後の段階7)においては、すでに耐荷力が低下している段階であることから、危機管理または緊急措置が必要であり、モニタリング、ベントの設置、交通規制、通行止め、架け替えを行うことが基本となる。

以上、プレテンT桁における塩害の損傷メカニズムや措置方針の詳細について飛来塩による塩害の代表例を含めて示した。飛来塩の他、凍結防止剤による塩害および初期内在塩による塩害についても同様の整理を行っている。なお、これらの損傷はポステンT桁と損傷メカニズムおよび措置方針が同じある。

3.5 RC 桁

3.5.1 一般

RC 桁は、引張応力をすべて鉄筋が受け持つことを前提とし、主として曲げモーメントとせん断力等を伝達する役割を担う梁部材である。たとえばT桁橋は、支間方向（橋軸方向）に主桁を配置し、上フランジ間及び横桁部に場所打ちコンクリートを打設することによって一体化した構造を有する道路橋である。この他に桁の断面形状の違いにより、箱桁橋に分類される。

RC 桁橋は、1984 年以前に建設されたものがほとんどである。そのため、1984 年の塩害対策指針に準じたかぶりを有しておらず、2002 年の防水層の設置義務化前に建設されたものが多いという特徴がある。ここでは、RC 桁の T 桁橋（以下、RCT 桁）を想定して、このような実情をふまえ、損傷の分類やメカニズムを整理した。

3.5.2 RC 桁に生じる損傷

(1) 基本的な分類

図 3-5-1 に RC 桁の代表的な損傷原因を示す。図 3-5-1 に示すように、代表的な損傷原因は塩害、アルカリシリカ反応（ASR）、凍害、その他の損傷とした。塩害は、飛来塩による塩害、凍結防止剤散布による塩害、内在塩による塩害に分類した。それぞれの損傷について措置の観点から細かく分類した結果を(2)以降に示す。

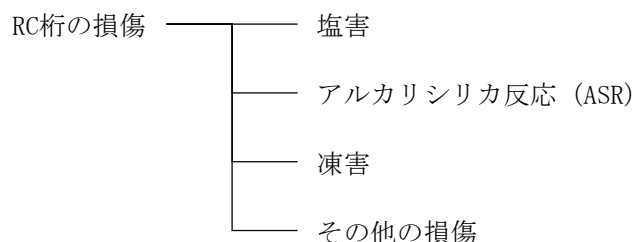


図 3-5-1 RC 桁の代表的な損傷

(2) 塩害

塩害は、塩化物イオンの作用により鉄筋を保護している不動態被膜が破壊され、酸素と水分の供給により鉄筋が腐食し膨張することで、コンクリートのひび割れ、剥離などの変状が生じる現象である。ここでは、塩化物イオンの供給経路の違いから、外来塩と初期内在塩に分類した。表 3-5-1 に分類を示す。

表 3-5-1 における各損傷によって生じた変状の例を図 3-5-2 に示す。

表 3-5-1 塩害の細分類

損傷	塩化物イオンの供給経路による分類		部位による分類及び水の供給経路
塩害	外来塩による塩害	飛来塩による塩害	一般部
		凍結防止剤による塩害	伸縮装置からの漏水による桁端部の損傷 路面からの漏水による床版の損傷
	初期内在塩による塩害		-



1) 飛来塩による変状



2) 凍結防止剤による変状

図 3-5-2 代表的な塩害事例

(3) アルカリシリカ反応 (ASR)

3.3.2(3)と同様である。

(4) 凍害

3.3.2(4)と同様である。

(5) その他の損傷

かぶり不足や充填不足等の製作・施工不良によって水等の劣化因子が容易にコンクリート内に浸透し鉄筋腐食やコンクリートの剥落などの変状が生じる場合がある。かぶり不足は、塩害対策指針が発刊される前の旧基準が適用されている場合や組立筋をかぶりに見込まない場合に生じることがある。図3-5-3に変状例を示す。



1) かぶり不足



2) 充填不足

図3-5-3 製作・施工不良による変状例

また、防水・排水工不良は、橋面からの漏水、滞水が生じ遊離石灰などの変状及び鉄筋の腐食やコンクリートの剥落等の変状が生じる場合がある図3-5-4に変状例を示す。



1) 伸縮装置の排水工不良



2) 床版防水工未設置



3) 排水工不良

図3-5-4 防水・排水工不良による変状例

以上の損傷のうち、飛来塩による塩害について、損傷メカニズムと措置方針の考え方の基本を3.5.3に示す。

3.5.3 RCT 桁の飛来塩による塩害のメカニズムと措置方針

飛来塩による塩害は、先述のとおり、酸素、水および塩化物イオンがコンクリート内への浸透により、鋼材が腐食し、腐食の進行程度によっては破断に至る場合も想定される。図3-5-5に主な水および飛来塩の供給経路を示す。図3-5-5に示すように、主に海風によって塩分がコンクリート表面に付着することでコンクリートに塩化物イオンが浸透する。T 桁の場合、飛来塩が耳桁の外側で洗い流される一方で、耳桁内側は海風が滞留するため付着塩分量が多くなる点に注意が必要である。また、防水層が設置されていないことが多いため、橋面から床版に塩化物イオンを含んだ水が漏水することがある。

PC 桁と同様に、ここでもコンクリート内部の塩化物イオンの状態を把握するために、特定点検³⁾の実施を前提とした。この前提によって、外観変状が生じないとき、すなわち鋼材のさびが発生しない状態を判断できるものとし、措置方針は腐食の原因となる水や塩分の供給をできるだけ抑えることを基本とした。一方で、外観変状が生じたとき、すなわち鋼材の錆が発生したときの措置は、鋼材腐食の進行を抑えることを基本とした。

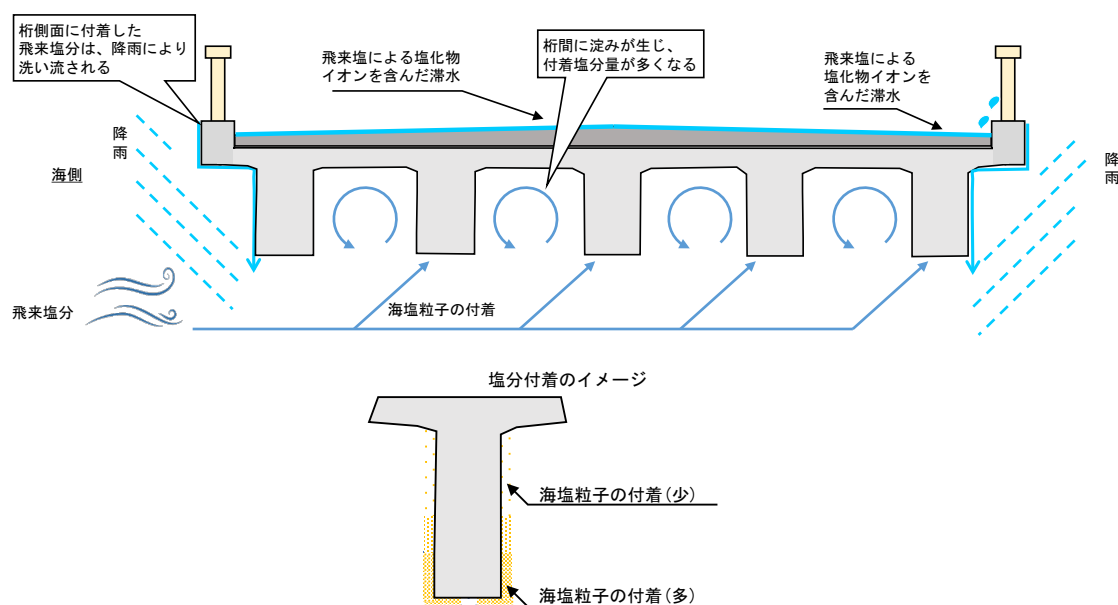


図3-5-5 水および塩分の主な供給経路

飛来塩による塩害の損傷メカニズムや措置方針の考え方について以下に示す。

RCT 桁の飛来塩による塩害の損傷メカニズムを図3-5-6に、診断セットを表3-5-2に示す。基本的な考え方は3.4.4と同様である。相違点として、RC 桁であるためPC 鋼材が配置されていないことに留意が必要である。

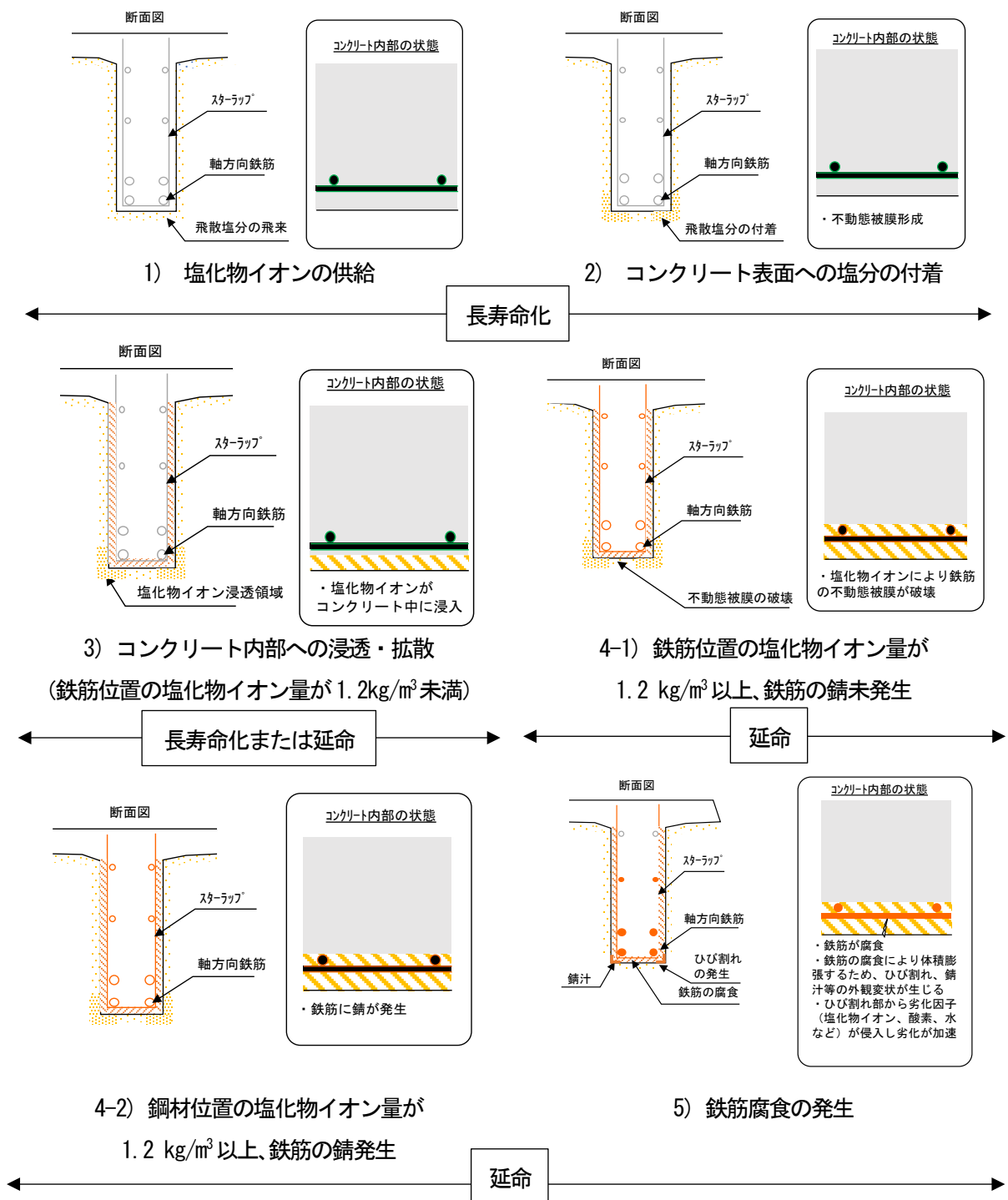


図 3-5-6 RCT 桁の飛来塩による塩害の代表的な損傷過程 (1/2)

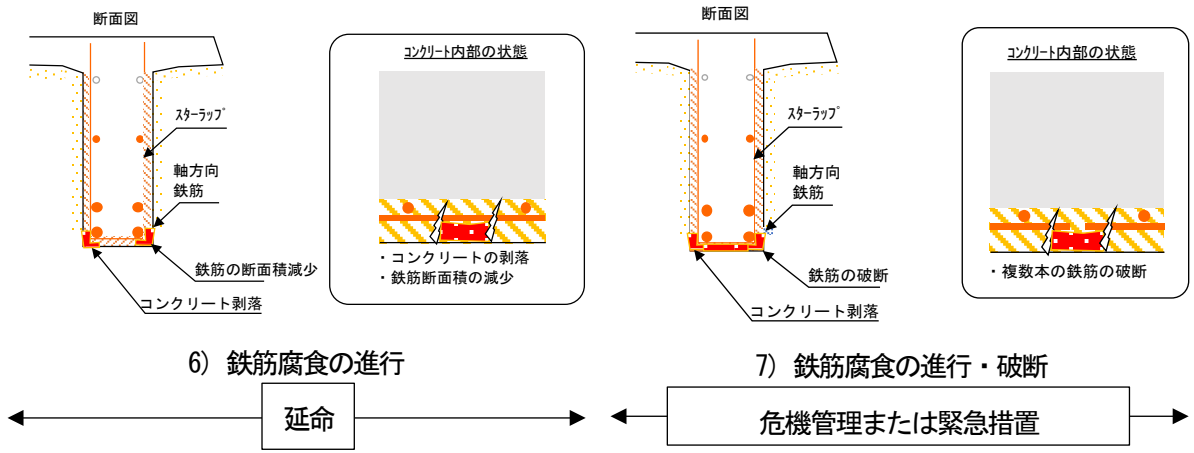


図 3-5-6 RCT 桁の飛来塩による塩害の代表的な損傷過程 (2/2)

表 3-5-2 RCT 桁の飛来塩による塩害の診断セット

メカニズム		点検における着目点 (定期点検)	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	—	<ul style="list-style-type: none"> 塩化物イオン含有量調査 (ドリルコア) ※塩害特定点検で実施 	<ul style="list-style-type: none"> 下部構造鋼材位置の塩化物イオン量が$1.0\text{kg}/\text{m}^3$以上かつ上部構造かぶり範囲の塩化物イオン量が微量混入 	長寿命化 (遮塩)	表面被覆or含浸
	2.コンクリート表面への塩分の付着	<ul style="list-style-type: none"> 塩害防止対策の有無 (表面被覆、防食鋼材など) 				
	コンクリート内部への浸透・拡散 (鋼材位置の塩化物イオン量が $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 未満)			<ul style="list-style-type: none"> 3-1.将来劣化なし 3-2.将来劣化あり 	<ul style="list-style-type: none"> 上部構造最外縁鋼材位置の塩化物イオン量が$1.2\text{kg}/\text{m}^3$未満かつ将来予測で10年以内に$1.2\text{kg}/\text{m}^3$を超える 	延命 (遮塩、鉄筋の防食)
	鋼材位置の塩化物イオン量が $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 以上	<ul style="list-style-type: none"> 4-1.鉄筋の錆未発生 4-2.鉄筋の錆発生 		<ul style="list-style-type: none"> 上部構造最外縁鋼材位置の塩化物イオン量が鋼材腐食発生限界$1.2\text{kg}/\text{m}^3$以上 		
外観変状 有り	5.鉄筋腐食とコンクリートひび割れの発生	<ul style="list-style-type: none"> 鉄筋に沿ったコンクリートのひび割れ (特にけた下フランジ隅角部) 	<ul style="list-style-type: none"> はつり調査、コア・ドリル削孔調査 (ひび割れに錆汁が生じていない場合) 		<ul style="list-style-type: none"> 鉄筋に沿ったひび割れが発生 (錆汁を伴う場合もある) 鉄筋の腐食が発生 	延命 (鉄筋の防食)
	6.鉄筋腐食の進行	<ul style="list-style-type: none"> コンクリートの浮き、剥落 鉄筋の断面積減少 腐食鉄筋の露出 	<ul style="list-style-type: none"> はつり調査、コア・ドリル削孔 (鉄筋が露出していない場合) 	<ul style="list-style-type: none"> かぶりコンクリートの浮き、剥落が発生 鉄筋の断面積減少が発生 腐食鉄筋の露出が発生 	延命 (鉄筋の防食)	電気防食 仮受け
	7.鉄筋の破断	<ul style="list-style-type: none"> 鉄筋破断 	—	<ul style="list-style-type: none"> 鉄筋に破断が発生 	危機管理	モニタリング 交通規制 仮受け 架替え
					緊急措置 (損傷が複数本の桁に発生等) ※詳細調査を行い個別に検討	通行止め 仮受け 架替え

表 3-5-2 において、図 3-5-6 に示す損傷メカニズムに応じた点検の着目点、必要な詳細調査、決め手となる情報、措置方針および工法例を示している。基本的な考え方は 3.4.4 と同様である。

RC 桁における塩害の損傷メカニズムや措置方針の詳細について飛来塩による塩害の代表例を含めて示した。飛来塩の他、凍結防止剤による塩害および初期内在塩による塩害についても同様の整理を行っている。なお、これらの損傷はポステン T 桁と損傷メカニズムおよび措置方針が同じである。

3.6 RC 溝橋

3.6.1 一般

RC 溝橋は、道路の下を横断する道路や水路等の空間を確保するために盛土あるいは地盤内に設けられる構造物で、橋長2m以上かつ土被り1m未満のボックスカルバートである⁴⁾ (図3-6-1、図3-6-2)。図3-6-3に示すとおり RC 溝橋を構成する部材は、頂版、側壁、隔壁 (2連の場合)、底板、翼壁である。

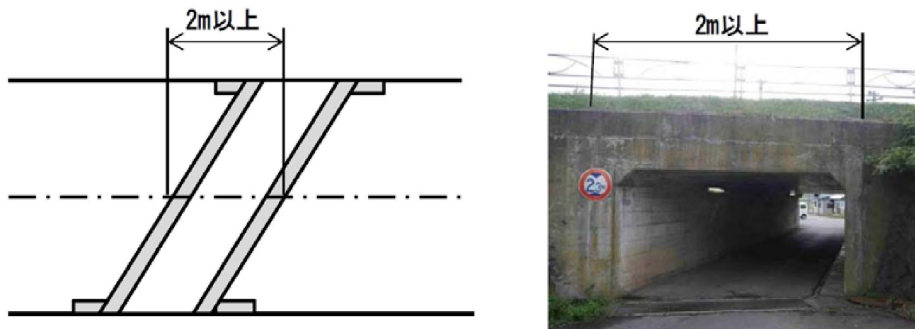


図3-6-1 橋長2m以上の考え方⁴⁾

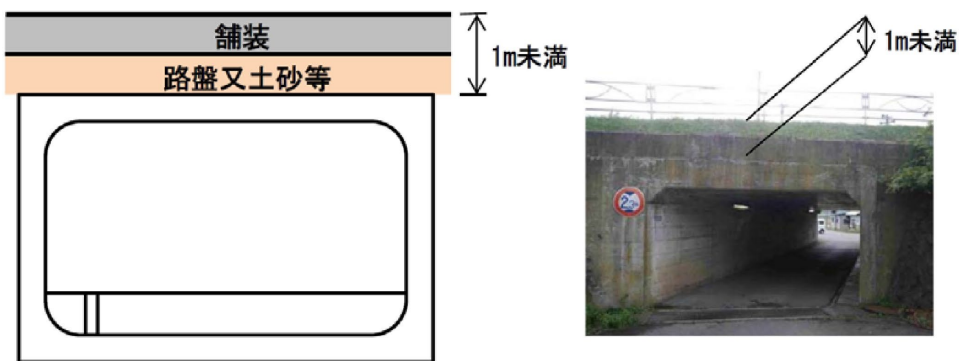


図3-6-2 土被り1m未満の考え方⁴⁾

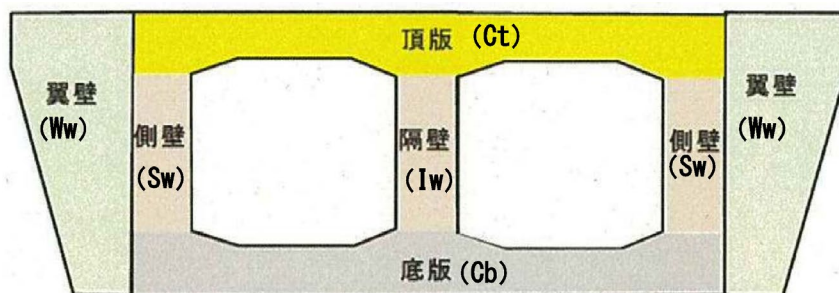


図3-6-3 2連の溝橋の部材名称⁴⁾

3.6.2 RC 溝橋に生じる損傷原因

(1) 基本的な分類

図 3-6-4 に示すとおり RC 溝橋の代表的な損傷は、特に構造安全性や段差等による走行安全性に影響を与えるものとして塩害、沈下、浸食が挙げられる。ここで扱う RC 溝橋は橋単位であり他節で扱う上部構造や下部構造を構成する部材に生じるその他の損傷も発生するものと考えられるが、ここでは特に橋の機能に影響を及ぼす代表的なものを挙げ、これら以外はその他の損傷とした。それぞれの損傷原因に対して、措置の観点から細く分類した結果については、(2)以降に示す。

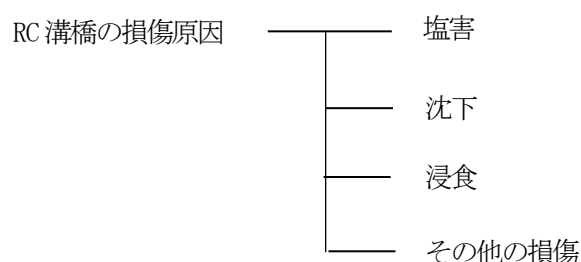


図 3-6-4 RC 溝橋に生じる損傷の基本的な分類

(2) 塩害

塩害は、塩化物イオンの作用により鋼材を保護している不動態被膜が破壊され、酸素と水の供給により鉄筋が腐食し膨張することで、コンクリートのひび割れや剥離などが生じる現象である。ここでは、塩化物イオンの供給経路の違いから、外来塩と初期内在塩に分類した。

外来塩は、海からの飛来塩による塩害と凍結防止剤散布による塩害に分類した。また、凍結防止剤による塩害は、凍結防止剤を含んだ水の供給経路によって措置が異なる。そのため、代表的な水の供給経路として、①継手部からの漏水と②路面からの漏水の2つに分類した。

初期内在塩による塩害は、塩分を含んだ混和剤または海砂の使用により、建設当初からコンクリート中に多量の塩分が含まれていたことによって生じる塩害である。この損傷は、「コンクリート中の塩分総量規制」(1986年)以前に生じることが多い。

以上をふまえて、表 3-6-1 に示すとおりに細分類した。また、図 3-6-5 に RC 溝橋の塩害による変状事例を示す。

表 3-6-1 RC 溝橋の塩害損傷の細分類

損傷	塩化物イオンの供給経路による分類		水の供給経路による分類
塩害	外来塩による塩害	飛来塩による塩害	—
		凍結防止剤による塩害	継手部からの漏水 路面からの漏水
	初期内在塩による塩害		—



1) 飛来塩による塩害



2) 凍結防止剤による塩害（継手部からの漏水）

図 3-6-5 RC 溝橋の塩害による変状事例

(3) 沈下

沈下は、表 3-6-2 に示すとおり、圧密沈下と圧縮沈下に分類した。

圧密沈下は、RC 溝橋による上載荷重が作用することで、底版直下にある軟弱な粘性土の間隙水が排出され地盤が沈下する現象である。圧密沈下に対する措置は、生じた変状の種類によって異なることから、代表的な変状として、①頂版や側壁に連続したひび割れが生じた場合と、②頂版、側壁、底版の継手部に開きや段差が生じた場合に分類した。

圧縮沈下は、RC 溝橋に隣接する盛土が、地震動による揺すり込み等により地盤が圧縮沈下する現象であり、その結果、境界部の路面に段差が生じる。

図 3-6-6 に RC 溝橋の圧密沈下による変状事例を、図 3-6-7 に RC 溝橋の圧縮沈下による変状事例を示す。

表 3-6-2 RC 溝橋の沈下損傷の細分類

損傷	沈下の種類による分類	変状の種類による分類
沈下	圧密沈下	頂版や側壁に連続したひび割れ
		継手部の開きや段差
	圧縮沈下	路面の段差



1) 連続したひび割れ



2) 継手部の開き



3) 継手部の段差

図 3-6-6 RC 溝橋の圧密沈下による変状の事例



図 3-6-7 RC 溝橋の圧縮沈下による変状事例
(RC 溝橋と盛土の境界部に生じた路面の段差)

(4) 浸食

浸食は、表 3-6-3 に示すとおり、①雨水による翼壁部の土砂の浸食と、②海や河川などの流水による側壁および隔壁の浸食に分類した。

図 3-6-8 に RC 溝橋の浸食による変状事例を示す。

表 3-6-3 RC 溝橋の浸食損傷の細分類

損傷	原因と部位による分類
浸食	雨水による翼壁部の土砂の浸食
	流水による側壁および隔壁の浸食



1) 翼壁部の浸食



2) 側壁の浸食

図 3-6-8 RC 溝橋の浸食による変状の事例

以上の損傷のうち、沈下について損傷メカニズムと措置方針の考え方の基本を 3.6.3 に示す。

3.6.3 沈下のメカニズムと措置方針

(1) 圧密沈下

圧密沈下は、底版直下にある軟弱な粘性土が正規圧密状態である場合、RC 溝橋による新たな上載荷重が作用することで、間隙水が徐々に排出され体積が減少し、地盤が沈下する現象である。飽和した粘性土は透水性が低いため、水の排出に時間がかかり、圧密がゆっくりと長期にわたって進行する。圧密沈下が原因で生じる変状は、図 3-6-9 のように頂版や側壁に連続したひび割れや、図 3-6-10 のように継手部の開きや段差である。

圧密沈下の診断セットを表 3-6-4 に示す。圧密沈下の診断は、軟弱粘性土層の圧密が今後も進行するか否かを確認することが重要である。その上で、今後も圧密が進行すると予想される場合は、継続的なモニタリングが必要となる。一方で、原因となる軟弱な粘性土層に対しては、一般には地盤改良を行う必要になるが、改良範囲の設定や不測の沈下に対する備えなど、適切な対策を講じることが困難な場合が多い。そのため、圧密が極度に進行するような場合においては、架け替えなどを念頭に維持管理を行う必要がある。また、継手部の開きが進行することで、土砂の流出や吸出しが生じる恐れがある場合は、車両や歩行者の通行に支障が生じる可能性が高いため、段差補修などの措置を講じることが必要である。

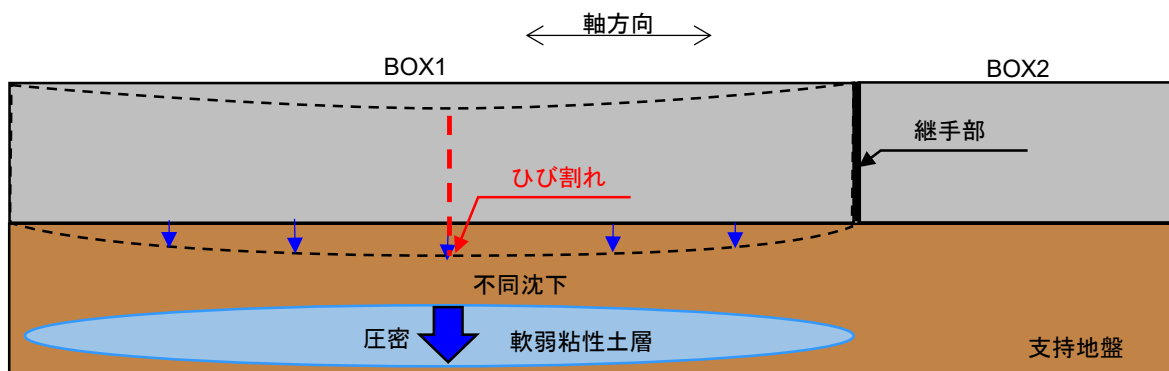


図 3-6-9 圧密沈下によりひび割れが生じる場合

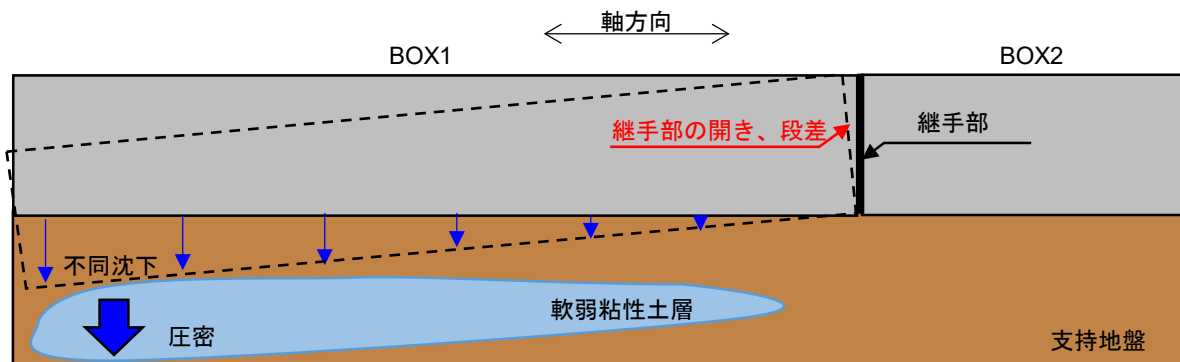


図3-6-10 圧密沈下により継手部の開き、段差が生じる場合

表3-6-4 RC溝橋の圧密沈下の診断セット

変状の状況	点検における着目点 (定期点検)	診断に必須な 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 有り	CASE1 コンクリート ひびわれの発生	・頂版から側壁まで連続 したコンクリートのひ び割れ ・路面の変状	・地質調査 (ボーリング、土の密度試験、圧密試験) ・地下水位調査	・軟弱粘性土層の有無 ・軟弱粘性土層の層厚 ・軟弱粘性土層の圧密状態 (正規圧密or過圧密)	延命	表面被覆or含浸、 断面修復、 剥落防止 ^{注1} 、 モニタリング、架替え ^{注2}
	CASE2 継手部の開き、 段差	・継手部からの漏水、漏 水跡 ・土砂流出、土砂吸出し の有無 ・路面の変状	・地質調査 (ボーリング、土の密度試験、圧密試験) ・地下水位調査	・軟弱粘性土層の有無 ・軟弱粘性土層の層厚 ・軟弱粘性土層の圧密状態 (正規圧密or過圧密)	延命	目地の改良、 背面土砂流出・吸出し防止、 道路補修、 止水対策、 モニタリング、架替え ^{注2}

(2) 圧縮沈下

圧縮沈下は、RC溝橋の側壁背面の盛土が地震動による揺すり込み等により、沈下する現象である。圧縮沈下が原因で生じる変状は、RC溝橋と盛土の境界部の路面の段差である(図3-6-11)。

圧縮沈下の診断セットを表3-6-5に示す。圧縮沈下に対する措置は、道路補修を基本とし、必要に応じて踏掛版の設置などを検討することが望ましい。

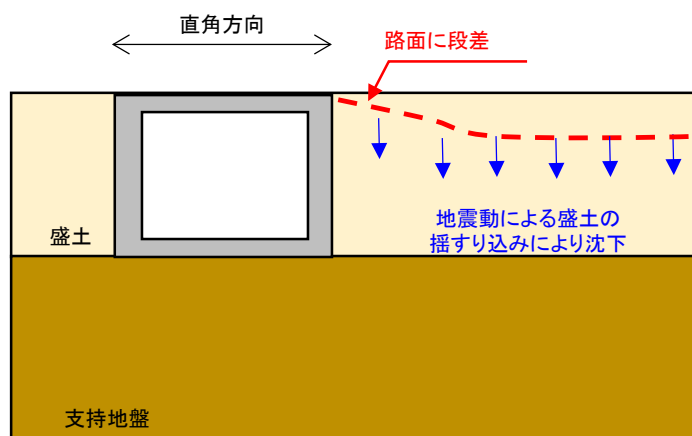


図3-6-11 圧縮沈下により代表的な変状

表 3-6-5 RC 溝橋の圧縮沈下の診断セット

変状の状況	点検における 着目点 (定期点検)	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 有り	地震動による盛土の揺すり込みにより圧縮沈下し、境界部の路面に段差	・路面の変状	—	延命	道路補修、踏掛版の設置、モニタリング

3.7 鋼桁

3.7.1 一般

鋼桁は、鋼板や形鋼等を溶接、高力ボルト等により I 形、箱形及び π 形の断面に集成し主として曲げモーメント及びせん断力に抵抗させることを目的とした梁部材である。

鋼桁を含む鋼部材の接合方法は、古くはリベット接合が広く用いられてきたが、1960 年代頃から高力ボルト接合又は溶接継手が広く採用されるようになってきている。鋼桁は、主桁、横桁、床桁（縦桁）として用いられる。ここでは、溶接により集成された鋼桁又は形鋼を用いた鋼桁で、鋼桁同士は高力ボルト摩擦接合継手により連結され、主桁に適用された場合を想定して、以下に損傷の分類や損傷のメカニズム等を示す。なお、主桁以外の横桁、床桁（縦桁）の他、対傾構や横構などの鋼部材に対しても、基本的な損傷のメカニズムは同じ部分もあるため参考にすることができる。

3.7.2 鋼桁に生じる損傷

(1) 基本的な分類

鋼桁の代表的な損傷は、腐食、疲労である。ただし、F11T の高力ボルトが適用されている場合、ボルトの遅れ破壊が生じることがあるため、図 3-7-1 に示すように、鋼桁に生じる損傷として、腐食、疲労、ボルトの遅れ破壊の 3 つを挙げ、これらに該当しないものはその他として分類した。さらに、それぞれの損傷に対して、措置の観点から細く分類した結果については、(2) 以降に示す。

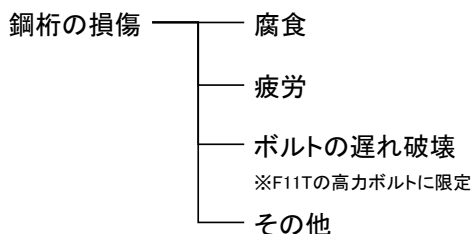


図 3-7-1 鋼桁に生じる損傷の基本的な分類

(2) 腐食

一般に、鋼材の腐食を防止するために鋼材表面には塗装などの防食がされるため、経年の影響等により防食機能の劣化が生じ、その後に鋼材の腐食が生じる。ここでは、防食機能の劣化から鋼材の腐食に至る一連の損傷を腐食として扱う。腐食には、異種金属腐食や隙間腐食など特殊な条件下で生じるものもあるが、ここでは一般的な条件下で生じる腐食を扱う。

表 3-7-1 に腐食損傷の細分類を示す。腐食に対する措置としては、水や塩分等の腐食の原因をできるだけ除去することが共通した考え方となるが、損傷の進行過程は、防食法に応じて異なるため塗装（一般塗装系、重防食塗装系）、犠牲防食（溶融亜鉛メッキ、金属溶射）、耐候性鋼材に分類している。図 3-7-2 に塗装（一般塗装系）で防食した鋼桁の桁端部、一般部及び添接部の変状を例示する。腐食の原因となる水の供給経路

は、桁端部と一般部では異なり、一般に、桁端部の腐食環境は厳しく一般部に比べ腐食が進行する場合が多い。また、添接部では塗膜厚が均一となりにくく角部から腐食が生じる場合が多いなど、添接部特有の腐食の進展が見られる場合がある。桁端部、一般部、添接部それぞれで、腐食の進行程度が異なり、応力状態等も異なるため、部位に応じて措置方法や措置のタイミングを検討することが合理的な場合があることから、これらの3つの部位で分類をした。

表 3-7-1 鋼桁の腐食損傷の細分類

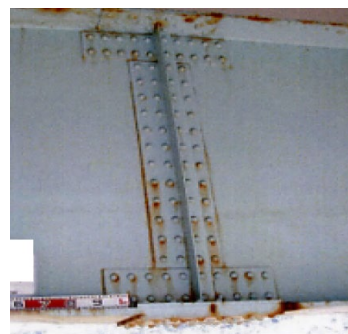
損傷	防食法による分類	部位による分類
腐食	塗装（一般塗装系、重防食塗装系）	桁端部
		添接部
		一般部
	犠牲防食（溶融亜鉛メッキ、金属溶射）	桁端部
		添接部
		一般部
	耐候性鋼材	桁端部
		添接部
		一般部



1) 桁端部



2) 一般部



3) 添接部

図 3-7-2 鋼桁の腐食の事例（一般塗装系）⁵⁾

(3) 疲労

疲労は、荷重の繰り返し作用により応力集中部から亀裂が発生し、進展する損傷である。表 3-7-2 に疲労の損傷の細分類を示す。これまでの疲労亀裂の発生事例や研究等から、発生する構造・部位とその損傷メカニズムが明らかとなっていることが多い。疲労亀裂は、一定程度長くなると脆性的な進展に移行する場合があるため、急激な進展の可能性が否定できない場合は、緊急措置を行うことが重要である。そうでない場合でも、応急的な措置を行い、リスクを軽減した後に本格的な措置を行うなど段階的な対応の必要性を検討した上で措置することが重要である。これらは、疲労損傷に対する共通的な考え方であるが、亀裂の発生する構造・部位ごとで詳細な部分は異なるため、構造・部位ごとに細分類した。

特に疲労損傷の発生しやすい構造・部位として、表 3-7-2 に示すように、主桁下フランジの支承ソールプレート溶接部、桁端切り欠き部、横構ガセットプレート取付部、対傾構取付部の垂直補剛材、横桁取付部（主桁腹板、ウェブギャップ板、横桁）、箱桁ダイアフラムを取り上げた。このうち、図 3-7-3 に、主桁下フランジの支承ソールプレート溶接部、桁端切り欠き部及び対傾構取付部の垂直補剛材に発生した疲労損傷を例示する。なお、これまでに報告されていない亀裂又はメカニズムが明確ではない亀裂が確認された場合には、個別に原因を追及し、リスクマネジメントを考慮した対応が必要となる。

表 3-7-2 鋼桁の疲労損傷の細分類

損傷	構造・部位による分類
疲労	主桁下フランジの支承ソールプレート溶接部
	桁端切り欠き部
	横構ガセットプレート取付部
	対傾構取付部の垂直補剛材
	横桁取付部（主桁腹板）
	横桁取付部（ウェブギャップ板）
	横桁取付部（横桁）
	箱桁ダイアフラム



1) 主桁下フランジの支承ソールプレート溶接部



2) 桁端切り欠き部



3) 対傾構取付部の垂直補剛材

図 3-7-3 鋼桁の疲労の事例⁵⁾

(4) ボルトの遅れ破壊

遅れ破壊は高強度の鋼材に高い引張力が静的に作用した状態で、相当の時間経過後に突然脆性的な破壊が生じる損傷であり、引張強度の大きいF11T以上の高張力ボルトで主に生じる。図3-7-4に損傷事例を示す。措置としてはボルトの遅れ破壊による脱落で第三者被害が生じる危険性を考慮し、ボルト取り換えまたは落下防止対策を講じることが基本となり共通しているため、ボルトの遅れ破壊に対する細分類はしていない。



1) ボルトの遅れ破壊が生じた添接部



2) 遅れ破壊の破面

図3-7-4 ボルトの遅れ破壊の事例

以上の損傷のうち、腐食と疲労の損傷メカニズムや措置方針の考え方については 3.7.3 ならびに 3.7.4 に示す。

3.7.3 腐食のメカニズムと措置方針

腐食は、鋼材表面に水と酸素が存在することで、鉄がイオン化して水の中へ溶解し酸化する電気化学的反応であり、塩分が存在するとその化学反応が促進される。図3-7-5、図3-7-6に腐食の原因となる水と塩分それぞれの主な供給経路を示す。措置では、腐食の原因となる水や塩分の供給をできるだけ抑えることが基本となる。また、滞水が生じているおそれのある箇所、土砂が堆積し、その土砂に雨水や凍結防止剤に含まれる塩化物イオンが堆積するような箇所では、局所的に腐食が進行する恐れがあるため、腐食環境の改善を行うことが基本となる。

防食法の分類の内、塗装（一般塗装系）の腐食損傷メカニズムや措置方針の考え方について以下に示す。

塗装（一般塗装系）の代表的な劣化の進展過程を図3-7-7に示す。経年の影響により塗膜の消耗・割れ・剥離等が生じ、鋼材表面に水や酸素が供給されやすくなることで塗装の内部から錆が生じる。その後、さびの範囲が拡大し、塗装の割れの拡大等を伴いながら鋼材の腐食が進行する。また、塗替え塗装時の素地調整不足による早期劣化のメカニズムを図3-7-8に示す。塗り替え塗装前の素地調整において、さびや塩分の除去が十分でない場合には、内部での腐食が進行しやすくなり、早期に再度の腐食に至る。なお、塩分は微細な孔食の中に入り込むと、ブラストしても除去が困難となるため、塩分の影響がある場合には、できるだけ鋼材の板厚減少を伴う腐食が生じる前に措置を行うことが望ましい。

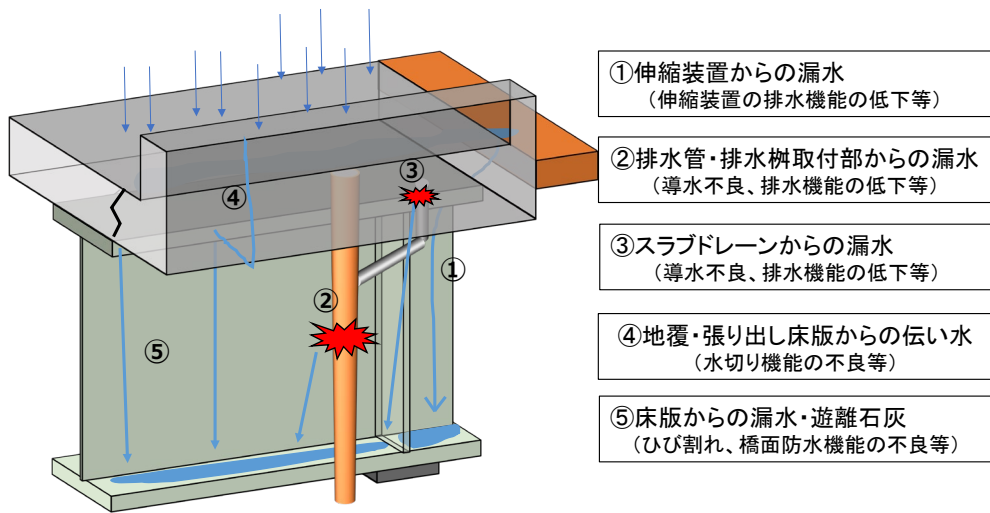


図 3-7-5 水の主な供給経路

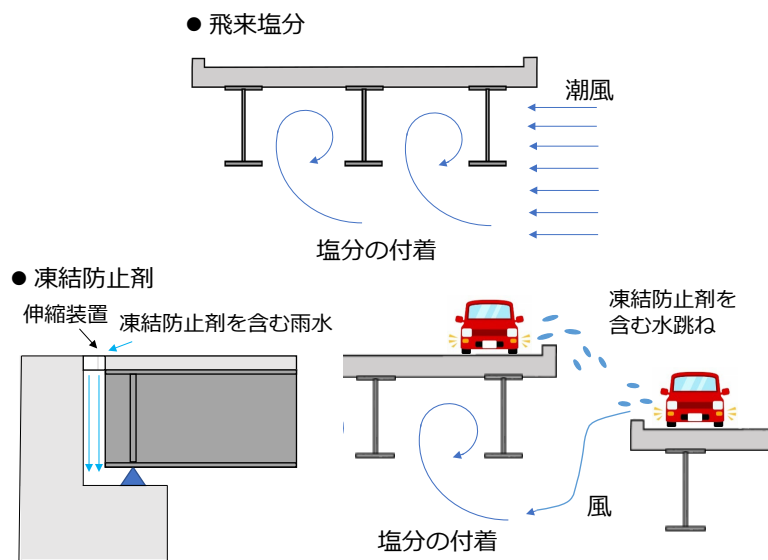


図 3-7-6 塩分の主な供給経路

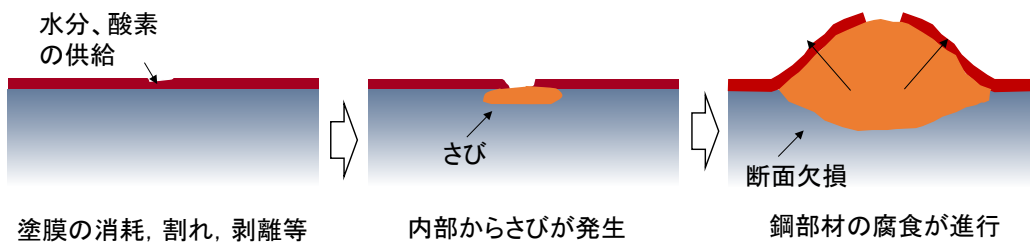


図 3-7-7 塗装（一般塗装系）の代表的な劣化メカニズム

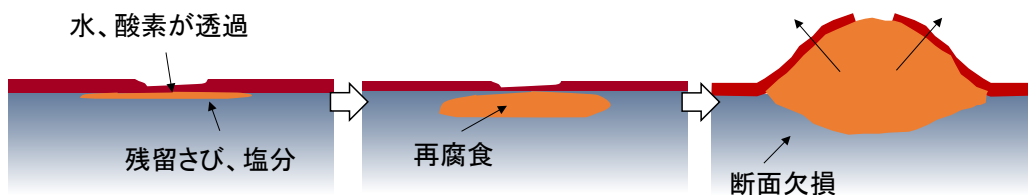


図3-7-8 塗替え塗装時の素地調整不足による早期劣化のメカニズム

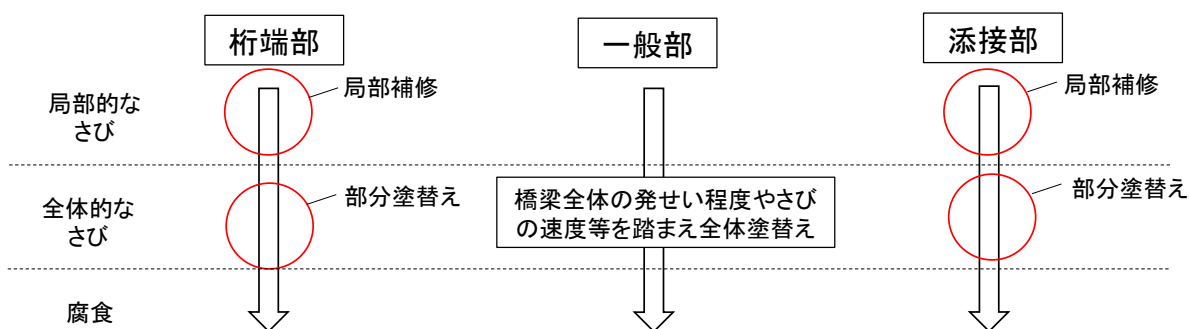


図3-7-9 塗替え塗装の考え方の例

鋼道路橋防食便覧⁶⁾では旧塗膜上に $50\text{mg}/\text{m}^2$ 以上の塩分が付着していると塗装後早期に塗膜欠陥が生じやすいことが示されており、現時点においてこれ以外に明確な知見がないと考えられることから、塩分が鋼材表面に付着している場合のブラスト後の鋼材表面の塩分量についても $50\text{mg}/\text{m}^2$ 以下を基本とするのがよい。ただし、水洗いができない条件下等では、 $50\text{mg}/\text{m}^2$ 以下とすることが困難な場合があり、その場合は、 $50\text{mg}/\text{m}^2$ 以下を目標とするか塩分除去が困難な場合には少なくとも $150\text{mg}/\text{m}^2$ 以下とし、 $50\text{mg}/\text{m}^2$ を超える場合はさびが再発するリスクもあるため点検調書等に記録しておくとともに、その後の点検で注意する必要がある。

塗装の劣化は、添接部の塗装厚のばらつきが生じやすい角部や、桁端部などの漏水の影響を受ける部位から生じやすい。局部的なさびが生じた段階で、グラインダ等によりさび落としを実施の上で、タッチアップによる防せい塗装をすることで、塗装の全面塗替の間隔を伸ばすことが可能となる場合がある。また、一定の範囲において塗装の劣化が見られる場合には、例えば、桁端部だけを部分塗り替えをすることで、全面塗替の間隔を伸ばすことが可能となる場合がある。このように、桁端部、一般部、添接部では、防食機能の劣化の進行程度の違いがあることが多いため、図3-7-9に示すようにこれらの区分ごとに状態を把握し、その進行度に応じて、局部補修や部分塗り替えの選択をするのが望ましい。なお、局部補修は、塗り替え塗装までの応急的な処置であり、実施した箇所等の維持管理に必要となる情報は記録を残し、他の腐食箇所と合わせて部分塗替又は全面塗替え計画の立案につなげることが望ましい。

鋼桁（塗装橋・桁端部）の腐食の代表的な損傷過程（防食機能の劣化から鋼材の腐食に至るまで）を図3-7-10に、診断セットを表3-7-3に示す。鋼桁桁端部では図3-7-5に示す様々な経路から水分が供給され

るが、特に伸縮装置またはその取り付け部からの漏水により水分が供給されることが多い。凍結防止剤の散布地域では塩分を含む雨水が桁端部に供給されることで腐食進展が早くなる可能性があるため特に注意が必要である。また、海岸からの距離が近い橋梁等では海からの飛来塩分の影響が疑われる。そのため、塩分の影響が疑われる場合には付着塩分量調査を行い、塩分を確認しておくことが望ましい。伸縮装置等より供給された水分は支点周りに滞水し、支点周りを中心とした局所的なさびが発生し段階2)に至る。以降、局所的なさびが範囲を広げ段階3)に至ることを図3-7-10では想定しているが、局部的に腐食が進行しそのまま断面欠損に至る場合もあるなど、腐食範囲の広がり方や深さ方向の進展は条件により様々であるため、図の損傷過程はあくまで一例である。腐食による板厚減少は支点部周りに集中することが多く、腐食減肉が進展する（段階4）と最終的に支点上ウェブや垂直補剛材に断面欠損が生じる（段階5）。

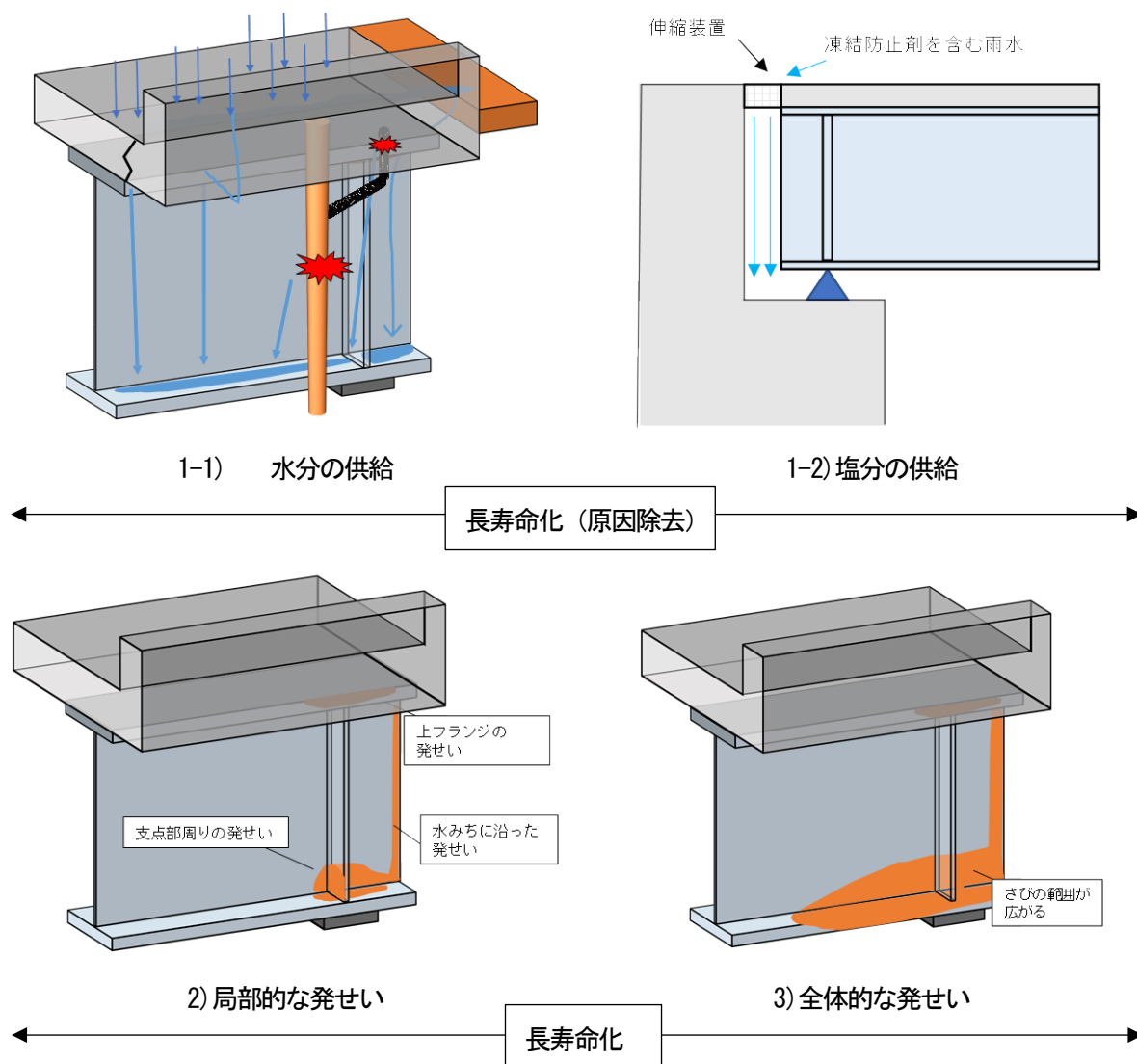


図3-7-10 鋼桁（塗装橋・桁端部）の腐食の代表的な損傷過程(1/2)

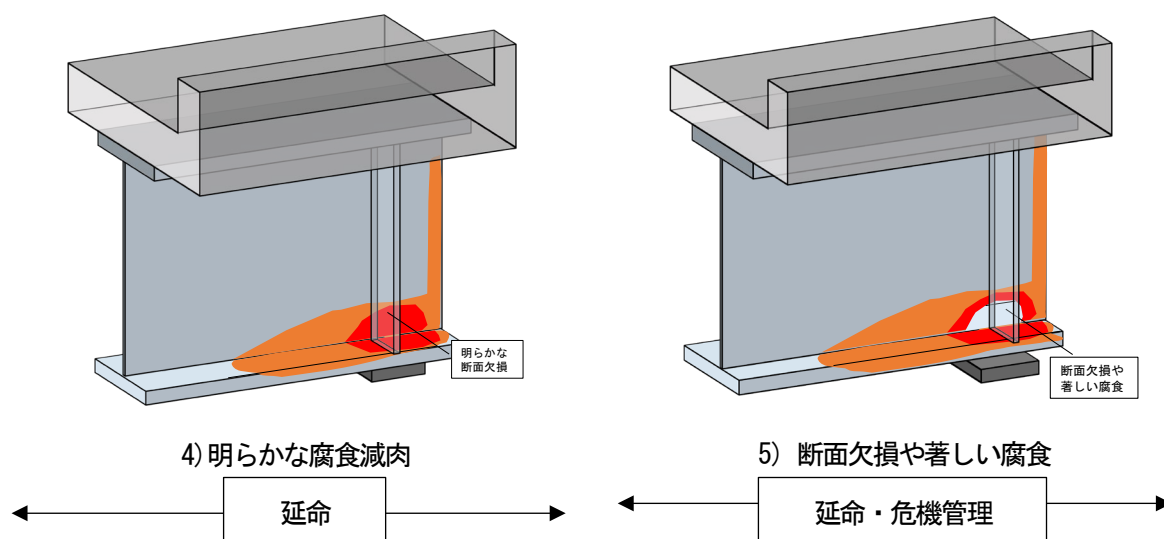


図 3-7-10 鋼桁（塗装橋・桁端部）の腐食の代表的な損傷過程 (2/2)

表 3-7-3 鋼桁（塗装橋・桁端部）の腐食の診断セット

メカニズム	点検における着目点 (定期点検)	診断に必要な詳細調査	診断の決め手となる情報 (+評価区分)	追加情報 (進展性の推定、塩分の影響)	措置の方針	工法例	
1	水分の供給	<ul style="list-style-type: none"> 伸縮装置からの漏水 土砂の堆積 	-	<ul style="list-style-type: none"> 漏水の発生 土砂の堆積 		<ul style="list-style-type: none"> 長寿命化 (原因除去) 	<ul style="list-style-type: none"> 伸縮装置の改良、橋面防水、排水管の補修・延長等 水洗、清掃
	塩分の供給	<ul style="list-style-type: none"> 地形条件 橋梁形式や架設位置 凍結防止剤の散布 	付着塩分量調査 (明らかに塩分の影響がない場合は除く)	付着塩分量が 50mg/m ² 以上である		<ul style="list-style-type: none"> 長寿命化 (原因除去) 	<ul style="list-style-type: none"> 同上 (漏水に伴う塩分供給の除去)
2	局所的な発せい	発錆範囲	付着塩分量調査 (明らかに塩分の影響がない場合は除く)	局所的に防食塗膜が劣化し、点錆が発生している。(防食機能の劣化e相当)	塩分の影響が見られない	長寿命化 (推奨)	局部補修 (目あらし+防錆塗装)
					塩分の影響が見られる	長寿命化	塩分除去+局部補修
3	全体的な発せい	発錆範囲	付着塩分量調査 (明らかに塩分の影響がない場合は除く)	<ul style="list-style-type: none"> 防食塗膜の劣化範囲が広く、点錆が発生している。 板厚減少を伴うさびが発生している。(腐食b相当) 	損傷の進展が緩慢と推定される	長寿命化 (推奨)	部分塗替え (Rc-1塗装系)
					損傷の進展が急激な可能性 (塩分無し)	長寿命化	部分塗替え (Rc-1塗装系)
					塩分の影響が見られる	長寿命化	塩分除去 + 部分塗替え (Rc-1 塗装系)
4	明らかな腐食減肉	腐食範囲・程度	付着塩分量調査	<ul style="list-style-type: none"> 目視で断面が減少している。 層状剥離さびが生じている。(腐食d相当) 	前回点検からの進行は緩慢	延命	個別判断により補修方法を検討
					前回点検からの急激な進展	延命	腐食原因を除去の上、個別判断により補修方法を検討
5	断面欠損や著しい腐食	<ul style="list-style-type: none"> 断面欠損の有無 著しい腐食の有無 	-	<ul style="list-style-type: none"> 断面欠損が生じている 著しい腐食が生じている 		延命	当て板
						危機管理	モニタリング、バント、交通規制

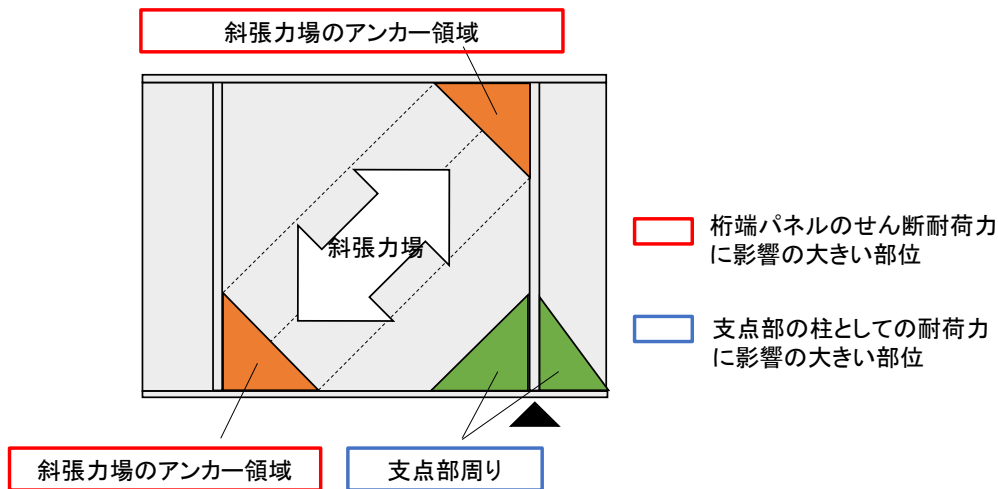


図3-7-11 桁端部の耐力に影響を与える部位

長寿命化を図るためには段階4)に至る前に措置を講じることが重要である。腐食が進展し著しい板厚減少や断面欠損に至ると桁端部の柱としての耐力低下が顕著となる他、橋軸方向に腐食範囲が拡大している場合には腹板のせん断耐力の低下が問題となるため、図3-7-11に示すように耐力に寄与する部位と腐食範囲や程度の関係ならびに前回点検からの損傷進行程度を踏まえて次回点検までの構造安全性が確保されるかを個別に判断し、当て板等の措置を行うか検討する必要がある。そのため、層状剥離錆が生じる等、明らかな腐食減肉が生じる前の段階4)までに漏水原因の除去、及び塗り替え塗装により防食機能を回復させるなど、長寿命化措置を講じることが望ましい。塗り替え塗装にあたっては塩分の影響が見られる場合には水洗いとブラストを併用することにより可能な限り塩分を除去する必要がある。漏水等が生じていれば、早い段階で止水対策として伸縮装置や排水装置の止水・排水機能の回復等を図るとともに、段階2)の局部的なさびが生じた段階であれば、グラインダ等によりさび落としを実施の上で、タッチアップによる防せい塗装をすることで、塗装の全面塗替えの間隔を伸ばすことが可能となる場合があるため、個別に検討した上、このような措置を講じることが望ましい。

以上は防食法として塗装（一般塗装系）を適用した鋼桁の腐食損傷メカニズムや措置方針の詳細について桁端部の代表例を含めて示したが、防食方法として犠牲防食や耐候性鋼材を適用している場合についても同様の整理を行っており、その概略を以下に示す。

犠牲防食（溶融亜鉛メッキ、金属溶射）は、塗装と同様に鋼材表面を金属被膜で覆う方法であり、水分や酸素の継続的な供給により金属被膜が消耗して鋼素地が露出しても、犠牲防食作用により表面に白さびの形成が期待できる。しかし、犠牲防食作用が消失すると赤さびが発生し断面減少に至るため、赤さびの範囲が広がり断面減少に至る前に塗り替えを行い、防食機能を回復させることが重要である。

耐候性鋼材は、普通鋼材に適量の合金元素を添加することにより、鋼材表面に緻密なさび層（保護性さび）を形成させ、鋼材表面を覆うことで鋼材の腐食速度の低下を前提として、鋼材表面を別の材料で覆うことなく用いる鋼材である。適度に乾湿が繰り返され、かつ、大気中の塩分量が少ない条件では、緻密なさび層が形成されるが、塩分量が多い環境条件又は湿潤状態が継続するような環境条件では期待する緻密なさび層が

生成されないため、異常さびに至る前に、異常さびを生じさせる原因の除去又は塗り替え塗装等を行うことが重要である。耐候性鋼材の表面に形成する緻密なさび層は、通常の鋼材に生じるさびに比べイオン透過抵抗が大きいという特性を踏まえ、異常さびに至る前の状態を定量的に判断する方法としてイオン透過抵抗に着目した方法が提案されている⁷⁾。明らかな異常さびが生じている箇所については、漏水等が生じている場合には止水対策を行うとともに、塩分の影響がある場合（50mg/m²以上を目安）には、塩分を除去した上で重防食塗装を行うことが望ましい。また、塩分の影響がなく、異常さびの範囲が局所的な場合には、原因となっている漏水等を止めることを前提として、さび落としを行い、次回点検時に状態を確認するなどの措置でよい場合があるが、腐食環境が確実に改善されなければ異常さびの範囲拡大につながる可能性があることに留意する必要がある。

3.7.4 疲労のメカニズムと措置方針

疲労は、荷重の繰り返し作用により応力集中部や溶接欠陥など応力条件が厳しい箇所から亀裂が発生し進展する損傷である。鋼道路橋では、疲労亀裂の多くは溶接継手に発生している。溶接継手部の疲労亀裂には、溶接止端部などの溶接部表面から発生する亀裂と、溶接ルート内の未溶着部や溶接内部の欠陥等から発生する亀裂がある（図3-7-12）。ルート亀裂や溶接内部の欠陥を起点とした亀裂は、溶接部表面まで亀裂が進展して発見できるようになった時点で、内部では大きく進展している可能性があるため注意が必要である。

疲労亀裂の発生要因は、構造や損傷部位により異なるが、代表的な要因として、①溶接継手特有の要因、②製作に関する要因、③使用材料に関する要因、④構造部位に関する要因、⑤交通量に関する要因、⑥振動に関する要因の6つが挙げられる。①溶接継手特有の要因は、溶接部での断面の急変による溶接止端部の応力集中や溶接残留応力である。溶接止端部は一般的に降伏応力に達する程度の引張残留応力が生じており、そのため外力の作用が圧縮応力しか生じない継手であっても疲労損傷が生じる場合がある。②製作に関する要因は、溶接欠陥による応力集中部の発生や過大なルートギャップなどの製作精度によるものである。③使用材料に関する要因は、鋼種による違いである。ただし、溶接部に生じる亀裂は、溶接部の構造的な要因が支配的であり、疲労照査においては鋼種の違いによる影響は無視できるとされている。④構造部位に関する要因は、設計段階では考慮されていなかった二次応力や構造的に応力集中部を引き起こす不適切な構造の採用である。⑤交通による要因は、大型車混入率や交通量である。⑥振動に関する要因は、風による部材振動

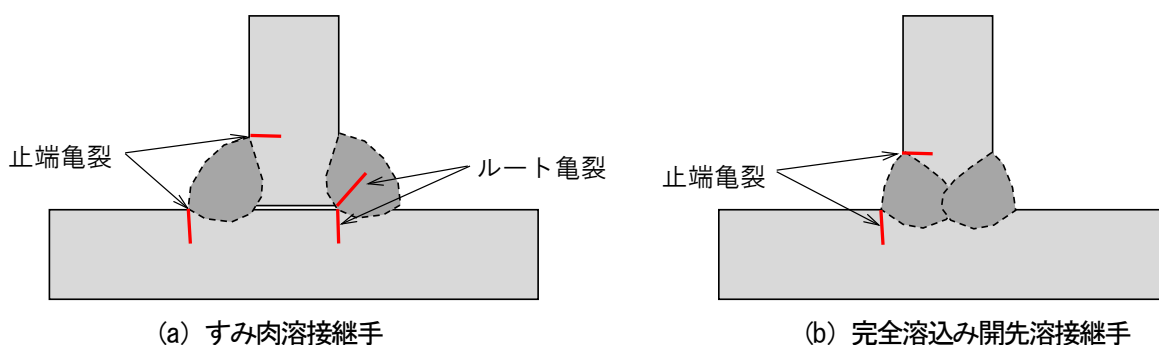


図3-7-12 溶接継手から発生する亀裂

などである。トラス格点部や、風の影響を受けやすい標識柱の基部などで損傷事例が報告されている。このように疲労の損傷原因は様々であり、これらが組み合わさって生じる場合もある。

道路橋における疲労設計は鋼床版など一部を除き、2002年になり導入されており、それ以前の橋では疲労照査は行なわれていない。しかし、全ての橋で疲労損傷が生じるわけではなく、特に大型車交通量の影響を受けるため、大型車交通量が少ない場合には相対的に生じる可能性は低い。一方で、同一路線の交通条件が同じ橋で疲労損傷が生じている場合には同一路線の橋で生じる可能性が高いと考えられる。そのため、過去に疲労損傷が生じた橋の記録を路線や大型車交通量などの関係を踏まえて管理することでリスクを把握し合理的に疲労損傷に対して対応できると考えられる。また、2002年以前の橋梁では疲労耐久性が低く望ましくないとされている溶接継手が採用されている場合がある。点検時などにそのような継手が確認された場合には記録を残し次回点検時に特に注意して亀裂の有無を確認することでリスクを小さくすることができると考えられる。

疲労亀裂に対する措置では、亀裂の発生原因の除去や亀裂による断面欠損を回復する補修補強を行う前に、条件によっては緊急措置、補修までの応急処置を行うことが必要となる場合がある。緊急措置は、交通規制や仮受け橋台の設置等により緊急的に安全性を確保する目的で行う措置である。疲労亀裂は、一定程度長くなると脆性破壊に移行する場合がある。そのため、主桁や主構を破断させるような重大な亀裂や、亀裂の急激な進展で橋の耐荷性能が著しく低下する可能性があるような部位に亀裂が発見された場合は、亀裂発見後、速やかに緊急措置を行うことが重要である。応急処置は、詳細調査から補修補強を実施するまでの間に亀裂が進展することや脆性破壊への移行を防止するために行う措置であり、例えばストップホールによる亀裂先端の応力集中の緩和などが挙げられる。条件によっては応急処置を行い当面の間、進展性を監視する場合もある。

疲労亀裂は、発生部位によって原因や進展性が異なる。そのため、上述した措置の考えは、疲労亀裂全般に共通したものであるが、具体的な対策については、発生部位ごとの損傷メカニズムに応じて適切に選定することが重要である。なお、表3-7-2に示す以外に一般化できず個別に原因等の追究が必要な場合もある。その場合はリスク管理を考慮した対応を基本とし、橋全体でどこにどれだけ亀裂が生じているかマッピングを行い、原因を特定して措置を検討することが望ましい。また、亀裂が生じていたとしても必ず疲労によるものとは限らない。溶接割れやその他疲労以外の亀裂の場合も考えられる。供用後短期間で亀裂が確認された場合はその可能性が高く、亀裂位置と応力状態の関係、同一橋梁内の同じ継手形式箇所での亀裂の有無、進展性、さらに必要な場合は破面観察やコア抜き結果等を踏まえて判断するのが良い。

鋼道路橋の疲労亀裂は、鋼桁橋の主桁と横桁又は対傾構の取付部周辺で多く発生している⁸⁾。このため、ここでは主桁と横桁又は対傾構が取り付く垂直補剛材に発生する疲労亀裂を例に疲労のメカニズムを示す。図3-7-13に示すように、鋼桁橋は床版と主桁・横桁・対傾構・横構等で構成されており、床版は車両の鉛直荷重に対して3次元的なたわみ挙動を示すが、そのたわみ挙動は主桁や横桁等で構成される格子構造により拘束される。主桁上フランジと横桁・対傾構の上側の取り付け部間の狭い領域ではたわみ挙動が拘束されるため、垂直補剛材上端に局部的に高い応力が生じ、亀裂が発生する⁹⁾。図3-7-14にFEM解析により鋼I桁橋の横つなぎ材（横桁・対傾構・横構）の有無による変形の違いを示す。横つなぎ材無しのモデルでは床

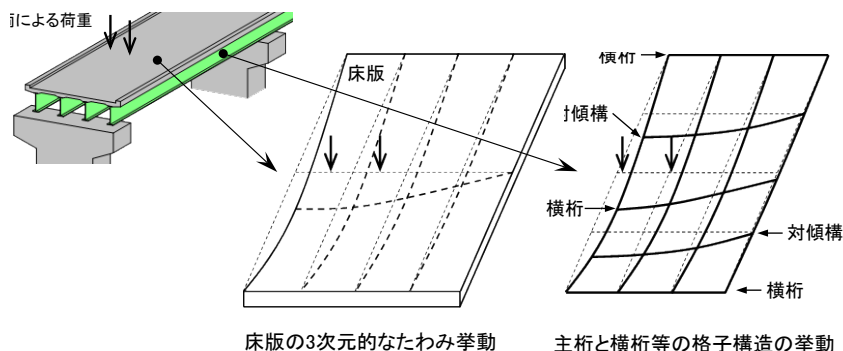


図 3-7-13 鋼桁橋の鉛直荷重に対する挙動

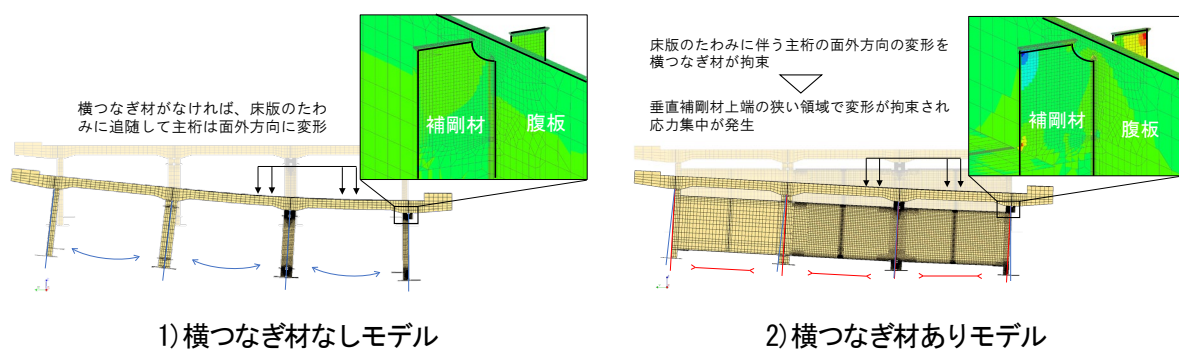


図 3-7-14 FEM 解析による試算結果

版の変形に追従して主桁は面外に変形している。一方、横つなぎ材ありのモデルはこの変形を拘束し垂直補剛材上端で応力集中が生じている。

垂直補剛材上端の疲労亀裂の進展メカニズムを図 3-7-15 に示し、診断セットを表 3-7-4 に示す。まず、段階 1) のように亀裂発生部に軽微な塗膜割れが生じる。ただし、塗膜割れが生じてもすべて疲労亀裂が発生しているわけではない。疲労亀裂の発生が疑われる塗膜割れを発見した場合、亀裂の有無や長さを把握するため、磁粉探傷試験 (MT) などの非破壊検査による詳細調査の実施が基本となる。なお、亀裂を MT により特定した後に塗装塗替えにより亀裂が隠されてしまう事例もあり、亀裂を有する橋の塗替え塗装の際には留意する必要がある。

亀裂が確認された場合、止端亀裂でかつ亀裂長さが極めて短い段階であれば、切削調査程度で亀裂を除去できる可能性がある。切削調査で除去できた場合でも、原因を完全に除去できていないリスクもあるため、記録に残しておく、次回の点検時に、亀裂の再発の有無を確認することが望ましい。

亀裂は進展すると、段階 3) のように側面へと亀裂が徐々に進展する。本部位に生じた亀裂は、進展が極めて遅い場合が大半であり¹⁰⁾、措置の緊急性が必ずしも高くない場合もある。そのため、このような段階においては、経過観察により次回の点検で進展状況を確認することが基本方針となる。次回の点検時に進展状況を確認し、著しく進展する可能性がある場合はこの段階であっても措置することが望ましい。

さらに亀裂が進展すると、段階 4) のように溶接線の破断に至る。そして、垂直補剛材上端のすみ肉溶接が切れると、応力集中が主桁の首溶接や垂直補剛材のまわし溶接部、スカラップ等に転じ、以降、段階

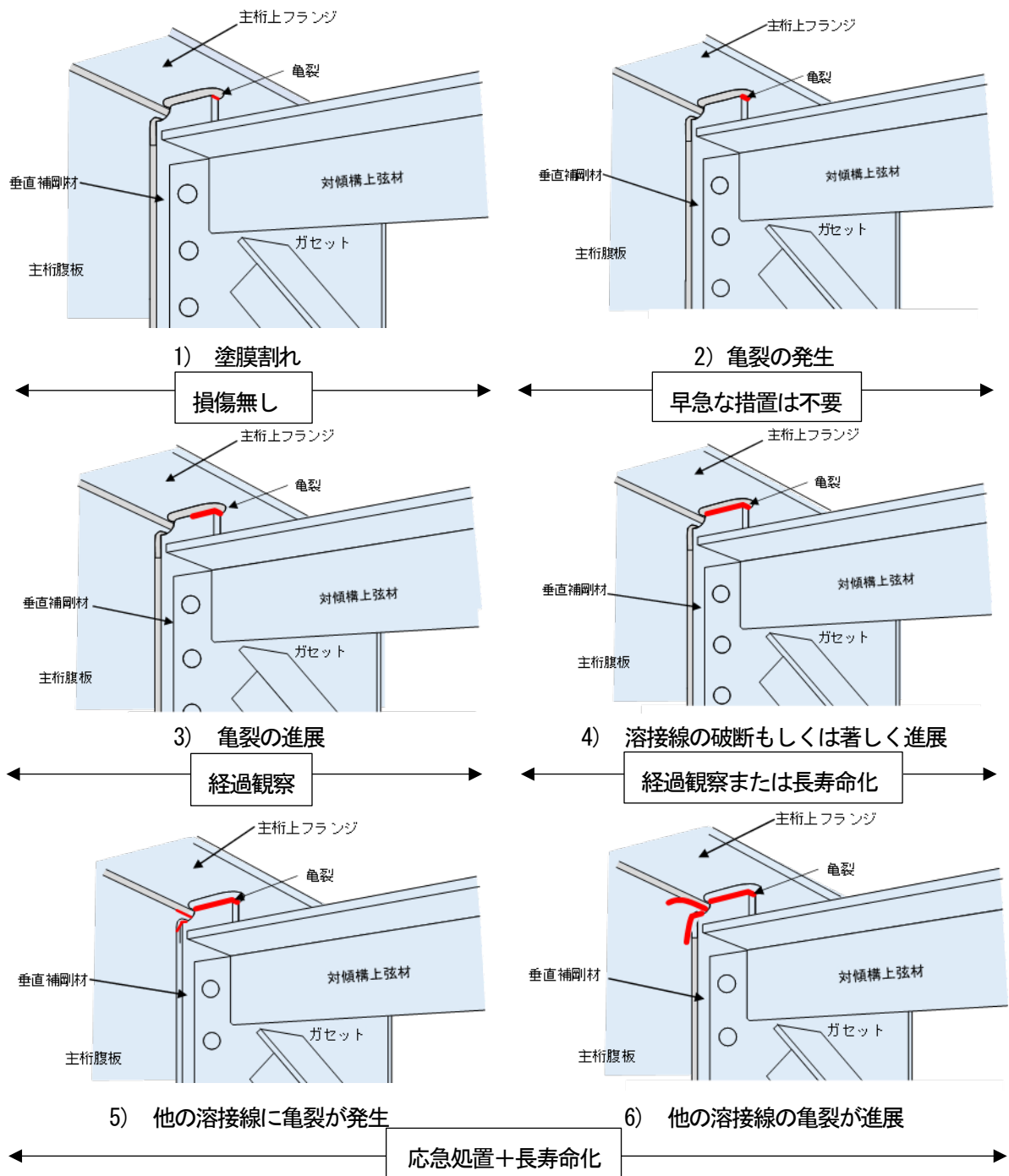


図 3-7-15 鋼桁（垂直補剛材）の疲労の代表的な損傷過程

5)、6) のように主桁ウェブの溶接部で亀裂が発生し進展する。溶接部の亀裂が荷重伝達機能を担う主桁ウェブに生じると耐荷力への影響が懸念されるため、それ以前の4) の段階で応力状態の改善を図る等の長寿命化措置を講じることが重要である。亀裂発生部の応力状態は、交通状況や、床版剛性、主桁間隔、横桁又は対傾構の取付位置などの構造条件によって異なる。そのため、次回点検まで放置すると溶接部が破断する限界の状態を明確にすることは困難であるが、これまでの点検結果等を踏まえて、溶接部の半分程度まで亀

裂が進展した状態を著しく進展した状態として段階4)の目安とした。

段階5)以降では応急措置として表面切削や亀裂先端にストップホールを施工した上で、段階4)と同様の措置を行うことが基本となる。先に述べたように、亀裂の発生要因は床版の3次元的なたわみ挙動を主桁や横桁などで構成される格子構造が拘束することにより生じる局所的な応力集中である。そのため、対策としては応力集中の発生要因である拘束を緩和させることが効果的であると考えられる。工法例は、横桁又は対傾構の取付け位置の変更などが挙げられる。また、構造的に固めて変形を抑えることで発生応力を低減する対策も考えられる。工法例は、当て板補強などが挙げられる。これらの工法は、交通状態や構造、また同一橋梁内の亀裂の発生状況なども加味しながら選定することが重要である。

表 3-7-4 鋼桁（垂直補剛材）の疲労の診断セット

<点検の着目点の凡例>

◇初回点検時など1回だけ確認が必要な内容

*垂直補剛材（ウェブギャップ板）と上フランジとの溶接線以外の亀裂に対するもの

メカニズム	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) ※留意事項は次頁参照	追加情報	措置の方針	工法例	
外観変状 有り	1.塗膜割れ	◇亀裂が生じやすい箇所 の塗膜割れ	・非破壊検査(MT)	・亀裂の指示模様が確認されない		損傷なし	—
	2.亀裂の発生	◇溶接の不具合	・非破壊検査(MT) ・切削調査	・亀裂の進展状態（止端仕上げ程度の浅い表面切削により亀裂が除去できる）（注2） ・溶接の不具合がある ・亀裂の起点がルートである		早急な措置は不要	・表面切削に合わせて止端仕上げ
	3.亀裂の進展		・非破壊検査(MT) ・切削調査	・亀裂の進展状態（表面切削により除去できない） ・亀裂の起点がルートである		早急な措置は不要	
	4.溶接線の破断もしくは著しく進展			亀裂の進展状態（溶接線が長さの半分程度まで破断している or 破断している）	き裂の状況から、進行は緩慢	経過観察	
					き裂の状況から、進行が急速に進展する可能性	長寿命化	・あて板補強（注1）
	5.他の溶接線に亀裂が発生	◇*亀裂が生じやすい箇所の塗膜割れ	・非破壊検査(MT) *表面切削	*亀裂の指示模様を確認 *亀裂の進展状態（止端仕上げ程度の浅い表面切削により亀裂が除去できる）（注2）		*応急処置 長寿命化	*表面切削 *あて板補強（注1） *あて板補強
6.他の溶接線の亀裂が進展		*非破壊検査(MT) *表面切削	*亀裂の指示模様を確認 *亀裂の進展状態（表面切削により除去できない）		*応急処置 長寿命化	*ストップホール ・あて板補強（注1） *あて板補強	

注1：同一橋梁内で多数発生している場合は、橋梁全体系のたわみ挙動に起因する大きな二次応力が要因となっている場合がある。部分的な対応では、応力集中の状況を改善できない場合は、橋梁全体構造での対応を検討する。

注2：亀裂が止端亀裂で、止端仕上げ程度の浅い表面切削により亀裂が除去でき、溶接ビードの形状から亀裂発生の原因が施工品質の影響が大きいと考えられる場合は、溶接部の仕上げ等を行い次回点検で進展性を確認する。

3.8 鋼トラス

3.8.1 一般

鋼トラスは、部材を三角形に組み合わせた構造を基本単位とし、部材同士の節点を自由に回転できるヒンジで結合し、部材には軸方向力のみが作用するトラス理論が成立するよう部材配置することを前提とした骨組み構造である。

トラス橋は主構をトラス構造とした上部構造の形式であり、床版、床組、主構（トラス構造）等によって構成される。トラス構造は上弦材、下弦材、斜材、垂直材、格点部などによって構成される。これらトラス構造を構成する部材の損傷は直ちに橋全体の崩落に繋がる危険性もあることから診断にあたっては注意が必要となる。また、路面の位置によって上路、下路、中路形式に分類されるが、下路形式の場合は斜材がコンクリート床板に埋め込まれている場合があり、過去には破断が生じた事例があるため特に注意が必要である。ここでは橋の主構がトラスで構成されているものを対象とし、以下に損傷の分類や損傷のメカニズム等を示す。

3.8.2 鋼トラスに生じる損傷

(1) 基本的な分類

鋼トラスの代表的な損傷は腐食、疲労である。ただし、鋼桁と同様 F11T の高力ボルトが適用されている場合、ボルトの遅れ破壊が生じることがあるため、**図3-8-1**に示すように、鋼トラスに生じる損傷として、腐食、疲労、ボルトの遅れ破壊の3つを挙げ、これらに該当しないものはその他として分類した。さらに、それぞれの損傷に対して、措置の観点から細かく分類した結果については、**(2)**以降に示す。なお、ボルトの遅れ破壊に関しては鋼桁と同様であるため、ここでは説明を省略する。

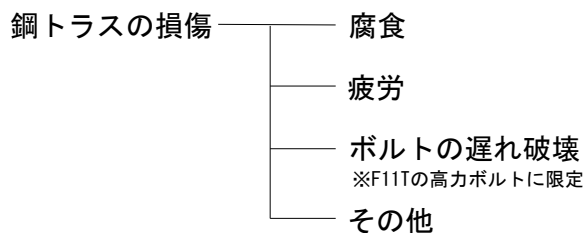


図3-8-1 鋼トラスに生じる損傷の基本的な分類

(2) 腐食

表3-8-1に腐食損傷の細分類を示す。また、**図3-8-2**に塗装（一般塗装系）で防食した鋼トラスの格点部、コンクリート埋め込み部、主構、床組みの腐食損傷の事例を示す。格点部では、雨水が斜材等を伝いガセットプレートの板継の箇所雨水や塵埃が溜まりやすく、なおかつ接合に高力ボルト継手が適用される場合が多く塗膜厚の不足する角部が腐食の弱点となりやすいため、主構一般部と比較すると腐食損傷が進行しやすい。斜材または垂直材がコンクリートに埋め込まれた構造では境界部から水が浸入滞留することによって腐食が進行しやすいことに加えて、コンクリート内部の鋼材の腐食状況が外観目視により確認できないため、

主構一般部とは区別して点検・診断を行う必要がある。以上より、トラス構造を構成する部材はそれぞれの腐食の進行程度等を踏まえて格点部、コンクリート埋め込み部、主構、床組みで分けて措置方針を検討することを基本としている。斜材や垂直材の引張部材に腐食減肉が生じると亀裂が発生し、一定程度、亀裂が進行すると急激に進展して破断に至る危険性に注意する必要がある。なお、箱抜き処理が行われている箇所についてはコンクリート埋め込み部として扱わず主構として分類する。

前述のとおりトラス橋は上路、下路、中路形式があり、トラスの骨組み形式は各種存在するとともに、構造ディテールも多様である。構造条件によって腐食が進行する部位は異なる場合があるため。過去の点検記録や詳細調査の結果等から橋梁の特徴を把握した上で診断することが望ましい。なお、鋼桁と同様に伸縮装置や排水装置からの漏水が生じた場合にその影響を受けやすい桁端部は一般的に腐食が進行しやすい傾向があり、主構や床組みは必要に応じて桁端部と一般部で区分して扱うことが望ましい。

表 3-8-1 鋼トラスの腐食損傷の細分類

損傷	構造・部位による分類
腐食	格点部
	コンクリート埋め込み部
	主構
	床組み



1) 格点部



2) コンクリート埋め込み部⁵⁾



3) 主構 (リベット構造)⁵⁾



4) 床組み

図 3-8-2 鋼トラスの腐食の事例 (一般塗装系)

(2) 疲労

表 3-8-2 に疲労の損傷の細分類を示す。基本的な疲労損傷に対する考え方は鋼桁と同様であり、鋼トラスについても疲労損傷に対する詳細な考え方が発生構造・部位毎で異なるため、構造・部位毎に細分類した。

特に疲労損傷の発生しやすい構造・部位として、表 3-8-2 に示すように横桁と縦桁の接合部、主構と横桁との接合部、斜材とガセットプレートの連結部を取り上げた。図 3-8-3 にはそれぞれの疲労損傷の事例を示す。横桁と縦桁の接合部及び主構と横桁の接合部の疲労亀裂は設計上の仮定と実挙動の乖離等を原因として応力集中が生じ、輪荷重の繰り返し作用によって亀裂が生じる部位である。斜材とガセットプレートの連結部の疲労亀裂は、斜材が細長くかつ強い風が吹く場合、振動が生じることで、亀裂が生じるものである。

表 3-8-2 鋼トラスの疲労損傷の細分類

損傷	構造・部位による分類
疲労	横桁と縦桁の接合部
	主構と横桁との接合部
	斜材とガセットプレートの連結部



1) 横桁と縦桁の接合部¹¹⁾



2) 主構と横桁との接合部



3) 斜材とガセットプレートの連結部¹²⁾

図 3-8-3 鋼トラスの疲労の事例

3.8.3 腐食のメカニズムと措置方針

構造・部位による分類の内、格点部の腐食損傷メカニズムや措置方針の考え方について以下に示す。

鋼トラス（格点部）の腐食の代表的な損傷過程を図 3-8-4 に、診断セットを表 3-8-3 に示す。鋼トラスの格点部はガセットプレートで覆われた構造であるため、斜材からの伝い水が滞留する他、土砂等の堆積により湿潤化しやすい。また、下路形式のトラスでは路面からの跳ね返り水が付着しやすく、上路形式のトラスでは排水管からの漏水の影響を受けやすいため、凍結防止剤が散布されている地域の場合は塩分の影響により腐食損傷が加速することが懸念される。

図 3-8-4 は斜材とガセットプレートの境界部やガセットと下弦材の溶接部付近から発せり範囲が広がり、最終的に著しい減肉や断面欠損に至る腐食損傷の過程を示したものである。ただし、格点部は複雑な形状の部材が様々な方向から集まっている他、ガセットプレートに接合する主構の構造詳細は様々であり、当該箇

所以外から損傷が進展した事例も報告されている。図 3-8-5 には格点部で腐食損傷が生じやすい部位を示す。ガセットと主構の境界部、ボルト、滞水が生じやすい下弦材の上面は腐食損傷が生じやすい部位であるため、点検にあたっては特に注意して確認を行う必要がある。

長寿命化を図るためには段階 4) に至る前に措置を講じることが重要である。段階 4) に至ると板厚減少量と部位の程度によっては当て板等の措置を行うかどうか検討する必要がある。そのため、明らかな腐食減肉が生じる前の段階 4) までに漏水原因の除去や、塗り替え塗装により防食機能を回復させる等、長寿命化のための予防保全措置を講じることが望ましい。なお、格点部は複雑な集成構造である他、床版と近接している場合も多いため、十分な素地調整が行えるよう施工にあたっては配慮することが必要である。格点部の様にブラストでは鋼材表面に含まれるさびや塩分が除去しにくい狭隘な部位ではレーザー光を用いた旧塗膜・さびの除去工法の適用性等を検討すると良い。レーザー光処理は鋼材表面に照射することで、古い塗膜やさび、付着した塩分を瞬間的に溶融・蒸散することで表面処理を行う工法で、狭隘部であってもレーザーが到達できる部位であれば施工が可能である。また、滞水や土砂の堆積が生じている場合には、設計時に設定された水抜き孔から排水ができていないか確認を行うとともに、できていない場合は水抜き孔の追加を行うことにより滞水原因を除去することに加え、定期的な清掃を行うことにより濡れ時間を短くすることが効果的である。以上の滞水対策と合わせて、段階 2) の局部的なさびが生じた段階でさびをグラインダ等で除去した上でタッチアップによる防せい塗装をすることで塗装間隔を延ばすことが可能となる場合があるため、点検時に合わせて実施することを検討するのが望ましい。

以上に格点部の腐食損傷のメカニズムや措置方針を示したが、その他部位についても同様に整理を行っており、その概略を以下に示す。

コンクリート埋め込み部は RC 床版等のコンクリート部材に主構が埋め込まれた部位であり、埋め込み部に雨水が浸入することでコンクリート内部鋼材の腐食が進行する。コンクリートに覆われていない外観目視できる部位の腐食や塗装の劣化程度と比較してコンクリート内部で腐食の進行が早く進み、著しい断面欠損が生じている場合もある。そのため、外観による状態把握のみでは健全性の評価を確実にに行えないため、はつり調査等の詳細調査を行い、コンクリート内部の鋼材の腐食状況を確認することが望ましい。埋め込み部周辺の腐食状況や錆汁の有無など腐食の徴候が見られない場合でも、外観目視のみの情報では不確実性を有することを踏まえて、詳細調査を実施しない場合には監視する等の注意が求められる。詳細調査としてはつり調査を行うにあたっては、床版上面または下面境界部での局部的な腐食や床版下面で錆汁が確認された場合等は床版内部で鋼材の著しい腐食が生じている可能性があるため、耐荷力に余裕がなくなっていることも踏まえた調査計画を立てることが求められる。また、はつり調査や補修・補強工事と合わせてコンクリート埋め込み部の再劣化を防止するため構造改善を行うことも重要である。構造改善を行う方法としては床版を箱抜き構造とすることで、埋込部特有の腐食を防止する方法が代表的な工法として挙げられる。箱抜き処理を行う場合は、確実に素地調整が実施できるよう箱抜き寸法を極力大きく取ることが望ましい。

主構は連結部や水平材上面等で滞水が生じやすい他、箱断面内部では開口部から水や飛来塩分が浸入し、

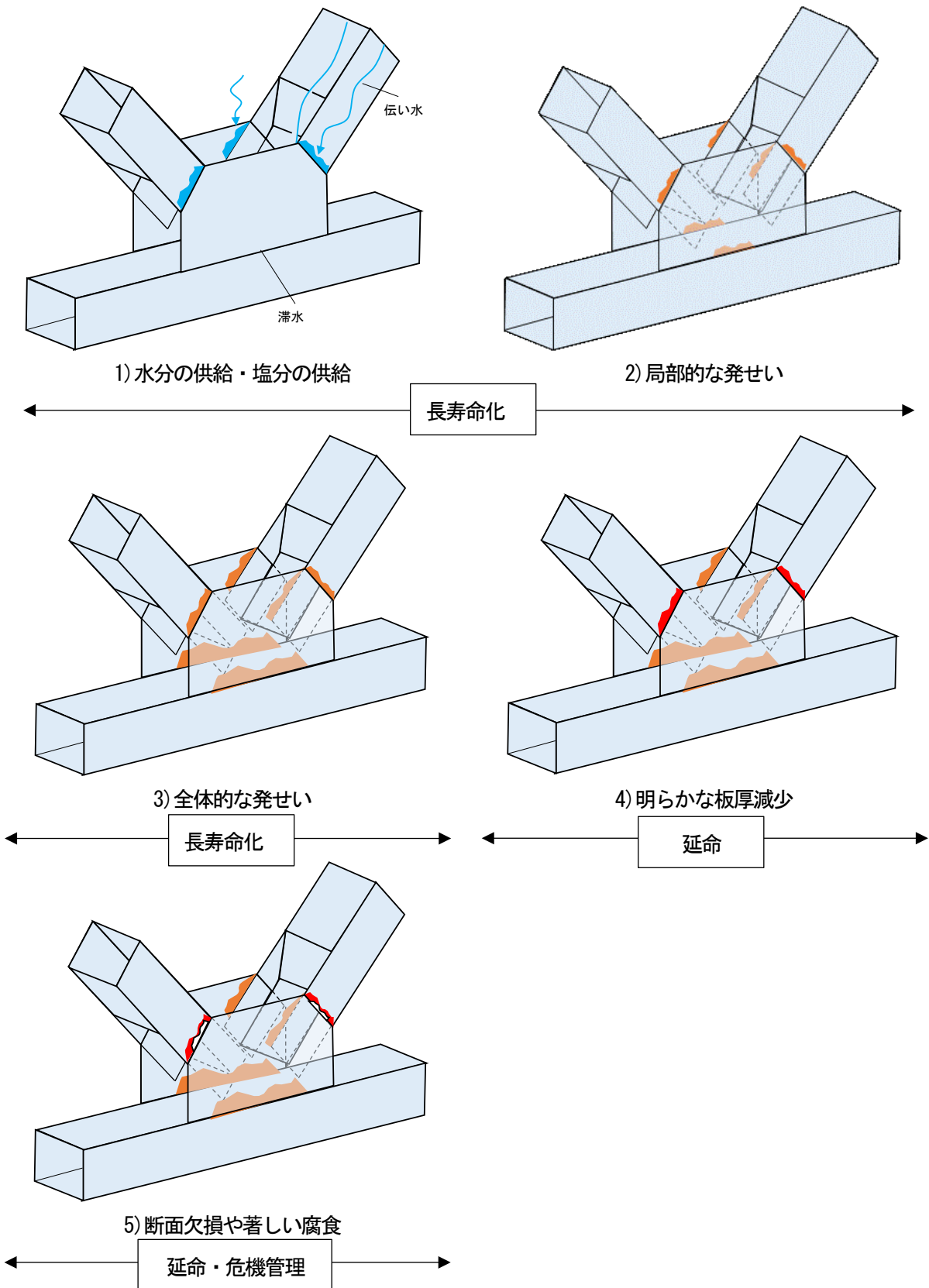


図 3-8-4 鋼トラスの腐食の代表的な損傷過程

内部で洗い流されず残り続けることで腐食を促進する可能性があることに注意する必要がある。また、鋼板と形鋼をリベット接合することにより主構の部材断面が構成されている場合には、箱断面内部に腐食因子が浸入しやすく、狭隘な構造内部で著しい腐食が進行することが懸念される他、維持管理が困難な部位であるため、部材の交換に合わせて塗り替え塗装を行い、防食性能を回復させる等の対策を検討することが望ましい。

床組は先述した通り基本的な考え方は鋼桁と同様であり、鋼桁の損傷メカニズムや措置方針の考え方を参考とできる。

表3-8-3 鋼トラスの診断セット

メカニズム	点検における着目点 (定期点検)	診断に必要な詳細調査	診断の決め手となる情報 (+評価区分)	追加情報 (進展性の推定、塩分の影響)	措置の方針	工法例	
1	水分の供給	<ul style="list-style-type: none"> 床版打ち継ぎ目からの漏水 土砂の堆積 	-	<ul style="list-style-type: none"> 漏水の発生 土砂の堆積 	長寿命化 (原因除去)	<ul style="list-style-type: none"> 橋面防水、排水管の補修・延長等 水洗、(格点部の) 清掃 	
	塩分の供給	<ul style="list-style-type: none"> 地形条件 橋梁形式や架設位置 凍結防止剤の散布 	付着塩分量調査 (明らかに塩分の影響がない場合は除く)	付着塩分量が 50mg/m ² 以上である	長寿命化 (原因除去)	同上 (漏水に伴う塩分供給の除去)	
2	局所的な発せい	発錆範囲	付着塩分量調査 (明らかに塩分の影響がない場合は除く)	局所的に防食塗膜が劣化し、点錆が発生している。	塩分の影響が見られない	長寿命化 (推奨)	局部補修 (目あらし+防錆塗装)
					塩分の影響が見られる	長寿命化	塩分除去+局部補修
3	全体的な発せい	発錆範囲	付着塩分量調査 (明らかに塩分の影響がない場合は除く)	防食塗膜の劣化範囲が広く、点錆が発生している。	損傷の進展が緩慢と推定される	長寿命化 (推奨)	部分塗替え (Rc-1塗装系)
					損傷の進展が急激な可能性 (塩分無し)	長寿命化	部分塗替え (Rc-1塗装系)
					塩分の影響が見られる	長寿命化	塩分除去 + 部分塗替え (Rc-1塗装系)
4	明らかな腐食減肉	腐食範囲・程度	付着塩分量調査	<ul style="list-style-type: none"> 目視で断面が減少している。 層状剥離さびが生じている。 	前回点検からの進行は緩慢	延命	個別判断により補修方法を検討
					前回点検からの急激な進展	延命	腐食原因を除去の上、個別判断により補修方法を検討
5	断面欠損や著しい腐食	断面欠損の有無	-	<ul style="list-style-type: none"> 断面欠損が生じている 著しい腐食が生じている 		延命	当て板
						危機管理	モニタリング、ベント、交通規制

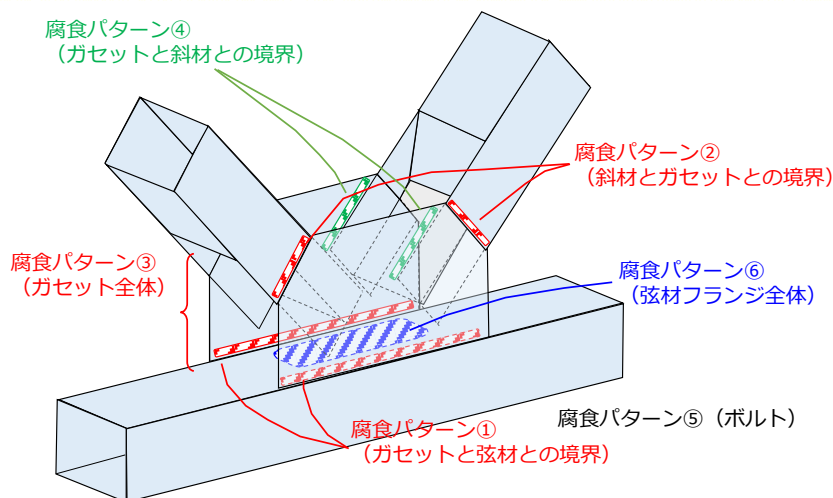


図3-8-5 格点部で腐食損傷が生じやすい部位

3.9 橋台・橋脚

3.9.1 一般

橋梁における下部構造は躯体及び基礎から構成され、躯体は橋台と橋脚に分けられる。橋台は橋梁の両端にあり、取り付け道路と橋梁を接続し、上部構造からの荷重の基礎への伝達及び背面盛土の土留めの役割を担う。一般的に橋台は胸壁、縦壁、翼壁の部材から構成される。橋台の形式としては重力式橋台、逆T式橋台、箱式橋台、ラーメン式橋台、盛りこぼし橋台、橋台部ジョイントレス構造などがあり、荷重条件や架橋地点の条件等により橋台形式が選定される。ここで示す損傷のメカニズムや損傷に対する措置方針は、一般的に用いられている逆T式橋台を対象としているが、その他の橋台形式についても損傷のメカニズムや損傷に対する措置方針は基本的に同様である。

橋脚は、上部構造を橋台間で支え、上部構造からの荷重を基礎に伝達する役割を担う。橋脚には基本的に鉄筋コンクリート部材もしくは鋼部材が用いられ、柱部（壁部）、梁部、隅角部（接合部）の部材から構成されている。コンクリート製橋脚の形式として、壁式橋脚、張出し式橋脚（T型橋脚）、ラーメン式橋脚、パイルベント橋脚が用いられることが多く、鋼製橋脚では主に単柱式やラーメン式橋脚などが用いられる。ここで示す損傷のメカニズムや損傷に対する措置方針は、一般的に用いられている鉄筋コンクリート製T型橋脚を対象としているが、その他の鉄筋コンクリート製の橋脚形式についても損傷のメカニズムや損傷に対する措置方針は同様である。なお、本報告書では鋼製橋脚は対象としていない。

3.9.2 橋台・橋脚に生じる損傷

(1) 基本的な分類

橋脚及び橋台に生じる損傷として、躯体の材料劣化に起因する損傷、地盤の変化に起因する損傷、その他の要因に起因する損傷（地震に起因する損傷、設計・施工が原因となって生じる損傷）に分類できる。地盤の変化に起因する損傷（洗掘や地すべり等）は 3.10 の代表的な損傷として扱い、本節の橋台・橋脚では材料劣化に起因する損傷に着目して、塩害、アルカリシリカ反応（以下、ASR）、凍害、その他の損傷に分類した（図 3-9-1）。塩害、ASR、及び凍害の各損傷に対して、措置の観点から細く分類した結果については、(2)以降に示す。

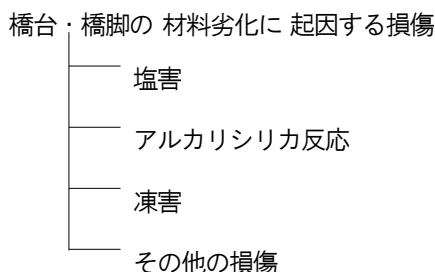


図 3-9-1 橋台・橋脚に生じる材料劣化に起因する損傷の基本的な分類

ここで、塩害、ASR、及び凍害の各損傷の細分類においては、損傷の種類と損傷が発生する構造・部位の組み合わせによって整理する。橋台及び橋脚における損傷（塩害、ASR、凍害）について、各損傷の部材ごとの発生割合を図3-9-2に示す。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判定以上となった点検部材数であり、1%以下の部材は凡例を省略している。各損傷において対象とする構造・部位は発生割合が上位のものから選定し、(2)以降に示す。

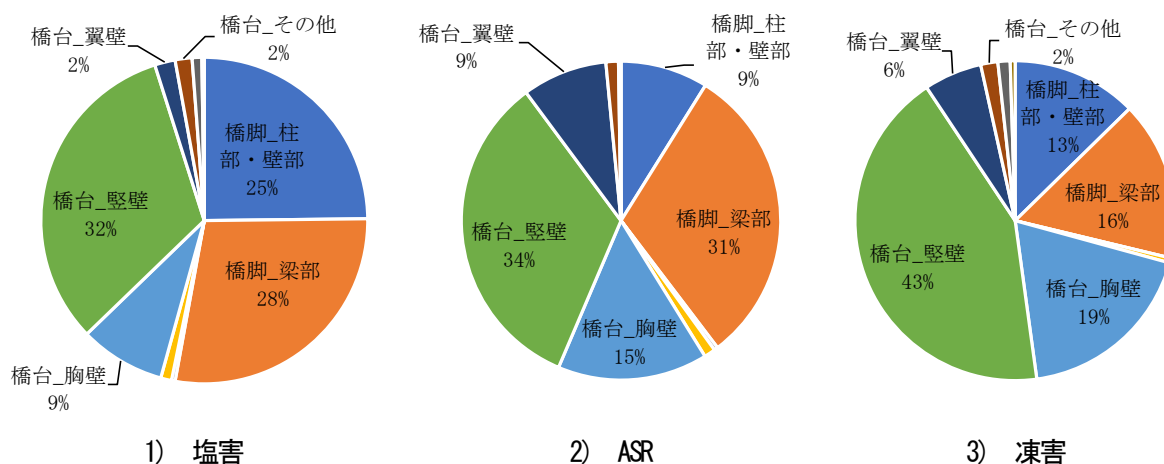


図3-9-2 橋台・橋脚に生じる損傷発生割合

(2) 塩害

塩害の概要は3.3.2(2)に示すとおりである。表3-9-1に塩害の損傷の塩分供給経路と構造・部位による細分類を示す。塩害は、塩分供給経路に応じて、外来塩による塩害と初期内在塩による塩害に分類することができる。さらに外来塩による塩害としては、飛来塩による塩害と、凍結防止剤による塩害に分類できる。塩害に対する措置としては、水や塩分等の塩害の原因をコンクリート内に浸透させないことや、コンクリート内に浸透した塩分をできるだけ除去することが共通した考え方となる。外来塩による塩害に対しては早期段階でコンクリートの表面被覆を行うことで塩分浸透の防止効果が期待できるが、初期内在塩による塩害に対しては表面被覆による塩害の抑制効果が期待できず、コンクリート内に浸透した塩分の除去が基本となる。

飛来塩による塩害の場合、一般的に海面に近い部材ほど飛来塩分量が多く、腐食環境が厳しい。特に飛沫帯では飛来塩分量が多くなり、海岸沿いの路線では直接海水がかかる場合もある。また、凍結防止剤による塩害の場合、橋面上に散布された凍結防止剤を含む融雪水や雨水が、伸縮装置や排水管等から漏水、または車両の走行により飛散するため、橋座部や梁部等上部の部材ほど塩分供給量が多い。これらの外来塩による塩害について、橋台・橋脚に生じる塩害の損傷発生割合（図3-9-2 1)）のうち上位を占める橋台堅壁、橋脚の梁部及び柱部を診断セットの対象とした。なお、橋台堅壁、橋脚の梁部、及び柱部以外の橋台胸壁等でも損傷メカニズムは同様であることから、本報告における塩害に対する措置方針の適用は可能である。

初期内在塩による塩害は、塩化物を含む混和剤（硬化促進成分）や除塩が不十分な海砂がコンクリート材料に用いられて塩化物イオンが新設当時から内在する場合に発生する。そのため、本報告書では代表部材と

して橋台堅壁と橋脚柱部を対象としたが、初期内在塩による塩害は特定の構造や部位に発生するものではない。

図3-9-3に橋台堅壁、橋脚梁部、及び橋脚柱部に生じた塩害による損傷事例を示す。

表3-9-1 橋台・橋脚の塩害損傷の細分類

損傷	塩分供給経路による分類		構造・部位による分類	
	塩害	外 来 塩 に よる塩害	飛来塩による塩害	橋台
橋脚				梁部 柱部
凍結防止剤による塩害			橋台	堅壁
		橋脚	梁部 柱部	
初期内在塩による塩害		橋台	堅壁	
		橋脚	柱部	



1) 飛来塩による塩害
(橋台堅壁前面)



2) 凍結防止剤による塩害
(橋脚梁部)



3) 初期内在塩による塩害
(橋脚柱部)

図3-9-3 橋台・橋脚の塩害による損傷事例

(3) アルカリシリカ反応 (ASR)

ASRの概要は3.3.2(3)に示すとおりである。ASRによるひび割れの特徴として、①コンクリート表面の網目状のひび割れ、②主鉄筋やPC鋼材の方向に沿ったひび割れ、③微細なひび割れ等における白色のゲル状物質の析出がある¹³⁾。ASRによるひび割れは、①～③で示すような他の劣化要因によるものとは異なる特徴があるので、まず外観調査から行うのが良い。外観変状が無い場合には診断が困難であり、外観変状が生じASRの疑いが高い場合にはその進展性を判断するとともに、鋼材の腐食が生じているかを確認し、適切な措置を講じることが重要である。

表3-9-2にASRの損傷の細分類を示す。ASRは部材ごとに損傷のメカニズムや損傷に対する措置方針が異なるため、橋台・橋脚に生じるASRの損傷発生割合(図3-9-22)のうち上位を占める橋台の堅壁・胸壁、橋脚の梁部・柱部と、特徴的な損傷の一つであるフーチングを対象とした。なお、橋台の堅壁背面や、フーチングは土中部材であり定期点検でASRの損傷を捉えられない可能性があるため、梁や柱部など気中部材の状態から土中部材でASRによる損傷が生じている可能性を検討し、診断・措置を講じることに対応策と

して考えられる。また、フーチングで確認されている損傷事例は、フーチングの一部が地表面に露出している場合に損傷を発見できている事例であるため、事例としては少数である。

図3-9-4に橋台堅壁、フーチング、及び橋脚梁部に発生したASRによる損傷事例を示す。

表3-9-2 橋台・橋脚のASR損傷の細分類

損傷	構造・部位による分類	
ASR	橋台	胸壁
		堅壁
		フーチング
	橋脚	梁部
		柱部



1) 橋台堅壁側面部



2) フーチング



3) 橋脚梁部

図3-9-4 橋台・橋脚のASRによる損傷事例

(4) 凍害

凍害の概要は3.3.2(4)に示すとおりである。表3-9-3に凍害の損傷の細分類を示す。橋台・橋脚に生じる凍害の損傷発生割合(図3.9.2.3)のうち上位を占める、橋台の堅壁と胸壁、橋脚の梁部と柱部を対象とした。

損傷の原因が凍害と判断された場合は、劣化の進行速度を把握するためにも、微細ひび割れ等の発生状況についての追加調査を検討するのがよい。また、コンクリート表面に微細ひび割れ、スケーリング、ポップアウトが発生した段階では表面被覆による遮水や伸縮装置・排水装置等の修繕も念頭に、対策の検討を行う必要がある。損傷が進行しコンクリートのうきや剥離、鋼材腐食の錆汁が見られる場合には、損傷の発生部位により対策の緊急性が異なると考えられる。例えば、支承アンカー位置まで十分距離に余裕がある場合には構造安全性の観点から緊急性は低いと考えられるが、支承アンカー位置から近い位置で凍害が進行している場合には措置の緊急性は高いと考えられる。

図3-9-5に橋台堅壁、橋台胸壁、及び橋脚梁部に生じた凍害による損傷事例を示す。

表 3-9-3 橋台・橋脚の凍害損傷の細分類

損傷	構造・部位による分類	
凍害	橋台	豎壁
		胸壁
	橋脚	梁部
		柱部



1) 橋台豎壁



2) 橋台胸壁



3) 橋脚梁部

図 3-9-5 橋台・橋脚の凍害による損傷事例

(5) その他の損傷

かぶり不足や締固め不良等の製作・施工不良によって、水等の劣化因子がコンクリート内に浸透し、鉄筋腐食やコンクリートの剥落などの変状が生じる場合がある。

3.9.3 ASR のメカニズムと措置方針

3.9.2 に示した損傷のうち、ここでは ASR による損傷のメカニズムや、損傷に対する措置方針の考え方について以下に示す。ASR は、コンクリート内部において骨材から融解したシリカとアルカリ金属との化学反応であり、この反応で生成したアルカリシリカゲルが吸水膨張し、コンクリート構造物にひび割れを生じさせる損傷である。ASR の原因となる水の主な供給経路を図 3-9-6 に示す。措置では、ASR の原因となる水の遮断を行うことが基本となる。

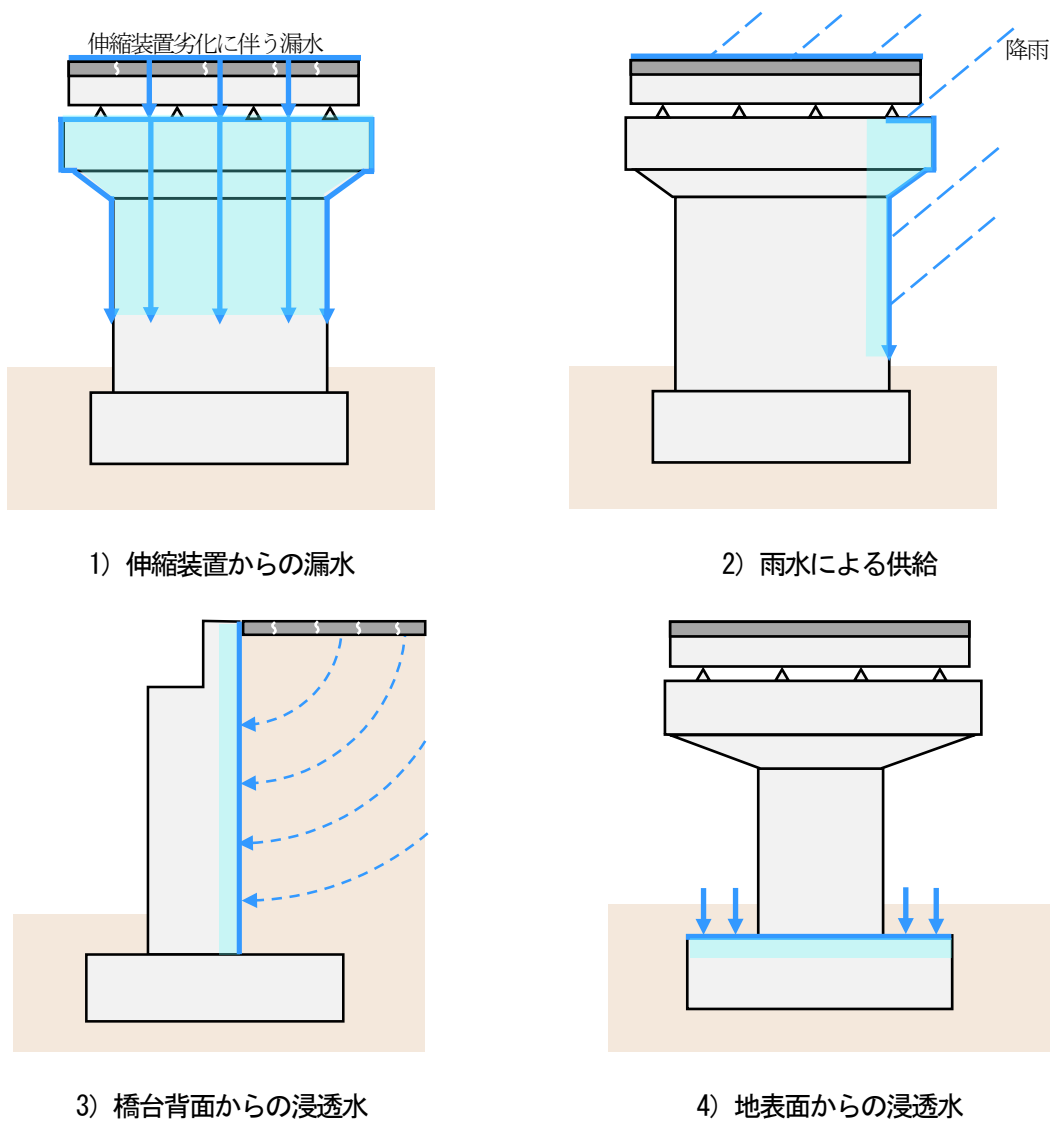


図 3-9-6 ASR の原因となる水の主な供給経路

ASR の代表的な劣化メカニズムを図 3-9-7 に示す。生成したゲルがコンクリート中の水分を吸収し膨張することで、微視的なひび割れが生じ表面ひび割れへと伸展する。ひび割れの進行によりコンクリート内部に水が浸入することで鉄筋の腐食が生じ、さらに、ゲルの吸水膨張の進行によりひび割れ幅やひび割れ密度が増加し、コンクリートの剝離や鉄筋腐食の進行による部材の断面減少が生じる。

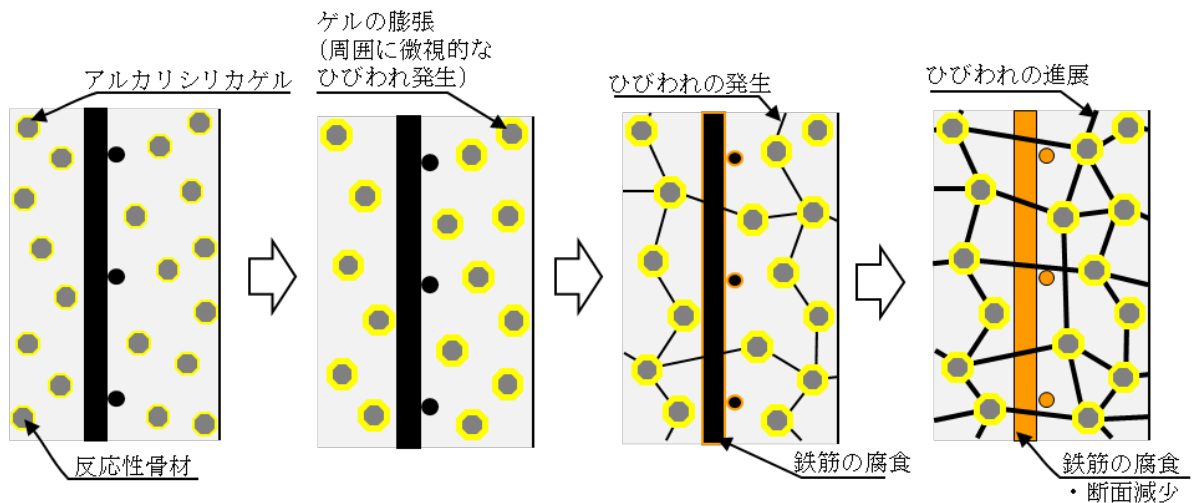


図3-9-7 ASRの代表的な劣化メカニズム

ASRによる劣化は、良質な川砂や川砂利が枯渇し、砕砂や砕石の使用が増えた1970年代以降に顕在化した。その後、対策として、1986年に、コンクリート中のアルカリ総量規制に関する通達が行われ、コンクリートのアルカリ骨材反応抑制がされている。従って、ASRによる損傷事例は、1970年代～1986年に建設された構造物に多い。また、反応性を示す可能性のある岩種は、火山岩（安山岩、流紋岩等）、堆積岩（チャート、砂岩、頁岩等）、変成岩の一部（石英片岩等）であり、深成岩や半深成岩に反応性を示すものはほとんどない。

ASRによる変状が構造物の耐荷性能に与える影響の評価は、対象構造物の外観調査の結果によることが基本となる。調査方法や結果の記録方法については、「橋梁定期点検要領、平成31年3月¹⁴⁾」によるものとし、ASRによる劣化が生じた構造物では特に以下の項目に着目するのが良い¹³⁾。

- ① ひび割れの状態（位置：鋼材との位置関係を含む、方向、性状、幅、長さ、段差の有無と量、漏水、錆汁、性状）
- ② 析出物の有無、状態（ひび割れを閉塞しているか等）
- ③ うきや剥離の有無、状態（位置、錆汁の有無、有効断面や鉄筋付着への影響）
- ④ PC構造物にあつては定着部近傍の異常（うき、鋼材の突出、著しい錆汁等）
- ⑤ 鋼材の著しい腐食が懸念される、顕著な錆汁の滲出
- ⑥ 水分供給の状態

ここでは、ASRの構造・部位による分類のうち、橋台堅壁の損傷過程や措置方針の考え方について以下に示す。

ASRの構造・部位による分類のうち、橋台堅壁の損傷過程と措置方針を図3-9-8に、診断セットを表3-9-4に示す。前述のとおり、1986年のアルカリ総量規制に関する通達が行われる以前の構造物では、ASRの劣化要因となる反応性骨材が含まれるコンクリートが使われている場合がある（段階1）。反応性骨材とセメ

ントのアルカリ成分の反応によりアルカリシリカゲルが生成され、骨材周辺に白色析出物が発生する（段階 2）。橋台堅壁では伸縮装置や排水装置の不具合による漏水が原因で水分が供給されることが考えられ、特に橋座面は排水勾配が緩い場合やゴミ等が堆積している場合に水が溜まりやすい状況にあると考えられる。また、橋台堅壁背面では背面からの水分の供給により土中内で損傷が進行している事例も確認されている¹⁵⁾。これらの水分供給により橋座部や堅壁側面部等でゲルの吸水膨張や微視的なひび割れが発生する（段階 3）。段階 1 から段階 3 では目視点検で確認できるような外観変状が生じないことが一般的であるため、診断が困難である。しかしながら、橋座部の滞水や堅壁側面に漏水跡が確認される場合には伸縮装置や排水装置からの漏水が生じていることが懸念されるため、必要に応じて付属物の修繕やコンクリートの表面被覆等の措置を講じることが望ましい。

降雨等により水分が供給される箇所では、ゲルの吸水膨張が進行することで、コンクリート表面に網目状のひび割れが発生する（段階 4）ため、この段階から外観変状が確認できる。段階 4 において ASR の進行性があると判断した場合、遮水などの延命措置もしくは追跡調査が主となるが、かぶりコンクリートの剝落等、第三者に被害が及ぶ可能性がある場合は表面被覆工等を行う必要がある。損傷の原因が ASR と判断された場合は、外観変状の有無に関わらず進行性の有無を把握することが重要であるため、コンタクトゲージなどによりひびわれ等の進展状況について追跡調査を実施する。前回点検時から ASR が進行していないことが確認できた場合には、劣化部の除去やひび割れ注入などの対策を講じるのがよい。なお、コンタクトゲージによる経過観察では、ASR によるひび割れの進展状況に着目するために温度変化によるひび割れ幅の変動に留意する必要がある。測定箇所は日射の影響を受けない箇所とし、外気温の変化を測定しておくのが良い。

ゲルの吸水膨張の進行によりひび割れ幅やひび割れ密度が増加してコンクリート内部に水分が浸入し、鉄筋の腐食が開始する（段階 5）。この段階の点検における着目点は、コンクリートのひび割れ、白色析出物の滲出、鋼材腐食による錆汁の有無が挙げられ、これらは診断の決め手となる。鉄筋が腐食することで耐荷性能の低下が生じている懸念があり、伸縮装置・排水装置等の修繕により水分の供給を遮断することや損傷部の部分打ち換え等による延命措置、もしくは耐荷性能が低下しているものと判断した場合は補強を行うなど危機管理の措置を講じるのが良い。

さらに損傷が進行すると、ひび割れの増大、かぶりコンクリートの剝離、腐食に伴う鉄筋の断面減少が生じる（段階 6）。この段階で損傷の進行を止めることが困難な場合には、補強する選択肢もあるものの、解体・撤去の計画を立て、それまでの間延命させる措置とならざるを得ない場合がある。

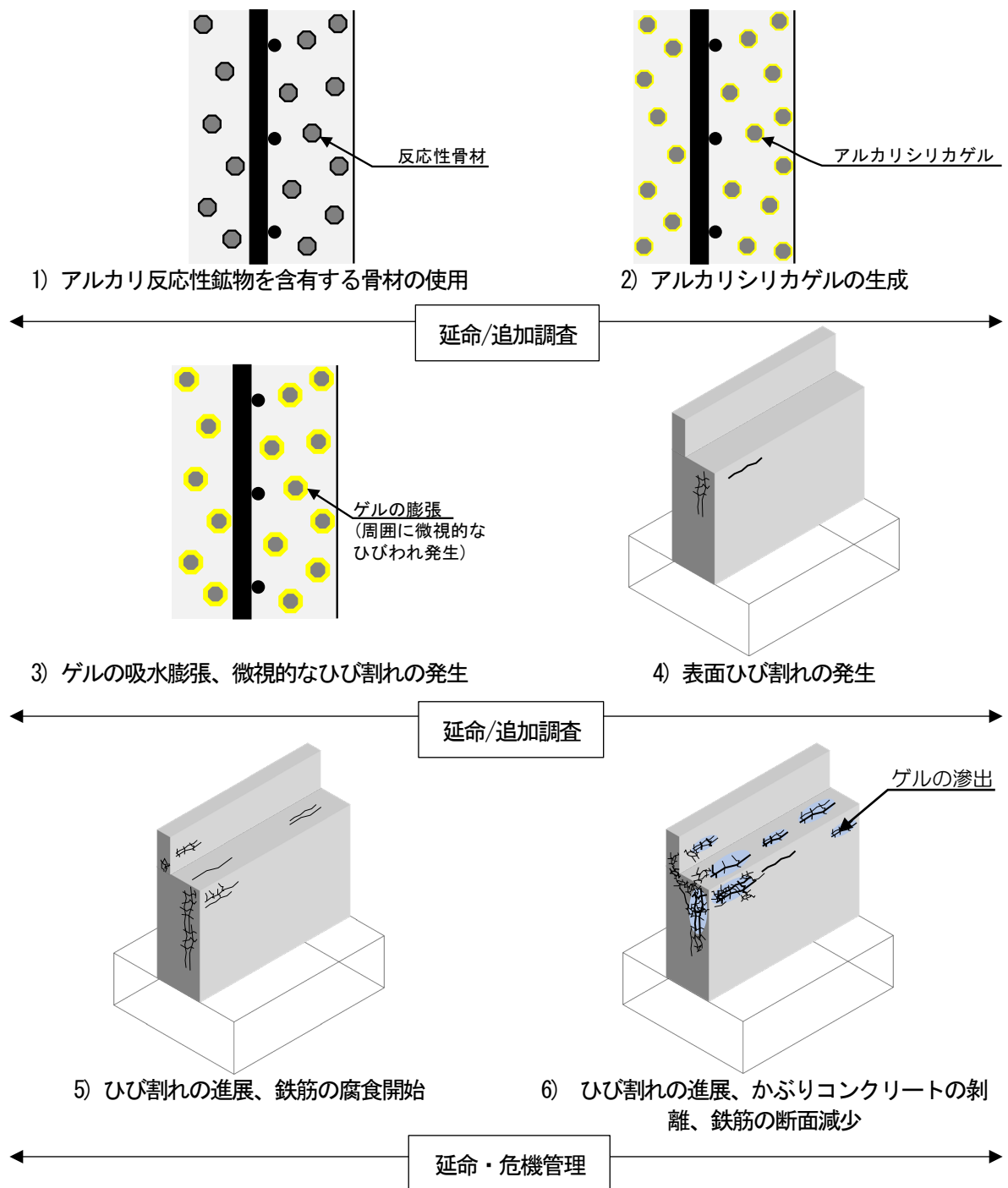


図 3-9-8 橋台縦壁の ASR の代表的な損傷過程と措置方針

表 3-9-4 橋台堅壁の ASR の診断セット

メカニズム	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. アルカリ反応性鉱物を含む骨材の使用	—	—	延命(遮水)	伸縮・排水装置等の修繕, 表面被覆 ^{注1} , 含浸	
	2. アルカリシリカゲルの生成	—	—			
	3. ゲルの吸水膨張, 微視的なひびわれ発生	・伸縮装置, 排水装置等からの漏水 ・滞水, 漏水跡	橋座等に滞水が発生している			
外観変状有り	4. 表面ひびわれの発生	・コンクリートのひびわれ	—	・ゲルの吸水膨張によって生じたと思われるひびわれが発生	<進行性あり> 延命(遮水) ^{注2}	伸縮・排水装置等の修繕, コンタクトゲージによる経過観察 ^{注3}
				<進行性なし> 延命(遮水, 劣化部除去)	伸縮・排水装置等の修繕, 部分打替え・ひびわれ注入	
	5. ひびわれの進展, 鉄筋の腐食開始	・コンクリートのひびわれ ・白色析出物の滲出 ・鋼材腐食による錆汁	—	・白色析出物が滲出 ・錆汁が発生	延命または危機管理	伸縮・排水装置等の修繕, 部分打替え・ひび割れ注入, 補強
	6. ひびわれの進展, 剥離, 鉄筋の断面減少	・コンクリートの剥離 ・白色析出物の滲出 ・鉄筋の断面減少	・はつり調査 ^{注4}	・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 ・鉄筋の断面減少	延命または危機管理(補強, 更新)	補強, 解体・撤去

注1) 橋台背面の裏込め排水工等が実施されておらず, 堅壁背面におけるASR劣化の進行が予想される場合には, 前面のみを遮水すると背面の劣化の進行が早まるため, 措置の判断には十分に注意が必要である。
 注2) 基本的には直ちに躯体に対する措置は行わず, 追跡調査が主な措置方針となるが, かぶりコンクリートの剥落等, 第三者に被害が及びぶ可能性がある場合は表面被覆工等を行う必要がある。
 ASRと判定された場合は外観変状の有無に関わらず進行性の有無を把握することが重要なため, ひびわれ等の進展状況について追跡調査を行う。調査時期は, 水分供給の多い雨期を終えた10~11月頃が望ましい。
 注3) コンタクトゲージによる経過観察では, 温度変化による変動に留意する必要がある。
 注4) 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。

以上は, 橋台及び橋脚の損傷のうち ASR による損傷メカニズムや措置方針の詳細について橋台堅壁を例として示したが, 表 3-9-2 に ASR の損傷の細分類を示しており, その他の部材についても同様の整理を行っている。その概略を以下に示す。

橋台堅壁以外の気中部材である橋台胸壁, 橋脚梁部, 橋脚柱部における水分の主な供給経路として, 伸縮装置や排水装置からの漏水や雨水が直接かかることが考えられ, ASR の損傷メカニズム及び措置方針は前述した橋台堅壁のものと同様である。橋台フーチングや橋台堅壁背面といった土中部材については, 目視による状態の確認ができないため, 他の部位の変状などの情報から推定し, ASR が疑われる場合には, 土中部材の点検や補修等について橋の重要度, 交通への影響, 施工条件, 交差条件等を踏まえて決定する必要がある。土中部材であるフーチングの水分の供給経路は, 地表面からの浸透水や地下水が考えられ, ASR による損傷メカニズムは前述と同様である。なお, 過去にはフーチングで ASR による損傷が生じた事例¹⁶⁾が確認されており, 中には鉄筋破断を伴う損傷が生じて耐荷性能の大きな低下が疑われるものもある。しかし, ASR による損傷を受けたフーチングの耐荷性能の評価, 点検・診断や補修・補強方法に関する知見は多くなく, 今後のさらなる研究が期待される。

また、橋台背面においては背面盛土への雨水の浸透や、地下水位の上昇により橋台背面に水分が供給されると考えられる。過去に橋台背面の土砂を撤去して橋台背面における ASR による損傷を確認した事例では、鉄筋の伸びや破断は確認されなかったものの表面のひび割れが多く確認された¹⁵⁾。橋台背面で ASR による損傷が確認された場合、橋台背面からの水分の浸透制御は大規模な掘削や通行規制が伴い、対策が困難な場合があるととも、完全に水を止めることはできない場合もある。そのような場合には、橋台前面からの施工が可能な亜硝酸リチウム工法¹⁷⁾等により ASR の反応抑制を目的とした措置を講じることなどが考えられる。

3.10 基礎

3.10.1 一般

基礎は橋台・橋脚の躯体からの荷重を地盤へ伝える役割を担う部材である。主な基礎形式としては直接基礎、杭基礎、ケーソン基礎、鋼管矢板基礎、地中連壁基礎、深礎基礎があり、荷重条件や架橋地点の地盤条件等を踏まえて基礎形式と工法が選定される。基礎形式ごと損傷ごとに整理するものの、ここでは損傷の種類に応じて、一般的に用いられている基礎形式を対象とした。例えば、地すべりによる損傷であれば一般的には、地すべり地（傾斜地）に位置する直接基礎の橋台、杭基礎（深礎基礎）の橋台が想定されるため、地すべりでは、橋台の直接基礎と杭基礎を対象とした。

3.10.2 基礎に生じる損傷

(1) 基本的な分類

基礎に生じる損傷は、地盤の変化に起因する損傷として洗掘、地すべり、側方流動に分類できる（図3-10-1）。ここで、地盤の変化に起因する損傷とは、地震や豪雨等による一過性の外力により生じる損傷ではなく、一般的な降雨等の繰り返し作用による地盤の変化により生じる損傷のことをいう。それぞれの損傷に対して、措置の観点から細かく分類した結果については、(2)以降に示す。

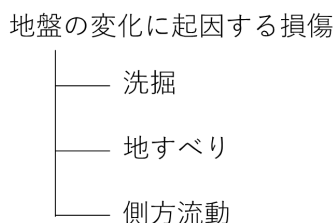


図3-10-1 基礎に生じる地盤の変化に起因する損傷の基本的な分類

(2) 洗掘

橋の機能に影響を及ぼす河床変化には、橋脚周りで生じる洗掘と河川のある程度広い範囲で生じる河床低下がある。河床変化によって、沈下や傾斜、転倒などの変状が下部構造に生じる場合がある。下部構造に変状が生じた場合、上部構造にも変形等の影響が生じるため、車両が通行できなくなる場合や、最悪の場合には落橋に至る可能性がある。橋の機能に影響を及ぼさないように橋梁定期点検等で留意すべき点としては、主に洗掘の原因となる橋梁の構造条件と、主に河床低下の原因となる河川全体の経年変化の2つが挙げられる。橋の機能に影響を及ぼしやすい橋梁の構造条件の例として、河積阻害率が大きい橋梁、パイルベント橋梁などが挙げられる。1976年7月に制定された「河川管理施設等構造令」（以下、「河川構造令」という。）では、「河川区域内に設ける橋台及び橋脚の構造の原則として、（中略）洗掘の防止について適切に配慮された構造とするもの」とされている。主に橋脚の配置や橋脚基礎の根入れ等に関して規定されている。河川全体の経年変化には、砂州の移動や高水敷の侵食などの自然の作用によるものと、河川工事（ダム、護岸や護床ブロックなどの設置・撤去）や砂利の採取などによる人為的な作用によるものとその両者の組み合わせによるものがある。

洗掘に関連する具体的な内容については「国土技術政策総合研究所資料 No.829 道路構造物管理実務者研修（橋梁初級Ⅰ）道路橋の定期点検に関するテキスト¹⁸⁾」や「国土技術研究センター、河川を横過する橋梁に関する計画の手引き（案）¹⁹⁾」でまとめられている。例えば洪水の流下断面を阻害しない位置に橋台を設置すること、河積阻害率は原則 5%以内を目安とすること、橋脚の基礎部は所定の深さ以上に設けること等について記載されている。河川構造令制定以前に建設された橋梁や既往の知見に記載されている配慮が十分なされていない橋梁は現時点で洗掘が生じていない場合でも、今後洗掘が起りうるリスクを内在していると考えられる。また、橋の機能に影響が生じはじめてから、橋の機能として致命的な状況となるまでの余裕が少ない橋梁であると考えられる。

河川全体の経年変化の例として、自然や人為的な作用により橋梁建設時に想定した低水路や高水敷が移動する場合がある。その場合、必要となるフーチングの根入れや橋脚と堤防との離隔が確保できない可能性があるため、架橋位置周辺における河川線形や濡筋の変化などについて、過去の資料等を参照しつつ、現地を確認する必要がある。また、河川上下流側において、対象橋梁の架橋年次以降に河川改修工事等が実施されていた際には、河川上流側からの土砂供給量が減少したり、下流側から河床変動が進展する可能性がある。その場合、全体的な河床低下を引き起こす可能性があるため、橋梁定期点検では、河川下流の河川改修工事の有無や、河川上流からの土砂供給量などにも留意する必要がある。

前述の既往の知見では、河床変化が生じやすい河川の特徴として、急流河川、扇状地、湾曲部、水衝部、狭隘部、河川の合流部などが挙げられている。

表 3-10-1 に洗掘による損傷の細分類を示す。ここでは、河川内に構築される基礎形式において過去の洗掘被害から橋脚と橋台を直接基礎、杭基礎、ケーソン基礎（柱状体基礎）で分類し、各基礎形式に応じて損傷のメカニズム及び措置方針を示している。例えば、直接基礎の場合では、洗掘がフーチング底面まで到達すると支持地盤が喪失し始め、支持能力が著しく低下すると考えられるが、杭基礎ではフーチング以深の杭の周面摩擦力や先端支持力で支持能力を確保しており、基礎の安定性を確保している場合は直ちに落橋等に至ることは考えにくいことから、基礎形式によって損傷メカニズムや措置、工法の考え方が異なる。橋脚の直接基礎、津波により洗掘された杭基礎、橋脚のケーソン基礎の被害例を図 3-10-2 に示す。

表 3-10-1 基礎の洗掘による損傷の細分類

損傷	基礎形式による分類	構造による分類
洗掘	直接基礎	橋台
		橋脚
	杭基礎	橋台
		橋脚
	ケーソン基礎	橋脚



1) 直接基礎の洗掘



2) 杭基礎の洗掘



3) ケーソン基礎の洗掘

図 3-10-2 橋台・橋脚の洗掘の事例

(3) 地すべり

地すべりは、地下深部のある面(地すべり面)を境界として、その上部の土塊・岩塊が徐々に下方に移動する現象であり、一般には移動速度が遅い。斜面崩壊と比較して緩勾配の斜面が大規模に移動し、「地すべり地形」を形成する。また、特定の地質や地質構造を有する地域に集中する傾向が強く、「流れ盤の地形、地質構造」「断層地形」等で発生しやすい。

表 3-10-2 に基礎の地すべりによる損傷の細分類を示す。地すべり地形に構築される橋台の基礎形式として直接基礎と杭基礎(斜面であることから深礎杭を想定)に分類した。また、発生する地すべり面と橋台支持面との関係より、橋台の挙動として橋台のパラペットが上部構造に近づく挙動と上部構造から離れる挙動が考えられる。さらに、地すべり面が比較的浅い面又は比較的深い面に分類される。これらの分類についてイメージ図を図 3-10-3 に示す。

図 3-10-4 に地すべりによって損傷した下部構造の事例を示す。平成 20 年の岩手・宮城内陸地震で被災した祭時大橋では、周辺が地すべり地帯であり、流れ盤構造を有すること、ボーリングコアからすべり面に軟質化した弱層が存在することが判明している²⁰⁾。

地すべりによる変状に対する措置方針を決定するためには、地すべりの状況(進行性や方向性)を把握する必要がある。なお、地すべり現象自体に対する診断を別途実施することが最優先であり、地すべりへの対策は斜面の管理者との協議を行い検討することが重要である。

表 3-10-2 基礎の地すべりによる損傷の細分類

損傷	基礎形式による分類	橋台の挙動による分類	地すべり面の位置による分類
地すべり	直接基礎	橋台のパラペットが上部	比較的浅い
		構造側に近づく挙動	比較的深い
	杭基礎（深礎杭）	橋台のパラペットが上部	比較的深い
		構造側に近づく挙動	比較的深い

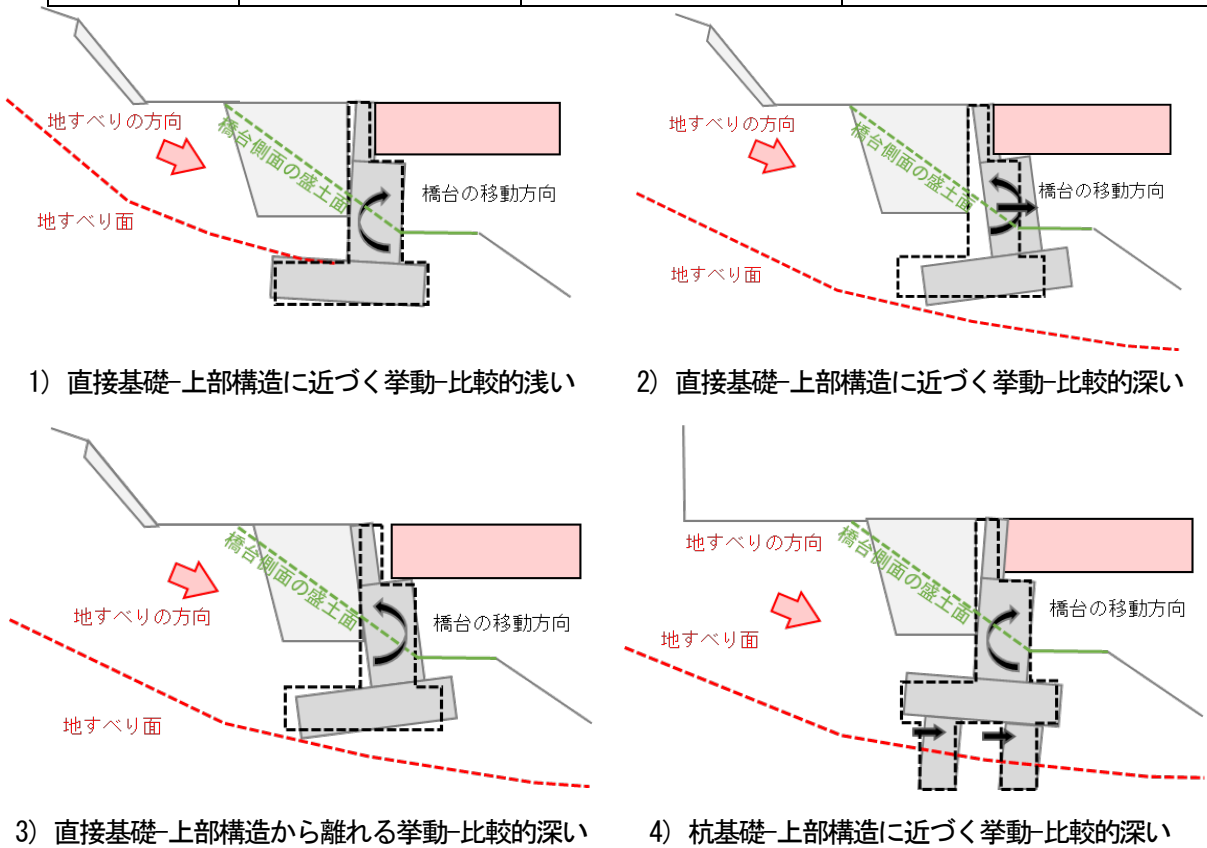


図 3-10-3 基礎の地すべりによる損傷の分類イメージ

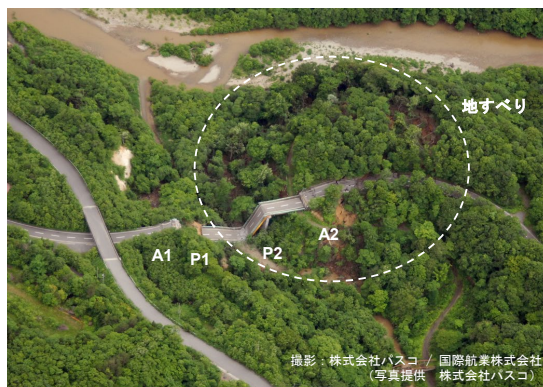


図 3-10-4 地すべりによる落橋事例

(4) 側方流動

側方流動は、軟弱粘性土（ N 値 <5 ）の土層を表層とする場合に、橋台背面の土工部の経年的な沈下に伴い、設計時に想定していない土圧によって主として橋台が前面側へ倒れる挙動が生じる現象である。側方流動は橋台の基礎が杭基礎やケーソン基礎で構築されている場合に生じているが、側方流動による橋台の変状は杭基礎とケーソン基礎で同様と考えられるため、対象とする構造は橋台杭基礎とした。なお、橋台の転倒方向として、背面側へ倒れ込む挙動が生じる場合も考えられるが、本検討では多くの場合で該当すると考えられる前面側へ倒れる挙動を対象とする。側方流動の概念図を図 3-10-5 に示す。

側方流動による変状としては、伸縮装置や支承、桁遊間に偏りが生じ、その後も変状が進展し、支承の破断や伸縮装置の破損、上部構造への衝突によるパラペットの破損、橋台堅壁前面のひび割れ等が生じる。側方流動は地盤内における現象であり、地盤そのものの変状を捉えることは困難と考えられるが、橋台背面に軟弱粘性土があり、上記の外観から捉えられる変状が生じている場合には側方流動の可能性が想定される。そのため、早期の段階では動態観測や定点観測により進行性や速度を把握することが重要である。

側方流動に対する措置は、橋台背面土工部の軟弱土層を対象とした地盤改良や、背面土工部の軽量化によって側方流動の要因を取り除くことにより²⁾、早期に対策を講じることで橋梁の長寿命化が期待できると考えられる。

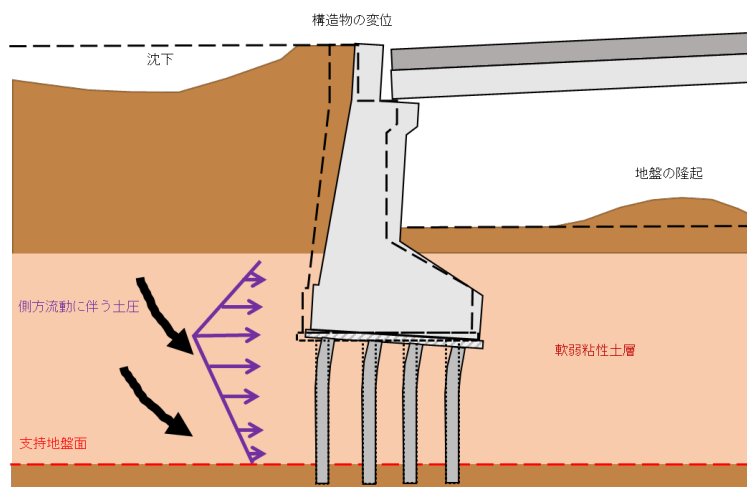


図 3-10-5 側方流動の概念図

3.10.3 洗掘のメカニズムと措置方針

3.10.2 に示した損傷のうち、洗掘による基礎の損傷メカニズムや措置方針の考え方について以下に示す。

(1) 診断セットで対象とする洗掘シナリオ

河床変化に対する橋梁の予防保全に資する洗掘や河床低下のメカニズムの検討や、メカニズムに応じた対策工法の開発は現在研究されている²⁾。

対象とする洗掘シナリオは、河川内に橋脚を有し5年に1回の頻度で実施される定期点検で状態の把握・措置が可能なものであることを前提としている。豪雨等による計画高水流量を超える流量により生じる洗掘や、落差工などの河川構造物が損失したことによって生じる河床低下など、急速に状態が変化するものに関しては緊急点検を実施し必要に応じて対策を講じる。

(2) 一般的な洗掘の損傷過程

直接基礎の橋脚について洗掘の代表的な進展過程を図3-10-6に示す。河床変化により橋脚のフーチングの土被りが徐々に減少し、一部で土被りがなくなりフーチングが露出する。さらに河床変化による土被りの減少が進展するとフーチングの上面、側面、下面の順で露出し、支持地盤が洗掘されることによって橋脚の沈下・移動・傾斜等の損傷が生じ、橋梁として致命的な状態に至る場合がある。

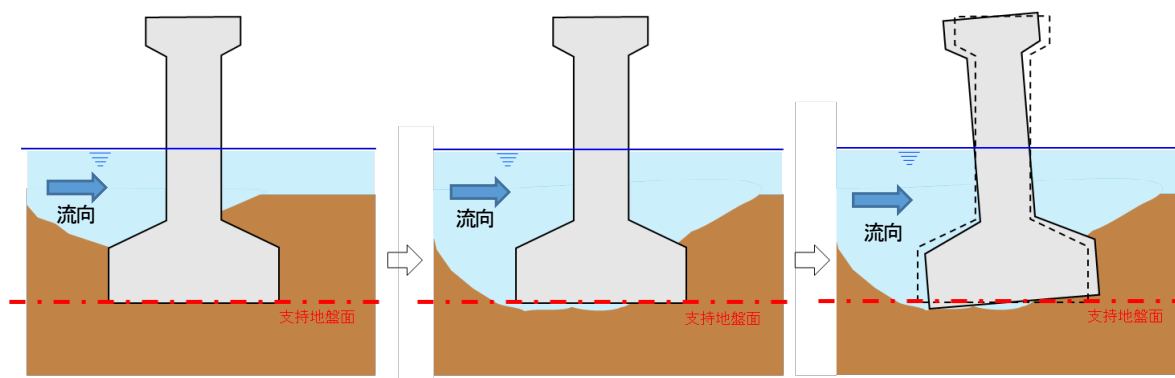


図3-10-6 洗掘の代表的な進展メカニズム

前述の通り、橋の機能に影響を及ぼさないように橋梁定期点検等で留意すべき点としては、橋梁の構造条件と河川全体の経年変化の2つが挙げられる。河川では橋梁の有無に限らず、図3-10-7に示すように河川の湾曲部や狭隘地等では局所的な水位上昇や部分的に流速が大きくなる箇所が存在している。橋梁周囲での局所的な洗掘ではなく、河川のある程度広い範囲で生じる河床低下の場合、橋梁周辺の限定的なエリアを対象とした根固め工等の対策では、洗掘の要因を除外するには至らない。そのため、橋梁洗掘の予兆となりうる河床高の変化等の河川の管理情報を道路橋の維持管理に活用すること、橋梁の上下流も含めた広範囲の河床低下低減を目的とした床止めや、河川工学の見も踏まえた河床低下対策を目的とした低水路の橋脚に対する瀬替えなど、河川管理者と連携した対応が望まれる。

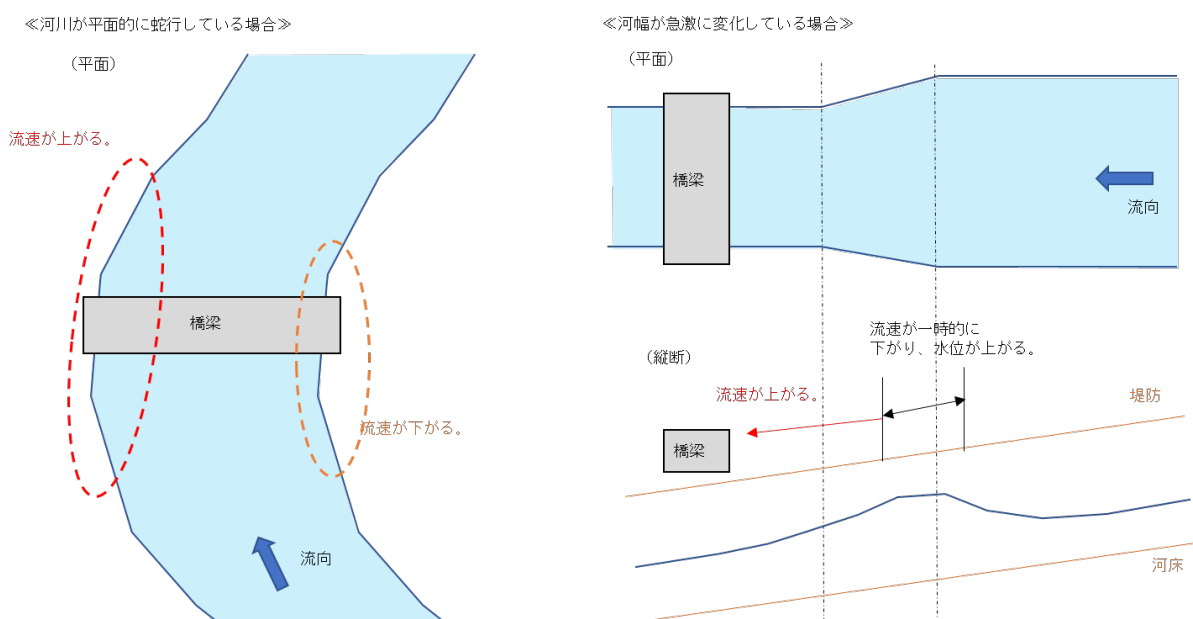


図3-10-7 河川条件に起因する洗掘箇所

(3) 洗掘による損傷のメカニズムと損傷に対する措置方針

洗掘の分類の内、直接基礎の橋脚の損傷のメカニズムや損傷に対する措置方針の考え方について以下に示す。

直接基礎の橋脚の損傷のメカニズムを図3-10-8に、診断セットを表3-10-3に示す。前述のとおり、橋脚の周囲で発生する水の流れやその乱れ等により橋脚基部で土被りの減少が発生する(段階1)。洗掘により土被りの減少が進行することでフーチングの一部が露出する状況となる(段階2)。河床は土砂の供給による堆積と掃流力による河床掘削を繰り返すため、必ずしも洗掘の発生自体は問題とはならないが、段階1から段階2において過年度の点検調書から進展が見られる場合等は、出水期等に急速に洗掘が進行する懸念があるため、必要に応じて傾斜計や沈下計等による橋脚の傾斜や沈下のモニタリングを行いつつ、長寿命化の措置を講じることが望ましい。

さらに洗掘が進行するとフーチング上面の露出(段階3)、側面の露出(段階4)に至る。なお、段階1から段階4では直接基礎はフーチング下面の支持層で荷重を支持することを基本としていることから、橋脚基

部の沈下や傾斜等の外観変状は生じていないことが一般的ではあるが、前述の通り出水期等の豪雨によって急速に河床変化により土被りの減少が進行する可能性があるため、早期に河川管理者への相談を行いつつ、河床変化の要因および対策に関する検討を行うことが望ましい。また、河床変化への対策は、早期に対策を講じることで橋梁に対する「長寿命化」も可能になるため、併せて長寿命化に関しても検討することが望ましく、橋梁単独での対策では再度河床変化により土被りの減少が生じるリスクが高いため、河川全体としての対策を講じることを望ましい。ここで、段階3と段階4で示す損傷に対する措置方針として、方針①と方針②で区別しており、方針①は変状の状態や情報に基づいた標準的な措置の方針とし、方針②は進行性が高いと判断された場合の措置の方針としている。

河床変化により土被りの減少が進行しフーチング下面の露出（段階5）まで進行すると、支持地盤の洗掘等による橋脚基部の沈下・傾斜により、伸縮装置・支承・桁遊間等に異常が見られはじめる。さらに洗掘等が進行すると不安定化による橋脚の沈下・傾斜により伸縮装置・支承・桁遊間等に明らかな異常が見られる（段階6）。そのため、段階5以降から外観変状が確認されはじめるが、この段階では明らかに損傷が進行し根固め工、基礎の補強や桁端部の改良等の対策を施した場合でも橋脚の不安定化により、損傷の制御が難しくなる恐れがあるため、危機管理の対策を講じる必要がある。

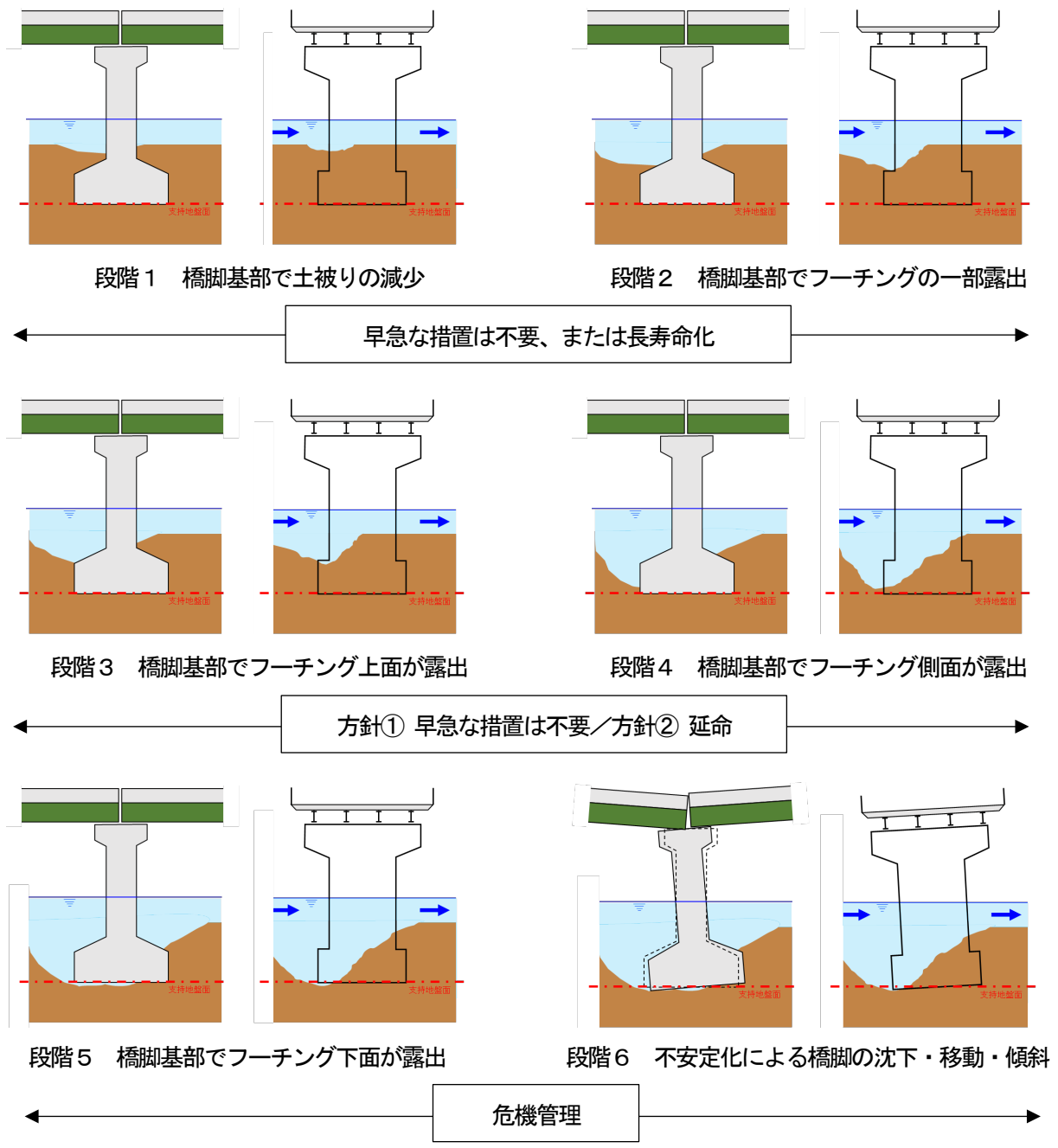


図 3-10-8 直接基礎の橋脚の洗掘による代表的な損傷過程と措置方針

表 3-10-3 直接基礎の洗掘の診断セット

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・橋脚基部で土被り減少	洗掘	洗掘調査 ・範囲や深さ	渇水時に橋台・橋脚周辺に土被りの減少が見られる	早急な措置は不要 ※1または長寿命化	傾斜計、沈下計等
②橋台・橋脚基部でフーチングの一部露出	洗掘	洗掘調査 ・範囲や深さ	渇水時に橋台・橋脚周辺にフーチングの部分的な露出等が見られる 過年度の点検調書からの進行	早急な措置は不要 ※1または長寿命化	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	渇水時に橋台・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	渇水時に橋台・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	渇水時に橋台・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 背面アブーチ部の復旧

※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。

以上は基礎の損傷のうち洗掘による損傷のメカニズムや損傷に対する措置方針の詳細について直接基礎を例として示したが、表 3-10-1 に洗掘の損傷の細分類を示しており、その他の構造・基礎形式についても同様の整理を行っている。その概略を以下に示す。

直接基礎以外の基礎形式である杭基礎、ケーソン基礎についても橋の機能に影響を及ぼす河床変化には、橋脚周りで生じる洗掘と河川のある程度広い範囲で生じる河床低下があることが考えられる。洗掘による損傷メカニズムは前述した直接基礎のものと同様であるが、損傷に対する措置方針の分かれ目についてはそれぞれの基礎形式が有する支持機構に応じて異なるため、基礎形式によって個別に検討する必要がある。

3.11 支承部

3.11.1 一般

支承部は、上部構造から伝達される荷重を確実に上部構造又は下部構造に伝達すること、活荷重、温度変化等による上部構造の伸縮や回転変位に追随し、上部構造と上部構造又は下部構造の相対的な変位に追随する等の役割を担う。支承部には、(1)荷重伝達機能（鉛直、水平）、(2)鉛直変位の保持機能、(3)水平変位追随機能、(4)回転変位追随機能、(5)その他機能（減衰、騒音・振動等）が求められる。支承部に求められる機能ごとに状態を評価し、診断する必要がある。(3)水平変位追随機能と(4)回転変位追随機能の低下が生じると他部材の損傷の原因となる場合がある。そのため、支承部の診断にあたっては、支承そのものの機能低下だけでなく、支承の機能低下に伴う他部材への影響や、橋の機能への影響についても評価し、総合的に診断を行う必要がある。例えば、コンクリート橋と鋼橋と比較すると、鋼橋の方が応力集中しやすいことから支承部の水平変位や回転変位の追随機能の低下が橋に及ぼす影響は相対的に異なる。支承機能の低下が橋の機能に与える影響は、特に曲線橋、支間長や固定支承までの距離が長い、交通量が多い、斜角が大きい場合に大きくなることが多いので、より一層の注意が必要である。

支承部は、支承本体、アンカーボルト、セットボルト等の上下部構造との取付部材、沓座モルタル、アンカーバー等の支承の性能を確保するための部品により構成される²³⁾。これら全体として支承部の性能を確保する必要があることから、各構成部が担う役割を良く理解した上で各部の状態を点検、診断することが重要である。

図 3-11-1 に支承形式の変遷を示す。明治時代以降は主に鋼製支承が適用されてきたが、1995 年兵庫県南部地震以降はゴム支承等の各種形式が開発されている。支承形式によって機能を担う部材、及び、その部材の組合せが異なり、また年代によっても機能の水準が異なることに留意して維持管理を行う必要がある。

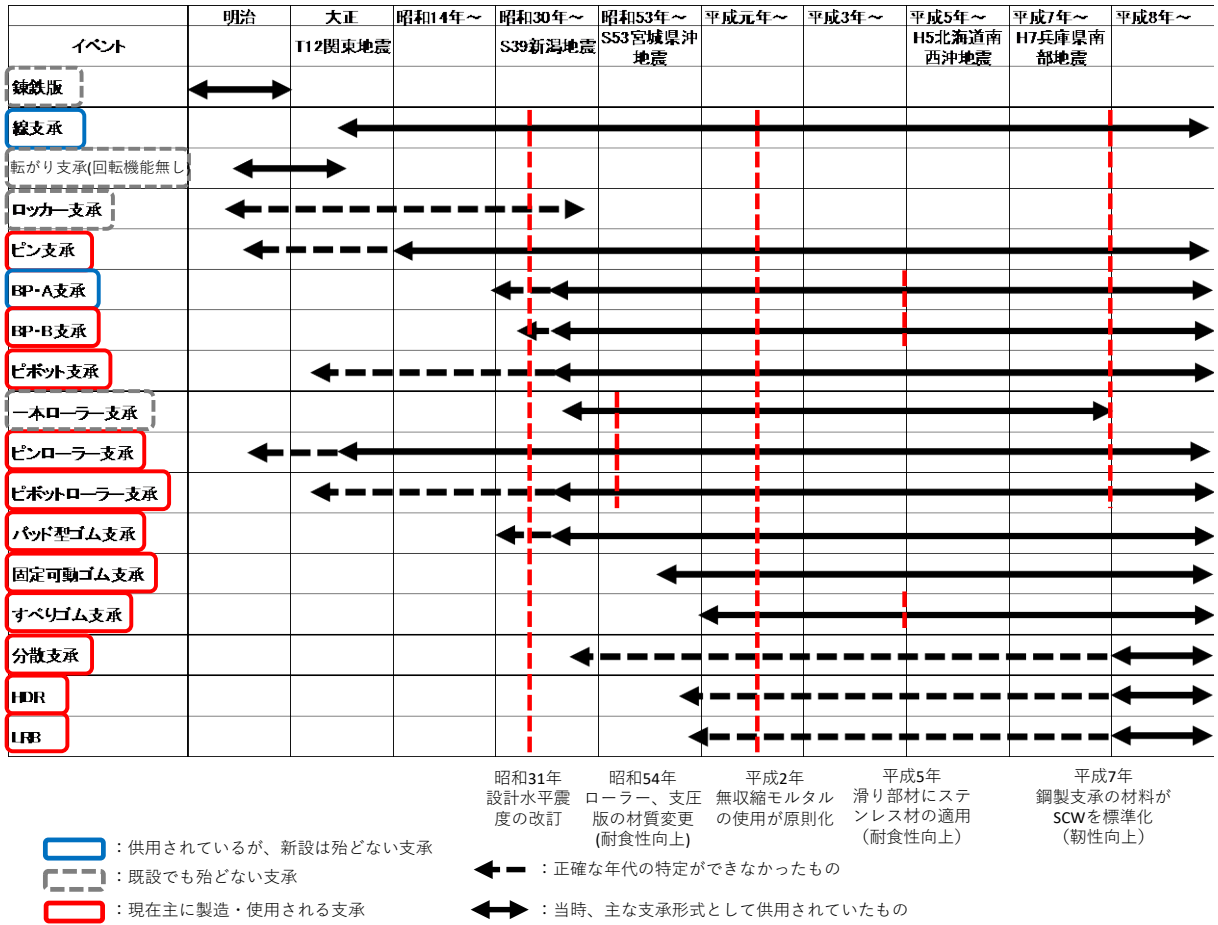


図 3-11-1 支承形式の変遷

3.11.2 支承部に生じる損傷

(1) 基本的な分類

図 3-11-2 に支承部に生じる損傷の基本的な分類を示す。支承の代表的な損傷は、オゾン劣化、腐食、凍害、ボルトの緩み、パッド型ゴム支承に特有の損傷（ズレ・逸脱）、遊間不足・片当り、沓座モルタル内の空隙、縁端距離不足、下部構造の移動に起因する損傷、地震に起因する損傷である。

ここでは、積層ゴム支承本体のオゾン劣化、鋼材の腐食、沓座モルタルの凍害、セットボルトのボルトの緩み、パッド型ゴム支承のズレ・逸脱、遊間不足・片当り、沓座モルタル内の空隙、橋座部の縁端距離不足、下部構造の移動に起因する損傷、地震に起因する損傷について損傷事例を述べる。

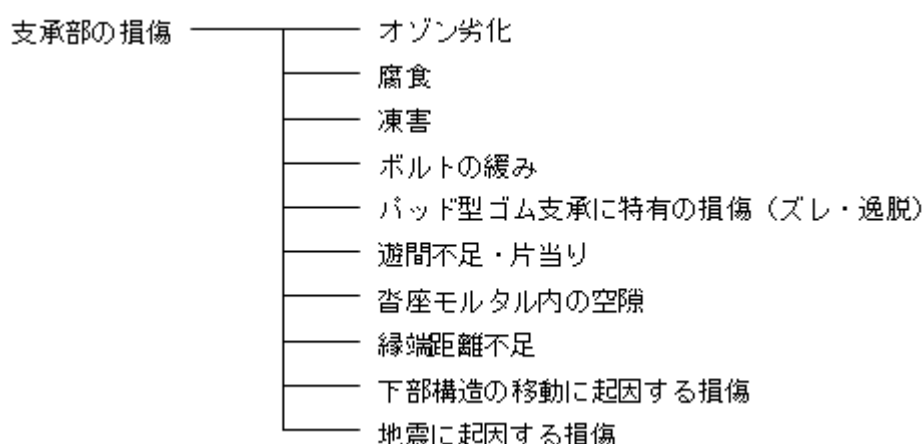
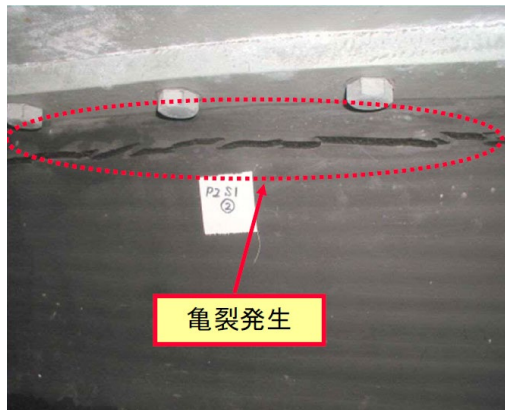


図 3-11-2 支承部に生じる損傷の基本的な分類

(2) 積層ゴム支承本体のオゾン劣化

積層ゴム支承は、ゴムと鋼板からなる積層ゴム支承の本体周りに、劣化因子の浸入を抑制する目的の被覆ゴムが設けられていることが一般的である。この被覆ゴムは荷重を支持する部分として見込まれていないことから、損傷したとしても耐荷性能には影響しないが、オゾンや紫外線等の環境作用による劣化を考慮し、それらの経年の影響を考慮して耐久性能を確保するために用いられている。ただし、被覆ゴム表面に生じた亀裂が貫通する等により、積層ゴム支承本体が外気に触れ、支承本体に劣化因子が浸入すると、内部鋼板の腐食や、ゴムと内部鋼板の剝離により荷重伝達機能（水平）が低下する危険性がある²⁴⁾。

被覆ゴムに亀裂が発生する原因の一つがオゾン劣化である。オゾン劣化は空気中のオゾンがゴムを構成する分子に作用し、ゴム表面に引張が生じることで亀裂を生じさせるものである。図 3-11-3 に積層ゴム支承表面にオゾンクラックが生じた事例を示す。また、オゾン劣化を防止する手段としては、老化防止剤の配合や EPDM（エチレンプロピレンジエンゴム）等の耐オゾン性の高い材料を用いる等が考えられる。



(a) 積層ゴム支承



(b) 積層ゴム支承 (CR系ゴム使用)

図 3-11-3 積層ゴム支承表面にオゾンクラックが生じた事例²⁵⁾

(3) 鋼材の腐食

支承部の損傷の多くは、鋼材の錆、腐食に起因したことが多い。図 3-11-4 に鋼製支承の腐食の事例を示す。腐食の進行により、水平変位追従機能や回転変位追従機能が低下した支承は可動部の固着による桁の疲労等、上部構造、下部構造、支承部に影響を及ぼす場合がある²⁶⁾。腐食が生じやすい環境は、伸縮装置からの漏水や、橋面排水管の破損に伴い雨水が降り注ぐ等の湿潤な環境であり、特に飛来塩分の多い架橋環境や凍結防止剤の散布により塩分が供給される場合に腐食が加速される。支承部は腐食が進行しやすい環境条件である。

点検及び診断では、支承部を構成する部材ごとに担う機能が異なるため、どの部材が腐食するかによって、低下する機能が異なることに留意する必要がある。



(a) BP 支承



(b) ローラー支承

図 3-11-4 鋼製支承の腐食の事例²⁵⁾

(4) 沓座モルタルの凍害

図 3-11-5 に支承モルタルの凍結膨張による支承の沈下事例を示す。支承アンカーボルト箱抜き部の無収縮モルタルに雨水等が浸入し、凍結融解作用により劣化している事例が報告されている²⁵⁾。滞水した水が沓座モルタル内部に浸透し、凍結融解を繰り返すことで内部に微細クラックが発生する。凍害の進行によりモルタル表面にひび割れや欠け、スケーリングが生じる。それがさらに進行すると、沓座モルタルが損傷し、支承が沈下することもある。



図 3-11-5 支承モルタルの凍結膨張による支承の沈下事例²⁵⁾

(5) セットボルトのボルトの緩み

図 3-11-6 に緩んだセットボルトの増し締め事例²⁶⁾を示す。活荷重の作用により、上部構造の振動や変位、たわみが繰り返し作用することにより、セットボルトに緩みが生じたものと推察される。



図 3-11-6 緩んだセットボルトの増し締め事例²⁶⁾

(6) パッド型ゴム支承に特有の損傷（ズレ・逸脱）

図3-11-7にパッド型ゴム支承のズレ・逸脱の事例を示す。上部構造の温度伸縮に伴うゴムのせん断変形が生じた状態で、交通振動等により支承に作用する鉛直反力が変動することでゴムにずれが生じる。また、ずれ防止に配慮した構造もある。



図3-11-7 パッド型ゴム支承のズレ・逸脱の事例

(7) 遊間不足・片当り

図3-11-8に遊間不足・片当りの事例を示す。支承は回転、水平移動のために遊間が必要であるが、遊間量は施工等による誤差の許容範囲においても均等ではないことから、何らかの原因により遊間以上の変位が生じた際には、一方に寄る、もしくは方向がずれた結果、設計の想定とは異なる応力等が生じることがある。支承種によって、可動方向の遊間や方向のずれに対して許容できる量に差がある。特に可動支承において、異常が生じやすい。

例えば線支承や支承板支承であれば遊間不足により下沓突起またはサイドブロックと上沓が接触し、支承の水平変位追従機能などが拘束されやすい傾向がある。それを越えて更に上下部構造間に相対変位が生じる場合には上沓や下沓突起等に亀裂が発生し、最終的には破断に至る。ローラー支承であれば方向のずれにより、ローラーカバーや連結板とローラーが接触し、支承の水平変位追従機能などが拘束されることがある。それを越えて更に上下部構造間に相対変位が生じる場合にはローラーカバー、あるいは連結板が破断し、最終的にはローラーの逸脱に至る。



(a) 線支承²³⁾



(b) ローラー支承²⁷⁾

図 3-11-8 遊間不足・片当りの事例

(8) 沓座モルタル内の空隙

図 3-11-9 に沓座モルタル内の空隙が原因で生じた変状の事例を示す。下沓中央付近の沓座モルタルが部分的に空隙となっていたことで、下沓下面の支持が不均一となり支承本体に曲げやせん断が作用する。下沓の破断を防止する手段として、現在は沓座モルタルの材料も品質や性能が向上し、充填性が改善されている。また、材料としても SCW480N 材や SM490A 材等の衝撃力に強い材料に改善が図られている。



図 3-11-9 沓座モルタル内の空隙が原因で生じた変状の事例^{27), 28)}

(9) 橋座部の縁端距離不足

アンカーボルトの縁端距離が不足している状態で、上部構造から荷重が作用すると、橋座の割れが生じる場合がある。この時点で水平方向に対する耐荷力が喪失しているが、割れが進行することで剥落に至る。

(10) 下部構造の移動に起因する損傷

地震に起因する下部構造の移動や傾きにより、設計で想定している以上の支承部の変位となり、沓座モルタル、台座コンクリート、橋座コンクリートの割れ、移動制限装置や浮き上がり防止装置の変形・亀裂、ボ

ルトやナットの緩み・変形・抜け出し、支承本体の割れ、ピンの変形・抜け出し、ゴム支承本体の変形・亀裂、パッド型ゴム支承本体のずれ等が生じ、最終的には橋座コンクリートの剥落、移動制限装置や浮き上がり防止装置の破断、ボルトの破断、ピンの破断、ゴム支承本体の層間剥離・破断、パッド型ゴム支承本体の逸脱等が生じる。

(11) 地震に起因する損傷

地震に起因する損傷の内、代表的なものは沓座モルタルの割れ・沈下、台座コンクリートの割れ、橋座コンクリートの割れ・剥落、移動制限装置や浮き上がり防止装置の変形・亀裂・破断・脱落、ボルトやナットの緩み・変形・破断・脱落、アンカーボルトの抜け出し・破断、支承本体の割れ・ピンの変形・破断・抜け出し、ゴム支承本体の変形・亀裂・層間剥離・破断、パッド型ゴム支承のずれ・逸脱等、多岐にわたる。

3.11.3 積層ゴム支承本体のオゾン劣化のメカニズムと措置方針

オゾン劣化の原因は空気中のオゾンであり、オゾンがゴム材料に侵入し、ゴムを構成する分子間の結合を切断し、ゴム材料の表面に亀裂を発生させる。図3-11-10に積層ゴム支承本体のオゾン劣化の代表的な損傷過程を示す。被覆ゴムに生じる亀裂は、一般に引張力が集中する箇所から発生する。その後、亀裂数が増加、もしくは水平方向に亀裂が伸長するとともに深化し、被覆ゴムを貫通する場合がある。被覆ゴムの貫通に伴うゴム支承内部への水の浸入により、内部鋼板の腐食等が生じ、荷重伝達機能（水平）が低下する。

表3-11-1に積層ゴム支承のオゾン劣化の診断セットを示す。オゾン劣化に対する措置方針は、被覆ゴムに亀裂が発生後、その亀裂が貫通する段階以前では必要に応じて、現場加硫や保護材被覆を行うと良い。亀裂が被覆ゴムを貫通した場合や、錆汁の発生により内部鋼板の腐食が疑われる場合は、支承を取り替える措置を基本とする。

診断では、亀裂発生までに経過した期間等を勘案し、次回点検時に亀裂損傷がどこまで進行するかを考えると良い。なお、オゾンクラックはゴム表面に引張が生じている時点が確認しやすいため、上部構造の温度伸縮によりゴムに大きな変形が生じると考えられる最大温度または最低温度付近の変形時に点検を実施するのが良い。その際、亀裂深さは目視による把握には限界があるため、針金等を使用すると良い。

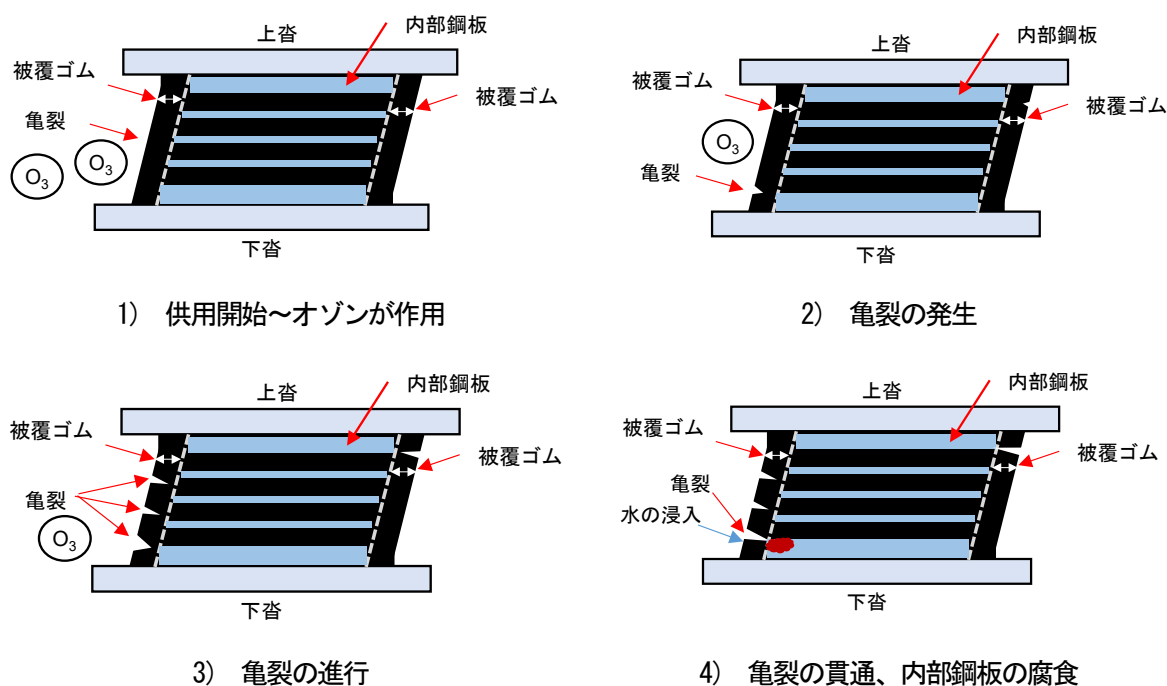


図3-11-10 積層ゴム支承本体のオゾン劣化の代表的な損傷過程

表 3-11-1 積層ゴム支承のオゾン劣化の診断セット

メカニズム		点検の着目点	工法例	理由	
外観変状 無し	1	オゾンが作用	◇ゴムの材質 ・環境条件 (凍結の可能性、オゾン濃度) ・肉眼で亀裂がない	・なし	・外観に変状がない
外観変状 有り	2	亀裂の発生	・肉眼で見える細かな亀裂(幅0.2mm程度)がある(JIS規格のA-2以上)	・必要に応じて表面保護剤等	・被覆ゴム本体は設計に耐力等を見込んでいない
	3	亀裂の伸展	・亀裂が顕在化し、次回点検時までに内部鋼板まで到達する	・支承更新	・緊急性は低いですが、損傷が相当程度進行しており、時間経過や地震等によって耐力が喪失する懸念があるため、橋梁構造安全性の観点から次回の定期点検までには補修等される必要がある

3.11.4 鋼材の腐食のメカニズムと措置方針

支承の腐食は、主に伸縮装置からの漏水や、橋面排水管の破損に伴い雨水が降り注ぐ等の湿潤な環境で生じやすく、特に飛来塩分の多い架橋環境や凍結防止剤の散布により塩分が供給される場合に腐食が加速される。支承は、支承形式によって機能を担う部材及びその部材の組合せが異なる。そのため、腐食箇所が機能に与える影響やその程度も支承形式により異なる。本章では代表例として、BP・A 支承の腐食、ローラー一部の腐食、線支承の腐食、アンカーボルト頭部・ナットの腐食について述べる。

(a) BP・A 支承の腐食

図 3-11-11 に BP・A 支承の腐食の代表的な損傷過程を示す。BP・A 支承特有の腐食メカニズムは先ず支承板を取り囲むシールリングに損傷（破断、塑性化により回転時に隙間形成等）が生じ、それに伴い密閉性が低下し、可動部に水が浸入し腐食が生じる。腐食の発生に伴い水平変位追従機能や回転変位追従機能が低下する。

表 3-11-2 に腐食（BP・A 支承の腐食）の診断セットを示す。点検時にはシールリングの状態や、水の存在の痕跡を注視して確認すると良い。また、可動部の腐食や腐食に伴う固着が見られる場合は、橋の機能へ与える影響度合いを考慮し必要に応じて支承交換を行う。点検時には可動部からの錆汁、交通による回転時の異音、触診による回転の有無を確認すると良い。

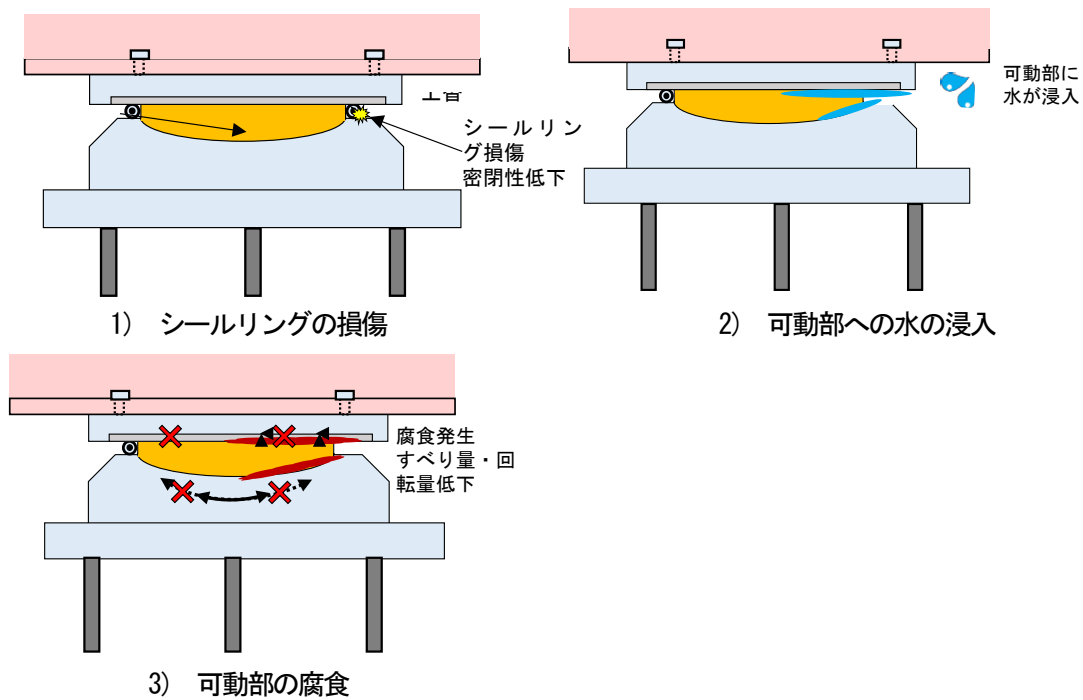


図 3-11-11 BP・A 支承の腐食の代表的な損傷過程

表 3-11-2 腐食 (BP・A 支承の腐食) の診断セット

メカニズム		点検の着目点	工法例	理由
外観変状 有り	1 シールリングの損傷	・シールリングの隙間、損傷	・なし	支承は健全
	2 可動部への水の浸入	・環境条件(上部工からの漏水、海水、凍結防止剤の有無) ・水が侵入した痕跡	・必要に応じて可動部の清掃	機能低下の可能性はある
	3 可動部の腐食	・可動部から錆汁の発生 ・稼働時に異音がある	・必要に応じて可動部の清掃	機能が低下しているが、喪失していない
	4 可動部の固着	・腐食し、可動面が固着している	・他部材への影響を調査	設計で想定する桁伸縮量分の力を支承部周辺が受け持っているため、その影響を詳細調査により確認する必要がある

(b) ローラー部の腐食

図3-11-12にローラー部の腐食の代表的な損傷過程を示す。ローラー部の腐食メカニズムは、ローラーカバー内に水が浸入し、ローラー部周辺に腐食が発生する。その後、ローラー部または支圧板に激しい腐食が生じ、水平変位追従機能が低下する。その後、腐食の進行に伴いローラー部の摩耗が発生し、水平変位追従機能の更なる低下と、支承部の沈下が生じることがある。

表3-11-3に腐食（ローラー部の腐食）の診断セットを示す。ローラー部の腐食に対する措置の方針として、ローラーの腐食が進行し、摩耗により桁と床版に空き・段差がある場合は支承交換を行う必要がある。ピンローラー支承は橋梁規模の大きいものに採用されることが多いため、支承機能の低下が橋の機能に与える影響が大きく、支承交換が推奨されることが多い。

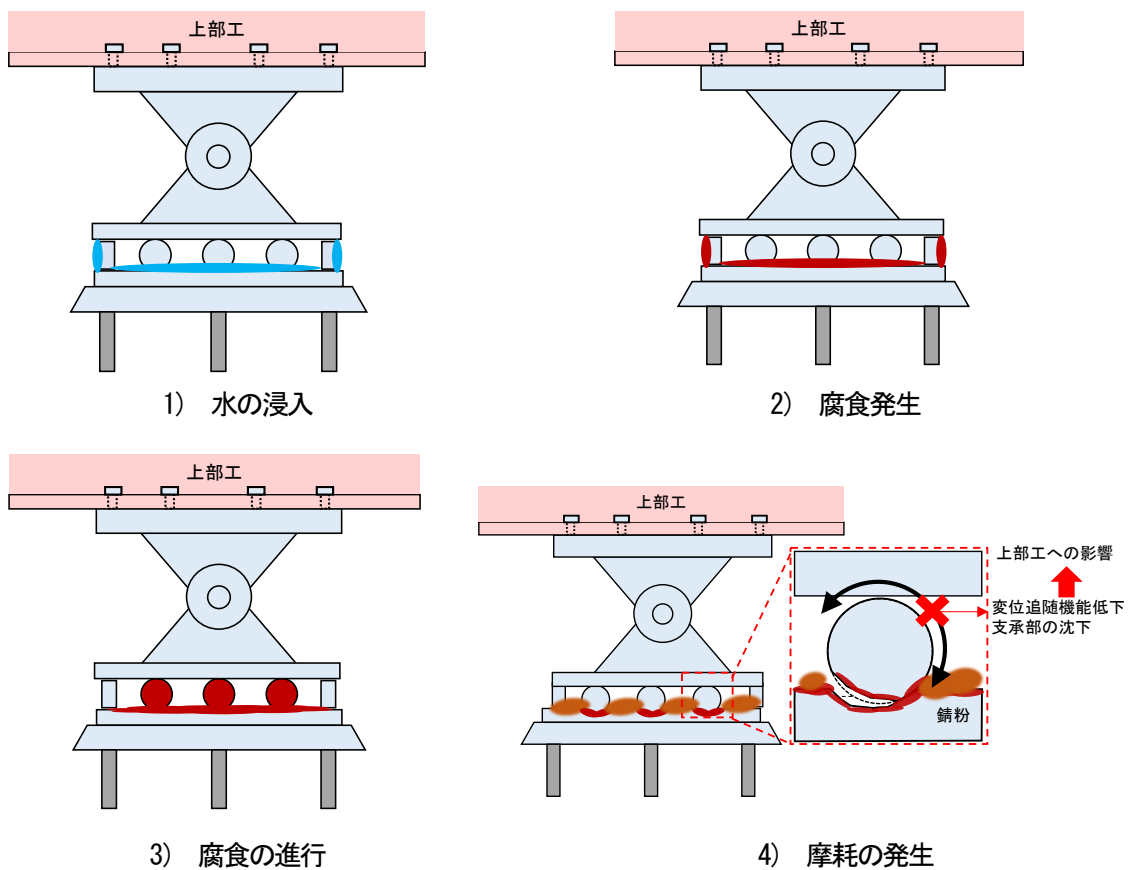


図3-11-12 ローラー部の腐食の代表的な損傷過程

表 3-11-3 腐食（ローラー部の腐食）の診断セット

メカニズム		点検の着目点	工法例	理由	
外観変状 無し	1	水の浸入、土砂の堆積	・環境条件(水の供給、塩化物イオンの有無) ・滞水、土砂、塵埃が堆積している	必要に応じて止水、防水工等	外観変状なし
	2	腐食発生	・ローラー部の錆、錆汁	・必要に応じて錆の除去、止水、防水工等	機能低下の可能性がある
外観変状 有り	3	腐食の進行	・ローラー部の激しい錆、錆汁 ・周辺部材の損傷 ・転がり時の異音	・必要に応じて錆の除去、止水、防水工等	機能が低下しているが、喪失していない
	4	摩耗の発生	・ローラーの腐食が進展し、摩耗により桁と床版に空き・段差がある	・支承更新	緊急性は低いですが、損傷が相当程度進行しており、時間経過や地震等によって耐荷力が喪失する懸念があるため、橋梁構造安全性の観点から補修等される必要がある

(c) 線支承の腐食

図 3-11-13 に線支承の腐食の代表的な損傷過程を示す。線支承の腐食メカニズムは、先ず可動部に水が浸入し、腐食が発生し摩耗することで、鉛直変位の保持機能や回転変位追従機能が低下する。腐食の進行に伴い、可動部及びその周辺の断面が減少する。その後、腐食の進行に伴い線支承下査頂部の摩耗が発生し、変位追従機能の低下と、支承部の沈下が生じることがある。

表 3-11-4 に腐食（線支承の腐食）の診断セットを示す。線支承の腐食に対する措置の方針として、橋梁規模の小さいものに採用されることが多いため、支承機能の低下が橋の機能に与える影響が小さく、線接触部の軽微な腐食に対しては工法例が殆ど無い。変位量の低下や断面減少が生じた際には支承交換を行うこともある。支承交換の判断は、他部材へ与える影響を考慮して行うと良い。

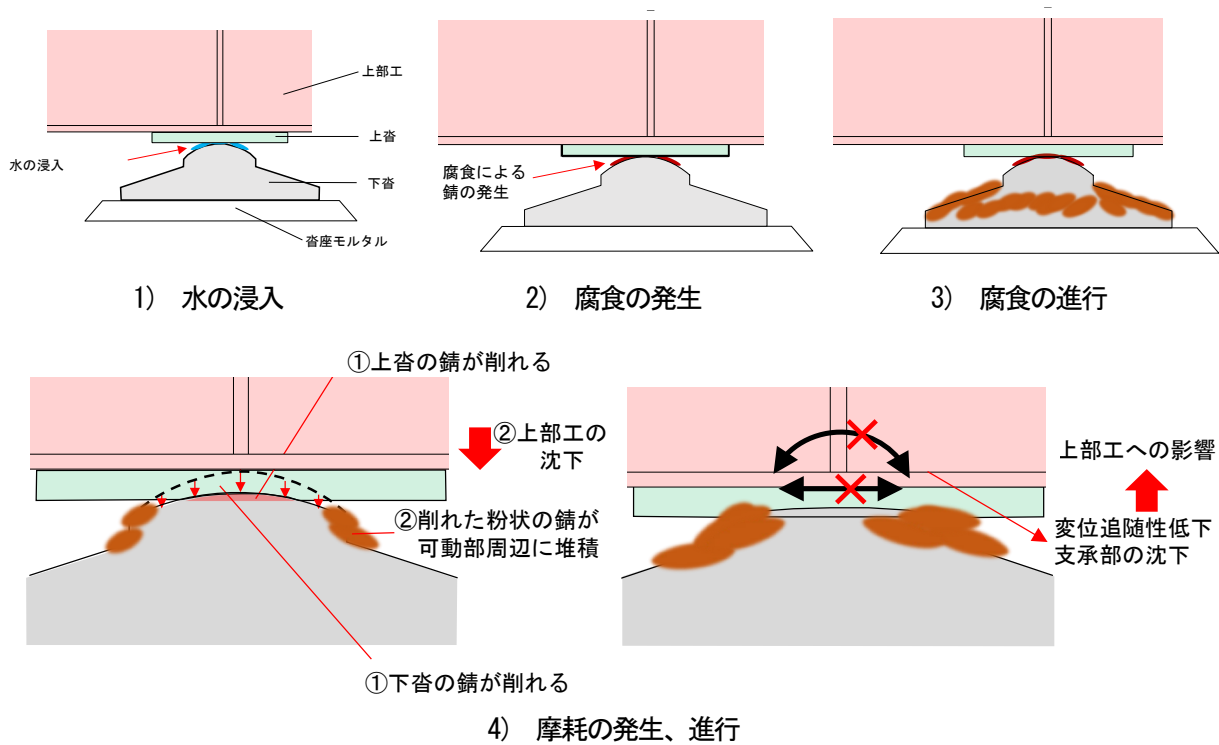


図3-11-13 線支承の腐食の代表的な損傷過程

表3-11-4 腐食（線支承の腐食）の診断セット

メカニズム		点検の着目点	工法例	理由	
外観変状 無し	1	水の侵入、土砂の堆積	・環境条件(上部工からの漏水、海水、凍結防止剤の有無) ・滞水、土砂が堆積している	・必要に応じて止水、防水工等	外観変状なし
	2	腐食の発生	・可動部の局所的な錆、錆汁	・必要に応じて錆の除去及び止水、防水工等	機能低下の可能性はある
外観変状 有り	3	腐食の進行	・可動部の全体的な錆、錆汁、錆粉の発生 ・異音の発生	・必要に応じて錆の除去及び止水、防水工等	機能が低下しているが、喪失していない
	4	摩耗の発生、進行	・線支承の腐食が進展し、摩耗により桁と床版に空き・段差がある	・支承更新	緊急性は低いですが、損傷が相当程度進行しており、時間経過や地震等によって耐荷力が喪失する懸念があるため、橋梁構造安全性の観点から補修等される必要がある

(d) アンカーボルト頭部・ナットの腐食

図3-11-14にアンカーボルト頭部・ナットの腐食の代表的な損傷過程を示す。アンカーボルト頭部・ナットの腐食メカニズムは、先ずアンカーボルト頭部及びナット周辺に上部構造からの漏水や土砂が堆積し、それが原因でナット周辺に腐食が発生する。その後、アンカーボルト頭部及びナット全体に腐食が進行し、錆や錆汁が発生する。その後更に腐食が進行すると、ボルト頭部やナットの断面が減少し、取替不可能な状態となる。

表3-11-5に腐食（アンカーボルト頭部・ナットの腐食）の診断セットを示す。アンカーボルト頭部・ナットの腐食に対する措置の方針として、腐食によるボルト頭部やナットの断面減少が生じている段階では、固着によるナットの交換も行えないため、支承本体とアンカーボルト断面の減少によって生じる水平方向の荷重伝達機能が低下を考慮し、それによって想定される影響が許容できるかどうかを判断した上で、必要に応じて支承交換を行う。基本的には、アンカーボルト頭部・ナットの腐食によって構造物の安全性が著しく損なわれる可能性は少ない。

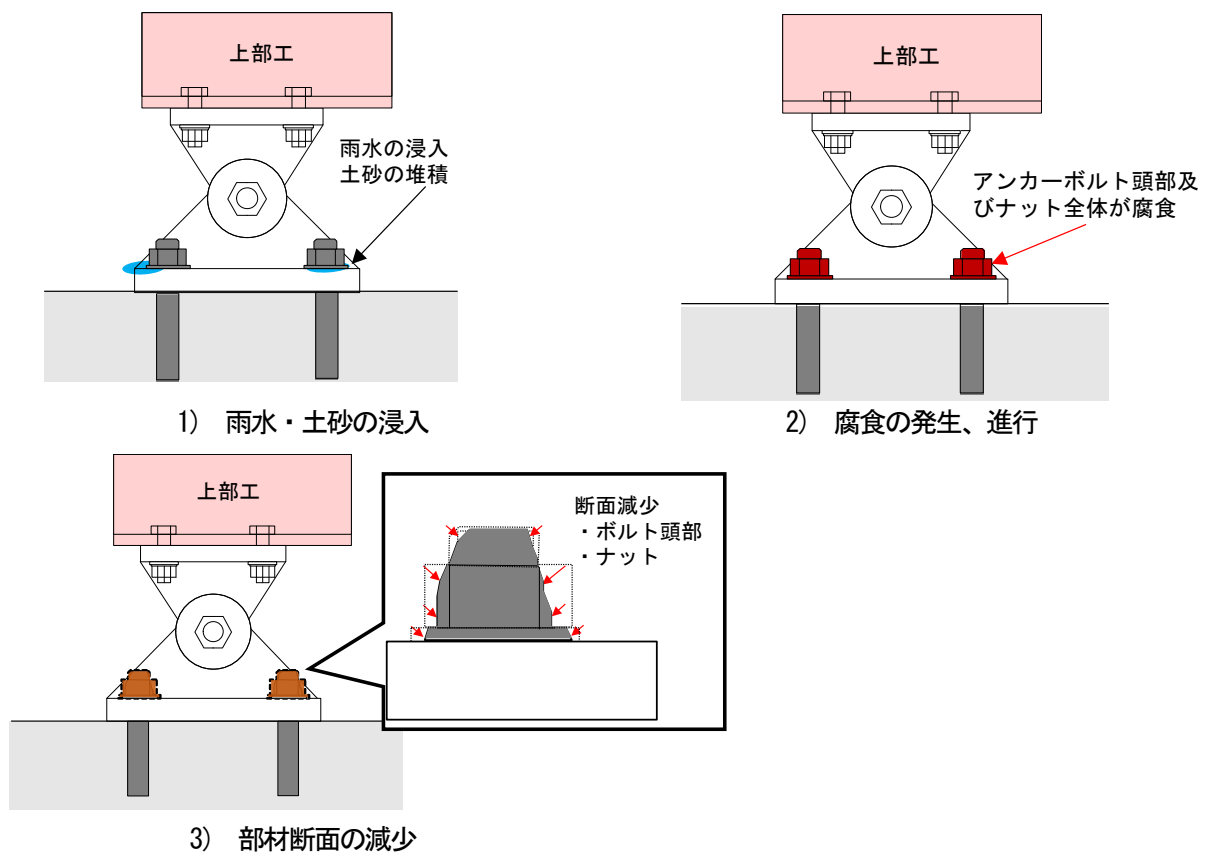


図3-11-14 アンカーボルト頭部・ナットの腐食の代表的な損傷過程

表 3-11-5 腐食（アンカーボルト頭部・ナットの腐食）の診断セット

メカニズム		点検の着目点	工法例	理由
外観変状 無し	1	ボルト・ナットに水の付着、土砂の堆積	・なし	外観変状なし
	2	腐食の発生、進行	・必要に応じて再塗装等	機能低下の可能性はある
	3	部材断面の減少	・なし	ボルトの固着が生じているものの、次回の定期点検までに構造物の安全性が著しく損なわれる可能性は少ない

3.12 伸縮装置

3.12.1 一般

橋の桁端部は、鋼橋、コンクリート橋を問わず、湿気がこもりやすく、かつ主桁と橋台パラペットの隙間である遊間からの漏水が見られることが多い。1990年代にスパイクタイヤの使用が規制され、一般道でも交通安全のため凍結防止剤（塩化物）の散布量が急増した²⁹⁾。このことから、道路橋の塩分環境が顕著に変化している。塩化物が混入した漏水が構造物に接触すると、鋼材の腐食やコンクリートの材料劣化が早期に発生、伸展し、著しい損傷につながることを懸念される。このことから、塩分環境の変化の中で、道路橋の維持管理における漏水に対する配慮をそれに対応したものに転換していく必要がある。

(1) 漏水に対する意識—道路橋特有の塩分環境の変化

図3-12-1は、凍結防止剤散布量の概略の推移を模式図で示したものである³⁰⁾。縦軸は凍結防止剤の散布量であり、約30年前の一般道における全国平均を1として表す。一般道における散布量は、1990年代にスパイクタイヤが禁止されて以降、急速に増加し、今日の散布量は禁止以前に比べて概ね1オーダーの違いがある²⁹⁾³¹⁾。国内では沖縄県を除き、全国で使用されており、散布量増加の影響は広範囲に及ぶ可能性がある。今日、一般道においては、塩分環境の変化を意識して、後に劣化や劣化箇所の急激な伸展、増加を招かないようにするため、漏水があるところは塩分の供給が明確にあると考え、「いまの漏水は塩水」という意識を持つ必要がある。

(2) 桁端部の漏水の影響

図3-12-2に、伸縮装置の漏水と部材の損傷の関係を示す。また、図3-12-3に、桁端部の漏水の影響範囲のイメージを示す。漏水によって、橋梁の各部材にさまざまな影響を及ぼすことから、各部材の診断との連携が重要である。

図3-12-4に一般道における鋼桁橋桁端部の腐食事例を示す³²⁾。塗装の種類によっては、長期に塩水に曝されると、早期に塗膜の腫れ等の劣化が生じ、腐食発生を早めるとともに、鋼材の腐食自体も塩化物が介在することで加速される³³⁾。塩水が流下する環境では、たとえ高耐久性の防食であっても相対的に厳しい状況に置かれることから、防食方法に限らず、まず漏水を防ぐことが肝要である。

図3-12-5に、PC箱桁の桁端部下面に見られた塩害事例を示す³⁴⁾。伸縮装置からの塩化物を含む漏水が箱桁下面に伝い、下面のコンクリートに塩化物イオンが浸透して表面付近の鉄筋が腐食したと考えられる。

図3-12-6のように橋台天端から前面に流れ落ちる箇所が限定され、「水みち」を形成する事例がよく見られる。塩化物が混入した漏水の場合における、水みちの範囲と塩化物の影響範囲（塩分浸透が多い箇所、劣化が著しい箇所）の関係を調査した例では、水みち部分よりも、水みちのある箇所とない箇所の境界部で塩分浸透が多く、かぶりコンクリートのうきが多いこと、複数の水みちがある場合は、その間の水みちがない箇所でコンクリートのうきが多く見られることが報告されている³⁵⁾。水みちの境界部のそのような傾向は、境界部が乾湿繰返しの影響を受けやすいことが一因とされる³⁵⁾。また境界部は、漏水の際に塩分がときおり付着するが夏場などにおいて雨水により洗われにくいことも関わっている可能性がある。

図3-12-7は、桁端部の漏水により、橋台天端及び側面のコンクリートが著しい凍害により深く浸食されて

いた事例である³⁶⁾。東北地方の峠近くに位置していた橋であり、冬季に凍結防止剤が散布されていた。塩水が介在すると、コンクリートの凍結融解が著しく促進されることが知られている^{37)、38)}。この事例では、写真に見えている鉄筋の腐食はごく軽微であり、鉄筋が腐食するよりも早くコンクリートが凍害により著しく劣化したと考えられる。また、古い橋の橋台でアルカリシリカ反応 (ASR) の反応性骨材を多く含む場合には、多量の水が供給されると ASR によって多くのひび割れを誘発することがある。そして漏水に塩化ナトリウムが含まれると ASR を促進することが懸念される³⁸⁾。

特に、鋼部材の腐食やコンクリート部材の塩害は、塩分の供給が多いほど、厳しい劣化に至りやすい^{39)、40)}。塩化物による鋼材腐食が生じた後は、錆層と鋼材素地の間に塩化物イオンが集中する傾向があり^{41)、42)}、塩化物イオンを取り除くために錆層をきちんと取り除く必要があることからブラスト処理が必要である^{33)、42)}。しかし、腐食の程度が著しいとブラストしても孔食の底から早期に腐食が発生することから、腐食の程度が著しいほど、塩化物イオンを除去しきれず、早期に再劣化する可能性が高くなると考えられる。また、コンクリート部材の塩害では、コンクリートのひび割れが発生したときには既に鋼材の腐食が著しく、上記の鋼部材と同様にその後の補修が難しく、再劣化する事例が多く見られる³¹⁾。さらに、前述のとおり、こうした劣化は漏水の到達する範囲に起こり、勾配によってはかなり広範囲に及ぶ可能性がある。また、点検すら困難な狭い遊間をはじめ、桁端部の狭い空間でこれらの補修を適切に行うにはさらに難しさを伴う。これらは、桁端部の漏水の影響を考える上で重要な視点である。

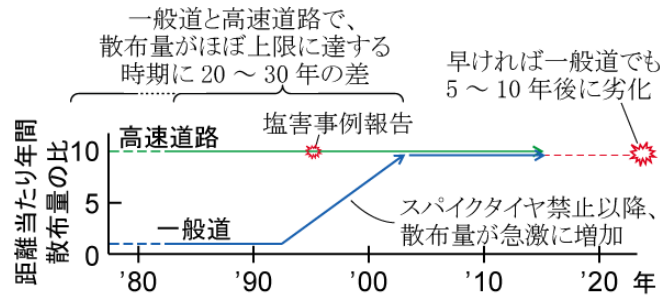


図3-12-1 凍結防止剤散布量の概略の推移³⁰⁾

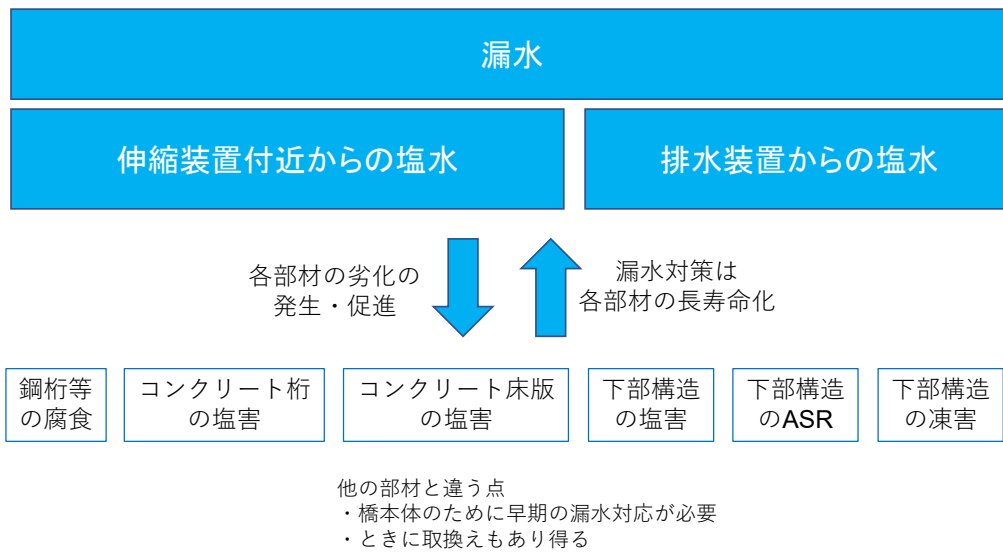


図3-12-2 伸縮装置や排水装置からの漏水と部材の損傷の関係

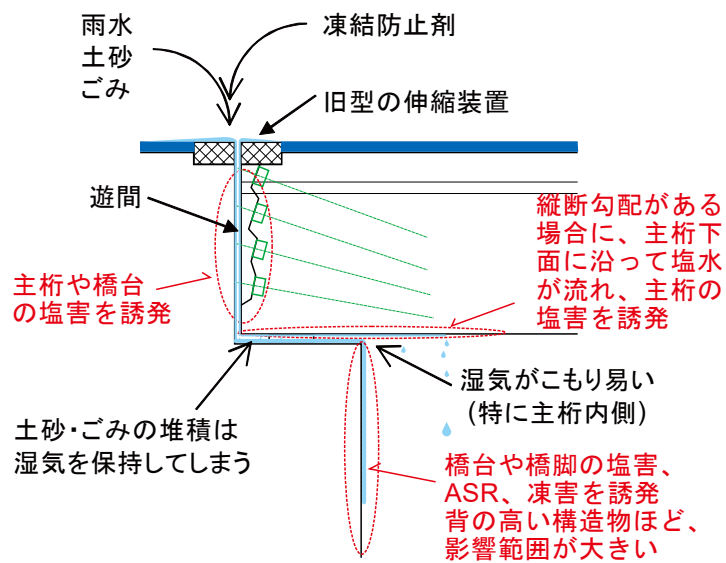


図3-12-3 伸縮装置からの漏水による影響³⁴⁾



図 3-12-4 桁端部の腐食と断面欠損³²⁾
(内桁の支承上、支間側の角)

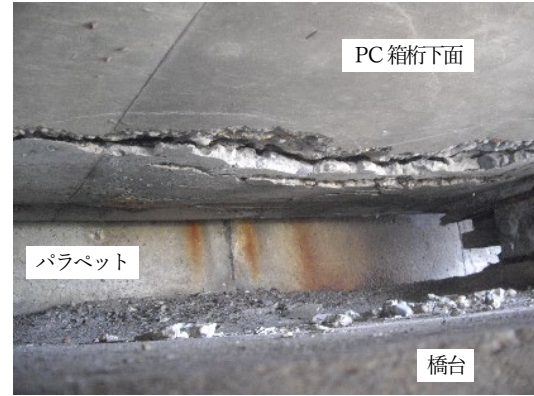
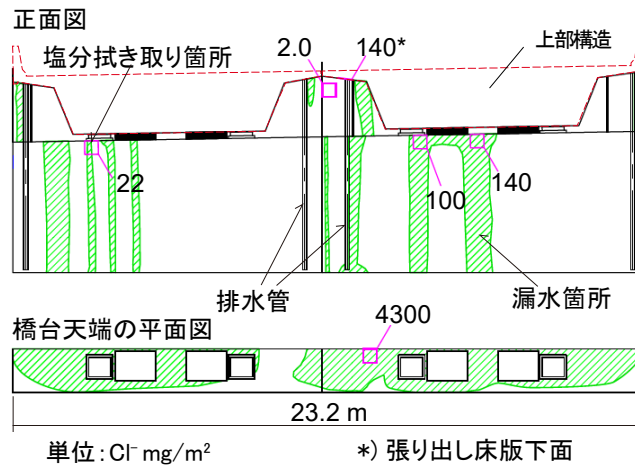


図 3-12-5 PC 箱桁の桁端部下面に見られた塩害³⁴⁾



注) 図中の数値は付着塩分量を示す。60 以上で沿岸部に相当

■ : 漏水箇所

図 3-12-6 橋台の付着塩分量調査結果の例 (自動車専用道)³⁰⁾

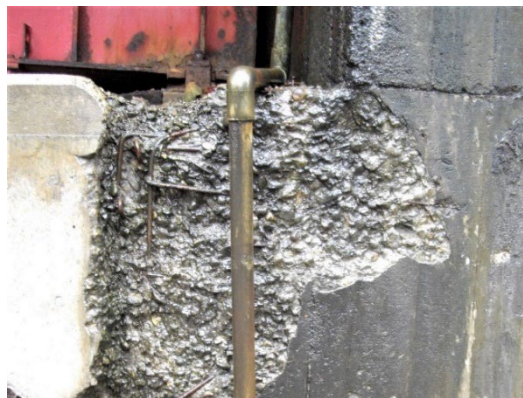


図 3-12-7 凍害による橋台コンクリートの劣化事例 (鉄筋腐食よりも速い劣化)³⁶⁾

3.12.2 伸縮装置に生じる損傷

(1) 基本的な分類

道路橋の伸縮装置には、様々な形式が存在する（図3-12-8～図3-12-11）（例えば、18）、43）-45）。



埋設型ジョイント

図3-12-8 埋設型ジョイント



シールゴム

図3-12-9 突合せ型ゴムジョイント



図3-12-10 ゴムジョイントの例
(左：ゴム+鋼製、右：ゴム製)

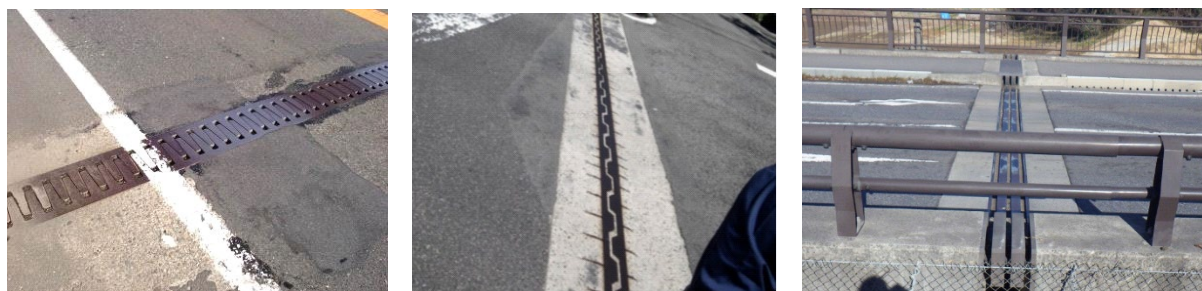
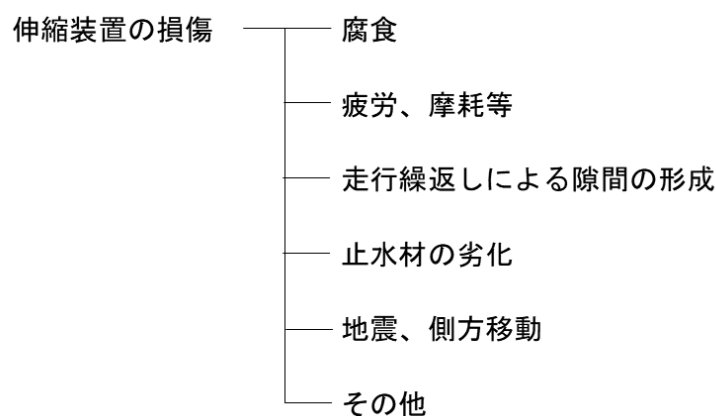
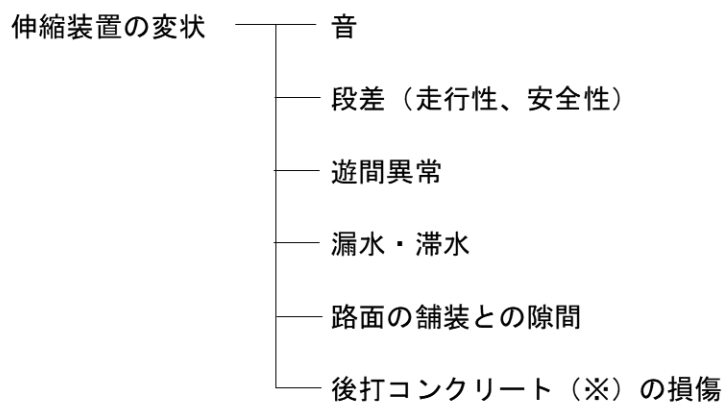


図3-12-11 鋼製ジョイントの例
(左：フィンガー型 中央：簡易鋼製形式、右：モジュラー型)

伸縮装置の損傷の種類は、その形式ごとに異なる点があると考えられる。そのうち、比較的共通すると考えられる損傷形態に着目して、伸縮装置に生じる損傷及び変状の基本的な分類を図3-12-12に示す。同図(a)に劣化機構による損傷の分類を、同図(b)に変状による分類を示す。伸縮装置に生じる変状のうち、段差は橋上の走行性だけでなく、程度によっては安全性に関わることから早急に対応することが望ましい。また、漏水は3.12.3で述べるとおり、将来の維持管理の負担軽減のために早急に対応することが望ましい。段差については3.12.2(2)で、漏水については3.12.2(3)でそれらの損傷について述べる。



(a) 劣化機構で分類



※裏込コンクリート、定着用コンクリートともいう。

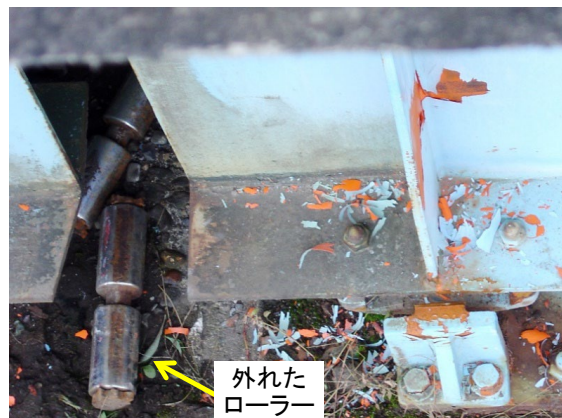
(b) 変状で分類

図3-12-12 伸縮装置に生じる損傷及び変状の基本的な分類

(2) 段差

伸縮装置とその固定のための後打コンクリートの付近に、段差が生じやすい傾向がある。走行性、乗心地は、路面の平坦性に関わるところが大きく⁴³⁾、伸縮装置の設置に際して、その段差をできるだけ小さくするための配慮が必要である。また、図3-12-13に示す例のように、地震などにより大きい段差が発生すると、走行の安全性を著しく損なうことから、直ちに通行止めを行い、緊急を要する対応が必要となる。表3-12-1に、伸縮装置の段差の細分類を示す。段差は材料の異なる界面の位置で生じると考えられる。そのうち段差が生じやすい位置は、伸縮装置の突合せ部、後打コンクリートと舗装（床版側）との界面、後打コンクリートと舗装（土工部側）との界面が挙げられる。これらの要因は同表に示したとおり複数あり、多くの場合は、いずれかの部位が沈下することにより発生する。段差の要因を特定するためには、段差部だけでなく、上部構造や支承の損傷、下部構造の移動、回転、沈下など、それぞれの状態を把握する必要がある。限られた構造ではあるが、橋梁端部が浮き上がることがある。不均衡な支間割の場合や特殊な施工方法を用いた場合など、橋梁の支点部にアップリフトが生じるのを何らかの支材で押さえていたものが、地震や支材の劣化などによって開放されたときに起こり得る^{46) 47)}。また、下部構造の側方移動などにより、下部構造と上部構造が押し合う状態になった場合には、伸縮装置がぶつかって伸縮装置自体や遊間に設置されたゴムの異常変形が見られることがある。

伸縮装置を段差なく正確な位置に固定するために、後打コンクリートが有効であると考えられる。しかし、伸縮装置を取換える時の施工時間が、交通規制の時間や時間帯の制約により厳しいほど、新旧コンクリートの打継目の処理など、施工品質が低下する傾向にあると考えられ、伸縮装置が適切に後打コンクリートで設置できても、後打コンクリートと旧コンクリートの間に隙間ができやすくなってしまうことが懸念される。点検や診断の際、伸縮装置のみでなく、固定に用いられている後打コンクリートの状態も把握する必要がある。



1) 路面の段差

2) 抜け出したローラー

図 3-12-13 伸縮装置の大きい段差の事例（地震により支承が損傷して生じた）

表 3-12-1 伸縮装置の段差の細分類

損傷	部位・要因による分類
段差	伸縮装置自体の損傷
	支承の損傷
	後打コンクリートの損傷（床版側）
	後打コンクリートの損傷（土工部側）
	支承・主桁の損傷による沈下
	近傍床版コンクリートの劣化
	背面土の陥没
	橋台・橋脚の沈下
その他	

(3)漏水

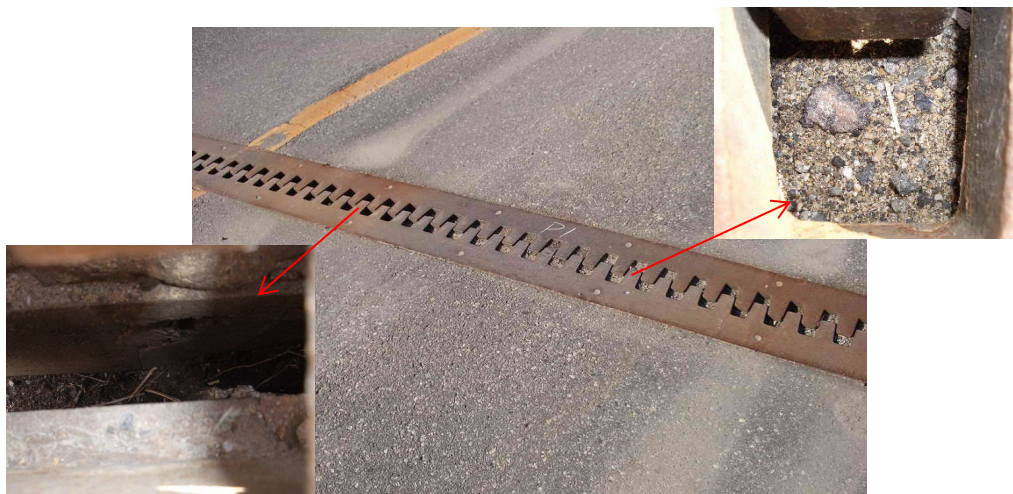
図3-12-14に、フィンガー形式の伸縮装置の例を示す。また、図3-12-15に、フィンガー形式の伸縮装置の下方に配置されていた鋼製樋の例を示す。1990年代以前の道路橋では、建設当時にフィンガー形式の鋼製伸縮装置がよく用いられていた。路面からの水は鋼製の樋で受けて排水できるように思われるが、実際は図3-12-15に示すように土砂が堆積して排水路が詰まり、水はそのまま下方に流れる。また、図3-12-16のように、鋼製の樋や排水管が腐食し、孔が空いたり、欠損に至ったりして排水の機能を失う事例もある。当時の伸縮装置便覧⁴³⁾には、止水の概念が既に示されていた。伸縮装置におけるゴム部材の使用は、走行性確保と止水の目的が考えられるが、個々の形式におけるゴム材の目的は必ずしも明示されていなかった。図3-12-17に、突合せ型ゴムジョイントの伸縮装置の例を示す。この例では、ゴム材が横断方向（橋軸直角方向）に500～600mm間隔で途切れており、まったく接続されていないために、横断方向の止水の連続性が確保されていない。丁寧な施工事例では現場でゴム同士を融着等で接続されている場合もある。

伸縮装置からの漏水を防ぐ目的で、鈹桁橋の場合に、下方からウレタンゴムを詰めたり、樹脂製の排水樋を設置したりする事例が見られる。フィンガー形式の鋼製伸縮装置に止水材を付加した場合は、図3-12-18のように、土砂の堆積や積雪が、その重みによって、車輪に押し込まれて漏水が再発する事例や止水材が落下する事例が見られる³⁰⁾。図3-12-19、図3-12-20に、止水材からの漏水と止水材の落下の事例を示す。

1990年代以降は、非排水型の伸縮装置が使用される事例が増加した。しかし、非排水型伸縮装置に交換した後も伸縮装置からの漏水が見られる事例があったため、近年二次止水などと呼ばれる二重の止水機能を持った伸縮装置が開発されている。また、図3-12-21のように、歩道と車道で異なる製品を用いて、その境界部（歩車道境界）の適切な止水が施されず漏水が生じている事例も多く見られる。

桁端部の漏水は、必ずしも伸縮装置からとは限らない。定期点検などにおいて、漏水を認識するのは、図3-12-19のような橋台天端の滞水や橋台の側面、前面における水の流下から、あるいは構造物の劣化から、連想される場合が多いと考えられる。前者には、水の由来が単に外に面した橋台天端に掛かった雨水が天端の横断勾配で桁下まで流れ込む場合も含まれる。パラペットを貫通するライフラインを伝ってパラペット背面の土中の水や路面水が流れ込む場合もある³⁴⁾。水道管等に見られる多量の結露水に由来する場合もある。伸縮装置を固定するための後打コンクリートの打継目に隙間ができると、それを伝って流れ落ちる路面水もある³⁴⁾。これらのうち、塩化物が含まれる可能性が高い路面水の漏水に注意を要する。

伸縮装置から漏れて主桁に掛かる路面水は、下方に向かって拡がる傾向が見られる³³⁾。また、勾配がきついと、遊間から流下した路面水が桁下面を伝って広範囲に拡がり、桁端部だけに留まらない。縦断勾配、横断勾配のきついRC床版橋で、下面の勾配の下流側で広い範囲にわたる劣化が見られた事例が報告されている⁴⁸⁾。



(a) 路面の外観と遊間の土砂詰まり³⁴⁾。樋がないにもかかわらず路面付近まで土砂が堆積。



(b) 下方から見上げて撮影。樋がない。櫛歯の下面が腐食している。

図 3-12-14 フィンガー形式の伸縮装置

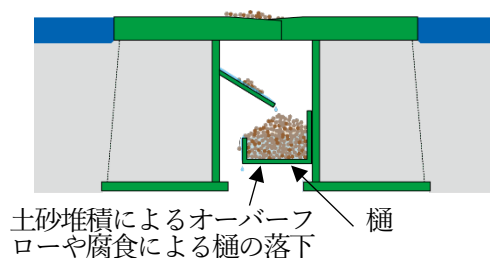


図 3-12-15 鋼製伸縮装置の樋と土砂堆積

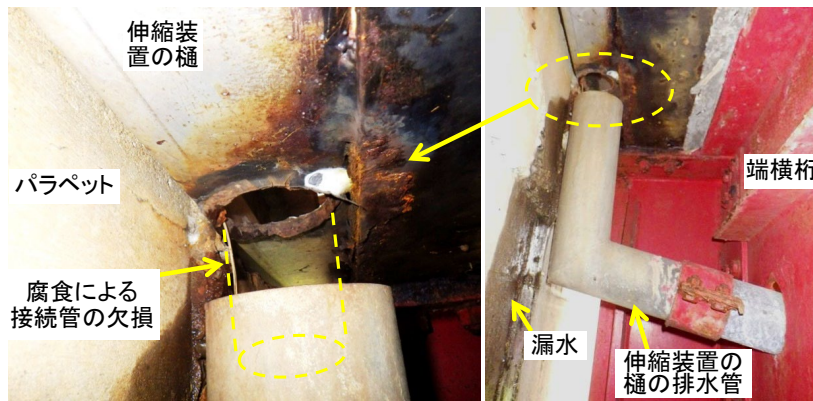


図 3-12-16 伸縮装置の樋の腐食、破損に伴う漏水



図 3-12-17 横断方向に不連続なゴム材

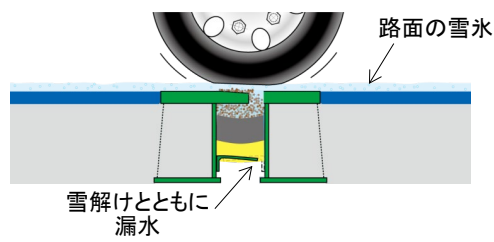


図 3-12-18 土砂や積雪の押し込みによる止水材の設置後の漏水（概念図）



図 3-12-19 伸縮装置の下面に設置された止水材やそのバックアップ材の隙間からの漏水



図 3-12-20 伸縮装置の止水材の落下と漏水、つらら
(後付けの止水材が部分的に外れて、垂れ下がっていた³⁰⁾)

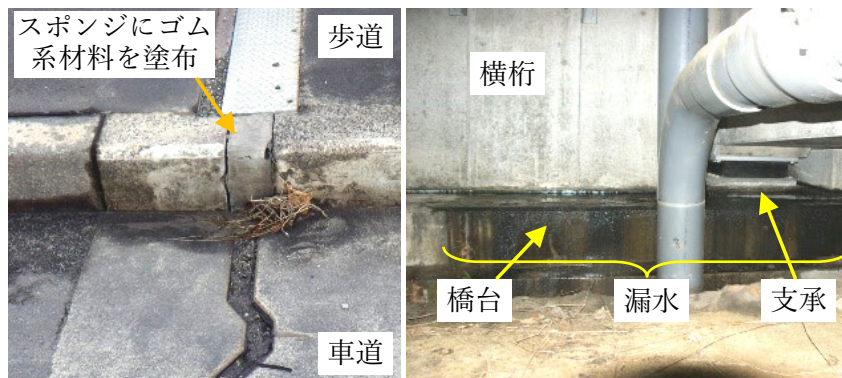


図 3-12-21 歩車道境界の止水ゴムの損傷(左)とその直下の桁端部の漏水(右)³⁴⁾

3.12.3 伸縮装置の漏水のメカニズムと措置方針

(1) 伸縮装置の漏水のメカニズムの例

伸縮装置からの漏水は、段差の発生箇所と同様に、伸縮装置の突合せ部、後打コンクリートと舗装（床版側）との界面、後打コンクリートとの舗装（土工部側）との界面から発生する可能性がある。

突合せ部からの漏水のうち、建設時のフィンガー型のまま非排水化されていない伸縮装置の場合については、前項の3.12.2(3)で述べた。建設時に鋼製樋が設けられていても、土砂が堆積して排水機能を早期に失い、塩化物が介在すると鋼製樋が腐食して孔が開いたり、樋の排水管が脱落したり、樋自体が落下してしまうことが起こり得る。路面からの塩水は、図3-12-3に示したように、そのまま容易に遊間に流下する。また、後付けで止水材を設置した場合の漏水についても3.12.2(3)で述べた。

図3-12-17に、ゴム製伸縮装置におけるゴム材の不連続の例を示した。伸縮装置の断面図で見た場合に止水できそうな場合であっても、横断方向の連続性がないために、漏水が容易に生じている事例が多く見られる。非排水型の伸縮装置が使用される以前も以後も、図3-12-21のような歩車道境界での伸縮装置の不連続やゴム製伸縮装置におけるゴム材の不連続が漏水の一因となる事例がある。

図3-12-21のように、歩車道境界に簡易な間詰が設けられている事例が多い。これと同様に、図3-12-22に示すように、地覆部にも同様の材料がよく用いられている。図3-12-23に、路面に露出する止水材の例と損傷の要因例を示す。この止水材は、伸縮装置の隙間にスポンジ等のバックアップ材を配置して、その表面に薄いゴム系塗膜等を塗布したものと考えられる。施工後は、薄いゴム膜に孔が開き、コンクリートとの間に隙間ができることで止水機能が比較的早期に失われた状態となっている。このゴム膜の紫外線に対する耐久性も懸念されるが、それ以前に、これらの設置箇所は、図3-12-23(b)、(c)に示すように、除雪や清掃などの路面管理の作業において、厳しい外力に曝される可能性が高く、ゴム膜の薄さから考えると、それらの外力に対する抵抗性はほとんど期待できない。

図3-12-24に、非排水型伸縮装置の施工と施工後の漏水事例を示す。施工から1年後に確認したところ、止水材の接続箇所付近からの漏水が認められた。既設橋においてRC床版を取り換えた際に、二次止水を有する非排水型伸縮装置を設置したが、片側通行規制のため、伸縮装置は上り線と下り線で分割施工することとなった。その際、現場での止水材の接続が必要となったが、同図に示したとおりの狭い空間での施工であったため、現場での止水材の接続が十分でなかったものと推察される。

図3-12-25に、打継目からの漏水の推定図を示す³⁴⁾。伸縮装置取り換え時の後打コンクリートの打継目の施工によっては、このような打継目からも漏水する可能性があると推察される。図3-12-26は、伸縮装置からの漏水だけでなく、パラペット背面の水が図3-12-27のようにライフラインの貫通孔を通じて流出したものも含まれ、それらが凍結したものである³⁴⁾。この場合、古い構造物でアプローチ部の舗装が著しく劣化していると、路面の塩水が滞水し、土中に浸漬している可能性がある。そのような場合は、背面からの漏水にも他の漏水と同様の配慮が必要と考える。



図 3-12-22 地覆部の止水材とき裂

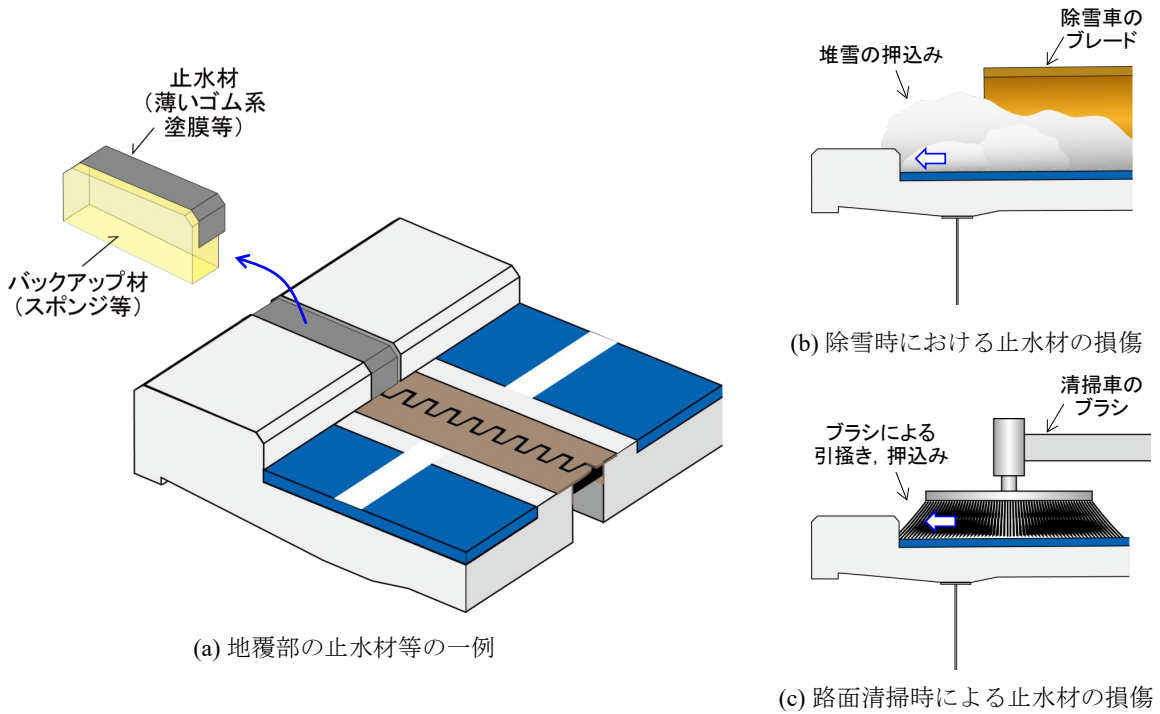


図 3-12-23 路面に露出する止水と損傷の要因例



伸縮装置取換えの施工途中
非排水型の止水ゴムの位置
(上：片側交通規制中の路面，下：止水材の断面)

伸縮装置取換え時の止水ゴム現場継手
からの漏水，取換えから1年後
(上：伸縮装置下面，下：橋台上)

図 3-12-24 既設橋における非排水型伸縮装置の施工と漏水事例

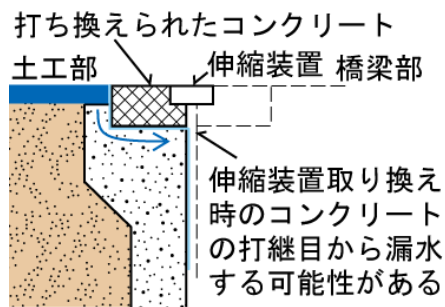


図 3-12-25 打継目からの漏水の可能性 (推定図) ³⁴⁾



図 3-12-26 伸縮装置からの漏水及び橋台背面からの流水の凍結（鋼橋の例）³⁴⁾

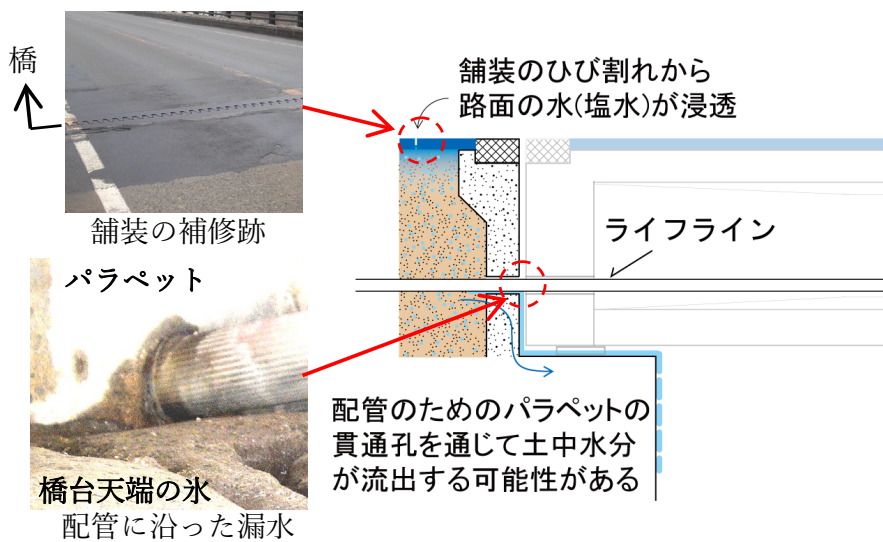


図 3-12-27 橋台背面からの漏水経路の想定図³⁴⁾

(2) 伸縮装置の漏水に対する措置方針

表 3-12-2 に、伸縮装置の漏水に関わる診断セットを示す。3.12.1(1) で述べたとおり、国道や自動車専用道路などにおいて凍結防止剤の散布量が増加した現在は、漏水は塩水ととらえて、早期に漏水を止める必要がある。地方自治体で管理される路線であっても、空港連絡道路のように凍結防止剤を多用する場合、同様の判断が必要である。このことから、同表では、漏水が見られた場合あるいは疑われる場合は、止水対策を行うとともに、伸縮装置の非排水化が直ちにできない橋については、応急処置を施すことが望ましい。

これまで沿岸部の橋における多数の腐食、塩害事例から、著しい腐食が生じる前に対策することがライフサイクルコスト（LCC）を軽減する上で重要であることが分かる^{例えば、31)}。道路橋特有の塩分環境の変化により、内陸部であっても鋼部材の腐食やコンクリート部材の塩害の件数が急増することが懸念される。またそれだけでなく、コンクリートの水平ひび割れや土砂化など、従来あまり見られなかった劣化形態も顕在化する可能性がある^{34)、49)51)}。劣化が発生する前に早期に桁端部の漏水対策に取り組まなければ、これらの劣化が全国の橋で多発し、事後対策に追われる可能性が十分にある。供用下で狭い空間において桁端部の漏水を止めることは必ずしも容易ではないが、開かれた空間の補修ですら難しいものをも手も入らぬ空間で実施することに比べれば、あるいは橋の広範囲に広がった劣化を補修することに比べれば、早期の漏水対策はまだ十分に実施可能な対策であると考えられる。

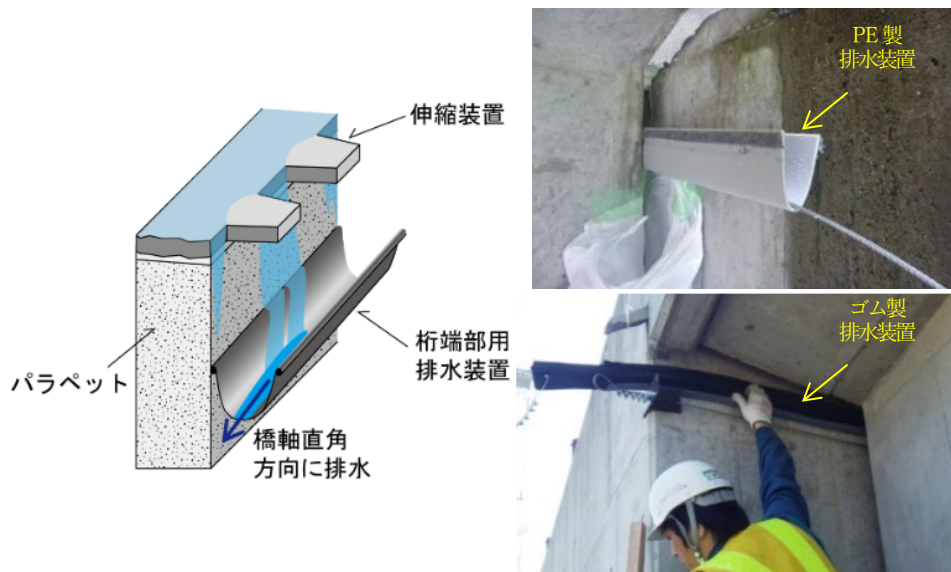
従来の桁端部の主な漏水対策は、非排水型の伸縮装置への交換であり、近年、止水効果も改善されつつあり、有効な工法であると考えられる。ただし、その交換には、通行規制が必要であるため関係機関との協議に時間を要し、また予算確保にも時間を要する。交換までに数年かかることもあり、ある路線で全橋を対象にすれば10年や20年かけても交換を達成できないこともあり得ると考えられる。このことから、伸縮装置を交換するまでの応急的な対策が必要である。

鋼橋においては、近年、応急的な対策として、簡易に取付けできる止水材や排水装置が開発され、徐々に普及している。また、伸縮装置のゴム部分を取り換える工法等も提示されている⁵²⁾。橋長が20～30mのコンクリート橋の場合は、遊間が狭く、手を入れる余地もほとんどないため、何らかの対策を行うという発想が出にくい状況にあったが、**図 3-12-28**のように、その狭い空間であっても、橋上の交通を規制することなく、橋の側方から設置可能な止水材や排水装置が開発されている^{34)、53)、54)}。

なお、次節で述べる既設道路橋の排水管の損傷や流末処理についても、塩化物を含む漏水に対する対応は概ね同様である。

表 3-12-2 伸縮装置の漏水に関わる診断セット

メカニズム	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	他の部材への影響
—	止水材のき裂、目地や継目の割れ、隙間	—	<ul style="list-style-type: none"> 橋台、橋脚に見られる流水または流水跡 バックアップ材の濡れ、漏水、つらら 	長寿命化 長寿命化（応急処置）	<ul style="list-style-type: none"> 止水材の交換（できる場合） 伸縮装置の交換 桁端部用排水装置の設置 樋の設置（鋼橋の場合） 	主桁端部付近の腐食、塩害等劣化
—	止水材の落下、欠損	—	<ul style="list-style-type: none"> 止水材の落下、欠損 橋台、橋脚に見られる流水または流水跡 	長寿命化 長寿命化（応急処置）	<ul style="list-style-type: none"> 止水材の交換（できる場合） 伸縮装置の交換 桁端部用排水装置の設置 樋の設置（鋼橋の場合） 	下部構造の塩害等劣化



(左：概念図、右上：ポリエチレン (PE) 製、右下：ゴム製)

図 3-12-28 コンクリート橋桁端部の狭い遊間に設置可能な排水装置^{34)、53)}

3.13 排水装置

3.13.1 一般

前節で述べたように、一般道においても道路橋の塩分環境が大きく変化しており、路面に散布された塩化物は、排水中に混入して橋本体に流下し、そのため鋼部材の著しい腐食やコンクリート部材の塩害を引き起こす事例が見られる^{例えば、55)}。図 3-13-1 に、路面に散布された塩化物の構造物への浸入経路を概念図で示す⁵⁶⁾。塩化物の浸入経路は、桁端部や床版上面からの水だけでなく、排水管の損傷や流末水の思わぬ方向への飛散が、橋本体の耐久性に影響する可能性がある。道路橋では、車両の走行安全性の観点から橋面上の雨水を速やかに排除するため、適切な排水が必要とされている⁵⁷⁾。それだけでなく、凍結防止剤散布量の増加とともに、橋の耐久性確保の観点から、適切な排水が一層重要になっている。その排水のために大きな役割を果たす排水管については、これまで流量計算に基づく内径や勾配の設計が行われる程度であり⁵⁸⁾、排水管自体の構造や耐久性の設計方法は明確に示されていないのが現状である。しかしながら、排水装置の損傷などに起因する漏水は、伸縮装置の漏水同様に、道路橋に甚大な影響を及ぼす可能性があることから、現状に応じて排水装置の適切な診断を行うことが道路橋本体の耐久性の確保に重要な意味を持つ。例えば、図 3-13-1 に示したように、鋼橋、コンクリート橋に限らず、箱桁内に配置した排水装置が万一損傷すると、内部に塩水のプールを形成して、橋梁本体の著しい損傷を招くとともに、本体の寿命を縮めかねない事態を引き起こす可能性がある。

また、流末水が構造物の劣化をもたらす。図 3-13-1 では、排水管の流末水が構造物にかかってしまう場合があることを示した。図 3-13-2 は、1961 年に建設された PC 橋で、外桁の近くに配置された排水管の末端が外桁の下フランジに近接していた。PC 鋼材の腐食に対する応急処置として、PC 桁の下フランジの一部に赤い塗装が施されていた。この橋のこの部分だけに PC 鋼材の腐食による露出が見られた（うき部分をはつり落とすと考えられる）。この橋は、日本海の海岸線から約 40km 内陸に位置しており、他の部位に図 3-13-2 と同様の塩害の症状は見られなかったことから、排水管からの塩水が影響を及ぼした可能性が高いと考えられた。一方、PC 鋼材の腐食は外桁の内側寄りのみで、かつ排水管の位置よりも支間中央側にやや離れた位置で見られた。図 3-13-2 の中に矢印で冬季の卓越風向を示す。橋軸が南北にほぼ平行であるのに対して、冬季の最大瞬間風速(4~7m/s 程度)の卓越風向は北北西の場合が圧倒的に多い箇所であった。このことから、内陸で季節風の程度が沿岸部ほど厳しくないとは言え、冬季の風と、排水管の末端の位置が主桁下面に近かったことから、流末水が飛散して主桁にかかってしまい、局所的に塩害が生じたものと推察される。なお、桁の外側は、雨水により比較的洗われ易いことも、塩害が外桁の内側寄りに限られていたことと関係していたと考えられる。

図 3-13-3 は、1965 年に建設された道路橋の桁端部の状況を示す。橋台にさび汁やひび割れが見られ、塩害やコンクリートのアルカリ骨材反応が疑われる。これらは、桁端部からの漏水によって生じていた可能性があると考えられる。写真を撮影した時点（2012 年）で、写真中①で示すとおり、元の排水管に塩化ビニル管（以下、塩ビ管）を接続して延長し、排水が上部構造や支承に直接かからないように配慮されていた。また、写真中②で示すとおり、桁端部に鋼製の樋が設置され、その排水が橋台前面に排水されるように配管さ

れていた。ただし、配水管①、②ともに、橋台前面から外側（写真では手前側）に若干離している程度であるため、流末水が風によって容易に橋台にかかるものと考えられる。

参考として、図3-13-4に、強風下における流末水の飛散状況を示す。冬季の季節風が厳しい、日本海沿岸部の道路橋でビデオ撮影を行った。撮影したのは11月末であったが、天候が悪く、平均風速10m/sを超える厳しい風が吹いていた。橋の周囲では、常時一定以上の風が吹いているにもかかわらず、多主桁の下では風が乱されるため、ときおり同写真の①のように、自然流下に近い状況が見られた。排水管の下端が斜めに切断されていると、自然流下では、水が垂直に落下する場合と、下端の角度に沿った方向に流れ落ちる場合（同写真の①）が交互に見られる。厳しい横風がある場合には、風向きに沿って同写真②～③のような流末水の側方への飛散が繰り返し見られた（①～③が繰り返された）。

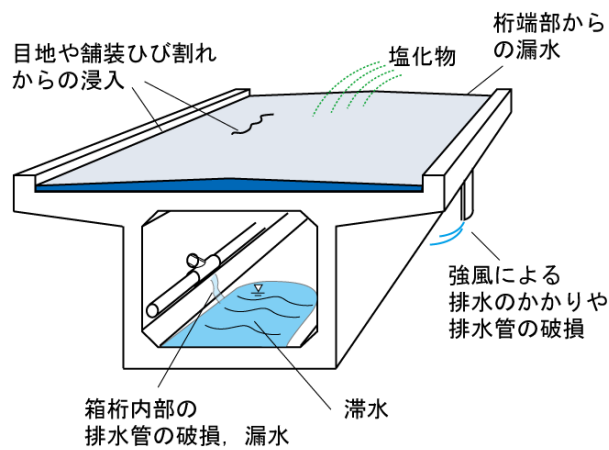


図 3-13-1 散布された塩化物の構造物への浸入経路（概念図）⁵⁶⁾



図 3-13-2 季節風により排水が主桁にかかり腐食した事例⁵⁶⁾



図 3-13-3 流末処理と下部構造の劣化⁵⁹⁾

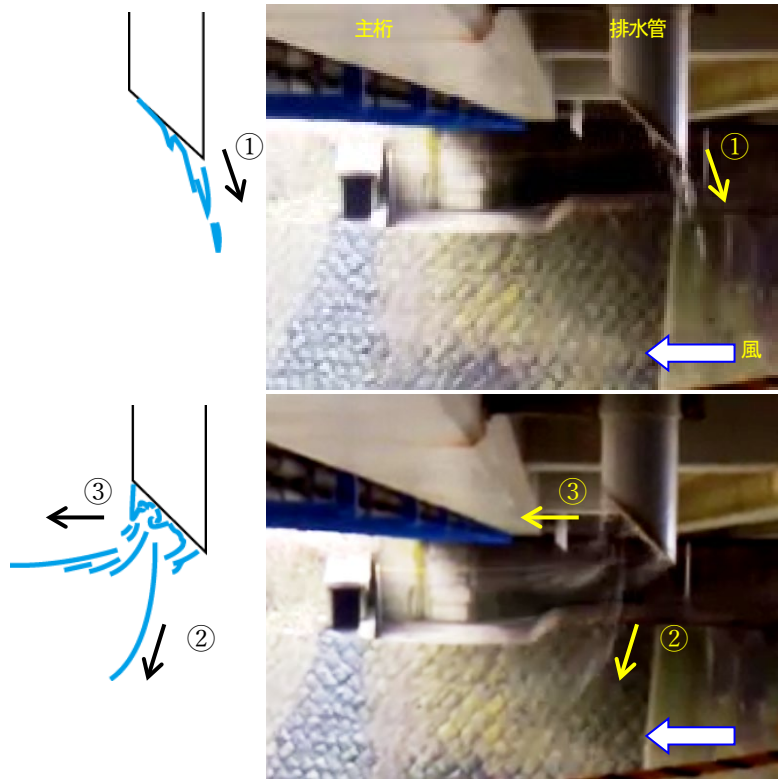


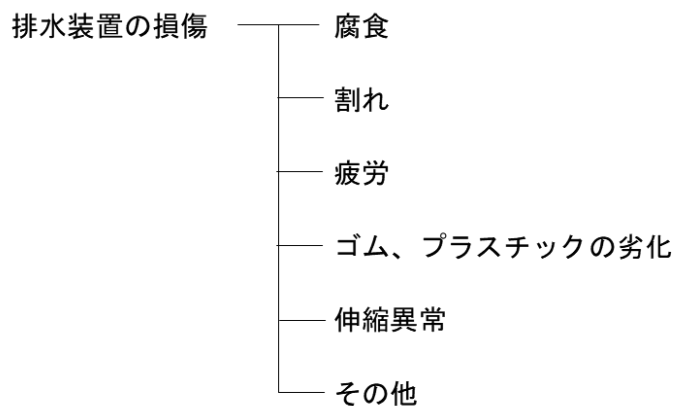
図 3-13-4 日本海沿岸部の季節風と排水の角度⁵⁹⁾

(2013年11月26日12時、近隣気象観測所の10分平均風速10.7m/s、最大瞬間風速18.1m/s、白矢印は風向を示す)

3.13.2 排水装置に生じる損傷

(1) 基本的な分類

図3-13-5に、道路橋の排水装置に生じる損傷の基本的な分類を示す。排水装置からの漏水をもたらす損傷として、(2)で腐食、(3)で割れについて述べる。なお、本文では、道路橋の排水装置に、排水管（普通鋼、ステンレス鋼、塩化ビニル樹脂（PV）、ポリエチレン樹脂（PE）、FRP）、床版水抜き孔や伸縮装置止水材からの排水管、路面排水装置、排水ますを含む。



注) 排水装置には、次のものを含む

排水管（普通鋼、ステンレス鋼、PV、PE、FRP）

床版水抜き孔や伸縮装置止水材からの排水管

路面排水装置

排水ます

図3-13-5 排水装置に生じる損傷の基本的な分類

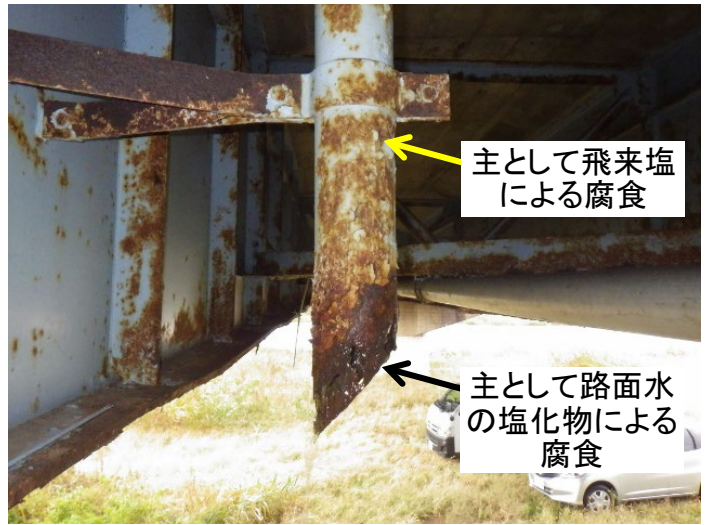
(2) 腐食

近年、耐食性の観点からプラスチック製やステンレス製の排水管が用いられる傾向にあるが、既設橋では鋼製排水管が使用されているものが多く現存している。鋼製排水管は、具体の仕様は必ずしも明確でないが、外面は本体と同様に塗装されており、水道管と同様に、管内面は樹脂などによってライニング処理されているものを用いていたと推察される。しかし、ある程度の防食処理はされていても、鋼桁と同様に腐食が生じる事例が少なからず見られる。図3-13-6に、道路橋における排水管の腐食事例を示す。同図(a)は、内陸の橋であり、内面からの腐食により排水管に貫通孔が生じていた事例である。凍結防止剤が散布される橋であり、路面からの塩水が管内に流下することにより、著しい腐食をもたらしたと考えられる。また、同図(b)は、東北地方の日本海から10km程度の内陸に位置する橋の事例である。塗装した主桁に腐食が見られるのと同様に、排水管の外面にも腐食が見られる。また、冬季に凍結防止剤も散布されることから、配管の下端付近は内面からの腐食による著しい断面欠損、貫通孔が見られた。

図3-13-7に、鋼製排水管の著しい腐食事例を示す。撤去が予定されていた橋で、塗装や排水管の維持管理は最小限にとどめられていたことから、より著しい腐食が見られた。鋼製の排水管は、外面は再塗装することができても、内面の再塗装は難しく、かつ当然ながら内面を伝って路面からの塩水が流下することから、主として内面側から腐食が進行したと考えられる。内面は、塩化物が付着しても、すぐに洗い流される機会が多いと考えられるが、塩化物が介在する腐食が一旦始めると、腐食が徐々に進行すると考えられる。



a) 排水管内部からの腐食



b) 排水管の内部と外部からの腐食

図 3-13-6 鋼製排水管の腐食の事例



図 3-13-7 鋼製排水管の著しい腐食事例⁵⁹⁾

(3) 割れ

図 3-13-8 は、排水管の継手部からの漏水や排水管の破損により、結果的に PC 箱桁の内部に路面からの塩水を引き込んでしまった事例である。内部に滞水した塩水は、やがてコンクリート部材の塩害を引き起こす一因となった⁵⁹⁾。図 3-13-9 は、排水管撤去後における、中間支点上のコンクリート隔壁内に埋め込まれた排水管内部の状況を示す。排水管の内部に塩化物を含む多量の土砂が堆積していた。図中に示す土中の塩化物イオン濃度は、乾燥土質量あたりに換算したものである⁶⁰⁾。0.38mg/g は他の事例⁶⁰⁾と比べて必ずしも大きい値ではなかったが、塩化物の混入を示す値であった。

図 3-13-10 に、排水管からの流末水が凍結して、排水管よりも太く長く成長した、つららの事例を示す。前日に降雨、降雪はなかったが、12 月中旬で既に路面に積雪があったため、凍結防止剤や昼間の気温上昇に伴う融雪水が排水管を流下して、凍結したものと考えられる。図 3-13-11 は、橋台前面付近に流末がある排水管で、やはり流末水が凍結した事例である。

両橋は 2000 年以降に建設された橋であり、比較的太い径のステンレス製排水管が使用されていたことから、排水管の割れには至らなかったが、例えば塩化ビニル樹脂製の排水管の場合には割れに至る可能性が高いと考えられる。また、いずれも流末での排水の凍結により、十分な排水が期待できない状況であった。図 3-13-10 のような状況では、風を受ける面積や固定部付近にかかる曲げモーメントのアーム長が増加し、かつ氷の重さが加わることによって、排水管やその固定具にかかる負荷が大きく変化すると考えられる。また、頻繁に厳しい風が吹く場合には、繰返しの負荷による影響も生じ得ると考えられ。



図 3-13-8 箱桁内部の排水管と継手部の損傷例^{55)、56)}

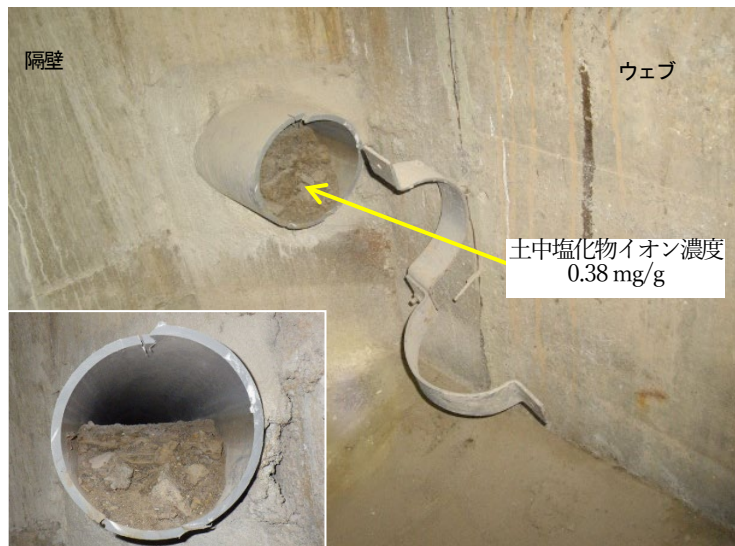


図 3-13-9 箱桁内部の排水管中の土砂堆積 (図 3-13-8 と同橋)⁵⁹⁾



図 3-13-10 流末水の凍結事例⁵⁹⁾
(12月中旬、前夜に降雨なし、最低気温-4℃)



図 3-13-11 橋台前面の流末水の凍結事例⁵⁹⁾
(2月下旬、前夜に降雨なし、最低気温-1℃)

3.13.3 排水装置の割れのメカニズムと措置方針

前項で述べたとおり、排水装置の割れは、複数の要因が考えられ、凍結時の作用のように、複合的な要因による可能性もあると考えられる。冬季の凍結や季節風による流末水の飛散など、点検時には気づきにくい点が多くあると考えられる。排水管の内部における土砂の堆積や腐食など、点検時に排水管の状況を直接観察することができない難しさもある。排水装置が置かれる応力状態やそれぞれの材料の強度特性なども明確にされていない部分が多い。

排水管に作用する外力としては、死荷重、温度変化、風、地震など、橋本体と同様の影響に加えて、排水管内の堆積物による荷重、活荷重による振動や排水の脈動などの影響も想定される。図3-13-8(下)に示した排水管の損傷の例では、損傷の外的要因として、次の点が考えられる。a) 橋と排水管の線膨張係数の違いによる伸縮量の差により継手強度以上の負荷がかかった。b) 図3-13-9に示したように、排水管中には堆積土と詰まった排水による重量増により継手強度以上の負荷がかかった。c) a)やb)に車両走行等による振動が加わった。d) a)やb)に地震の影響が加わった。これらを解明するには現地計測や解析などを行う必要があると考えられ、一般の橋でこれらを行うのは現実的でなく、重要な課題とはいえ予算的にも困難である。

表3-13-1に、排水装置からの漏水に関わる診断セットを示す。排水装置の割れのメカニズムを把握する以前に、まずは、伸縮装置からの漏水と同様に、点検等において排水装置からの漏水を発見した際に、応急処置を施すことが重要である。その上で、個々の橋で排水装置が損傷しやすい状況に置かれていないか、橋の構造との取り合いや、想定しない外力の可能性、過度の土砂詰まりのたたきによる調査などによって診断する必要がある。

膨大な数の既設道路橋の中には、ここで示した事例と同様の損傷や流末水のかかりを生じる可能性を持つ橋が少なからず現存していると考えられる。特に、凍結防止剤が散布される地域の橋での、箱桁の内部に引き込まれた排水管の損傷は、橋本体の耐荷力や寿命に著しい悪影響を及ぼすことを想定しておく必要がある。箱桁内に配置された排水管は、損傷が生じても直ちに発見されるとは限らないので、万一排水管の損傷が生じて、橋本体に重大な影響を及ぼさないような対策を施す必要がある。厳しい腐食環境に置かれる沿岸部のコンクリート道路橋の塩害対策では、コンクリート中の鋼材位置への塩化物イオンの浸入に対して二重三重の対策で対処することが重要である⁶¹⁾。凍結防止剤による塩害も、構造物に及ぼす影響、構造物の維持管理に及ぼす負担はほぼ同様であることから、路面からの塩水の排水において、塩化物が構造物に容易に接触しない複数の防備が必要であると考えられる。

表 3-13-1 排水装置からの漏水に関わる診断セット

メカニズム	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	他の部材への影響
凍結による排水不良	排水下端の凍結	冬季の写真	・排水口を塞ぐほどの凍結	長寿命化	・強度の高い排水管に交換 ・何らかの凍結対策	-
排水管内の滞水	-	-	-	長寿命化	・土砂詰まりによる場合は管内清掃	-
(滞水の)凍結	排水管のき裂、割れ	-	・凍結によるき裂、割れ	長寿命化 長寿命化(応急処置)	・排水管の交換 ・再劣化の可能性がある場合は原因除去または二重止水 ・テーピング ・構造物に塩水がかからないように仮設排水管を設置 ・塩水がかかる箇所に塗装(コンクリート桁の場合)	鋼桁の腐食 Co桁の塩害 下部構造の塩害等劣化

メカニズム	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	他の部材への影響
(風、交通振動などによる)疲労	排水管のき裂、割れ	-	・排水管にき裂、割れ ・排水管の折れ曲がり ・排水管から漏水	長寿命化 長寿命化(応急処置)	・排水管の交換 ・再劣化の可能性がある場合は原因除去または二重止水 ・テーピング ・構造物に塩水がかからないように仮設排水管を設置 ・塩水がかかる箇所に塗装(コンクリート桁の場合)	鋼桁の腐食 Co桁の塩害 下部構造の塩害等劣化
(同)疲労	排水管の欠損	-	・根元で折れて落下、消失	(応急処置)	・排水管の設置	-
-	固定金具のゆるみ、破損	-	・排水装置が固定されていない	長寿命化	・固定金具の交換	-
-	ジョイントの破損または外れ	-	・ジョイント部が破断または継手部品欠落	(応急処置)	・ジョイントの接続、交換	主桁の腐食、塩害等 下部構造の塩害等

メカニズム	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	他の部材への影響
伸縮異常*	排水管のき裂、割れまたは屈曲	-	・桁の伸縮や移動に対して追従できず、排水管にき裂、割れや折曲り	長寿命化 長寿命化(応急処置)	・配管の見直し ・再劣化の可能性がある場合は原因除去または二重止水 ・テーピング ・構造物に塩水がかからないように仮設排水管を設置 ・塩水がかかる箇所に塗装(コンクリート桁の場合)	鋼桁の腐食 Co桁の塩害 下部構造の塩害等劣化
伸縮異常*	継手の破損または外れ	-	・フレキシブルジョイント用ゴムが異常に変形	(応急処置)	・配管の見直し	-
伸縮異常	地震による主構造の変形等に伴う変形・破損	-	・主構造の変形や異常な移動量	(応急処置)	・主構造の補修後に配管の見直し	-

*) 地震等による遊間異常、固定不良等が影響している場合があり得る。

注) 箱桁内部では、特に「応急処置」の緊急性が高い。

参考文献

- 1) 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 点検 AI (床版の土砂化等) 開発グループ: 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報告書 (II-1) —非破壊検査技術を用いたコンクリート床版上面の滞水検知手法の開発—、共同研究報告書第 582 号、2023.
- 2) 国土交通省東北地方整備局: 東北地方における道路橋の維持・補修の手引き (案) 【改訂版】【参考資料】、2017.
- 3) 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.
- 4) 国土交通省道路局: 特定の条件を満足する溝橋の定期点検に関する参考資料、2019.
- 5) 国土技術政策総合研究所: 道路橋の定期点検に関する参考資料 (2013 年版) —橋梁損傷事例写真集—、国土技術政策総合研究所資料第 748 号、2013.
- 6) (社) 日本道路協会: 鋼道路橋防食便覧、2014.
- 7) 西川和廣、中野正則、安波博道、落合盛人、五島孝行、中島和俊: イオン透過抵抗法による耐候性鋼橋梁の異常さびの早期検出〜定期点検における健全度判定の信頼性向上を目指して〜、土木技術資料、59-4、pp.68-73、2017.
- 8) 山本亨介、村越潤、上仙靖: 橋梁点検データに基づく鋼 I 桁橋における主桁-横部材取合い部の疲労損傷事例の分析、鋼構造論文集、第 28 巻、第 112 号、pp.89-100、2021.
- 9) (社) 日本道路協会: 鋼道路橋疲労設計便覧、2020.
- 10) 牧山大祐、中村充: 鋼 I 桁のウェブギャップ板に発生する疲労き裂の進展速度分析、土木学会第 71 回年次学術講演会、I-399、2016.
- 11) 財団法人道路保全技術センター道路構造物保全研究会、橋梁点検ハンドブック、鹿島出版会、2006.
- 12) 吉岡勉、原田政彦、山口宏樹、伊藤信: 斜材の実損傷による鋼トラス橋の振動特性変化に関する一検討、構造工学論文集、Vol.54A、pp.199-208、2008.
- 13) ASR に関する対策検討委員会: アルカリ骨材反応による劣化を受けた道路橋の橋脚・橋台躯体に関する補修・補強ガイドライン (案)、2008.
- 14) 国土交通省道路局国道・技術課: 橋梁定期点検要領、2019.
- 15) 玉越隆史、佐々木一夫、木村嘉富、渡辺博志: アルカリ骨材反応により劣化した橋台の補修事例、土木技術資料、53-11、pp.50-51、2011.
- 16) 独立行政法人土木研究所: アルカリシリカ反応による損傷を受けたフーチングに対する損傷度評価および補修・補強方法に関する研究、土木研究所資料第 4304 号、2015.
- 17) 青山智之: アルカリシリカ反応により劣化した架道橋橋台の補修対策、日本鉄道施設協会誌、Vol.49、No.12、pp.57-59、2011.
- 18) 国土技術政策総合研究所: 道路構造物管理実務者研修(橋梁初級 I)道路橋の定期点検に関するテキスト、国土技術政策総合研究所資料第 829 号、2015.
- 19) 財団法人国土技術研究センター: 河川を横過する橋梁に関する計画の手引き (案)、2009.

- 20) (社) 日本道路協会：斜面上の深礎基礎設計施工便覧、2021.
- 21) 独立行政法人土木研究所：橋台の側方移動対策ガイドライン策定に関する検討（その2）、土木研究所資料第4174号、2010.
- 22) 七澤利明、宮原史、藤田智弘、猪股広典：近年の道路橋の洗掘被害を踏まえた国総研・土研の取組み、基礎工、Vol.50、No.6、pp.33-38、2022.
- 23) (公社) 日本道路協会：道路橋支承便覧、2019.
- 24) 江口康平、大住道生、菅原達也：ゴム支承用ゴムの耐オゾン性評価方法、土木技術資料、63-12、pp.44-47、2021.
- 25) 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所：凍害が疑われる構造物の調査・対策手引書（案）、2017.
- 26) 日本道路公団中国支社：鳥取県西部地震 災害報告書その7、2001、
https://www.pref.tottori.lg.jp/secure/237119/dourokoudan_saigaihoukoku_07.pdf（閲覧日：2022.11.16）
- 27) (社) 土木学会：道路橋支承部の改善と維持管理技術（鋼構造シリーズ17）、2008
- 28) (社) 土木学会：道路橋支承部の点検・診断・維持管理技術（鋼構造シリーズ25）、2016.
- 29) 木村恵子、曾根真理、並河良治、桑原正明、角湯克典：凍結防止剤散布と沿道環境、国土技術政策総合研究所資料第412号、2007.
- 30) 田中良樹、村越潤、石田雅博、吉田英二：道路橋桁端部の腐食環境調査～橋台、橋脚の調査事例～、土木技術資料、57-6、pp.36-41、2015.
- 31) 西川和廣、河野広隆ら：コンクリート橋のライフサイクルコストに関する調査研究—コンクリート橋の損傷状況と維持管理費の実態調査—、土木研究所資料第3811号、2001.
- 32) 田中良樹、村越潤、飯塚拓英：鋼道路橋桁端部の腐食断面欠損に対する当て板補強、土木技術資料、56-4、pp.40-45、2014.
- 33) (社) 日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧資料集、2010.
- 34) 村越潤、田中良樹、藤田育男、坂根泰、田中健司、植田健介：既設コンクリート道路橋桁端部の腐食環境改善への取組み、土木技術資料、55-11、pp.29-34、2013.
- 35) 渡辺暁央、小保田剛規、河野成弘：凍結防止剤による下部工の塩化物イオンの浸透性に関する考察、コンクリート工学年次論文集、30-1、pp.741-746、2008.
- 36) 田中良樹、玉越隆史：道路橋桁端部の漏水対策に向けて～路面排水下におけるコンクリートコアの凍害暴露試験～、土木技術資料、59-1、pp.52-53、2017.
- 37) 大和竹史、江本幸雄、添田政司：塩化物を含むコンクリートの凍結融解抵抗性、セメント技術年報、Vol.39、pp.126-129、1985.
- 38) 日本コンクリート工学協会、融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会報告、1999.
- 39) 建設省土木研究所、(社)鋼材倶楽部、(社)日本橋梁建設協会：耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書（XVIII）—全国暴露試験のまとめ（概要編）—、共同研究報告書第86号、1993.
- 40) (社) 日本道路協会：道路橋の塩害対策指針（案）・同解説、1984.
- 41) 田中誠：塗装さび鋼板のさび層構造と塗膜耐久性、防錆管理、34-11、pp.479-485、1990.

- 42) 村越潤、田中良樹、船木孝仁：鋼橋桁端部の腐食対策に関する研究、土木研究所資料第 4142 号、2010.
- 43) (社) 日本道路協会：道路橋伸縮装置便覧、1970.
- 44) 日本道路ジョイント協会：伸縮装置の設計ガイドライン、2019.
- 45) 日本道路ジョイント協会：橋梁用伸縮装置標準図集 第VI集、2000.
- 46) 国土技術政策総合研究所、土木研究所：平成 28 年（2016 年）熊本地震土木施設被害調査報告、国土技術政策総合研究所資料第 967 号・土木研究所資料第 4359 号、2017.
- 47) 上関大橋復旧検討会議：上関大橋復旧検討会議報告書、2021.
(<https://www.pref.yamaguchi.lg.jp/soshiki/128/142697.html>、閲覧日：2022.6.16)
- 48) 本荘清司、上東泰、井手上文雄、丸屋剛、谷口秀明、宮川豊章：内部塩分と凍結防止剤により劣化した RC 中空床版橋への劣化予測に基づく計画的維持管理の適用、土木学会論文集、No. 774、p. 99-110、2004.
- 49) 村越潤、田中良樹：道路橋鉄筋コンクリート床版の劣化形態の多様化と防水対策、土木施工、55-6、pp. 68-71、2014.
- 50) 田中良樹、石田雅博、村越潤：道路橋における凍結融解と ASR の影響を受けたコンクリートの劣化調査、土木学会論文集 E2、72-3、pp. 214-233、2016.
- 51) 国土交通省道路局国道・技術課、国土技術政策総合研究所、東北地方整備局、北陸地方整備局、中部地方整備局、九州地方整備局、北海道開発局、国立研究開発法人土木研究所：道路橋コンクリート床版の土砂化対策に関する調査研究、土木研究所資料第 4398 号、2020.
- 52) 国土交通省道路局：道路行政の技術開発ニーズ一覧、[https:// www.mlit.go.jp/road/tech/donyu/index.html](https://www.mlit.go.jp/road/tech/donyu/index.html)、2022.
(閲覧日：2022.4.26)
- 53) 村越潤、田中良樹、高橋実：既設道路橋における鋼部材の腐食と技術開発、土木技術資料、58-6、pp. 12-15、2016.
- 54) (社) 日本道路協会：道路橋補修・補強事例集 2012 年版、2012.
- 55) 玉越隆史、平賀和文、木村嘉富：PC 鋼材の腐食損傷への対応事例—妙高大橋のグラウト未充填と鋼材腐食の調査—、土木技術資料、54-5、pp.50-51、2012.
- 56) 木村嘉富、田中良樹：塩害に対する PC 道路橋の維持管理と設計へのフィードバック、プレストレストコンクリート、52-2、pp.43-48、2010.
- 57) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編、2012.
- 58) 高津和義、長谷川和夫：橋梁部の排水設計、橋梁と基礎、20-8、pp.91~95、1986.
- 59) 田中良樹、村越潤：道路橋の排水装置に関する調査—腐食環境の改善に向けて—、土木技術資料、58-7、pp. 52-55、2016.
- 60) 田中良樹、村越潤：道路橋桁端部における腐食環境の評価と改善方法に関する検討、土木技術資料、50-11、pp.16~19、2008.
- 61) 国土交通省土木研究所、プレストレスト・コンクリート建設業協会：ミニマムメンテナンス PC 橋の開発に関する共同研究報告書 (III) —PC 橋の塩害対策に関する検討—、共同研究報告書第 270 号、2001.

第4章 橋梁診断支援AIシステム

4.1 橋梁診断支援AIシステムの概要

4.1.1 システムの処理の流れ

橋梁診断支援AIシステム（以下、「診断AIシステム」という）は、診断結果の理由を第三者に説明可能なものとするために、共同研究参加者及び招へい研究員で作成した診断セットと診断のプロセスを基に診断のフローチャートを作成し、処理フローに沿って入力情報を処理するエキスパートシステムとした。

システム処理の考え方と流れを図4-1-1に示す。診断のプロセスごとに情報源（橋梁諸元・各種履歴、点検調査書、現地調査、前回調査との比較など）から抽出した情報と予め用意した損傷の診断セット情報を照合して、損傷の種類、進行度や進展の推定、措置方法などを推定する方法をとっている。具体的には、まず、台帳データ（橋梁形式、供用年、設計基準、交通量等）、今回の点検データ（所見、損傷が疑われる部材、部位、変状等）、カルテデータ（前回までの所見、補修履歴等）などの情報からデータを入力し、直ちに措置が必要な変状の有無の情報などがあれば緊急対策の必要性を判断した後、疑いのある損傷候補を抽出する。必要に応じて、システムが損傷を特定するために必要な追加情報を提案し、管理者が詳細調査を実施する。ここまでで得られた情報をもとに損傷及び原因を特定するとともに、損傷の進行度（状態）の推定及び損傷の今後の進展度合いの推定を行った後、措置方針を含めた診断結果を出力し、措置の実施内容等をカルテに保存する。このように診断AIシステムにおける処理の分岐条件については診断セットの内容をもとに設定している。

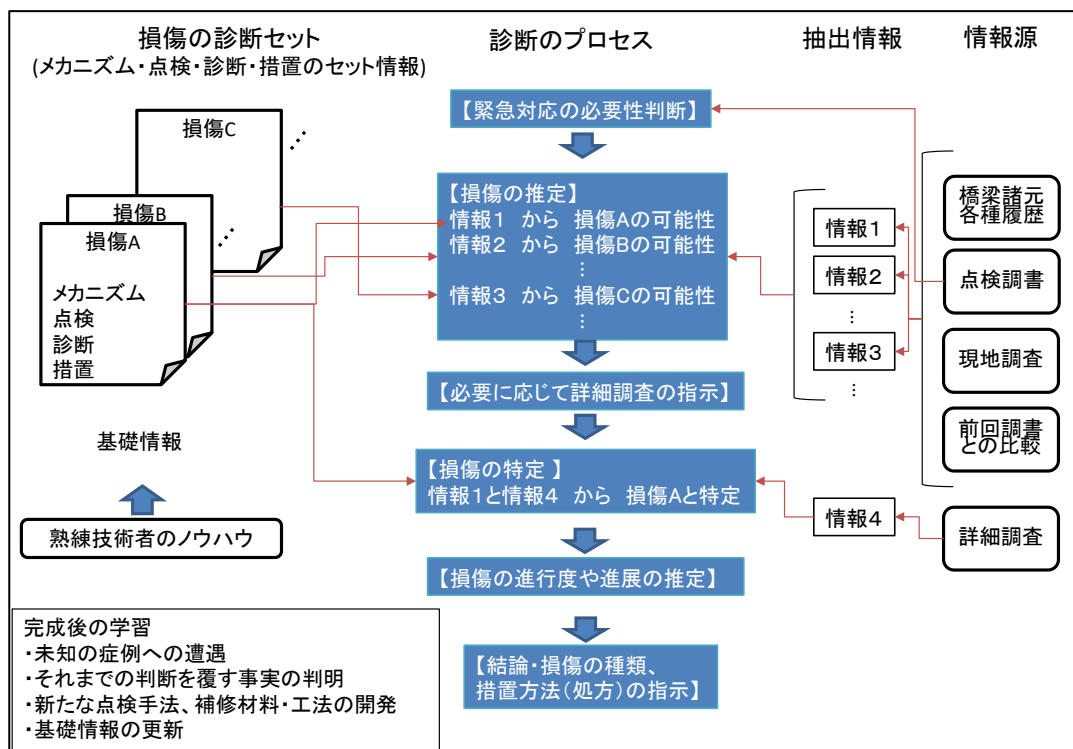


図4-1-1 診断AIシステムの考え方と流れ

システム上での情報入力から結果出力までの流れを図4-1-2に示す。まず、対象とする橋梁の診断に必要な諸元情報等をシステムに登録する。次に、その橋梁の点検で得られた情報を入力することで、まずそこで、入力情報をもとに緊急対策の必要性が出力される。また、同様に可能性として考えられる損傷も出力される。次に疑いのある損傷を特定するための詳細調査が提示されるので、それに従って調査結果を入力する。今までに入力した情報をもとに、損傷及び原因と損傷の進行度の推定結果が出力される。最後に、前回の点検情報との比較により、損傷の進行が確認されるかどうかを入力することによって、最終的なアウトプットである損傷とその原因、損傷の進行度の推定結果、損傷の進展の推定結果、措置方針がまとめて出力される。

供用中の道路橋に生じる損傷や影響因子、さらには変状の種類やパターンは多岐にわたり、生じる可能性がある症例の全てを網羅することは難しい。そのため、発生が多く報告されている症例から順にシステム化をしており、現時点でのシステムで対応できないものも存在する。システムは、あくまで一般的な症例に対する案を提示し、また、不明なものは不明と提示し、最終的には人が判断するという使い方を想定している。

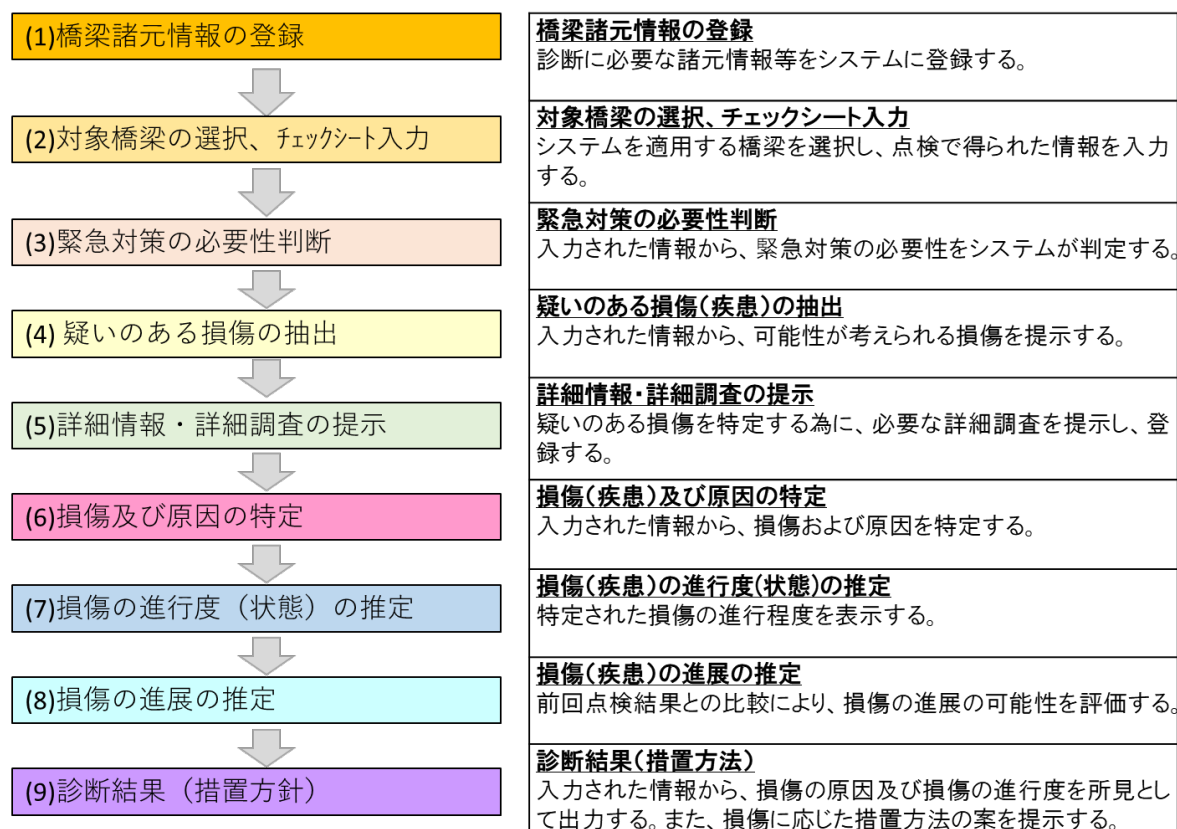


図4-1-2 情報入力から結果出力までの流れ

次に、診断 AI システムの画面の例を示す。図 4-1-3 は点検情報を入力する画面である。まず、点検の対象とする部材を選択する。その選択に合わせた診断に必要な項目が現れ、点検で得られた情報を選択していく。点検で得られた情報について記録を残す必要がある場合は、写真も登録することができる。

チェックシート

諸元情報の入力
点検結果の入力

対象部材を選択

R/C床版
主桁(床版橋)
支承
橋台・橋脚・基礎
伸縮装置・排水装置

共通
疲労
土砂化1
土砂化2
土砂化3
土砂化4
塩害1
塩害2

橋梁管理番号	000201	径間番号	1	点検年度	2021
名称	鳴瀬大橋	径間分割番号	0	(西暦)	

診断セットから抽出した診断に必要な項目

連続的な角欠け
舗装の異常箇所直下に著しい漏水・遊離石灰
格子状（亀甲状）のひびわれ
走行性に影響を与える舗装の異常
鉄筋の著しい腐食
第三者被害が懸念される箇所とうき
橋軸直角方向ひびわれ
橋軸方向ひびわれ幅0.2mm以上
複数の閉じたブロックを形成

点検で得られた情報を選択

	今回			前回（参考）		
連続的な角欠け	<input type="radio"/> 有り	<input type="radio"/> 無し	<input type="radio"/> 不明	<input type="radio"/> 有り	<input type="radio"/> 無し	<input type="radio"/> 不明
舗装の異常箇所直下に著しい漏水・遊離石灰	<input type="radio"/> 有り	<input type="radio"/> 無し	<input type="radio"/> 不明	<input type="radio"/> 有り	<input type="radio"/> 無し	<input type="radio"/> 不明
格子状（亀甲状）のひびわれ	<input type="radio"/> 有り	<input type="radio"/> 無し	<input type="radio"/> 不明	<input type="radio"/> 有り	<input type="radio"/> 無し	<input type="radio"/> 不明
走行性に影響を与える舗装の異常	<input type="radio"/> 有り	<input type="radio"/> 無し	<input type="radio"/> 不明	<input type="radio"/> 有り	<input type="radio"/> 無し	<input type="radio"/> 不明
鉄筋の著しい腐食	<input type="radio"/> 有り	<input type="radio"/> 無し	<input type="radio"/> 不明	<input type="radio"/> 有り	<input type="radio"/> 無し	<input type="radio"/> 不明
第三者被害が懸念される箇所とうき	<input type="radio"/> 有り	<input type="radio"/> 無し	<input type="radio"/> 不明	<input type="radio"/> 有り	<input type="radio"/> 無し	<input type="radio"/> 不明
橋軸直角方向ひびわれ	<input type="radio"/> 有り	<input type="radio"/> 無し	<input type="radio"/> 不明	<input type="radio"/> 有り	<input type="radio"/> 無し	<input type="radio"/> 不明
橋軸方向ひびわれ幅0.2mm以上	<input type="radio"/> 有り	<input type="radio"/> 無し	<input type="radio"/> 不明	<input type="radio"/> 有り	<input type="radio"/> 無し	<input type="radio"/> 不明
複数の閉じたブロックを形成	<input type="radio"/> 有り	<input type="radio"/> 無し	<input type="radio"/> 不明	<input type="radio"/> 有り	<input type="radio"/> 無し	<input type="radio"/> 不明

変状写真を登録可能

写真
写真
写真
写真
写真
写真
写真
写真
写真

図 4-1-3 点検情報入力画面の例

図4-1-4は損傷の進行度(状態)の推定結果の出力画面の例である。まず、対象とする橋梁の諸元情報、点検情報、詳細調査の結果などを入力することで、システムが診断セットに基づいて判定した損傷とその進行度(状態)を出力する。進行度(状態)は、その損傷ごとに図解したものが示されており、推定された損傷の進行度(状態)はオレンジ色で着色される。

Inspection Photo 位置図 全景写真 一般図 状況写真 損傷図

(7) 損傷の進行度(状態)の推定

橋梁管理番号: 000101 径間番号: 5 径間分割番号: 0

床版 主桁(床版橋) 支承 橋台・橋脚・基礎 伸縮装置・排水装置

疲労 土砂化1 土砂化2 土砂化3 土砂化4 塩害1 塩害2

基礎データ

諸元情報

No.	データ項目	値
1	床版種類使用形式	場所打床版
2	床版材料	コンクリート系
3	架設竣工年	1951
4	大型車交通量	537

点検情報(今回)

No.	データ項目	値
1	橋軸直角方向ひびわれ	有り
2	橋軸方向ひびわれ幅0.2mm以上	有り
3	格子状(亀甲状)のひびわれ	無し
4	複数の閉じたブロックを形成	無し

点検情報(前回)

No.	データ項目	値
1	橋軸直角方向ひびわれ	無し
2	橋軸方向ひびわれ幅0.2mm以上	無し
3	格子状(亀甲状)のひびわれ	無し
4	複数の閉じたブロックを形成	無し

状態の特定と措置方針

損傷の進行度

①

床版下面のひび割れ

②

床版下面のひび割れ

③

床版下面のひび割れ

④

床版下面のひび割れ

⑤

床版下面のひび割れ

⑥

床版下面のひび割れ

図4-1-4 損傷の進行度(状態)の推定結果の出力画面の例

図 4-1-5 は診断結果（措置方針）の出力画面の例である。今まで入力した情報を基に、損傷及び原因、損傷の進行度（状態）の推定結果、損傷の進展の推定結果、措置方針（案）が出力される。損傷及び原因の特定に対する根拠についても一緒に提示されるため、システム利用者は診断に至った理由を把握することが可能である。

(9) 診断結果（措置方針）

橋梁管理番号：000101	径間番号：3	径間分割番号：0
---------------	--------	----------

RC床版	主桁(床版橋)	支承	橋台・橋脚・基礎	伸縮装置・排水装置
------	---------	----	----------	-----------

損傷及び原因

格子状（亀甲状）のひびわれが広範囲で発生していることから、輪荷重の繰り返し作用を原因とする「疲労」であると考えられます。車線部の床版上面が常に滞水し、土砂化が発生していることから、「土砂化（輪荷重による破砕）」であると考えられます。疑いのある損傷に「海砂による塩害」はありません。

損傷の進行度（状態）の推定

【疲労】格子密度が飽和状態に達し、損傷発生範囲も広範囲で、曲げひびわれが床版全厚を貫通しているため、「状態⑥」と考えられます。
【土砂化1 輪荷重による破砕】舗装下面が滞水している可能性があり、土砂化が床版深部に及んでいることから、「状態⑤」と考えられます。

損傷の進展の推定

前回の点検時と今回の点検時を比較すると、損傷の進行が確認されませんでした。

措置方針(案)

- ひびわれ密度が飽和し貫通ひびわれが増加した段階で、路線重要度が高い場合には床版取替が望ましい。
- 走行性に影響を与える舗装の異常が発生している場合には通行規制が必要となる。
- 補修箇所の再劣化が頻発し、路線重要度も高い場合には、床版取替が望ましい。
- 漏水・遊離石灰が確認された場合、または床版防水がされていない場合には床版防水工を追加する。床版下面に漏水・遊離石灰が発生していない場合には、床版防水の実施優先度は低いと考える。

損傷の原因や進行状態、措置方針案について、根拠を付けて出力

追加情報の入力	カルテに保存	矛盾、未解決のため再検討
---------	--------	--------------

図 4-1-5 診断結果（措置方針）の出力画面の例

4.1.2 システムの使用例

診断AIシステムの使用例としては次の通りを想定している。まず、点検現場に行く前に台帳データ、カルテデータ、前回点検データなどの情報をシステムに入力しておく。次に、現場に行き、事務所で入力した情報に基づき、診断で必要となる入力項目がシステム上に表示されるため、それに従い、現地で橋の状態を見ながら情報を入力する。情報の入力が完了したら、現場でも事務所でも診断結果を出力することができる。

そのため、診断AIシステムは、システムをインストールしたタブレット型PCを直接現場に持ち込み、その場でタブレットに表示される項目を確認しながら入力できるように構築した（写真4-1-1、写真4-1-2）。



写真4-1-1 タブレット型PCにインストールした診断AIシステム



写真4-1-2 現場でのシステム使用状況

4.1.3 診断結果の出力以外の付加機能（点検調書の出力）

地方公共団体の点検診断業務の省力化を図るために、地方公共団体が点検診断結果を記録する際に参考とされている様式¹⁾を出力する機能を付加した（図4-1-6）。ただし、システムに入力した橋梁の情報から出力されるため、例えば、様式1であれば、橋梁の諸元情報は出力されるが、部材ごとの判定区分や変状の種類、橋梁の健全性の判定区分や所見などは現時点では出力されない（図4-1-7）。様式2であれば、部材、径間ごとの損傷写真は出力されるが、その判定区分までは現時点では出力されない（図4-1-8）。



図4-1-6 点検調書出力画面



図4-1-7 様式1の出力画面の例



図 4-1-8 様式 2 の出力画面の例

4.1.4 システムの開発状況

発生が多く報告されている症例から順に診断セット及びフローチャートを作成し、それを基にシステム開発を行っている。システム化したものから順次、システムのロジックの妥当性や使用性を検証するための現場検証を行った。その検証結果に基づき、システムを改善するとともに、システムの対象部材を拡大していくことで、令和3年度までに、対応可能な症例が限定されているが、床版橋、桁橋、トラス橋など橋種の約9割を対象とする診断AIシステム Ver.1.0を開発した(図4-1-9)。それと同時に、本システムを普及させるための機能要件(案)についても整理した。機能要件(案)については次章で記述する。

引き続き、点検調書等を活用したシステムの実出力結果の検証や、実際の橋梁を対象としたシステムの使用性の検証などを行い、実運用に向けた課題を見つけてシステムの改善を図るとともに、システムの対象部材、損傷を拡大することとしている。

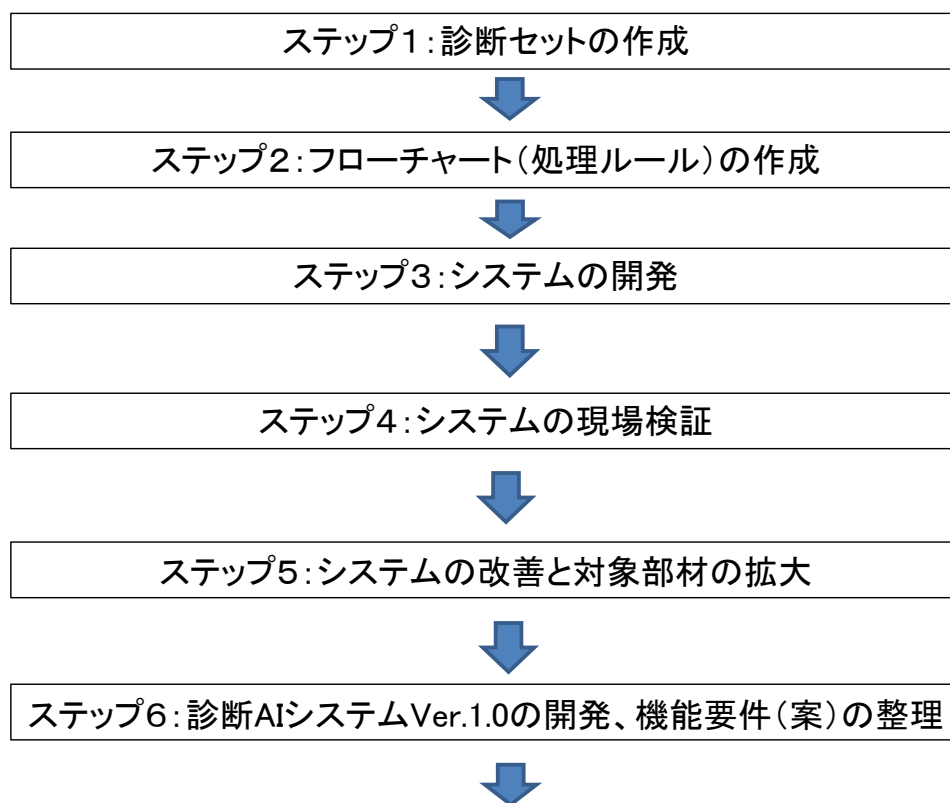


図4-1-9 診断AIシステムの開発の流れ

4.2 橋梁診断支援AI システムの検証

4.2.1 RC 床版を対象にした検証

診断 AI システムの出力結果の妥当性の検証と診断 AI システムの使用性に関する改善点の抽出を目的に、共同研究参加者及び招へい研究員が現場まで行き、実際の橋梁の状態を見ながら、システムに情報を入力し、共同研究者及び招へい研究員（以下、診断技術者という）の診断結果とシステムの出力結果を比較することで診断結果の妥当性を確認した上で、システムの説明性や使用性に関する意見を収集した。

対象橋梁を表 4-2-1 に示す。令和 2 年に茨城県管理の H 橋と東北地方整備局管理の N 橋を対象にシステムの検証を行った。この時はまだシステムが RC 床版と床版橋までしか対応していないため、どちらも RC 床版を対象とした検証を行っている。

表 4-2-1 対象橋梁

橋梁名	管理者	検証対象
H 橋	茨城県	RC 床版
N 橋	東北地方整備局	RC 床版

(1)H 橋の検証概要

H 橋の橋梁情報、現況写真等、側面図をそれぞれ表 4-2-2、図 4-2-1、図 4-2-2 に示す。H 橋は 1951 年に供用した橋長 110m の 5 径間連続鋼ゲルバー桁橋である。現場に行く前に点検調書 (H30) を確認し、特にひび割れ等の変状が確認されている第 1 径間 (図 4-2-3) と第 5 径間 (図 4-2-4) を今回の検証の対象にした。

橋梁諸元情報は事前に道路管理者から入手した情報を記入しており、検証当日は点検情報として直視で確認できる項目をチェックし、ひび割れ幅等の直接近接目視で確認できない項目は周囲の状況から想定してチェックした (図 4-2-5、図 4-2-6)。また、RC 床版の診断セットを参照しながら、診断結果記入様式に総合所見、損傷及び原因、損傷の進行度、措置方針 (案) を記入し、診断技術者の診断結果と診断 AI システムからの出力結果を比較した (図 4-2-7)。さらに、診断結果の説明性やシステムの使用性についてアンケートにより意見を収集した (図 4-2-8)。

表 4-2-2 H 橋の橋梁情報

名称	H 橋
管理者	茨城県
路線名	日立笠間線
供用年	1951 年
上部構造	5 径間連続鋼ゲルバー桁橋
橋長	110m
径間数	5 径間
幅員	有効幅員 5.5m (全幅員 6.3m)
交通量	大型車 416 台/12h
備考	飛来塩分の影響なし 凍結防止剤の散布あり 床版防水工無し

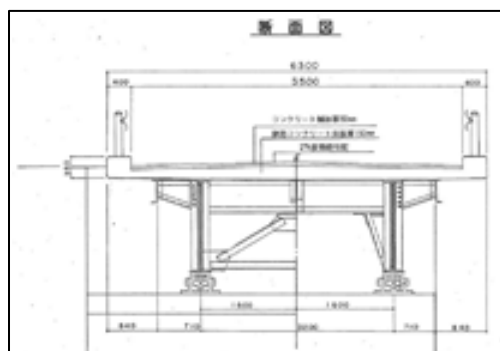


図4-2-1 H橋の現況写真など

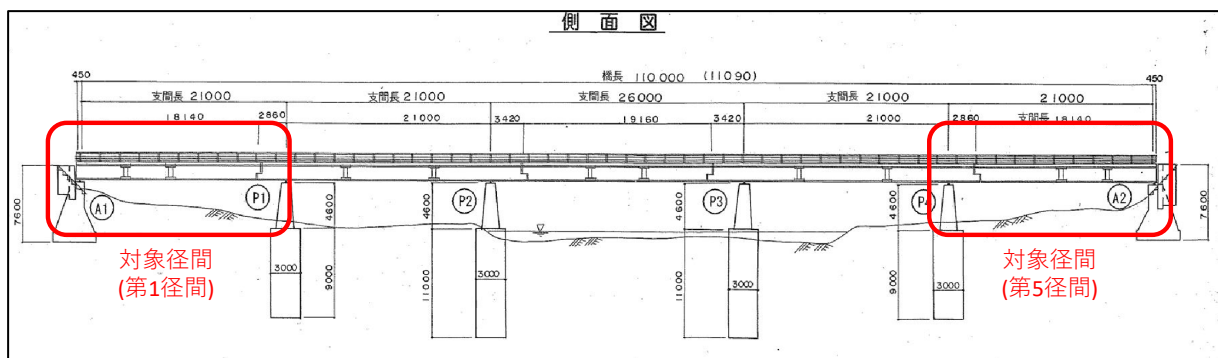


図4-2-2 H橋の側面図

チェックシート (橋梁諸元情報)					
橋梁管理番号	000101	上部工形式	鋼ゲルバー桁	塩害地域区分	D
橋梁名	H橋	下部工形式	重力式橋台、壁式橋脚	海岸からの距離[m]	6,000 m
路線名称	日立笠間線	基礎形式	直接基礎、ケーソン基礎	卓越する風向	無し
架設竣工年	1951 年	交通量昼夜24時間	5969 台	橋の陸側の地形	無し
管理者	茨城県	大型車混入率	9 %	冬期平均最低気温	-2 °C
事務所		大型車交通量	537 台	凍結防止剤の散布の有無	<input checked="" type="checkbox"/> 有/ <input type="checkbox"/> 無
出張所	-	防水工有無	<input type="checkbox"/> 有/ <input checked="" type="checkbox"/> 無	隣接橋	<input type="checkbox"/> 有/ <input checked="" type="checkbox"/> 無
橋長	110 m	床版防水工の仕様	-	床版種類	場所打床版
総径間数	5 径間	床版防水実施年度	-	床版材料	コンクリート系
適用示方書	S 1 4 道示	架橋状況	河川・開水路・湖沼	床版補修履歴	-

図 4-2-5 チェックシート (橋梁諸元情報)

チェックシート (点検情報)			
橋梁管理番号	キーコード	径間番号	点検年月日 (西暦)
名称		総径間数	点検者 (所属・氏名)
連続的な角欠け	<input type="checkbox"/> 有 / <input type="checkbox"/> 無	床版下面、排水ます周辺から漏水・遊離石灰	<input type="checkbox"/> 有 / <input type="checkbox"/> 無
舗装の異常箇所直下に著しい漏水・遊離石灰	<input type="checkbox"/> 有 / <input type="checkbox"/> 無	舗装の異常 (はがれ、ポットホール、蜘蛛の巣状のひびわれ)	<input type="checkbox"/> 有 / <input type="checkbox"/> 無
格子状 (亀甲状) のひびわれ	<input type="checkbox"/> 有 / <input type="checkbox"/> 無	舗装の異常が発生している箇所で土砂が噴出	<input type="checkbox"/> 有 / <input type="checkbox"/> 無
走行性に影響を与える舗装の異常	<input type="checkbox"/> 有 / <input type="checkbox"/> 無	舗装の補修箇所の再劣化	<input type="checkbox"/> 有 / <input type="checkbox"/> 無
鉄筋の著しい腐食	<input type="checkbox"/> 有 / <input type="checkbox"/> 無	他の部位での凍害に特徴的な損傷	<input type="checkbox"/> 有 / <input type="checkbox"/> 無
第三者被害が懸念される箇所にうき	<input type="checkbox"/> 有 / <input type="checkbox"/> 無	下部構造や近隣の構造物にASRを原因とする変状	<input type="checkbox"/> 有 / <input type="checkbox"/> 無
橋軸直角方向ひびわれ	<input type="checkbox"/> 有 / <input type="checkbox"/> 無	ひびわれ周辺に白色の析出物 (ゲル) の発生	<input type="checkbox"/> 有 / <input type="checkbox"/> 無
橋軸方向ひびわれ幅0.2mm以上	<input type="checkbox"/> 有 / <input type="checkbox"/> 無	前回点検時から白色の析出物や亀甲状ひびわれの進展	<input type="checkbox"/> 有 / <input type="checkbox"/> 無
複数の閉じたブロックを形成	<input type="checkbox"/> 有 / <input type="checkbox"/> 無	下側鉄筋に沿ったひびわれの発生	<input type="checkbox"/> 有 / <input type="checkbox"/> 無
鉄筋間隔程度 (概ね15~20cm) の間隔で ひびわれが発生している箇所を複数確認	<input type="checkbox"/> 有 / <input type="checkbox"/> 無	剥離・鉄筋露出、うきの発生	<input type="checkbox"/> 有 / <input type="checkbox"/> 無
		床版下面の断面修復箇所の再劣化	<input type="checkbox"/> 有 / <input type="checkbox"/> 無

図 4-2-6 チェックシート (点検情報)

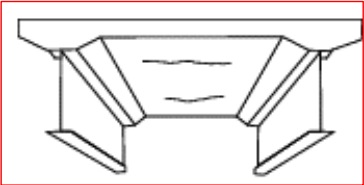
径間番号	1 or 5	部材名	床版	部材番号	00
変状図 (ポンチ絵)	<p>※診断の決め手となる変状のポンチ絵</p>  <ul style="list-style-type: none"> ・一方向ひびわれが主 ・ひびわれ間隔〇m ・漏水・遊離石灰を伴う 				
総合所見	△△を原因とした床版ひびわれが発生している。供用開始より〇年経過しており、損傷の進行度は早くないと推定されるが、長寿命化の観点より、対策（〇〇工法）を実施することが望ましい。				
損傷及び原因	●●（要因）による■（変状）が広範囲（位置や範囲）で発生していることから、▲▲を原因とする◆◆（損傷）であると考えられる。				
損傷の進行度	診断セットの◆◆（損傷）の状態（①～⑥）にあると推定される。前回点検（点検調書）に対して、損傷の進展はみられない。				
措置方針（案）	措置方針：長寿命化 or 延命 or 危機管理 工法例：具体の工法例				

図4-2-7 診断結果記入様式

立場	視点1：診断結果について	視点2：診断システムの使い勝手
管理者用	<p><問い></p> <ul style="list-style-type: none"> ・第三者に対して論理的に診断結果や措置方針を説明出来るかどうか？ <p><コメント></p>	<p><問い></p> <ul style="list-style-type: none"> ・現在の点検・診断業務を支援するツールとして、利用可能か？ <p><コメント></p>
点検・診断者用	<p><問い></p> <ul style="list-style-type: none"> ・管理者に対して明確な判断過程に基づき診断結果や措置方針を説明出来るかどうか？ <p><コメント></p>	<p><問い></p> <ul style="list-style-type: none"> ・現在の点検・診断業務の一連の流れの中で過度な負担なく利用することが可能か？ <p><コメント></p>

図4-2-8 アンケート様式

検証状況を写真4-2-1に、検証結果を表4-2-3に示す。診断技術者の診断と診断AIシステムの診断結果を比較したところ、概ね一致した。また、診断結果の説明性について、診断結果や措置方針などが具体的に表示されるので第三者に対して説明しやすい等の意見が多く、説明性の部分については、概ね良好な評価であった。一方、システムの使用性については、「変状位置の記録ができない」、「過去の変状データを参照できない」、「入力項目に対して選択や値を入れるのは経験がないと難しい」などの意見が出され、課題があることがわかった。

この結果から明らかとなった課題として、入力項目の見直しや入力を補助する説明機能、変状の発生位置や程度等の記録機能、前回点検データ等を確認できる機能の追加等を把握できた。



写真 4-2-1 検証状況 (H橋)

表 4-2-3 検証結果の概要 (H 橋)

検証内容	検証結果の概要	
(1) 診断技術者の診断結果と診断AIシステムの出力結果の比較	診断技術者の主な診断結果	★損傷原因：疲労、土砂化、乾燥収縮、凍結防止剤による塩害 ★損傷の進行度状態：状態①、状態② ★措置方針：経過観察＋予防保全（床版防水）
	診断AIシステムの出力結果	★損傷原因：土砂化（輪荷重）、土砂化（凍害） ★損傷の進行度状態：状態①～③ ★措置方針：予防保全（遮水＋排水）
(2) 診断結果の説明性 【問】 明確な判断過程に基づき診断結果や措置方針を説明できるかどうか？	<道路管理者からの主な回答> <ul style="list-style-type: none"> ● 支援という意味では十分。 ● 診断結果、措置方針などが具体的に表示されるので、第三者に説明しやすい。 <診断技術者からの主な回答> <ul style="list-style-type: none"> ● 診断結果は道路管理者に説明可能なものとなっている。 ● 部位ごとに、評価が異なる場合に対応できると良い。 	
(3) 診断結果の使用性 【問】 現在の点検・診断業務の一連の流れの中で過度な負担なく利用することが可能か？	<道路管理者からの主な回答> <ul style="list-style-type: none"> ● 変状位置も記録できるようにすると良い。 ● 過去の変状データを参照できると良い。 <診断技術者からの主な回答> <ul style="list-style-type: none"> ● 問題なく利用可能。ただし、変状の入力には経験がないと難しい。 ● 入力項目が多い。 	

(2) N 橋の検証概要

N 橋の橋梁情報、現況写真等、側面図をそれぞれ表 4-2-4、図 4-2-9、図 4-2-10 に示す。N 橋は 1978 年に供用した橋長 435.3m の 3 径間連続非合成鈹桁橋の 3 連である。現場に行く前に点検調書 (H30) を確認した結果、特にひび割れ等の変状が確認されており、河川敷から調査が可能な第 9 径間 (図 4-2-11) を今回の検証の対象にした。検証方法は、H 橋と同様とした。検証状況を写真 4-2-2 に、検証結果を表 4-2-5 に示す。診断技術者の診断と診断 AI システムの診断結果を比較したところ、概ね一致した。また、診断結果の説明性に関する意見は特になかった。一方、システムの使用性については、「入力結果の確認表示がスクロールなしで見ることができると良い」、「現地での入力項目を減らせると良い」などの意見が出され、操作の効率化に関する課題があることがわかった。なお、N 橋の検証の時は、診断技術者としての参加者は H 橋の時と同じため、診断技術者からの意見は聞いていない。

表 4-2-4 N 橋の橋梁情報

名称	N 橋
管理者	東北地方整備局
路線名	一般国道 45 号
供用年	1978 年
上部構造	3 径間連続非合成鈹桁橋 3 連
橋長	435.3m
径間数	9 径間
幅員	有効 10.5m (全幅員 11.4m)
交通量	大型車 514 台/12h
備考	床版防水工有り 水切り有り H27 橋面補修 (第 4 径間～第 6 径間) 伸縮装置取替 (P3,P6) 床版部分打替 (第 4 径間～第 6 径間)

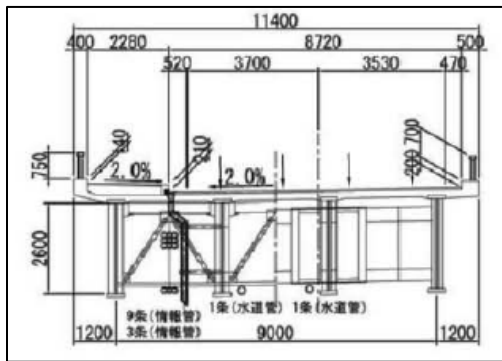


図 4-2-9 N 橋の現況写真など

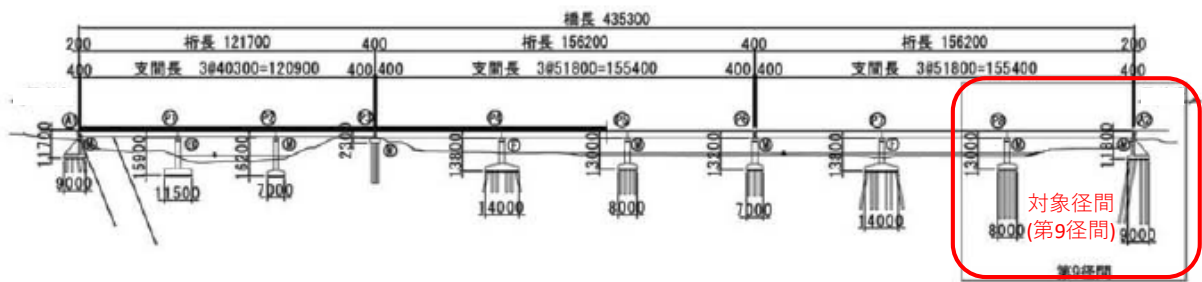


図 4-2-10 N 橋の側面図

対象部材	変状写真		
点検日 : 2018/8/9 対象部材 : R C 床版 対象径間 : 第9径間	【Ds0302】 	【Ds0205】 	【Ds0209】 

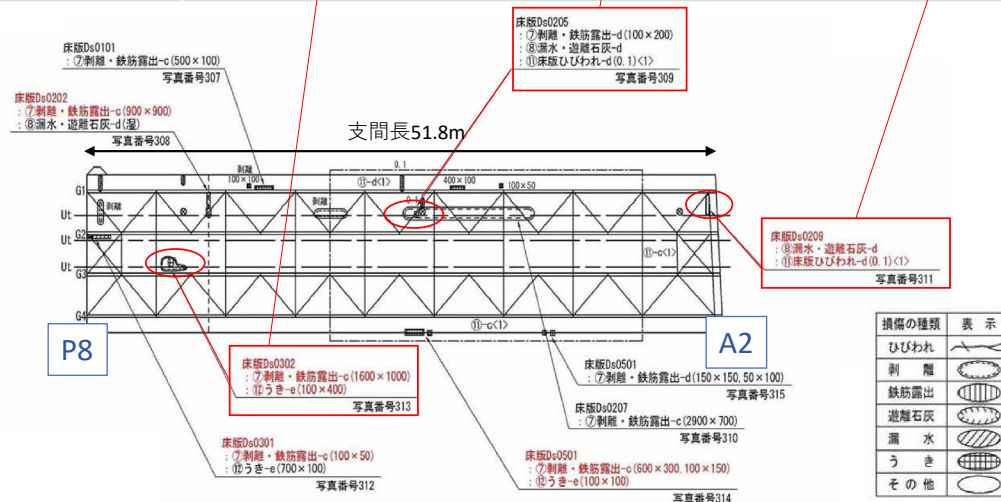


図4-2-11 第9径間の変状写真と損傷図



写真4-2-2 検証状況 (N橋)

表 4-2-5 検証結果の概要 (N 橋)

検証内容	検証結果の概要	
<p>(1) 診断技術者の診断結果と診断AIシステムの出力結果の比較</p>	<p>診断技術者の主な診断結果</p>	<p>★損傷原因：土砂化（輪荷重による破碎）、土砂化（凍害）</p> <p>★損傷の進行度状態：状態①～③</p> <p>★措置方針：経過観察、予防保全（床版防水）、局所的な床版の打ち換え</p>
	<p>診断AIシステムの出力結果</p>	<p>★損傷原因：土砂化（輪荷重）、土砂化（凍害）、土砂化（凍結防止剤による塩害）</p> <p>★損傷の進行度状態：状態①～③</p> <p>★措置方針：予防保全（遮水＋排水）、床版防水＋スラブドレーン</p>
<p>(2) 診断結果の説明性 【問】明確な判断過程に基づき診断結果や措置方針を説明できるかどうか？</p>	<p><道路管理者からの主な回答></p> <p>—</p>	
<p>(3) 診断結果の使用性 【問】現在の点検・診断業務の一連の流れの中で過度な負担なく利用することが可能か？</p>	<p><道路管理者からの主な回答></p> <ul style="list-style-type: none"> ● 入力結果の確認表示がスクロールなしで見ることができると良い。 ● 現地での入力項目を減らせると良い。 	

4.2.2 鋼I桁、鋼トラス桁、RCT桁、PCT桁を対象にした検証

診断AIシステムの出力結果(アルゴリズム)の妥当性を確認すること、入力項目の表現等を確認すること、及びシステムの使いやすさを確認することを目的として、診断AIシステムの検証を行った。

対象橋梁を表4-2-6、表4-2-7に示す。今回は令和3年度にシステムに追加した桁橋とトラス橋を選定対象とした。検証は、実際に現場に行きシステムに情報を入力する現場検証と、点検調書やあらかじめ用意した現地の動画、360度画像などから情報を入力する机上検証の2通りで行った。S橋は河川敷に車を止められる場所が確保できたため、土木研究所職員が実際に現場に行き検証を行ったが、他の橋梁については、遠方であることや架橋条件が悪く少人数でしか現場に行くことができないことから机上検証を行った(写真4-2-3、図4-2-12、図4-2-13、図4-2-14、図4-2-15、図4-2-16)。

表4-2-6 対象橋梁

橋梁名	管理者	橋の種類	対象損傷	検証方法
S橋	茨城県	鋼I桁・鋼トラス桁	腐食、疲労亀裂	現場検証、机上検証
HI橋	茨城県	RCT桁	塩害	机上検証
G橋	茨城県	鋼I桁	腐食、疲労亀裂	机上検証
SI橋	富山市	ポステンT桁	ASR	机上検証

表4-2-7 各橋梁の情報

名称	S橋	HI橋	G橋	SI橋
管理者	茨城県	茨城県	茨城県	富山市
路線名	結城下妻線	水戸鉦田佐原線	土浦境線	保内神通線
架設年次	1965年	1942年	1969年	1980年
橋長	315m	120m	160m	124m
径間数	8径間	8径間	4径間	4径間
幅員	7.3m	9.8m	18.8m	9.5m



写真 4-2-3 現場検証状況 (S 橋)



図 4-2-12 S 橋 鋼 I 桁 (第 6 径間) [360 度画像]

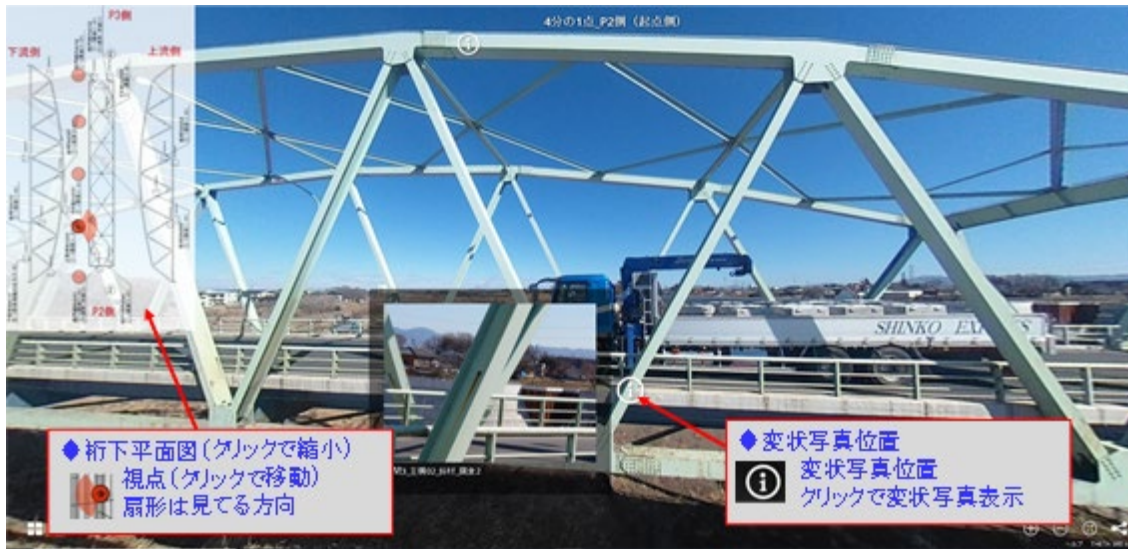


図4-2-13 S橋 鋼トラス (第3径間) [360度画像]

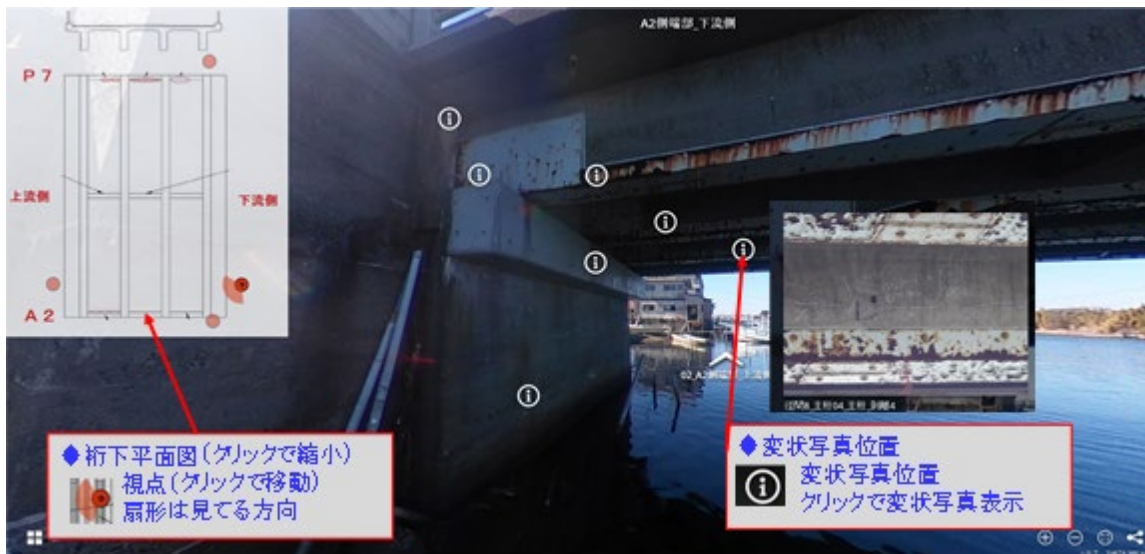


図4-2-14 HI橋 RCT桁 (第8径間) [360度画像]



図4-2-15 G橋 鋼I桁(第1径間) [360度画像]



図4-2-16 SI橋 PCT桁(第1径間) [360度画像]

出力結果の妥当性の確認方法として、システムの出力結果と対象橋梁の直近の点検調書や補修設計業務の報告書とを比較して整理した。その結果を表4-2-8、表4-2-9、表4-2-10に示す。

S橋（鋼トラス）に関しては、過去の補修設計業務での判定と本システムの出力結果は概ね一致した。ただし、格点部については、過去の補修設計業務では防食機能の劣化のみで経過観察という措置方針だったのに対し、本システムでは軽微な板厚減少が確認され、措置としては長寿命化のための部分塗替えが示された。S橋（鋼桁）に関しては、どちらも変状程度（腐食）は軽微と判断された。ただし、システムでは連結部について局部補修が必要と判断された。S橋（支承）に関しては、どちらも措置方針が支承交換となり、補修設計業務の報告書とシステムの診断結果は一致した。HI橋（RCT桁）に関しては、どちらも飛来塩分による変状と判断された。しかし、点検調書では詳細調査に基づく早急な対策が必要と判断されたが、システムでは延命のための電気防食が示されており、より具体的な措置が示されていることがわかる。G橋（鋼桁）に関しては、どちらも早期の対策（桁端部の再塗装）が必要と判断され、点検調書とシステムの診断結果は一致した。最後に、SI橋に関しては、上部構造の損傷としてASRがシステム上で未対応のため、下部構造を対象に検証した。その結果、SI橋（下部構造）に関しては、点検調書もシステムもASRとなり、診断結果は一致したが、措置の方針は点検調書では経過観察となっているが、システムでは延命または危機管理となり、結果に差異が見られた。机上検証において、入力項目の表現等の適正化やシステムの使いやすさという観点から、共同研究者からの意見を集約した。その意見をもとに入力項目の表現を修正したものを表4-2-11に示す。また、システムの使いやすさに関する主な意見を表4-2-12に示す。「上部構造形式等の諸元に応じて設問を絞るのが良い」や「不必要な項目は表示されないようにできれば良い」などの課題を把握した。入力項目をシステム側で判断して如何にシステムに情報を入力する労力を簡略化していくかがシステムの使いやすさという観点での今後の課題であることが分かった。

表 4-2-8 検証結果の概要 (1)

S 橋	R2 年度補修設計業務委託報告書	システムの出力結果
S 橋 (鋼トラス)	<p>【弦材・斜材・格点部】 腐食</p> <ul style="list-style-type: none"> ・防食機能の劣化による腐食が見られる。 ・斜材下端は下弦材との交点部滞水による腐食が見られる。 <p><措置方針></p> <ul style="list-style-type: none"> ・変状が軽微なため、経過観察 	<p>【格点部】 腐食</p> <ul style="list-style-type: none"> ・格点部に軽微な板厚減少が確認される。 <p><措置方針></p> <ul style="list-style-type: none"> ・長寿命化【部分塗替え (Rc-1 塗装系)】 <p>【弦材・斜材】 腐食</p> <ul style="list-style-type: none"> ・弦材に局所的な発せいが確認される。 <p><措置方針></p> <ul style="list-style-type: none"> ・長寿命化または経過観察【局部補修 (目あらし+防錆塗装)】
	<p>【縦桁・横桁・下横溝】 腐食</p> <ul style="list-style-type: none"> ・防食機能の劣化による腐食が見られる。 ・雨水等の滞水による腐食が見られる。 <p><措置方針></p> <ul style="list-style-type: none"> ・損傷の進行を抑止するため、予防保全の観点から塗装塗替えを行う。 	<p>【床組み部材】 腐食</p> <ul style="list-style-type: none"> ・腐食が発生。板厚減少は軽微な段階。 <p><措置方針></p> <ul style="list-style-type: none"> ・延命【部分塗替え (Rc-1 塗装系)】
S 橋 (鋼I桁)	<p>【主桁】 腐食</p> <ul style="list-style-type: none"> ・主桁全体に防食機能劣化が見られる。 ・下フランジの上面等の滞水しやすい箇所には腐食が見られる。 <p><措置方針></p> <ul style="list-style-type: none"> ・損傷の進行を抑止するため、予防保全の観点から塗装塗替えを行う。 	<p>【鋼I桁 端部】 腐食</p> <ul style="list-style-type: none"> ・鋼桁端部に腐食。その程度は軽微。 <p><措置方針></p> <ul style="list-style-type: none"> ・長寿命化【部分塗替え (Rc-1 塗装系)】 <p>【鋼I桁 連結部】 腐食</p> <ul style="list-style-type: none"> ・連結部に腐食。断面欠損は軽微。 <p><措置方針></p> <ul style="list-style-type: none"> ・延命【局部補修 (目あらし+防錆塗装)】 <p>【鋼I桁 一般部】 腐食</p> <ul style="list-style-type: none"> ・鋼桁一般部に腐食が発生。防食下地が露出し発せいしている段階。 <p><措置方針></p> <ul style="list-style-type: none"> ・長寿命化【部分塗替え (Rc-1 塗装系)】

表 4-2-9 検証結果の概要 (2)

S 橋 (支承)	R2 年度補修設計業務委託報告書	システムの出力結果
	<p>【支承】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 支承本体に防食機能劣化が見られた。 ・ ピンチプレートが変形し機能障害となっている。 ・ 沓座モルタルは、ひびわれや欠損が生じていた。 <p><措置方針></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 損傷の進行を抑止するため、予防保全の観点から支承本体を取り替える。 	<p>【支承本体・アンカーボルト】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 支承本体に全体的な腐食が発生 ・ アンカーボルト頭部またはナットに腐食が発生 <p><措置方針></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 軽微な補修【錆除去+再塗装、ナット交換+再塗装】 【土砂の撤去、漏水原因の解消】 <p>【遊間不良・下部移動】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 線支承の移動制限装置に亀裂または破断し、遊間異常が発生 <p><措置方針></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 支承交換または支承の監視 【支承交換】
HI 橋 (RCT 桁)	H30 年度点検調査	システムの出力結果
	<p>【RCT 桁】 飛来塩分による塩害</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ コンクリート部材に塩害の影響によるものと推定される損傷が多数見られる。 ・ 剝離、鉄筋露出、補修・補強材の損傷、コンクリートの浮き <p><措置方針></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 詳細調査を行い、早急な対策が必要。 <p>【再塗装】</p>	<p>【RCT 桁】 飛来塩分による塩害</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 飛来塩分が付着する環境であり、鉄筋位置での塩化物イオン濃度が発錆限界以上であるため「飛来塩分による塩害」の損傷であると考えられる。 ・ 鉄筋の腐食が進行し、鉄筋の断面減少が発生している。 <p><措置方針></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 延命 (鉄筋の防食) 【電気防食】 【桁の仮受け】
G 橋 (鋼I 桁)	H29 年度点検調査	システムの出力結果
	<p>【主桁】 腐食</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 主桁端部に腐食、孔食が見られる。 ・ 伸縮装置からの漏水が見られる。 <p><措置方針></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 早期の措置が必要。 【再塗装】 	<p>【鋼I 桁 端部】 腐食</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 橋座面に滞水跡が見られる。 ・ 重防食塗装系の鋼桁端部に腐食が発生。 <p><措置方針></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 延命 【部分塗替え (Rc-1 塗装系)】

表 4-2-10 検証結果の概要 (3)

SI 橋	H29 年度点検調査	システムの実出力結果
(下部構造)	<p>【橋台】 ASR</p> <ul style="list-style-type: none"> 隅角部にひびわれが見られ、ASR によるものと推定 <p><措置方針></p> <ul style="list-style-type: none"> 漏水・遊離石灰は、軽微な損傷のため、経過観察 	<p>【橋台】 ASR</p> <ul style="list-style-type: none"> 隅角部にひびわれが見られ、ASR によるものと推定 <p><措置方針></p> <ul style="list-style-type: none"> 延命または危機管理【補強】

表 4-2-11 入力項目の表現の修正

選択肢の表現が不明確なものの修正	
修正前	修正後
塗膜割れ (疲労を想定)	溶接線に沿った塗膜割れ
橋座面の滞水	橋座面の滞水または滞水跡
橋座面の土砂堆積	鋼桁への土砂堆積
部位・部材の表現の修正	
修正前	修正後
鋼桁高力ボルト連結部	鋼桁連結部 (高力ボルトに限定しない)

表 4-2-12 システムの使いやすさに関する主な意見

<ul style="list-style-type: none"> 上部構造形式等の諸元に応じて入力項目を絞るのが良い。 不必要な項目は表示されないようにできれば良い。 例) 質問を階層化する等 関係のない質問につける選択肢 (「該当しない」 など) があると良い。 入力項目の順番は、確認する場所の順番になっている方が入力しやすい。
--

第5章 橋梁診断支援 AI システムの機能要件（案）

5.1 機能要件とは

橋梁診断支援 AI システムの将来的な普及イメージとして、本共同研究で令和3年度までに開発した橋梁診断支援 AI システム Ver.1.0（ここでは、「診断 AI コアシステム」という）を民間企業等へ提供して、その民間企業等が診断 AI コアシステムに対して独自機能を付加し、利便性や使用性等を向上させた独自の診断 AI 民間システムを開発及び販売して、診断 AI システムを世の中に普及させていくことを想定している（図 5-1-1）。当然、民間企業等へ提供する際には、診断 AI コアシステムのコアとなる部分（診断ロジックの条件分岐フロー部分など）を改変してはいけないものとし、例えば、プログラム言語を変える際には、条件分岐フローが正確に機能するか証明することなどの一定の制約を課すことで診断結果の信頼性を確保する必要がある。

本共同研究で開発した診断 AI コアシステムをベースに民間企業等が診断 AI 民間システムを開発する場合に、最低限備えるべき機能要件を設定することで、診断 AI 民間システムを利用した際の診断の信頼性を確保することを目的に、橋梁診断支援 AI システムの機能要件（案）を作成した。

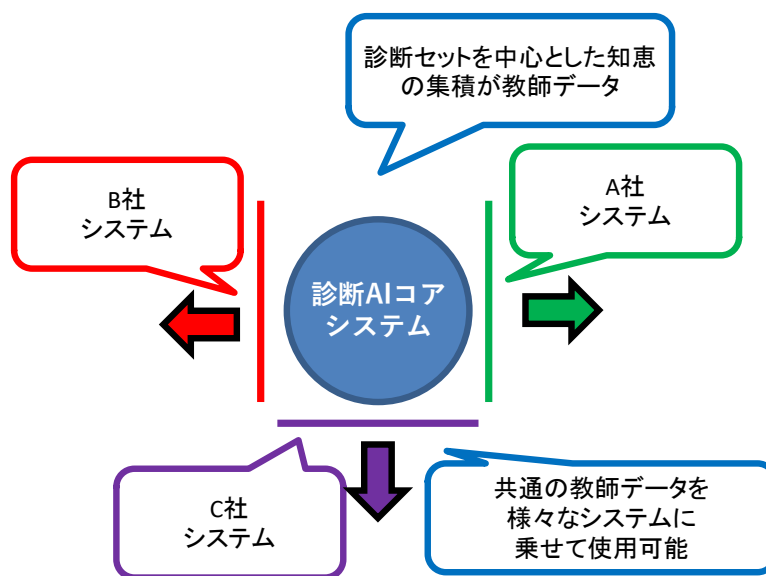


図 5-1-1 診断 AI コアシステムを中心としたシステム普及イメージ

5.2 機能要件（案）の構成

機能要件（案）の構成は、大きく3つに分けられる。1つ目は、「システムの概要」である。ここでは、システムの動作環境、活用の全体イメージ、システムのユースケース、対象部材と損傷種類、システムの機能構成、ソースデータの提供、開発システムのセキュリティに関して記載している。

内容の一例として、システムの動作環境を表5-2-1に、活用の全体イメージを図5-2-1に、システムの機能構成を図5-2-2に示す。

表5-2-1 システムの動作環境

No.	項目	名称	バージョン
1	ハードウェア	Microsoft Surface	Surface Go / Surface Go 2を基準とする。
2	OS	Windows 10	Pro
3	開発言語	PHP	7.3以上
4	DB	PostgreSQL	9.4以上
5	Web サーバ	Apache	2.4以上

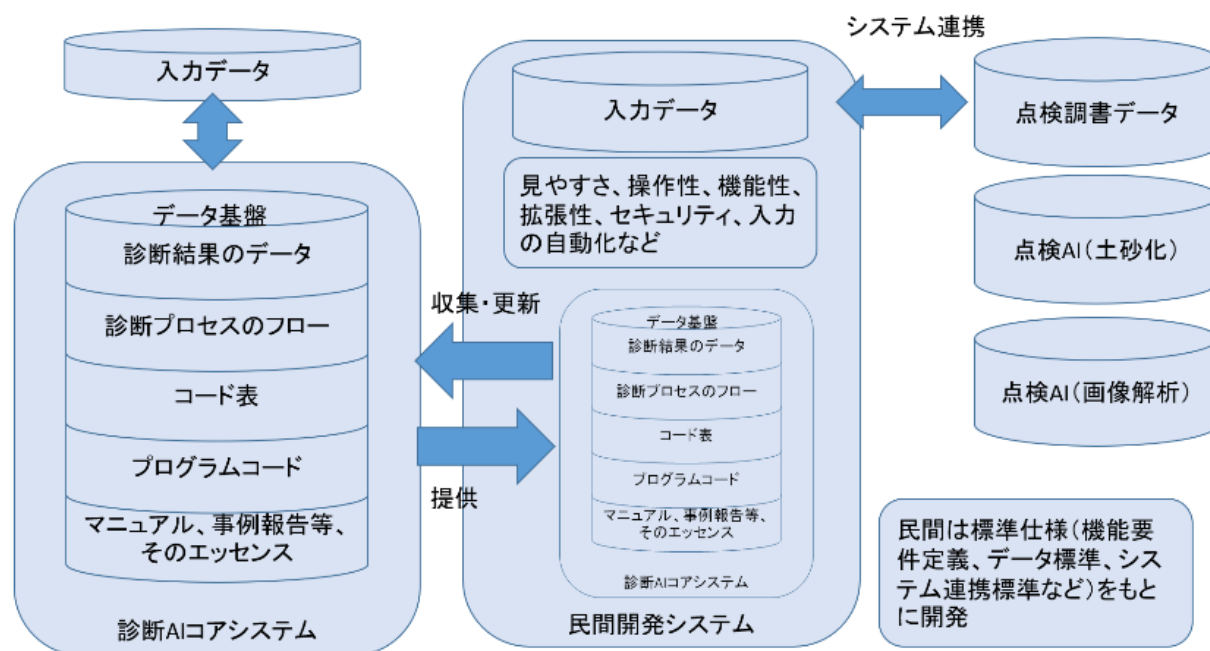


図5-2-1 診断AI コアシステムの活用の全体イメージ

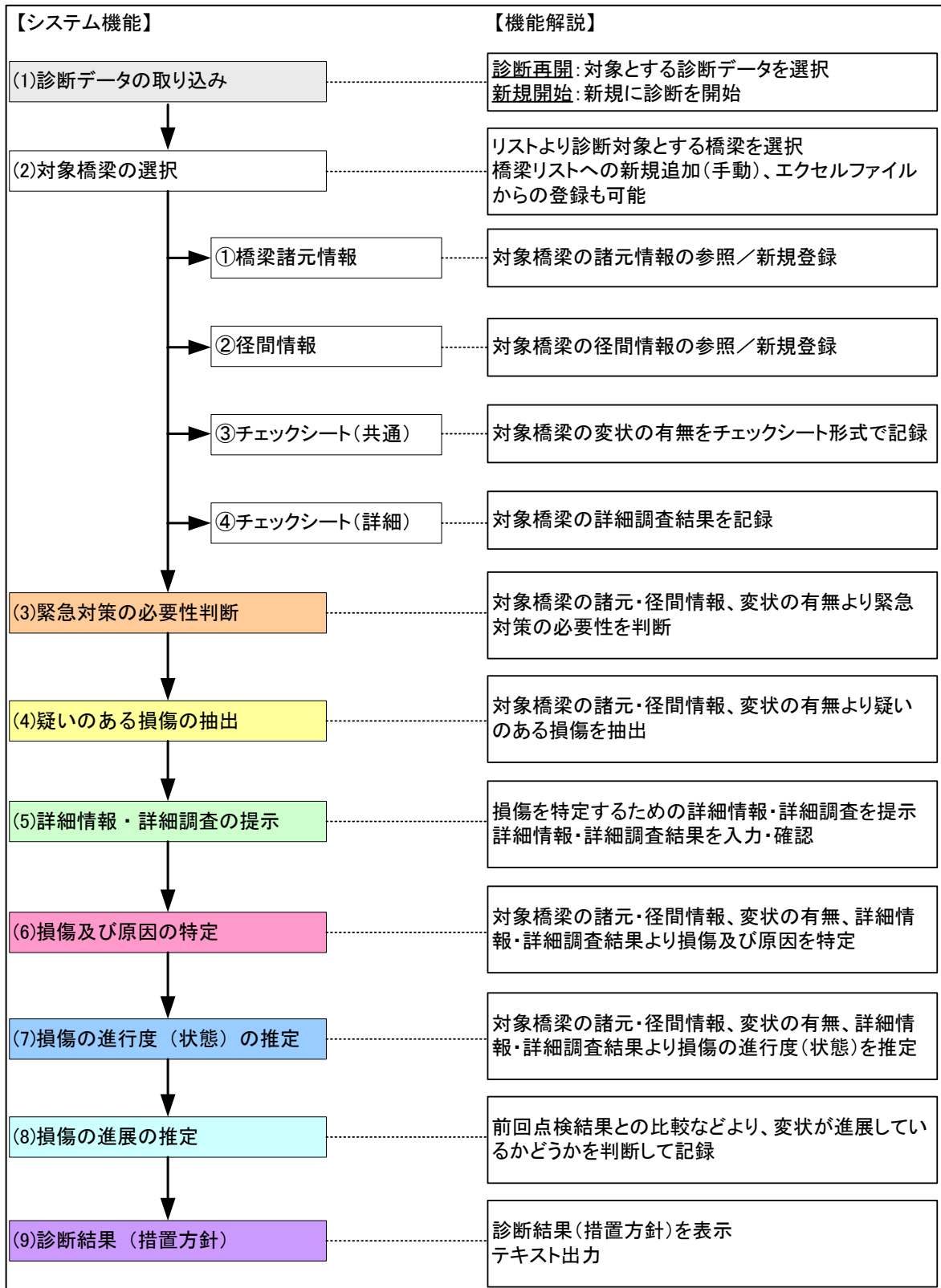


図 5-2-2 システムの機能構成

2つ目は、「システムの機能」である。図5-2-2に示す「(1) 診断データの取り込み」から「(9) 診断結果 (措置方針)」の各システムの基本機能と関連するデータテーブルを記載している。

一例として、「(1) 診断データの取り込み」の基本機能を図5-2-3に、関連するデータテーブルを表5-2-2に示す。

既存診断データがある場合、対象とする診断データを選択できること

診断再開 **新規開始** 1件削除

診断タスクを選択できること (基本的に上から) **既存データを選択した場合、診断開始をクリック(再開)できること** **新規開始をクリックで新たな診断データを作成できる**

図5-2-3 「(1) 診断データの取り込み」の基本機能

表 5-2-2 関連テーブル

No.	論理名	物理名	データ型	Not Null	デフォルト	備考
1	セッションID	SESSION_ID	character varying(16)	Yes (PK)		ブラウザのセッションID。
2	橋梁管理番号	BRIDGE_NO	character varying(16)	Yes (PK)		診断する橋梁番号。
3	径間番号	SPAN_NO	integer	Yes (PK)	1	診断する橋梁の径間番号。
4	径間分割番号	SPAN_DIV_NO	integer	Yes (PK)	1	診断する橋梁の径間分割番号。
5	点検実施年月日	STAGING_YEAR	Date	Yes (PK)		点検実施年月日。
6	前回の点検ID	PREV_SESSION_ID	character varying(16)	No		現在は使用しない。
7	最終診断タスクID	CURRENT_TASK_ID	integer	Yes	1	表示対象となる診断タスクを番号で保持。 1: (1) 診断データの取込 2: (2) 対象橋梁の選択 3: (3) 緊急対策の必要性判断 4: (4) 疑いのある損傷の抽出 5: (5) 詳細情報・詳細調査の提示 6: (6) 損傷及び原因の特定 7: (7) 損傷の進行度(状態)の推定 8: (8) 損傷の進展の推定 9: (9) 診断結果 10: チェックシート
8	定期点検者	REGULAR_INSPECT	character varying(60)	No		
9	最終診断日時	UPDATE_DATE	timestamp	Yes	now()	対象の橋梁診断の最終更新日。

3つ目は、「システムの画面遷移図」である (図5-2-4)。

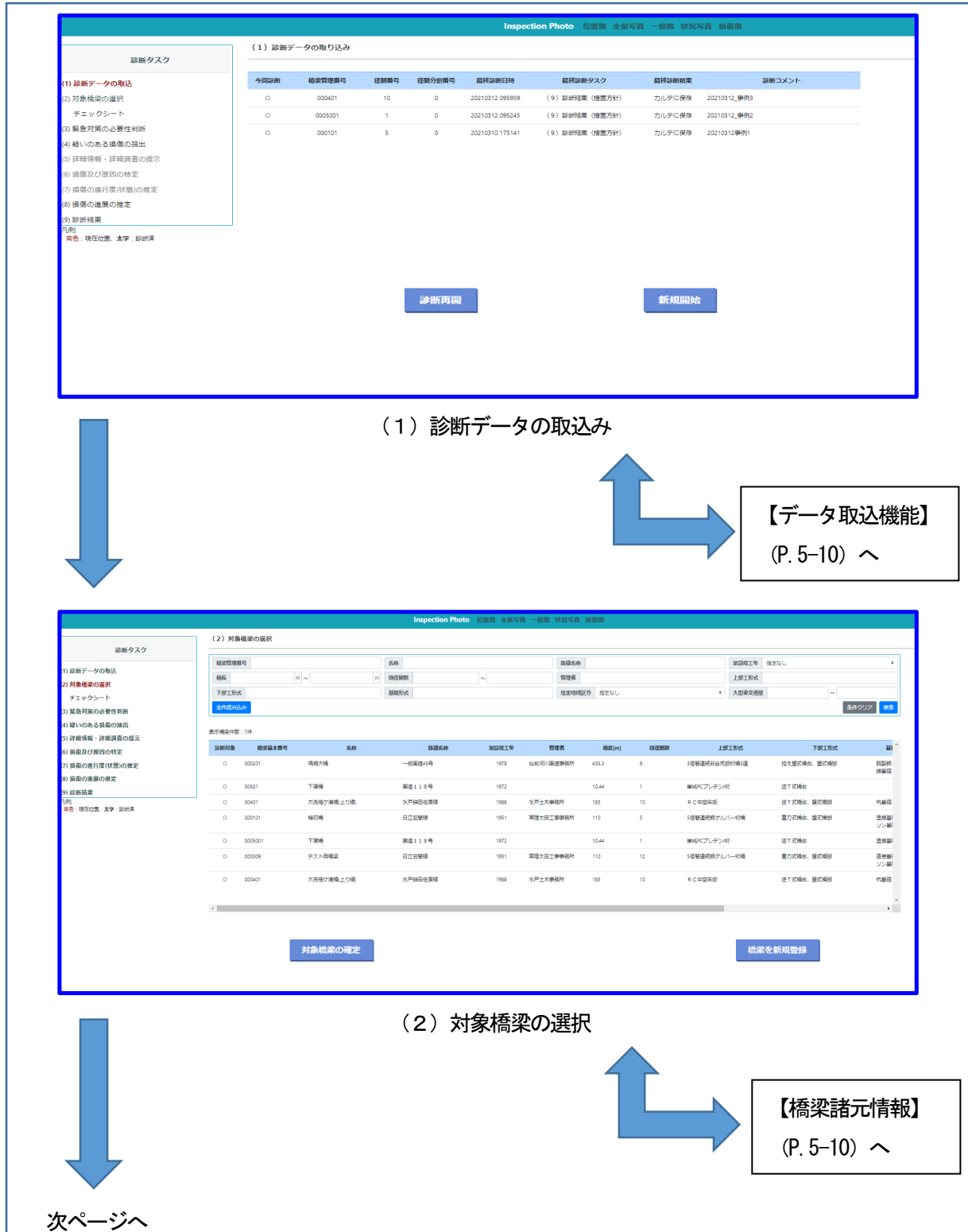


図5-2-4 システムの画面遷移図(1/6)

Inspection Photo 位置別 全量写真 一般照 状況写真 損傷照

診断タスク

1) 診断データの取込
2) 対象種別の選択
チェックシート
3) **緊急対策の必要性判断**
4) 疑いのある損傷の抽出
5) 詳細情報・詳細調査の提示
6) 損傷及び原因の特定
7) 損傷の進行度(状態)の判定
8) 損傷の進展の判定
9) 診断結果
印刷
背景: 現在位置, 文字: 診断済

(3) 緊急対策の必要性判断

検査管理番号: 0005001 径線番号: 1-1 径線分割番号: 1-1

確認 主形確認済 変更 検出・検出・検出 検出結果・修正結果

確認データ

検査済種別から以下を選択しました。確認し、必要に応じて修正を確認してください。
プロトタイプ版では、検査済種別を先にすべて入力してください。

1. 優先順位の抽出			2. 点検結果		
No.	データ項目	値	No.	データ項目	値
1	梁筋径工事(梁筋)	1972	1	鉄筋に付いたPC: 0.1mm, RC: 2mm以上のひび割れ	無し
2	梁構材種別	S39	2	かぶりコンクリートのつき・剥離	無し
3	塩害危険区分	D	3	鉄筋の断面減少	無し
4	海軍からの防錆剤				

データ確定

3. 前回の点検結果

No.	データ項目	値
1	鉄筋に付いたPC: 0.1mm, RC: 2mm以上のひび割れ	無し
2	かぶりコンクリートのつき・剥離	無し
3	鉄筋の断面減少	無し

点検部材写真

疑いのある損傷の抽出

撮影結果から疑いのある損傷が抽出されています。適切に危険性を評価し、緊急対策の必要性を判断してください。

(3) 緊急対策の必要性判断

Inspection Photo 位置別 全量写真 一般照 状況写真 損傷照

診断タスク

1) 診断データの取込
2) 対象種別の選択
チェックシート
3) 緊急対策の必要性判断
4) **疑いのある損傷の抽出**
5) 詳細情報・詳細調査の提示
6) 損傷及び原因の特定
7) 損傷の進行度(状態)の判定
8) 損傷の進展の判定
9) 診断結果
印刷
背景: 現在位置, 文字: 診断済

(4) 疑いのある損傷の抽出

検査管理番号: 0005001 径線番号: 1 径線分割番号: 0

確認 主形確認済 変更 検出・検出・検出 検出結果・修正結果

確認データ

検査済種別から以下を選択しました。確認し、必要に応じて修正を確認してください。
プロトタイプ版では、検査済種別を先にすべて入力してください。

1. 優先順位の抽出			2. 点検結果		
No.	データ項目	値	No.	データ項目	値
1	梁筋径工事(梁筋)	1972	1	腐食の発生・鉄筋の露出し(腐食・剥離)による剥離	無し
2	大型車(運搬車)種別	1611	2	養生養生が剥離される箇所につき	無し
3	防水工種別	無し	3	劣化に伴い影響を与える鉄筋の腐食	無し
4	梁筋径工事の仕様				

データ確定

3. 前回の点検結果

No.	データ項目	値
1	腐食の発生・鉄筋の露出し(腐食・剥離)による剥離	無し
2	養生養生が剥離される箇所につき	無し
3	劣化に伴い影響を与える鉄筋の腐食	無し

点検部材写真

疑いのある損傷の抽出

No.	損傷の種別	状態	理由
1	腐食	無し	腐食発生が確認される箇所が無い。
2	腐食	無し	腐食が確認される箇所が無い。
3	腐食	有り	劣化に伴い影響を与える鉄筋の腐食が確認されたためである。

(4) 疑いのある損傷の抽出

Inspection Photo 位置別 全量写真 一般照 状況写真 損傷照

診断タスク

1) 診断データの取込
2) 対象種別の選択
チェックシート
3) 緊急対策の必要性判断
4) 疑いのある損傷の抽出
5) **詳細情報・詳細調査の提示**
6) 損傷及び原因の特定
7) 損傷の進行度(状態)の判定
8) 損傷の進展の判定
9) 診断結果
印刷
背景: 現在位置, 文字: 診断済

(5) 詳細情報・詳細調査の提示

検査管理番号: 0005001 径線番号: 1 径線分割番号: 0

確認 主形確認済 変更 検出・検出・検出 検出結果・修正結果

確認データ

検査済種別から以下を選択しました。確認し、必要に応じて修正を確認してください。
プロトタイプ版では、検査済種別を先にすべて入力してください。

詳細調査の提示・結果入力

土砂化(崩壊)による部材の構造的特徴、状態の判定のために、以下の詳細調査が必要です。調査結果を入力してください。

No.	調査項目	調査方法	調査結果
1	舗装下の雨水	電気回路 上段: 選択 下段: 選択 床面防水工の調査	○ 有り ○ 無し 詳細調査の入力がない場合は、床面防水工の調査の有無より、舗装下の雨水の発生を確認します。
2	土砂化の発生	目視観察 新入土砂観察	○ 土砂状態確認済み ○ 土砂状態より上の状態を確認 ○ 無し 詳細調査の入力がない場合は、土砂状態の調査の結果より、土砂化の有無を確認します。

点検部材写真

比較写真

NO IMAGE

データ確定

(5) 詳細情報・詳細調査の提示

次ページへ

図 5-2-4 システムの画面遷移図(2/6)

Inspection Photo 位置情報 全表示 一覧 検索 状況写真 撮影履歴

検査管理番号: 0005001 経路番号: 1 経路外番号: 0

検査 主成分分析 写真 検出・検出 検出履歴 検出履歴

検出 検出 検出 検出 ASR 土砂化1 土砂化2 土砂化3 土砂化4 凍害1 凍害2 陥没

基礎データ

1. 基本情報

No.	データ項目	値
1	架設竣工(時期)	1972
2	大型車の通過(台/日)	1611
3	防水工実施	無し
4	床面防水工の有無	

2. 点検結果

No.	データ項目	値
1	腐敗の発生・腐材の露出し・腐蝕・部材の剥離による陥没	無し
2	第三巻修繕が想定される陥没に付き	無し
3	進行性に影響を及ぼす陥没の発生	無し

3. 陥没の点検結果

No.	データ項目	値
1	腐敗の発生・腐材の露出し・腐蝕・部材の剥離による陥没	無し
2	第三巻修繕が想定される陥没に付き	無し
3	進行性に影響を及ぼす陥没の発生	無し

点検写真写真 8枚中1

詳細調査の提示・結果入力

土砂化・凍害による陥没の詳細調査結果です。

No.	調査項目	調査方法	上段・中段・下段・陥没	調査結果
1	陥没下の漏水	電気レシーダ	床面防水工の設置	詳細調査結果の入力がない場合は、床面防水工の設置の有無より、陥没下の漏水の有無を判断します。
2	土砂化の発生	観察検査 鉛筆・丸ノコ試験		詳細調査結果の入力がない場合は、点検結果の陥没の状況より、土砂化の有無を判断します。

診断 (特定)

陥没の特定

陥没下の漏水がないと判定されることから、「土砂化 (陥没)」以外の調査が行われます。

(6) 損傷および原因の特定

Inspection Photo 位置情報 全表示 一覧 検索 状況写真 撮影履歴

検査管理番号: 0005001 経路番号: 1 経路外番号: 0

検査 主成分分析 写真 検出・検出 検出履歴 検出履歴

検出 検出 検出 検出 ASR 土砂化1 土砂化2 土砂化3 土砂化4 凍害1 凍害2 陥没

基礎データ

1. 基本情報

No.	データ項目	値
1	架設竣工(時期)	1972
2	大型車の通過(台/日)	1611
3	防水工実施	無し
4	床面防水工の有無	

2. 点検結果

No.	データ項目	値
1	腐敗の発生・腐材の露出し・腐蝕・部材の剥離による陥没	無し
2	第三巻修繕が想定される陥没に付き	無し
3	進行性に影響を及ぼす陥没の発生	無し

3. 陥没の点検結果

No.	データ項目	値
1	腐敗の発生・腐材の露出し・腐蝕・部材の剥離による陥没	無し
2	第三巻修繕が想定される陥没に付き	無し
3	進行性に影響を及ぼす陥没の発生	無し

点検写真写真 8枚中1

詳細調査の提示・結果入力

土砂化・凍害による陥没の詳細調査結果です。

No.	調査項目	調査方法	上段・中段・下段・陥没	調査結果
1	陥没下の漏水	電気レシーダ	床面防水工の設置	詳細調査結果の入力がない場合は、床面防水工の設置の有無より、陥没下の漏水の有無を判断します。
2	土砂化の発生	観察検査 鉛筆・丸ノコ試験		詳細調査結果の入力がない場合は、点検結果の陥没の状況より、土砂化の有無を判断します。

診断 (推定)

状態の特定と補修方針

①

②

③

④

⑤

⑥-1, ⑥-2

「状態①」～「状態⑥」のいずれにも該当しませんでした。

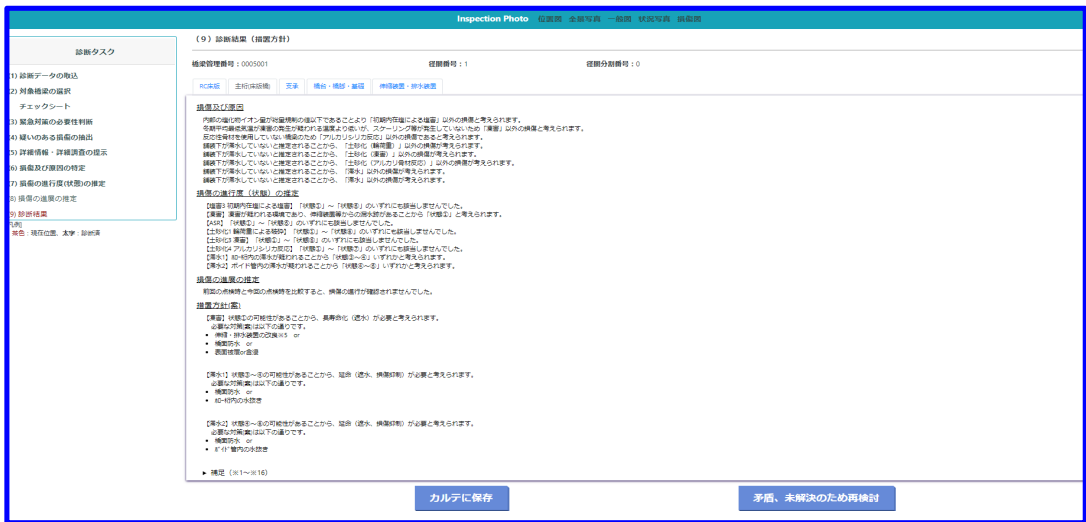
(7) 損傷の進行度 (状態) の推定

次ページへ

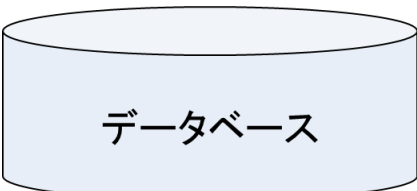
図5-2-4 システムの画面遷移図(3/6)



(8) 損傷の進展の推定



(9) 診断結果



診断記録の保存

【(1) 診断データの取込み】(P.5-6)へ

図 5-2-4 システムの画面遷移図(4/6)

Inspection Photo 検査票 全量一覧 一括印刷 状況写真 検査票

(2) 対象橋梁の選択

検査管理番号: [] 名称: [] 路線名称: [] 架設施工年: [指定なし]

路線: [] 区間: [] 区間開始: [] 区間終了: [] 管理番号: [] 上部工形式: []

下部工形式: [] 基礎形式: [] 橋梁種別区分: [指定なし] 大型車交通量: []

全件印刷 [] 検索 []

表示橋梁件数: 7件

路線対象	検査基本番号	名称	路線名称	架設施工年	管理番号	橋長[m]	橋径距離	上部工形式	下部工形式	基礎形式
<input type="radio"/>	000001	増城大橋	一般国道4号	1970	仙台河川国道事務所	435.3	9	3径型連続鋼管拱橋	径型橋脚	基礎形式
<input type="radio"/>	00501	下瀬橋	国道118号	1972	水戸土木事務所	10.44	1	鋼桁PCプレテンション	径型橋脚	基礎形式
<input type="radio"/>	00401	大洗陸ヶ瀬橋上り橋	水戸線陸ヶ瀬橋	1888	水戸土木事務所	185	10	R.C中空床版	径型橋脚、壁式橋脚	基礎形式
<input type="radio"/>	000101	橋初橋	日立道路	1951	茨城土木事務所	110	5	3径型連続鋼管アール橋	重力式橋脚、壁式橋脚	基礎形式
<input type="radio"/>	0005001	下瀬橋	国道118号	1972	水戸土木事務所	10.44	1	鋼桁PCプレテンション	径型橋脚	基礎形式
<input type="radio"/>	000309	グスト南橋梁	日立道路	1951	茨城土木事務所	110	12	3径型連続鋼管アール橋	重力式橋脚、壁式橋脚	基礎形式
<input type="radio"/>	000401	大洗陸ヶ瀬橋上り橋	水戸線陸ヶ瀬橋	1888	水戸土木事務所	185	10	R.C中空床版	径型橋脚、壁式橋脚	基礎形式

橋梁をExcelから印刷 [] 資料検索を印刷 []

対象橋梁の確認 [] 橋梁を新規登録 []

データ取込機能

Inspection Photo 検査票 全量一覧 一括印刷 状況写真 検査票

チェックシート

諸元情報を入力 点検結果を入力

検査管理番号: [0005001] 上部工形式: [鋼桁PCプレテンション] 橋梁種別区分: [D] *

名称: [下瀬橋] 下部工形式: [径型橋脚] 橋梁対策の有無: [不明] *

路線名称: [国道118号] 基礎形式: [直接基礎] 橋脚からの距離[m]: []

架設施工年(西暦): [1972] 防水工有無: [無し] * 卓越する高向: [不明] *

検査管理者: [] 架設防水工の仕様: [] 橋の階層の階形(階形別): [] *

事務所: [] 床版防水築年(西暦): [] 橋脚や橋脚間・橋脚の基礎形式・オンの配分: [] *

出場所: [] 圧入性骨材使用の有無: [不明] * 冬期平均最低気温(℃): [-2] *

橋長[m]: [10.44] 排水管材料: [钢管] * 凍結防止剤の散布の有無: [無し] *

橋径距離: [1] 曲率半径[m]: [] 橋脚種別: [無し] *

適用法令: [] 斜角度(度): []

交通量調査(時間/日): [12142] 架橋状況: []

大型車進入車(日): [13] 調査や点検記録: []

大型車交通量(日): [1611] 補修履歴: []

データ更新 [] キャンセル []

橋梁諸元情報



【径間情報】(P. 5-11) へ



【チェックシート (共通)】
(P. 5-11) へ



【チェックシート (詳細)】
(P. 5-11) へ

図5-2-4 システムの画面遷移図(5/6)

第6章 まとめ

橋梁の診断の信頼性向上を図ることを目的に、橋梁の部材・損傷ごとに損傷のメカニズムを整理し、その損傷のメカニズムに応じた点検・診断・措置の一連の技術情報を「診断セット」と称して整理した。そして、診断セットと診断に必要なとされる知識と技能を有する者の診断プロセスを取り入れた診断支援技術である橋梁診断支援 AI システムを開発した。

本研究によって得られた主な成果を以下に示す。

(1) 診断セットの作成

橋に生じる損傷のメカニズムや点検で取得すべき情報・詳細調査・診断の決め手となる情報・措置方針や工法例の一連の技術情報を診断セットとして、体系的な整理を行った。診断セットは、部材・損傷毎に作成しており、要因別に細分化した損傷まで合わせると、合計で203種類の診断セットを作成した。

(2) 橋梁診断支援 AI システムの開発

橋の診断における信頼性向上を目的として、診断に必要なとされる知識と技能を有する者の診断ロジックや、診断セットに基づき、説明性が確保された橋梁診断支援 AI システムを開発した。令和3年度までには、対応可能な症例は限定されているものの、橋種の約9割を対象にした橋梁診断支援 AI システム Ver.1.0 を完成させた。また、開発したシステムの検証を行うことで、出力結果の妥当性の確認や、使いやすさという観点で改善点の抽出を行った。

(3) 機能要件（案）の作成

本共同研究で開発した橋梁診断支援 AI システムをベースに民間企業等が橋梁の診断支援システムを開発する場合に、最低限備えるべき機能要件を設定することで、診断 AI 民間システムを利用した際の診断の信頼性を確保することを目的に、「システムの概要」、「システムの機能」、「システムの画面変遷図」で構成する橋梁診断支援 AI システムの機能要件（案）を作成した。

謝辞

第4章の橋梁診断支援 AI システムの検証に際して、東北地方整備局仙台河川国道事務所にご協力を頂きました。

以下の方々におかれては、橋梁診断支援 AI システムの開発に関して、招へい研究員という立場から助言を頂きました。

植野インフラマネジメントオフィス 植野芳彦氏

東京大学大学院工学系研究科 特任准教授 全邦釘氏

樋野企画 樋野勝巳氏

株式会社 松村技術士事務所 松村英樹氏

東京都立大学都市環境科学研究科都市基盤環境学域 教授 村越潤氏

この場を借りて、本研究にご協力頂いた関係各位に感謝致します。

共同研究報告書
Cooperative Research Report of PWRI
No.579 October 2023

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754