

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)

ー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ー

令和5年3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
点検 AI(床版の土砂化等)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(Ⅱ-1)

ー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
点検 AI (床版の土砂化等) 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)の点検 AI (床版の土砂化等) 開発グループでは、土砂化の要因と考えられる床版上面の滞水の検知技術の確立を目的として、実橋及び模型供試体を用いて各種非破壊検査技術の適用性の検証を行っている。

本報告では、令和3年までに実施した各種非破壊検査技術の検証結果と、電磁波レーダの計測波形データと床版上面水分量を機械学習させ、電磁波波形データを入力することで床版上面の滞水を自動推定する床版滞水推定 AI の構築に関する取組みについて紹介する。

キーワード：RC床版，土砂化，滞水，非破壊検査技術，床版滞水推定 AI，機械学習

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 和彦	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
1.3.1	診断AI開発グループの研究概要	1-3
1.3.2	点検AI（床版の土砂化等）開発グループの研究概要	1-4
1.3.3	点検AI（画像解析）開発グループの研究概要	1-5
1.4	本共同研究報告書の位置づけと構成	1-6
第2章	点検AI（床版の土砂化等）開発グループにおける研究の概要	2-1
2.1	研究の背景と目的	2-1
第3章	G橋（上り線）における非破壊検査技術の適用性の検証	3-1
3.1	G橋（上り線）の概要	3-2
3.1.1	橋梁諸元	3-2
3.1.2	補修履歴及び変状発生状況	3-5
3.1.3	調査内容	3-14
3.2	舗装開削調査	3-15
3.2.1	調査目的	3-15
3.2.2	調査位置	3-15
3.2.3	調査方法	3-15
3.2.4	調査結果	3-15
3.3	車載式電磁波レーダによる調査	3-18
3.3.1	調査目的	3-18
3.3.2	電磁波レーダの原理	3-18
3.3.3	車載式電磁波レーダの概要	3-19
3.3.4	調査機器の仕様	3-19
3.3.5	計測方法	3-20
3.3.6	解析方法	3-23
3.3.7	解析結果	3-26
3.3.8	解析結果と実際の床版状態との検証結果	3-28
3.3.9	まとめ	3-28
3.4	カート式電磁波レーダ（高周波型）による調査	3-29
3.4.1	調査目的	3-29
3.4.2	カート式電磁波レーダの概要	3-29
3.4.3	調査機器の仕様	3-29
3.4.4	調査方法	3-30

3.4.5	レーダデータの判定方法	3-31
3.4.6	損傷範囲の検証結果	3-32
3.4.7	まとめ	3-34
3.5	室内試験による床版コンクリートの含水状態調査	3-35
3.5.1	調査目的	3-35
3.5.2	試験概要	3-35
3.5.3	コンクリート試料	3-35
3.5.4	試験方法	3-39
3.5.5	試験結果	3-41
3.5.6	考察	3-43
3.5.7	まとめ	3-48
3.6	まとめ	3-49
第4章	G橋（下り線）における非破壊検査技術の適用性の検証	4-1
4.1	G橋（下り線）の概要	4-2
4.1.1	橋梁諸元	4-2
4.1.2	補修履歴及び変状発生状況	4-5
4.1.3	調査内容	4-12
4.2	舗装開削調査	4-13
4.2.1	調査目的	4-13
4.2.2	調査方法	4-13
4.2.3	開削結果	4-14
4.3	床版水分量測定	4-16
4.3.1	測定目的	4-16
4.3.2	測定機器の仕様	4-16
4.3.3	測定方法	4-17
4.3.4	測定結果	4-19
4.4	車載式電磁波レーダによる調査	4-23
4.4.1	調査目的	4-23
4.4.2	調査機器の仕様	4-23
4.4.3	計測方法	4-23
4.4.4	解析方法	4-23
4.4.5	解析結果と実際の床版状態との検証結果	4-25
4.4.6	まとめ	4-28
4.5	カート式電磁波レーダ（高周波型）による調査	4-29
4.5.1	調査目的	4-29
4.5.2	調査機器の仕様	4-29
4.5.3	調査方法	4-29

4.5.4	レーダデータの判定方法	4-29
4.5.5	損傷範囲の検証結果	4-30
4.5.6	まとめ	4-33
4.6	カート式電磁波レーダ（中周波型）による調査	4-34
4.6.1	調査の背景と目的	4-34
4.6.2	調査装置	4-34
4.6.3	調査方法	4-35
4.6.4	記録断面	4-35
4.6.5	舗装亀裂の分布	4-38
4.6.6	床版下面の信号分析	4-41
4.6.7	まとめ	4-44
4.7	ハンディ式電磁波レーダによる調査	4-45
4.7.1	調査目的	4-45
4.7.2	調査機器の仕様	4-45
4.7.3	調査方法	4-45
4.7.4	測定結果の判断方法	4-48
4.7.5	測定結果	4-48
4.7.6	まとめ	4-52
4.8	MMS（Mobile Mapping System）を用いた床版上面の滞水箇所特定手法	4-53
4.8.1	調査目的	4-53
4.8.2	調査機器の仕様	4-53
4.8.3	MMS 車両による滞水箇所の特定手法	4-54
4.8.4	計測結果	4-58
4.8.5	まとめ	4-62
4.9	小径微破壊内部検査	4-63
4.9.1	調査目的	4-63
4.9.2	小径微破壊内部検査の概要	4-63
4.9.3	調査方法	4-65
4.9.4	削孔調査により取得できる情報	4-68
4.9.5	調査結果	4-70
4.9.6	まとめ	4-79
4.10	まとめ	4-80
第5章 模型供試体を用いた非破壊検査技術の適用性の検証		5-1
5.1	模型供試体の概要	5-2
5.1.1	供試体諸元	5-2
5.2	車載式電磁波レーダによる調査	5-14
5.2.1	調査目的	5-14

5.2.2	調査機器の仕様	5-14
5.2.3	調査方法	5-14
5.2.4	計測した模型供試体	5-15
5.2.5	調査結果	5-15
5.2.6	まとめ	5-20
5.3	ハンディ式及びカート式電磁波レーダ（高周波型）による調査	5-21
5.3.1	調査目的	5-21
5.3.2	調査機器の仕様	5-21
5.3.3	調査方法	5-21
5.3.4	検証結果	5-22
5.3.5	まとめ	5-28
5.4	ハンディ式電磁波レーダを用いた滞水検知に関する解析手法の検討	5-29
5.4.1	調査目的	5-29
5.4.2	技術課題に対する解析手法を用いたアプローチ	5-29
5.4.3	模型供試体による解析結果	5-31
5.4.4	まとめ	5-33
5.5	超音波探査による調査	5-34
5.5.1	調査目的	5-34
5.5.2	超音波非破壊計測装置	5-34
5.5.3	計測原理	5-36
5.5.4	計測機器の仕様	5-37
5.5.5	計測方法	5-37
5.5.6	測定の対象	5-39
5.5.7	模型供試体 No.2（ひび割れ）の測定	5-41
5.5.8	模型供試体 No.3(防水層シート上面)の測定	5-43
5.5.9	撤去床版活用供試体 No.2(ひび割れ)の測定	5-45
5.5.10	G 橋(下り線)撤去床版の測定	5-47
5.5.11	計測結果・考察	5-54
5.5.12	まとめ	5-54
5.6	まとめ	5-55
第6章	電磁波レーダを用いた床版滞水推定 AI の構築	6-1
6.1	床版滞水推定 AI	6-2
6.1.1	概要	6-2
6.1.2	床版滞水推定 AI の構築方針	6-2
6.1.3	学習データの取得及び加工	6-3
6.1.4	分類モデルの構築	6-5
6.2	模型供試体を用いた床版滞水推定 AI の推定精度検証	6-11

6.2.1	概要	6-11
6.2.2	計測した模型供試体	6-11
6.2.3	検証方法	6-12
6.2.4	検証結果	6-13
6.2.5	まとめ	6-15
6.3	新たな学習データの整備及び追加学習による推定精度向上	6-16
6.3.1	概要	6-16
6.3.2	対象橋梁	6-16
6.3.3	学習データの取得	6-16
6.3.4	床版滞水推定 AI への追加学習	6-17
6.3.5	模型供試体を用いた追加学習後の分類モデルの推定精度検証	6-18
6.3.6	まとめ	6-20
6.4	床版滞水推定 AI の実橋への適用	6-21
6.4.1	概要	6-21
6.4.2	対象橋梁	6-21
6.4.3	適用結果	6-21
6.4.4	まとめ	6-23
6.5	まとめ	6-24

謝辞

参考資料

車載式電磁波レーダを用いた床版上面の滞水検知に関する手引き（案）

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。

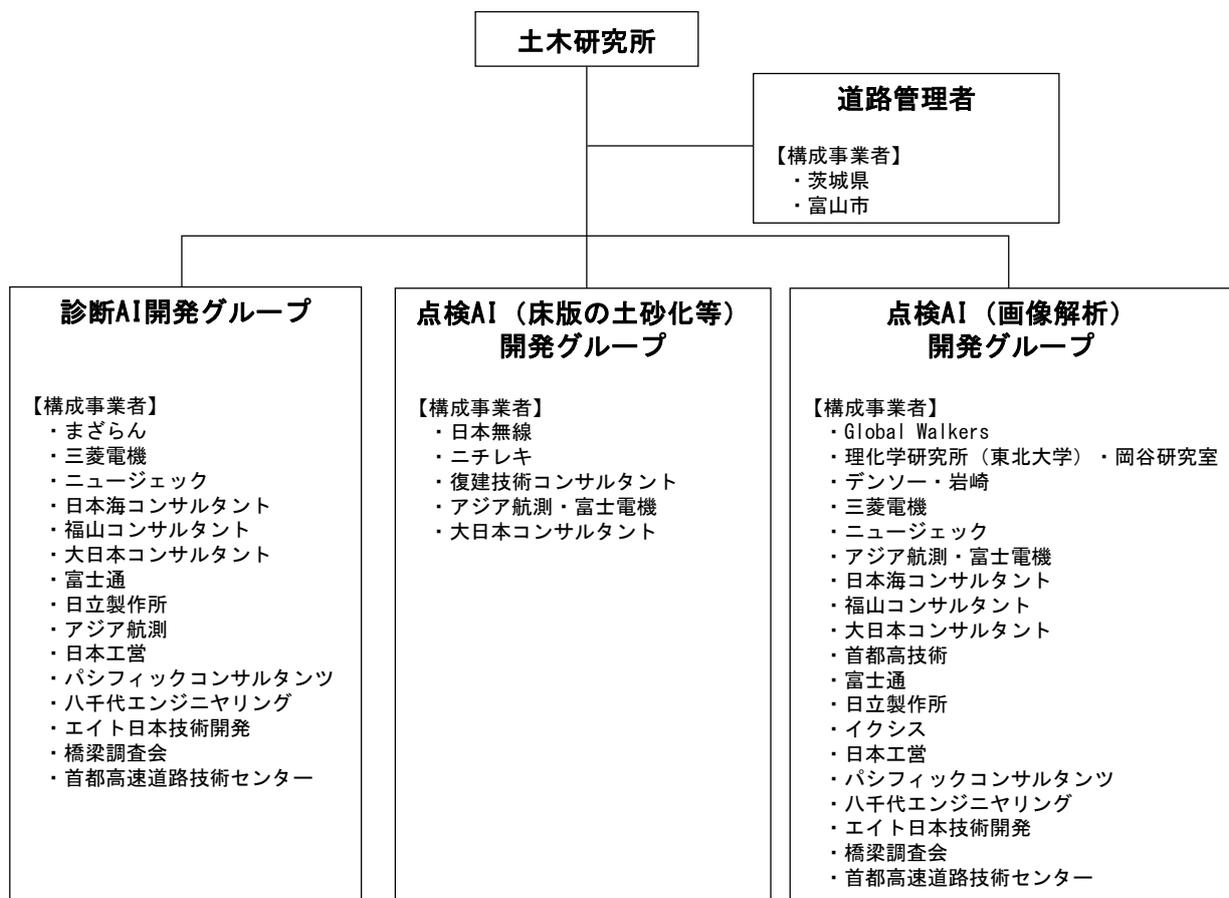


図-1.2.1 共同研究体制（平成30年度～令和3年度）

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¹⁾。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。共同研究参加者及び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

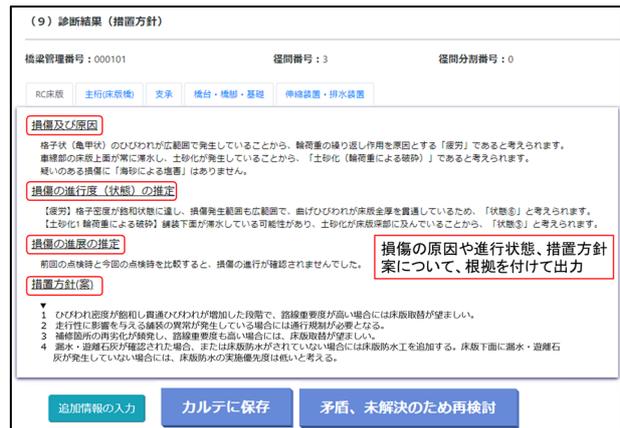


図-1.3.1 診断結果出力画面の例



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。

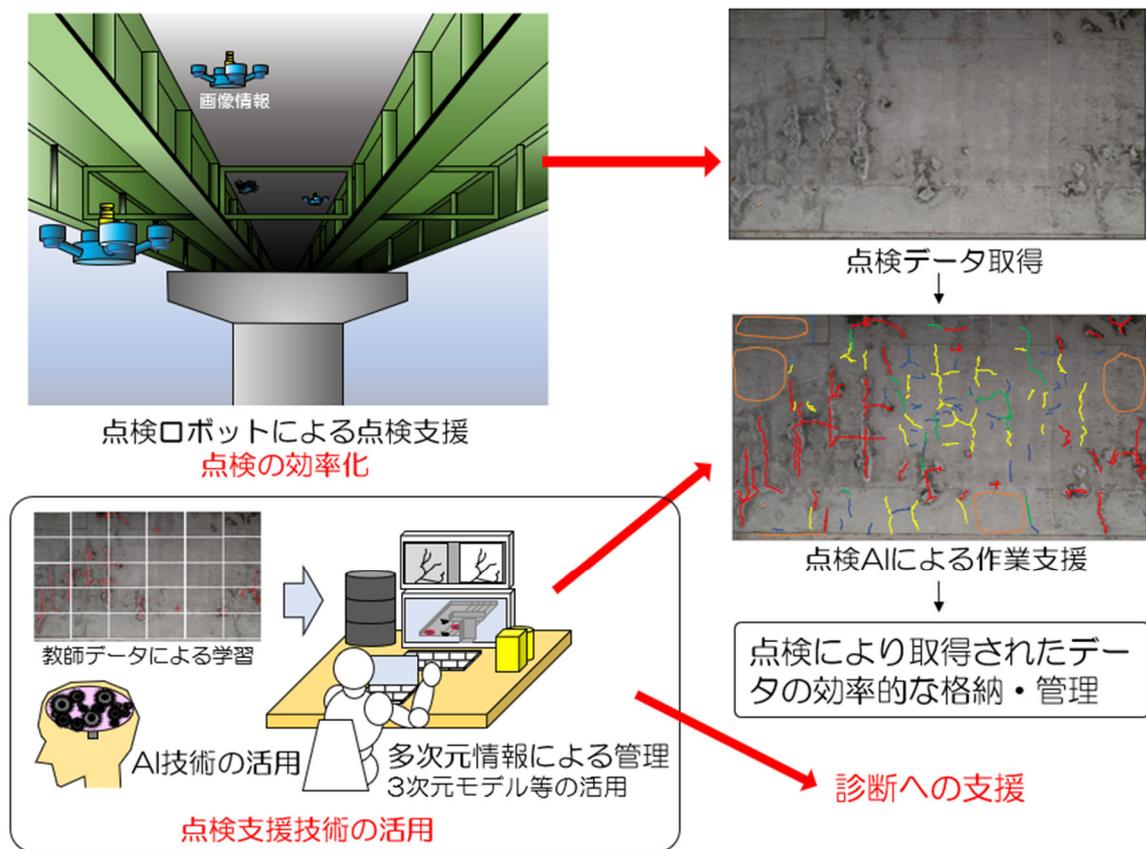


図-1.3.2 点検ロボット及び画像解析技術の活用による点検支援技術のイメージ

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、点検 AI（床版の土砂化等）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、舗装下の滞水検知手法としての非破壊検査技術の適用性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述べる。

第 2 章では、点検 AI（床版の土砂化等）グループにおける研究の背景及び目的について詳述する。

第 3 章及び第 4 章では、舗装下の滞水検知手法としての非破壊検査技術の適用性について、実橋において実施した調査内容とその結果について述べる。

第 5 章では、第 3・4 章同様舗装下の滞水検知手法としての非破壊検査技術の適用性に関して、土木研究所が所有する舗装下に滞水を模擬可能な模型供試体を用いて実施した調査内容とその結果について述べる。

第 6 章では、舗装下の滞水検知の省力化・効率化を目的に、AI を用いて電磁波レーダの計測結果から舗装下の滞水状態を自動推定する床版滞水推定 AI を構築したため、その内容と模型供試体及び実橋における滞水推定精度の検証結果について述べる。

第1章 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 点検 AI（床版の土砂化等）開発グループにおける研究の概要

2.1 研究の背景と目的

我が国において、高度経済成長期以降に集中的に整備されたインフラの老朽化が深刻化しており、老朽化が進むインフラを計画的に維持管理・更新していくことが求められている。このような社会背景の中、我が国では平成 26 年の道路法改正により、道路橋については道路管理者による 5 年に 1 回の頻度を基本とする定期点検が義務化され、道路橋定期点検要領¹⁾及び道路管理者ごとにさらに詳細に定めた要領^{例えば2)}に基づき進められているところである。

道路橋における RC 床版は、過去には大型車の輪荷重の繰返しによる疲労損傷が問題となり、最小床版厚及び配力鉄筋量の見直し等様々な対策が実施されてきた³⁾。しかし、近年では RC 床版上面の土砂化という損傷が顕在化し問題となっている。ここで言う土砂化とは、コンクリートの骨材と硬化セメントペーストが分離して堆積している状態⁴⁾を指す。道路橋定期点検要領及び橋梁定期点検要領における既設床版の劣化・損傷状況の点検は、主な着目箇所の例として床版下面及び舗装面が挙げられており、実際の現場でも床版下面からの外観目視及び舗装面のひび割れ等の発生状況の目視確認により行われている。しかし、輪荷重による疲労、材料劣化等により生じる床版上面の土砂化は、舗装のポットホールや床版下面のひび割れ及び漏水痕などの外観変状との相関が明確でなく、外観目視による点検手法では床版上面の土砂化の発生・進行を見落とすリスクを抱えている。写真-2.1.1 は、前回の定期点検時には明確な変状が見られず、対策不要と判定されていた箇所で、数年後に床版の抜け落ちが発生した事例である。このように床版の土砂化は、床版下面に変状が生じて以降の劣化の進行が速いことが特徴となっている。土砂化は、図-2.1.1 のように路面上の水が舗装のひび割れや継目等から舗装下に浸入、コンクリート床版の細孔が水で充填されたのち、輪荷重による水圧が周囲のモルタルを破碎することで進行していくと考えているが、凍害、塩害等による複合劣化も生じており、劣化機構を含めて不明な点が多い。

土砂化は舗装下のコンクリート床版上で発生・進展することから、現状の外観目視を主とした定期点検では劣化初期段階での検知が困難である。そのため、土砂化が進行してから初めて確認される場合が多く、確認されたときには床版の性能が著しく低下している場合もある。図-2.1.1③の状態まで土砂化が進行してしまうと、その補修のためには断面修復や床版の部分打換え、さらに劣化が広範囲に及ぶ場合は床版取替といった大規模な補修工事を実施しなければならず、膨大な補修コストが必要となる。一方、図-2.1.1②までの状態のうちに床版上面の滞水を早期検知することができれば、止水・遮水といった小規模な補修工事で済み、補修コストを大幅に低減できる。

以上のように、膨大な量の道路橋を効率的に維持管理していくためには、潜在的な劣化リスクを抱えた橋梁を点検によりスクリーニングし、劣化が進行する前に予防保全的措置を実施することが重要である。

このような背景の中、近年電磁波レーダ法等の非破壊検査手法を用いて、土砂化の生じた位置やその範囲を推定する試みが行われている⁵⁾。電磁波レーダ法とは、電磁波が電気的特性の異なる物質の境界面で反射する原理を利用したものであり、従来は鉄筋の探査などの構造物の内部状況を把握する手法や土工部の空洞、埋設管の位置を確認する手法として利用されてきた。

第2章 参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路橋定期点検要領，2019
- 2) 国土交通省道路局 国道・技術課：橋梁定期点検要領，2019
- 3) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：道路橋床版の疲労耐久性評価に関する研究，国土技術政策総合研究所資料，第472号，pp5-6，2008
- 4) 田中良樹：土木用語解説，土木技術資料 コンクリート床版の土砂化，Vol.63，No.10，p.52，2021
- 5) 小林大，永塚竜也，田代大樹，橋本竜也：電磁波レーダによるRC床版上面の状態評価に関する実験的検討および現場適用事例，第九回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp.73-76，2016

第3章 G橋（上り線）における非破壊検査技術の適用性の検証

本章では、G橋（上り線）を対象とした、舗装下の滞水検知手法としての非破壊検査技術の適用性の検証結果を記した。また、適用性の評価に必要な舗装開削調査及び床版上面水分量測定の結果を記した。

3.1 G 橋（上り線）の概要

3.1.1 橋梁諸元

非破壊検査技術の適用性の検証を実施した G 橋（上り線）は、1973 年に供用を開始した、東北地方の積雪寒冷地を通る国道上に架設された道路橋である。橋梁諸元を表-3.1.1、外観写真を写真-3.1.1、橋梁一般図を図-3.1.1 に示す。橋梁諸元は調査時点での最新の定期点検調書（2017 年）に記載の情報を記載している。ただし、昼間 12 時間交通量及び大型車交通量のみ 2015 年の数値となっている。現地は積雪寒冷地のため、冬季には凍結防止剤の散布が実施されている。

表-3.1.1 橋梁諸元

橋梁名	G 橋（上り線）
供用年	1973 年（昭和 48 年）
供用後経過年数	46 年
上部工形式	3 径間連続鋼非合成鈹桁橋
橋長	101.00m
支間長	32.00m+36.00m+32.00m
設計活荷重	TL-20（1 等橋）
幅員構成	全幅員 10.40m, 有効幅員 9.50m
昼間 12 時間交通量	42,085 台
大型車混入率	8.6%
適用基準	昭和 47 年 道路橋示方書
橋面防水工の有無	有り（シート系防水）



(a) 路面全景 (A1 側より撮影)



(b) 路面全景 (A2 側より撮影)



(c) 第1径間 (A1-P1) 全景



(d) 第1径間 (A1-P1) 下面



(e) 第2径間 (P1-P2) 全景



(f) 第2径間 (P1-P2) 下面



(g) 第3径間 (P2-A2) 全景



(h) 第3径間 (P2-A2) 下面

写真-3.1.1 外観写真

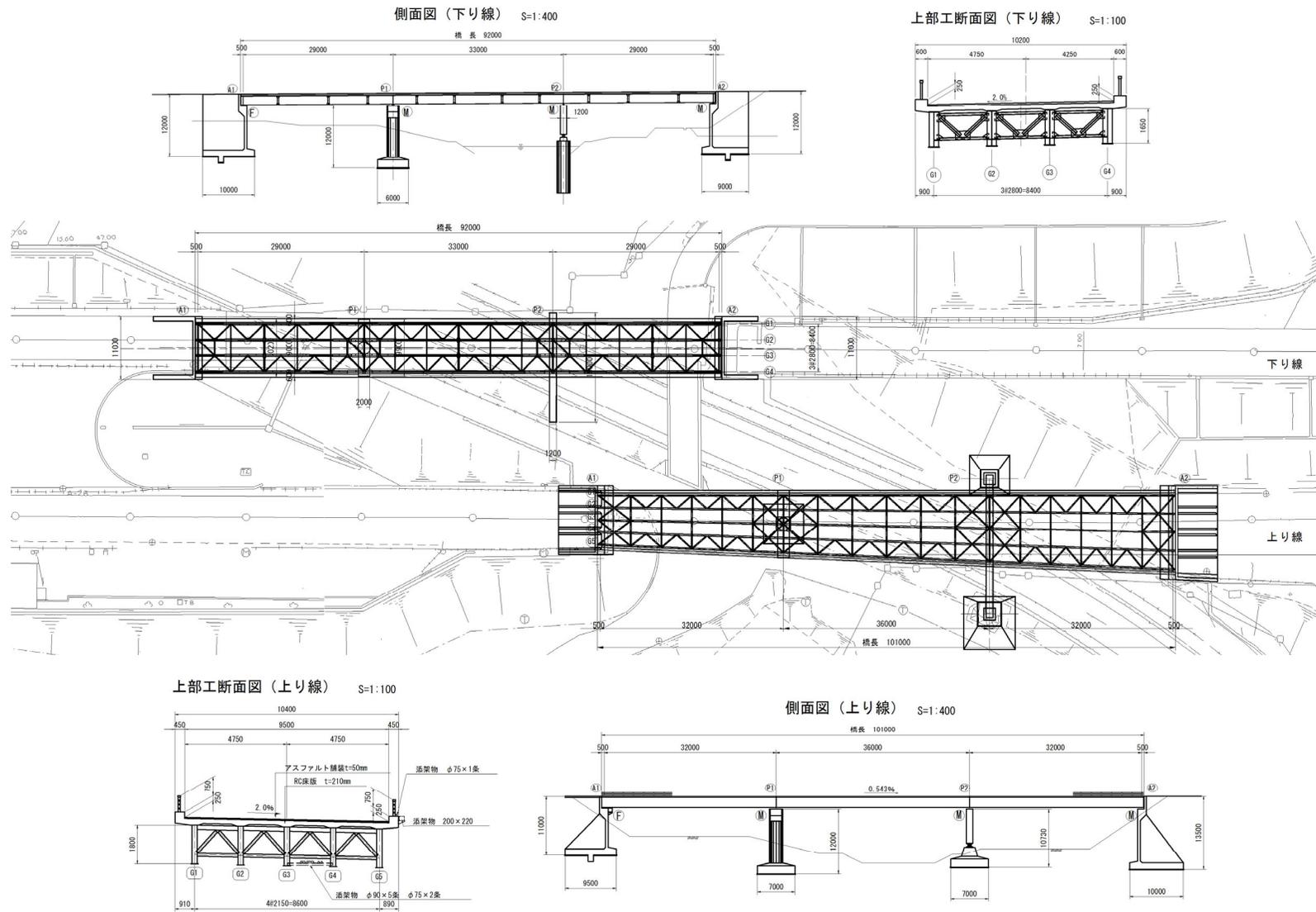


図-3.1.1 橋梁一般図

3.1.2 補修履歴及び変状発生状況

過去の補修工事における床版上面補修図面を図-3.1.2 に、最新の定期点検調書（2017 年実施）に記載されている路面及び床版下面の点検結果を図-3.1.3～図-3.1.5 に示す。床版上面補修図面は、2005 年に行われた補修工事におけるものである。

第1 径間では、図-3.1.2 より過去に舗装打継目に沿って広範囲の補修が実施されていることが確認できる。床版下面には写真-3.1.2 のように G4-G5 桁間を除いて全面に炭素繊維シートが格子状に貼り付けられており、床版下面の状況が確認できないため変状は記録されていない。G4-G5 桁間については、一部パネルで 0.5mm を超えるひび割れが生じている。路面には一部補修痕があるものの、大きな変状は生じていない。

第2 径間では、図-3.1.2 より右路肩及び P2 付近の走行車線部に上面補修されたことが確認できる。床版下面に着目すると、比較的広範囲にひび割れが生じており、そのうちのほとんどの箇所で漏水・遊離石灰が確認されている。遊離石灰の発生状況を写真-3.1.3 に示す。遊離石灰について、点検調書の記載には前回点検から新たに確認されたとあり、橋面防水工が実施された履歴があるものの機能せず、路面から水が浸入していることが分かる。床版上面補修痕が集中していた P2 付近の走行車線部の路面には写真-3.1.4 のとおり土砂噴出が確認されており、過去の補修痕に水が浸入し再劣化が生じている可能性が考えられる。P1 側舗装打継目付近の路面に確認されている土砂噴出も同様に、過去の補修痕の再劣化の可能性がある。

第3 径間では、図-3.1.2 より全体的に補修痕が点在している。床版下面では、第2 径間ほどではないがひび割れが生じており、一部のひび割れから漏水・遊離石灰も確認されている。また、遊離石灰確認箇所の直上付近の路面には土砂噴出が確認されている。この遊離石灰について、点検調書の記載には前回点検から新たに確認されたとあり、第2 径間同様に路面から水が浸入していると推察される。

上記損傷・補修状況は直近の定期点検時点のものであり、橋梁調査時点では損傷が更に進行している可能性もある。そこで、直近の定期点検以降かつ橋梁調査実施前までの路面状況について、グーグルのストリートビューを用いて確認した。

写真-3.1.5～写真-3.1.7 は、最新の定期点検（2017 年）に最も近い 2017 年 9 月撮影の路面画像と、非破壊検査技術の適用性の検証実施日（2020 年 1 月）の直前の 2019 年 6 月撮影の路面画像の比較である。写真中の赤丸は直近の定期点検結果に記録されていない路面補修痕を示している。2 年弱という短期間で路面補修痕が増加していることが確認された。

床版上面補修工 補修位置平面図 S=1:300

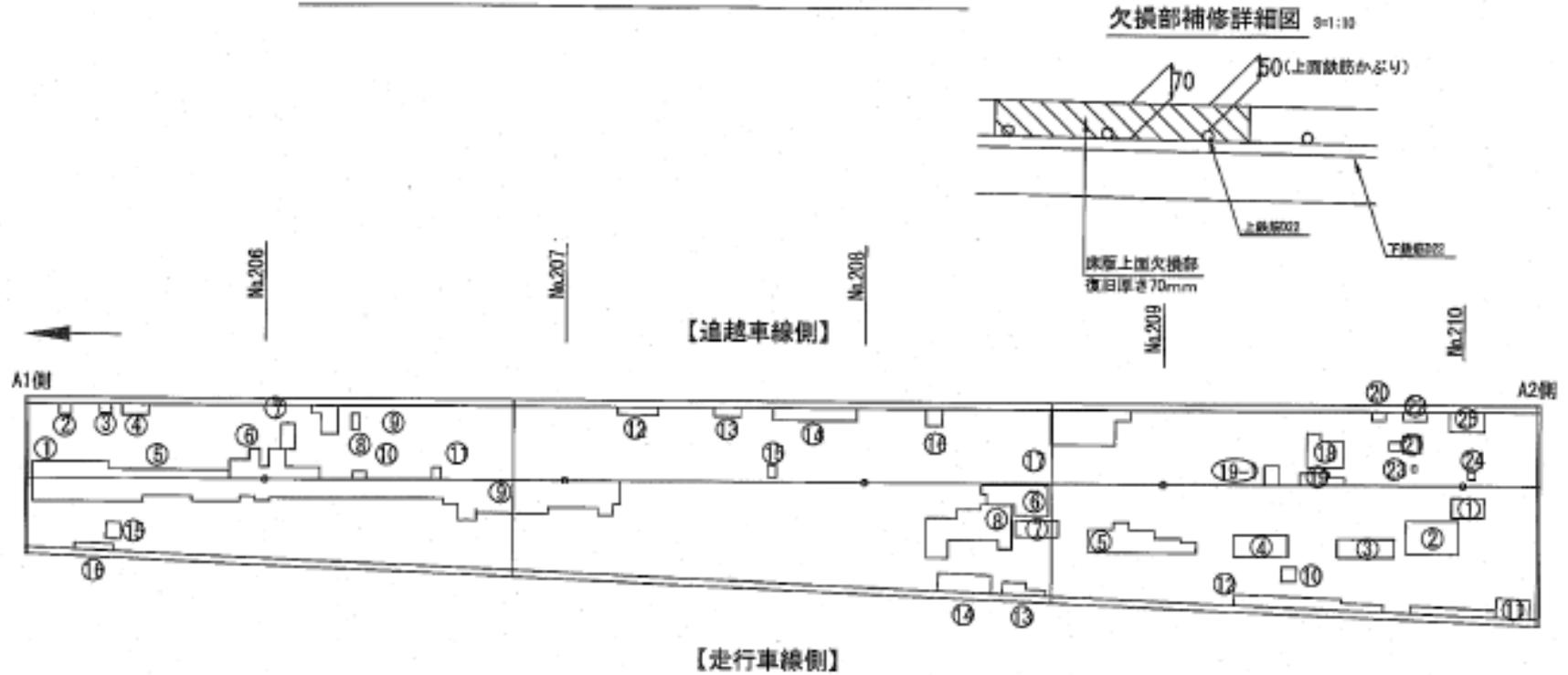
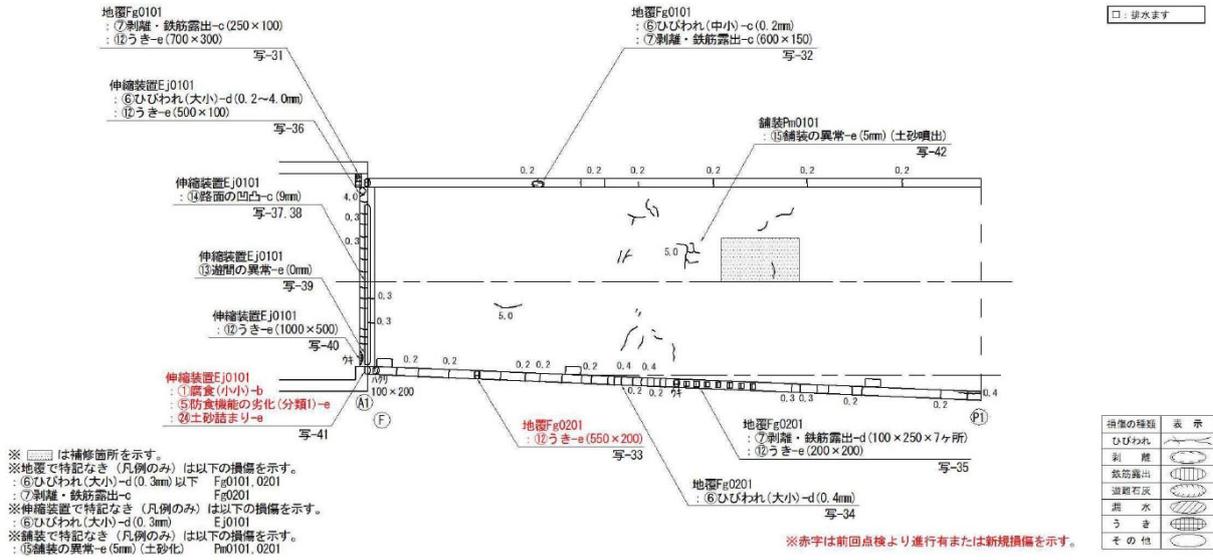


図-3.1.2 床版上面補修図面

第1径間 橋面

防護柵(Gf) 地覆(Fg) 伸縮装置(Ej) 舗装(Pm) 排水ます(Dr)

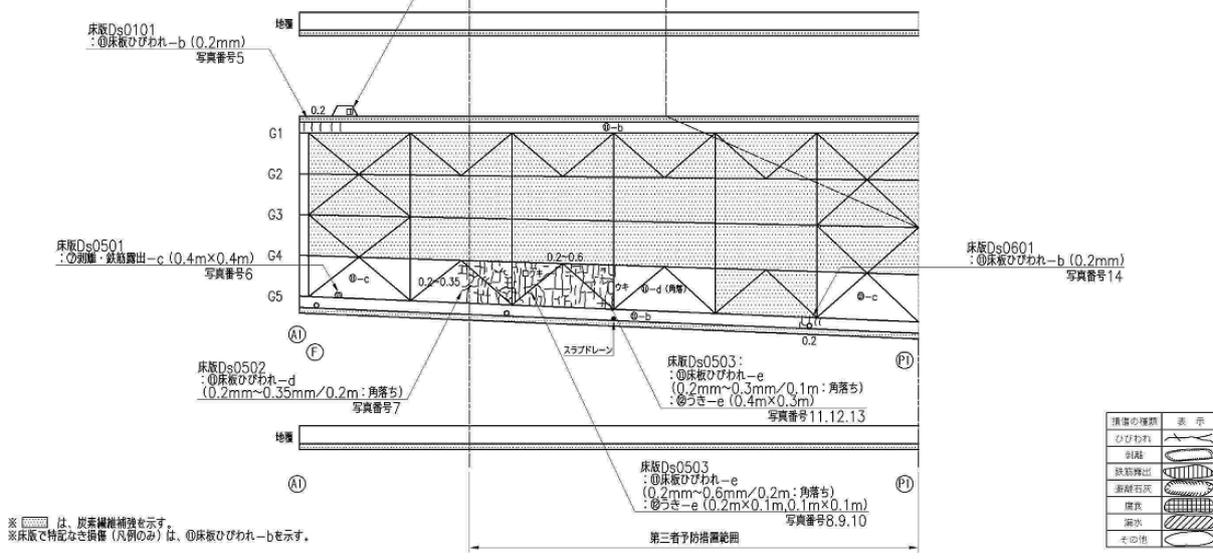
橋面防水工	有
排水施設	有
舗装	有
□: 排水ます	



(a) 路面点検結果

第1径間 桁下面

床版(Ds) 地覆(Fg)



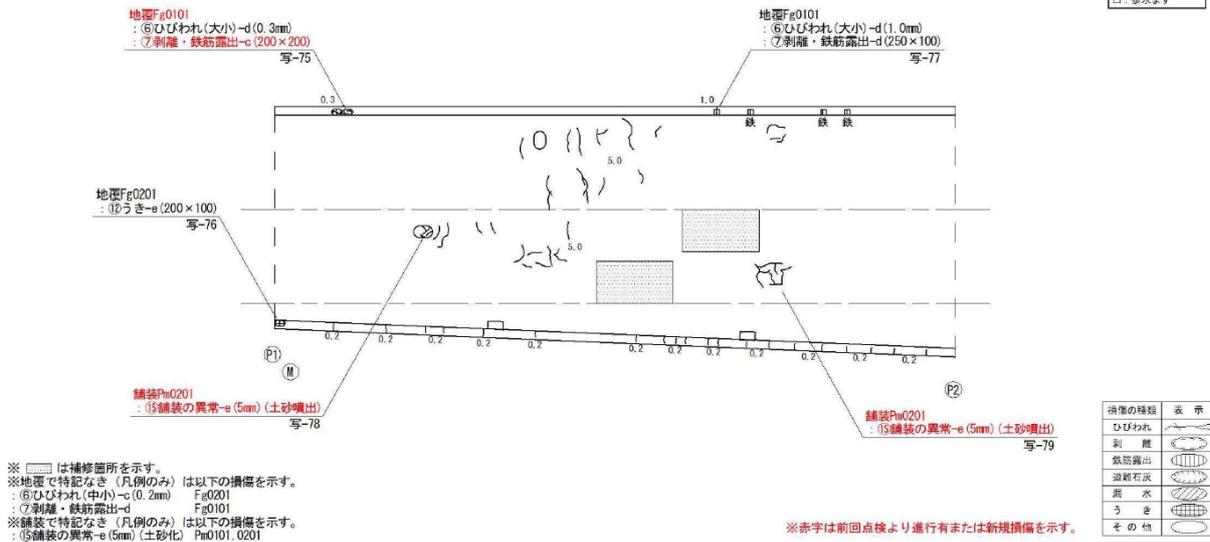
(b) 床版下面点検結果

図-3.1.3 路面及び床版下面点検結果(第1径間)

第2径間 橋面

防護柵 (Gf) 地覆 (Fg) 伸縮装置 (Ej) 舗装 (Pm) 排水ます (Dr)

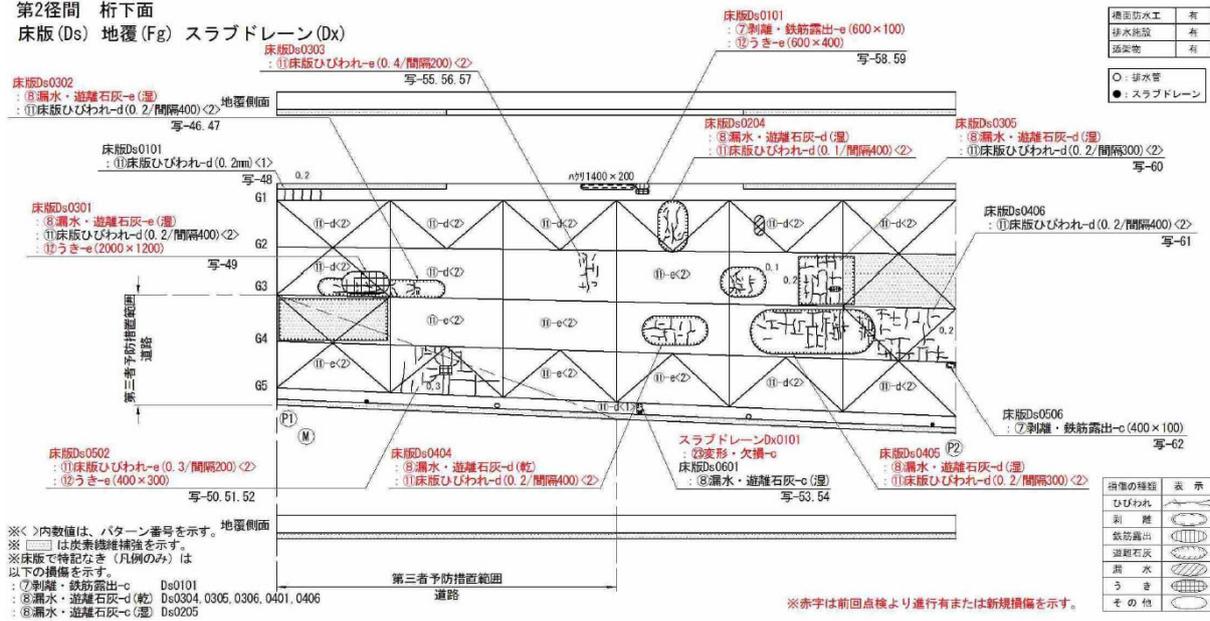
橋面防水工	有
排水施設	有
透空物	有
□: 排水ます	



(a) 路面損傷図

第2径間 桁下面
床版 (Ds) 地覆 (Fg) スラブレイン (Dx)

橋面防水工	有
排水施設	有
透空物	有
○: 排水管 ●: スラブレイン	



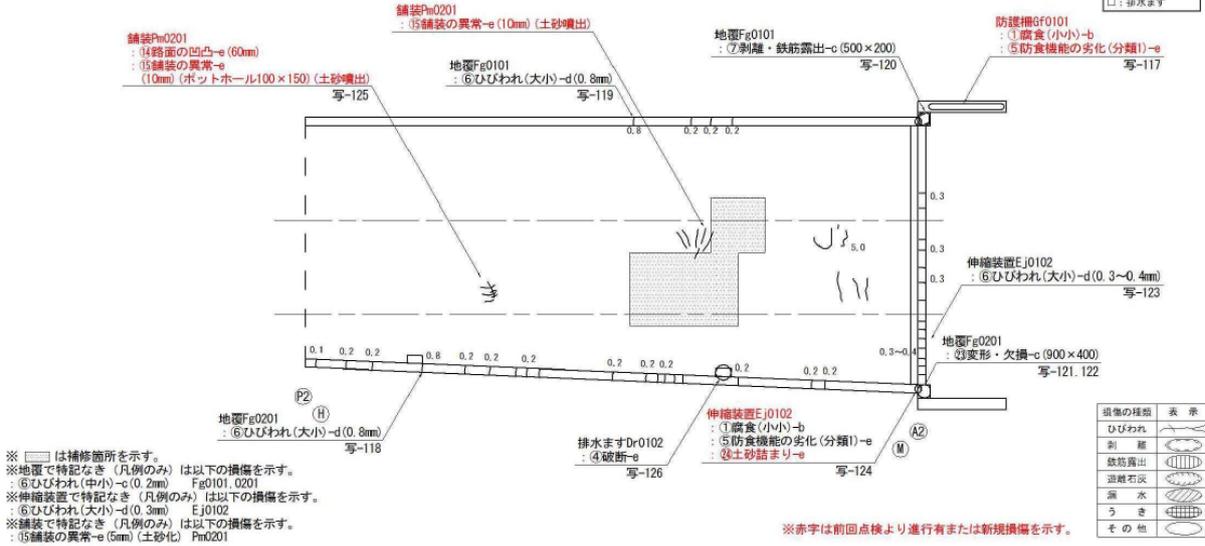
(b) 床版下面損傷図

図-3.1.4 路面及び床版下面損傷図(第2径間)

第3径間 橋面

防護柵(Gf) 地覆(Fg) 伸縮装置(Ej) 舗装(Pm) 排水ます(Dr)

橋面防水工	有
排水施設	有
添築物	有
□ : 排水ます	

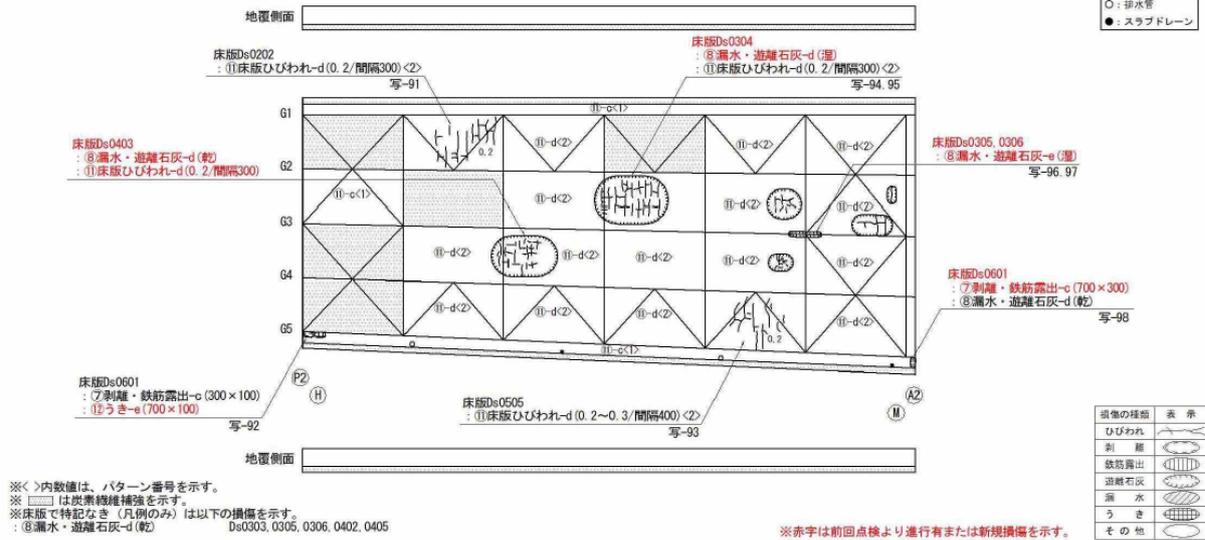


(a) 路面損傷図

第3径間 桁下面

床版(Ds) 地覆(Fg)

橋面防水工	有
排水施設	有
添築物	有
○ : 排水管 ● : スラブドレーン	



(b) 床版下面損傷図

図-3.1.5 路面及び床版下面損傷図(第3径間)



写真-3.1.2 炭素繊維シート貼付け状況



写真-3.1.3 遊離石灰（床版下面損傷図内の写-46）



写真-3.1.4 土砂噴出（路面損傷図内の写-78）



撮影日: 8月 2016 © 2022 Google

Google 2016.1 撮影

(a) 2017年9月撮影 (P1 から A1 を見た画像) ¹⁾

2016年1月撮影 <https://www.google.co.jp/maps/@38.2599159,140.8206651,21z>



撮影日: 6月 2019 © 2022 Google

Google 2019.6 撮影

(b) 2019年6月撮影 (P1 から A1 を見た画像) ²⁾

2019年6月撮影 <https://www.google.co.jp/maps/@38.2599159,140.8206651,21z>

写真-3.1.5 第1径間の路面画像の比較



撮影日: 9月 2017 © 2022 Google

Google 2017.9 撮影

(a) 2017年9月撮影 (P2 から P1 を見た画像) ³⁾

2017年9月撮影 <https://www.google.co.jp/maps/@38.2598627,140.8201031,19z>



撮影日: 6月 2019 © 2022 Google

Google 2019.6 撮影

(b) 2019年6月撮影 (P2 から P1 を見た画像) ⁴⁾

2019年6月撮影 <https://www.google.co.jp/maps/@38.2598627,140.8201031,19z>

写真-3.1.6 第2径間の路面画像の比較



撮影日: 9月 2017 © 2022 Google

Google 2017.9 撮影

(a) 2017年9月撮影 (A2 から P2 を見た画像) ⁵⁾

2017年9月撮影 <https://www.google.co.jp/maps/@38.2598627,140.8201031,19z>



撮影日: 6月 2019 © 2022 Google

Google 2019.6 撮影

(b) 2019年6月撮影 (A2 から P2 を見た画像) ⁶⁾

2019年6月撮影 <https://www.google.co.jp/maps/@38.2598627,140.8201031,19z>

写真-3.1.7 第3径間の路面画像の比較

3.1.3 調査内容

G橋（上り線）で実施した調査内容一覧を表-3.1.2に示す。調査内容の詳細及び結果は次節以降で詳述する。

表-3.1.2 調査内容一覧

調査項目	概要	使用機器	調査範囲	調査日	節
路面外観調査	舗装路面の外観を観察する	カメラ	A1-A2	2020.1.10 2020.1.11	—
		車載ライセンカメラ	A1-A2		3.3
床版上面外観調査	舗装を一部撤去し床版上面状況を観察する	カメラ 点検ハンマ	A1-A2	2020.1.10 2020.1.11	3.2
床版下面外観調査	吊足場内から床版下面の外観を観察する	カメラ	A1-A2	2020.1.16	—
車載式レーダ計測	車載式レーダを用いて舗装下の床版のレーダ探査を行う	レーダ搭載調査車	A1-A2	2019.11.28	3.3
カート式レーダ計測	カート式レーダ（高周波）を用いて舗装下の床版のレーダ探査を行う	カート式レーダ（高周波）	A1-A2	2020.1.10	3.4
床版上面水分量測定	舗装除去後の床版上面コンクリートの水分量を測定する	電気抵抗式水分計	A1-A2	2020.1.10 2020.1.11	3.2
コンクリートコア採取	舗装撤去範囲の床版のコアを採取する	コンクリートコア削孔機	A1-P2	2020.1.10	3.6

3.2 舗装開削調査

3.2.1 調査目的

非破壊検査技術を用いて、路面上から床版上面に生じた滞水や劣化状態を検知可能か検証するためには、まず実際の床版上面の状態がどうなっているかを把握する必要がある。床版上面の状態を把握することを目的として、舗装の開削調査を行った。

3.2.2 調査位置

図-3.2.1 に調査位置図を示す。No.1 の調査箇所は舗装補修跡から土砂の噴出が確認されており、床版上面に土砂化が発生していると想定した。No.2 の調査箇所はNo.1 の隣であり土砂が噴出していないため健全部として想定した。No.3 の調査箇所は舗装コアを採取した後の床版上面の水分量計測で高い計測値を示したため土砂化が発生していると推定した。No.4 及びNo.5 の調査箇所は舗装の部分補修部の損傷から床版上面に水分が供給され滞水していると推定した。

3.2.3 調査方法

開削範囲の四辺をカッターで縁切りしたのち、小型ブレーカーを用いて開削を行った。

3.2.4 調査結果

図-3.2.2(a)～(c)に開削前の舗装状態、図-3.2.3(a)～(c)に開削箇所の床版上面の状態を示す。No.1 は全体的にコンクリートの剥離や劣化等が見られず健全な状態であった。No.2 では湿潤状態の部分でコンクリートが劣化しており部分的な欠損が生じていた。隣接する舗装補修部に生じた損傷から水分が供給されていた可能性が高い。No.3 では床版上面にうきが確認された。No.4 は床版上面の補修が行われており、上面補修部をハンマーで壊し既設コンクリートを確認すると、セメントペーストと骨材の剥離が生じておりコンクリートが欠損していた。No.5 もNo.4 と同様にセメントペースト骨材の剥離によるコンクリートの欠損が見られ、滞水も生じていた。コンクリートの欠損は床版の上側鉄筋位置まで進行しており、鉄筋の腐食も確認された。No.4 とNo.5 の開削箇所については、舗装を開削する前に小径微破壊検査で使用したエアブローで空気を注入すると、補修部の損傷している箇所や補修部と既設アスファルトの境界部から水が噴出されるのを確認した(図-3.2.4 赤矢印)。当箇所において水の噴出が確認された部分から、床版上面に橋面水が供給されていたと考える。

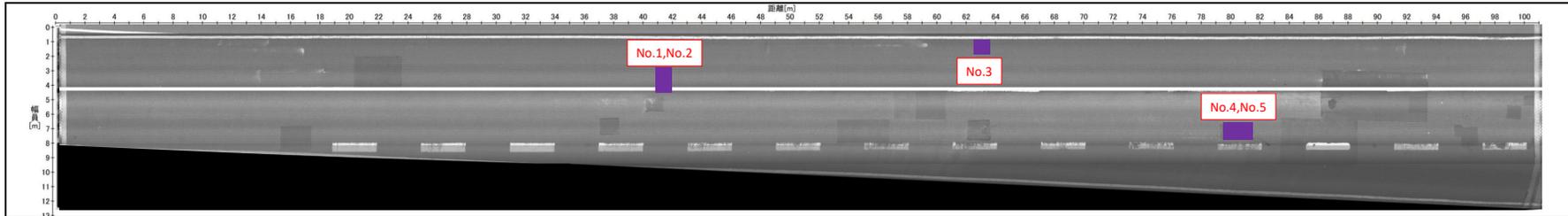


図-3.2.1 開削調査箇所的位置図

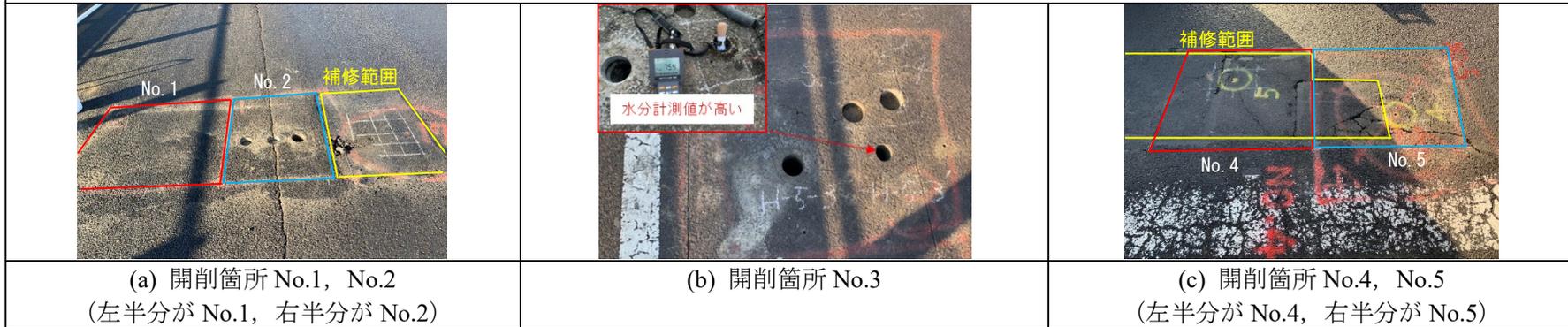


図-3.2.2 開削前の舗装の状態



図-3.2.3 開削後の床版上面の状態



図-3.2.4 空気注入による床版内部の滞水状況の確認

3.3 車載式電磁波レーダによる調査

3.3.1 調査目的

非破壊検査技術の1つである電磁波レーダ法は、電磁波が透過した媒体と異なる比誘電率を持つ媒体の境界で反射する性質を利用し、物質内部を非破壊で探査する技術であり、その計測方法はおおまかに、車両にレーダを搭載して計測を行う車載式、人力でレーダを牽引して計測を行うカート式、及び小規模な範囲を詳細に計測するハンディ式に分けられる。

そのうちの車載式電磁波レーダについて、G橋（上り線）において調査を実施し、電磁波の反射信号の特徴に基づきRC床版上面の滞水及び劣化状態を検知可能か検証した。

3.3.2 電磁波レーダの原理

電磁波レーダの探査原理は、図-3.3.1及び図-3.3.2に示すように、電磁波を媒体中に送信器から放射し、反射した電磁波を受信器で受信し、反射波が返ってくるまでの時間から深さ方向の位置を推定する。平面的な位置は、距離計を内蔵した装置を移動させることにより、位置情報を得る。電磁波の速度は、真空中の速度（ $3 \times 10^8 \text{m/s}$ ）が基準となり各媒体に対する固有の速度で伝わる。各媒体内での伝播速度は、各媒体の固有の比誘電率に依り、式(1)の速度で進む。反射物体までの距離は、送信時刻と反射波の受信時刻の時間差から、式(2)で求めることができる。

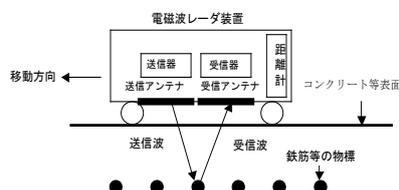


図-3.3.1 測定原理の概略図

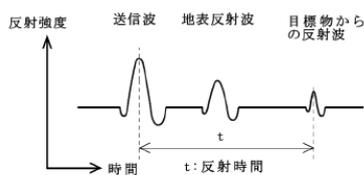


図-3.3.2 送信波と反射波

$$V = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

ここで、 V ：各媒体における電磁波の速度（m/s）、 ϵ_r ：各媒体の比誘電率

$$D = \frac{1}{2} \cdot V \cdot T \quad (2)$$

ここで、 D ：反射物体までの距離（m）、 T ：送信時刻と反射波の受信時刻の時間差（s）

3.3.3 車載式電磁波レーダの概要

車載式電磁波レーダは、交通規制をかけずに調査が可能という特長を有する。車載式は短時間で強い電磁波を射出するパルス式と、電磁波の周波数を段階的に（例：200MHz, 220MHz, 240MHz, …, 3GHz）上げながら連続する sin 波を送信し、最後に各周波数の受信波を重ね合わせて 1 つの波形を生成するマルチステップ周波数式に大別される。両者は、結果として得られる記録断面には大きな相違はないが、詳細な分析を行う際に注意が必要となる場合がある。一方、車載式として普及している装置の周波数特性等に大きな相違はなく、床版調査に対する特性に大きな差はない。本調査で使用した車載式レーダには、マルチステップ周波数方式を採用している。周波数領域のデータを逆フーリエ変換して時間領域のデータに変換することで、Real 値(実数)と Imaginary 値(虚数)が算出される。また、Real 値(実数)と Imaginary 値(虚数)を計算処理して位相に関係なく反射の強さとしたものが Magnitude となる。生成された波形の例を図-3.3.3 に示す。この方式は、中心周波数の異なるパルスレーダを複数個使用した場合と同様な結果が得られる。

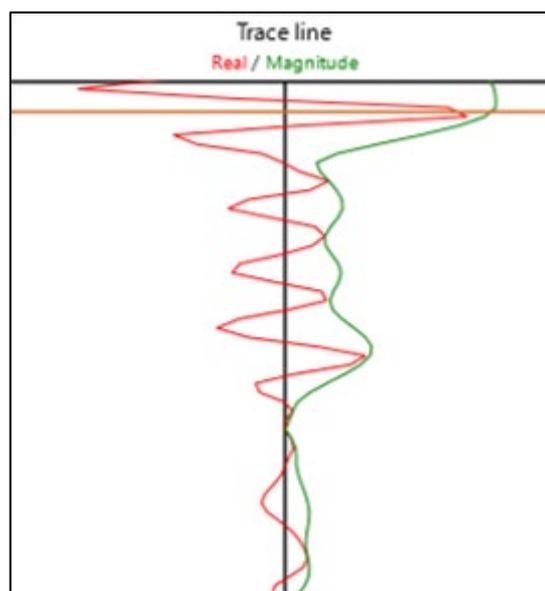


図-3.3.3 生成された波形の例（赤線:Real, 緑線:Magnitude）

3.3.4 調査機器の仕様

計測は、自走式の電磁波レーダ装置「床版キャッチャー」を用いて一般交通の中で路面に向かって電磁波を発信し、反射信号を受信することで行う。床版キャッチャーの外観及び仕様について、写真-3.3.1 と表-3.3.1 に示す。



写真-3.3.1 床版キャッチャー外観

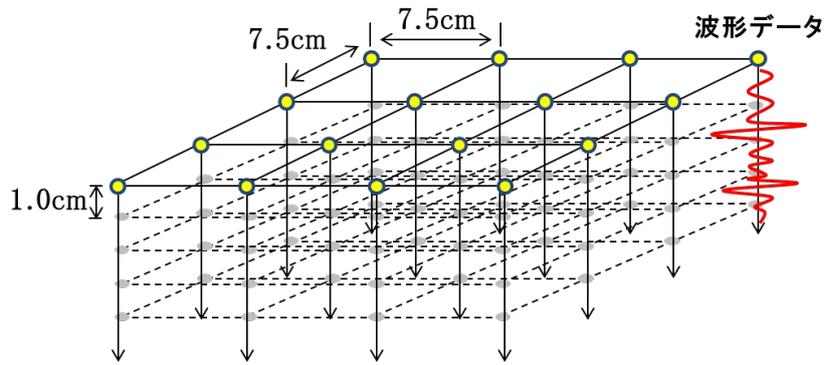
表-3.3.1 床版キャッチャー仕様

項目		仕様	性能
測定速度		～80km/h	最大80km/h,推奨40km/h,交通規制不要
距離測定	測定方式	車速信号取得	精度±0.3%以内
路面画像	撮影方式	ラインセンサカメラ	幅1mm以上のひび割れ検出可,夜間の撮影は不可 有効撮影幅員幅4m
電磁波レーダ	測定方式 周波数 アンテナ	マルチステップ周波数方式 200MHz～3GHz アンテナ幅1.8m	周波数を高速で切り替えながらデータを取得 最大探査深度1.5m程度 (比誘電率に依存) 有効測定幅員幅1.5m 橋軸方向7.5cm間隔、橋軸直角方向7.5cm間隔 深さ方向1.0cm間隔 (比誘電率に依存)
記録媒体		HDD記録	

3.3.5 計測方法

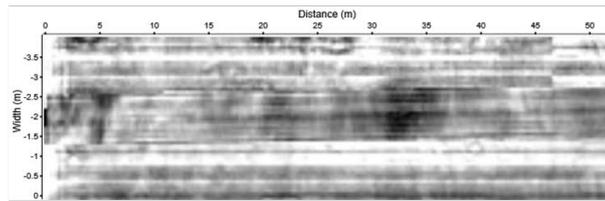
電磁波レーダの有効幅員幅は1.5mであるため、橋梁の幅員に合わせて複数回走行して計測する必要がある。G橋(上り線)は、1車線あたり3回走行してデータを取得した。取得したデータは、ラインセンサカメラによる路面画像と電磁波レーダによる反射信号の2つである。反射信号は、橋軸方向及び橋軸直角方向に7.5cm間隔、深さ1.0cm間隔で取得され、その強度の大小に応じて256階調のモノクロのコンター図(平面図・縦断図・横断図)に変換され視覚化される(図-3.3.4)。複数に分割して取得した路面画像及び反射信号のデータを合成することで、1つの橋梁のデータとする。合成後の路面画像及び平面コンター図を図-3.3.5～図-3.3.7に示す。

データ取得イメージ

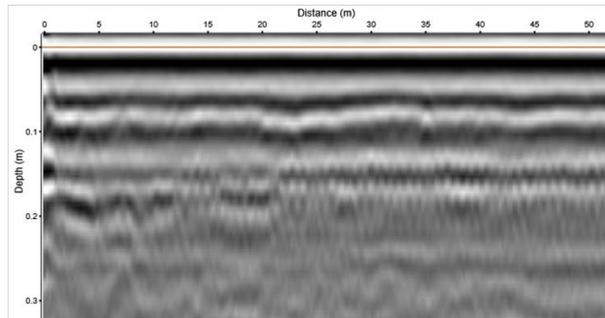


波形データに256階調のモノクロで色付け

平面コンター図



縦断コンター図



横断コンター図

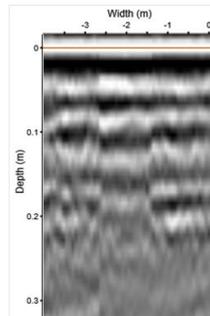


図-3.3.4 取得データの視覚化イメージ

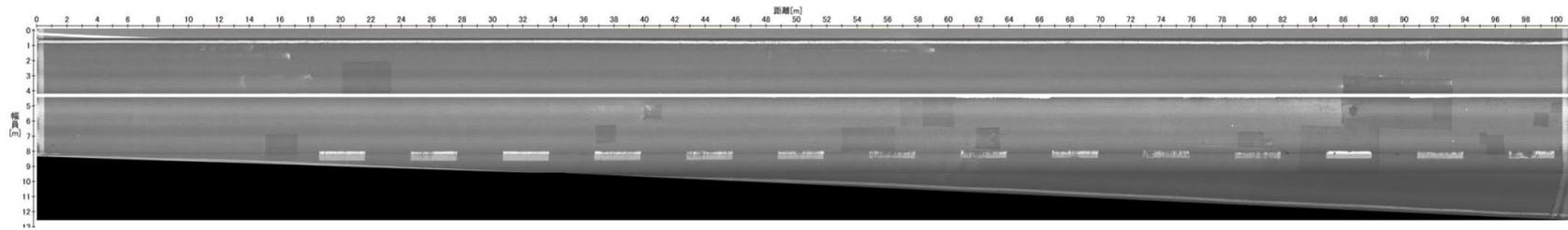


図-3.3.5 路面画像

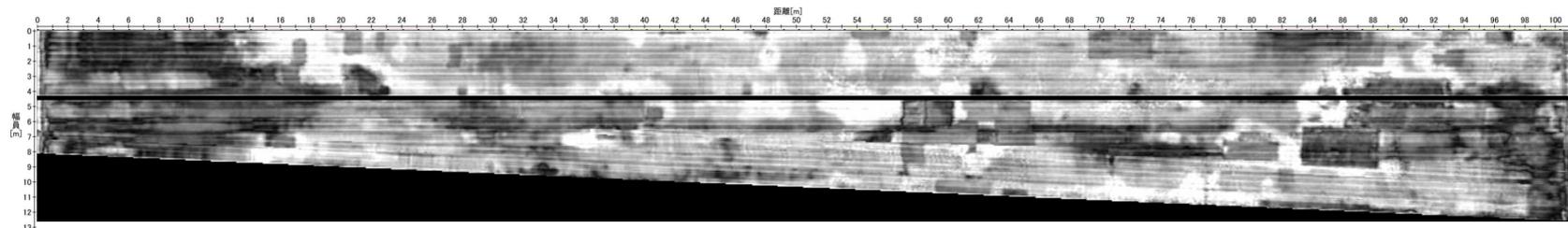


図-3.3.6 平面コンター図（床版上面付近）

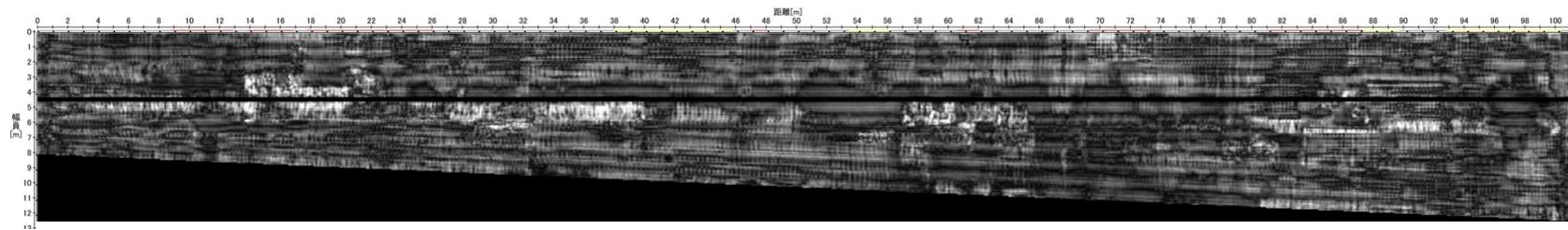


図-3.3.7 平面コンター図（上側鉄筋付近）

3.3.6 解析方法

解析は、既往研究における実物大供試体実験より得られた知見⁷⁸⁾に基づいて、G橋（上り線）の床版上面の状態をグループ1～3（表-3.3.2）の3つに分類した。次に、実物大供試体実験より得られたグループ1～3の代表的な反射信号を図-3.3.8～図-3.3.10に示す。

表-3.3.2 RC床版上面の状態分類

分類	推定される床版状態
グループ1	健全
グループ2	舗装剥離，浅い土砂化，水平クラック等の疑いあり
グループ3	深い土砂化，床版上面の滞水等の疑いあり

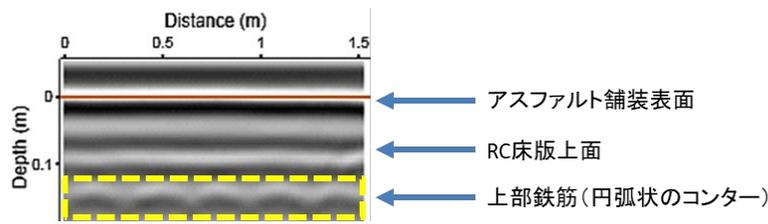


図-3.3.8 実物大供試体実験において健全を模擬した供試体の反射信号

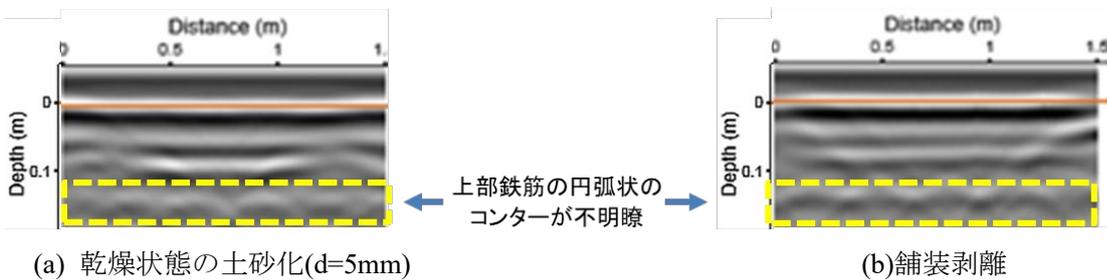


図-3.3.9 実物大供試体実験において乾燥状態の土砂化(d=5mm)および舗装剥離を模擬した供試体の反射信号

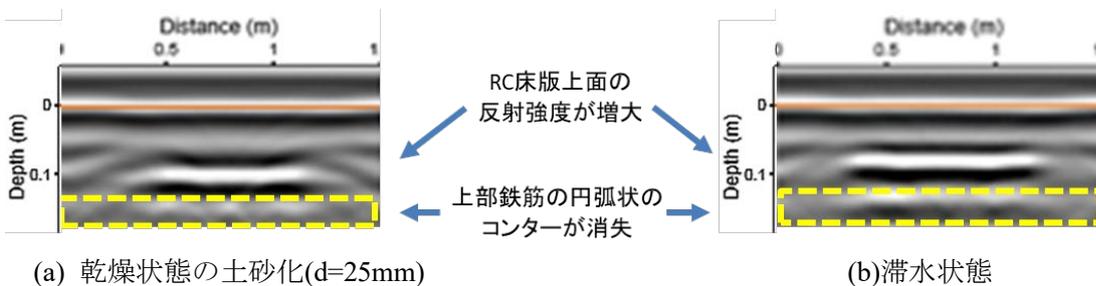


図-3.3.10 実物大供試体実験において乾燥状態の土砂化(d=25mm)および滞水状態を模擬した供試体の反射信号

以下では、G橋（上り線）の床版上面の状態を分類した結果について、各グループの代表箇所のデータを用いて説明する。

(1) グループ 1 の分類

アスファルト舗装及び RC 床版がともに健全（材料レベルでの損傷がなく両者が密着）な場合は、アスファルト舗装とコンクリートの比誘電率に範囲があるものの、それぞれの材料の境界における電磁波の反射が面的に一樣と言える。前述の実物大供試体実験の結果、このような場合の反射信号の縦断面図は、図-3.3.8のように「RC 床版上面の反射信号が一樣」であり、「鉄筋の反射信号のコンターが円弧状」に見えるという知見を得ている。これらの特徴を有する反射信号を基準とし、グループ 1 と分類する。G 橋（上り線）においてグループ 1 に分類したデータを図-3.3.11 に示す。

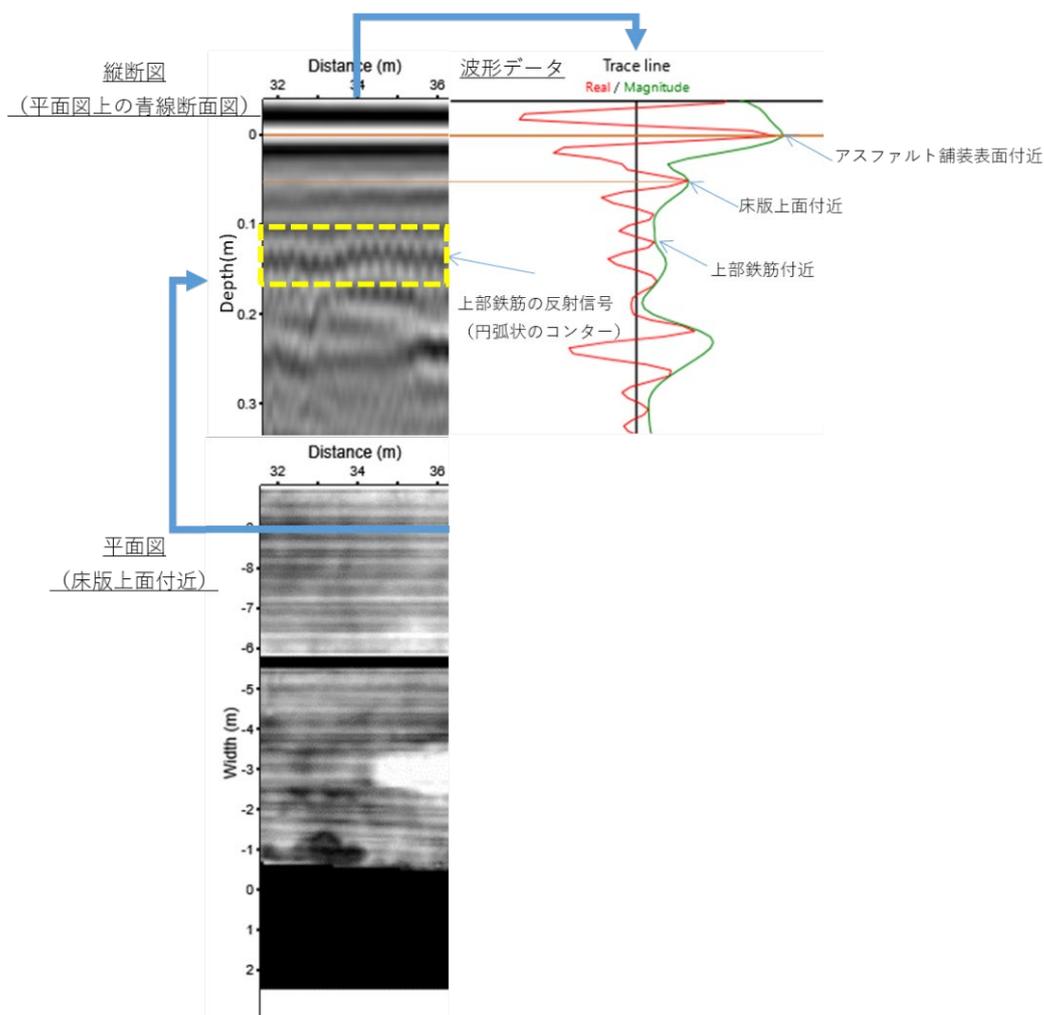


図-3.3.11 G橋（上り線）においてグループ 1 に分類した反射信号

(2) グループ 2 の分類

舗装剥離，RC床版上面に浅い土砂化，及び水平クラック等が生じている場合は，材料の比誘電率が変化し，電磁波の反射信号の強度や透過性に变化が生じる．前述の実物大供試体実験の結果，図-3.3.9 のとおりグループ 1 と比較すると，浅い土砂化，舗装剥離及び水平クラックを模擬した供試体の縦断面図では，鉄筋の円弧状のコンターが不明瞭に見えるという知見を得ている．これをグループ 2 と分類する．G 橋（上り線）において，グループ 1 に分類したデータとグループ 2 に分類したデータの比較を図-3.3.12 に示す．グループ 1 に比べて，グループ 2 に分類したデータは，上側鉄筋付近の深度において円弧状のコンターが不明瞭であることがわかる．

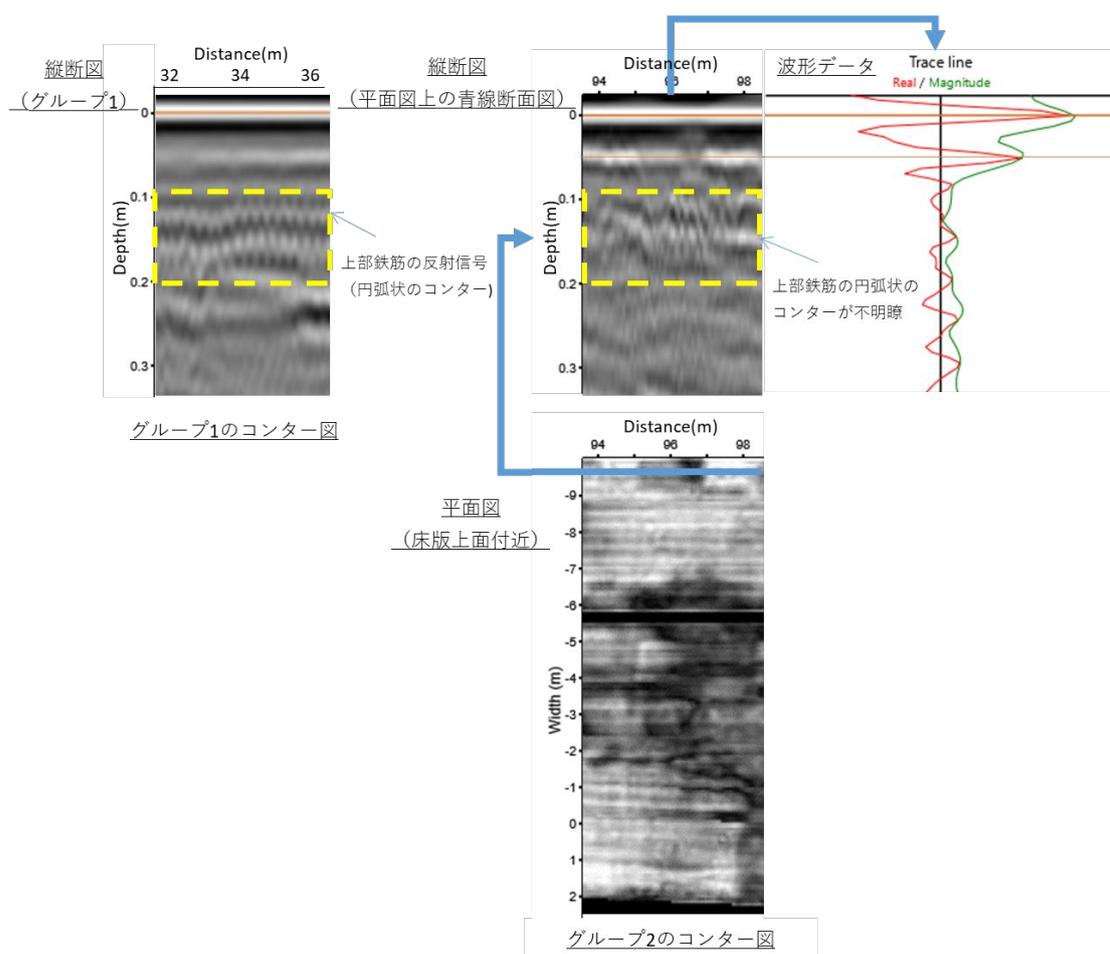


図-3.3.12 G 橋（上り線）におけるグループ 1 とグループ 2 の反射信号の比較

(3) グループ 3 の分類

RC床版上面に深い土砂化や滞水等が生じている場合は，新たな物質が加えられることで，材料の比誘電率や電磁波の反射信号の強度や透過性に变化が生じる．前述の実物大供試体実験の結果，図-3.3.10 のとおりグループ 1 と比較すると，深い土砂化及び滞水を模擬した供試体の縦断面図では，RC床版上面の反射信号の強度が増大し，かつ鉄筋の円弧状のコンターを視認できなくなるという

知見を得ている。これをグループ 3 と分類する。グループ 1 に分類したデータとグループ 3 に分類したデータの比較を図-3.3.13 に示す。グループ 1 と比べて、床版上面付近の反射信号が増大し、上側鉄筋付近の深度において円弧状のコンターが視認できないことがわかる。

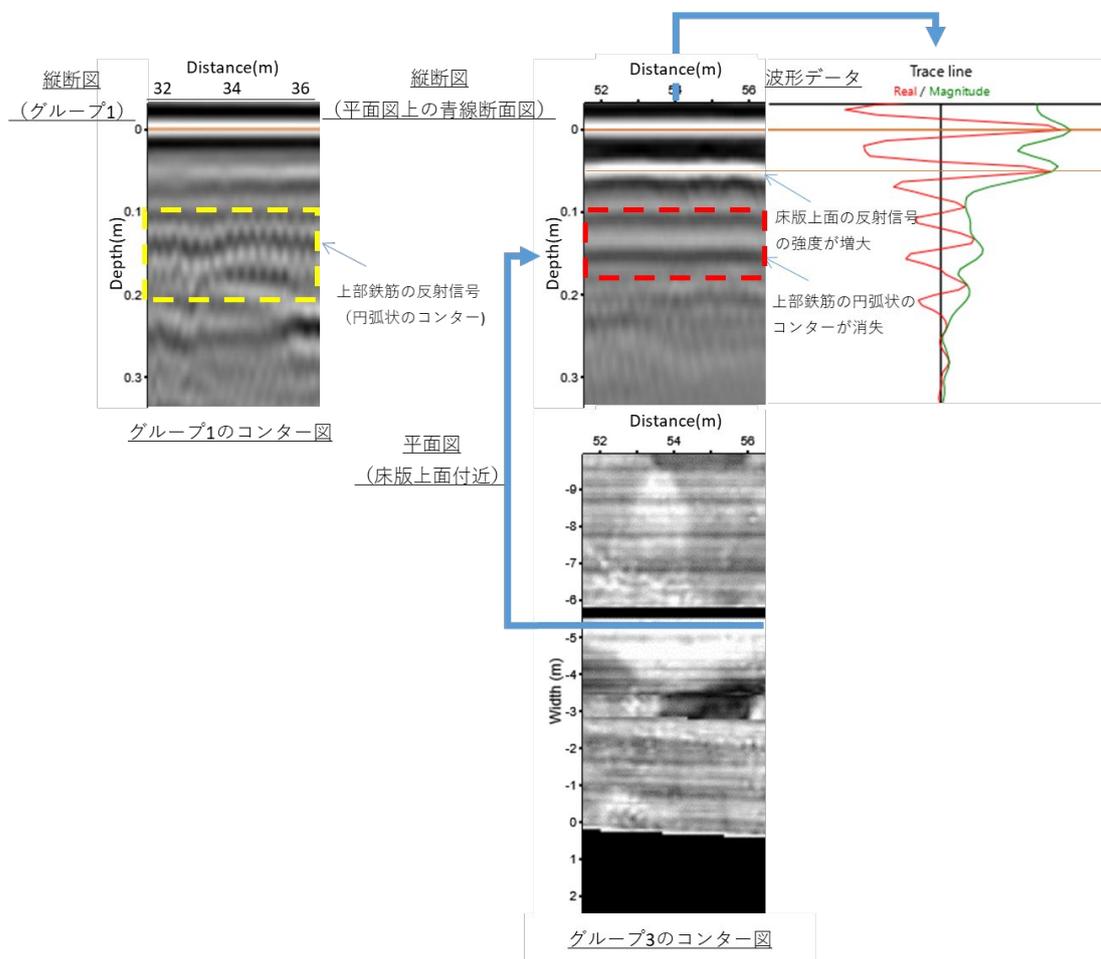


図-3.3.13 G 橋（上り線）におけるグループ 1 とグループ 3 の反射信号の比較

3.3.7 解析結果

3.3.6 (1) ~ (3) で示した分類に従い、G 橋（上り線）の計測結果をグループ 1, 2, 3 に分類した結果を図-3.3.14~図-3.3.16 に示す。深い土砂化や滞水等の疑いがあるグループ 3 の箇所が橋梁全体にわたり確認された。また、舗装剥離、浅い土砂化、及び水平クラックが疑われるグループ 2 の箇所も複数箇所を確認された。

凡例	分類	推定要因
	グループ1	健全
■	グループ2	舗装剥離, 浅い土砂化, 水平クラック等の疑いあり
■	グループ3	深い土砂化, 床版上面の滞水等の疑いあり

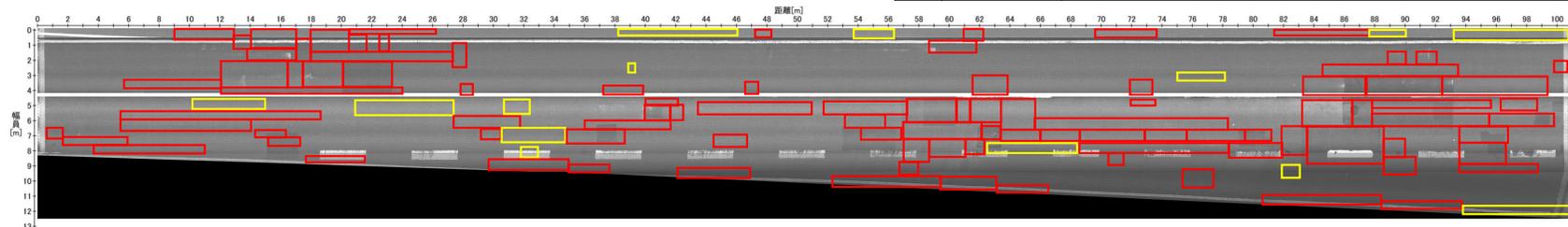


図-3.3.14 解析結果 (路面画像)

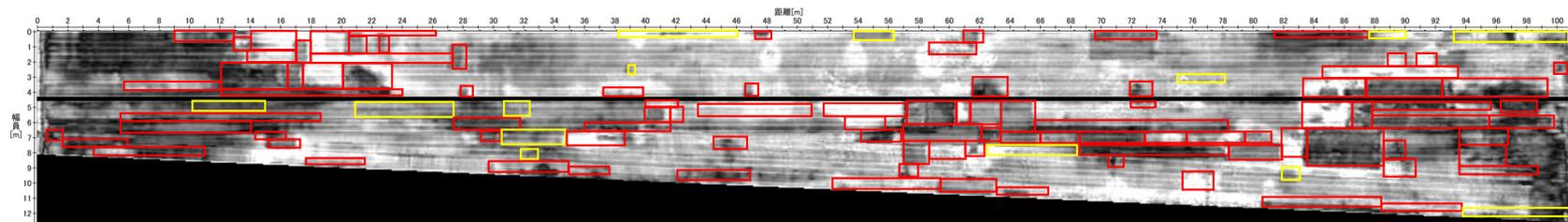


図-3.3.15 解析結果 (床版上面付近)

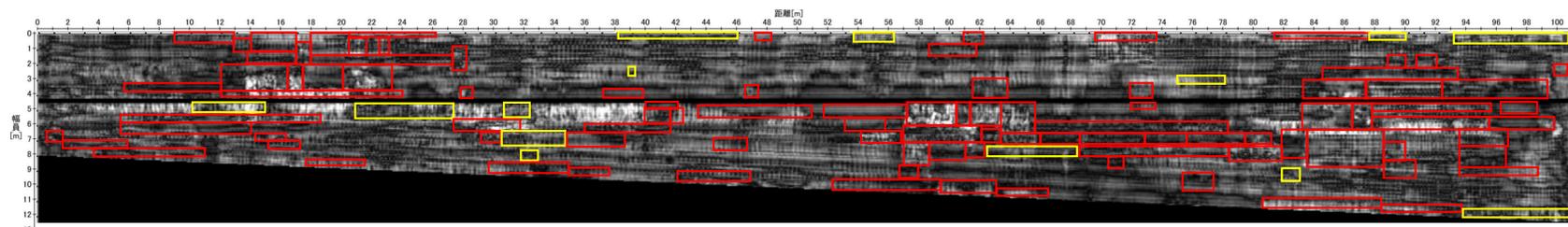


図-3.3.16 解析結果 (上側鉄筋付近)

3.3.8 解析結果と実際の床版状態との検証結果

3.2 で示した開削調査箇所と解析結果を重ね合わせたものを図-3.3.17 に示す。G 橋（上り線）の調査でグループ 3 と評価した範囲のうち、A1 側伸縮装置から橋軸方向へ延長 81.0m，左路肩側の側帯区画線から橋軸直角方向へ 6.0m 付近で、1m×1m 範囲の開削調査が行われた（図-3.3.17 中の No.4, No.5）。開削の結果、床版上面の土砂化及び滞水が確認された。

一方、グループ 3 評価をつけていない箇所でも開削調査を実施している（No.1, 2, 3）。電気抵抗式水分計で床版上面の水分状態を調査した結果、床版上面は湿潤状態～滞水状態であった。この原因の一つとして、レーダ計測日と開削調査日で床版上面の水分状態が変動したことが考えられる。床版上面の水分状態は、舗装のひび割れや継ぎ目箇所からの雨水の浸入や蒸発により変化する。レーダ計測日は令和元年 11 月 28 日に対して、開削調査日は令和 2 年 1 月 11 日と期間が開いたため、水分状態が変動したものと考えられる。

以上のことから、解析結果と水分状態との整合を検証するには、レーダ計測後すぐに開削調査を行い、同じ条件下で検証することが必要と考えられる。

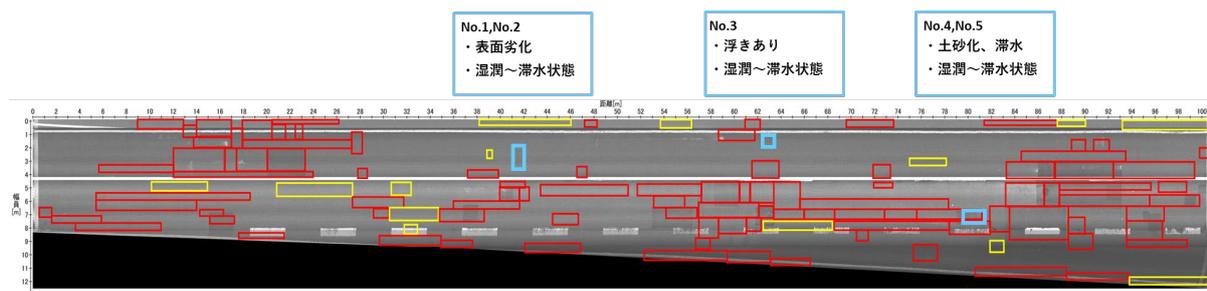


図-3.3.17 開削調査箇所と解析結果の重ね合わせ図

3.3.9 まとめ

今回調査した範囲では、床版上面の土砂化が確認された範囲において、電磁波レーダの解析結果はグループ 3（深い土砂化，滞水等の疑いあり）と評価されていた。一方で、グループ 3 と評価されていないその他の箇所でも、滞水状態となっている範囲が確認された。解析結果と水分状態との整合を検証するためには、電磁波レーダ調査と舗装開削調査を極力同条件下で実施することが必要である。

3.4 カート式電磁波レーダ（高周波型）による調査

3.4.1 調査目的

調査に用いたカート式電磁波レーダ装置は、車載式電磁波レーダ装置に比べ探査速度は遅いが、その分細かなピッチでデータを得られ、この結果、高精度な画像解析が可能となる。主として補修設計や床版補修工事で詳細な補修範囲や損傷程度を把握する事を目的に使用されることを想定している。

G橋（上り線）において、カート式電磁波レーダ（高周波型）を用いた調査を実施し、得られたレーダデータを画像処理することで、損傷範囲を的確に検出することができるか検証した。

3.4.2 カート式電磁波レーダの概要

カート式電磁波レーダは、人力で牽引するマルチチャンネルのレーダであり、車載式電磁波レーダと同等の大きさの装置である。従来このレーダは、土工部や堤防などの内部の空洞等を調査するものとして利用されてきたが、近年は高周波数の製品も開発されるようになり、その活用のフィールドは拡大している。カート式は車両牽引型に比べて低速であるが、調査箇所が比較的正確であり、アンテナを路面に可能な限り近づけられることから記録品質が高く、調査対象の内部状況を詳細に分析するのに適している。また、手押しの道具であるため現場での取り回しの良さから、橋梁歩道部などの車両の進入ができない場所や、幅員の狭隘な箇所でもレーダ計測を可能にする。ただし、車線上での調査を実施する場合は、車線規制や通行止めが必要となるため状況に応じた判断が必要となる。

3.4.3 調査機器の仕様

調査に用いた高周波型カート式電磁波レーダの仕様を表-3.4.1に示す。

表-3.4.1 カート式高周波型電磁波レーダの仕様

項目	性能 (カタログ値)	機材外形
計測幅	91×42cm	
チャンネル数	計 16 個 進行方向 8 個 横断方向 8 個	
放射方法	アレイ式	
周波数	2.0GHz	
アンテナ間隔	10cm	

3.4.4 調査方法

今回の調査は、測線方向のデータ取得を 3cm ピッチ、測線間隔を 10cm として、3 径間分のレーダ探査を実施し、舗装部分撤去後の床版上面の滞水及び劣化状況を確認し、検証を実施した。探査状況を写真-3.4.1 に示す。



写真-3.4.1 探査状況

3.4.5 レーダデータの判定方法

電磁波は比誘電率の異なる物質の境界面において、反射と透過を繰り返しながら伝播する。コンクリート床版が健全な場合は舗装と床版の境界で明確な反射があるが、床版の表面付近が劣化した床版では不明瞭な反射となる。レーダ波形を基に処理した画像データより、この境界部付近の乱れの度合いを評価し判定する。

判定方法は実物大供試体実験により床版上面の状態を3つのグループに分類した事例が報告されている⁷⁾。また、パルス式レーダを用いた供試体の検証では、図-3.4.1のとおりレーダ反射波を画像化した縦断断面から劣化の大きさや深さを推定できることが報告されている⁹⁾。今回の実橋での検証も縦断断面画像のコンターの連続性や乱れの度合いと実際の損傷範囲の整合を確認した。

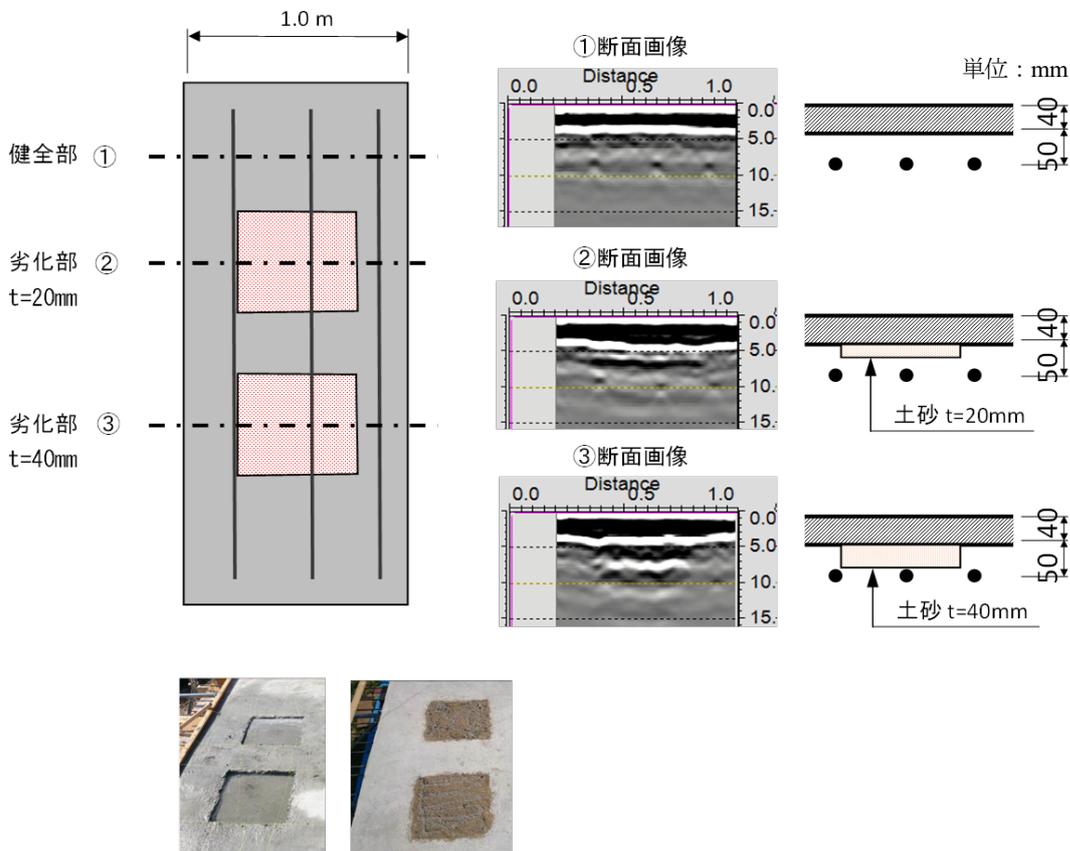


図-3.4.1 レーダを用いたコンクリートの劣化検知事例⁹⁾

3.4.6 損傷範囲の検証結果

カート式電磁波レーダ（高周波）調査より得られた結果と考察を以下に示す。

図-3.4.2 は、レーダ探査で得た電磁波波形データをもとに作成した、全体の床版上面付近の平面コンター図である。

健全な橋梁では濃淡のない一様な画像となることが経験上わかっているが、図-3.4.2 では濃淡が多く見られることから、滞水や損傷、過去に実施された補修などが存在することが推定できる。ただし、床版上面の不陸により平面コンター図が一様に床版上面位置を示しているものではないこと、また、床版の補修材や水分量等により比誘電率が一定ではなく、単純に損傷・滞水を表す分布ではないことも分かっている。

図-3.4.3 は、3箇所を検証箇所毎に舗装部分撤去後の床版上面写真、レーダ画像（縦断面及び平面コンター図）、床版下面写真を示している。

検証箇所③の土砂化している箇所では、縦断面図の乱れが大きいことから、乱れの程度を確認することで判定可能であると考えられる。一方、検証箇所①の表面劣化や検証箇所②のうきでは縦断面図の乱れに大きな差がないため、レーダ画像からその種別を判定することは困難であると考えられる。

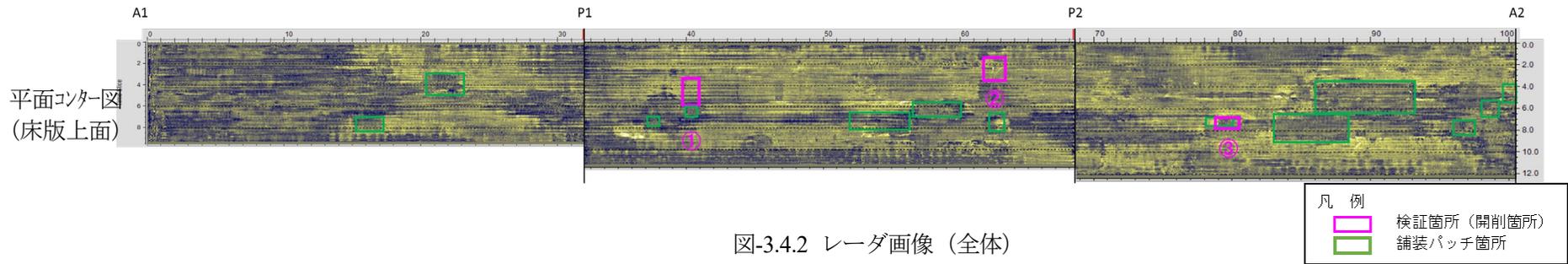


図-3.4.2 レーダ画像 (全体)

		検証箇所 ① [補修箇所周辺の表面劣化]	検証箇所 ② [うき]	検証箇所 ③ [補修箇所周辺の土砂化]
舗装開削時写真				
レーダ画像	縦断スライス図	床版上面 (乱れ小)	床版上面 (乱れ小)	床版上面 (乱れ大)
	平面コンター図 (床版上面) : 開削箇所	濃淡なし	濃淡あり	濃淡あり
床版下面写真				

図-3.4.3 損傷状況とレーダ画像

3.4.7 まとめ

本節では、G橋（上り線）において、カート式電磁波レーダ（高周波型）を用いた調査を実施し、得られたレーダデータを画像処理することで、損傷範囲を的確に検出することができるか検証した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 「土砂化」箇所は、平面コンター図で反射強度が強いことを示す濃い色が確認でき、縦断図では大きな乱れが確認できた。以上より、「土砂化」箇所を推定することは可能である。
- (2) 「うき」箇所は、平面コンター図で反射強度が強いことを示す濃い色が確認できた。縦断図では小さな乱れが確認できたが、「表面劣化」箇所の乱れと大きな差はなかった。以上より、「うき」箇所は、健全でないことは推定できるが、損傷が表面劣化なのか浮きなのかを推定することは困難である。
- (3) 「表面劣化」箇所は、平面コンター図では健全箇所と明確な差異が確認できなかった。縦断図では小さな乱れが確認できたが、「うき」箇所の乱れと大きな差はなかった。以上より、「表面劣化」箇所を判別することは困難である。

3.5 室内試験による床版コンクリートの含水状態調査

3.5.1 調査目的

電磁波レーダの反射振幅や反射強度は、その透過する媒質の物性によって大きく変わる。本研究の検知対象はアスファルト舗装と床版コンクリートの境界面としており、コンクリートの湿潤状態に依存したデータ取得となる。しかし、これまでの既往研究において、レーダで検知する対象が通常どのような状態のコンクリートであるかに言及したものは少ない。またその対象を実橋梁の試料で実施したものはほとんどないため、G橋（上り線）にて採取したコンクリート試料を用いて健全なコンクリートと劣化したコンクリートの内部及びその含水状態について詳細な分析を行った。

3.5.2 試験概要

本試験では、G橋（上り線）にて採取された床版コンクリートコア試料を深度方向に分割し、それらの含水比を測定した。

3.5.3 コンクリート試料

本試験に用いるコンクリートコア試料は、図-3.5.1 に示した位置でそれぞれ採取したものである。今回使用する試料の概要について表-3.5.1 に示す。

これらの試料の採取は、別途調査にて行った舗装コア採取によりできた削孔穴から、床版水分計を用いて床版上面のカウント値（電気抵抗換算値）を測定し、健全（乾燥）状態及び滞水状態を確認できた箇所の近傍で実施することとした。表-3.5.2 に使用した床版水分計の仕様、図-3.5.2 に床版の状態別のカウント値の目安¹⁰⁾ について以下に示す。

表-3.5.1 コンクリート試料概要

試料名	定義する状態	コンクリート表面の含水カウント値
Core-01	健全（乾燥）	209
Core-02	滞 水	627

表-3.5.2 床版水分計の仕様

	測定方式	電気抵抗式
	測定対象	コンクリート床版
	検量線	コンクリート床版表面 カウント（電気抵抗換算値）
	測定範囲	0～6%（コンクリート床版） 40～990（カウント）
	分解能	0.1%

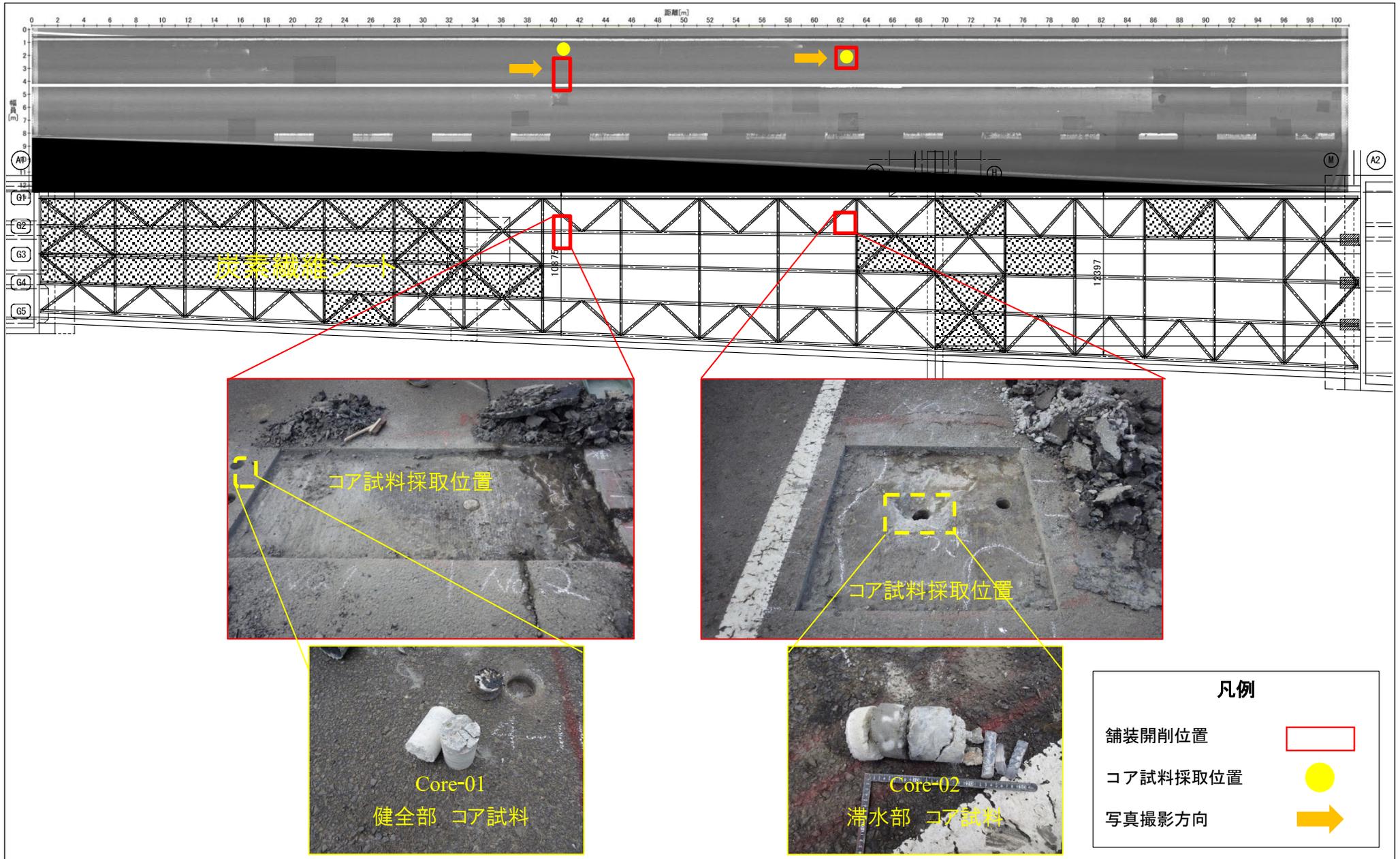


図-3.5.1 試料採取位置

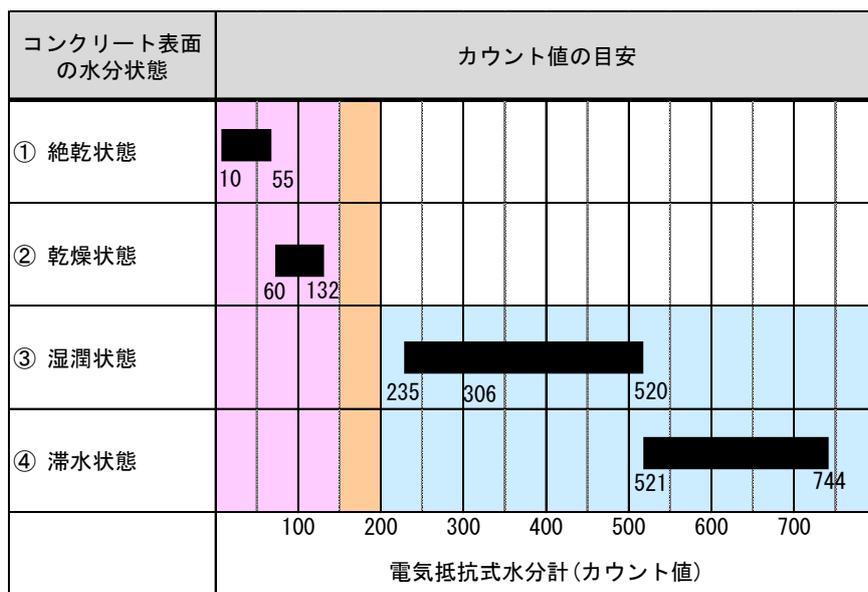


図-3.5.2 床版の状態別のカウント値の目安¹⁰⁾

3.5.4 試験方法

含水比測定試験は、コアの指定深度位置にコンクリートカッターで深さ 10mm 程度の切り込みを入れて切断したスライス片に対して実施する。本実験に利用するコンクリートコア試料は、現場条件や劣化の有無により、完全な柱状コアを採取することが困難であった。このため、亀裂や分離している箇所に関しては細かなピッチで切断することが難しいため、10mm に限らず加工が可能な範囲で試料を分割した。また、Core-01 の床版上面部分にはアスファルト片が付着しており、正確な測定が不可能であると判断し、今回の測定からは除外した。コア試料とそれらのスライス位置を写真-3.5.1、写真-3.5.2 に示す。また今回実施した試験の実施工程を以下に示す。

1. 切断後のスライス片の質量A(g)を測定する。
2. スライス片を 105°Cの乾燥機に 168 時間投入し乾燥させる。
3. 取り出したスライス片をデジケーター内で放冷後、絶乾質量B(g)を測定する。
※) 絶乾とは水分を全く含んでいない状態を指す。
4. デジケーターにスライス片を投入し、真空ポンプを作動させたまま 3 時間放置する。
5. 真空状態を維持しながらデジケーター内に蒸留水を入れてスライス片を浸漬させる。
6. スライス片から気泡が出なくなったことを確認し、真空ポンプを停止させる。
7. スライス片の水中質量C(g)及び表乾質量D(g)を測定する。

上記で得られた結果を用いて、含水比、飽水状態含水比及び絶乾密度を算出する。まずは、切断後すぐの供用状態における質量A(g)と絶乾質量B(g)から式(1)を用いて含水比W(%)を算出する。

$$W = ((A - B)/B) \times 100 \quad (1)$$

次に、飽水状態含水比 W_s (%)を式(2)より算出する。

$$W_s = ((D - B)/B) \times 100 \quad (2)$$

次に絶乾密度 D_{ad} (g/cm³)を式(3)より算出する。

$$D_{ad} = (B/(D - C)) \times 100 \quad (3)$$

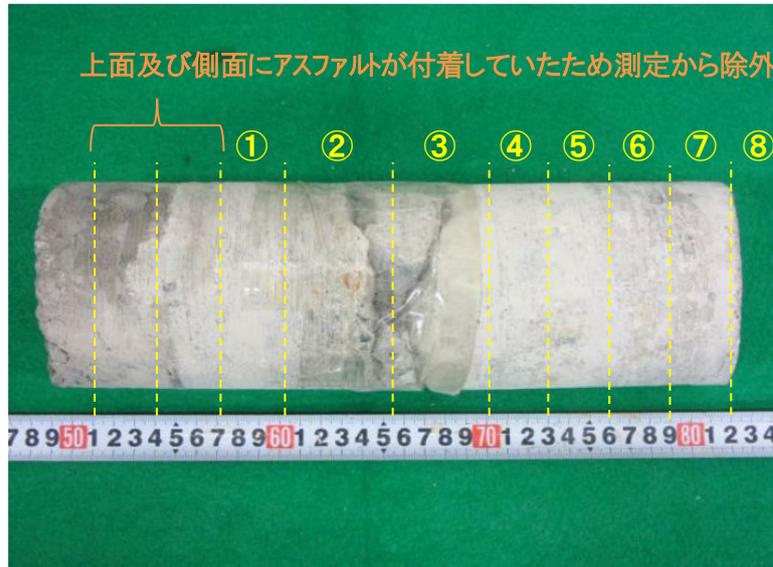


写真-3.5.1 Core-01 分割位置とスライス片番号



写真-3.5.2 Core-02 分割位置とスライス片番号

3.5.5 試験結果

本試験で得られた結果を以下の表-3.5.3, 図-3.5.3 及び図-3.5.4 に示す.

表-3.5.3 含水比測定試験結果

試料名	スライス片	含水比 (%)	飽水状態含水比 (%)	絶乾密度 (g/cm ³)
Core-01 健全部	①	6.5	10.1	2.09
	②	6.5	10.2	2.08
	③	6.1	9.1	2.12
	④	6.3	9.6	2.11
	⑤	6.0	9.9	2.10
	⑥	6.0	9.9	2.09
	⑦	5.0	9.0	2.14
	⑧	2.4	7.1	2.25
Core-02 滞水部	①	4.4	8.6	2.17
	②	6.8	10.0	2.10
	③	8.4	10.9	2.05
	④	8.5	10.8	2.05
	⑤	9.1	11.0	2.05
	⑥	9.4	11.3	2.03
	⑦	10.8	11.8	2.01

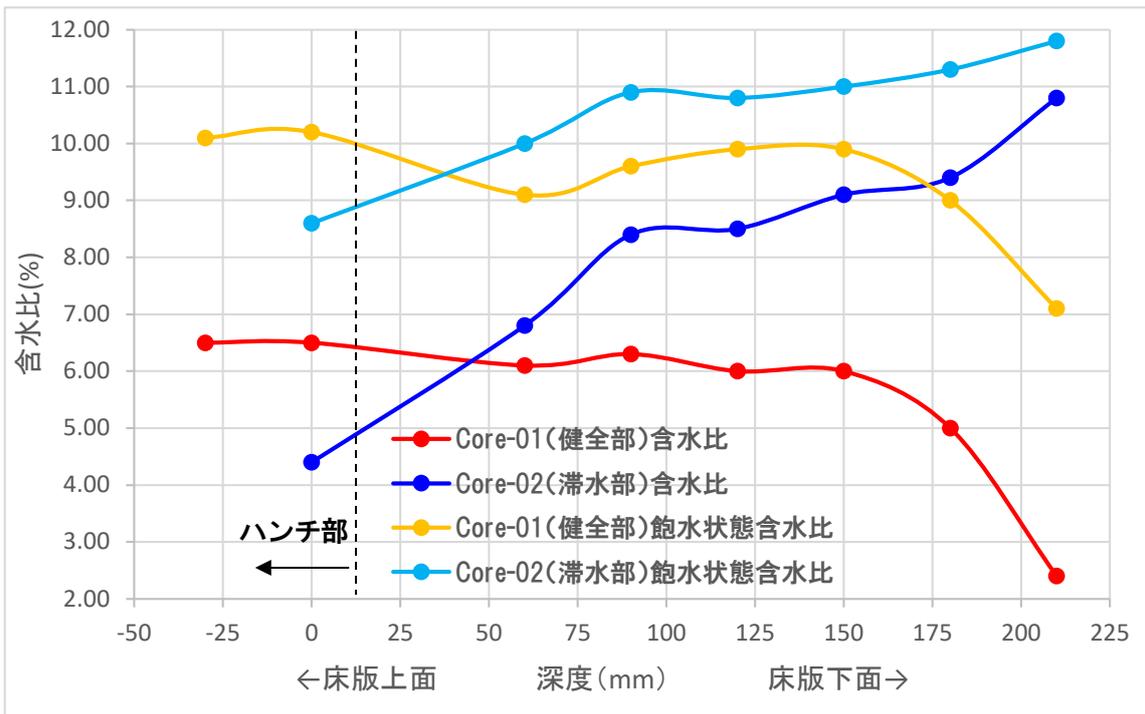


図-3.5.3 含水比及び飽水状態含水比の比較

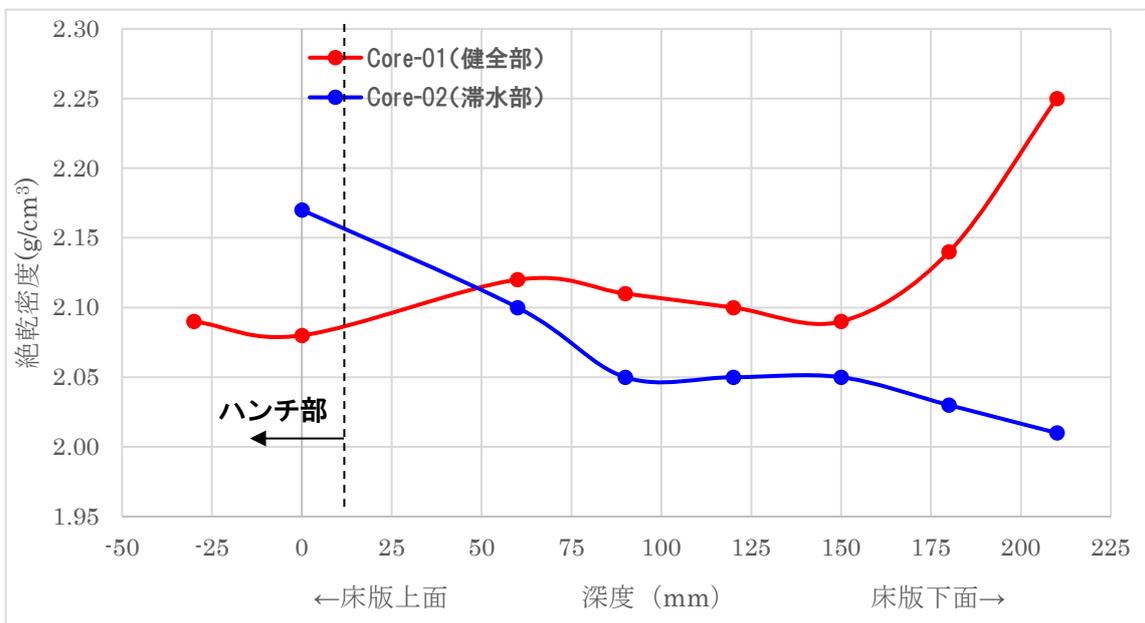


図-3.5.4 絶対密度の比較

今回の試験で使用した Core-01 (健全部) のコンクリートコアは、床版のハンチを含む箇所にて採取している。このため図示する際は床版下面を基準として両試料の結果を並べて表示することとした。

3.5.6 考察

(1) 健全部試料 Core-01 の高い含水比

図-3.5.3 において Core-01 と Core-02 を比較すると、床版上面側は Core-01 の含水比が 6.5% と高く、深度が深くなるにつれて Core-02 の含水比が逆転する傾向が見られた。一般的に供用されて時間が経過している床版コンクリートの含水比は、おおむね 5.0% 以下となる¹¹⁾が、本試験結果では健全部として採取した試料であっても一般値を超えている。これは、試料採取時点で表面が乾燥していた場合であっても内部に水分が浸透しているためと考えられる。これらの試料は令和 2 年 1 月 10 日に宮城県仙台市青葉区 G で路面が乾いている状態で採取したものである。しかし、この年は 1 月 3 日から 10 日朝まで降雨や降雪がしばしば見られ、降雨等がなくとも多湿であったり、日照時間が極端に短かったりと現地での試料採取までに完全に床版が乾燥するとは考えにくい状況であった。当該期間の天気情報を表-3.5.4 に示す。このため、1 月 10 日以前に降った降雨降雪により、床版コンクリート内部の含水比が上昇したものと考えられる。既往文献¹¹⁾によると、3 ヶ月間の水張り試験を行った直後の床版下面の含水比はおおむね 5.0~6.0% となるとしており、これを考慮すると健全なコンクリートとしている Core-01 の含水比が 6.0% 前後であっても妥当と判断できる。

表-3.5.4 試料採取日までの現地の天気¹²⁾

日付	降水量 (mm/h)	湿度 (%)	日照時間 (h)	天気概況	
				昼	夜
1/3	0.0	67	4.8	晴一時曇	晴一時雨
1/4	0.0	63	5.5	晴	晴一時曇
1/5	0.0	69	5.4	雪時々晴	晴時々雪
1/6	0.0	55	6.4	晴後時々曇	晴
1/7	2.5	63	4.6	曇一時晴	雪時々みぞれ一時曇
1/8	17.0	97	0.0	雨一時曇	雨一時曇
1/9	2.5	80	3.8	晴時々雨	曇時々晴
1/10	試料採取日				

(2) 含水状態に着眼した劣化コンクリートの特徴

試験の結果、Core-01 と Core-02 には含水比の傾向による水の浸透状況の違い、飽水状態含水比と絶乾密度によるコンクリートの緻密性の違いが明確となった。

(i) 水の浸透状況

Core-01 は Core-02 に比べて床版上面側の含水比が高い傾向にあるが、深度が深くなってもほぼ一定の比率を保ったまま浸透していき、床版下面側へ到達すると乾燥して含水比が低下していることがわかる。

一方、Core-02 は床版上面付近の含水比はスライス片②以深において Core-01 よりも高い含水比へと上昇し、深度と共に湿潤な状態へと変化している。

これら 2 つの試料の水の浸透傾向の違いは、各試料の内部状況の違いによるものと考えられる。なお、田中ら¹¹⁾は長期間にわたる水張り試験を実施しているが、Core-01 に類似した傾向を示しており、Core-02 のような極端な含水比の上昇は見られていない。

ここで、写真-3.5.1 と写真-3.5.2 より各種試料を目視で確認すると、Core-02 は柱状を示しておらず、スライス片を生成する前から分離している。これは試料採取時に生じた負荷で折れるもしくは分離した可能性もあるが、少なくともスライス片②と③に関しては、コア削孔後の孔内において同位置に水平ひび割れと滲出する水や、削孔中に泥状になったモルタル分が削孔穴から析出するなどが確認されており、採取前から柱状を保てずに分離していた可能性が高いことがうかがえる（写真-3.5.3、写真-3.5.4）。

以上より、床版コンクリートの内部が劣化している場合、同箇所の含水比を上昇させる要因になる可能性がある。



写真-3.5.3 Core-02 採取後の削孔穴



写真-3.5.4 Core-02 削孔時に析出したモルタル成分

(ii) 飽水状態含水比と絶乾密度による劣化傾向

次に、飽水状態含水比と絶乾密度における試験結果を考察する。まず飽水状態含水比について、この項目は、試験体の含有可能な水分比率を表しており、値が小さいほど水の侵入可能な空隙が少ない緻密なコンクリートであり、値が大きければ内部に空洞やひび割れなどの水が侵入し滞留できるスペースがあることを指す。この飽和含水状態比は、養生終了後のイニシャルデータがあれば劣化の進行について検証可能であるが、本試験では健全部と滞水部（劣化部）と仮定した箇所でのみ比較する。

本試験による試料を比較すると、Core-01 はおおむね 10%前後がピーク値となっており、Core-02 は 12%弱がピークであった。特に Core-02 は、深度に比例して数値が上昇傾向にあり、コンクリートが脆弱化している可能性があることがうかがえる。また Core-01 の最下面は、前述した含水比と共に飽和含水状態比率も際立って低いことがわかる。

次に、含水比と飽水状態含水比の差分から、吸水可能な水分量の算出を行った。結果を表-3.5.5 に示す。表より Core-02 はスライス片③以深で C 値が顕著に低下しており、Core-01 に比べて飽水状態に近い状態で存在したことが確認できる。この傾向は、特に下面に近づくほど顕著に見られている。

表-3.5.5 含水比測定試験結果

試料名	スライス片	含水比 (%)	飽水状態含水比 (%)	含水余力 (%)
		(A)	(B)	C = (A - B)
Core-01 健全部	①	6.5	10.1	3.5
	②	6.5	10.2	3.5
	③	6.1	9.1	3.0
	④	6.3	9.6	3.3
	⑤	6.0	9.9	3.9
	⑥	6.0	9.9	3.9
	⑦	5.0	9.0	4.0
	⑧	2.4	7.1	4.7
Core-02 滞水部	①	4.4	8.6	4.2
	②	6.8	10.0	3.2
	③	8.4	10.9	2.5
	④	8.5	10.8	2.3
	⑤	9.1	11.0	1.9
	⑥	9.4	11.3	1.9
	⑦	10.8	11.8	1.0

次に、絶乾密度を比較する。絶乾密度は水を全く含んでいない骨材の比重を示しており、密度が大きいほど空隙が少なく品質が良い骨材を使用していると言える。

表-3.5.6 に本試験で得られた絶乾密度を示す。これまでの含水比、飽和含水状態比で最も健全と考えられる Core-01 のスライス片⑧において最大値 2.25(g/cm³)であった。次に Core-01 と Core-02 を比較すると、Core-02 が下面に近づくほど明らかに粗になっており、これまでの試験項目の傾向と同様に材料の劣化が確認できる。

表-3.5.6 絶乾密度(g/cm³)

試料／スライス片	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
Core-01	2.09	2.08	2.12	2.11	2.10	2.09	2.14	2.25
Core-02	—	2.17	2.10	2.05	2.05	2.05	2.03	2.01

3.5.7 まとめ

本節では、G橋（上り線）にて採取したコンクリート試料を用いて健全なコンクリートと劣化したコンクリートの内部及びその含水状態について詳細な分析を行った。本試験で得られた知見を以下に示す。なお、以下の文章では表面が乾燥しているコンクリートを『健全部』、表面が滞水しているコンクリートを『滞水部』と表現した。

- (1) 滞水部の床版コンクリートは、健全部と比較して深さ方向に比例して含水比が上昇する傾向がある。
- (2) 飽水状態含水比から、滞水部の床版コンクリートは、ひび割れや空隙などが生じている可能性が高く、吸水効果が増大していると考えられる。これにより（1）における含水比が上昇していると考えられる。
- (3) 飽水状態含水比と含水比の関係から、吸水可能な水分量を検証したところ、滞水部の床版コンクリートは、健全部の床版コンクリートに比べて、広い区間で飽水状態に近いことが判明した。
- (4) 絶乾密度を測定したところ、滞水部の床版コンクリートは健全部に比べて顕著に密度が低下しており、これはコンクリート内部の空隙が大きいほど水分量が多く、土砂化に進展しやすい状態であると考えられる。

3.6 まとめ

本章では、滞水・床版劣化検知手法としての各非破壊検査技術の適用性の検証を目的に、G橋（上り線）において、各種非破壊検査技術による調査を行った。以下に得られた知見を示す。

【車載式電磁波レーダによる調査】

- ・ 車載式電磁波レーダの解析結果と舗装開削後の実際の床版状態を比較した結果、解析結果でグループ3（深い土砂化、床版上面の滞水等の疑いあり）と評価とされた範囲で床版上面の土砂化及び滞水が確認され、整合性を確認できた。
- ・ 一方、解析結果でグループ1（健全）と評価とされた範囲で床版上面の湿潤状態～滞水状態が確認された。この原因の一つとして、レーダ計測日と開削調査日で期間が開いたため、水分状態が変動したものと考えられる。解析結果と水分状態との整合を検証するには、レーダ計測後すぐに開削調査を行い、同じ条件下で検証することが必要と考えられる。

【カート式電磁波レーダ（高周波型）による調査】

- ・ 「土砂化」箇所は、レーダの平面コンター図で反射強度が強いことを示す濃い色が確認でき、縦断面図では大きな乱れが確認できることから、「土砂化」箇所を推定することは可能である。
- ・ 「うき」箇所は、レーダの平面コンター図で反射強度が強いことを示す濃い色が確認できるが、縦断面図では「表面劣化」箇所と明確な差異が見られないことから、健全でないことは推定できるものの、損傷が表面劣化なのか浮きなのかを推定することは困難である。
- ・ 「表面劣化」は、レーダの平面コンター図で「健全」箇所と明確な差異が見られず、縦断面図でも「うき」箇所と明確な差異が見られないことから、「表面劣化」箇所を判別することは困難である。

【室内試験による床版コンクリートの含水状態調査】

- ・ 滞水部の床版コンクリートは、健全部と比較して深さ方向に比例して含水比が上昇する傾向がある。
- ・ 飽水状態含水比から、滞水部の床版コンクリートはひび割れや空隙などが生じている可能性が高く、吸水効果が増大していると考えられる。
- ・ 飽水状態含水比と含水比の関係から吸水可能な水分量を検証したところ、滞水部の床版コンクリートは健全部の床版コンクリートに比べて、広い区間で飽水状態に近かった。
- ・ 絶乾密度を測定したところ、滞水部の床版コンクリートは健全部に比べて著しく密度が低下していた。コンクリート内部の空隙が大きいほど含む水分量が多くなるため、土砂化に進展しやすい状態であると考えられる。

第3章 参考文献

- 1) グーグルストリートビュー，平成29年9月撮影
<https://www.google.co.jp/maps/@38.2599217,140.8207319,3a,75y,88.04h,75.8t/data=!3m7!1e1!3m5!1spAHaDq4Po9H6MVIIf2utoRA!2e0!5s20170901T000000!7i13312!8i6656?hl=ja>(令和4年6月閲覧)
- 2) グーグルストリートビュー，令和元年6月撮影
<https://www.google.co.jp/maps/@38.2599202,140.8207233,3a,75y,88.04h,75.8t/data=!3m7!1e1!3m5!1sy9F3dAYZYC6K8T4xYaUDJQ!2e0!5s20190601T000000!7i16384!8i8192?hl=ja>(令和4年6月閲覧)
- 3) グーグルストリートビュー，平成29年9月撮影
https://www.google.co.jp/maps/@38.2598719,140.8202433,3a,90y,86.21h,75.41t/data=!3m7!1e1!3m5!1soRPuURowUiK190_48Ugfug!2e0!5s20170901T000000!7i13312!8i6656?hl=ja(令和4年6月閲覧)
- 4) グーグルストリートビュー，令和元年6月撮影
<https://www.google.co.jp/maps/@38.2598753,140.8202589,3a,90y,91.53h,73.28t/data=!3m7!1e1!3m5!1ssJwYmkpf71mUaDL6c2fCMg!2e0!5s20190601T000000!7i16384!8i8192?hl=ja>(令和4年6月閲覧)
- 5) グーグルストリートビュー，平成29年9月撮影
https://www.google.co.jp/maps/@38.2598292,140.819829,3a,75y,88.79h,75.15t/data=!3m7!1e1!3m5!1s0K_ZeHsIf660U2wVRhWdaQ!2e0!5s20170901T000000!7i13312!8i6656?hl=ja(令和4年6月閲覧)
- 6) グーグルストリートビュー，令和元年6月撮影
https://www.google.co.jp/maps/@38.2598286,140.8198071,3a,75y,88.79h,75.15t/data=!3m7!1e1!3m5!1sNsee04W_Tb2rk5Mp8TBKJQ!2e0!5s20190601T000000!7i16384!8i8192?hl=ja(令和4年6月閲覧)
- 7) 小林大，田代大樹，永塚竜也，橋本竜也：電磁波レーダによるRC床版上面の状態評価に関する実験的研究，土木学会第71回年次学術講演会，CS11-002，2016.9
- 8) 永塚竜也，小林大，唐木正史：RC床版上面の状態グルーピングアルゴリズムの適用事例，土木学会第71回年次学術講演会，CS11-001，2016.9
- 9) 小早川正樹，唐木正史：鉄筋探査用RCレーダを用いた点検困難箇所のコンクリート非破壊診断技術，土木学会第71回年次学術講演会，05-556，2016.9
- 10) 谷倉泉，榎園正義，後藤昭彦：床版防水工における水分計の適用性に関する研究，構造工学論文集 Vol.59A，土木学会，pp.1122-1123，2013.3
- 11) 田中良樹，村越潤，吉田英二：撤去された鉄筋コンクリート床版の水張り試験，第八回道路橋床版シンポジウム論文報告集，土木学会，p.145-148，2014.10
- 12) 気象庁：各種データ・資料，<https://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>

第4章 G橋（下り線）における非破壊検査技術の適用性の検証

本章では、3章同様、G橋（下り線）を対象とした舗装下の滞水検知手法としての非破壊検査技術の適用性の検証結果を記した。また、適用性の評価に必要な舗装開削調査及び床版上面水分量測定や、併せて実施した小径微破壊内部検査等の結果を記した。

4.1 G橋（下り線）の概要

4.1.1 橋梁諸元

G橋（下り線）は、上り線橋梁から13年後の昭和61年に供用を開始している。橋梁諸元を表-4.1.1、外観写真を写真-4.1.1、橋梁一般図を図-4.1.1に示す。上り線同様、橋梁諸元は平成29年の定期点検調書の情報を記載し、昼間12時間交通量及び大型車交通量のみ2015年の数値を採用している。

表-4.1.1 橋梁諸元

橋梁名	G橋（下り線）
供用年	昭和61年（1986年）
供用後経過年数	36年
上部工形式	3径間連続鋼非合成鈹桁橋
橋長	92.00m
支間長	29.00m+33.00m+29.00m
設計活荷重	TL-20（1等橋）
幅員構成	全幅員 10.20m, 有効幅員 9.00m
昼間12時間交通量	42,085台
大型車混入率	8.6%
適用基準	昭和55年 道路橋示方書
橋面防水工の有無	無し



(a) 路面全景 (A1側より撮影)



(b) 路面全景 (A2側より撮影)



(c) 第1径間 (A1-P1) 全景



(d) 第1径間 (A1-P1) 下面



(e) 第2径間 (P1-P2) 全景



(f) 第2径間 (P1-P2) 下面



(g) 第3径間 (P2-A2) 全景



(h) 第3径間 (P2-A2) 下面

写真4.1.1 外観写真

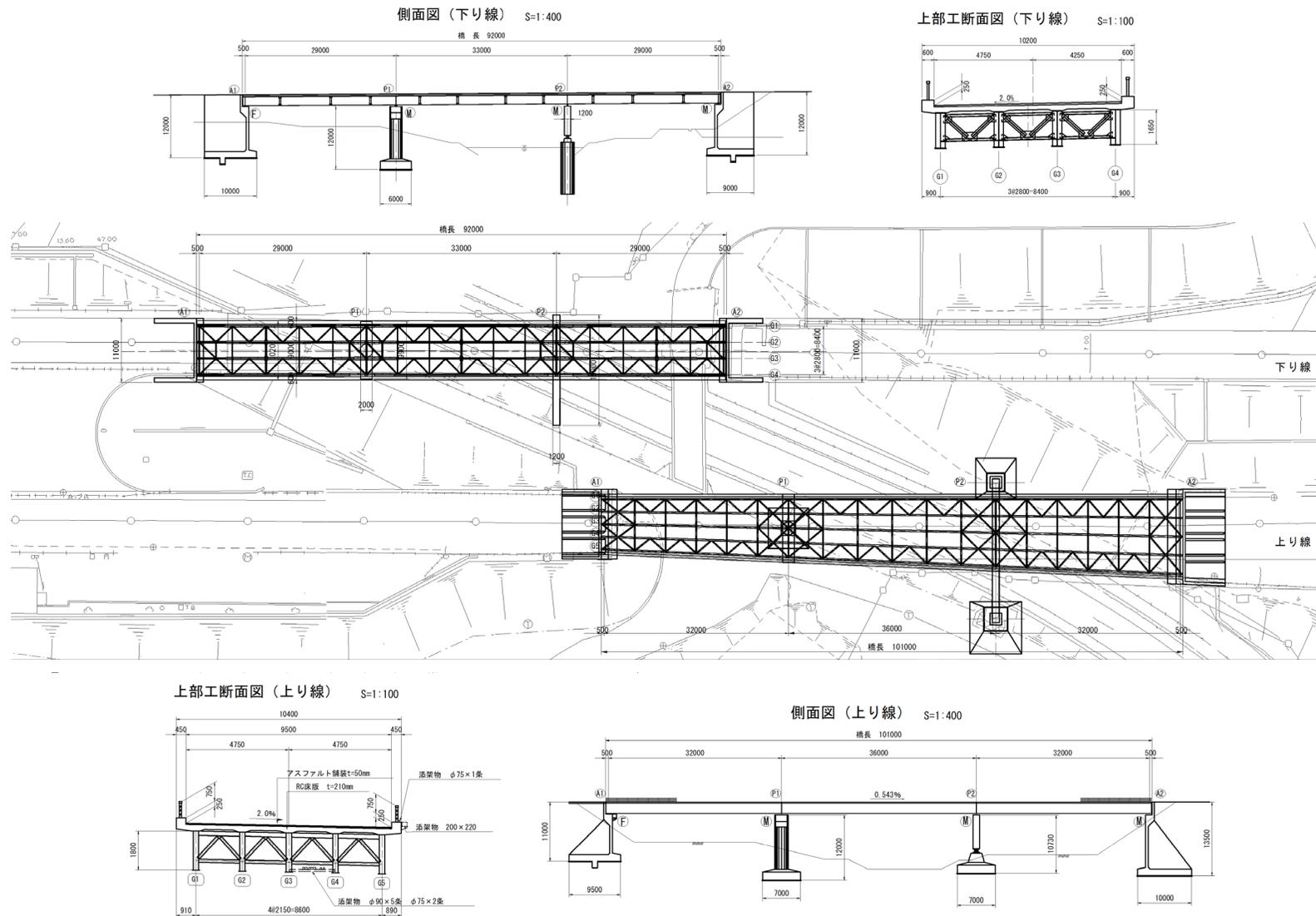


図-4.1.1 橋梁一般図

4.1.2 補修履歴及び変状発生状況

最新の定期点検調書（平成29年）に記載されている路面及び床版下面の点検結果を図4.1.2～図4.1.4に示す。

第1径間の床版下面では、全体的にひび割れが生じている。また一部のひび割れでは漏水・遊離石灰や表面剥離が確認されている。表面剥離が生じている箇所の路面には補修痕が確認できる。それ以外にも土砂噴出がいくつか生じている。

第2径間の床版下面では、第1径間ほどひび割れは生じていないが、G2-G3桁間の中央支間付近に漏水・遊離石灰を伴うひび割れ及び浮きが生じている。点検調書の記載には、前回点検から新たに浮きが確認されたとあり、損傷が進行していることが分かる。路面を見ると、このひび割れの直上付近に補修箇所が確認できる。

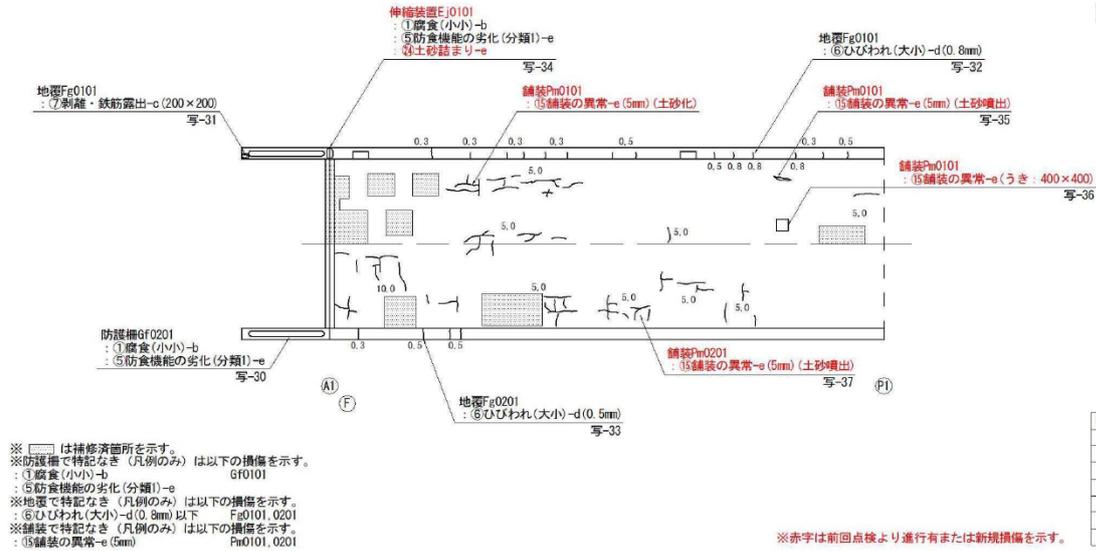
第3径間の床版下面でも、新たな損傷が進行している。特に路面にポットホールやわだち掘れ等の新規損傷が多く生じている。

上り線同様、直近の定期点検以降かつ今回の検証前までの路面状況について、グーグルのストリートビューを用いて確認した。

写真4.1.2～写真4.1.4は、最新の定期点検（平成29年7月）に最も近い平成29年9月撮影の路面画像と、非破壊検査技術の適用性の検証実施日（令和2年12月）の直前の令和2年10月撮影の路面画像の比較である。写真中の赤丸は直近の定期点検結果に記録されていない路面補修痕を示している。前章で紹介した上り線ほどではないものの、やはり約2年で路面補修痕が増加していることが確認された。

第1径間 橋面

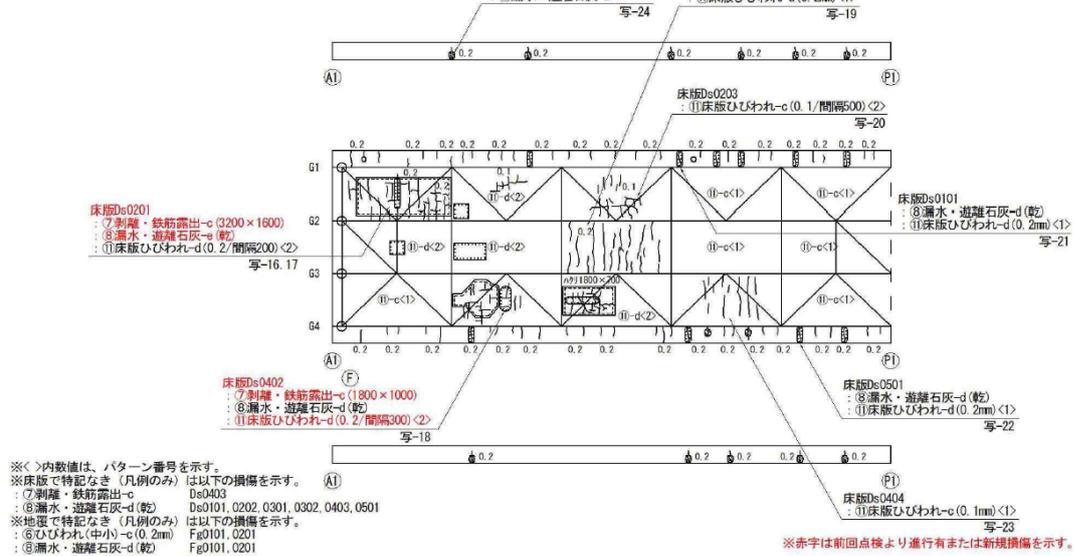
防護柵(Gf) 地覆(Fg) 伸縮装置(Ej) 舗装(Pm) 排水ます(Dr)



(a) 路面損傷図

第1径間 桁下面

床版(Ds) 地覆(Fg)



(b) 床版下面損傷図

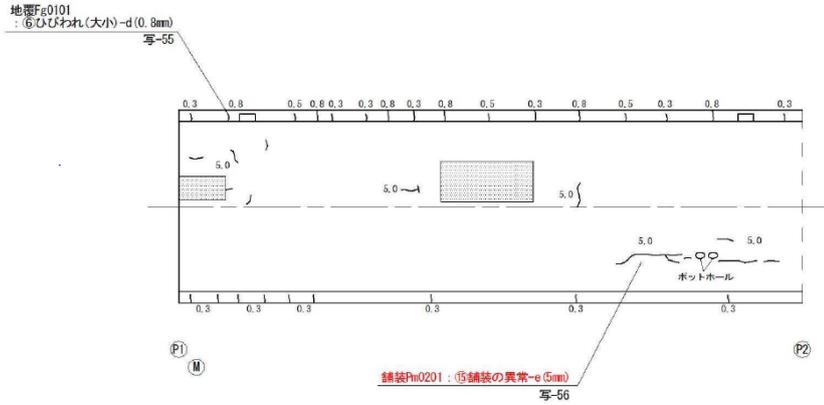
図4.1.2 路面及び床版下面損傷図 (第1径間)

第2径間 橋面

防護柵(Gf) 地覆(Fg) 舗装(Pm) 排水ます(Dr)

橋面防水工	無
排水施設	有
橋梁物	無

□ : 排水ます



※ □ は補修箇所を示す。
 ※地覆で特記なき(凡例のみ)は以下の損傷を示す。
 : ⑥ひびわれ(大小)-d(0.8mm)以下 Fg0101, 0201
 ※舗装で特記なき(凡例のみ)は以下の損傷を示す。
 : ④路面の凹凸-e Pm0201
 : ⑤舗装の異常-e(5mm) Pm0101, 0201

※赤字は前回点検より進行有または新規損傷を示す。

損傷の種類	表示
ひびわれ	
剥離	
鉄筋露出	
遊離石灰	
漏水	
うき	
その他	

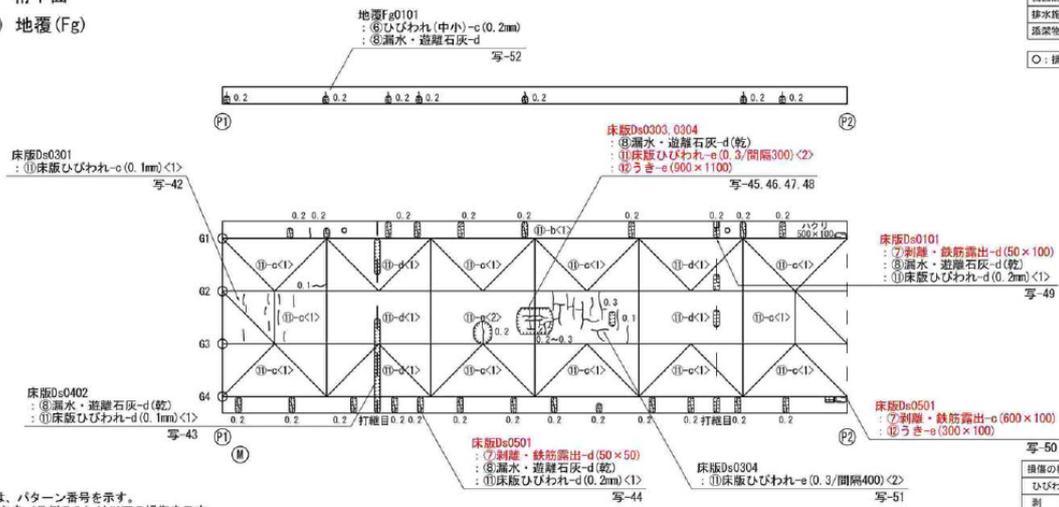
(a) 路面損傷図

第2径間 桁下面

床版(Ds) 地覆(Fg)

橋面防水工	無
排水施設	有
橋梁物	無

○ : 排水管



※ < > 内数値は、パターン番号を示す。
 ※床版で特記なき(凡例のみ)は以下の損傷を示す。
 : ⑦剥離・鉄筋露出-c Ds0101
 : ⑧漏水・遊離石灰-d(乾) Ds0101, 0202, 0205, 0302, 0303, 0304, 0305, 0501
 ※地覆で特記なき(凡例のみ)は以下の損傷を示す。
 : ⑥ひびわれ(中小)-c(0.2mm) Fg0101, 0201
 : ⑧漏水・遊離石灰-d(乾) Fg0101, 0201

※赤字は前回点検より進行有または新規損傷を示す。

損傷の種類	表示
ひびわれ	
剥離	
鉄筋露出	
遊離石灰	
漏水	
うき	
その他	

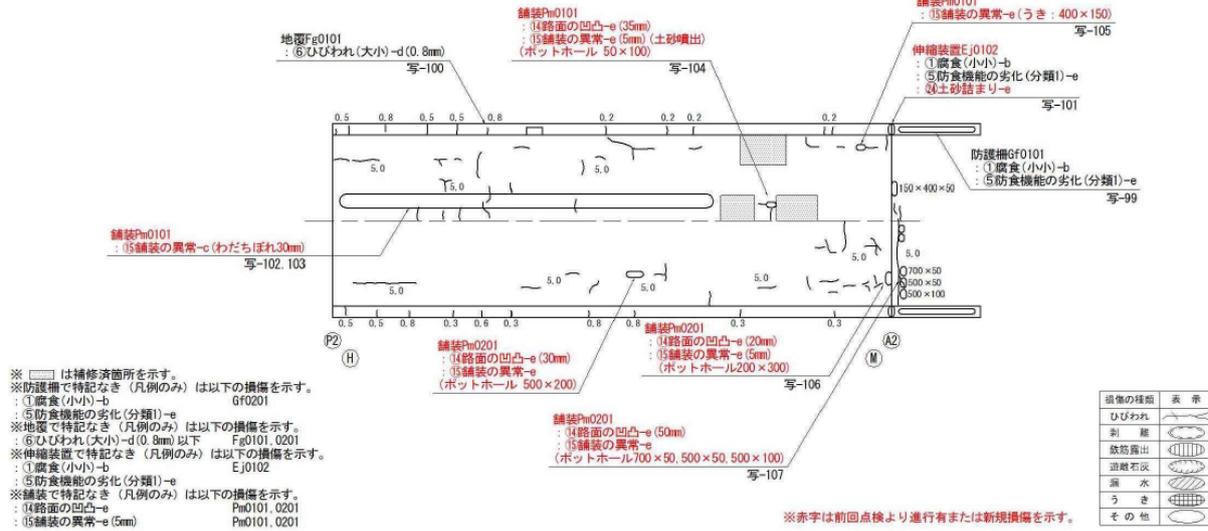
(b) 床版下面損傷図

図4.1.3 路面及び床版下面損傷図 (第2径間)

第3径間 橋面

防護柵(Gf) 地覆(Fg) 伸縮装置(Ej) 舗装(Pm) 排水ます(Dr)

橋面防水工	無
排水施設	有
活染物	無
□: 排水ます	

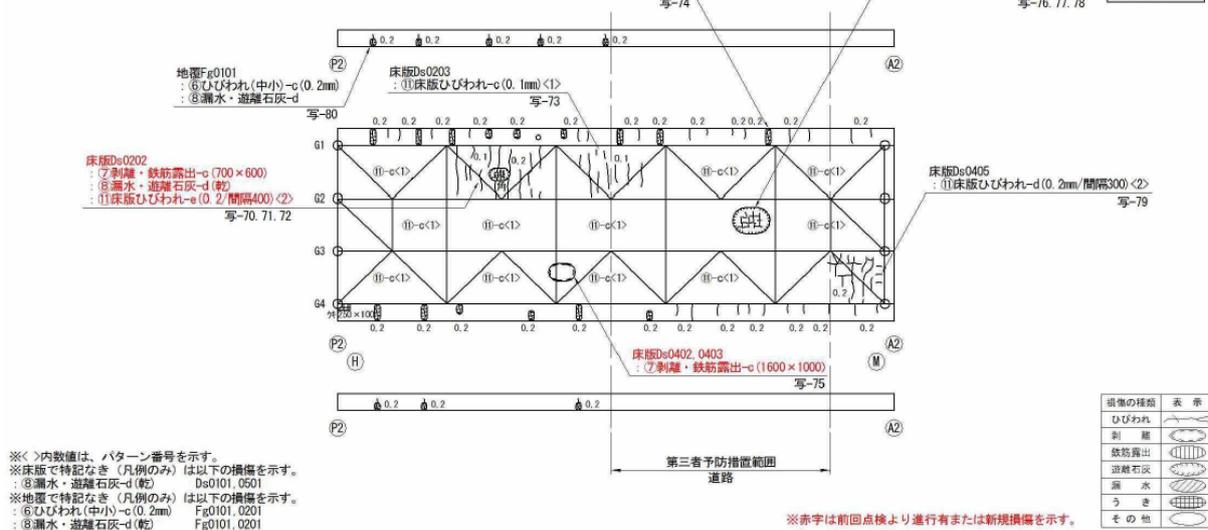


(a) 路面損傷図

第3径間 桁下面

床版(Ds) 地覆(Fg)

橋面防水工	無
排水施設	有
活染物	無
□: 排水管	



(b) 床版下面損傷図

図-4.1.4 路面及び床版下面損傷図 (第3径間)



撮影日: 9月 2017 © 2022 Google

Google 2017.9 撮影

(a) 平成 29 年 9 月撮影 (P1 から A1 を見た画像) ¹⁾

平成 29 年 9 月撮影 <https://www.google.co.jp/maps/@38.2597335,140.8218113,17z>



撮影日: 10月 2020 © 2022 Google

Google R2.10 撮影

(b) 令和 2 年 10 月撮影 (A1 から P1 を見た画像) ²⁾

令和 2 年 10 月撮影 <https://www.google.co.jp/maps/@38.2597335,140.8218113,17z>

写真4.1.2 第1 径間の路面画像の比較



撮影日: 9月 2017 © 2022 Google

Google 2017.9 撮影

(a) 平成 29 年 9 月撮影 (P1 から P2 を見た画像) ³⁾

平成 29 年 9 月撮影 <https://www.google.co.jp/maps/@38.259717,140.8216561,19z>



撮影日: 10月 2020 © 2022 Google

Google R2.10 撮影

(b) 令和 2 年 10 月撮影 (P1 から P2 を見た画像) ⁴⁾

令和 2 年 10 月撮影 <https://www.google.co.jp/maps/@38.259717,140.8216561,19z>

写真4.1.3 第2 径間の路面画像の比較



撮影日: 9月 2017 © 2022 Google

Google 2017.9 撮影

(a) 平成 29 年 9 月撮影 (A2 から P2 を見た画像)⁵⁾

平成 29 年 9 月撮影 <https://www.google.co.jp/maps/@38.2596314,140.8208307,19z>



撮影日: 10月 2020 © 2022 Google

Google R2.10 撮影

(b) 令和 2 年 10 月撮影 (A2 から P2 を見た画像)⁶⁾

令和 2 年 10 月撮影 <https://www.google.co.jp/maps/@38.2596314,140.8208307,19z>

写真4.1.4 第3 径間の路面画像の比較

4.1.3 調査内容

G橋（下り線）で実施した調査内容一覧を表-4.1.2に示す。調査内容の詳細及び結果は次節以降で詳述する。

表-4.1.2 調査内容一覧

調査項目	概要	使用機器	調査範囲	調査日	節
路面外観調査	舗装路面の外観を観察する	カメラ	A1-A2 間	R2.12.23	—
		車載ライセンカメラ	A1-A2 間	R2.12.3	4.4
床版上面調査	舗装を一部撤去し床版上面状況を観察する	カメラ 点検ハンマ	P2-A2 間の一部	R2.12.23	4.2
床版下面調査	吊足場内から床版下面の外観を観察する	カメラ	A1-A2 間	R2.12.21	—
床版上面水分量測定	舗装除去後の床版上面コンクリートの水分量を測定する	電気抵抗式水分計	P2-A2 間の一部	R2.12.23	4.3
床版下面水分量測定	床版下面のコンクリートの水分量を測定する	高周波容量式水分計	A1-A2 間	R2.12.21	4.3
車載式レーダ計測	車載式レーダを用いて舗装下の床版のレーダ探査を行う	レーダ搭載調査車	A1-A2 間	R2.12.3	4.4
カート式レーダ計測	カート式レーダ（高周波）を用いて舗装下の床版のレーダ探査を行う	カート式レーダ（高周波）	A1-A2 間	R2.12.22	4.5
	カート式レーダ（中周波）を用いて舗装下の床版のレーダ探査を行う	カート式レーダ（中周波）	A1-A2 間	R2.12.22	4.6
ハンディ式レーダ計測	ハンディ式レーダを用いて舗装下の床版のレーダ探査を行う	ハンディ式レーダ	P2-A2 間の一部	R2.12.22	4.7
MMS (Mobile Mapping System)	MMS 車両を用いて点群計測を行う	MMS 車両	A1-A2 間	R2.12.4	4.8
小径微破壊内部検査	小径コアを用いて床版内の状況を観察する	ロングビットドリル i-SCOPE	A1-A2 間	R2.12.22-23	4.9

4.2 舗装開削調査

4.2.1 調査目的

3.2 同様に、非破壊検査技術を用いた床版上面の滞水・劣化状態の検知可否の検証に必要な、実際の床版上面の状態の把握を目的として舗装の開削調査を行った。

4.2.2 調査方法

舗装開削は、道路管理者が発注した床版取替工事のための通行止め規制下において、路面切削機による舗装開削が開始されるまでの期間で行った。調査期間が2日間に限られていたため、開削範囲は路面の損傷が著しい箇所を含む、A2 橋台部の伸縮装置から橋軸方向に 11.6m、左側地覆から橋軸直角方向に 5.6mの約 65m²とした。開削範囲を橋軸方向に2分割して、A1 側を範囲①、A2 側を範囲②とした。舗装開削は、床版の損傷を防ぐため、小型バックホウを用いて行った。舗装開削範囲を図4.2.1に、開削状況を写真4.2.1に示す。

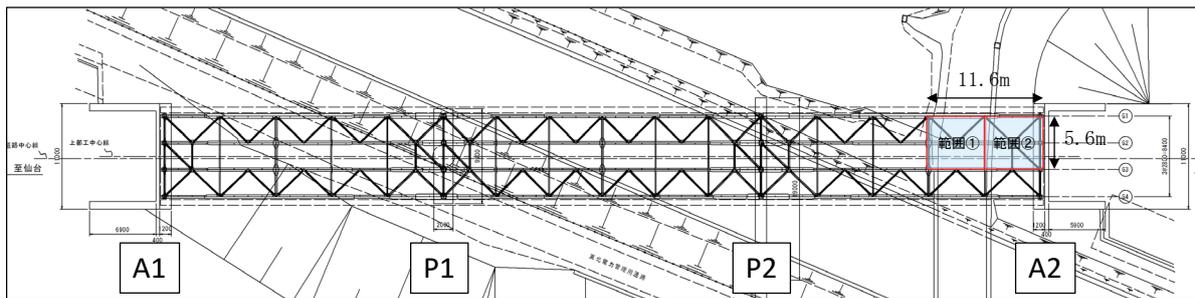


図4.2.1 舗装開削範囲



写真4.2.1 舗装開削状況

4.2.3 開削結果

舗装開削後に目視及び打音検査により確認した床版上面状態を図4.2.2及び写真4.2.2に示す。一部舗装未開削範囲があるが、これは舗装と床版との接着が強く舗装を剥がすことができなかった範囲である。伸縮装置継目付近で土砂化及び表面劣化が確認された。床版上面の滞水については目視では判別が困難であったため、図4.2.2には含んでいない。別途床版上面の水分量測定を実施しているため、その結果については4.3で詳述する。

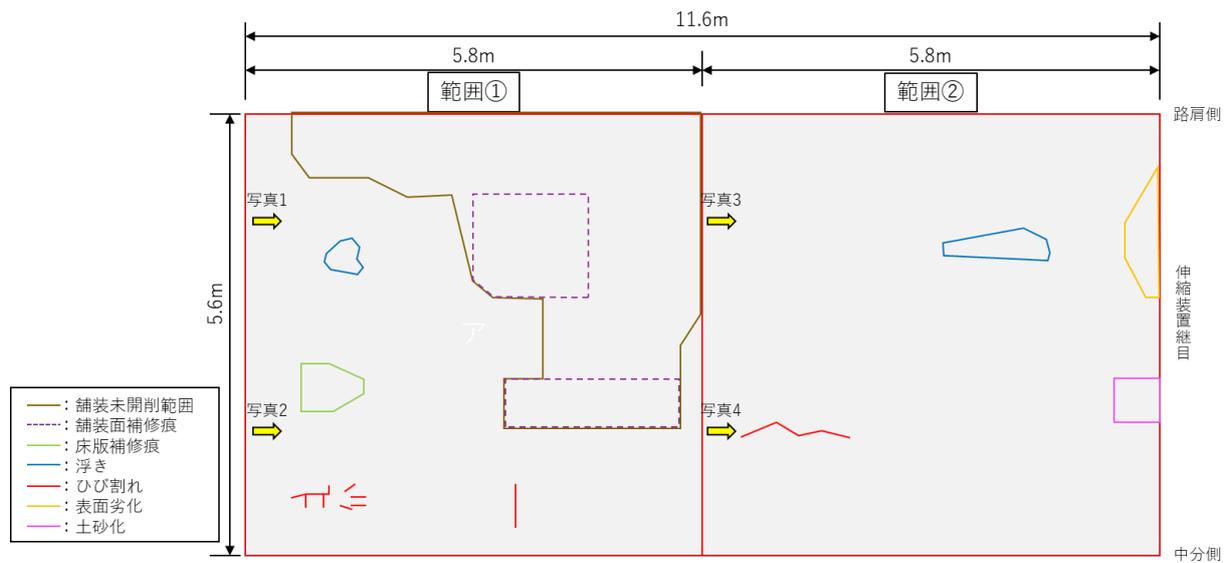


図4.2.2 確認された床版上面状態



a) 写真1



b) 写真2



c) 写真3



d) 写真4



e) 表面劣化 (写真3) の青丸部



f) 土砂化 (写真3) の赤丸部

写真4.2.2 床版上面状態

4.3 床版水分量測定

4.3.1 測定目的

床版上面の滞水範囲を定量的に把握することを目的に、4.2 で舗装開削した範囲内において、床版水分計を用いて床版上面水分量の測定を実施した。同様に、床版下面の水分量の分布を把握することを目的に、床版下面水分量の測定も実施した。

4.3.2 測定機器の仕様

使用した床版水分計の仕様を表4.3.1 に示す。床版上面の測定に用いた水分計は道路橋床版用のものであり、ゴムセンサを床版に密着させることで測定値を取得する。測定値は床版表面 (%) またはカウント値 (電気抵抗換算値) で表示可能である。図4.3.1 に示すとおり、既往の研究よりカウント値とコンクリート表面の水分状態との関係が整理されており⁷⁾、床版上面の含水状態を判別するためにカウント値を測定した。

床版下面の測定に用いた水分計は、含水状態を表す D 値を測定した。D 値は、コンクリート中の含水率が高いほど大きな値が表示される。D 値の測定結果の目安は、既往の調査結果⁸⁾⁾を踏まえて、表4.3.2 のとおり想定した。

表4.3.1 床版水分計の仕様

測定箇所	仕様			
	測定方法	測定範囲	使用温度範囲	機材外形
床版上面	電気抵抗式	電気抵抗換算値：40～990	0～40℃	
床版下面	高周波容量式	D 値：0～1999	自動：0～40℃ 手動：0～70℃	

コンクリート表面の水分状態	カウント値の目安										
①絶乾状態	10	55									
②乾燥状態		60	132								
③表面乾燥状態			137	230							
④湿潤状態				235			520				
⑤滞水状態								521		744	
		100	200	300	400	500	600	700			
	電気抵抗式水分計（カウント値）										

図-4.3.1 カウント値とコンクリート表面の水分状態の関係⁷⁾

表-4.3.2 D 値の測定結果の目安

D 値	含水状態の目安
-399	正常または接触不良
400-599	正常
600-799	多い
800-	著しく多い

4.3.3 測定方法

床版上面水分量の測定は、舗装開削調査を行った範囲のうち、舗装を全て撤去できた範囲②（橋軸方向 5.8m × 橋軸直角方向 5.6m）において、露出した床版面を 25cm×25cm のマスで区切り、アスファルト乳剤の付着や砂利等が堆積している部分を避けて 1 マスにつき 1 点測定した。床版上面水分量の測定範囲を図-4.3.2 に、測定状況を写真-4.3.1 に示す。

床版下面水分量の測定は、橋梁全長にわたって主桁と横桁及び対傾構で囲まれた範囲を 1 パネルとし、さらに 1 パネル内のハンチとハンチの間を 50cm×50cm のマスで区切り、その交点における水分量を測定した。床版下面水分量の測定範囲を図-4.3.3 に、床版下面の測定イメージ図を図-4.3.4 に示す。

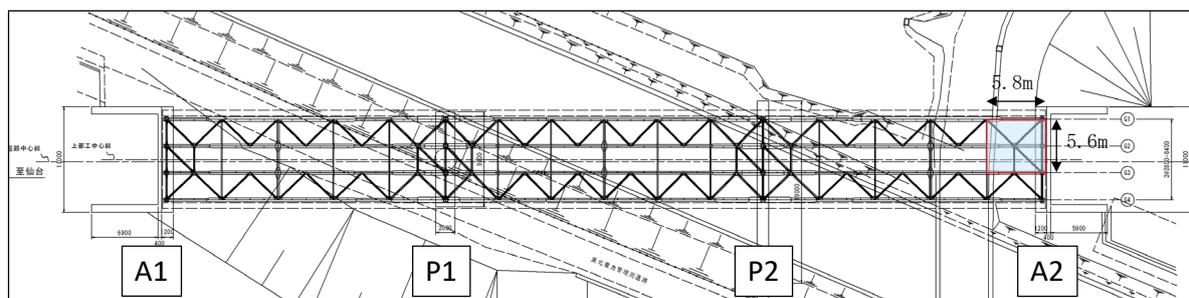


図-4.3.2 床版上面水分量の測定範囲



写真4.3.1 床版上面水分量の測定状況

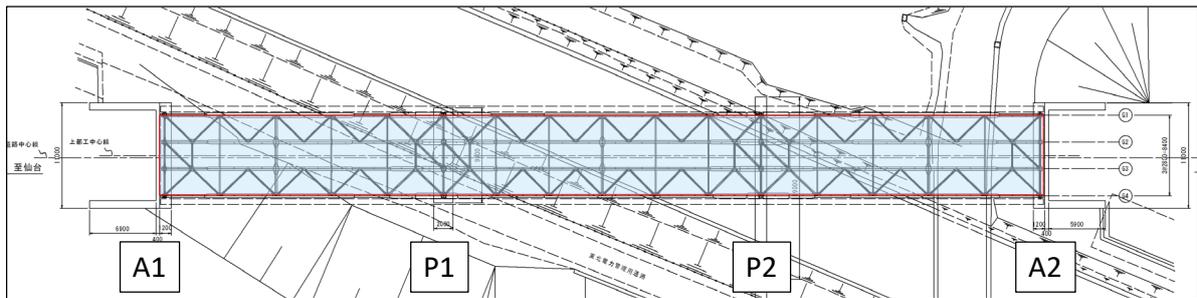


図4.3.3 床版下面水分量の測定範囲

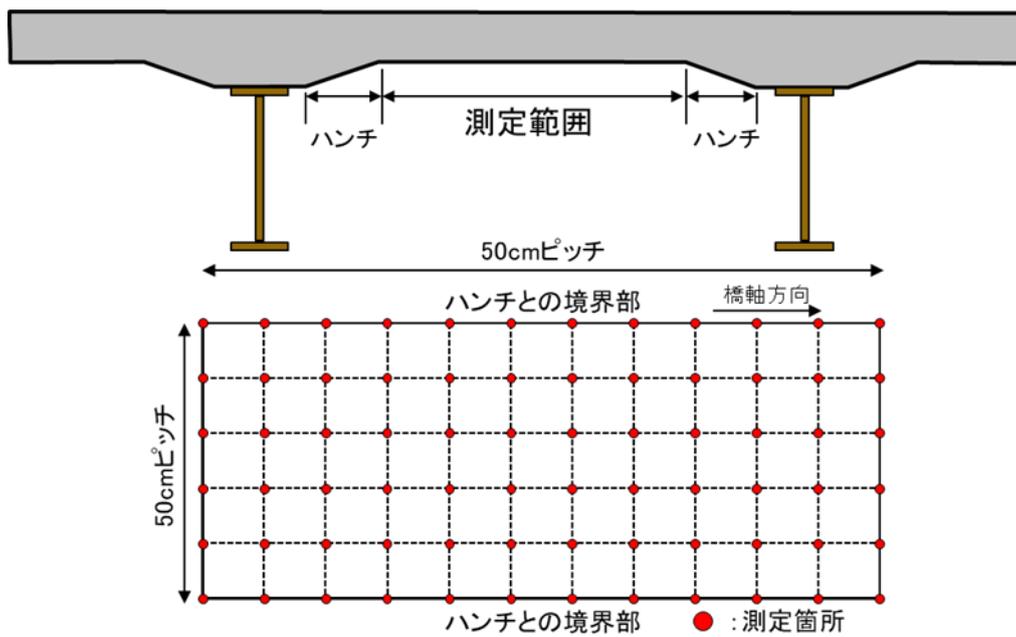


図4.3.4 床版下面の測定イメージ図

4.3.4 測定結果

床版上面水分量の測定結果と、現地で確認した舗装打継目や輪荷重位置、路面補修痕・ひび割れ等路面状況を重ね合わせたものを図4.3.5に示す。上側がA2側、下側がP2側であり、灰色の線はレーンマークを表している。マスの上側及び左側の数値は、それぞれ左側地覆境界部からの橋軸直角方向の距離及びA2側伸縮装置境界部からの橋軸方向距離を、マス内の数値は水分量の測定値を示している。赤線で囲んだ範囲が床版上面水分量の測定範囲であり、図4.3.1のカウント値とコンクリート表面の水分状態の関係に基づき、乾燥状態、湿潤状態、滞水状態の3つに分類し、該当するカウント値のマスを着色した。濃い青色の部分は測定上限（カウント値990）を超過した部分であり、超過を意味するHIを示した。輪荷重位置は、現場で路面に轍掘れが確認できたためその位置とした。

3色に分類した床版上面水分量を見ると、舗装打継目、伸縮装置との継目、及び地覆との継目付近で滞水状態の範囲が大きく、継目から距離のある輪荷重位置の内側付近では乾燥状態又は湿潤状態となっている。また路面ひび割れ位置と床版上面水分量を比較すると、一部乾燥状態となっている部分もあるものの、概ね路面ひび割れ直下も滞水状態となっている。

この結果より、舗装打継目、伸縮装置や地覆との継目、及び路面ひび割れが、床版上面への水の浸入経路となっていると考えられる。

次に、床版下面水分量の測定結果をコンターとして図化したものを図4.3.6に示す。値の大きい箇所を青色に、小さい箇所を赤色で表現している。A1-P1間のG1-G2桁間のコンターが表示されていないが、これはデータ取得に失敗したためである。

続いて図4.3.7は、4.1で示した2017年実施の路面の定期点検結果を図4.3.6と比較できるようつなげたものである。P2-A2間を見ると、3箇所の路面補修痕の位置で、コンター図は青色、即ち高い含水状態を示している（図4.3.7の赤丸部）。同様にP1-P2間でも、中央の路面補修痕の位置でコンター図が青色を示している。このような箇所は、路面上はきれいに補修されているものの、床版内部には多量の水を含んだままとなっていると考えられる。一方、コンター図のP2-A2間の左上パネルに青色が確認できるが、定期点検結果では補修痕等目立った損傷は記録されていない（図4.3.7の青丸部③）。P1-P2間のP2付近の中央パネルやA1-P1間左側中央パネルでも同様の箇所が確認できる（図4.3.7の青丸部①②）。

ここで、定期点検結果は2017年実施、床版下面水分量測定は2020年実施であり、約3年のタイムラグがあるため、定期点検結果には記録されていない新たな損傷が生じている可能性がある。2020年12月の実橋調査時に撮影した、青丸部①②③周辺の路面写真を写真4.3.2に示す。3箇所とも定期点検結果よりも路面ひび割れが進展しており、特に青丸部②では舗装が局所的に窪んでいるのが確認できる。このような窪みや路面ひび割れから水が浸入し、床版内のひび割れに浸透することで、床版下面において高い含水状態を示したと考えられる。

今回の床版下面水分量測定の結果から、床版下面水分量コンター図で青色（D値で600～1000）を示した場合、その直上付近の路面には水の浸入口となる損傷が生じている可能性が高いことが確認された。これを活用することで、路面の損傷程度が同程度であっても、床版下面の水分状態を計測してコンター図化することにより水の浸入口となっている損傷の可能性を判別できることが期待できる。効果的な補修順位の策定を



写真4.3.2 青丸部①②③周辺の路面写真

4.4 車載式電磁波レーダによる調査

4.4.1 調査目的

3.3 同様，G 橋（下り線）において調査を実施し，電磁波の反射信号の特徴に基づき RC 床版上面の滞水及び劣化状態を検知可能か検証した．

4.4.2 調査機器の仕様

調査に用いた車載式電磁波レーダの仕様は，3.3.4 と同様である．

4.4.3 計測方法

計測方法については，3.3.5 と同様である．

4.4.4 解析方法

解析は，3.3.6 と同様に床版上面の状態をグループ 1～3 の 3 つに分類した．G 橋（下り線）の床版上面の状態を分類した結果について，各グループの代表箇所データをを用いて説明する．

(1) グループ 1 の分類

3.3.6 (1) と同様に，G 橋（下り線）においてグループ 1 に分類したデータを図-4.4.1 に示す．

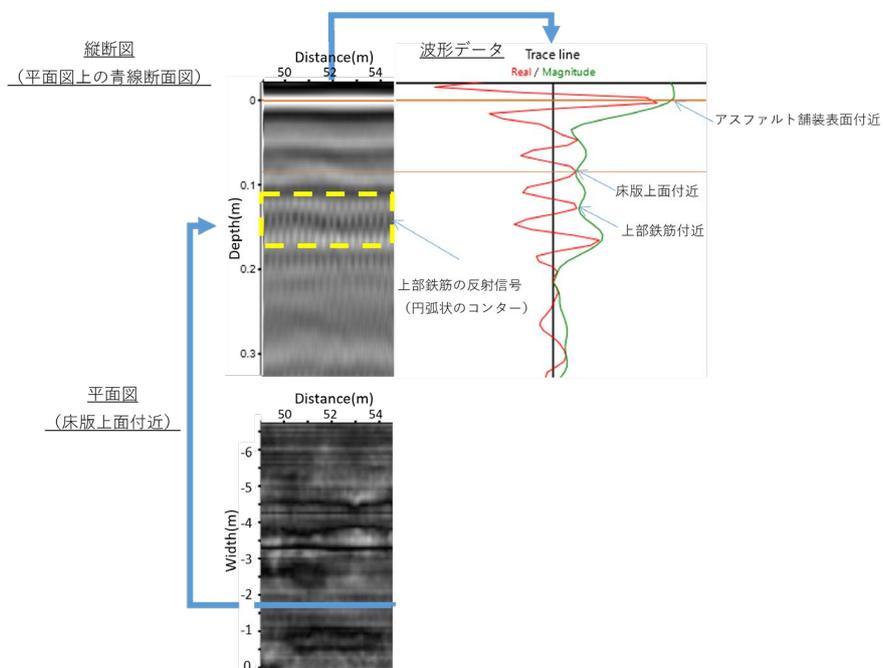


図-4.4.1 G 橋（下り線）においてグループ 1 に分類した反射信号

(2) グループ 2 の分類

3.3.6 (2) と同様に、G 橋（下り線）においてグループ 1 に分類したデータとグループ 2 に分類したデータの比較を図-4.4.2 に示す。

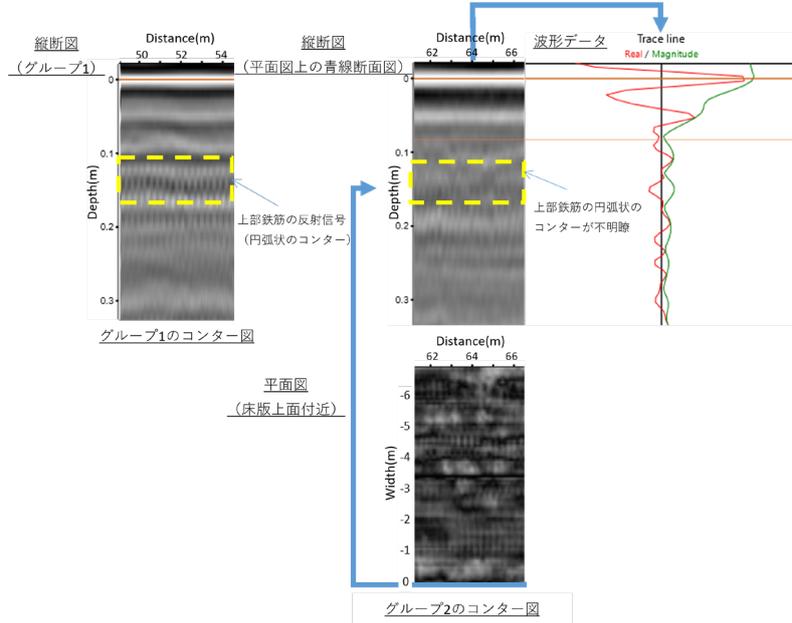


図-4.4.2 G 橋（下り線）におけるグループ 1 とグループ 2 の反射信号の比較

(3) グループ 3 の分類

3.3.6 (3) と同様に、G 橋（下り線）においてグループ 1 に分類したデータとグループ 3 に分類したデータを図-4.4.3 に示す。

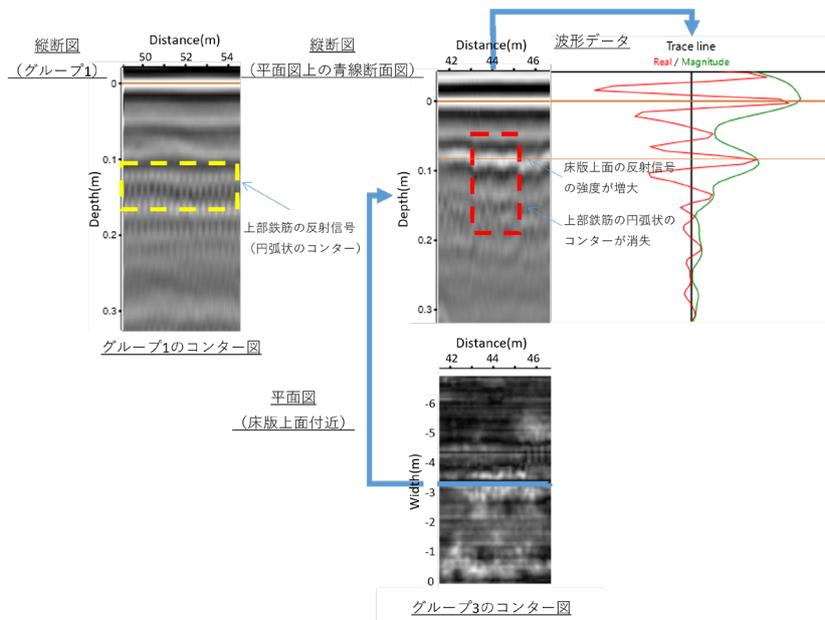


図-4.4.3 G 橋（下り線）におけるグループ 1 とグループ 3 の反射信号の比較

4.4.5 解析結果と実際の床版状態との検証結果

G橋（下り線）の計測結果をグループ1, 2, 3に分類した結果を図-4.4.4～図-4.4.6に示す。深い土砂化や滞水等の疑いがあるグループ3は複数箇所を確認された。また、舗装剥離、浅い土砂化、および水平クラックが疑われるグループ2の箇所も同様に複数箇所を確認された。

次に、4.2で示したとおり、A2橋台部の伸縮装置から橋軸方向（A1方向）に11.6m、左側の地覆から橋軸直角方向に5.6mの約65m²の範囲で舗装開削調査を実施した。解析結果（図-4.4.5）と比較するために、図-4.4.5の平面コンター図に開削範囲の床版状態を重ねたものを図-4.4.7に示す。浮きが確認された2箇所については概ねグループ2の範囲内に入っていたが、土砂化箇所についてはグループ1となっており検知できていなかった。図-4.4.8に示す当該箇所の電磁波レーダの波形において、上部鉄筋の反射信号の位置が床版上面の反射信号の位置と重なる異常を確認していたが、土砂化や滞水の場合にみられるグループ3の縦断図のような特徴は明確に確認できなかったため、舗装補修時に切削機で床版面を削ってしまった等の要因で床版のかぶりコンクリートが薄くなったことによる異常と考え、床版面の劣化ではないと判定していた。このような箇所については、検知精度向上のため更なる検証が必要である。

同様に、4.3で示した開削後に実施した電気抵抗式水分計による床版上面の水分状態の測定結果と解析結果との比較を図-4.4.9に示す。これを見ると、水分計の測定結果で滞水状態となっている路肩付近や中央破線付近、右端の伸縮装置近傍を、解析結果では滞水の場合のグループ3ではなく健全の場合のグループ1と判定している。この原因としては、水分計の調査日とレーダ計測日での床版上面の水分状態の変動が考えられる。

4.3で示した水分計の測定結果から、舗装打継目、伸縮装置との継目、及び地覆との継目付近が床版上面への水の浸入経路であると考えられる。現地は水分計測定前日の2020年12月22日まで全面的に積雪し、当日も路肩に堆雪している状況であり、地覆との継目などから融雪水が床版上面に浸入したと考えられる。一方、2020年12月3日に実施したレーダ計測では、計測日の5日前まで降雨は確認されなかった。これらより、水分計測定日とレーダ計測日で床版上面の水分状態が変動したため、水分計の測定結果と解析結果で乖離が見られたと考えられる。

以上のことから、解析結果と床版上面の水分状態との整合を検証するためには、水分計の測定とレーダ計測をいかに同じ条件で実施するかが課題である。

凡例	分類	推定要因
	グループ1	健全
	グループ2	舗装剥離, 浅い土砂化, 水平クラック等の疑いあり
	グループ3	深い土砂化, 床版上面の滞水等の疑いあり

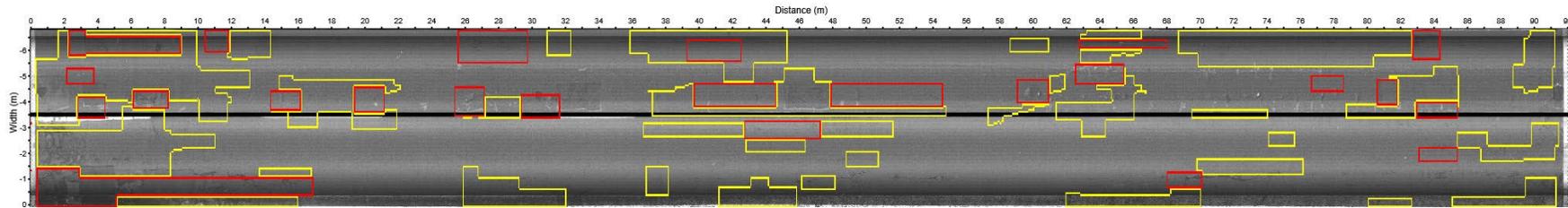


図-4.4.4 解析結果 (路面画像)

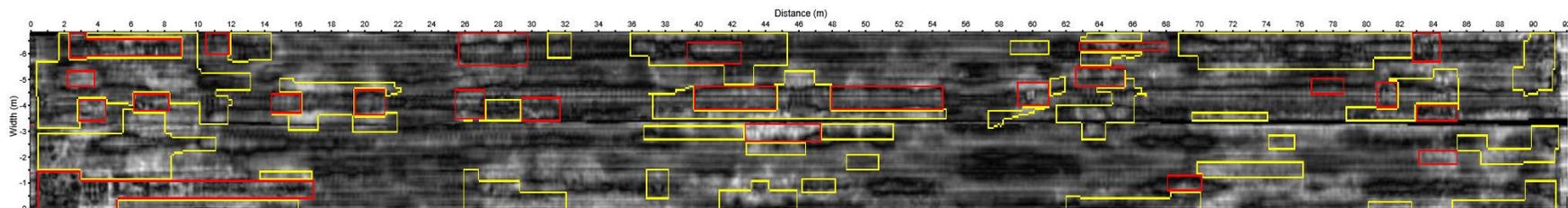


図-4.4.5 解析結果 (床版上面付近)

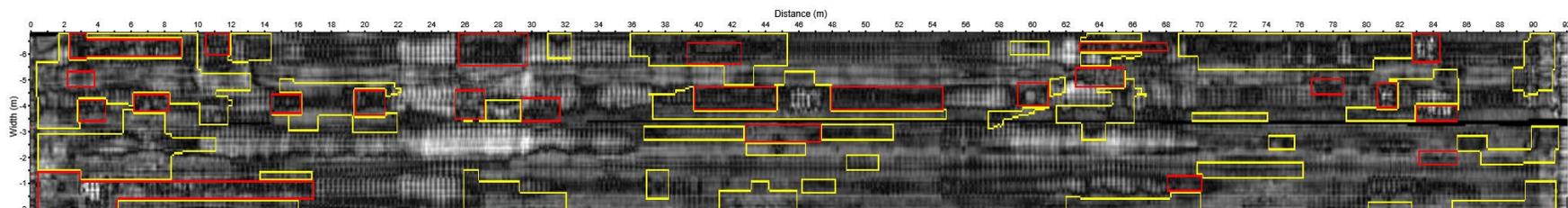


図-4.4.6 解析結果 (上側鉄筋付近)

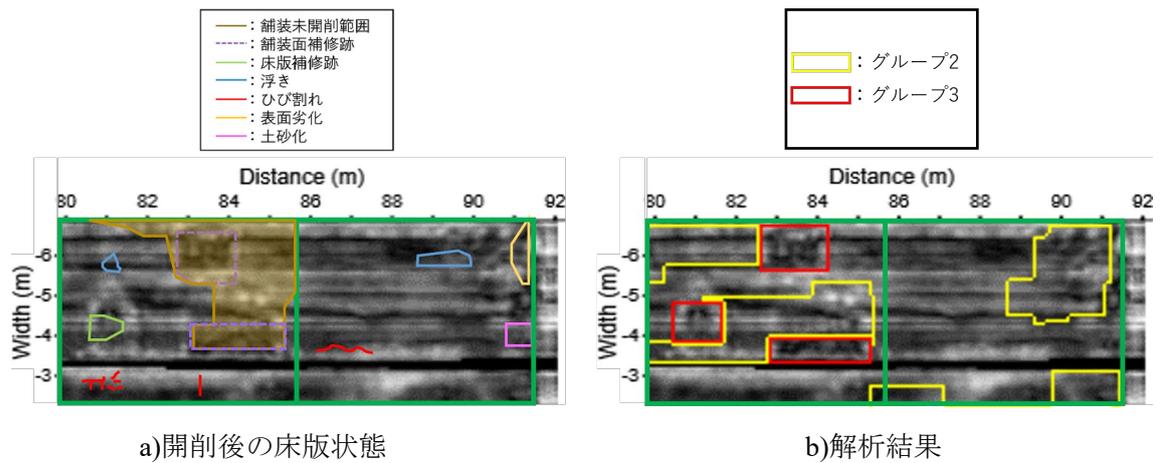


図-4.4.7 開削範囲の床版状態と解析結果の比較

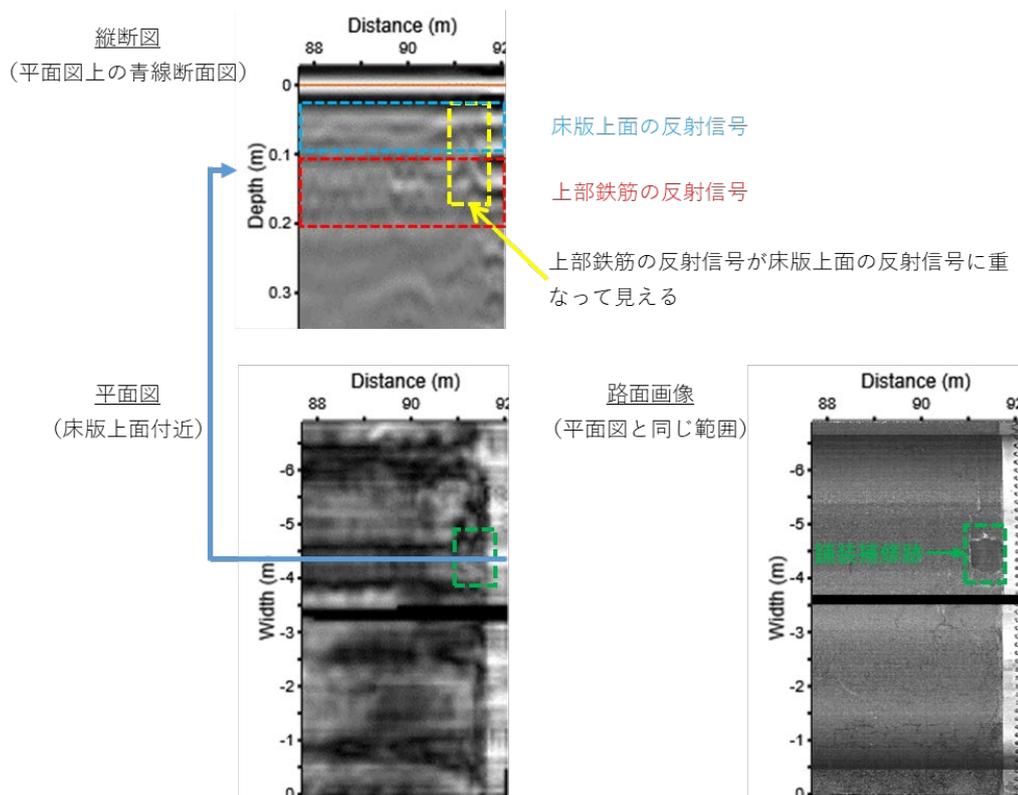


図-4.4.8 G橋（下り線）走行車線のA2側の補修跡付近における反射信号と路面画像

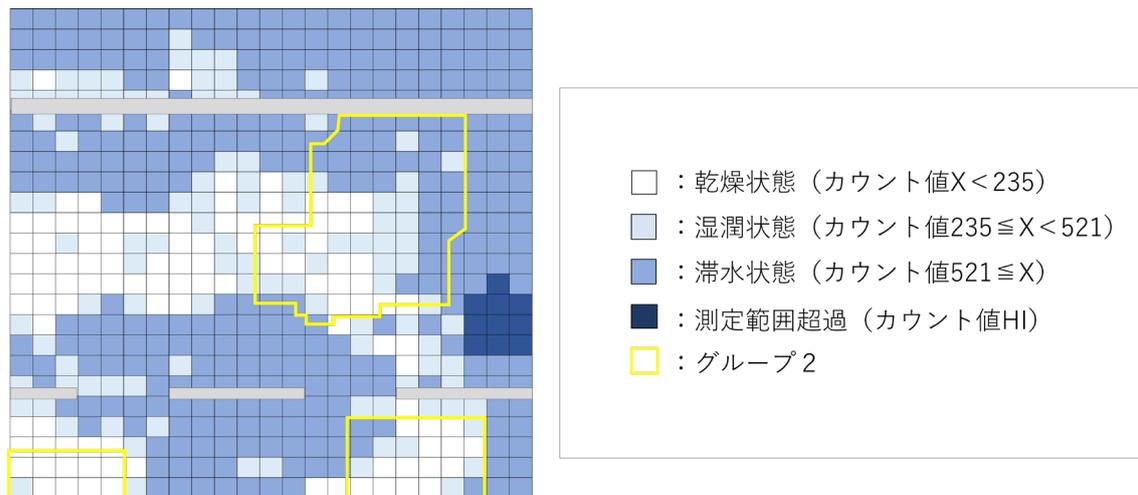


図-4.4.9 床版上面の水分状態と解析結果の比較図

4.4.6 まとめ

今回舗装開削した範囲では、電磁波レーダの解析結果（グループ分類）と実際の床版状態が乖離している範囲もあり、高精度で検知できているとまでは言えなかった。検知精度向上のため更なる検証が必要である。

また滞水検知については、レーダ計測日から舗装開削日までの降雪の影響により、検証することができなかった。検証のためには、水分計の測定とレーダ計測をいかに同じ条件で実施するかが課題である。

4.5 カート式電磁波レーダ（高周波型）による調査

4.5.1 調査目的

3.4 同様、G 橋（下り線）において、カート式電磁波レーダ（高周波型）を用いた調査を実施し、得られたレーダデータを画像処理することで、損傷範囲を的確に検出することができるか検証した。

4.5.2 調査機器の仕様

調査に用いた高周波型カート式電磁波レーダの仕様は、3.4.3 と同様である。

4.5.3 調査方法

3.4.4 と同様に、測線方向のデータ取得を 3cm ピッチ、測線間隔を 10cm として、3 径間分のレーダ探査を実施し、舗装部分撤去後の床版上面の滞水及び劣化状況を確認し、検証を実施した。探査状況を写真-4.5.1 に示す。



写真-4.5.1 探査状況

4.5.4 レーダデータの判定方法

レーダデータの判定方法は、3.4.5 と同様である。

4.5.5 損傷範囲の検証結果

カート式電磁波レーダ（高周波型）による調査より得られた結果を以下に示す。

図-4.5.1(a) は、レーダ探査した電磁波波形データをもとに、全体の床版上面付近の平面コンター図断面を示した画像である。

また図-4.5.1(b) は、検証箇所①及び検証箇所②の舗装開削後に確認した床版上面の損傷図であり、図-4.5.1(c) はその状況写真である。また、図-4.5.1(d) は主な損傷箇所の写真である。前述のとおり、床版上面では「土砂化」「表面劣化」「ひび割れ」「うき」「床版補修痕」が確認されている。

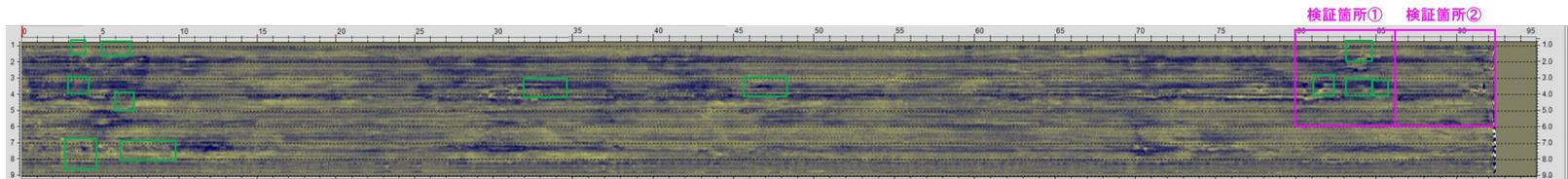
図-4.5.1(e) は、検証箇所①及び検証箇所②付近の平面コンター図である。平面コンター図では各所に濃淡が見られ、このような橋梁では損傷が多く発生したり過去に補修が繰り返行われていることも疑う必要がある。

続いて、図-4.5.2(a) は、検証箇所②付近の床版上面付近レーダ画像の平面コンター図と、主な損傷の位置及び橋面の滞水とその状況写真である。損傷箇所及び滞水箇所は反射強度が強いことを示す濃い色となっているのが分かる。

図-4.5.2(b) は、舗装開削後に計測した床版上面の水分量調査の結果をカラーマップで示した図である。赤色は水分量の多いことを示しているが、図-4.5.2(a) のレーダ画像の濃い色と概ね一致している。

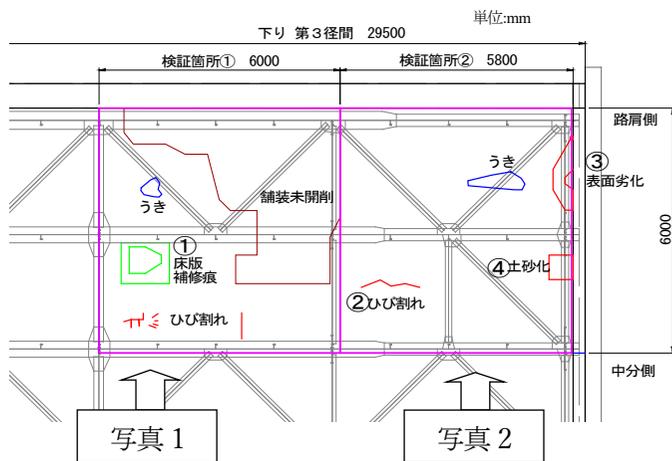
図-4.5.2(c) は、床版下面の状況写真である。湿潤箇所が濃い色となっているが、図-4.5.2(a) のレーダ画像や図-4.5.2(b) の水分分布とは異なっている。これは上面から下面に向かって水分が浸透する経路が真下とは限らないことを示している。したがって、経年的な劣化を予想するためには床版上面の水分量だけでなく、立体的な水分量の分布を把握する必要がある。

平面コンター図
(床版上面)



(a) レーダ画像 (全体)

凡例
 検証箇所 (開削箇所)
 舗装パッチ箇所



(b) 床版上面損傷図



写真1



写真2

(c) 舗装開削後の床版全景



① 床版補修痕



② ひび割れ



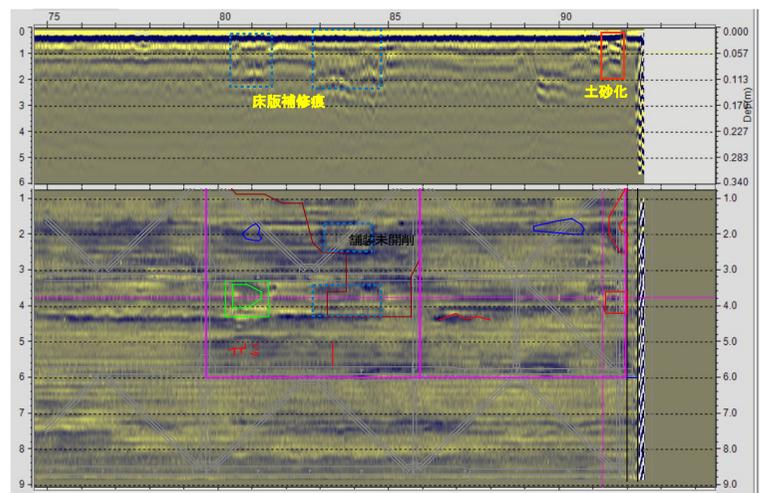
③ 表面劣化



④ 土砂化

(d) 損傷部写真

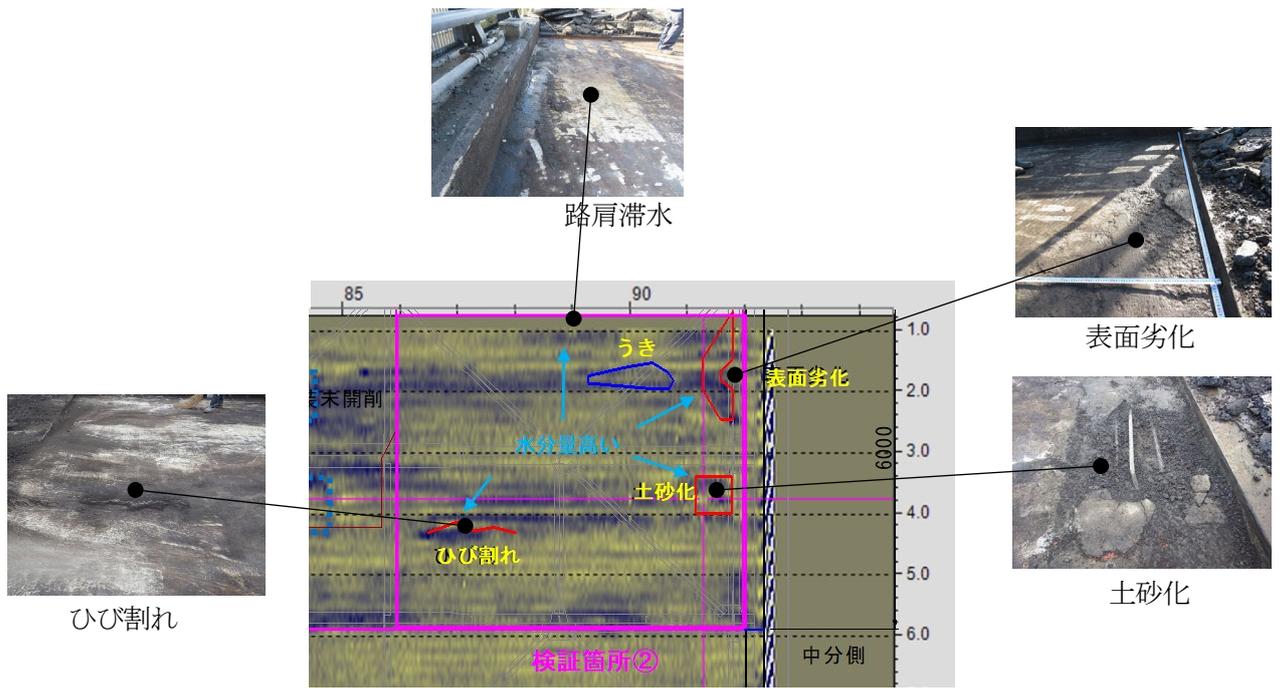
縦断スライス図
(- ライン)



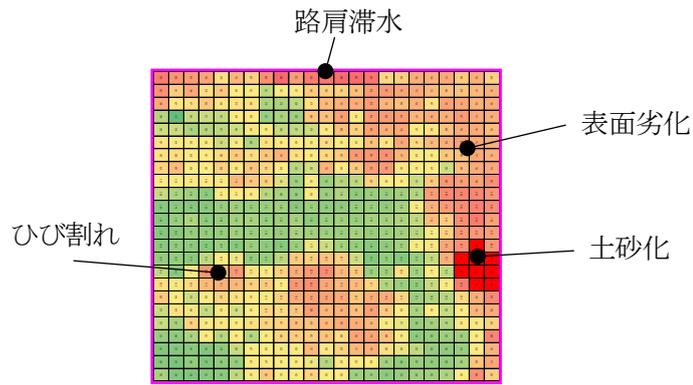
平面コンター図
(床版上面)

(e) (a) と (b) の重ね合わせ

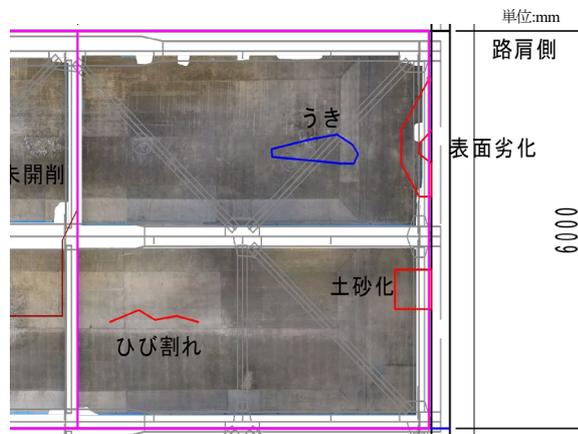
図-4.5.1 舗装開削状況とレーダ画像



(a) レーダ画像



(b) 水分量分布



(c) 床版下面写真 (反転)

図-4.5.2 水分の検知

4.5.6 まとめ

本節では、G 橋（下り線）において、カート式電磁波レーダ（高周波型）を用いた調査を実施し、得られたレーダデータを画像処理することで、損傷範囲を的確に検出することができるか検証を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 「土砂化」箇所は、平面コンター図で反射強度が強いことを示す濃い色が確認でき、縦断スライス図では大きな乱れが確認できた。以上より、「土砂化」箇所を推定することは可能である。
- (2) 「床版補修痕」は平面コンター図で人工的な矩形の輪郭が確認でき、縦断スライス図では鉄筋が鮮明に確認できた。以上より、「床版補修痕」を推定することは可能である。
- (3) 「表面劣化」「ひび割れ」「うき」箇所は平面コンター図で色が濃い範囲と重なっていた。縦断スライス図では小さな乱れが確認できるが、明確ではなかった。
- (4) 損傷箇所及び滞水箇所と平面コンター図の濃い色で表現される範囲は概ね一致した。これより、平面コンター図で濃い色で表現される範囲に着目すれば、劣化が進行しやすい範囲を推定することができると考えられる。
- (5) 床版の水分量の多い範囲は、上面と下面とでは必ずしも同じ位置ではなかった。これは上面から下面に向かって水分が浸透する経路が真下とは限らないことを示している。したがって経年的な劣化を予想するためには、床版上面の水分量だけでなく、立体的な水分量の分布を把握する必要がある。

今回の調査で、実際の損傷状況とレーダ画像の整合を確認した結果をまとめると表-4.5.1 のとおりである。

表-4.5.1 損傷とレーダ画像での推定

	レーダ画像の状態	カート式電磁波レーダ（高周波型）画像での推定精度
土砂化	平面コンター図で局部的に色が濃い 縦断スライス図での床版上面の不連続と大きな乱れ	○
表面劣化	平面コンター図で局部的に色が濃い 縦断スライス図での床版上面の軽度な不連続と小さな乱れ	△
ひび割れ	平面コンター図で局部的に色が濃い 縦断スライス図での床版上面の軽度な不連続と小さな乱れ	△
うき	平面コンター図で局部的に色が濃い 縦断スライス図での床版上面の軽度な不連続と小さな乱れ	△
床版補修痕	平面コンター図で人工的な矩形形状が確認できる 鉄筋等の反射が明確	○
水分	平面コンター図で色が濃い 縦断スライス図での床版上面の境界が明確	○

4.6 カート式電磁波レーダ（中周波型）による調査

4.6.1 調査の背景と目的

中心周波数が 300～900MHz の中周波型の電磁波レーダは、主に空洞調査や埋設管調査用に普及が進んでおり、利用可能な装置の種類や稼働台数が多い。また、複数のアンテナを備え一度に広い範囲を調査可能なマルチチャンネル型や、高速度で調査が可能な車載型の装置の多くは、中周波帯域の装置である。中周波型は高周波型に比べて波長が長く分解能に劣る。このため、高い判別性能が要求される床版の損傷調査においては不利となる。しかし、波長が長い分、調査位置の制御不足や舗装の凹凸などに起因するノイズの発生が抑制され、記録品質が低下しにくい利点も存在する。本節では、普及が進んでおり、汎用的に利用可能な中周波型の電磁波レーダ装置の床版の土砂化の検知に対する適用性を確認することを目的とし、対象橋梁で実施した調査結果について述べる。

4.6.2 調査装置

調査装置は EarthRadar 製の miniPod を用いた。中心周波数は約 800MHz の中周波型レーダである。使用機材は、4 台の送信アンテナと 8 台の受信アンテナを搭載したマルチチャンネル電磁波レーダである（図-4.6.1）。一度の走査で、走査方向と直角方向に対し 7.25cm 間隔の 14 本の測線の記録を同時に取得できる。

使用機材は車両牽引による高速探査を可能とする装置であるが、手押し式の台車に探査システムを載せ替え、人力で調査した。これにより、橋梁の端部まで隙間なく調査し、調査装置の性能試験に必要な記録を取得した。手押し台車への搭載に際して、アンテナ下面と舗装面との間の距離は 1cm に設定した。なお、車両牽引による高速調査でも、本試験で取得した記録と同様な波形記録を取得することができる。

記録は車輪のエンコーダにより走査方向に対し一定間隔（2.38cm）で取得した。また、記録取得位置の絶対座標は 0.05 秒ごとに RTK-GNSS により測定した。これにより、複数の測定記録間の相対位置を高精度で把握することができる。

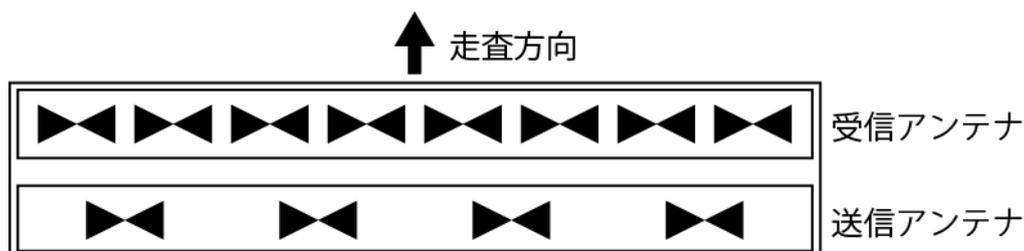


図-4.6.1 アンテナ配置

4.6.3 調査方法

調査は、走行車線方向に複数回往復して記録を取得した（写真-4.6.1）。27回走査し、記録の総延長は29,190mとなった。各測定記録の走査方向の測点間隔は全て2.38cmとした。1回の走査における隣接する測線の間隔は7.25cmであるが、複数回の近接域における走査により、一部でより高密度となっている箇所も存在する。ただし、本節の解析記録においては、一般的な性能を適切に評価する目的に合うように、取得記録の一部だけを用い、極端な高密度の記録は断面表示の際には使用していない。

調査地点の測量をRTK-GNSSにより0.05秒ごとに実施し、走査軌跡からアンテナの方位を計算している。RTK-GNSS以外の現地での走査地点の測量は行っておらず、現地調査の効率を高めている。また、各記録位置の決定は自動処理で実施しており、人の手による補正は行っていない。このため、測点数は多いが、解析においても、実用範囲内の解析作業量と考えられる。

調査は、A1からA2の桁間で行った。ただし、橋梁端部の一部に積雪していたため、それ以外の範囲を測定範囲とした。



写真-4.6.1 中周波型カート式電磁波レーダ装置による調査

4.6.4 記録断面

中周波型では、高周波型よりも波長が長いため、舗装面と床版上面の反射波、及び、床版上面と上部鉄筋の反射波が重なり、床版上面の反射波の識別が困難である場合がある。そこで、最も反射強度が大きく、反射波形が特徴的で識別の容易な、上部鉄筋の反射波の利用が標準的な解析方法となる。上部鉄筋の反射波は、伝播経路において、床版上部を含んでおり、床版の劣化や滞水により、反射強度や反射走時に影響を受ける。

そして、さらに下位の下部鉄筋や床版下面からの反射波も、床板上面を含むより上位の領域の影響を受けており、状態の判別に有益な情報を含んでいる場合がある。そのため、より下位の反射波も合わせて分析した。

図-4.6.2 に代表的な縦断スライス図を示す。左縦軸は、送信アンテナから電磁波を放射し、対象物から反射して受信アンテナで受信するまでの時間(走時)を示しており、単位はナノセカンド(ns)である。右縦軸は、伝播速度を0.12m/nsと仮定した場合の深度を示している。区間長は10mで、上部鉄筋(図-4.6.2中の赤矢印のライン)と床版下面(図-4.6.2中の青矢印のライン)が明瞭に識別できている。鉄筋による反射波形を一点に戻すマイグレーション処理を、一律の伝播速度(0.12m/ns)で適用している。一方で、2.5波長程度ある基本波形をパルス状の波形に変換するデコンボリューション処理は適用していない。このため、ひとつの対象からの反射波は、2回程度反復している波形として表現されている。各波動イベントの走時を解析する際は、各々の波形が最初に振動する走時を用いる。

図-4.6.2において、異常領域とした範囲における赤矢印及び青矢印の長さの違いは、それぞれ上部鉄筋及び床版下面の反射波の走時が、健全な箇所に対して遅れていることを示している。上部鉄筋の深度や床版厚が変化していることはないため、走時の遅れは、主に電磁波の伝播速度が低下することにより、反射波の到来時間が長く変化していることを示している。走時が遅れている領域は、振幅も小さくなっている。このような、走時が遅れ、振幅が低下した領域を異常領域として識別できる。

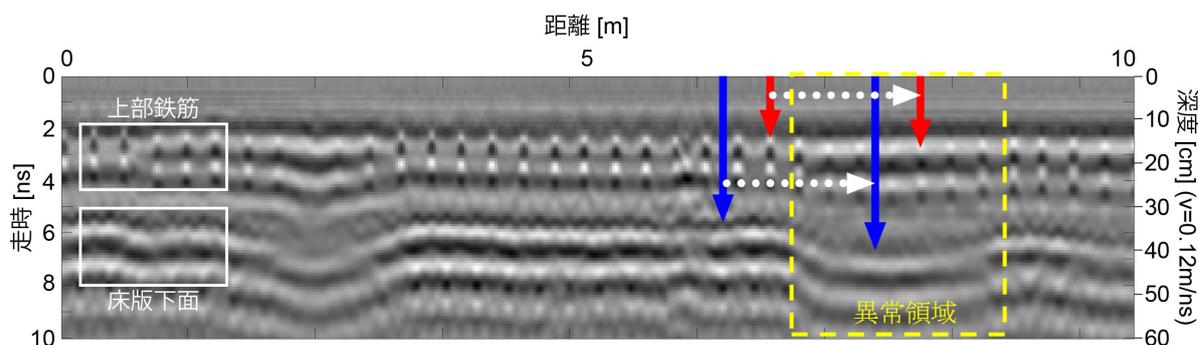


図-4.6.2 縦断スライス図例

次に、図-4.6.3～図-4.6.5 に往復走時それぞれ2.3ns、3.5ns、6.0nsの平面コンター図を示す。図の上側が北に相当する。2.3nsと6.0nsは、それぞれ上部鉄筋と床版下面の位置に相当する。3.5nsは上部鉄筋よりやや下部の位置で、床版上面による反射応答の影響が小さくなり、上部鉄筋の影響がより強く現れる位置に相当する。これらの注目走時の選定は、舗装厚や鉄筋のかぶり厚、及び、電磁波レーダの特性等により異なるため、各橋梁の測定記録に対して個別に選定する必要がある。

電磁波レーダの波形は、一般的に正と負が対になっている。したがって、正に振れた前後に必ず負に振れている。また、その途中でゼロの値を示している。したがって、1つの測定点の振幅の正負や値の大きさだけで、状態を識別することはできない。しかし、同走時分布として示した場合に、隣接域において互いに値が異なる場合は、何らかの状態が互いに異なっていることを示している。そのため、振幅値が周囲と異なる領域を異常領域として特定できる。

鉄筋の反射パターンが明瞭に捉えられる平面コンター図では、反射パターンが消失している領域を異常領域として識別することもできる。ただし、鉄筋の間隔が半分になっている箇所が存在するため、注意が必要となる。調査においては、鉄筋の特徴的な反射波形を適切に捉えるのに十分な測定間隔で記録を取得することが重要となる。

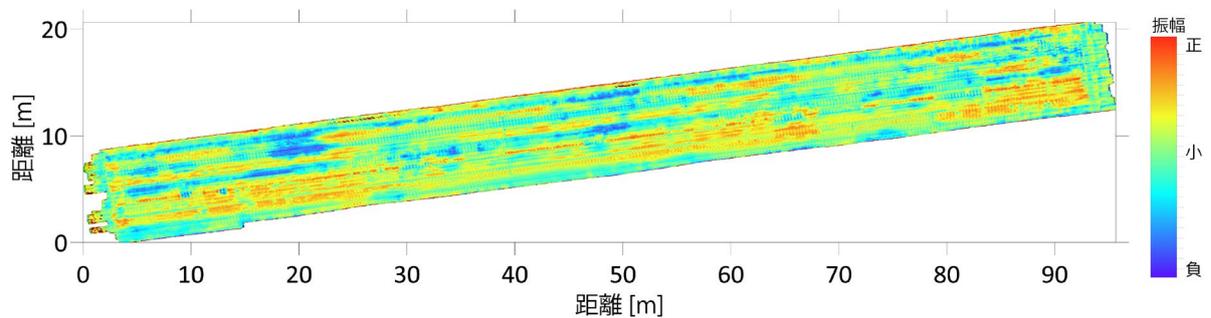


図-4.6.3 同走時 (2.3ns) 面記録

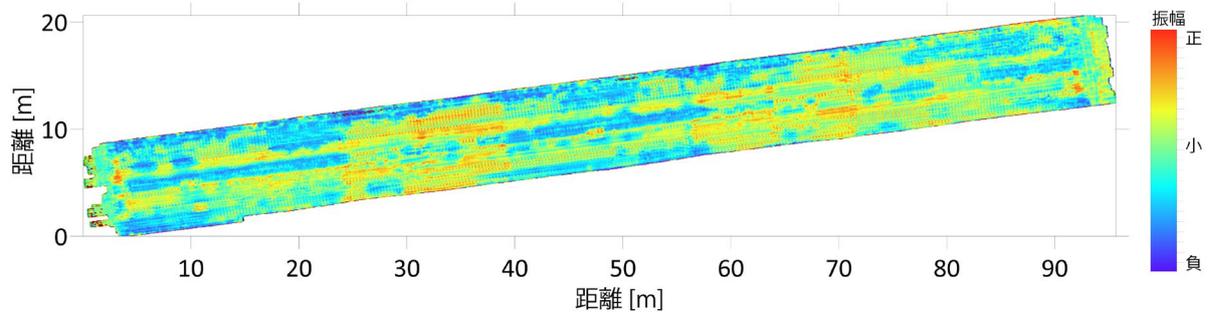


図-4.6.4 同走時 (3.5ns) 面記録

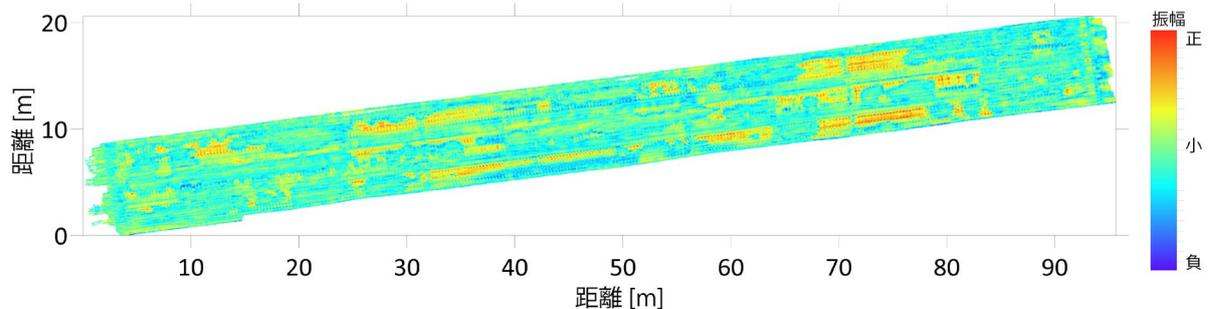


図-4.6.5 同走時 (6.0ns) 面記録

4.6.5 舗装亀裂の分布

別途撮影した舗装面の多数の写真から作成したオルソ画像を図-4.6.6 に示す。亀裂の識別を比較的明瞭に行えることから、舗装の亀裂を抽出した(図-4.6.7)。さらに、抽出した亀裂を、図-4.6.4 に示す 3.5ns の同走時面記録と合わせてプロットした図を図-4.6.8～図-4.6.11 に示す。図-4.6.4 を車線方向に4等分し、西側から区間1～4として表している。

図-4.6.6 のオルソ画像より亀裂を確実に識別できた範囲の境界を、図-4.6.8～図-4.6.11 に亀裂識別領域として破線で明示している。したがって、レーダ記録と舗装表面の損傷の比較対象域は破線の枠内となる。鉄筋の反射パターンが失われている領域、すなわち橋軸直角方向の主鉄筋の縞模様が確認できない領域の多くに亀裂が存在しており、電磁波レーダの断面記録と相関性が高いことがわかる。ただし、一部の領域では、図-4.6.8 のA付近のように亀裂が認められていないにもかかわらず、鉄筋の反射パターンが失われている箇所も存在する。



図-4.6.6 舗装面のオルソ画像

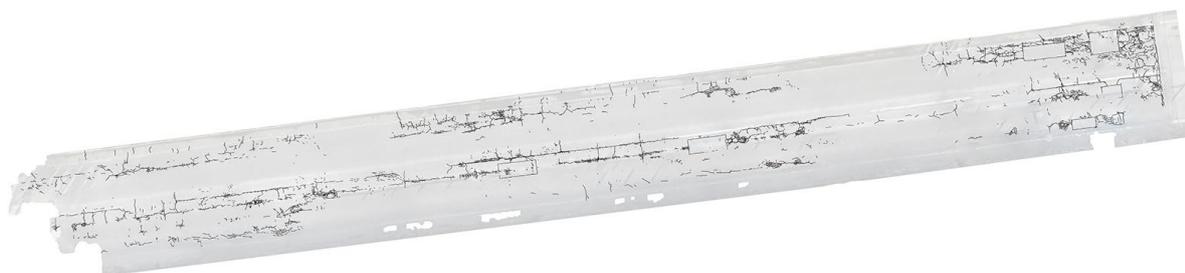


図-4.6.7 舗装面の亀裂分布

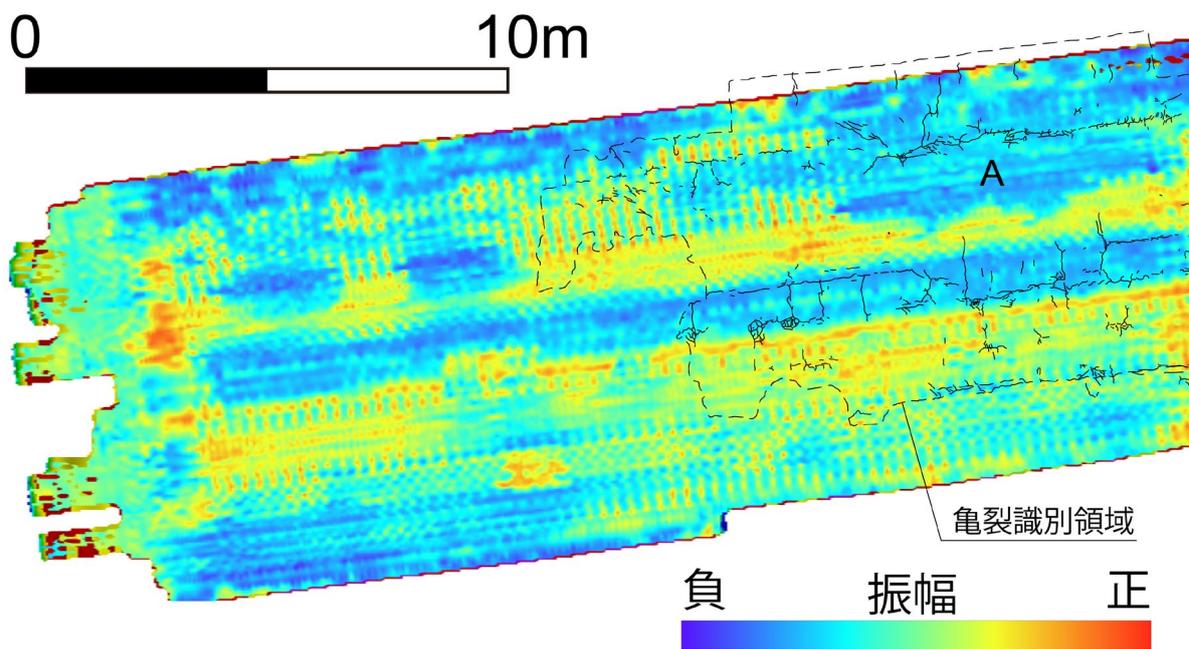


図-4.6.8 亀裂分布と同走時断面の比較（区間1）

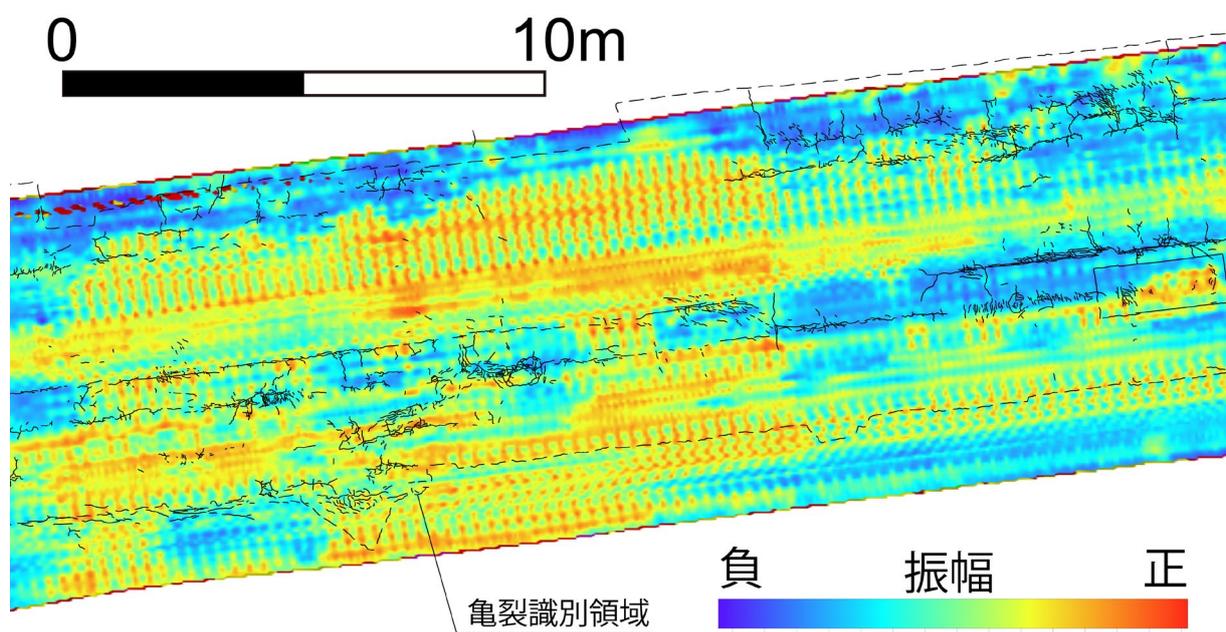


図-4.6.9 亀裂分布と同走時断面の比較（区間2）

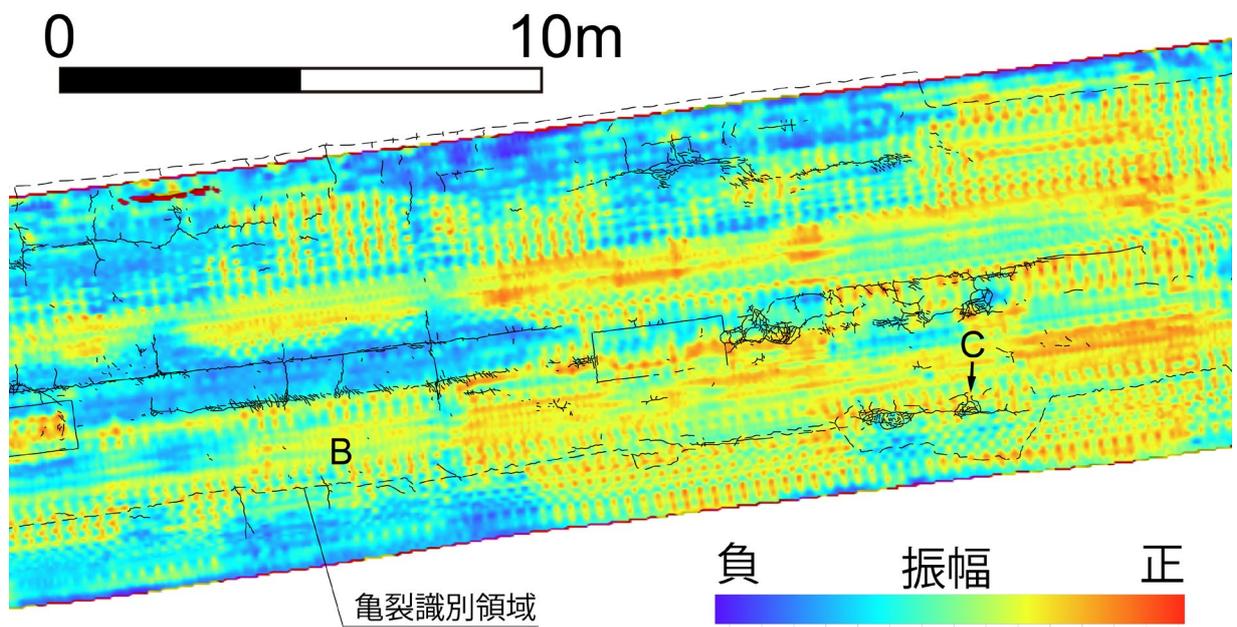


図-4.6.10 亀裂分布と同走時断面の比較 (区間3)

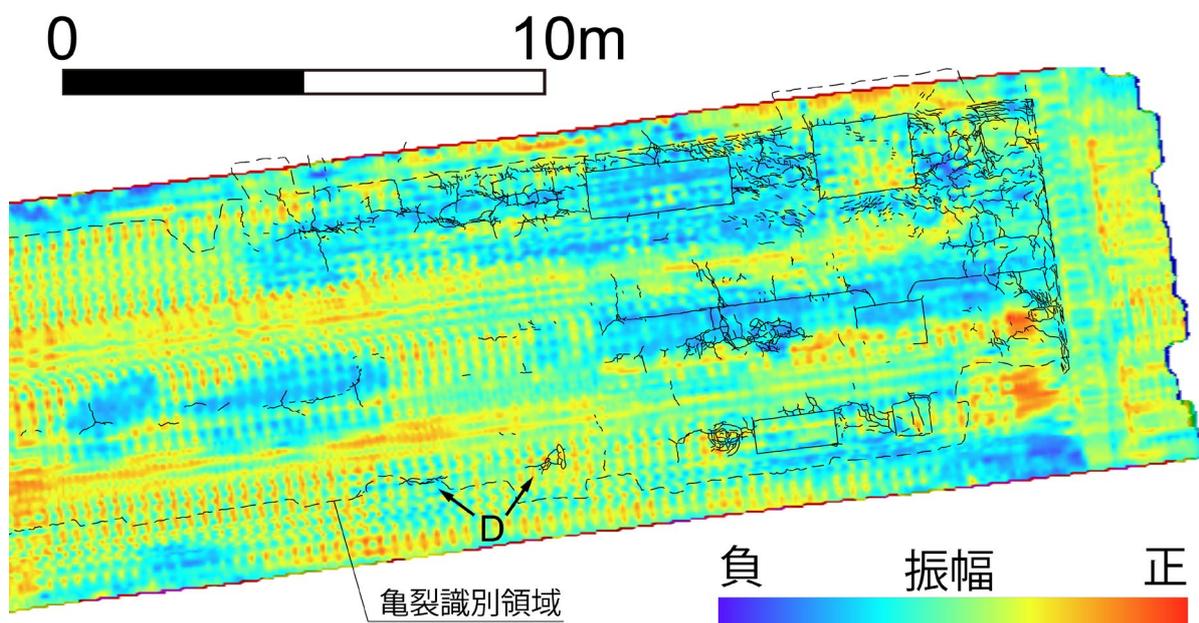


図-4.6.11 亀裂分布と同走時断面の比較 (区間4)

4.6.6 床版下面の信号分析

一般的には、橋梁床版の状態把握においては、上部鉄筋による強い反射信号のマッピングが有効なことが多い。しかし、対象床版は図-4.6.5 に示される床版下面付近の反射応答に、十分な記録品質が認められる。そこで、床版下面における応答信号の追加解析を実施した。

床版下面の反射波は床版の全厚を通過しており、上部鉄筋の反射波よりも伝播経路が長い。このため、床版上面付近だけでなく、下部域を含む床版内部全体に滞水している場合には、走時や振幅の変化量がより増大する。

床版下面の反射波の振幅は、図-4.6.2 において確認できるように、明瞭に変化している。ここでは、所定の走時範囲の最大振幅を床版下面の反射波の振幅として抽出した。この解析は比較的容易に行うことができる。抽出した振幅の分布を図-4.6.12 に示す。舗装や床版の損傷による散乱、または、滞水による減衰により、床版内部を伝播する電磁波のエネルギーが減少し、反射波の振幅が減少する。したがって、暖色系で示される振幅の値が小さい領域は、舗装や床版の損傷、または、滞水が生じていると推定される。なお、床版の下面は一部で主桁や対傾構に接しており、このような箇所での振幅評価は不良となる。

また、床版下面の反射波の走時は、図-4.6.2 において確認できるように、大きく変化している。床版下面の反射波の走時の抽出には、代表的な反射波形を用意し、これとの相互相関処理により自動処理で探索した。特定された反射波からは、走時と振幅の情報が得られる。このうち、反射走時は伝播速度の低下により長くなる。伝播速度は主に滞水により低下するため、走時の増加量から床版内部の含水率を推定できる。

床版下面から反射して戻ってきた電磁波の伝播時間と、設計時の床版厚と舗装厚の合算値 (31cm) から平均伝播速度が求められ、さらに伝播速度から比誘電率が求められる。比誘電率から体積水分率への変換は幾つかの関係式が提唱されており、本節では Topp 式¹⁰⁾ を用いて変換した。さらに、体積水分率からコンクリートの乾燥時密度の推定値 (2.3g/cm^3) を用いて重量含水率に変換した。図-4.6.13 に含水率の推定分布を示す。ただし、Topp 式は土壌における関係式であるため、コンクリートでは誤差がある。また、電磁波の伝播に影響する水分は、水和物を含む。以上より、推定された含水率は、室内試験による測定値と異なることが想定されるが、値の大小の傾向は整合するため、滞水状態の分布の推定に用いることができると考えられる。

次に、「4.3 床版水分量測定」の図-4.3.6 で示した床版下面水分量コンター図を、電磁波レーダ記録との比較を容易にするために、クリギングによる内挿補間を適用し、再描画したものを図-4.6.14 に示す。キャリブレーションを行っていないため、D 値は含水率に変換していないが、D 値は含水率と正の相関がある。さらに、電磁波レーダにより推定した含水率分布と床版水分計による D 値の分布との比較を図-4.6.15 に示す。点線の矢印が示すように、含水率が高い領域の位置と D 値が大きい領域の位置が概ね整合していることがわかる。

しかし、一部の領域については分布や値の変化の仕方が厳密には整合していない。この要因には、電磁波レーダの推定値が床版と舗装の内部の含水率の平均であるのに対し、床版水分計による測定値は床版下面の分布であるという点がある。また、両者の値は線形関係にあるとは限らない点も影響している。さらに、電磁波レーダは主桁や対傾構に接している箇所において推定値の誤差が大きくなっていると考えられる。ただし、床版水分計の測定も床版の露出部でのみしか測定できていない。さらに、図-4.6.15の点線円の箇所においては、床版下面の含水分布では最も走時が遅れている（含水率が高い）と考えられる領域であるが、走時の遅れがない（含水率が正常値）と判定しており、反射波の走時の推定が不良であったことが推定される。これは、自動解析処理の誤りに起因している。自動解析を適用する記録時間範囲を場所により手動で調整するなどにより解消できると考えられるが、膨大なデータの解析処理に対して手作業の割合をなるべく減らすことが、実用性の高い手法となると考えられることから、ここでは自動解析による結果図を示す。

解析結果図において、特徴的な箇所を、図-4.6.15中にA～Dで示した。領域Aは図-4.6.8のAと同領域で、舗装面に亀裂がないが、上部鉄筋付近では異常が認められ、さらに床版内部や床版下面の含水率も高い領域である。舗装面に亀裂が生じていない場所でも、床版内部に滞水している可能性が高いと考えられる。次に、領域Bは図-4.6.10のBと同領域で、舗装面に亀裂は認められず、上部鉄筋付近でも異常が認められていないが、床版内部や床版下面の含水率が高い領域である。続いて、領域Cは図-4.6.10のCと同領域、また領域Dは図-4.6.11のDと同領域で、舗装面に亀裂が認められているが、上部鉄筋付近では異常が認められていない領域で、床版内部や床版下面の含水率が高い領域である。これらは、床版内部の滞水検知の必要性を示唆している。

以上のように、中周波帯域の電磁波レーダを用いても、床版の損傷域や滞水域を検出できることが示された。分解能は高周波帯域の装置に劣るが、調査位置の測定精度や路面の起伏が記録品質に与える影響が小さくなることが想定され、調査作業者の熟練によらず、比較的安定した品質の記録を取得することができる利点がある。

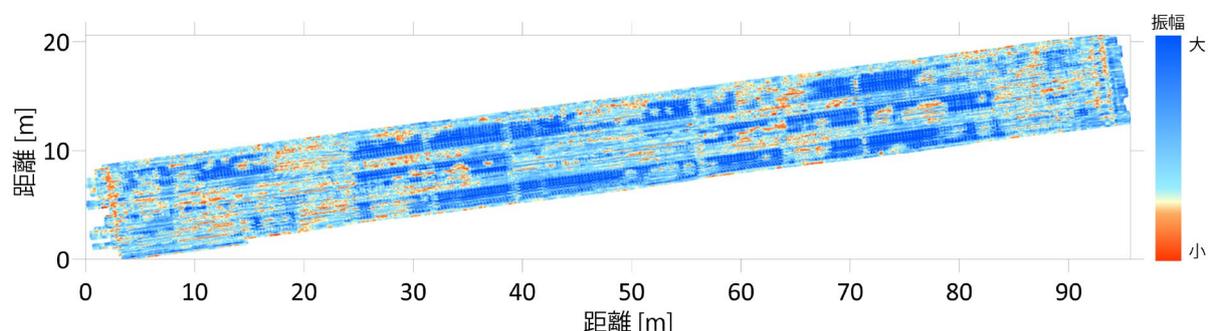


図-4.6.12 床版下面の反射振幅分布

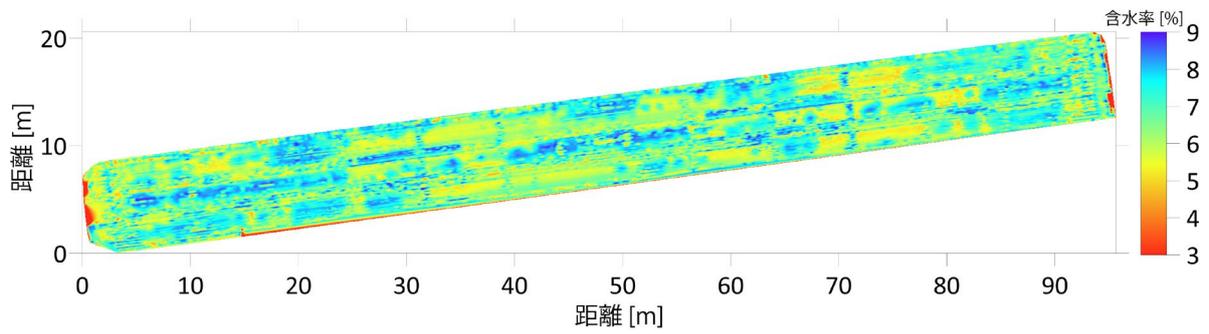


図-4.6.13 床版内部の推定含水率分布

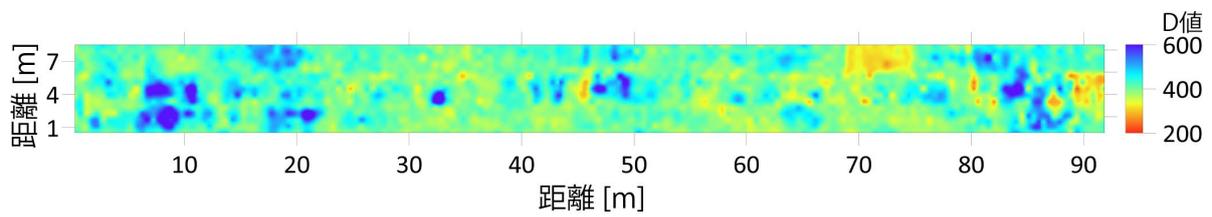


図-4.6.14 床版下面の含水分布

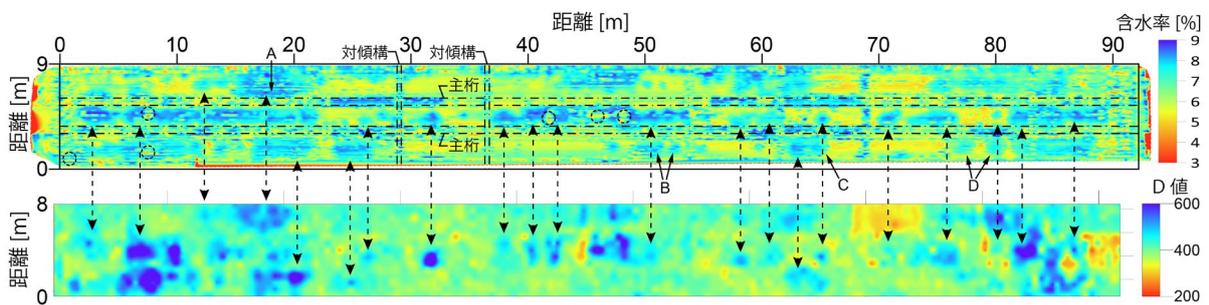


図-4.6.15 床版内部の推定含水率と床版下面の含水分布の比較

4.6.7 まとめ

本節では、中周波帯域の電磁波レーダ装置の床版の土砂化の検知に対する適用性を確認することを目的とし、G橋（下り線）で調査を実施した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 波長の長い中周波帯域では、床版上面と上部鉄筋からの反射波が重なり合うが、反射強度の大きい上部鉄筋からの反射波に着目し平面コンター図で分析すると、異常振幅域や反射パターンの消失域として、損傷範囲が特定できる。
- (2) 床版内部が滞水すると、電磁波の伝播速度が低下し、鉄筋や床版下面からの反射波の走時が遅れる。特に、床版下面からの反射波は、伝播経路が長いため、遅延時間が大きく、滞水区間を明瞭に識別することができる。また、滞水区間では散乱や減衰により反射波の振幅も低下する。
- (3) 床版下面からの反射波の走時と床版と舗装の設計厚から電磁波の平均伝播速度が求められ、さらに、比誘電率や体積水分率、重量含水率に変換できる。推定した含水率は、床版下面で直接測定した含水に関する測定値（D値）と同様な分布であることを確認した。
- (4) 平面コンター図において、上部鉄筋の反射パターンが失われている多くの領域では、舗装路面に亀裂が存在しており、整合している。一方で、両者の相関がない一部の領域において、床版の下面や内部で含水の高い領域が存在していた。これは、床版内部の滞水検知の必要性を示唆している。

4.7 ハンディ式電磁波レーダによる調査

4.7.1 調査目的

ハンディ式電磁波レーダで床版上面の滞水の検知が可能かを検証するため、G橋（下り線）において測定を行い、得られたレーダデータを画像処理したのち、4.3で確認した舗装開削範囲の床版上面水分量の分布との比較を行った。

4.7.2 調査機器の仕様

調査に用いたハンディ式電磁波レーダの仕様を表4.7.1に示す。調査には、GSSI社のStructureScanを用いた。

表4.7.1 ハンディ式電磁波レーダ仕様

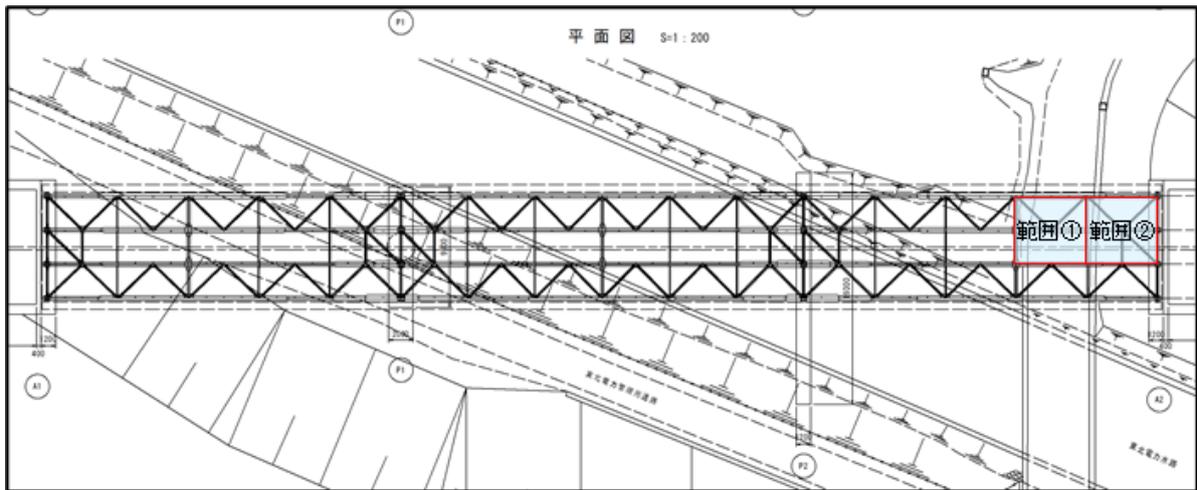
項目	性能 (カタログ値)	機材外形
機材名	GSSI 社製 SIR-EZ XT	
チャンネル数	シングル	
放射方法	パルス式	
中心周波数	2.7GHz	

4.7.3 調査方法

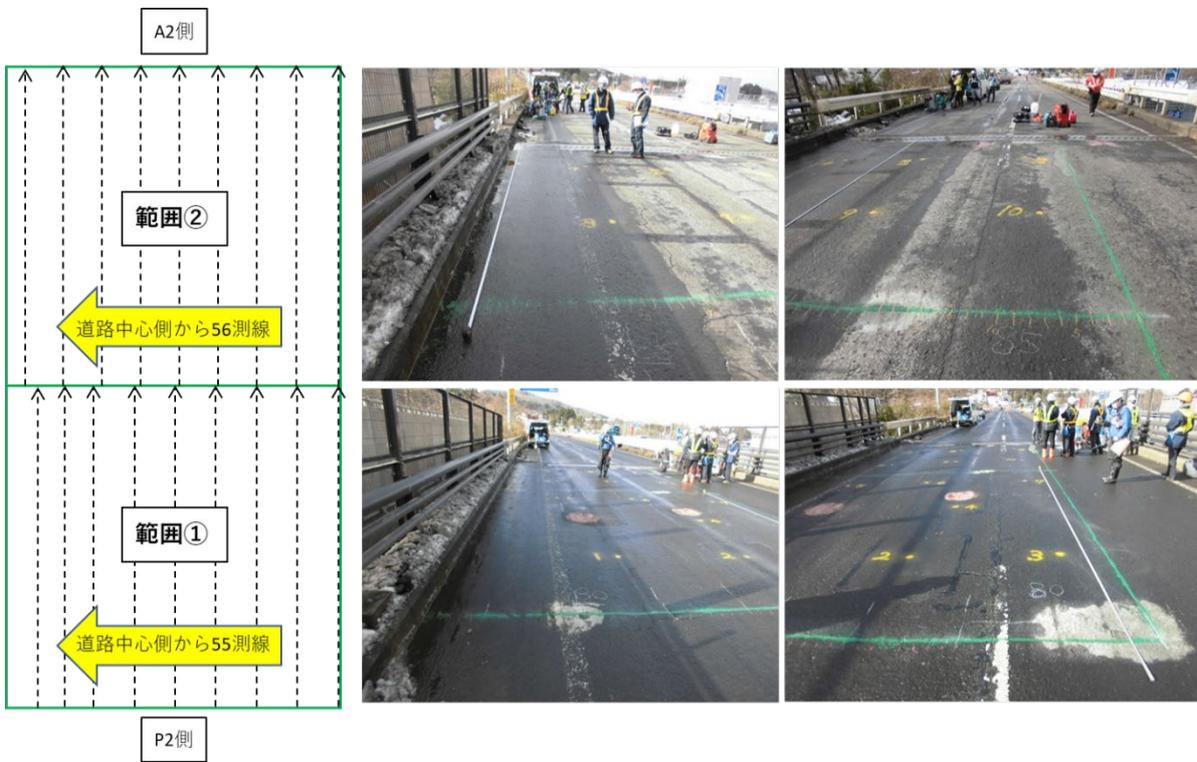
測定範囲は、4.2の舗装開削範囲と同様 A2 橋台部の伸縮装置から橋軸方向に 11.6m、左路肩の地覆際から橋軸直角方向に 5.6m の約 65m² に対して行った。この範囲を橋軸方向に 2 分割して、A1 側を範囲①、A2 側を範囲②として別々に測定した。測定は、道路中心側から路肩側に向けて橋軸方向に 100mm 間隔で行い、範囲①では 55 測線、範囲②では 56 測線を測定した。範囲①が範囲②より測線数が少ないのは、範囲①の路肩側に路面滞水があり一部測定ができなかったためである。調査状況を写真4.7.1に、測定範囲を図4.7.1に示す。図4.7.1のb)測定範囲（詳細）の写真内の緑線は測定範囲を舗装にスプレーで明示したものである。現地は1週間前から調査日の2日前まで降雪が続いており、調査当日も路肩に積雪していたため、雪解け水の影響で路面は湿潤状態であった。



写真4.7.1 調査状況



a)測定範囲（平面図）



b)測定範囲（詳細）

図4.7.1 ハンディ式電磁波レーダの測定範囲

4.7.4 測定結果の判断方法

電磁波は、透過した媒質と異なる比誘電率を持つ媒質の境界で反射する性質を持ち、反射波の振幅は接する二つの媒体の比誘電率の差によって決まる¹¹⁾。床版上面に滞水がある場合と滞水がない場合で反射波の振幅を比較すると、アスファルトやコンクリートと比較して比誘電率が大きい水がある場合の方が反射波の振幅が大きくなり、電磁波レーダの反射波の振幅を図化した平面コンター図では、水分など比誘電率がアスファルトやコンクリートより大きいものが存在する場合、コンターの濃淡のムラが表われる。一方、反射波の振幅に差がない、すなわち水分が存在しない場合は濃淡に変化の少ない一様な色合いで表示されることが分かっている¹²⁾。また縦断スライス図では、水分が存在しない場合は鉄筋からの反射が明瞭であるのに対し、水分が存在する場合は電磁波が水で反射され、電磁波が減衰することで鉄筋からの反射が不明瞭となることが分かっている¹¹⁾。以上のような知見をもとに、ハンディ式電磁波レーダで床版上面の滞水が検知可能か検証を行った。

4.7.5 測定結果

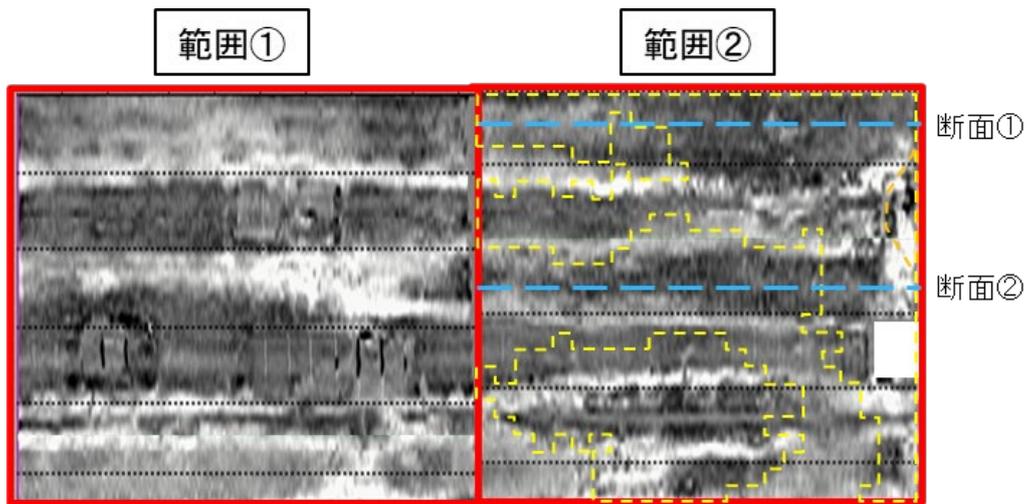
ハンディ式電磁波レーダの測定結果を用いた床版上面の滞水検知に関する検証結果について、以下に結果と考察を述べる。

ハンディ式電磁波レーダの測定結果より作成した平面コンター図と、4.3 で取得した床版上面水分量測定結果の比較を図4.7.2に示す。床版上面水分量の測定範囲は範囲②のみのため、レーダ測定結果の範囲②と大きさを揃えて比較している。平面コンター図の範囲②内の右端が一部白抜きになっているのは、土砂化により路面が陥没していた箇所であり、不陸により測定できなかったためである。

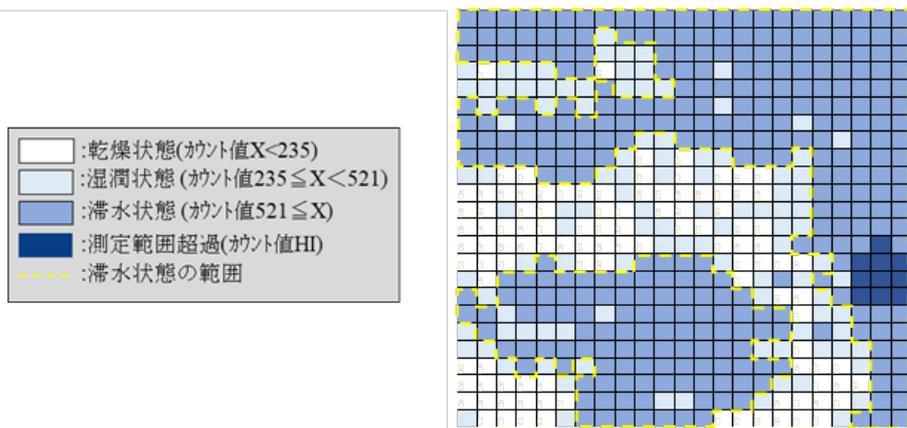
平面コンター図内の黄色破線は、床版上面水分量測定結果で滞水状態となっている範囲を囲ったものである。下側の黄色破線で囲まれた範囲や右端の黄色破線内ではコンターに濃淡のムラが生じており、滞水状態の分布と概ね合致している。また、乾燥状態又は湿潤状態となっている中央付近ではムラのない一様なコンターとなっており、こちらも水分量の分布と概ね合致した結果となっている。

一方、上端付近の黄色破線内に着目すると、床版水分量測定結果では滞水状態であるにもかかわらずムラのない一様なコンターに見え、滞水状態の分布と合致していない。ここで、図中の断面①及び断面②における縦断スライス図の比較を図4.7.3に示す。床版上面水分量測定結果でほぼ全断面にわたり滞水状態となっていた断面①では、鉄筋からの反射波形が全体的に不明瞭でぼやけている。一方、床版水分量測定結果で右端のみ滞水状態となっていた断面②では、右端部分は断面①同様に不明瞭だが、それ以外の部分は鉄筋からの反射波形が明瞭に確認できる。これは、4.7.4に記載のとおり比誘電率の異なる媒質、すなわち水が存在することにより電磁波が水で反射され、電磁波が減衰したことで鉄筋からの反射が弱まったためである。

以上より、平面コンター図における濃淡のムラの有無だけでは床版上面の滞水の確実な検知はできないものの、加えて縦断スライス図で鉄筋からの反射が不明瞭であることを確認することで、ハンディ式電磁波レーダの測定結果から床版上面の滞水を検知可能であることが確認できた。



a) ハンディ式電磁波レーダ測定結果



b) 床版上面水分量測定結果

図4.7.2 ハンディ式電磁波レーダ測定結果と床版上面水分量測定結果の比較

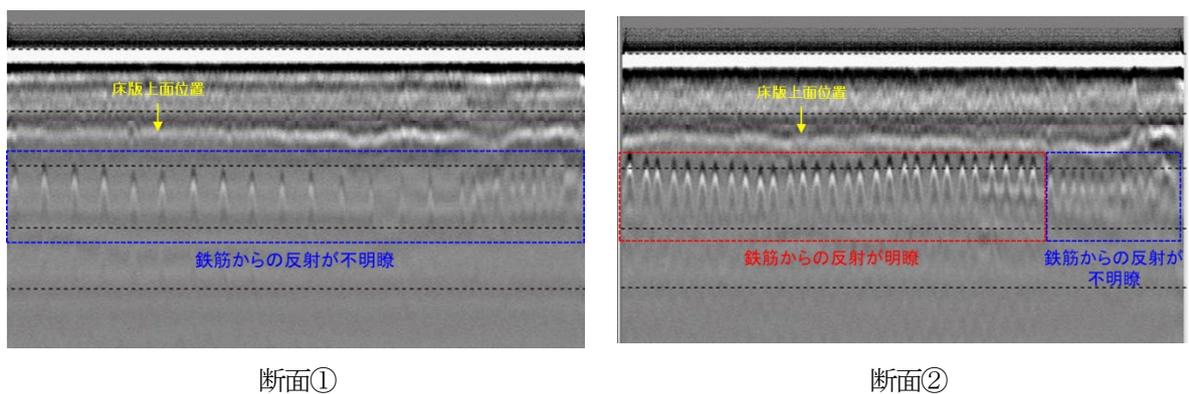


図4.7.3 縦断スライス図の比較

次に、滞水の検知に併せてその他の床版状態の検知が可能であるか検証した結果を述べる。図4.7.2に示したのと同じ平面コンター図上に、4.2で確認した床版上面状態結果を重ねた比較図を図4.7.4に示す。平面コンター図の上段には黄色破線位置で取得した縦断スライス図も示している。

まず床版補修痕を見ると、矩形のムラ及びびに縦方向の線が確認できる。既設床版のコンクリートと床版補修部の補修材の比誘電率が異なるため、濃淡のムラが生じたものと考えられる。また、縦方向の線は既設床版内の鉄筋からの反射波によるものと考えられる。同様のムラ及びび縦方向の線は舗装面補修痕でも生じている。次に、床版補修痕及び舗装面補修痕を含む断面位置の縦断スライス図である縦断スライス図①を見ると、床版上面位置の反射が床版補修痕の部分は途切れたように映っている。右側の舗装面補修痕も同様に途切れて映っていることから、この位置の床版も補修されているものと考えられる。このように、床版補修痕については、平面コンター図において濃淡のムラが生じていること、及び縦断スライス図において床版上面位置の反射が途切れて映ることを確認することで、検知が可能であると考えられる。

次に表面劣化、ひび割れ及び浮きの箇所を見ると、図4.7.2で示した滞水状態の範囲と被っているが、他の滞水状態の範囲と比較して明確な違いは確認できない。表面劣化及び浮きを含む断面位置の縦断スライス図②を見ても、表面劣化や浮きの範囲と他の範囲に違いは確認できなかった。以上より、表面劣化・浮き・ひび割れについては、ハンディ式電磁波レーダによる点検では検知が困難であると考えられる。

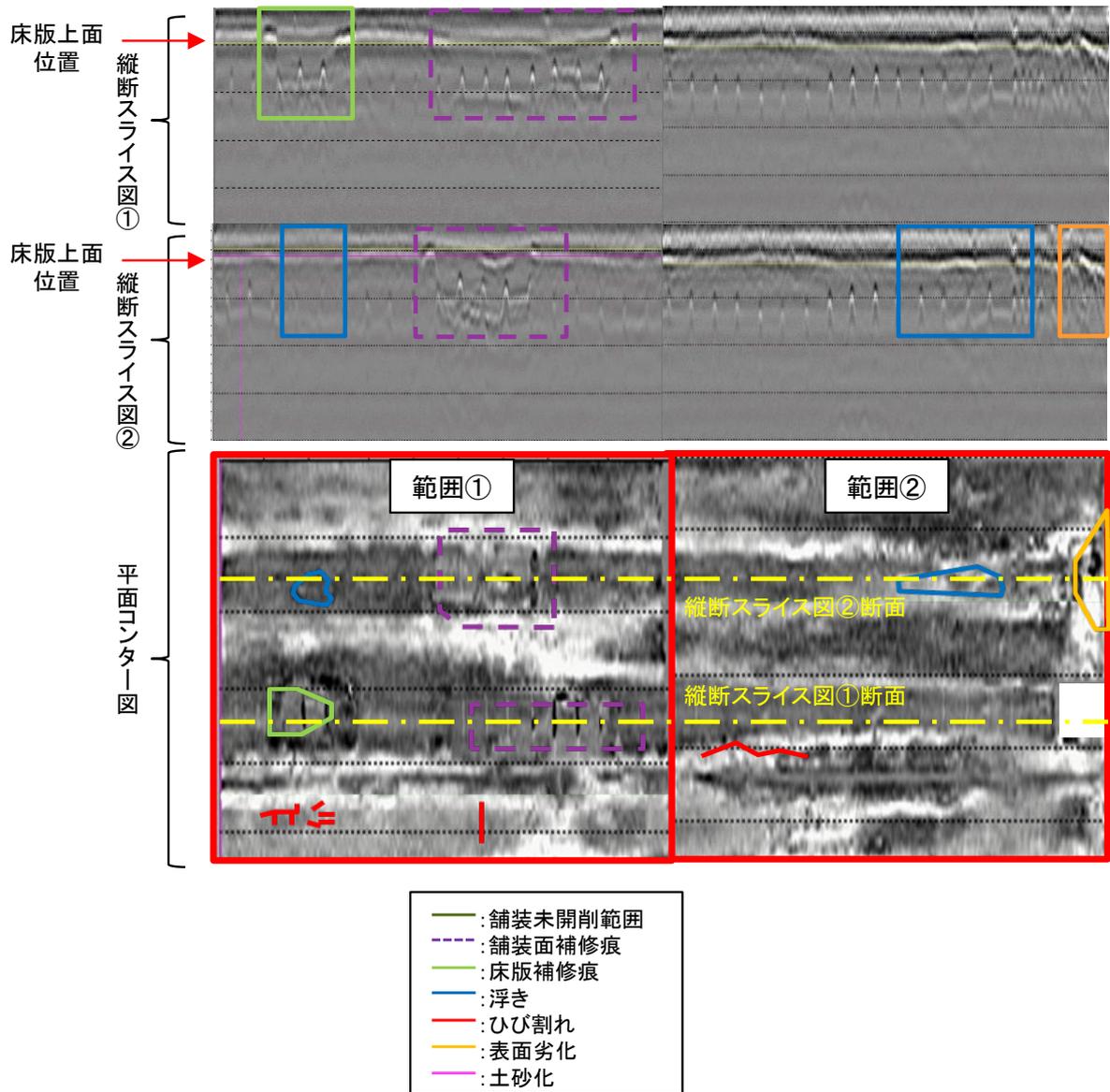


図4.7.4 ハンディ式電磁波レーダ測定結果と床版上面状態結果の比較

4.7.6 まとめ

本節では、G橋（下り線）において路面上からハンディ式電磁波レーダによる測定を行い、得られた測定結果と舗装開削後の床版上面水分量の分布や床版上面状態と比較することで、床版上面の滞水や床版状態の検知が可能か検証を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 床版上面の滞水は、平面コンター図における濃淡のムラの有無だけでは床版上面の滞水の確実な検知はできないものの、加えて縦断スライス図で鉄筋からの反射が不明瞭であることを確認することで検知可能である。
- (2) 床版補修痕は、平面コンター図において濃淡のムラが生じていること、及び縦断スライス図において床版上面位置の反射が途切れて映ることを確認することで検知可能である。
- (3) 床版面の表面劣化・浮き・ひび割れは、平面コンター図・縦断スライス図ともに、他の範囲と比較しても明確な違いは確認できなかったことから、ハンディ式電磁波レーダによる点検では検知困難である。

4.8 MMS（Mobile Mapping System）を用いた床版上面の滞水箇所特定手法

4.8.1 調査目的

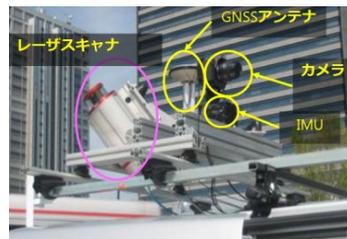
本節では、モービルマッピングシステム（以下、MMS）による土砂化に関するデータ収集の概略を述べるとともに、MMSを用いて床版上面の滞水箇所を特定可能か検証を行った。

4.8.2 調査機器の仕様

計測に用いたMMS車両には、3次元点群データが取得できるレーザースキャナ、位置情報を取得するための衛星測位システム（GNSS）、位置補正に活用する慣性航法装置（IMU）、詳細な画像を取得するラインカメラ（計測速度30km/hでの0.25mm計測モード、計測速度60km/hでの0.5mm計測モード、計測速度80km/hでの1.0mm計測モード）等が搭載されており、法定速度（一般道では40km/h、高速道では80km/h）で走行しながら道路とその周辺の3次元情報や幅0.25mm以上の微細な路面ひび割れを点群データとして取得することができる（図-4.8.1）。



MMS 車両



センサー取付状況



点群データ

図-4.8.1 MMS の概要

4.8.3 MMS 車両による滞水箇所の特的手法

床版の土砂化の原因となる滞水箇所の特的手法として、図-4.8.2 に示す MMS を用いた分析フローを考案した。具体的には、実橋を対象に MMS 車両を使って収集した点群データを用いて路面で水が滞水しやすい箇所を特定し、画像から収集した路面のひび割れデータから土砂化が生じる可能性の高い箇所を絞り込む。その上で実際に舗装開削した結果から土砂化の危険箇所が特定できるかを検証した。

まず、MMS によって取得した路面の各点の座標値を用いて、数値標高モデル (Digital Elevation Model, 以下 DEM) を作成する。DEM とは、各種測量法で計測された平面位置 (2 次元) 及び標高値を用いた 3 次元座標をデジタルで表現したものである。本試行では 10 センチ間隔のメッシュを使って DEM を作成した。

DEM は、図-4.8.3 のとおり地表面を同一の正方形に区切り、それぞれの正方形の中心点に標高値を持たせており、それをコンターで表現することで地形の標高を表現することが可能である (図-4.8.4)。デジタル標高モデルと呼ばれることもあり、一般にデジタル地形モデル (Digital Terrain Model) と同じ意味で使われている。

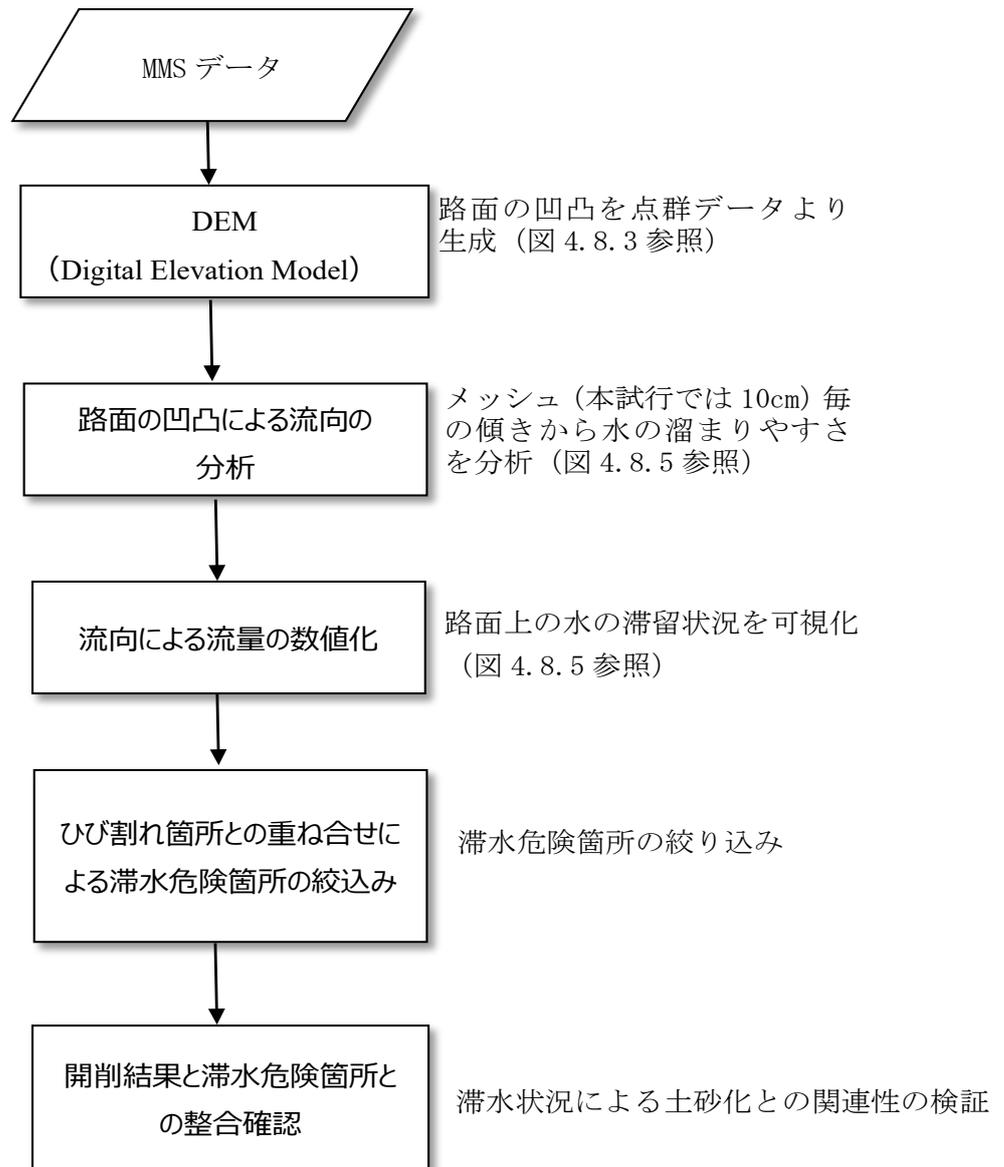
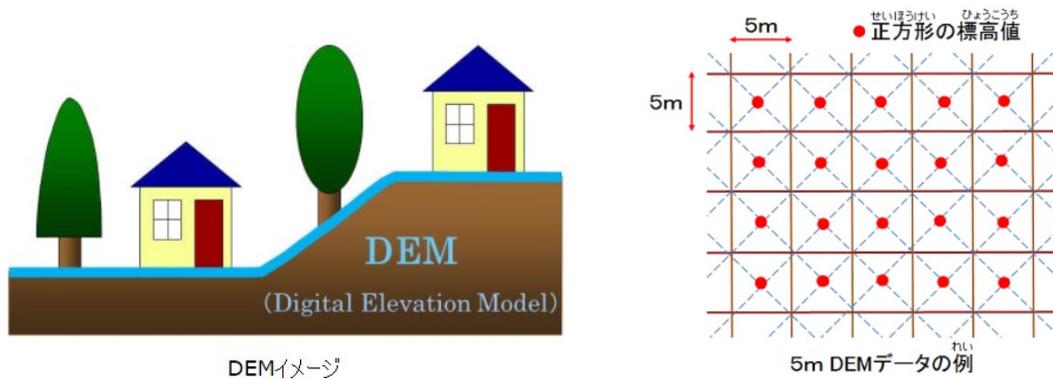


図-4.8.2 分析フロー



DEMイメージ
 図-4.8.3 DEMデータの概要 (出典：国土地理院 HP)

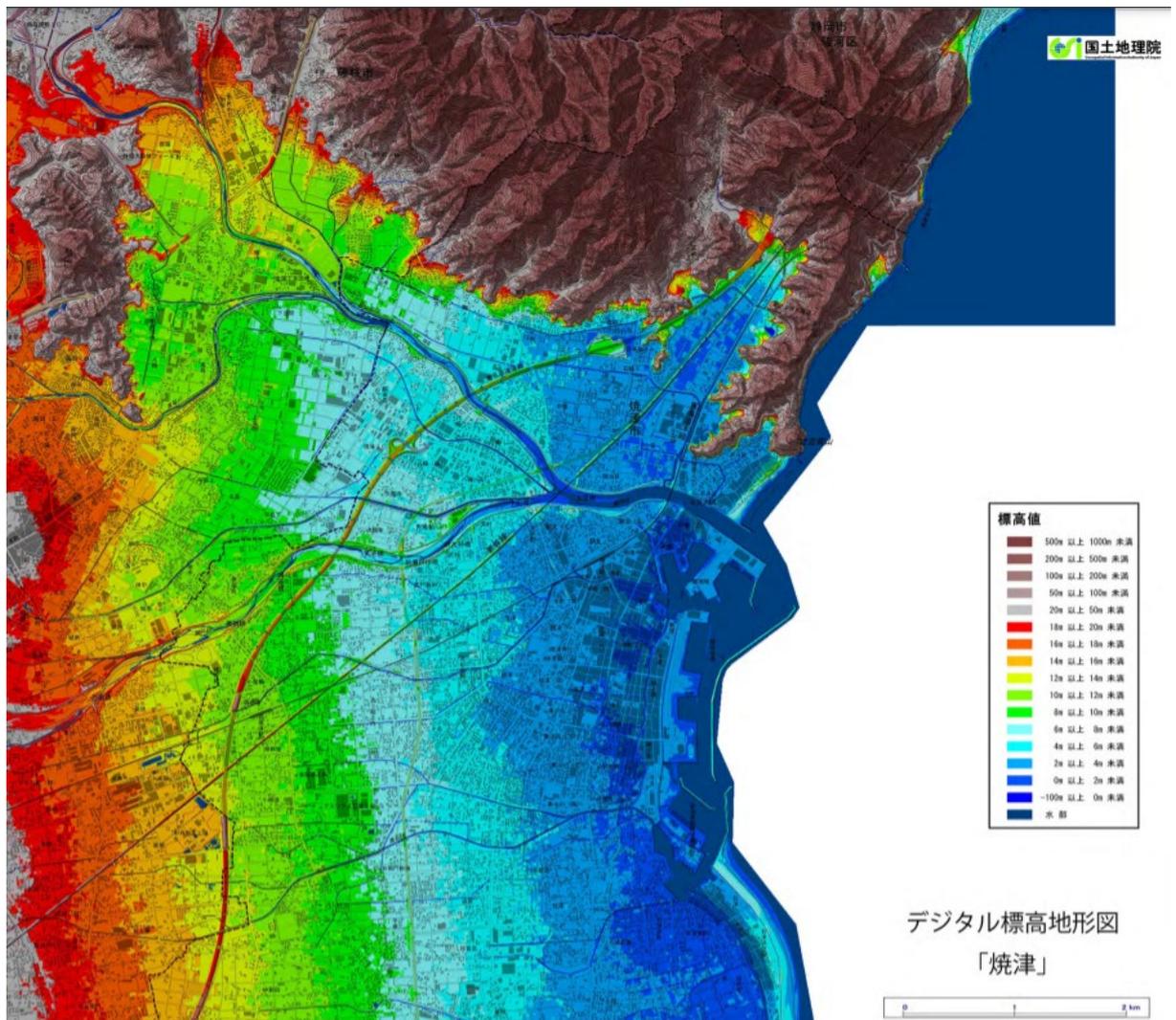


図-4.8.4 5mメッシュDEMによる地形表現イメージ¹³⁾

DEMの分析ツールは、GIS（地理情報システム）の機能の一部として搭載されていることが多い。DEMができれば、以下の処理は地理情報システム（GIS; ここではArcGIS 2を利用）の「累積流量ラスタ作成」機能¹⁴⁾によって行うことができる。この機能では、まず各メッシュの傾きを計算する。その傾きに従って水が流れるものと想定し、各メッシュに流れ込んでくる「メッシュの数」を計算する（図-4.8.5）。例えば、図-4.8.5左図はDEMから計算した各メッシュの傾斜方向を示している。この傾斜をもとにしてそれぞれのメッシュから水がどの方向に流れるかを求め、各メッシュに流入するメッシュの総数を算定し滞水箇所を推定する（図-4.8.5の右図）。このことからわかるように、この手法では路面の水の流れを動的にシミュレーションしているわけではない。またこの機能は、もともと流域の特定等に使用されるものであるが、本節では水が溜まりやすい箇所を特定する目的で利用している。

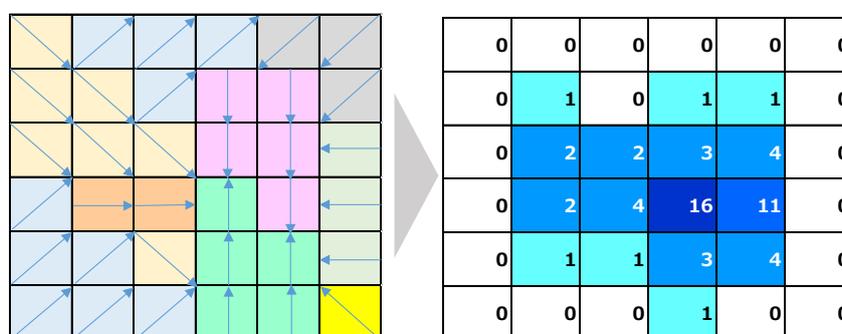


図-4.8.5 累積流量の算出イメージ

累積流量の算出の詳細は、以下のとおりである。水の流れのモデリング手法の一つに水文解析があり、水の流れや、地表の形状の変化が流れに及ぼす影響の把握などに活用されている。本節では、水が溜まりやすい箇所の特定のため、ArcGISの水文解析¹⁵⁾で算出が可能な累積流量を採用した。累積流量とは、流れが集中する箇所を示す指標であり、流路の特定などに使用されている。ここでは、デジタル標高モデル（DEM）にFlow Direction関数及びFlow Accumulation関数を適用し、累積流量を算出した。累積流量の算出方法を以下に示す。また、算出の流れを図-4.8.6に示す。

- 流向の算出（Flow Direction 関数）

対象のメッシュの水は、周囲にある8つのメッシュのうち、最も低い標高のメッシュに流れると仮定し、そのメッシュの方向を流向とする。

- 累積流量の算出（Flow Accumulation 関数）

流向が対象のメッシュに向いているメッシュの数を、次々に足し合わせていくことにより、各メッシュに流れ込むメッシュの数を算出し、当該メッシュの値とする。この値が大きいほど、流れが集中することになる。

- 滞水危険箇所の特定

最後に、ラインカメラで取得した高精細画像からひび割れ箇所を抽出し、滞水箇所と重ね合わせて水が浸み込みやすい滞水危険箇所を絞り込む。

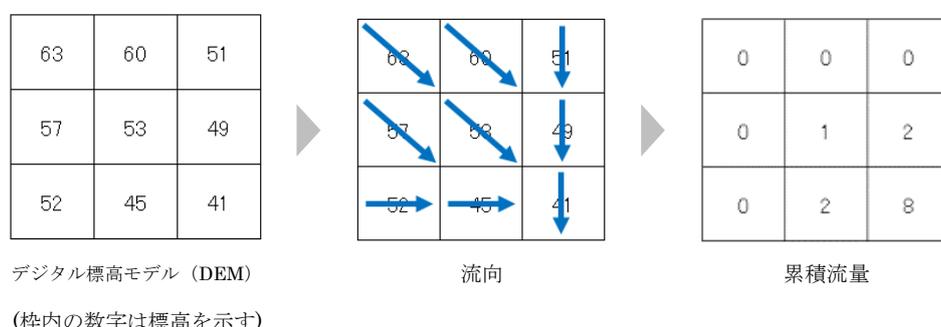


図-4.8.6 累積流量算出の流れ

4.8.4 計測結果

上記の分析手法を用いて、G 橋（下り線）にて実施した検証結果を以下に記す。図-4.8.7 は、MMS による点群計測結果と舗装開削調査範囲の位置関係を示したものである。黄色部分で舗装を開削し、床版の土砂化を 1 箇所を確認している。

図-4.8.8 では、反射強度オルソ（レーザースキャナから照射された点群の跳ね返りの強さの情報（反射強度）を用いて各点を正射投影した画像）上にラインカメラで判読したひび割れの箇所と長さを重畳した状況を示している。次に示した図-4.8.9 は反射強度オルソ上に累積流量を重畳したもので、この結果を用いてひび割れと累積流量の関係性を検証した。

図-4.8.9 の白丸箇所は、累積流量が最大となる紫色の箇所であり、水が浸水し易いことから土砂化が発生する可能性が高いことを示している。この紫色の箇所はかなり局部的であるが、床版の土砂化は水が浸水した箇所ピンポイントに生じるのではなく、そこを中心にある程度の範囲で生じると想定されるため、累積流量が紫色の箇所の概ね 1m 範囲を同一箇所として土砂化危険箇所とした。その結果、図-4.8.10 のように掘削範囲では土砂化危険箇所が 2 箇所（図中の①及び②）存在した。舗装開削後の床版の状態と比較した結果、図-4.8.11 のとおり①は実際に土砂化していることが確認された。一方、②では土砂化は確認されなかった。①が土砂化していた理由としては、累積流量が最大であることに加えて伸縮装置近傍であるため伸縮装置継目部からも水が浸入しやすかったこと、伸縮装置近傍であるため車両の通行荷重の影響を受けやすかったためと推察される。

この結果より、累積流量が最大であっても路面位置や車両の走行条件により床版の土砂化の生じやすさは異なることがわかる。

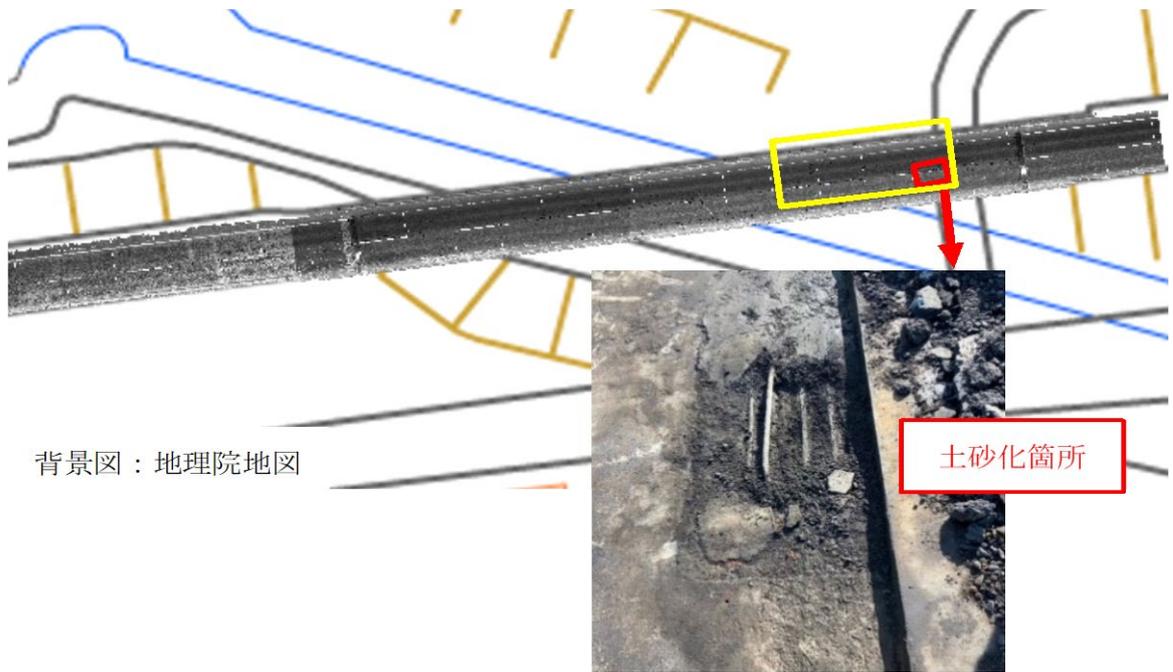


図-4.8.7 G橋での検証結果

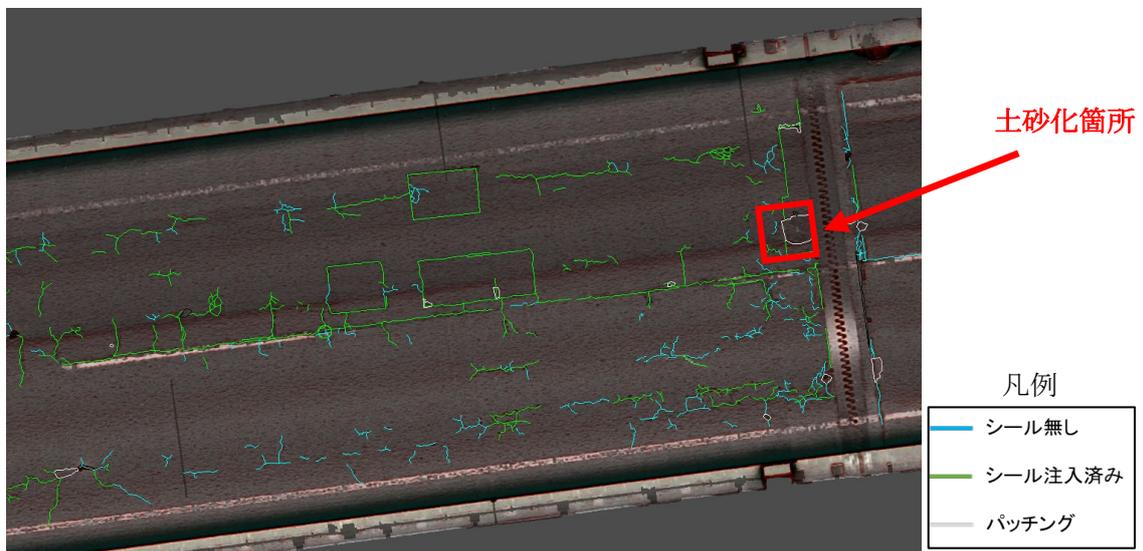


図-4.8.8 反射強度オルソ+ひび割れ

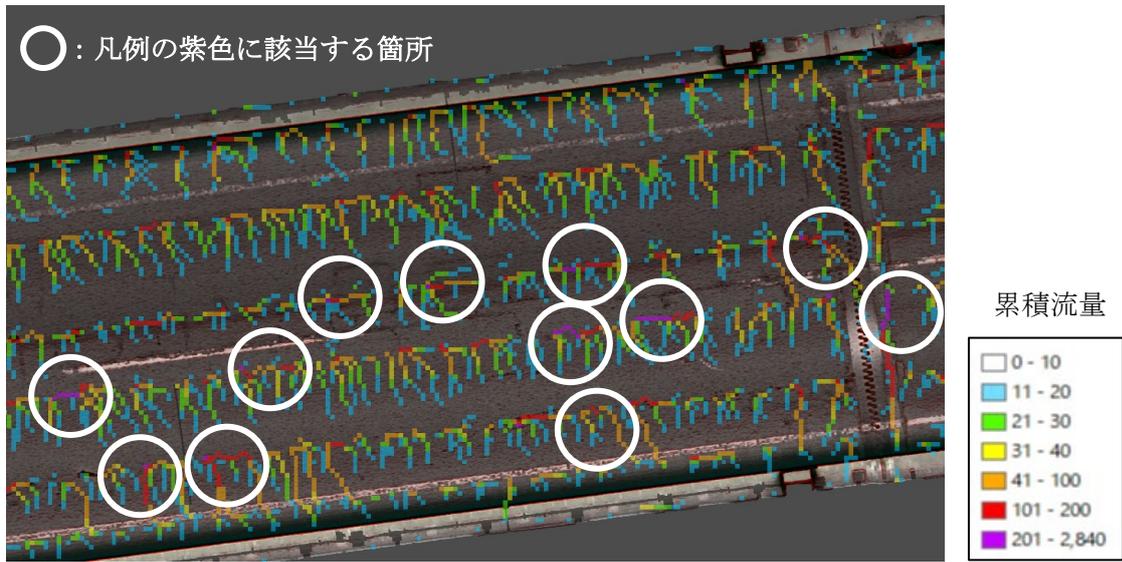


図-4.8.9 反射強度オルソ+累積流量

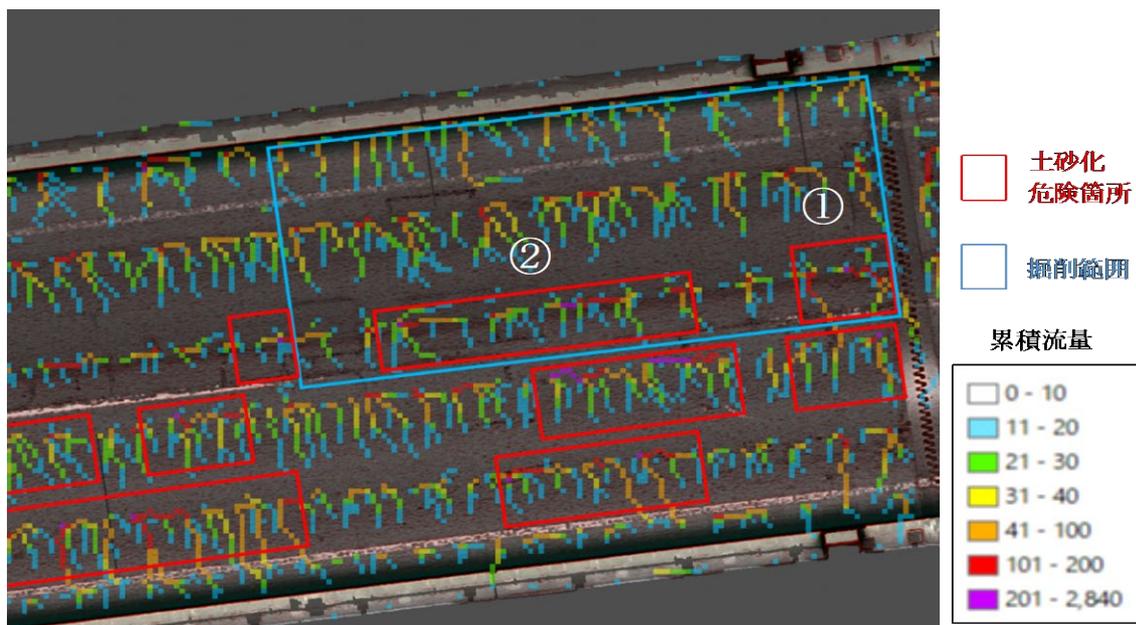


図-4.8.10 床版の土砂化危険箇所



図-4.8.11 床版の土砂化状況

4.8.5 まとめ

本節では、MMS を用いた計測によって取得される点群データから DEM を作成し、その結果を使って路面で水の滞水しやすい箇所を特定できることを示した。さらに、MMS 車両のラインカメラによって路面のひび割れデータを取得可能であることも示した。一方で、累積流量が最大であっても路面位置や車両の走行条件により土砂化の進行度合いが異なることを確認した。

4.9 小径微破壊内部検査

4.9.1 調査目的

4.4 の車載式電磁波レーダでグループ 1, 2, 3 と分類された範囲について、実際の床版内部の損傷状態やその傾向を確認するため、床版コンクリートの小径微破壊内部検査を実施した。

4.9.2 小径微破壊内部検査の概要

小径微破壊内部検査は、舗装上から床版に対し小径の削孔を行い、その孔に高性能小型内視鏡を挿入することによりコンクリート内部の損傷や水平ひび割れ等の状況を観察することができる内部調査手法である。通常床版の内部状況を確認する場合はコンクリートコア採取が一般的であるが、コア採取の場合比較的大きな孔径($\phi 50 \sim \phi 100$)が必要であるためコンクリート部材への影響が大きく、作業にも時間を要する。本手法では、ロングビットドリルミニ及び吸引装置付きろ過循環器を用いた $\phi 10.5$ の小径の削孔で調査可能なため、コンクリート部材への影響が小さく済み、1箇所当たりの作業時間も短い。使用した機器、特殊カラー樹脂の注入イメージ図及び調査フローをそれぞれ図4.9.1～図4.9.3に示す。

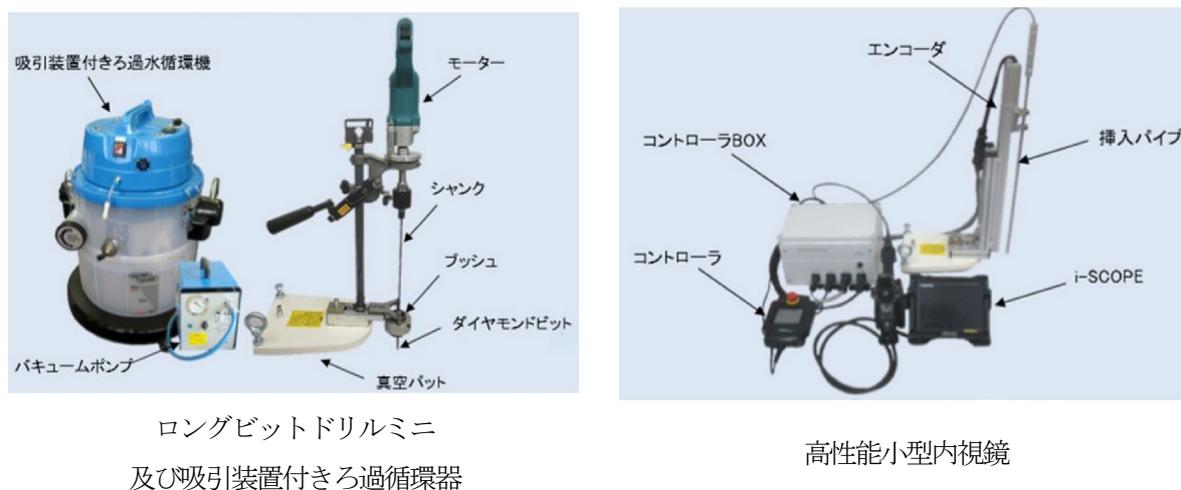


図4.9.1 小径微破壊コンクリート検査の使用機器

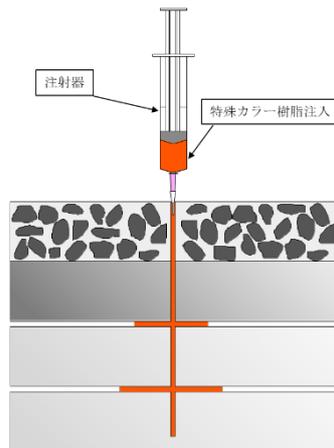


図4.9.2 特殊カラー樹脂注入イメージ図

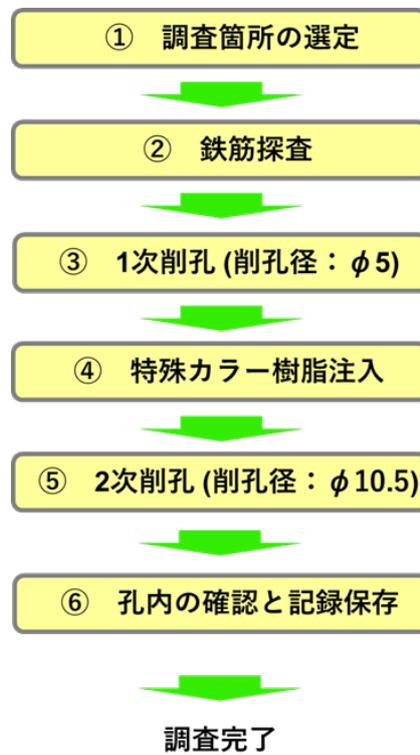


図4.9.3 小径微破壊検査の調査フロー

4.9.3 調査方法

小径微破壊内部検査の削孔位置は、4.4の解析結果、車線上の位置、及び路面状況を勘案して選定した。削孔箇所一覧を表4.9.1に、削孔位置図を図4.9.4に、削孔箇所写真を写真4.9.1～写真4.9.2に示す。削孔箇所一覧には、橋軸方向距離及び橋軸直角方向距離とともに、該当する車載式電磁波レーダによる分類グループを示している。また削孔位置図のうち、丸付き番号はそれぞれ削孔Noを示している。削孔NoにおいてNo.⑥及びNo.⑭がないのは、調査当日の調査時間の関係で調査できなかったためである。

表4.9.1 削孔箇所一覧

削孔No	A1伸縮装置中央からの 橋軸方向距離(m)	左側路肩地覆端部からの 橋軸直角方向距離(m)	車載式電磁波レーダによる 分類グループ
①	71.31	2.40	グループ2
②	49.52	3.98	グループ3
③	80.62	7.39	グループ1
④	26.88	4.96	グループ1
⑤	91.54	6.78	グループ1
⑦	12.42	7.51	グループ3
⑧	27.83	1.90	グループ3
⑨	6.32	4.01	グループ3
⑩	66.93	4.96	グループ1
⑪	0.50	5.26	グループ2
⑫	46.18	3.80	グループ2
⑬	60.25	3.90	グループ3
⑮	83.25	1.84	グループ3
⑯	84.98	4.20	グループ3
⑰	91.25	4.28	グループ1
⑱	14.92	4.50	グループ1
⑲	63.62	1.79	グループ3
⑳	42.73	3.80	グループ3

凡例	分類	推定要因
	グループ1	健全
	グループ2	錆剥離、浅い土砂化、水平クラック等の疑いあり
	グループ3	深い土砂化、床版上面の滞水等の疑いあり

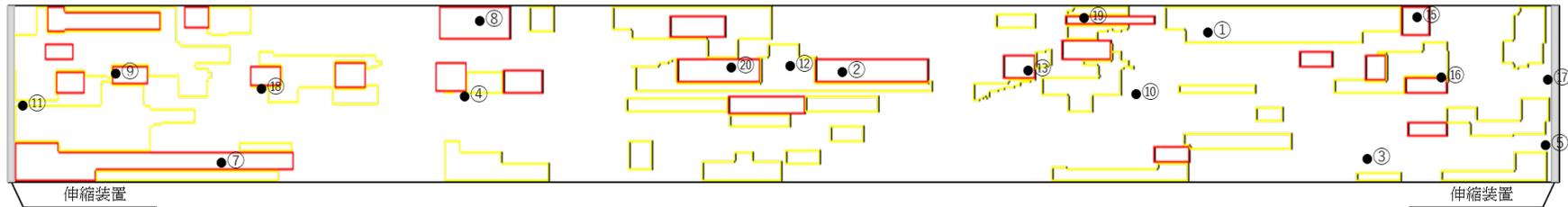


図-4.9.4 削孔位置図



No.①



No.②



No.③



No.④



No.⑤



No.⑦



No.⑧



No.⑨



No.⑩



No.⑪



No.⑫



No.⑬

写真4.9.1 削孔箇所写真①



No.15



No.16



No.17



No.18



No.19



No.20

写真4.9.2 削孔箇所写真②

4.9.4 削孔調査により取得できる情報

削孔調査により取得できる削孔内部の画像例を図4.9.5に示す。上から、床版上面から下面側へ撮影した削孔方向画像、舗装と床版の界面を横方向に撮影した側面画像、側面画像を柱状に加工した柱状画像となっている。各画像中でピンク色の部分が確認できるが、これはひび割れ箇所の確認を容易にするため削孔後に注入した特殊カラー樹脂である。柱状画像中の赤丸は、舗装と床版の界面を示している。ただし、柱状画像はある一方向の側面画像を柱状に加工したものであり、削孔内部の全周を表したものではない。したがって、柱状画像にて舗装と床版の界面の剥離が確認されても、異なる方向では舗装と床版が密着している場合もある。また、図4.9.5を見ると、No.③では削孔方向画像・側面画像とも舗装と床版の界面が剥離せず密着しているのが確認できる。一方 No.⑬では、舗装と床版の界面に全周にわたり剥離が生じている。しかし、側面画像を見ると床版面はモルタルと粗骨材が付着しており、砕けるまでは至っていない。これに対して No.⑨では、モルタルと粗骨材の付着がなくなり床版面が砕けた状態となっている。

舗装と床版の界面が No.③のような状態を健全、No.⑬のような状態を剥離、No.⑨のような状態を土砂化と定義し、各削孔箇所毎に車載式電磁波レーダによる分類グループと深さ方向の損傷状態を整理した。

<p>舗装-床版界面(削孔方向画像) (No.③)</p>	<p>舗装-床版界面(削孔方向画像) (No.⑬)</p>	<p>舗装-床版界面(削孔方向画像) (No.⑨)</p>
<p>舗装-床版界面(側面画像) (No.③)</p>	<p>舗装-床版界面(側面画像) (No.⑬)</p>	<p>舗装-床版界面(側面画像) (No.⑨)</p>
<p>柱状画像 (No.③)</p>	<p>柱状画像 (No.⑬)</p>	<p>柱状画像 (No.⑨)</p>

図-4.9.5 削孔内部の画像例

4.9.5 調査結果

車載式電磁波レーダによる分類グループ毎に削孔箇所の深さ方向の損傷状態を整理した結果を表4.9.2に、それぞれの床版内部の画像を図4.9.6～図4.9.11に示す。表4.9.2は、見やすさの観点から削孔No順ではなく、車載式電磁波レーダによる分類グループ順とした。深さ方向の損傷状態の欄は、舗装-床版界面以外は1行目に舗装面からの距離、2行目に損傷内容、3行目に損傷程度を記載した。また一番右の列に、路面画像及び柱状画像から判断した床版補修の有無も記載した。

まず車載式電磁波レーダによる分類グループでグループ1（健全）に分類された範囲に着目すると、全6箇所のうち、舗装-床版界面が健全状態であったのは3箇所（③⑩⑱）で、残り3箇所（④⑤⑰）は剥離状態であった。深さ方向の損傷状態を見ると、舗装-床版界面に1.0～1.6mmの剥離と床版内に複数の水平ひび割れが確認された。特にNo.⑤では、床版内部に全削孔箇所の中で最も多い4本の水平ひび割れが確認された。今回の削孔調査の範囲では、グループ1判定で土砂化状態となっている箇所は確認されなかった。

次に、グループ2（舗装剥離、浅い土砂化、水平クラック等の疑いあり）に分類された範囲に着目すると、全3箇所のうち舗装-床版界面が剥離又は土砂化状態であったのは2箇所（①⑪）であり、No.①の舗装-床版界面では2.7mmの剥離が確認された。No.⑫のみ舗装-床版界面が健全状態であり、ひび割れ本数もかなり深い箇所に1本のみであった。路面画像より路面に補修痕があること、柱状画像から床版上部側では粗骨材が確認できないことから、過去にポリマーセメントモルタル等の補修材で床版補修が実施された範囲であることが確認された。

グループ3（深い土砂化、床版上面の滞水等の疑いあり）に分類された範囲に着目すると、全9箇所のうち舗装-床版界面が土砂化状態なのが2箇所（②⑨）、剥離状態が5箇所（⑦⑧⑬⑮⑳）、健全状態が2箇所（⑯⑲）であった。剥離状態だった箇所の舗装-床版界面では2.0～5.7mmの剥離が確認され、床版内のひび割れ本数は最大で1本、ひび割れ幅は最大で3.1mmであった。No.⑮⑯については、No.⑫同様路面の補修痕及び柱状画像から床版上部側で粗骨材が確認できないことから、ポリマーセメントモルタル等の補修材で床版補修が実施された範囲であることが確認された。

以上を勘案して、本削孔調査結果の範囲において確認できた内容を以下に示す。

- (1) ポリマーセメントモルタル等の補修材での床版補修が確認された3箇所（⑫⑮⑯）のうち2箇所（⑫⑯）では、舗装-床版界面が密着している健全状態でもグループ2又は3に分類されていた。電磁波は媒体の比誘電率によって反射強度が変化する性質を持つことから、補修材で補修された範囲は周りのコンクリートと比較して反射強度が変化したため、グループ2又は3に分類された可能性がある。
- (2) 舗装-床版界面が土砂化状態に至っている場合（②⑨⑪）は少なくともグループ2以上と判定されており、グループ1と判定された範囲で舗装-床版界面が土砂化状態の箇所はなかった。舗装-床版界面の状態が著しく損傷している場合は、少なくともグループ2以上と判定される傾向が確認された。
- (3) グループ1と判定された箇所のうち半数（④⑤⑰）で舗装-床版界面が剥離状態の箇所がされた。グループ2又は3判定の箇所では、舗装-床版界面の剥離の幅が2.0～5.7mmであったのに対し、グループ1判定の箇所での剥離の幅は1.0～1.6mmであった。剥離の幅が小さい場合は、正しく剥離と判定され

ない可能性がある。

- (4) 床版内部の深さ方向の損傷状態に着目すると、今回の削孔箇所範囲では1～4本のひび割れが確認された。このうち、最も多くの4本のひび割れが確認されたのはグループ1に分類された箇所(⑤)であり、グループ3に分類された削孔箇所を確認されたひび割れは最大でも2本(②)であった。以上より、グループ分類と床版内のひび割れ本数には関連性は確認できなかった。

以上のおり、本削孔調査結果の範囲において確認できた内容について記したが、これは床版面に対して非常に狭い範囲である削孔箇所の状況から確認した結果であり、削孔箇所における床版内部の状態が削孔箇所周辺の床版内部の状態を適切に表しているとは限らないことに留意する必要がある。本調査方法にて床版内部の損傷状態を確実に把握しようとする場合は、近接して面的に複数削孔する等平面的な調査を実施する必要がある。

表4.9.2 車載式電磁波レーダによる分類グループと削孔箇所の深さ方向の損傷状態

削孔 No	車載式電磁波レーダ による分類グループ	深さ方向の損傷状態 1行目：舗装面からの距離 2行目：損傷内容 3行目：損傷程度					床版補修 有無
		舗装-床版 界面	1箇所目	2箇所目	3箇所目	4箇所目	
③	グループ1	健全	—	—	—	—	無
④	グループ1	剥離 1.0mm	—	—	—	—	無
⑤	グループ1	剥離 1.6mm	67mm ひび割れ 0.1mm	87mm ひび割れ 0.1mm	101mm ひび割れ 1.91mm	119mm ひび割れ 0.16mm	無
⑩	グループ1	健全					無
⑰	グループ1	剥離 1.0mm	81mm ひび割れ 0.08mm	110mm ひび割れ 0.8mm	—	—	無
⑱	グループ1	健全			—	—	無
①	グループ2	剥離 2.7mm	110mm ひび割れ 2.9mm	—	—	—	無
⑪	グループ2	土砂化	110mm ひび割れ 2.2mm	—	—	—	無
⑫	グループ2	健全	146mm ひび割れ 3.8mm	—	—	—	有
②	グループ3	土砂化	69mm ひび割れ 1.4mm	100mm ひび割れ 0.07mm	—	—	無
⑦	グループ3	剥離 5.7mm	68mm ひび割れ 0.6mm	—	—	—	無
⑧	グループ3	剥離 2.21mm	96mm ひび割れ 1.3mm	—	—	—	無
⑨	グループ3	土砂化	—	—	—	—	無
⑬	グループ3	剥離 2.0mm	—	—	—	—	無
⑮	グループ3	剥離 3.0mm	123mm ひび割れ 3.1mm	—	—	—	有
⑯	グループ3	健全	—	—	—	—	有
⑲	グループ3	健全	—	—	—	—	無
⑳	グループ3	剥離 2.0mm	—	—	—	—	無

<p>舗装-床版界面 (削孔方向画像) (No.①)</p>	<p>舗装-床版界面 (削孔方向画像) (No.②)</p>	<p>舗装-床版界面 (削孔方向画像) (No.③)</p>
<p>舗装-床版界面 (側面画像) (No.①)</p>	<p>舗装-床版界面 (側面画像) (No.②)</p>	<p>舗装-床版界面 (側面画像) (No.③)</p>
<p>柱状画像 (No.①)</p>	<p>柱状画像 (No.②)</p>	<p>柱状画像 (No.③)</p>

図4.9.6 削孔後の床版内部画像 (No.①～No.③)

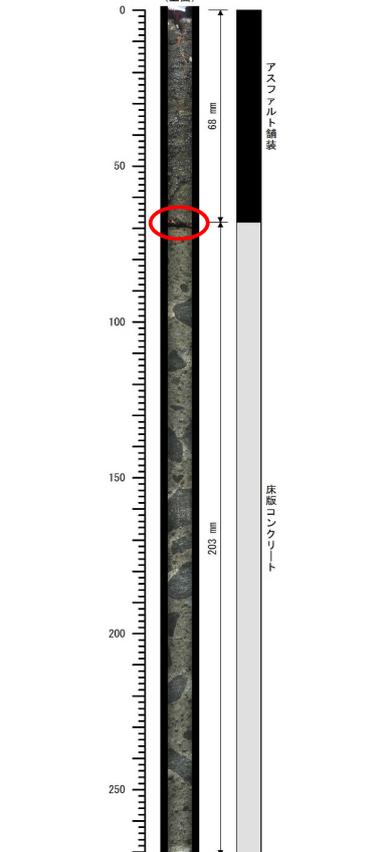
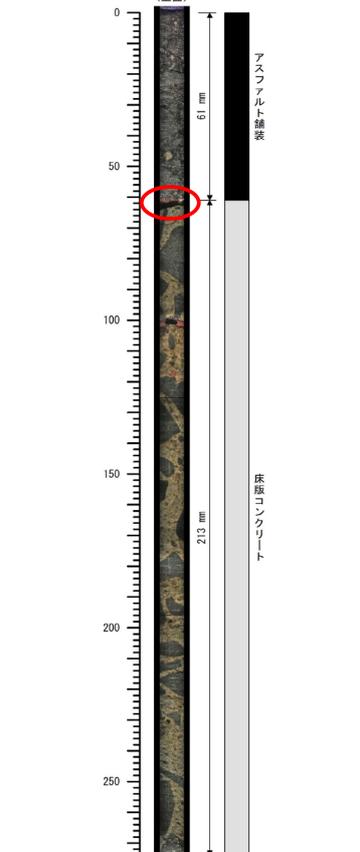
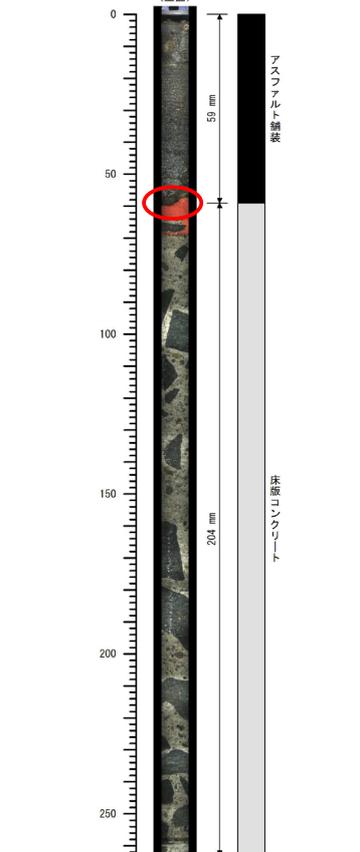
		
<p>舗装-床版界面 (削孔方向画像) (No.④)</p>	<p>舗装-床版界面 (削孔方向画像) (No.⑤)</p>	<p>舗装-床版界面 (削孔方向画像) (No.⑦)</p>
		
<p>舗装-床版界面 (側面画像) (No.④)</p>	<p>舗装-床版界面 (側面画像) (No.⑤)</p>	<p>舗装-床版界面 (側面画像) (No.⑦)</p>
		
<p>柱状画像 (No.④)</p>	<p>柱状画像 (No.⑤)</p>	<p>柱状画像 (No.⑦)</p>

図-4.9.7 削孔後の床版内部画像 (No.④～No.⑦)

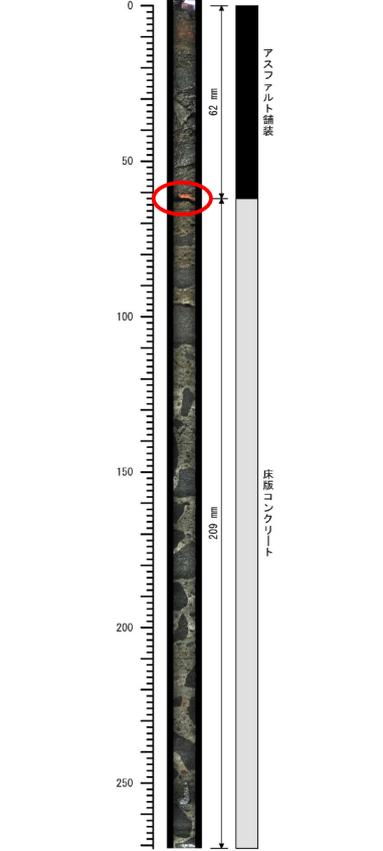
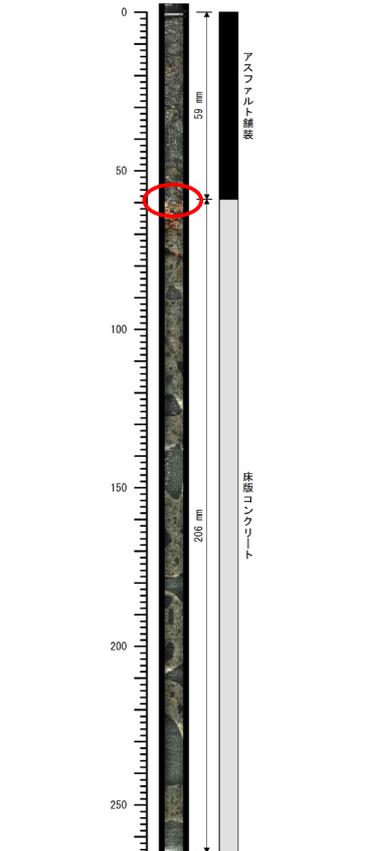
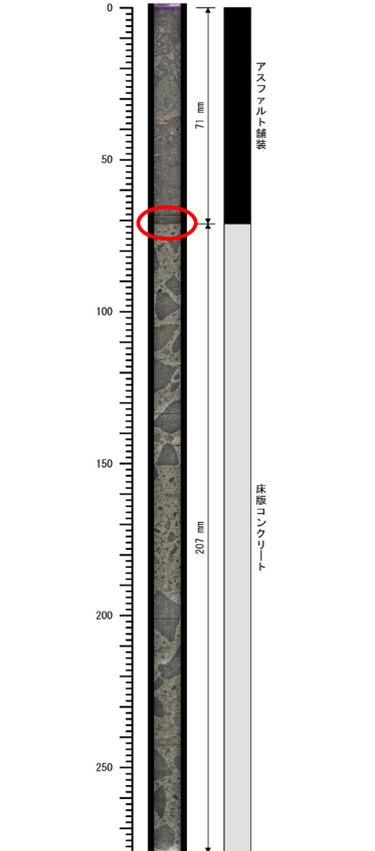
		
<p>舗装-床版界面 (削孔方向画像) (No.⑧)</p>	<p>舗装-床版界面 (削孔方向画像) (No.⑨)</p>	<p>舗装-床版界面 (削孔方向画像) (No.⑩)</p>
		
<p>舗装-床版界面 (側面画像) (No.⑧)</p>	<p>舗装-床版界面 (側面画像) (No.⑨)</p>	<p>舗装-床版界面 (側面画像) (No.⑩)</p>
		
<p>柱状画像 (No.⑧)</p>	<p>柱状画像 (No.⑨)</p>	<p>柱状画像 (No.⑩)</p>

図4.9.8 削孔後の床版内部画像 (No.⑧~No.⑩)

<p>舗装-床版界面 (削孔方向画像) (No.⑪)</p>	<p>舗装-床版界面 (削孔方向画像) (No.⑫)</p>	<p>舗装-床版界面 (削孔方向画像) (No.⑬)</p>
<p>舗装-床版界面 (側面画像) (No.⑪)</p>	<p>舗装-床版界面 (側面画像) (No.⑫)</p>	<p>舗装-床版界面 (側面画像) (No.⑬)</p>
<p>柱状画像 (No.⑪)</p>	<p>柱状画像 (No.⑫)</p>	<p>柱状画像 (No.⑬)</p>

図-4.9.9 削孔後の床版内部画像 (No.⑪～No.⑬)

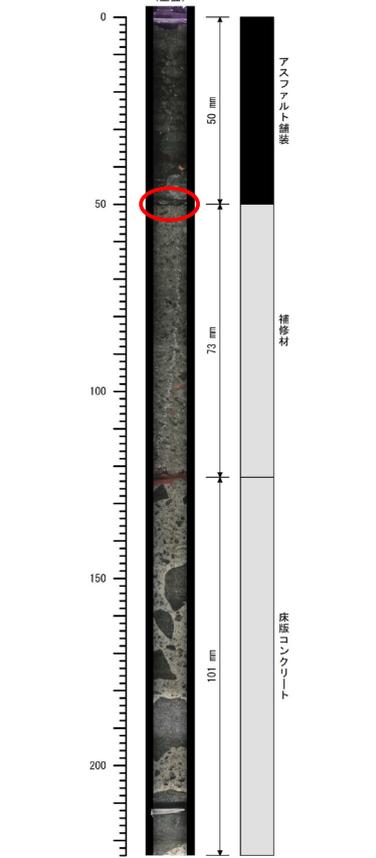
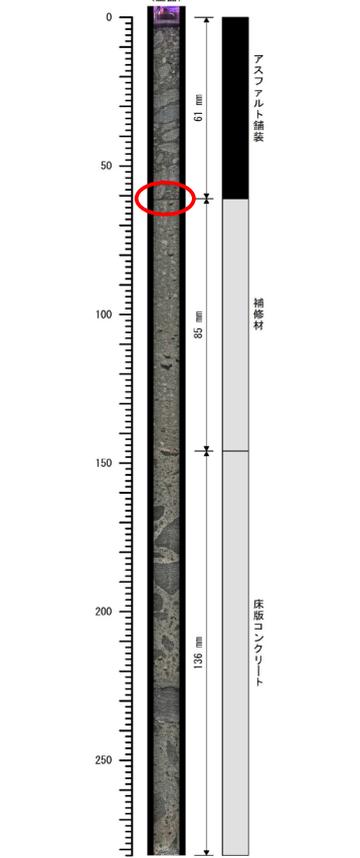
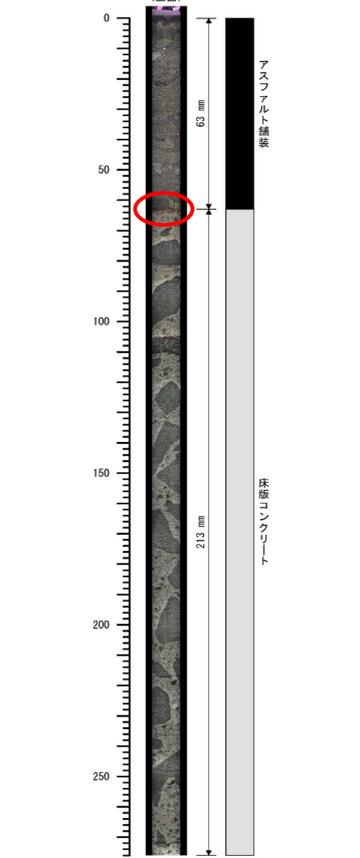
		
<p>舗装-床版界面 (削孔方向画像) (No.15)</p>	<p>舗装-床版界面 (削孔方向画像) (No.16)</p>	<p>舗装-床版界面 (削孔方向画像) (No.17)</p>
		
<p>舗装-床版界面 (側面画像) (No.15)</p>	<p>舗装-床版界面 (側面画像) (No.16)</p>	<p>舗装-床版界面 (側面画像) (No.17)</p>
		
<p>柱状画像 (No.15)</p>	<p>柱状画像 (No.16)</p>	<p>柱状画像 (No.17)</p>

図-4.9.10 削孔後の床版内部画像 (No.15~No.17)

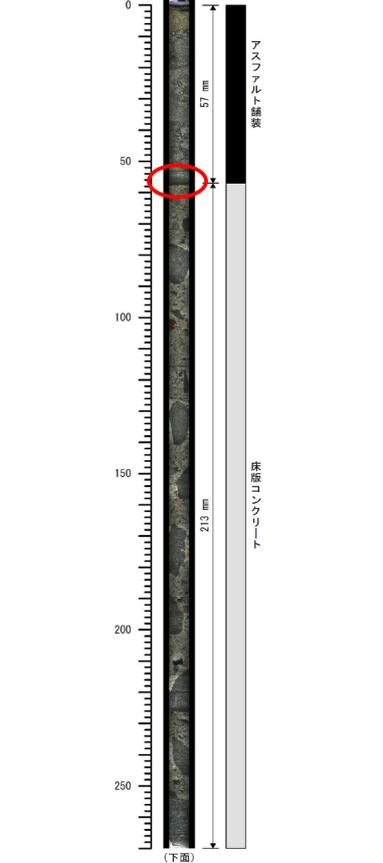
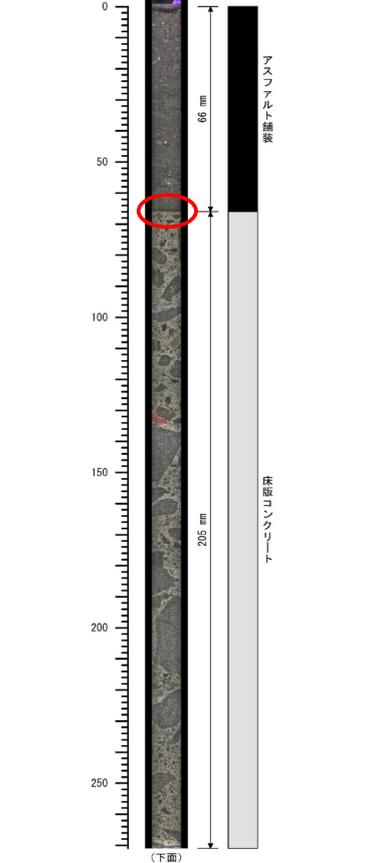
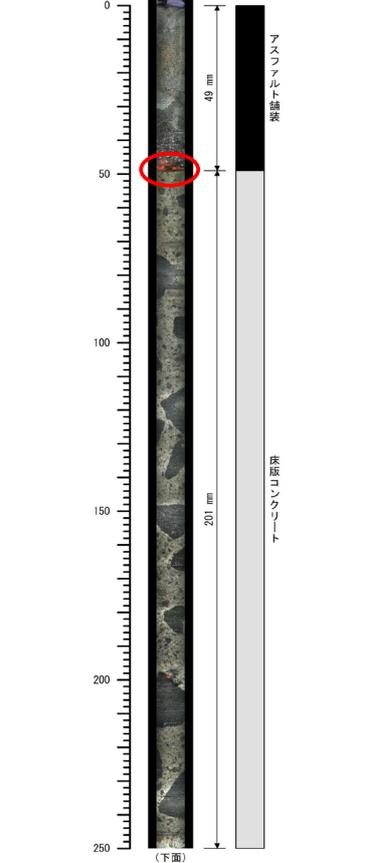
		
<p>舗装-床版界面 (削孔方向画像) (No.18)</p>	<p>舗装-床版界面 (削孔方向画像) (No.19)</p>	<p>舗装-床版界面 (削孔方向画像) (No.20)</p>
		
<p>舗装-床版界面 (側面画像) (No.18)</p>	<p>舗装-床版界面 (側面画像) (No.19)</p>	<p>舗装-床版界面 (側面画像) (No.20)</p>
		
<p>柱状画像 (No.18)</p>	<p>柱状画像 (No.19)</p>	<p>柱状画像 (No.20)</p>

図-4.9.11 削孔後の床版内部画像 (No.18~No.20)

4.9.6 まとめ

本節では、4.4の車載式電磁波レーダでグループ1, 2, 3と分類された範囲について、実際の床版内部の損傷状態やその傾向を確認するため、床版コンクリートの小径微破壊内部検査を実施した。本調査の範囲内において得られた知見を以下に示す。なお、本知見は床版面に対して非常に狭い範囲である削孔箇所から確認した結果であり、削孔箇所の床版内部の状態が削孔箇所周辺の床版内部の状態を適切に表しているとは限らないことに留意する。

- (1) ポリマーセメントモルタル等の補修材での床版補修が確認された3箇所のうち2箇所では、舗装床版界面が密着している健全状態でも、車載式電磁波レーダによる計測データの解析結果でグループ2（舗装剥離、浅い土砂化、水平クラック等の疑いあり）又はグループ3（深い土砂化、床版上面の滞水等の疑いあり）に分類されていた。電磁波は媒体の比誘電率によって反射強度が変化する性質を持つことから、補修材で補修された範囲は周りのコンクリートと比較して反射強度が変化したため、グループ2又は3に分類された可能性がある。
- (2) 車載式電磁波レーダによる計測データの解析結果でグループ1（健全）と判定された範囲で舗装床版界面が土砂化状態の箇所はなく、舗装床版界面の状態が著しく悪い場合は、少なくともグループ2以上と判定される傾向が確認された。
- (3) 車載式電磁波レーダによる計測データの解析結果でグループ1（健全）に分類された箇所のうち半数で舗装床版界面が剥離状態の箇所がされた。グループ2又は3判定の箇所では、舗装床版界面の剥離の幅が2.0～5.7mmであったのに対し、グループ1判定の箇所での剥離の幅は1.0～1.6mmであり、剥離の幅が小さい場合は正しく剥離と判定されない可能性がある。
- (4) 車載式電磁波レーダによる計測データの解析結果のグループ分類と床版内のひび割れ本数には関連性は確認できなかった。

4.10 まとめ

本章では、滞水・床版劣化検知手法としての各非破壊検査技術の適用性の検証を目的に、G橋（下り線）において、各種非破壊検査技術による調査を行った。以下に得られた知見を示す。

【車載式電磁波レーダによる調査】

- ・ 今回舗装開削した範囲では、電磁波レーダの解析結果（グループ分類）と実際の床版状態が合致している範囲も乖離している範囲もあり、劣化箇所を高精度で検知できているとまでは言えなかった。
- ・ 滞水検知については、レーダ計測日から舗装開削日までの降雪の影響により、検証することができなかった。検証のためには、水分計の測定とレーダ計測をいかに同じ条件で実施するかが課題である。

【カート式電磁波レーダ（高周波型）による調査】

- ・ 「土砂化」箇所は、平面コンター図で反射強度が強いことを示す濃い色が確認でき、縦断スライス図では大きな乱れが確認できることから、「土砂化」箇所を推定することは可能である。
- ・ 「床版補修痕」箇所は、平面コンター図で人工的な矩形の輪郭が確認でき、縦断スライス図では鉄筋が鮮明に確認できることから、「床版補修痕」箇所を推定することは可能である。
- ・ 「表面劣化」「ひび割れ」「うき」箇所は、平面コンター図で色が濃い範囲と重なっており、縦断スライス図では小さな乱れが確認できたものの明確ではなかった。
- ・ 「滞水」箇所は、平面コンター図で反射強度が強いことを示す濃い色が確認でき、その位置は床版上面の水分量調査による水分量の多い範囲と概ね一致していた。
- ・ 床版の水分量の多い範囲は、上面と下面とでは必ずしも同じ位置ではない。これは上面から下面に向かって水分が浸透する経路が真下でないことを示しており、例えばコンクリートの空隙の多い経路を浸透するなどの理由が考えられる。

【カート式電磁波レーダ（中周波型）による調査】

- ・ 波長の長い中周波帯域では床版上面と上部鉄筋からの反射波が重なり合うが、反射強度の大きい上部鉄筋からの反射波に着目し平面コンター図で分析することで、異常振幅域や反射パターンの消失域として異常域を特定できる。
- ・ 床版内部が滞水すると、電磁波の伝播速度が低下し、鉄筋や床版下面からの反射波の走時が遅れる。特に、床版下面からの反射波は、伝播経路が長いいため、遅延時間が大きく、滞水区間を明瞭に識別することができる。また、滞水区間では散乱や減衰により反射波の振幅も低下する。
- ・ 電磁波の平均伝播速度から推定した床版下面の含水率は、床版下面で床版水分計にて測定した含水に関する測定値（D値）と同様な分布であることを確認した。
- ・ 平面コンター図において、上部鉄筋の反射パターンが失われている多くの領域では、舗装路面に亀裂が存在しており整合していた。

【ハンディ式電磁波レーダによる調査】

- ・ 床版上面の滞水は、平面コンター図における濃淡のムラの有無だけでは床版上面の滞水の確実な検知はできないものの、加えて縦断スライス図で鉄筋からの反射が不明瞭であることを確認することで検知可能である。
- ・ 床版補修痕は、平面コンター図において濃淡のムラが生じていること、及び縦断スライス図において床版上面位置の反射が途切れて映ることを確認することで検知可能である。
- ・ 床版面の表面劣化・浮き・ひび割れは、平面コンター図・縦断スライス図ともに、他の範囲と比較しても明確な違いは確認できないことから、ハンディ式電磁波レーダによる点検では検知困難である。

【MMS（Mobile Mapping System）を用いた床版上面の滞水箇所特定手法】

- ・ MMS（Mobile Mapping System）を用いた計測で取得される点群データから数値標高モデル（DEM）を作成し、その結果を使って路面で水の滞水しやすい箇所を特定できることを示した。さらに、MMS 車両のラインカメラによって路面のひび割れデータを取得可能であることも示した。
- ・ 累積流量が最大であっても、路面位置や車両の走行条件により床版の土砂化の進行度合いが異なることを確認した。

【小径微破壊内部検査】

- ・ 小径微破壊内部検査による床版内部確認の結果、床版補修痕では舗装-床版界面が密着している健全状態でも、車載式電磁波レーダによる計測データの解析結果でグループ2（舗装剥離、浅い土砂化、水平クラック等の疑いあり）又はグループ3（深い土砂化、床版上面の滞水等の疑いあり）に分類される箇所があることを確認した。補修材と周辺コンクリートとの比誘電率の違いにより反射強度が変化し、グループ2又は3に分類された可能性がある。
- ・ 小径微破壊内部検査による床版内部確認の結果、車載式電磁波レーダによる計測データの解析結果でグループ1（健全）と判定された範囲で舗装-床版界面が土砂化状態の箇所はなく、舗装-床版界面の状態が著しく悪い場合は、少なくともグループ2以上と判定される傾向が確認された。
- ・ 小径微破壊内部検査による床版内部確認の結果、舗装-床版界面の剥離の幅が小さい場合は正しく剥離と判定されない可能性が示唆された。
- ・ 小径微破壊内部検査による床版内部確認の結果、車載式電磁波レーダによる計測データの解析結果のグループ分類と床版内のひび割れ本数には関連性は確認されなかった。

第4章 参考文献

- 1) グーグルストリートビュー, 平成29年9月撮影
https://www.google.co.jp/maps/@38.2597182,140.8216698,3a,75y,89.06h,68.34t/data=!3m7!1e1!3m5!1s8sR8cv47RMaHUYcpo_UI_g!2e0!5s20170901T000000!7i13312!8i6656?hl=ja(令和4年6月閲覧)
- 2) グーグルストリートビュー, 令和2年10月撮影
<https://www.google.co.jp/maps/@38.2597443,140.8219303,3a,75y,263.16h,71.49t/data=!3m7!1e1!3m5!1sLh8S11KwRRYNeHXLGzL8Qw!2e0!5sR21001T000000!7i16384!8i8192?hl=ja>(令和4年6月閲覧)
- 3) グーグルストリートビュー, 平成29年9月撮影
https://www.google.co.jp/maps/@38.2597182,140.8216698,3a,75y,266.86h,95.61t/data=!3m7!1e1!3m5!1s8sR8cv47RMaHUYcpo_UI_g!2e0!5s20170901T000000!7i13312!8i6656?hl=ja(令和4年6月閲覧)
- 4) グーグルストリートビュー, 令和2年10月撮影
<https://www.google.co.jp/maps/@38.2597173,140.8216742,3a,64.2y,268h,98.8t/data=!3m7!1e1!3m5!1sE3JPV8SK3lu9ojKGQwmiXg!2e0!5sR21001T000000!7i16384!8i8192?hl=ja>(令和4年6月閲覧)
- 5) グーグルストリートビュー, 平成29年9月撮影
<https://www.google.co.jp/maps/@38.2596276,140.8207798,3a,75y,76.13h,86.31t/data=!3m7!1e1!3m5!1sO6zTHZkmP8t-Yhh37-EtkQ!2e0!5s20170901T000000!7i13312!8i6656?hl=ja>(令和4年6月閲覧)
- 6) グーグルストリートビュー, 令和2年10月撮影
<https://www.google.co.jp/maps/@38.2596647,140.8211528,3a,63.9y,259.05h,95.18t/data=!3m7!1e1!3m5!1sJLhRkTvUFB9tmf5raZbqSg!2e0!5sR21001T000000!7i13312!8i6656?hl=ja>(令和4年6月閲覧)
- 7) 谷倉泉, 榎園正義, 後藤昭彦: 床版防水工における水分計の適用性に関する研究, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.1112-1123, 2013
- 8) 田中良樹, 村越潤: 橋面アスファルト舗装の変状とRC床版の疲労, 土木技術資料, 53-2, pp.22~27, 2011
- 9) 田中良樹, 村越潤, 吉田英二: 撤去された鉄筋コンクリート床版の水張り試験, 第8回道路橋床版シンポジウム論文報告集, 土木学会, pp.145~148, 2014
- 10) Topp, G.C., Davis, J.L., and Annan, A.P.: Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines, *Water Resources Research*, 16(3), pp.574-582, 1980
- 11) 野田翼, 松本直士, 石田雅博: 電磁波レーダによるRC床版の滞水の検出, 土木技術資料, Vol.62, No.4, pp.18-21, 2020
- 12) 藤木裕二, 岩谷祐太, 夏堀格, 石田雅博: 電磁波レーダを用いたRC床版上面の滞水検知手法, 橋梁と基礎, Vol.56, No.8, pp.37-40, 2022

- 13) 国土交通省国土地理院, “デジタル標高地形図で見る東海地方の凸凹 (DEM 版)”, 国土交通省国土地理院, 令和 4 年 7 月 8 日, <https://www.gsi.go.jp/chubu/cb-demmap.html>(令和 4 年 7 月閲覧)
- 14) Esri) ArcGIS Pro 水門解析ツールセット: 累積流量ラスタの作成の詳細
<https://pro.arcgis.com/ja/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-accumulation-works.htm>
- 15) Esri) ArcGIS Desktop 水文解析ツールセットの概要
<https://desktop.arcgis.com/ja/arcmap/10.4/tools/spatial-analyst-toolbox/an-overview-of-the-hydrology-tools.htm>

第5章 模型供試体を用いた非破壊検査技術の適用性の検証

本章では、舗装と床版上面の界面の滞水や劣化を模擬した模型供試体を用いて行った、床版上面の滞水・劣化検知手法としての非破壊検査技術の適用性の検証結果を記した。

5.1 模型供試体の概要

5.1.1 供試体諸元

非破壊検査技術を用いて道路橋コンクリート床版上面に生じた滞水や劣化の検知精度を検証することを目的として、舗装と床版上面の境界部に生じた滞水を模擬した供試体と、撤去床版を活用した床版上面の劣化（土砂化を想定）を模擬した供試体の2種類を製作した。各供試体の詳細な内容について以下に示す。

(1) 滞水を模擬した供試体

図-5.1.1 に舗装と床版上面の境界部に生じた滞水を模擬した供試体の概要図、写真-5.1.1 に模型供試体の外観、図-5.1.2 に配筋図を示す。供試体は滞水が生じていない健全部として No.1、舗装ひび割れを模擬し浸入した水分の広がりを確認することを目的とした No.2、防水層にシート系の材料を使用し舗装と床版の境界部に滞水を模擬することのできる仕掛けを設置した No.3、防水層に塗膜系の材料を使用し滞水を模擬する仕掛けは No.3 と同様な No.4 の計4体を製作した。滞水部の有無以外で非破壊検査技術の性能を確認することを目的として、4体の供試体すべてでかぶり厚が異なる箇所を設け、No.3 と No.4 については防水層プライマーを塗布していない箇所を設けている。

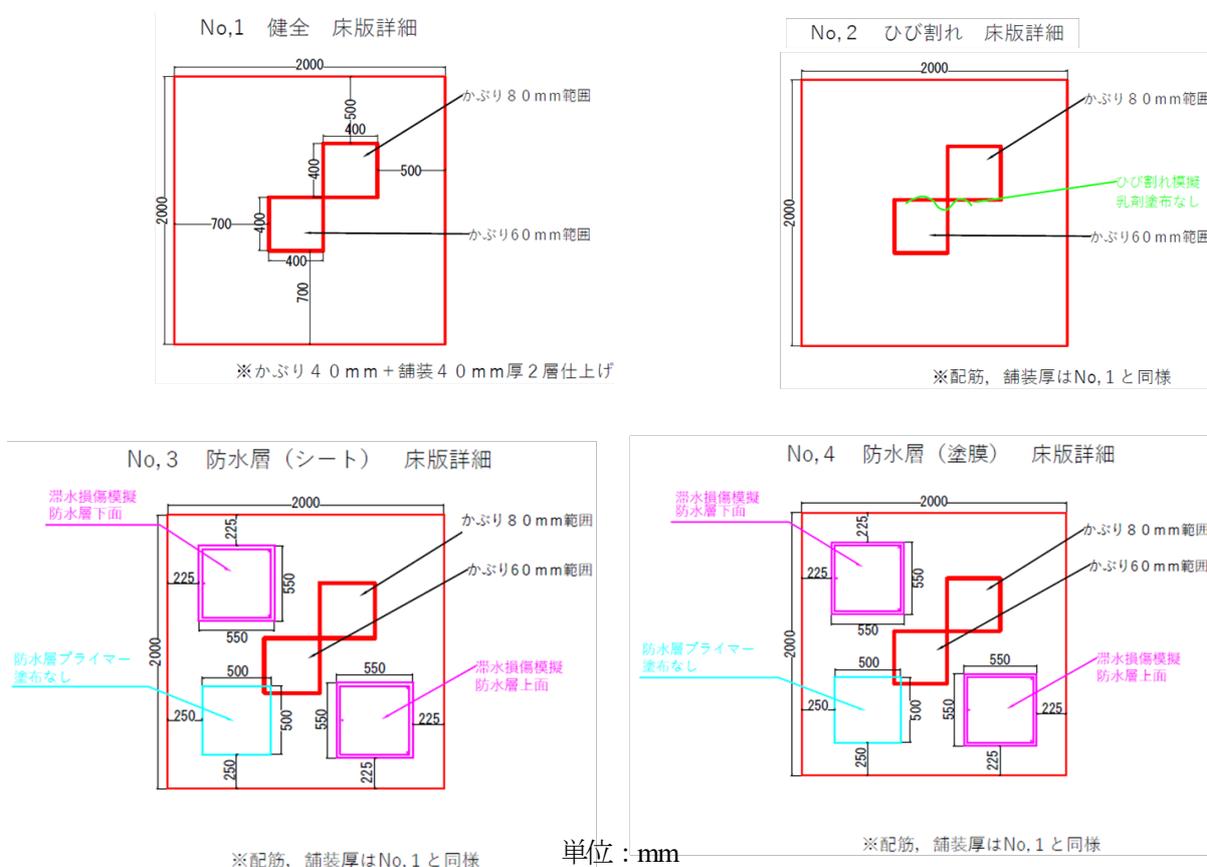


図-5.1.1 滞水を模擬した供試体の概要図

図-5.1.3 に滞水を模擬するための仕掛けの詳細図と写真，写真-5.1.2(a)にフェルトシートを設置状況，(b)に注水孔と排水孔の下面の状況を示す。厚さ5mmのゴム材で500mm四方の囲いを作り，滞水状態を保持することを目的にフェルトシートを設置した。水の出し入れは囲いの中に設置した注水孔からホースを介して行い，フェルトシートに吸水されなかった水は排水孔から排水できる仕様とした。この滞水を模擬するための仕掛けは，舗装と防水層の境界部に滞水をするケースと，防水層と床版上面の境界部に滞水をするケースの2ケースを模擬できるようにした。

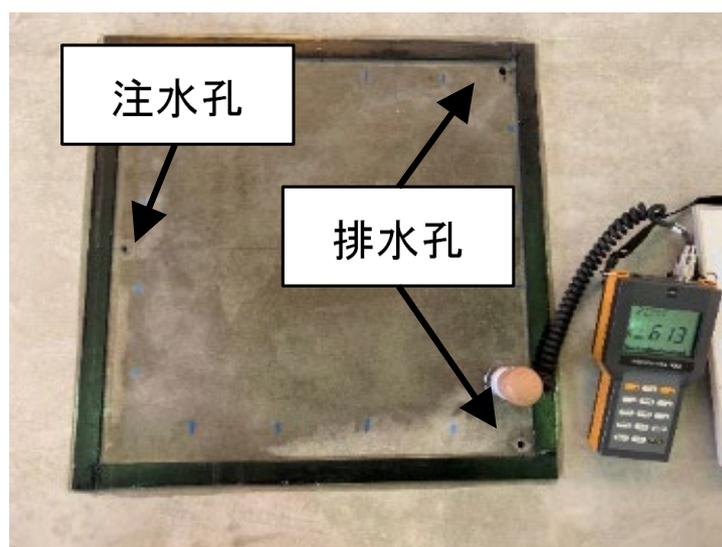
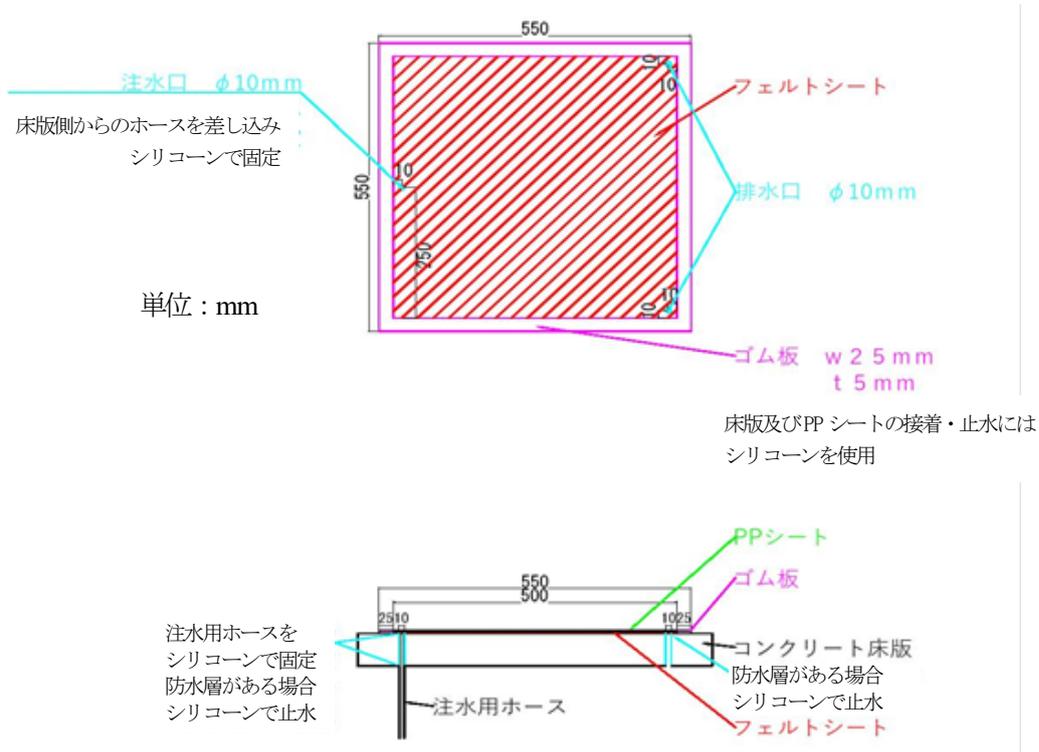
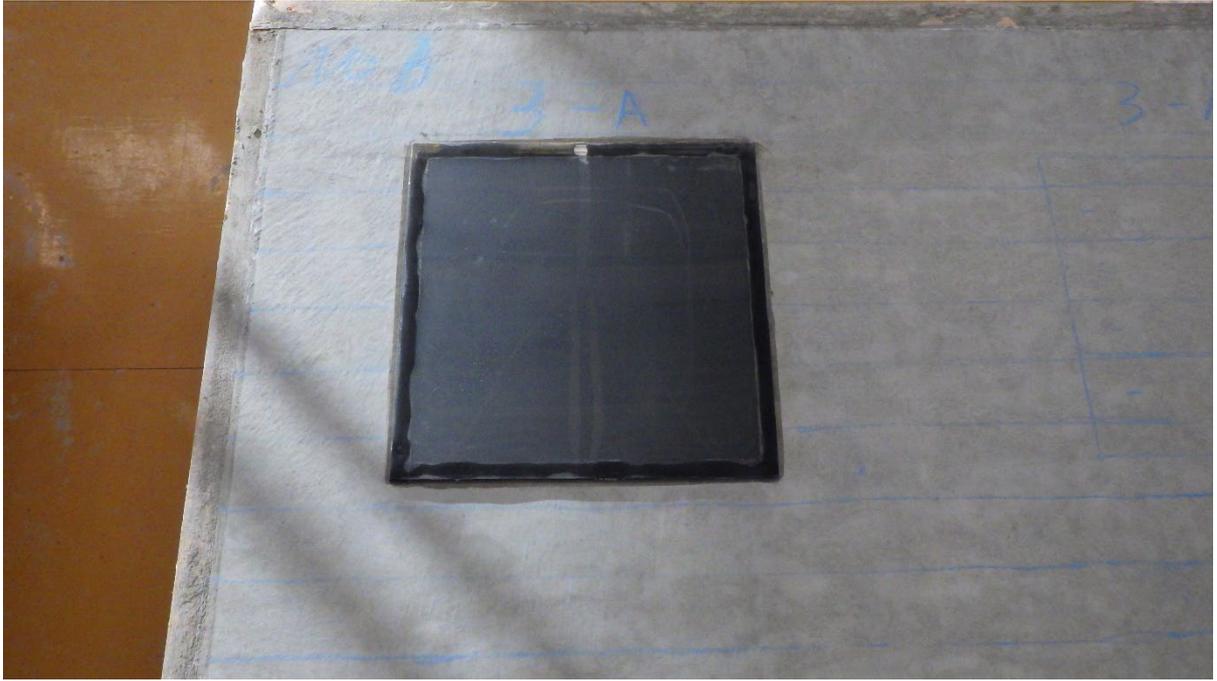


図-5.1.3 滞水を模擬するための仕掛けの詳細図と写真



(a)フェルトシートの設置状況

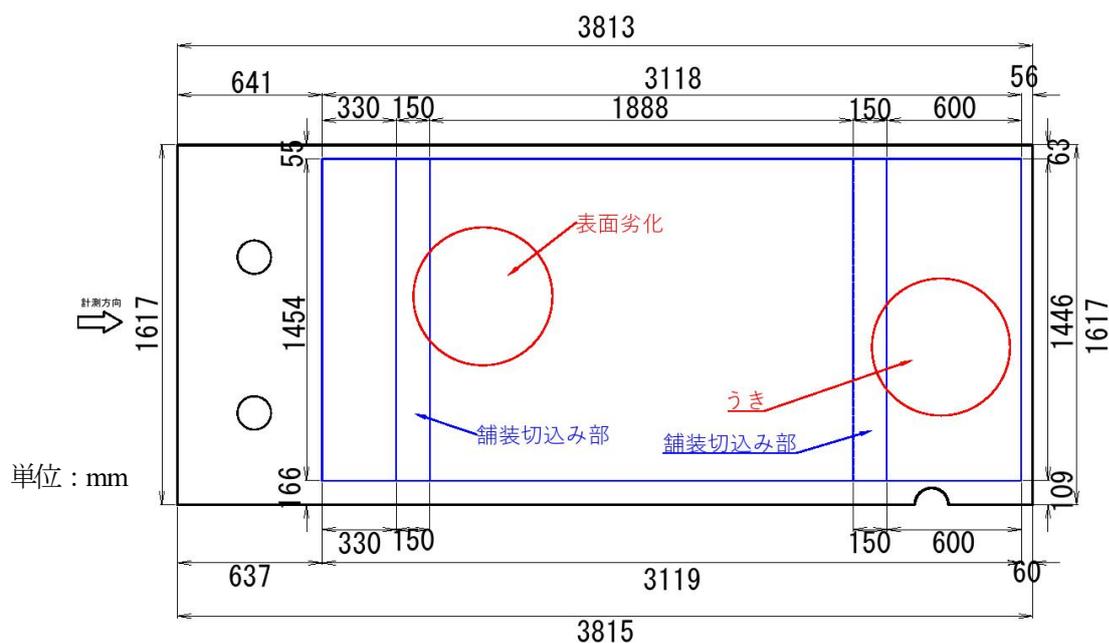


(b) 注水孔と排水孔の下面の状況

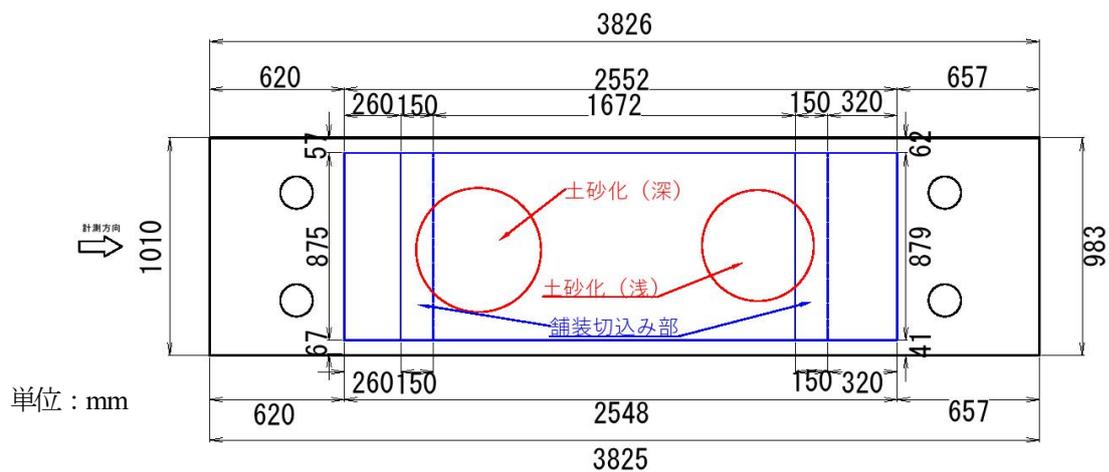
写真-5.1.2 フェルトシートの設置状況及び注水孔と排水孔の下面の状況

(2) 撤去床版を活用した供試体

図-5.1.4 に撤去床版を活用した供試体の概要図を示す。撤去床版を活用した供試体の製作には土木研究所が保有している既設橋梁の撤去床版を使用した(写真-5.1.3)。写真-5.1.4～写真-5.1.13 に施工状況を示す。No.1の床版上面に「表面劣化」「うき」、No.2の床版上面に「軽微土砂化」「深層土砂化」をブレーカーではつるなどしてそれぞれ劣化を模擬し、その上にアスファルトを舗装した。また劣化を模擬した箇所に対して水分を供給できるように、写真-5.1.11 及び写真-5.1.13 に示す通り舗装の一部を取り外しすることができる仕様とした。



(a) 撤去床版活用供試体 No.1



(b) 撤去床版活用供試体 No.2

図-5.1.4 撤去床版を活用した供試体の概要図

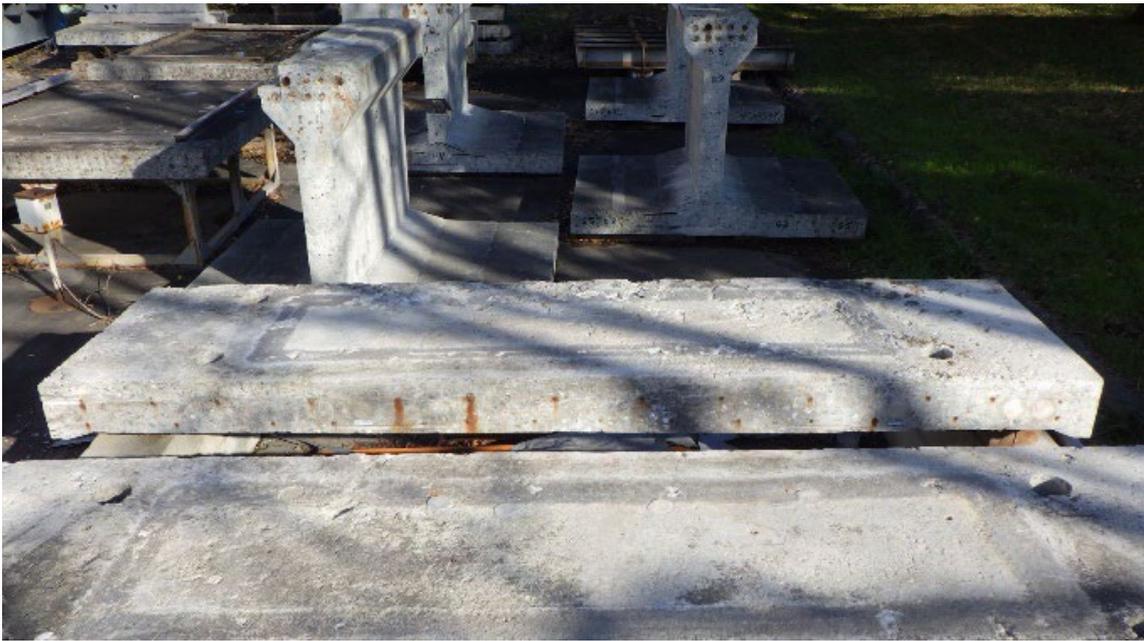


写真-5.1.3 使用した撤去床版



写真-5.1.4 ブレーカーによるはつり状況（撤去床版活用供試体 No.2）



写真-5.1.5 深層土砂化の模擬状況①（撤去床版活用供試体 No.2）



写真-5.1.6 深層土砂化の模擬状況② (撤去床版活用供試体 No.2)



写真-5.1.7 軽微土砂化の模擬状況① (撤去床版活用供試体 No.2)



写真-5.1.8 軽微土砂化の模擬状況②（撤去床版活用供試体 No.2）



写真-5.1.9 はつり箇所にはつりがらを敷き詰めた状況（撤去床版活用供試体 No.2）



写真-5.1.10 舗装舗設完了状況（撤去床版活用供試体 No.2）



写真-5.1.11 舗装取り外し状況（撤去床版活用供試体 No.2）



写真-5.1.12 舗装舗設完了状況（撤去床版活用供試体 No.1）



写真-5.1.13 舗装取り外し状況（撤去床版活用供試体 No.1）

5.2 車載式電磁波レーダによる調査

5.2.1 調査目的

車載式電磁波レーダを用いて、滞水を模擬した模型供試体のレーダ探査を行い、模擬した床版上の滞水を判別が可能であるか検証した。

5.2.2 調査機器の仕様

計測対象が模型供試体のため、通常の計測に使用する床版キャッチャーでは計測ができない。そのため、車載式電磁波レーダを手押し型に改良した装置を用いて計測を行った。手押し型の電磁波レーダ装置の外観及び仕様について、写真-5.2.1 と表-5.2.1 に示す。



写真-5.2.1 手押し型の電磁波レーダ装置外観（左：正面，右：側面）

表-5.2.1 手押し型の電磁波レーダ装置仕様

項目	仕様		性能
測定速度		～80km/h	最大80km/h,推奨40km/h,交通規制不要
距離測定	測定方式	車速信号取得	精度±0.3%以内
電磁波レーダ	測定方式	マルチステップ周波数方式	周波数を高速で切り替えながらデータを取得 最大探査深度1.5m程度（比誘電率に依存） 有効測定幅員幅0.6m 橋軸方向7.5cm間隔、橋軸直角方向7.5cm間隔 深さ方向1.0cm間隔（比誘電率に依存）
	周波数	200MHz～3GHz	
	アンテナ	アンテナ幅0.9m	
記録媒体		HDD記録	

5.2.3 調査方法

電磁波レーダの有効幅員幅は0.6mであるため、模型供試体の幅員に合わせて複数回走行して計測した。取得したデータは電磁波レーダによる反射信号である。反射信号の取得間隔は4.5と同様

である。

5.2.4 計測した模型供試体

写真-5.2.1 に示す手押し型の電磁波レーダ装置を用いて、条件の異なる4種類の模型供試体（以下、No.1, No.2, No.3, No.4 と記載）の計測を実施した。供試体の外観について写真-5.2.2 に示す。

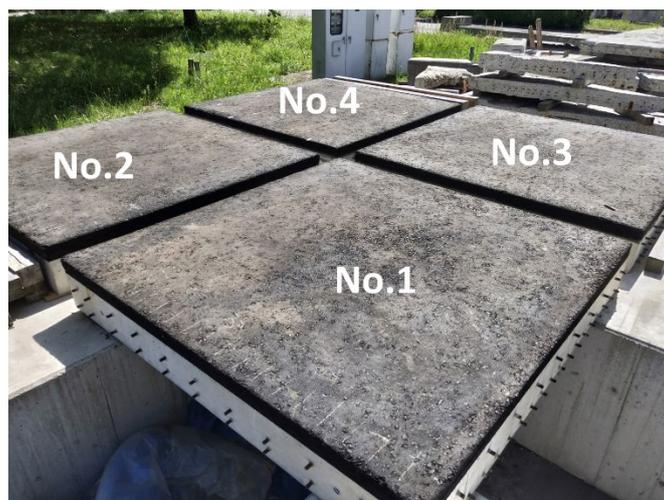


写真-5.2.2 計測した模型供試体

5.2.5 調査結果

電磁波の反射信号の強度は、接する2つの物質の持つ比誘電率（表-5.2.2）の差に依存する。アスファルト舗装及びRC床版がともに健全（材料レベルでの損傷がなく両者が密着）な場合は、アスファルト舗装とコンクリートの比誘電率に幅があるものの、それぞれの材料の境界における電磁波の反射が面的に一様となる。一方、RC床版上面に土砂化や滞水が発生している場合は、滞水がない場合に比べて比誘電率の差が相対的に大きくなり、電磁波の反射信号の強度が大きくなる。以降にNo.1～No.4の各模型供試体における測定結果について詳述する。

表-5.2.2 比誘電率の一般値¹⁾

物質	比誘電率の一般値
水	81
舗装	乾燥状態：2～4 湿潤状態：6～12
コンクリートのみ	乾燥状態：2～4 湿潤状態：6～12

(1) 模型供試体 No.1

模型供試体 No.1 の平面コンター図と波形データを図-5.2.1 に示す。1-1～1-4 の4カ所の地点の波形データでは、床版上面付近の反射強度は同程度であり、後述する滞水を模擬した模型供試体 No.3 (3-1, 3-4 地点)、模型供試体 No.4 (4-1, 4-4 地点) と比べて床版上面付近の反射強度が大きい箇所は見られない。

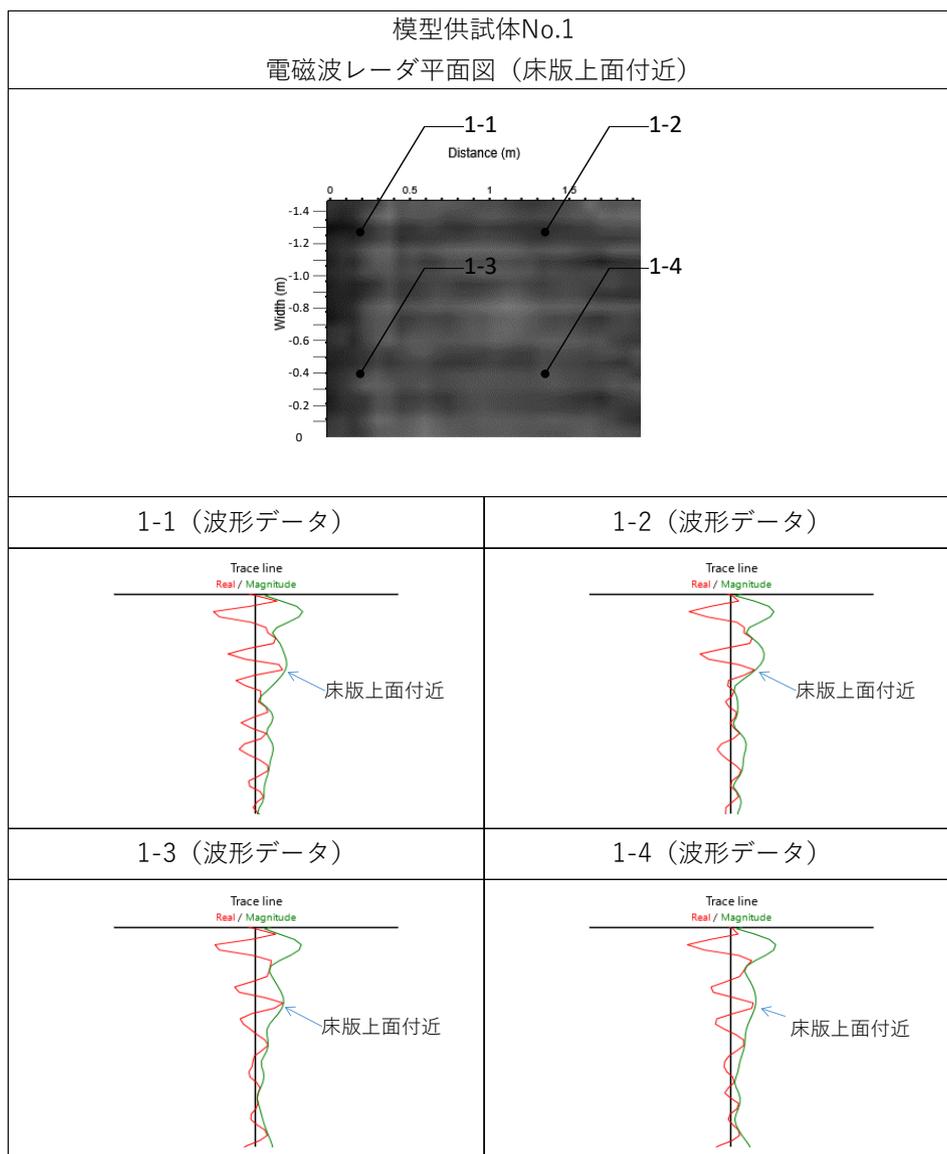


図-5.2.1 模型供試体 No.1 の電磁波データ (電磁波レーダ平面図と波形データ)

(2) 模型供試体 No.2

模型供試体 No.2 の平面コンター図と波形データを図-5.2.2 に示す。2-2 及び 2-4 地点の波形データでは床版上面付近の反射強度が相対的に大きい。2-1 及び 2-3 地点の反射強度は相対的に小さい。2-2 と 2-4 地点は、床版上面において比誘電率の違いが大きかったため、相対的に反射強度が大きくなったと考えられる。しかし、模型供試体 No.2 は床版上面の滞水状態ではなく、舗装にひび割れを模擬した供試体である。このため、反射強度の大きい箇所の原因は、暴露期間中に舗装のひび割れから浸入した雨水だと推定できる。また、後述する滞水状態を模擬した模型供試体 No.3 (3-1, 3-4 地点)、模型供試体 No.4 (4-1, 4-4 地点) と比べて供試体 No.2 の 2-2 及び 2-4 地点の反射強度は低いため、雨水の浸入による水分の影響は滞水状態と比べて小さい（例えば、床版上面が滞水状態ではなく湿潤状態など）ことが考えられる。

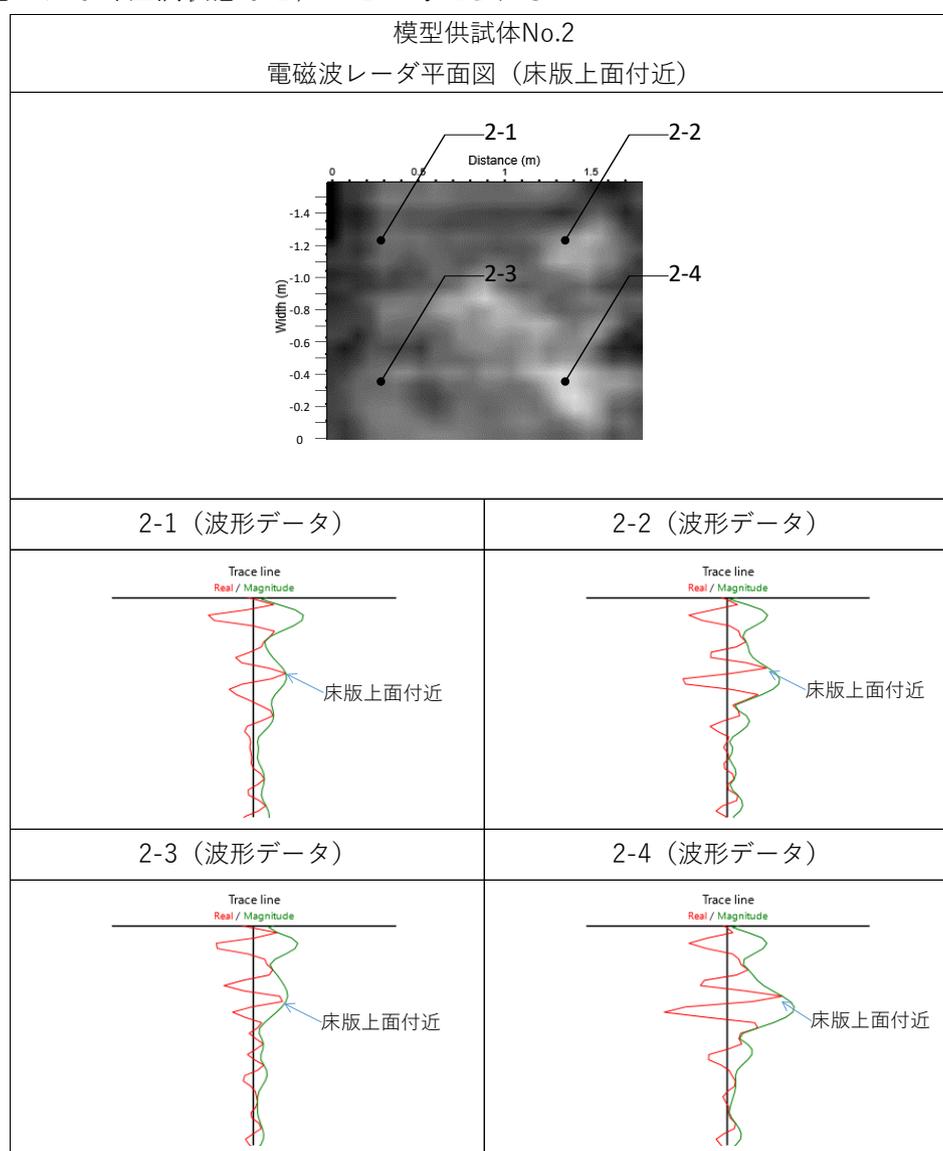


図-5.2.2 模型供試体 No.2 の平面コンター図と波形データ

(3) 模型供試体 No.3

模型供試体 No.3 の平面コンター図と波形データを図-5.2.3 に示す。3-1 及び 3-4 地点は、床版下面から注水することにより滞水を模擬した滞水スペース、3-2 及び 3-3 地点は非滞水スペースである。3-1 及び 3-4 地点の波形データでは床版上面付近の反射強度が相対的に大きい一方、3-2 及び 3-3 地点の反射強度は相対的に小さい。3-1 と 3-4 地点は、滞水により比誘電率の差が 3-2 及び 3-3 地点より大きく、滞水を精度良く検知できているといえる。

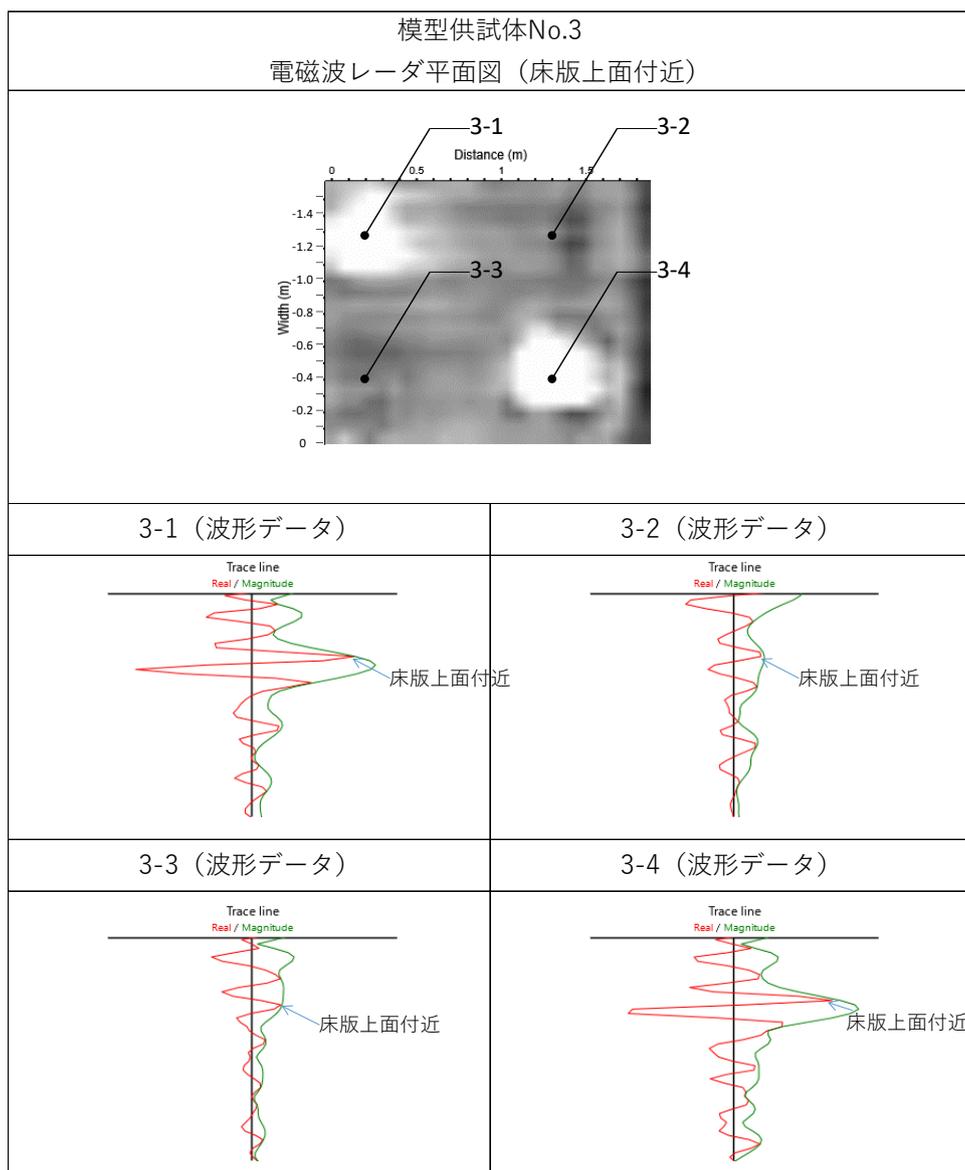


図-5.2.3 模型供試体 No.3 の平面コンター図と波形データ

(4) 模型供試体 No.4

模型供試体 No.4 の平面コンター図と波形データを図-5.2.4 に示す。4-1 及び 4-4 地点が滞水スペース、4-2 及び 4-3 地点が非滞水スペースである。模型供試体 No.3 同様、滞水スペースでは床版上面付近の反射強度が相対的に大きくなっており、滞水を精度良く検知できているといえる。

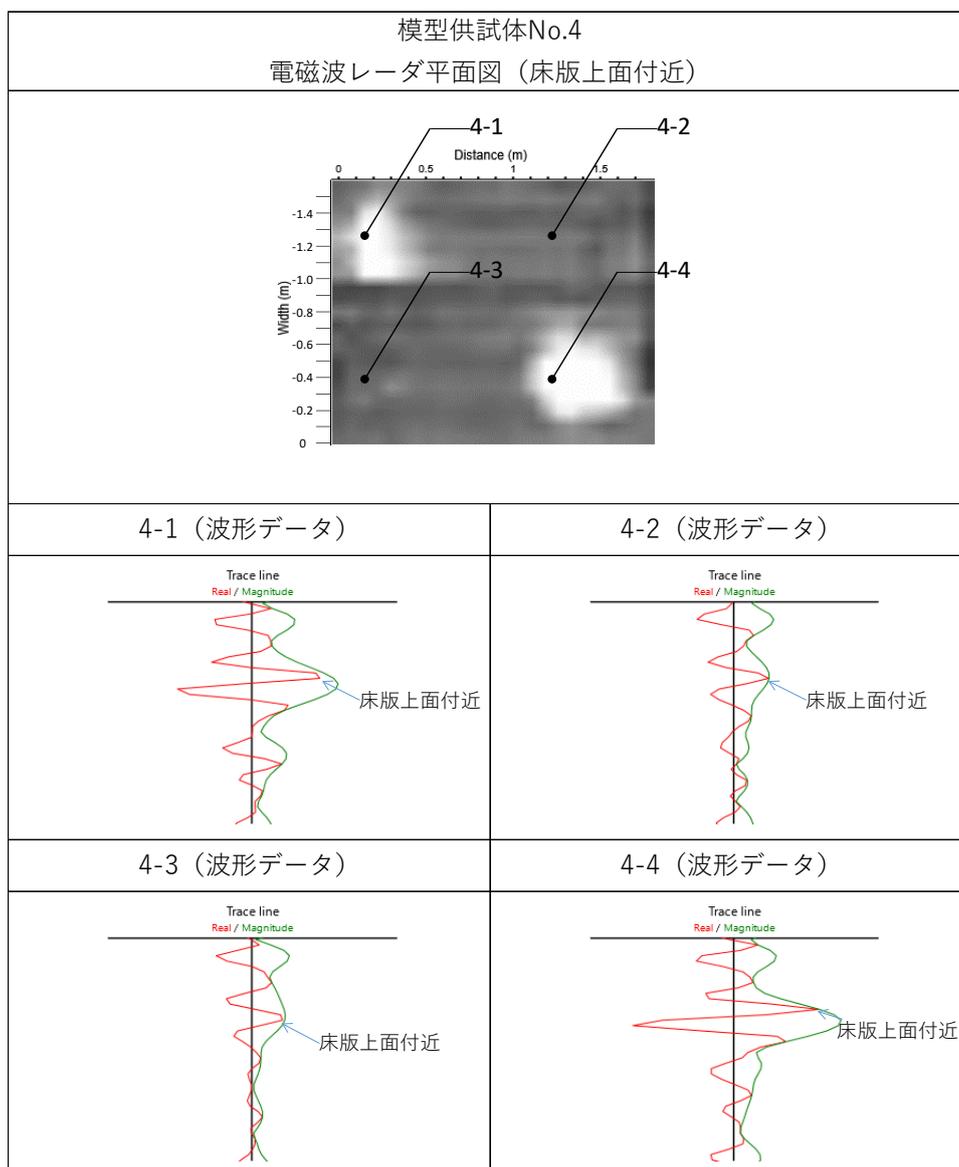


図-5.2.4 模型供試体 No.4 の平面コンター図と波形データ

5.2.6 まとめ

- (1) 模型供試体 No.1 の結果より，床版上面付近の反射強度は全体的に同程度であり，滞水がないことを精度よく検知できることを確認した.
- (2) 模型供試体 No.3 及び No.4 の結果より，床版防水層の材料の違い（シート系・塗膜系）や滞水の位置の違い（防水層の上または下）によらず，滞水箇所は非滞水箇所より相対的に反射強度が大きくなっており，模擬した滞水を精度よく検知できることを確認した.
- (3) 模型供試体 No.2 の結果より，滞水状態まではいかない水分状態（湿潤状態）について，非滞水の場合と比較すると反射強度が相対的に大きいものの，滞水箇所と比較すると相対的に小さく，精度よく検知することは難しいことを確認した.

5.3 ハンディ式及びカート式電磁波レーダ（高周波型）による調査

5.3.1 調査目的

高周波型の電磁波レーダを用いて、滞水及び損傷を模擬した模型供試体のレーダ探査を行い、模擬した床版上の滞水や損傷についてどの程度判別が可能であるか検証した。

5.3.2 調査機器の仕様

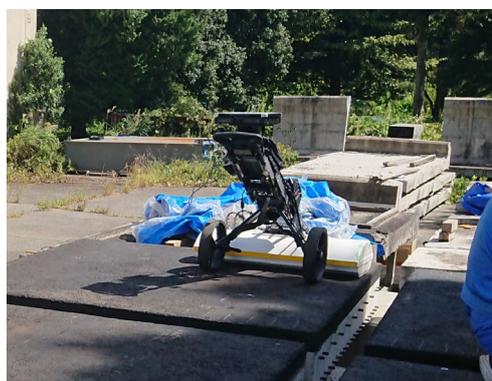
調査に用いた高周波型カート式電磁波レーダの仕様は、3.4 と同様である。ハンディ式レーダの仕様を表-5.3.1 に示す。

表-5.3.1 ハンディ式高周波型電磁波レーダの仕様

項目	性能 (カタログ値)	機材外形
機材名	GSSI 社製 SIR-EZ HR	
チャンネル数	シングル	
放射方法	パルス式	
中心周波数	2.6 GHz	

5.3.3 調査方法

カート式では測線方向のデータ取得を 3cm ピッチ、測線間隔を 10cm として、また、ハンディ式では測線方向のデータ取得を 1.25mm ピッチ、測線間隔を 10cm として模型供試体のレーダ探査を実施し、模擬した滞水や損傷を判別可能か確認した。探査状況を写真-5.3.1 に示す。



(a) カート式



(b) ハンディ式

写真-5.3.1 探査状況

5.3.4 検証結果

今回検証した各模型供試体の名称と模擬損傷の内容を表-5.3.2 に示す。

表-5.3.2 各模型供試体の模擬損傷の内容

供試体名称	模擬損傷
①模型供試体 No.3 [シート防水]	シート系防水層の上面と下面に各 1 箇所滞水損傷を模擬
②模型供試体 No.4 [塗膜防水]	塗膜系防水層の上面と下面に各 1 箇所滞水損傷を模擬
③撤去床版 No.1 [表面劣化&うき]	表面劣化とうきを模擬
④撤去床版 No.2 [土砂化(軽微)(深層)]	軽微な土砂化と深層土砂化を模擬

① 模型供試体 No.3 [シート防水] の検証結果

レーダ画像の平面コンター図と縦断スライス図を図-5.3.1 に示す。「注水なし」の平面コンター図において、水がない状態でも模擬損傷範囲が濃い色で表示されている要因は、模型供試体製作段階で含水比測定のために事前に注水試験を行っているため、水分が抜けていない可能性があるためと考えられる。また、カート式レーダで平面コンター図の右端が縞模様の画像となっているのは、多配列レーダのうち一部の送受信機が舗装端部からはみ出た状態となり波形が乱れているためである。

カート式及びハンディ式ともに、注水なしの画像（上段）に比べ注水あり（下段）の画像は、平面コンター図において明らかに電磁波の反射強度が強いことを示す濃い黒色となっており、滞水の範囲を識別できる。またデータの取得ピッチの細かいハンディ型の方がより鮮明な画像となっている。

このレーダ画像からは、滞水位置が防水層の上か下かは明確には判断できないが、例えば 300mm の範囲で 512 サンプルのデータを取得すれば 0.6mm 程度の解像度となることから、深さ方向のデータ取得ピッチを細かくすることにより、1.0mm 程度の高低差は検出できる可能性はあると考えられる。

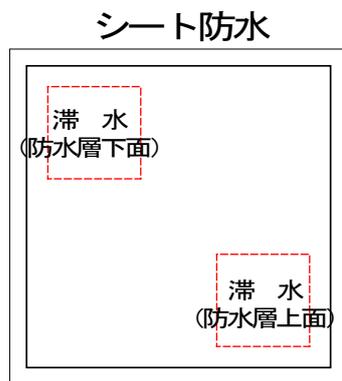
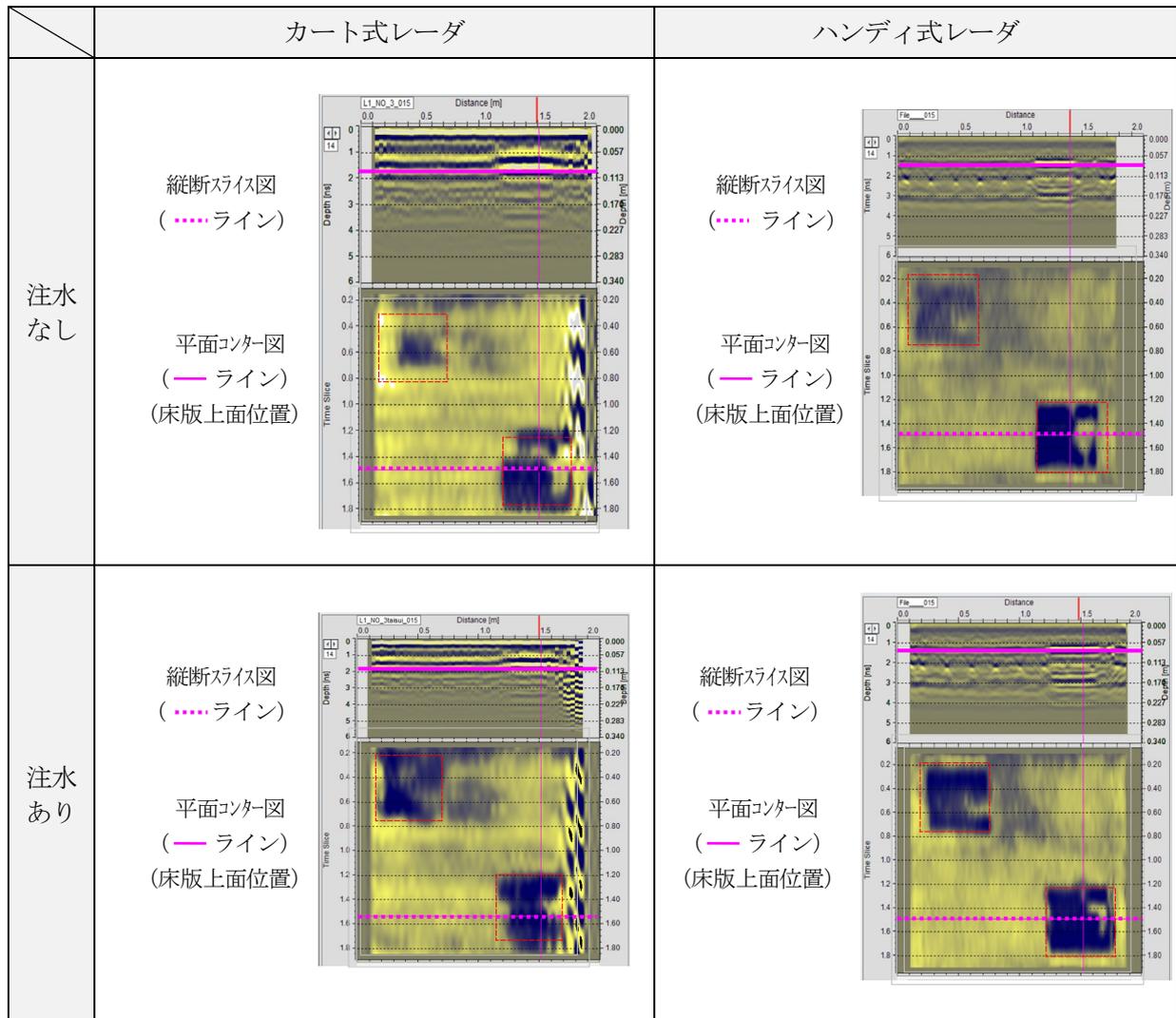


図-5.3.1 模型供試体 No.3 [シート防水] の平面コンター図及び縦断スライス図

②模型供試体 No.4〔塗膜防水〕の検証結果

レーダ画像の平面コンター図と縦断スライス図を図-5.3.2に示す。

①模型供試体 No.3〔シート防水〕の検証結果と同様であり、シート防水と塗膜防水の大きな差はみられない。

	カート式レーダ	ハンディ式レーダ
注水なし	<p>縦断スライス図 (.....ライン)</p> <p>平面コンター図 (——ライン) (床版上面位置)</p>	<p>縦断スライス図 (.....ライン)</p> <p>平面コンター図 (——ライン) (床版上面位置)</p>
注水あり	<p>縦断スライス図 (.....ライン)</p> <p>平面コンター図 (——ライン) (床版上面位置)</p>	<p>縦断スライス図 (.....ライン)</p> <p>平面コンター図 (——ライン) (床版上面位置)</p>

塗膜防水

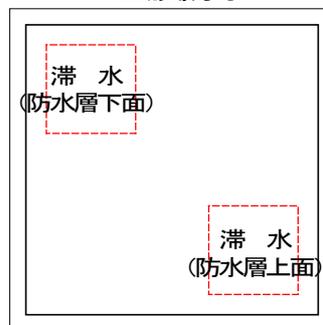


図-5.3.2 模型供試体 No.4〔塗膜防水〕の平面コンター図及び縦断スライス図

③撤去床版 No.1〔表面劣化&うき〕の検証結果

レーダ画像の平面コンター図と縦断スライス図を図-5.3.3 に示す。

カート式レーダ（データ取得ピッチ 3cm）の場合は、「表面劣化」「うき」ともに、縦断画像において境界面の小さな乱れは確認できるが、画像のみで損傷の状態を識別することは困難である。一方、ハンディ式レーダ（データ取得ピッチ 1.25mm）の場合の「表面劣化」は、縦断スライス図において境界面の乱れは小さいものの比較的画像が鮮明であるため、画像のみで損傷の状態を識別することは可能である。なお「うき」については舗装面の不陸が大きく機材を接地することができなかったことから計測できなかったが、他の実橋データで「うき」を識別できた事例もある（図-5.3.4）。

上記を踏まえると、パルス式レーダでの「表面劣化」や「うき」の判定は、データ取得ピッチを細密にすれば、比較的高い確率で画像のみで損傷の状態を識別できると考えられる。

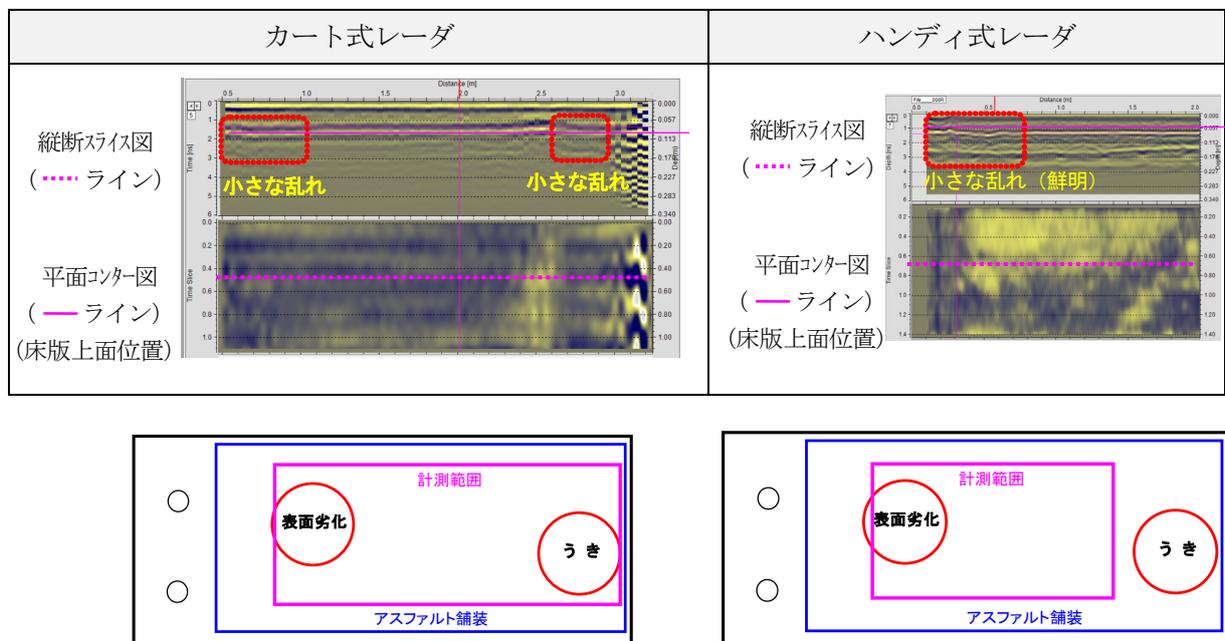
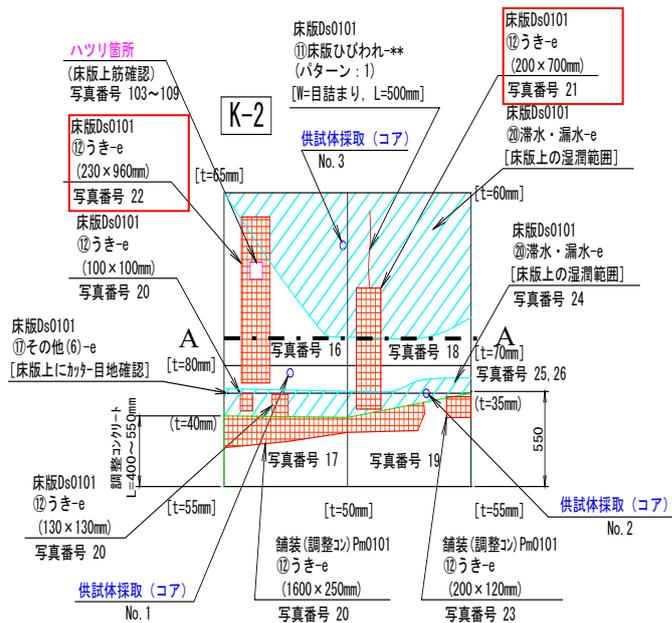
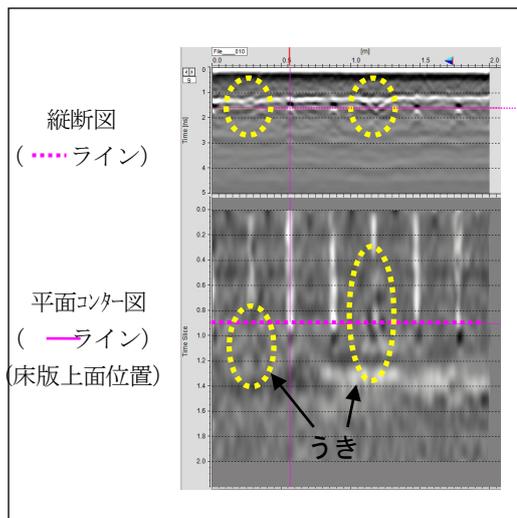


図-5.3.3 撤去床版活用供試体 No.1〔表面劣化&うき〕の平面コンター図及び縦断スライス図



(a) 損傷図



(b) A-A 断面レーダ画像



(c) うきの状況写真

図-5.3.4 うきの検知事例

④撤去床版 No.2〔土砂化（軽微）&（深層）〕の検証結果

レーダ画像の平面コンター図と縦断スライス図を図-5.3.5 に示す。

カート式レーダ（データ取得ピッチ 3cm）の場合は、「浅い土砂化」「深い土砂化」ともに、平面コンター図及び縦断スライス図でアスファルト舗装と床版境界面の乱れが比較的明確であり、画像のみで損傷の状態を識別することが可能である。さらにハンディ式レーダ（データ取得ピッチ 1.25mm）の場合は、カート式に比べ画像がより鮮明であり「浅い土砂化」「深い土砂化」ともに、画像のみで比較的容易に損傷の状態を識別することが可能である。

上記を踏まえると、パルス式レーダでの「土砂化」の判定は、損傷が比較的大きいことからデータ取得ピッチ 3cm でも画像のみで損傷の状態を高い確率で識別することが可能である。

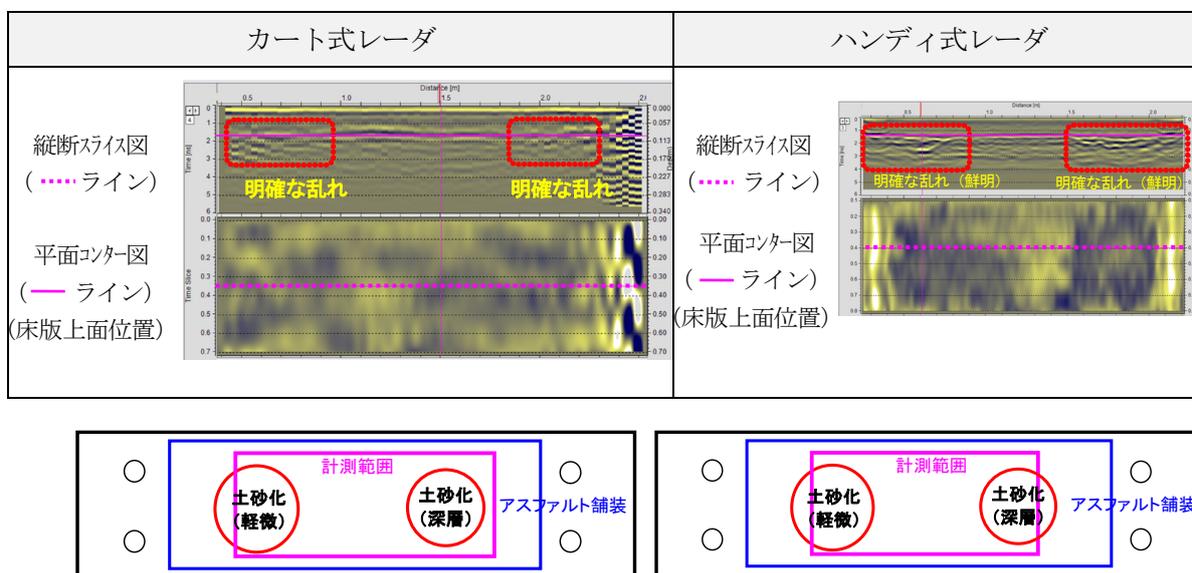


図-5.3.5 ④撤去床版活用供試体 No.2〔土砂化(軽微)(深層)〕の平面コンター図及び縦断スライス図

5.3.5 まとめ

高周波型の電磁波レーダを用いて、滞水及び損傷を模擬した模型供試体のレーダ探査を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) カート式レーダ及びハンディ式レーダのコンター図を比較した結果、全ての供試体においてデータ取得ピッチの細かいハンディ式レーダのほうが鮮明な画像が取得できた。
- (2) 「滞水」箇所は、カート式レーダ、ハンディ式レーダ共に平面コンター図で濃い黒色に表示され、画像から滞水範囲を比較的容易に識別できた。しかし、滞水の位置が防水層の上面なのか下面なのかは識別困難であった。
- (3) 「表面劣化」箇所は、カート式レーダでは識別困難な一方、ハンディ式レーダでは損傷があることは識別できた。
- (4) 「うき」箇所は、カート式レーダでは識別困難であった。
- (5) 「土砂化」箇所は、カート式レーダ、ハンディ式レーダ共に比較的容易に識別できた。
- (6) 上記より、データ取得ピッチを細密にすれば、高い確率で滞水及び損傷を検知できる可能性が高いと考えられる。しかし、細密なピッチでデータを取得するためにはレーダ装置の走査速度を落とす必要があり、車道上では道路規制が必要となる。それを踏まえると、まずは車載式レーダを用いて損傷が進行する可能性の高い範囲をスクリーニングし、その後カート式やハンディ式レーダを用いた詳細調査で細密なデータを取得することで損傷範囲・深さを推定する方法が効率的と考えられる。

5.4 ハンディ式電磁波レーダを用いた滞水検知に関する解析手法の検討

5.4.1 調査目的

床版上面の土砂化について、劣化初期の段階で検知することが求められている。そのためには、劣化初期段階における舗装と床版間の滞水を早期に検知することが課題となる。

比誘電率と導電率により対象の特定が可能である。そこで舗装と床版間の滞水を定量的に検知するため、電磁波レーダの測定信号をもとに対象内部の比誘電率・導電率を推定する解析手法の検討を行った。

5.4.2 技術課題に対する解析手法を用いたアプローチ

技術課題である対象内部の比誘電率・導電率を推定する解析手法の比較を表-5.4.1 に示す。その場合、表-5.4.2 のような問題点として、表-5.4.2 のような点が挙げられる。

表-5.4.1 対象内部の比誘電率・導電率解析手法の比較

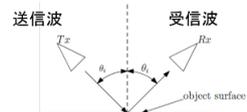
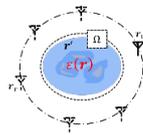
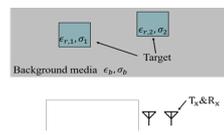
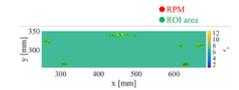
解析手法	エリプソメトリ	DBIM 法	CSI 法のレーダ応用	CSI 法と RPM 法との融合方式
解析手法の概要	物質表面での電磁波が反射するときの入射波と反射波から求める方法	DBIM 法を用いて物質からの全方位の反射電界から求める方法	CSI 法を用いて物質からの一方向の反射電界から求める方法	RPM 法で解析領域を絞り込みながら CSI 法を用いて物質からの一方向の反射電界から求める方法
解析手法概要図	 <p>送信波 受信波 object surface 反射角・反射係数比から推定</p>	 <p>全方位の反射電界から推定</p>	 <p>Background media ϵ_b, σ_b Target ϵ_t, σ_t 一方向の反射電界から推定</p>	 <p>レーダ画像化手法で解析領域(ROI)を絞り込む</p>
表面形状の影響	×感度高く、精度を得難いため平面以外に適用困難	○影響し難いため平面以外に適用可能	○影響し難いため平面以外に適用可能	○影響し難いため平面以外に適用可能
内部欠陥	×表面の影響により推定困難	○推定可能	○推定可能	○推定可能
レーダ手法	○対応可能	×トモグラフィ的な観測が必要	○対応可能	○対応可能
計算コスト	○低い	×電磁界解析を逐次計算する必要があるため膨大	×一方向の電界で推定するため未知数が多く膨大	△解析領域の絞り込みで未知数を低減し計算コストを下げる
検討結果	×	×	△	○

表-5.4.2 先行技術の問題点

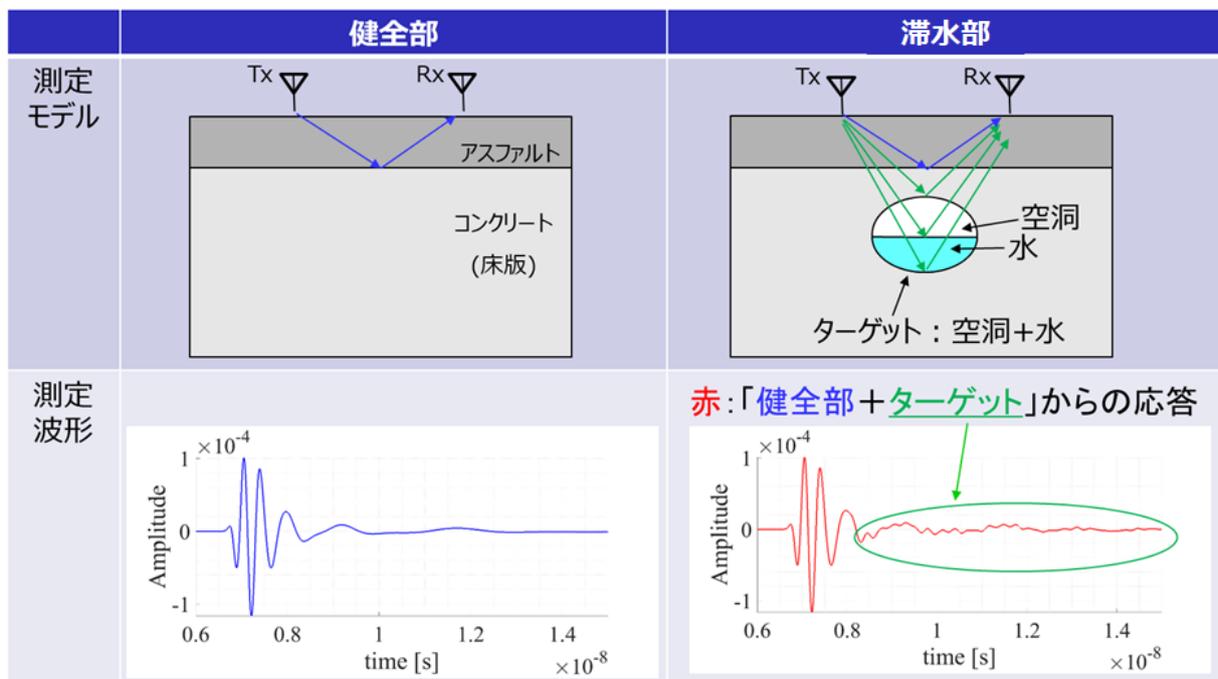
解析手法	問題点
エリプソメトリ	電磁波が入射および反射する点（散乱点）の形状影響が大きい。
DBIM 法	逆散乱解析法の一種で、トモグラフィ的な観測が必須で非破壊検査への適用が難しい。また電磁界解析を逐次計算する必要があり計算コストが膨大となる。
CSI 法のレーダ応用	逆散乱解析法の一種である CSI 法は電磁界解析を逐次計算する必要がないため DBI 法より計算コストを抑えられる特徴がある。レーダ応用により一方向の電界で推定すると電磁波レーダへの適用が可能となるが、トモグラフィ的な観測に比べて未知数が多くなるので計算コストが膨大となる。

そこで、電磁波レーダへの適用が可能な CSI 法のレーダ応用をベースに、計算コストの低減が可能な CSI 法とレーダ画像化手法である RPM 法を融合した「CSI 法と RPM 法との融合方式」を採用した。

健全部と滞水部の解析モデルとレーダからの応答波形イメージを表-5.4.3 に示す。滞水部の波形は健全部の波形に重なって現れるので、この波形の違いをもとに解析により水分量を求める。

このアプローチについて、土研敷地内に保管されている模型供試体を用いて解析を行った。

表-5.4.3 健全部と滞水部の応答波形イメージ



5.4.3 模型供試体による解析結果

模型供試体を KEYTEC 製のハンディ式電磁波レーダであるストラクチャスキャンで測定し、そのデータを用いて解析を行った。測定に使用した No.3 の模型供試体の構造を図-5.4.1 に示す。図中の右下に測線図を示している。ハンディ式電磁波レーダを用いて測線図の左上から図示する方向に測定を開始し、右下まで測定を行った。レーダ機材のタイヤが載る範囲の制約から 19 測線で計測を行った。

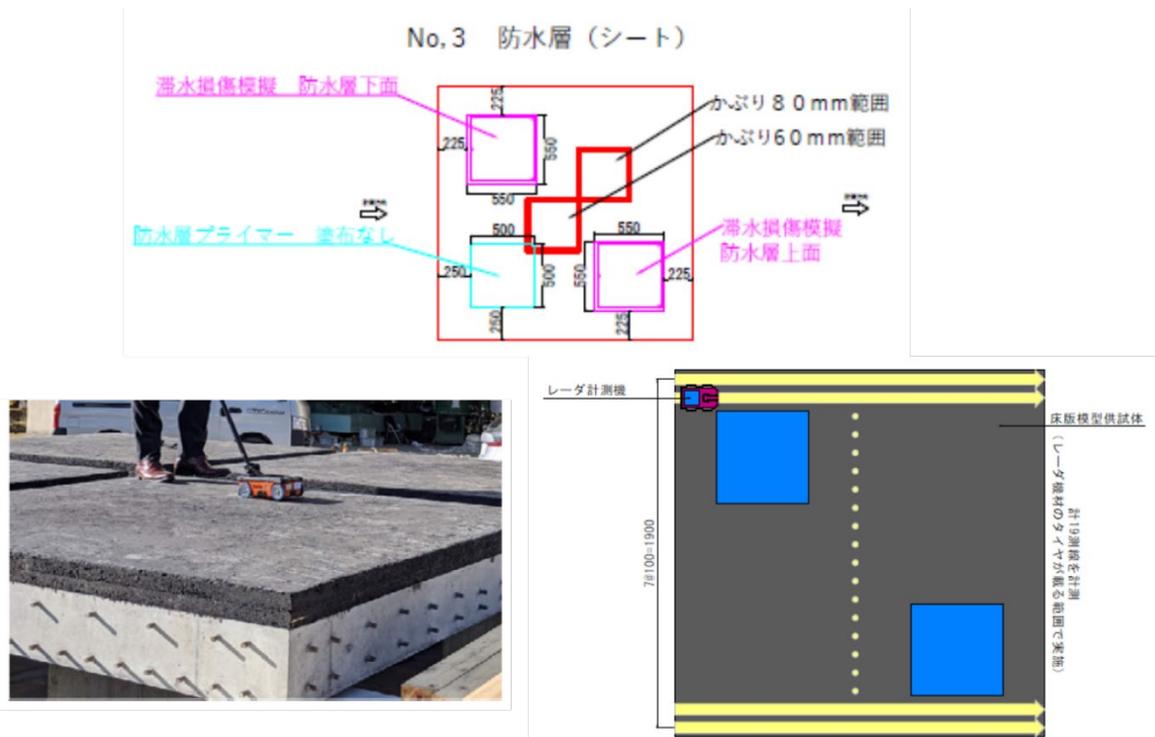


図-5.4.1 模型供試体 (No.3) の構造

解析フローを図-5.4.2 に、従来のレーダ画像化と RPM 法による画像化部分の説明図を図-5.4.3 に示す。まず従来のレーダ画像化と同様の手法により、取得した反射波のうち、表面反射波をフィルタで除去後に反射波のピーク時間からターゲットまでの距離点を算出し、距離点群のレーダ画像を出力する。次に各距離点におけるアンテナを中心に、反射波の振幅を半径とした円を描き、円上の全ての交点を求める。求めた交点に閾値処理を行い、設定閾値を超える交点を抽出することで、RPM 画像を出力する。次に抽出した RPM 画像をもとに ROI を設定する。ROI とは関心領域 (ROI: Region of Interest) のことで、一般的に画像処理やコンピュータビジョンにおいて、フィルタ処理や認識処理を適用したい「画像中の部分的な関心領域」のことを指す。本解析では誘電率および導電率を推定する領域を ROI と呼ぶことにする。RPM 画像をもとに設定した ROI について CSI 法を用いて誘電率を推定し、閾値処理により明らかに対象と異なる部分を除外することで ROI を決定する。そして最終的に決定した ROI について誘電率と導電率を推定する。

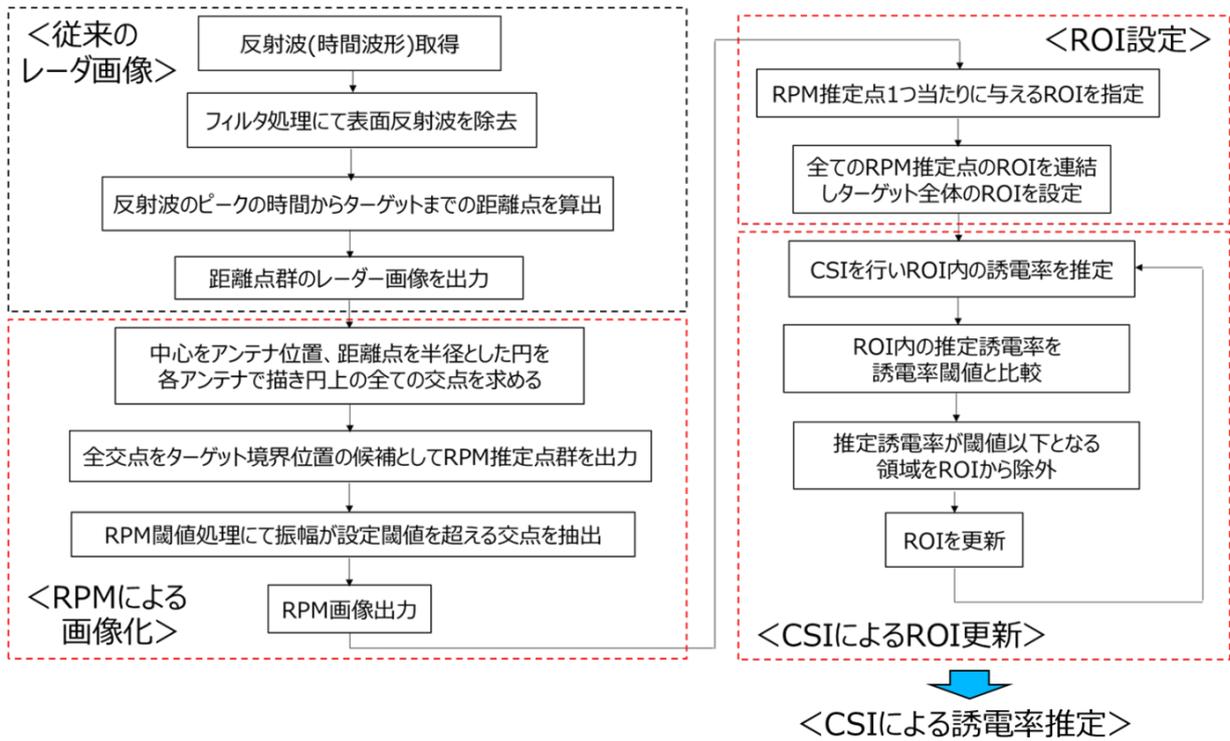


図-5.4.2 解析フロー

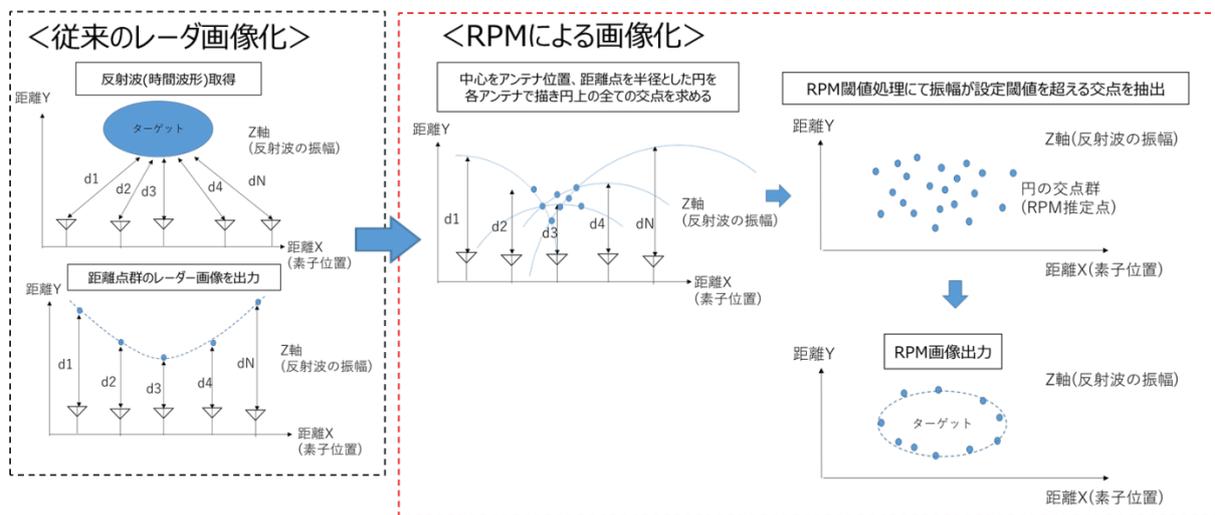
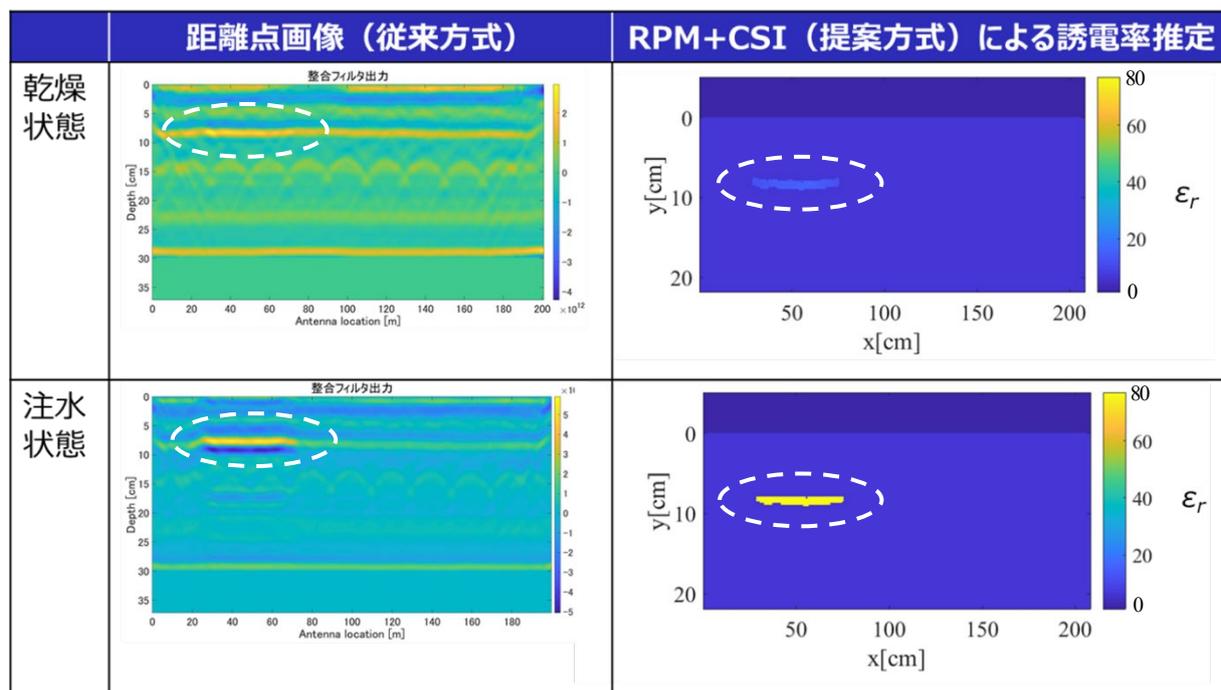


図-5.4.3 従来のレーダ画像化とRPMによる画像化

一般的な電磁波レーダ法である従来の距離点画像方式と、RPM法とCSI法を融合した提案方式を用いた解析結果の比較を表-5.4.4に示す。模型供試体(No.3)の2箇所滞水損傷模擬スペースのうち、防水層下面の模擬スペースにおける、乾燥状態と注水状態の結果を示している。表中の図の左縦軸は道路表面(0cm)からの深さを、右縦軸は誘電率を表し、横軸は測線距離に対応している。コンターの色の違いは、左欄の従

来方式は反射波の振幅を、右欄の提案方式は比誘電率を表している。従来方式は受信強度の違いでしか判別できないため、空洞と滞水の判別が困難である。一方、提案方式は比誘電率をもとに判別するので、空洞と滞水の定量的な判別が行うことができている。表-5.4.4 より白い点線で囲まれた部分の比誘電率は、右欄上の乾燥状態は1に近く、右欄下の注水状態は80に近いため、提案方式により対象の状態（乾燥状態または注水状態）を明確に判別できることが確認できた。

表-5.4.4 解析結果の比較



5.4.4 まとめ

本節では、舗装と床版間の滞水を定量的に検知するため、電磁波レーダの測定信号をもとに対象内部の比誘電率・導電率を推定する解析手法の検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 模型供試体のレーダ測定結果を用いてレーダ画像化手法である RPM 法と逆散乱解析法の一つである CSI 法を融合した提案方式について解析を行った結果、既存の距離点画像法に比べ、対象の空洞（乾燥状態）、滞水（注水状態）を明確に判別できることを確認した。

実際の運用方法は、通常の電磁波レーダと同様に距離点画像データを現場で取得し、そのデータを事務所などで解析することを想定している。その場合は現場での制約は、従来の電磁波レーダと同様である。今後の課題として、舗装厚や滞水量等条件により解析結果が変動する可能性があるため、条件の異なるモデルでの検証が必要と考える。

5.5 超音波探査による調査

5.5.1 調査目的

本調査では、超音波非破壊計測装置を用いて、土研敷地内にある床版上の滞水状態を模擬できる模型供試体、及び土砂化した既設床版の上に舗装されたアスファルト面から、滞水及び土砂化の検出が可能であるかを調査した。

また、G 橋（下り線）から撤去された床版を用いて、コンクリート面から土砂化又はその兆候とされる水平クラックの広がり等の検出が可能であるかを調査した。

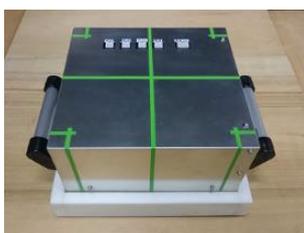
5.5.2 超音波非破壊計測装置

超音波非破壊計測装置は、アレイ状に二次元配置された超音波プローブにより非破壊で内部構造を三次元に可視化できるものである。計測方式には、縦波式と横波式があるが、用いた装置用法を鑑み、本調査では横波方式を採用することとした。

(1) 装置概要

装置の外観を図-5.5.1 に示す。縦波式装置は音波の伝達用に計測用ジェルが必須のため、ジェル塗布の作業性が著しく非効率的であり現地での使用を断念した。一方、横波式装置はプローブごとにスプリング機構が備わり 5mm までの表面凹凸を吸収しており、ジェルも不要なことからドライコンタクト式（またはドライ式）と称している。

- ・縦波式装置（ジェルコンタクト式装置）



外観



プローブ

寸法	: W365×D250×H150 [mm]
重量	: 4.5 [kg]
プローブ	: 64 [本] (16×4)
振動方向	: 縦波

装置情報

- ・横波式装置（ドライコンタクト式装置）



外観



プローブ

寸法	: W365×D250×H160 [mm]
重量	: 5.5 [kg]
プローブ	: 128 [本] (16×8)
振動方向	: 横波

装置情報

図-5.5.1 超音波非破壊計測装置の概要

(2) 超音波の振動方向

超音波の振動方向には、図-5.5.2 で示すように、振動が伝わる進行方向に振動する縦波と振動が伝わる進行方向と垂直な向きに振動する横波がある。一般的に、固体を伝わる波では、横波の音速は縦波より遅い、物理的な振動が異なるなどの特徴などがあり、より多くの情報を得るためには縦波と横波の両方を用いるのが望ましい。超音波プローブの送信波形を図-5.5.3 に示す。縦波の波形の方が鋭いソパルス状に近づいているが、これはプローブによる振動生成機構の違いによるものである。

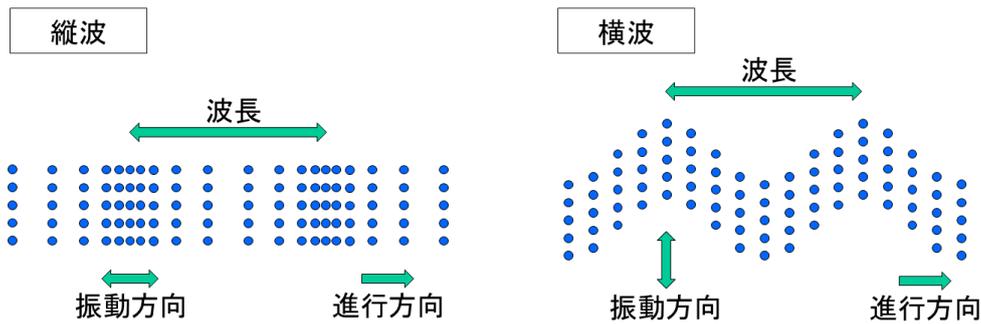


図-5.5.2 超音波の縦波と横波

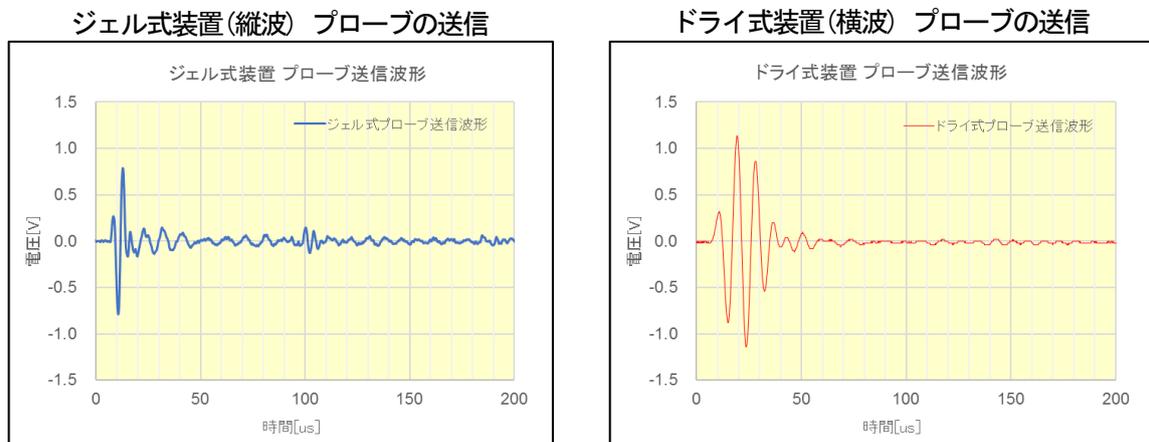


図-5.5.3 超音波プローブの送信波形

5.5.3 計測原理

(1) 概要

本装置は、図-5.5.4に示すように、超音波プローブ(探触子)から発生した超音波が探査対象物に対し、反射する強度により識別を行う。超音波は、音響インピーダンスの違う境界面で反射し、空洞・空隙に関しては全反射することから空洞・空隙の検出に有利とされている。

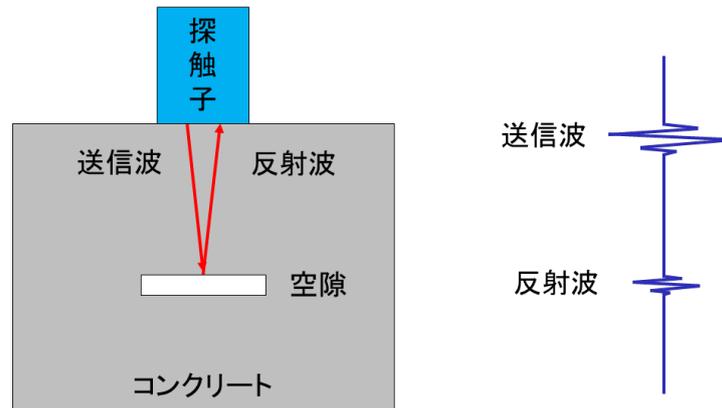


図-5.5.4 計測原理

(2) 信号処理

本装置は、アレイ状の超音波プローブの全送受信パターン波形を各画素位置で焦点を合わせるように合成することにより、高SN、高分解能とすることができ、空洞・空隙の検知が可能となっている。計測は、図-5.5.5に示すように、素子*i*から超音波を送信し、素子*j*で受信した信号*S_{ij}(t)*をSignal matrix (波形記憶マトリクス) に保存する。送信する素子と受信する素子を変えることにより、 $N \times (N-1)$ 通りの送受信の組み合わせの信号が記録される。その後、信号処理により各々の画素にビームが集束するよう、各々の送受信信号に遅延制御を行い、式(1)で示される集束ビーム $F(x[k, l, m], t)$ を合成する。

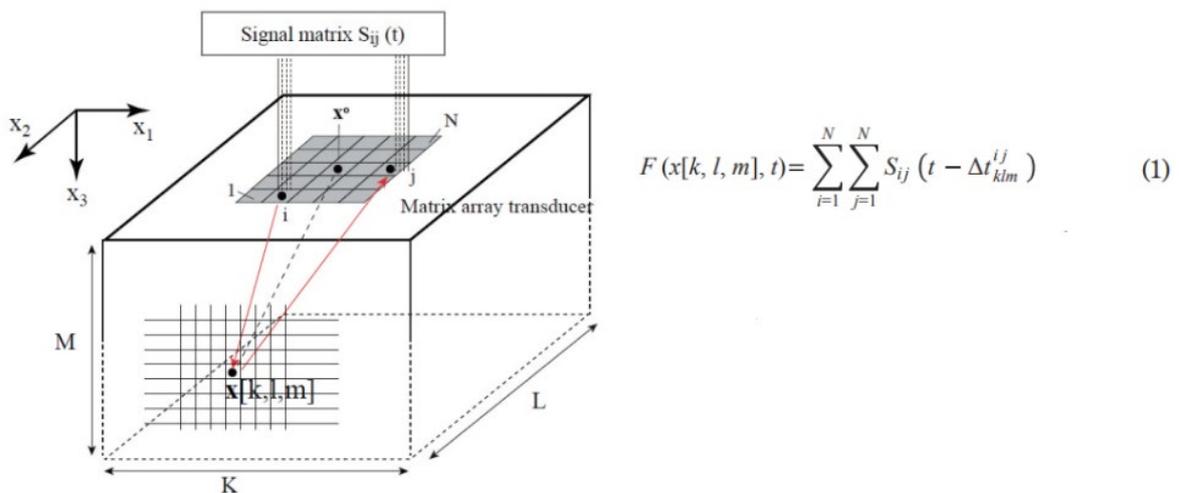


図-5.5.5 信号処理の概要

5.5.4 計測装置の仕様

本装置の1回の測定範囲は、図-5.5.6 に示すとおり 200mm×100mm であり、1回の操作は4秒で測定することができる。

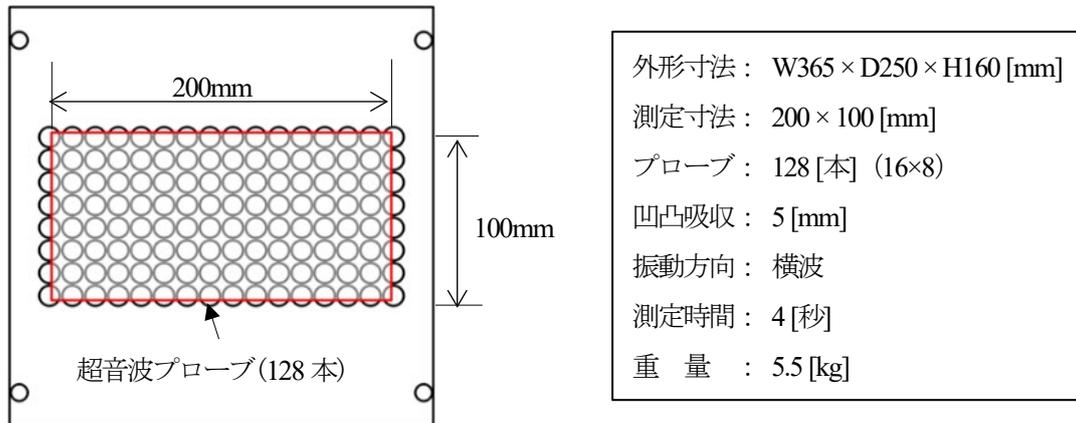


図-5.5.6 装置仕様

5.5.5 計測方法

本計測装置一式は、図-5.5.7 に示すとおり、超音波非破壊計測装置本体、制御・信号処理用 PC、屋外作業用バッテリー、接続ケーブル、及び測定治具からなる。測定治具は広範囲を測定したい場合に用いることで測定位置の管理が容易となり、作業性が向上する。その様子を図-5.5.8 に示す。

コンクリート計測の例として土研敷地内のコンクリートに対し、非破壊で内部構造を三次元で可視化した様子を図-5.5.9 に示す。測定範囲に対し装置を押し付けて測定し、断面解析や三次元解析により、厚さ 200mm のコンクリートの底面反射（空気層）が検出できている様子が分かる。

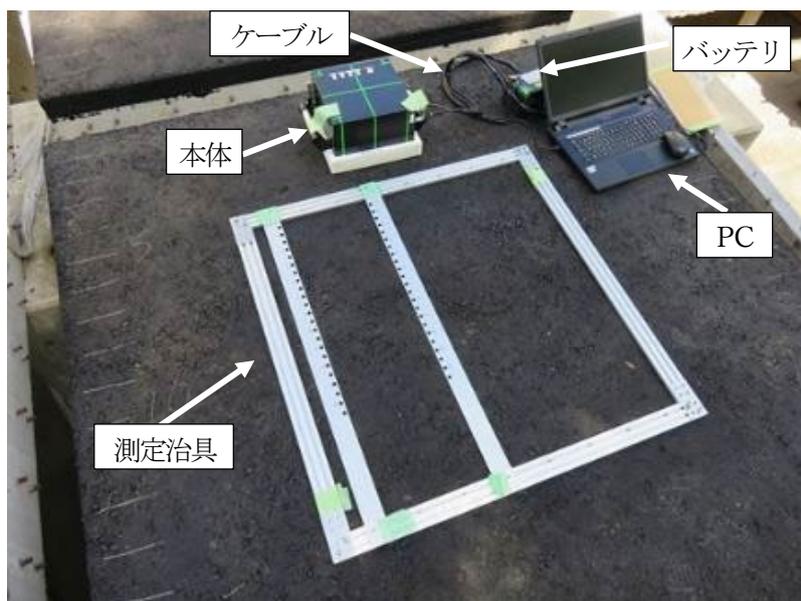


図-5.5.7 計測装置一式



測定部に測定治具と本体を設置



超音波プローブを測定面に押し付けて測定

図-5.5.8 測定治具と測定の様子

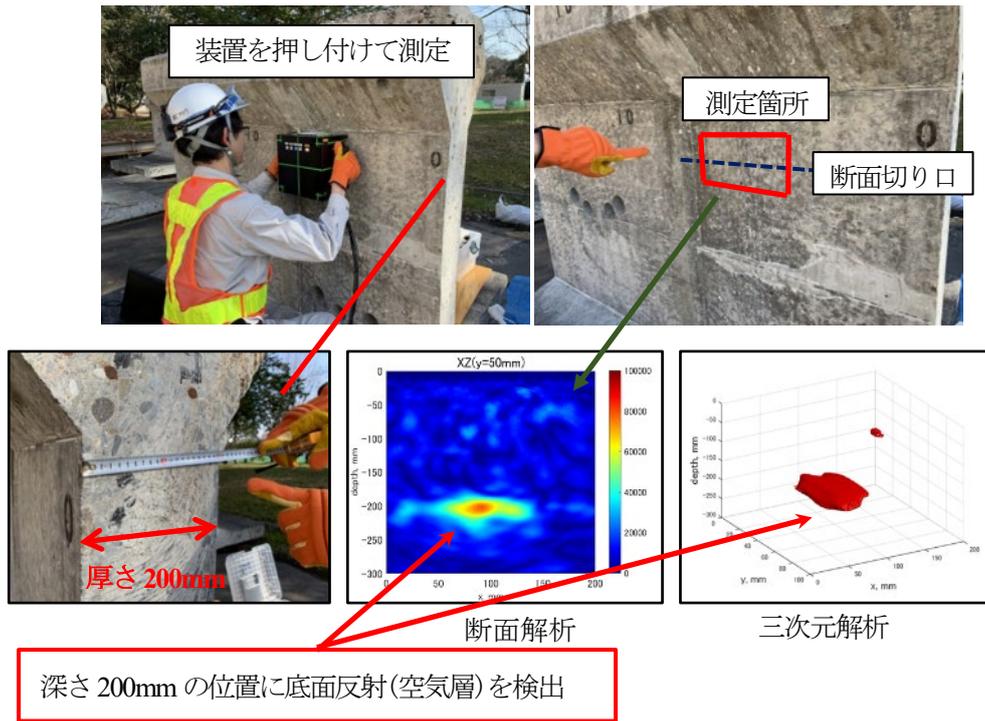


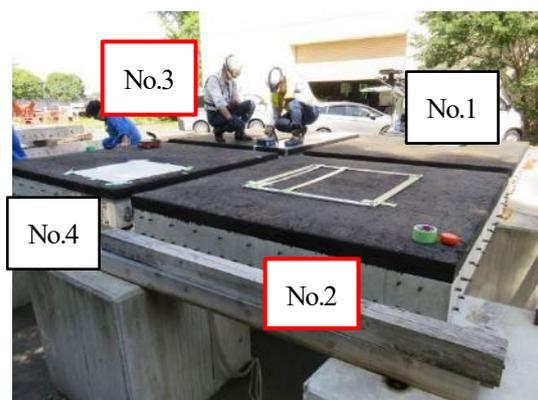
図-5.5.9 コンクリート内部の計測例

5.5.6 測定の対象

測定対象とした模型供試体及び撤去床版活用供試体をそれぞれ図-5.5.10, 図-5.5.11 に示す。模型供試体はその構造の違いによって4種類, 撤去床版活用供試体は床版に生じた劣化の種類によって2種類あるが, そのうち模型供試体ではNo.2 及びNo.3 を, 撤去床版活用供試体ではNo.2 を対象に測定を行った。

また, 測定対象としたG橋(下り線)からの撤去床版の概要を図-5.5.12 に示す。床版の縁(測定の開始位置)には深さ約50mm~100mmに水平クラックが確認できている。

模型供試体



番号	模型種類
No.1	健全
No.2	ひび割れ
No.3	防水層(シート)
No.4	防水層(塗膜)

図-5.5.10 測定した模型供試体

撤去床版活用供試体

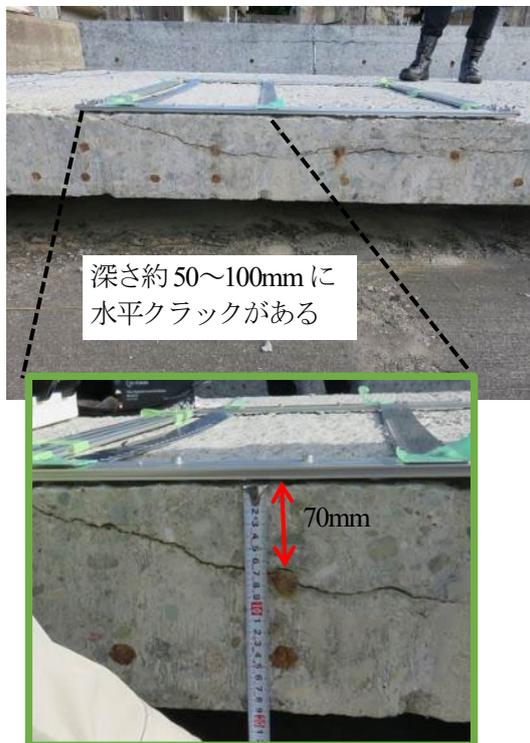


番号	模型種類
No.1	表面劣化&うき
No.2	ひび割れ

図-5.5.11 測定した撤去床版活用供試体

G橋（下り線） 撤去床版

水平クラック側（測定開始・手前側）の側面



反対側の側面



図-5.5.12 G橋（下り線） 撤去床版の概要

5.5.7 模型供試体 No.2 (ひび割れ) の測定

(1) 測定範囲

模型供試体 No.2 は図-5.5.13 で示す青枠の箇所がひび割れを模擬したものであり、着目する測定範囲となる。全測定範囲(55 測定分)は着目する範囲をほぼ中央とした赤枠で示す範囲とした。

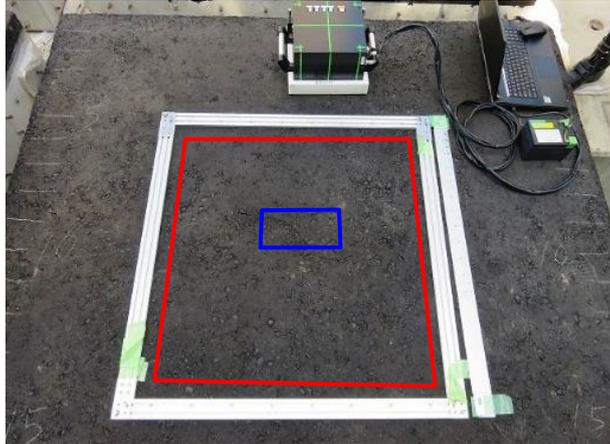


図-5.5.13 アスファルトを舗装した模型供試体 No.2 (ひび割れ)

(2) 超音波プローブの接触状態

供試体は凹凸があるため測定に際しては超音波プローブと供試体表面との接触状態を確認する必要がある。超音波プローブの接触状態はアレイ状 (16×8) となる近接するプローブ間の信号強度の加減で分かる。図-5.5.14 の二次元の図は供試体との接触状態を平面的に示したもので、黄色から緑色は概ね接触が良好であり青色は接触が弱いことを表す。また最濃紺色は計算に必要な信号レベルに達してないもので、128 個中それを除いた超音波送受信が有効なプローブの割合を接触率で表す。接触率は 100%であることが望ましく接触率低下は分解能に影響するが、その低下の影響度合いはケースバイケースである。なお、信号強度の差は後処理で補正している。

本測定での模擬供試体表面と超音波プローブとの接触率は 89.8%で、128 個中 13 個のプローブが有効に接触できていないことになる。特に図中の赤色曲線で示す付近が濃紺色で接触が弱くなっていることが分かるが、これはひび割れの形状と概ね一致しており、ひび割れ付近が周囲よりもやや凹んでいることが要因と考えられる。

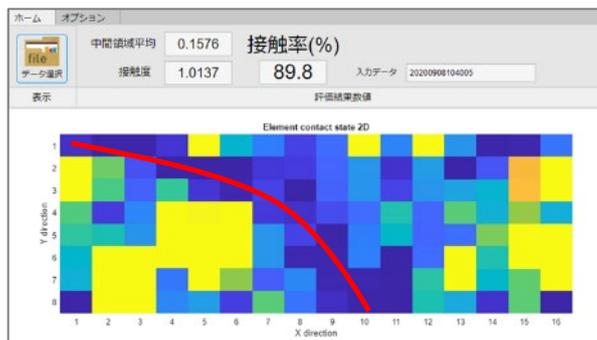


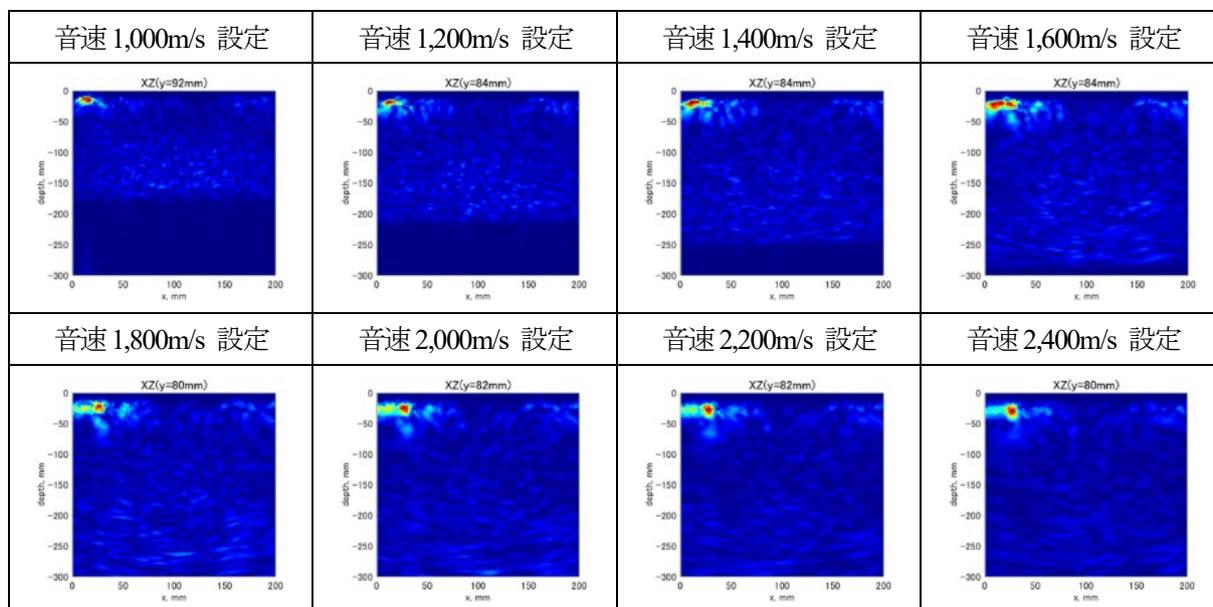
図-5.5.14 模型供試体 No.2 (ひび割れ) 超音波プローブの接触状態

(3) 画像化結果

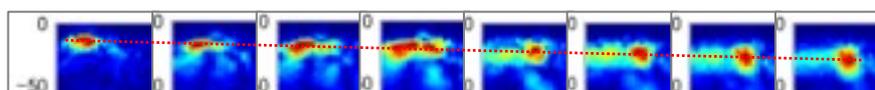
供試体内を画像化するにあたり、超音波エコーの反射位置を特定するためには供試体における超音波の透過速度情報が必要となる。透過速度は供試体の素材構成等により異なり、ドライコンタクト式の超音波非破壊計測装置は横波の超音波を発生しているが、横波の場合のアスファルトの超音波透過速度は文献²⁾からの弾性係数等を用いて1,000m/s～2,400m/sの範囲であると推定した。しかしながら推定範囲が広く、また、透過速度は素材構成等により供試体内では一様ではないと推測されるため、複数の音速設定を用いて画像化し反射位置の特定評価をすることとした。なお、音速設定は測定されたデータの後処理の際に用いられる。

図-5.5.15に着目範囲(200×100mm)の測定に関して画像化したXZ平面を示す。ここで、X、Y、Zはそれぞれ横、縦(奥行)、深さ方向を示す。なお、図では音速設定ごとに比較的強めの反射が得られたY方向のXZ平面を抽出している。また、図中の赤色は強い反射があったものである。音速設定による違いは、設定された音速より実際の音速が速い場合は反射距離が短く算出されることになるが、その様子は比較的音速が遅い1,000m/s設定側の方が画像化されたZ方向の深さが短いことから分かる。(紺色均一の箇所はデータ取得同一時間における設定速度で演算上の超音波未到達の領域を表す)

本測定では模擬供試体のアスファルトの厚さは約80mmであり、Z方向の80mm辺りにコンクリートとの境界が現れることを期待したがどの音速設定でも見出すことはできなかった。表層の骨材と考えられるエコー(赤色や水色)は検出できるが、ひび割れや内部の骨材等のエコーの検出は難しいという結果となった。この結果は全測定範囲(55測定分)でも同様であった。



縦軸を深さ方向とした断面画像 (Y方向で比較的反射強度の強いXZ面について)



音速 1,000m/s 設定

(左上拡大図)

音速 2,400m/s 設定

図-5.5.15 模型供試体供試体 No.2 (ひび割れ) 音速設定ごとの画像化結果

5.5.8 模型供試体 No.3(防水層シート上面)の測定

(1) 測定範囲

模型供試体 No.3 の平面方向の状態は概ね均一と仮定し、図-5.5.16 で示す中央付近の青色箇所を着目する測定範囲とし、全測定範囲(55 測定分)は着目する範囲をほぼ中央とした赤枠で示す範囲とした。

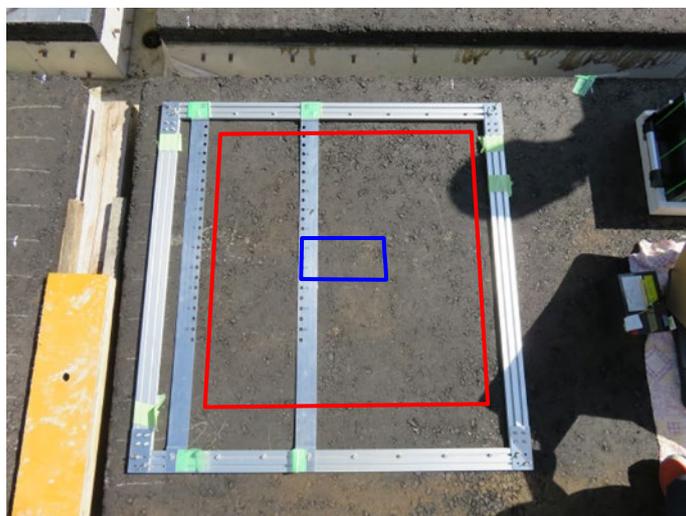


図-5.5.16 アスファルトを舗装した模型供試体 No.3 (防水層シート上面)

(2) 超音波プローブの接触状態

図-5.5.17 は模擬供試体表面と超音波プローブとの接触状態を示す。着目範囲における接触率は 95.3% であり有効に接触できていないプローブは周辺の 6 個であり、測定面に対して概ね良好に接触している。

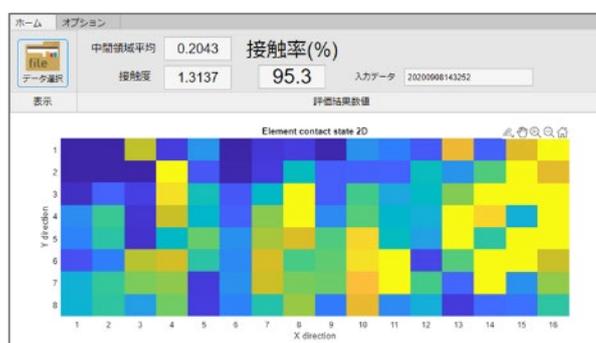
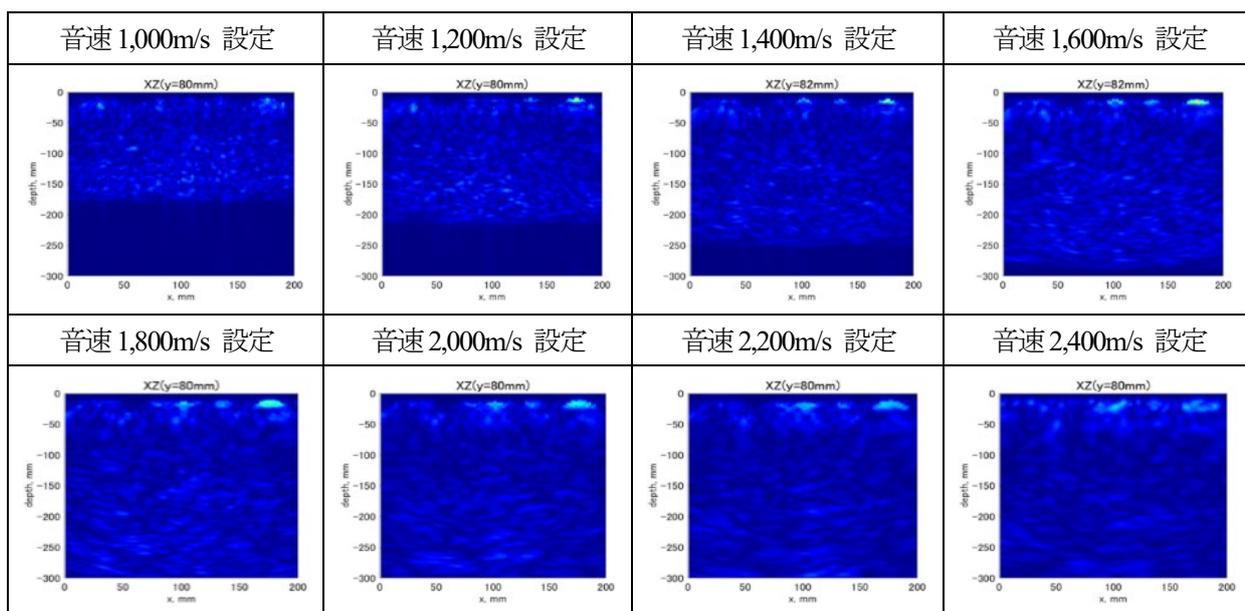


図-5.5.17 模型供試体 No.3 (防水層シート上面) 超音波プローブの接触状態

(3) 画像化結果

図-5.5.18 に着目範囲 (200×100mm) の測定に関して画像化した XZ 平面を示す。本測定での模擬供試体のアスファルトの厚さは約 80mm であり、Z 方向の 80mm 辺りにコンクリートとの境界や防水層 (シート) の様子が現れることを期待したが見出すことはできなかった。また、表層の骨材と考えられるエコー (水色) は検出できるが、内部の骨材等や滞水などのエコーは検出できていない結果となった。この結果は全測定範囲 (55 測定分) でも同様であった。



縦軸を深さ方向とした断面画像 (Y 方向で比較的反射強度の強い XZ 面について)

図-5.5.18 模型供試体 No.3 (防水層シート上面) 音速設定ごとの画像化結果

5.5.9 撤去床版活用供試体 No.2 (ひび割れ) の測定

(1) 測定範囲

撤去床版活用供試体 No.2 の平面方向の状態は概ね均一と仮定し、図-5.5.19 で示す中央付近の青色箇所を着目する測定範囲とし、全測定範囲(55 測定分)は着目する範囲をほぼ中央とした赤枠で示す範囲とした。

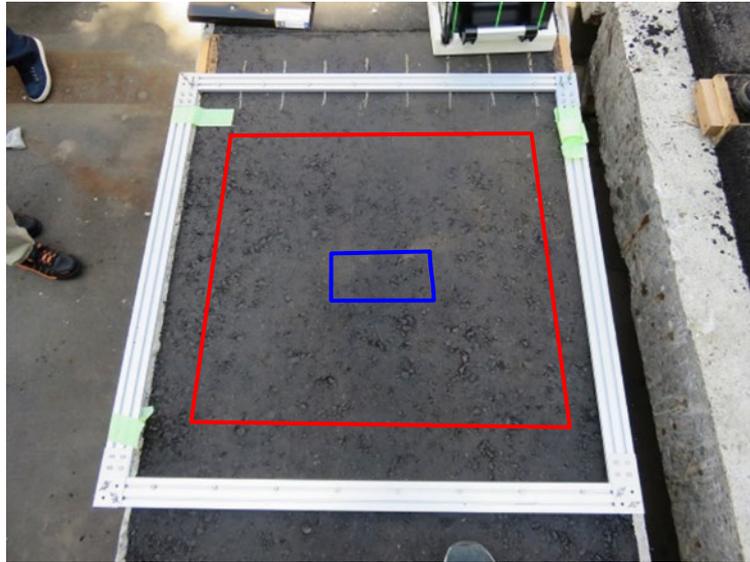


図-5.5.19 アスファルトを舗装した撤去床版活用供試体 No.2 (ひび割れ)

(2) 超音波プローブの接触状態

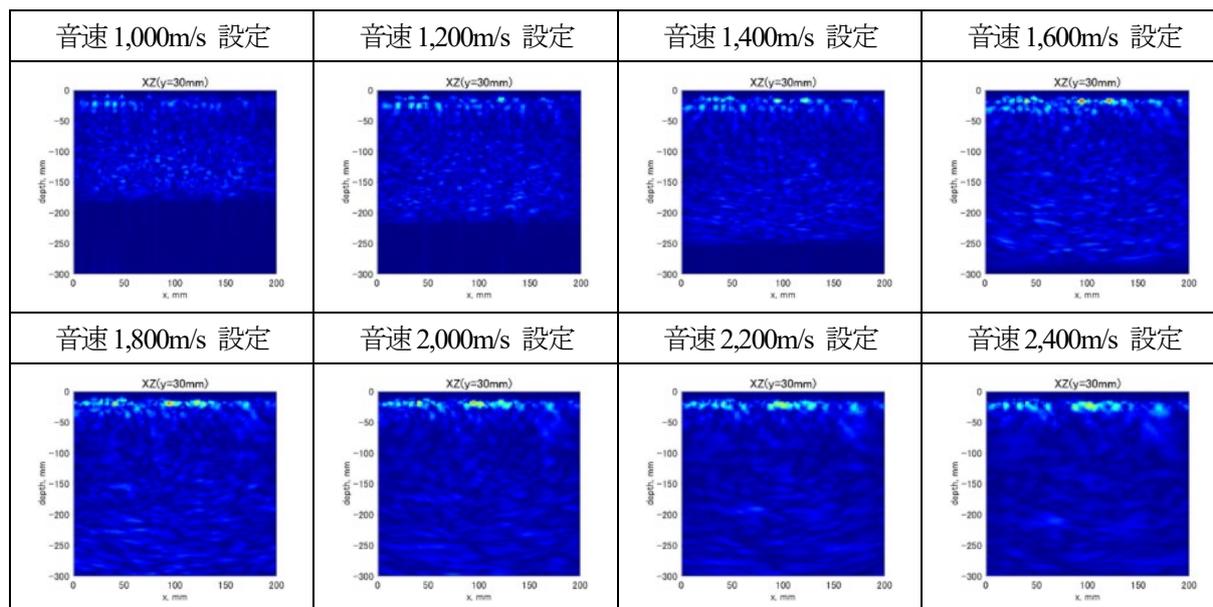
図-5.5.20 は模擬供試体表面と超音波プローブとの接触状態を示す。着目範囲における接触率は 99.2% であり有効に接触できていないプローブは周辺の 1 個であり、測定面に対して概ね良好に接触している。



図-5.5.20 撤去床版活用供試体 No.2 (ひび割れ) 超音波プローブの接触状態

(3) 画像化結果

図-5.5.21 に着目範囲 (200×100mm) の測定に関して画像化した XZ 平面を示す。本測定での撤去床版活用供試体のアスファルトの厚さは約 80mm であり、Z 方向の 80mm 辺りにコンクリートとの境界や土砂化の様子が現れることを期待したが見出すことはできなかった。また、表層の骨材と考えられるエコー (赤色や水色) は検出できるが、内部の骨材等やひび割れ部分などのエコーは検出できていない結果となった。この結果は全測定範囲(55 測定分)でも同様であった。



縦軸を深さ方向とした断面画像 (Y 方向で比較的反射強度の強い XZ 面について)

図-5.5.21 撤去床版活用供試体 No.2 (ひび割れ) 音速設定ごとの画像化結果

5.5.10 G橋（下り線） 撤去床版の測定

(1) 測定範囲

撤去床版の測定範囲は図-5.5.22 及び図-5.5.23 で示す赤枠で示した範囲に着目して行った。床版の縁に水平クラックが見られる側を測定 001 とし、図-5.5.23 に示すとおり 1 回で測定できる範囲の半分(約 50mm)ずつシフトさせながら計 33 測定を行った。

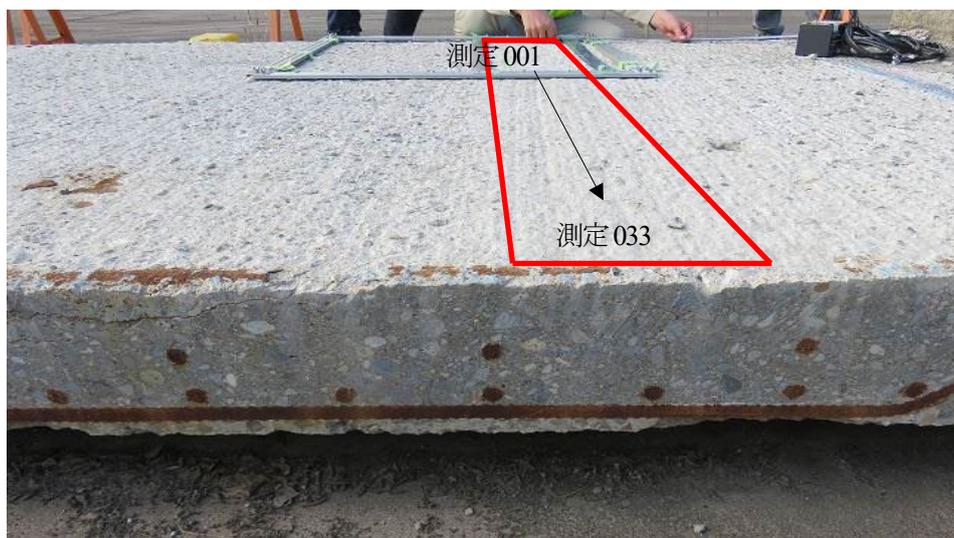


図-5.5.22 撤去床版の測定範囲

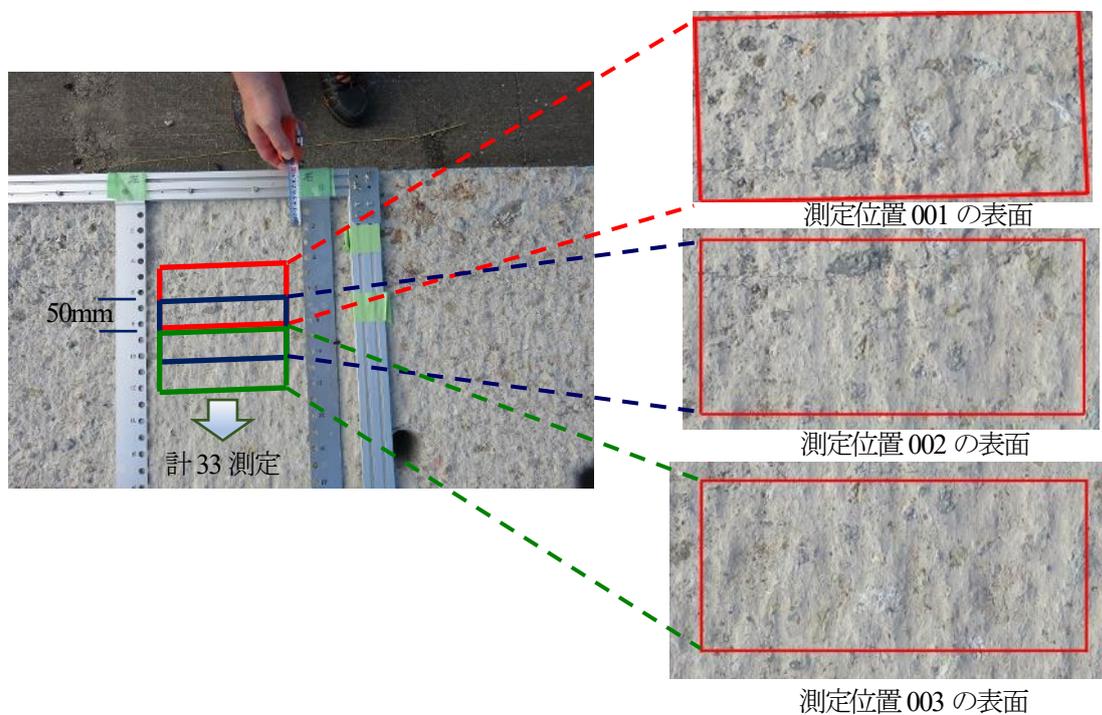


図-5.5.23 撤去床版の測定位置

(2) 表面状態及びプローブの接触状態

撤去床版の表面は図-5.5.24 で分かるように凹凸が激しく、凹凸差が 5mm を超えるとプローブのスプリング機構で吸収できないため、測定に際しては超音波プローブと供試体表面との接触状態を確認する必要がある。

測定した 33 箇所の接触状態を数値化した結果を図-5.5.25 に示す。表中の接触率は超音波送受信が有効となっている超音波プローブ 128 個中の割合を示す。また、接触度は表面が比較的平坦なモルタルを基準供試体として測定したときの平均受信強度を 1.0 としたときに対する受信強度比率を示す。受信強度は 0.8 以上であれば概ね良好と判断でき、同表からは番号 5, 9, 28 以外は概ね良好と判断できる。

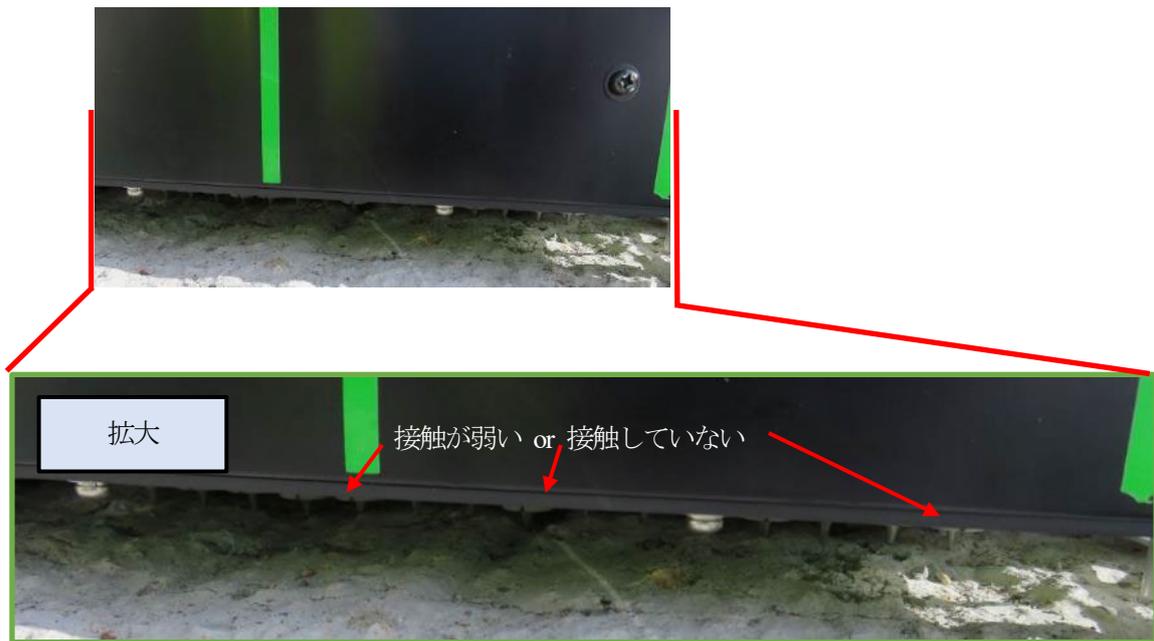
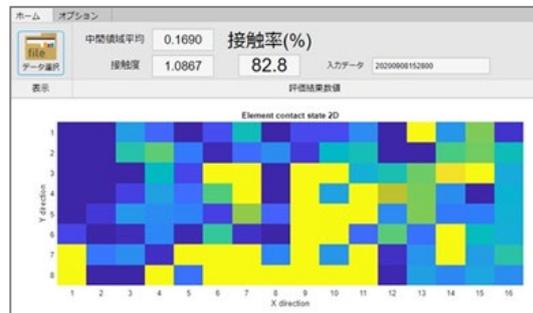


図-5.5.24 撤去床版の表面及びプローブの接触状態

番号	接触率	接触度
1	82.8%	1.0867
2	79.7%	1.028
3	85.2%	0.9656
4	84.4%	0.851
5	80.5%	0.6809
6	82.0%	0.8422
7	91.4%	0.9258
8	71.1%	0.8535
9	71.9%	0.7928
10	78.9%	0.9435
11	86.7%	0.9348
12	78.9%	0.8033
13	88.3%	0.8533
14	78.9%	0.9105
15	87.5%	0.811
16	91.4%	0.8354
17	78.9%	0.9643
18	77.3%	0.8641
19	78.9%	0.9479
20	86.7%	0.8159
21	84.4%	1.0046
22	83.6%	0.9085
23	89.1%	0.9507
24	85.2%	0.8934
25	74.2%	0.8406
26	75.8%	0.8689
27	78.9%	0.8608
28	88.3%	0.7809
29	83.6%	0.8194
30	82.8%	0.8415
31	91.4%	0.8701
32	86.7%	0.8519
33	89.8%	0.9545



例：番号1（測定位置001）における超音波プローブの接触状態

図-5.5.25 撤去床版表面における超音波プローブの接触状態

(3) 撤去床版 各計測位置の画像化結果

本計測の画像化結果例として、計測位置 001, 002, 003 についてそれぞれ図-5.5.26, 図-5.5.27, 図-5.5.28 に示す。また、全測定位置（測定位置 001～033）の XZ 断面の画像化結果を図-5.5.29 及び図-5.5.30 に示す。

計測位置 001

超音波プローブの接触状態は、左上の濃紺色（プローブが接触していない箇所）を除けば概ね良好に接触している。着目箇所の中央（床版の縁から約 218mm）をスライスした XZ 断面より、強いエコーが散見される。

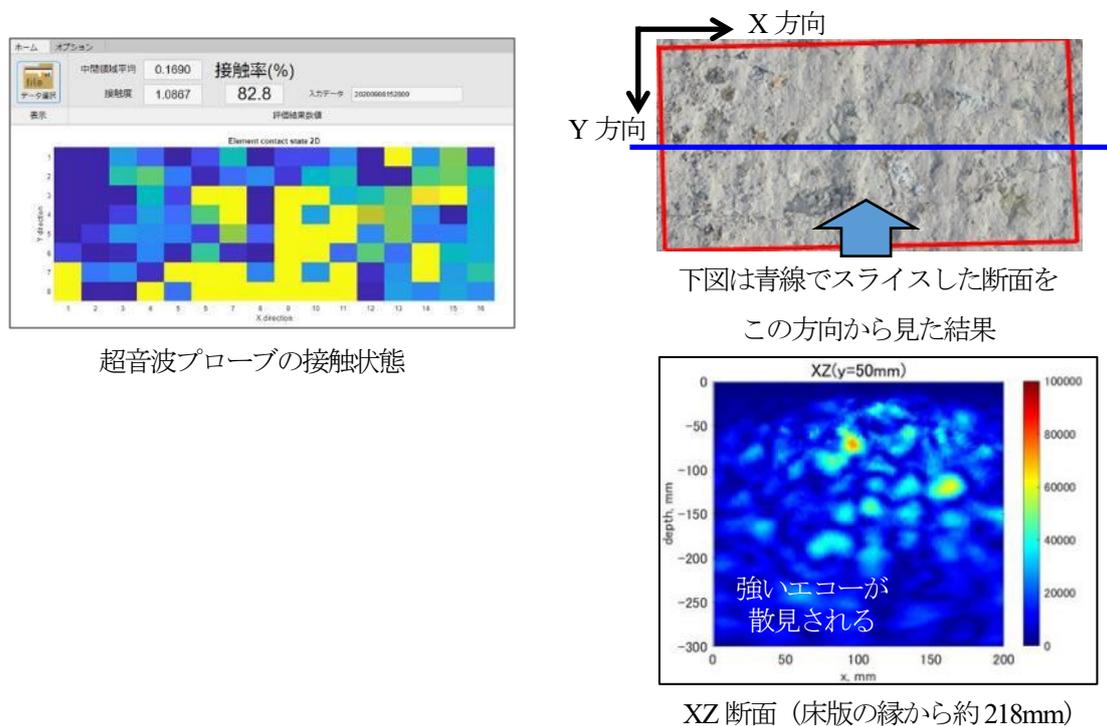


図-5.5.26 計測位置 001 の画像化結果

計測位置 002

超音波プローブの接触状態は、ひび割れ及び溝が深いと見られる上から2段目あたりは濃紺色だが、その他は概ね良好に接触している。XZ断面には強いエコーが散見される。

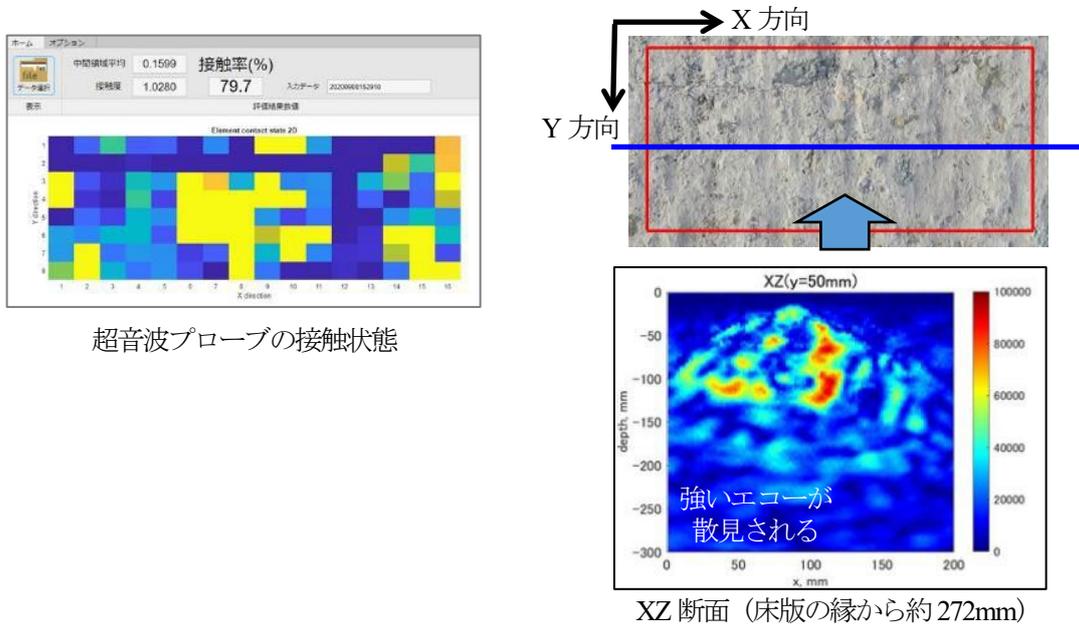


図-5.5.27 計測位置 002 の画像化結果

計測位置 003

超音波プローブの接触状態は、左下及び右下側の一部が濃紺色であるが、それ以外は概ね接触している。XZ断面には強いエコーは見られない。

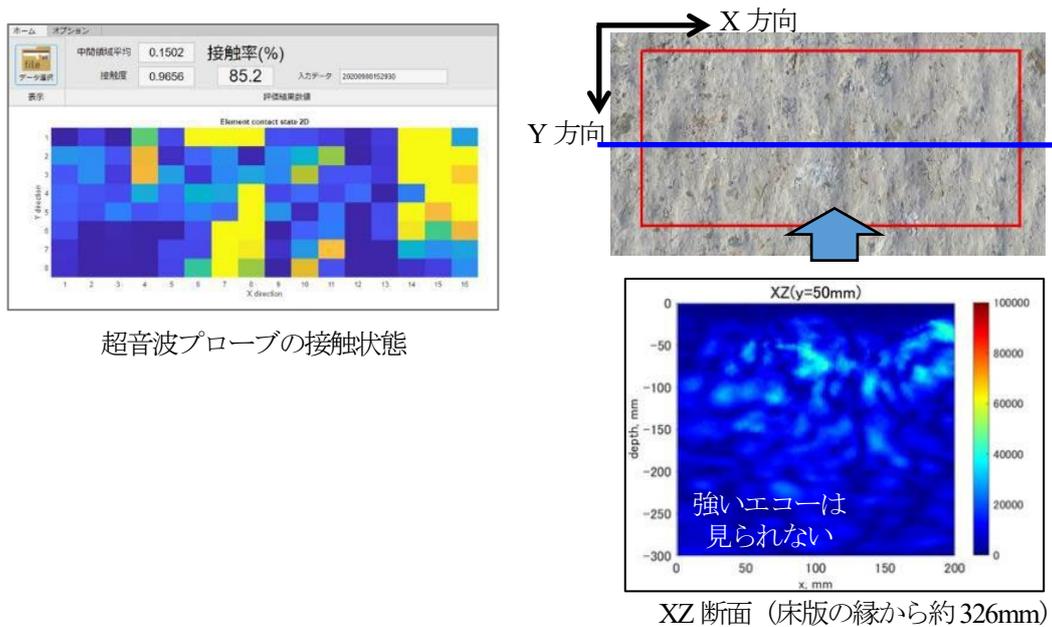
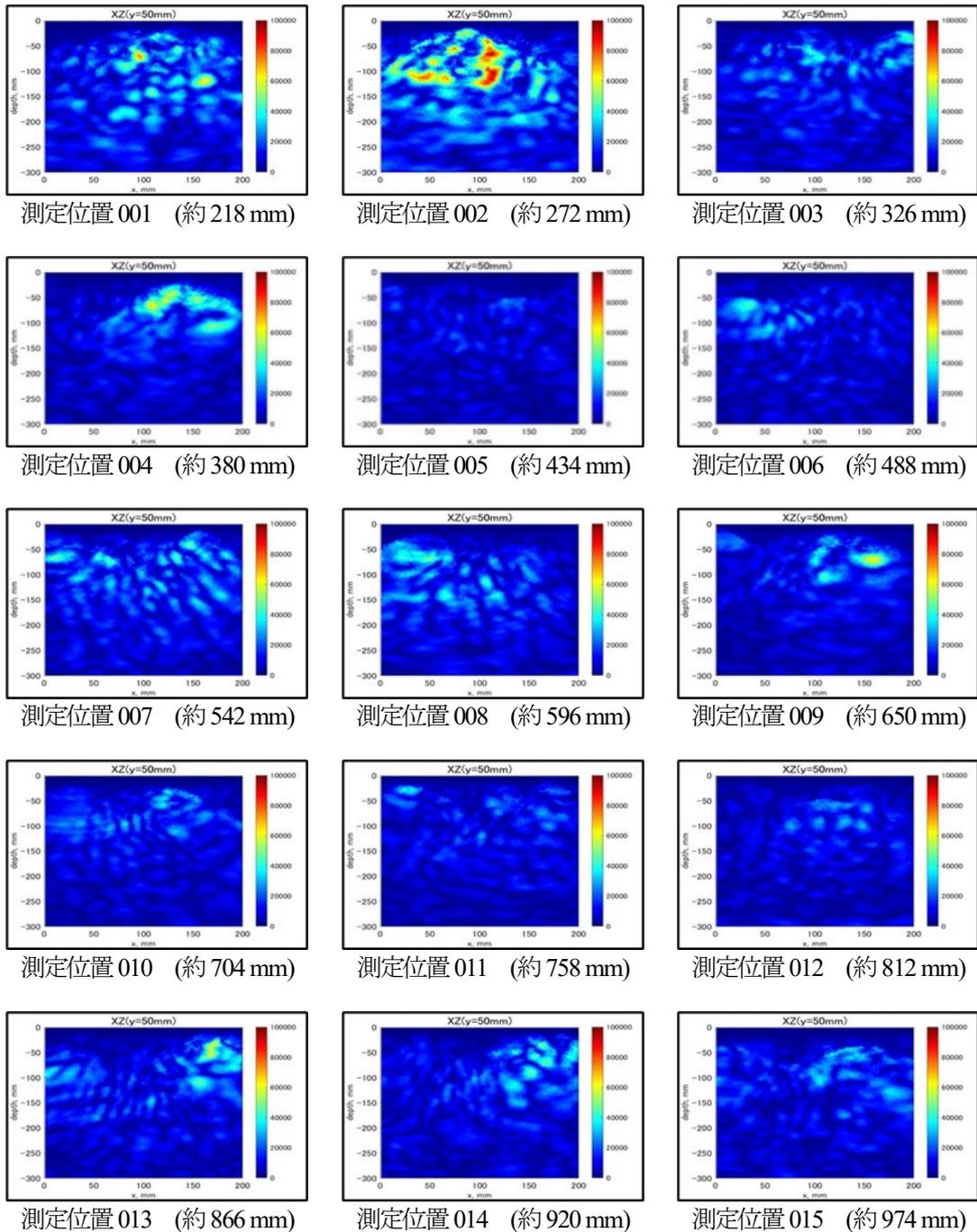


図-5.5.28 計測位置 003 の画像化結果

全測定位置（測定位置001～033）のXZ断面

測定位置001, 002では、比較的強いエコー（赤色）が散見されるが、床版の縁から確認できる水平クラックに起因するエコーと考えられる。測定位置003以降では、断片的なエコーのみであった。



各測定位置のXZ断面（横軸：横X方向，縦軸：深さZ方向）画像

()は床版の縁からのY方向の位置

図-5.5.29 全測定位置による撤去床版内部の画像化結果（測定位置001～015）

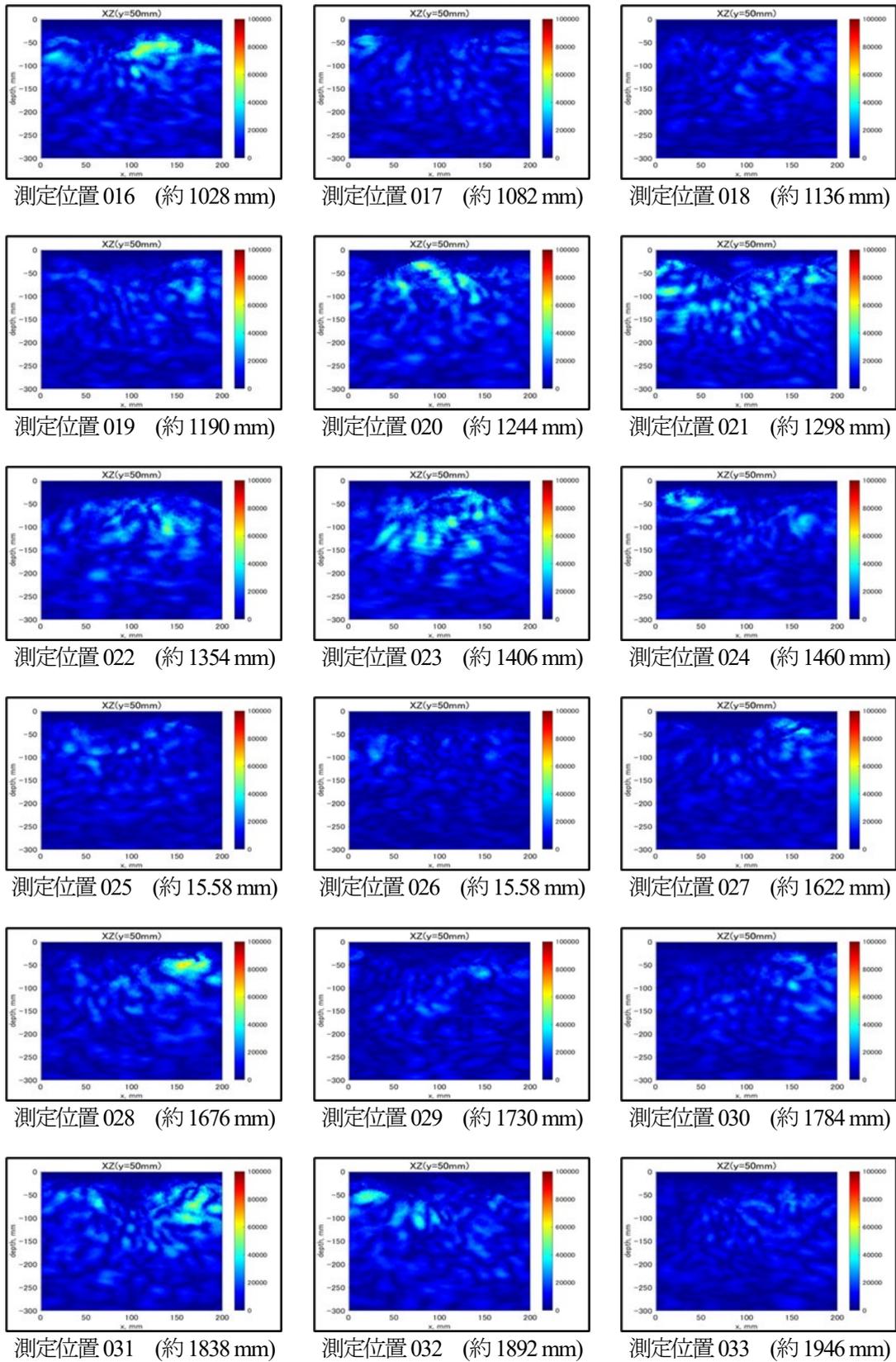


図-5.5.30 全測定位置による撤去床版内部の画像化結果 (測定位置 016~033)

5.5.11 計測結果・考察

床版上面の滞水を模擬可能な模型供試体では、アスファルト舗装面に超音波プローブ(探触子)が概ね良好に接触できており、計測は問題なく行うことができた。しかしながら、表面の骨材は検出できていたが、床版上面の滞水は検出できていない結果となった。要因としては、アスファルト舗装は側面から見た時に内部に多くの空隙が存在するように見受けられるため、コンクリートと異なりアスファルト舗装内部での散乱が多いことや横波の吸収減衰が大きいことが考えられる。従って、超音波非破壊計測装置ではアスファルト下の滞水及びコンクリートの土砂化の検出は困難と考えられる。

G 橋（下り線）の撤去床版では、コンクリート面に超音波プローブ(探触子)が概ね良好に接触できており、計測は問題なく行うことができた。床版の縁からの水平クラックについては、測定位置 001、測定位置 002 では強いエコーが散見されたのに対し測定位置 003 以降では断片的なエコーのみであったことから、床版の縁（測定開始位置）から確認できる水平クラックは約 300mm 程度の範囲に留まっていると推定する。このことより、水平クラックに関しては検出できる可能性があることが分かった。

5.5.12 まとめ

本節では、超音波非破壊計測装置を用いて、土研敷地内にある床版上の滞水状態を模擬できる模型供試体、及び土砂化した撤去床版の上に舗装されたアスファルト面から、滞水及び土砂化の検出が可能であるかを調査した。

また、G 橋（下り線）から撤去された床版を用いて、コンクリート面から土砂化又はその兆候とされる水平クラックの広がり等の検出が可能であるかを調査した。以下に得られた知見を示す。

- (1) アスファルト舗装面からの床版上面の滞水及び土砂化の検出については、超音波非破壊計測装置を用いて検出することはできなかった。要因としてはアスファルト内に空隙が多く、超音波の吸収が多いためと考えられる。
- (2) コンクリート面からの土砂化の兆候とされる水平クラックの検出については、超音波非破壊計測装置を用いて検出できる可能性が得られた。なお、今回用いた超音波非破壊計測装置は開発途上のものであり、より正確に検出するためには、測定パラメータや信号処理の工夫が今後必要になると考える。

5.6 まとめ

本章では、土木研究所が保有する床版上面の滞水を模擬した模型供試体及び、床版上面の劣化を模擬した模擬床版を用いて、滞水あるいは床版劣化検知手法としての各非破壊検査技術の適用性について検証を行った。以下に得られた知見を示す。

【車載式電磁波レーダ】

- ・ 滞水を模擬していない供試体の計測の結果、床版上面付近の反射強度は全体的に同程度であり、滞水がないことを精度よく検知できた。
- ・ 滞水を模擬した供試体の計測の結果、床版防水層の材料の違い（シート系・塗膜系）や滞水の位置の違い（防水層の上または下）によらず、滞水箇所は非滞水箇所より相対的に反射強度が大きくなっており、模擬した滞水を精度よく検知できた。
- ・ 滞水状態まではいかない水分状態（湿潤状態）について、非滞水の場合と比較すると反射強度が相対的に大きいものの、滞水箇所と比較すると相対的に小さく、精度よく検知することは困難であった。

【ハンディ式電磁波レーダ及び高周波型カート式電磁波レーダ】

- ・ カート式レーダ及びハンディ式レーダによる平面コンター図を比較した結果、全ての供試体においてデータ取得ピッチの細かいハンディ式レーダのほうが鮮明な画像が取得できた。
- ・ 「滞水」箇所は、カート式レーダ、ハンディ式レーダ共に平面コンター図から滞水範囲を比較的容易に識別できた。しかし、滞水の位置が防水層の上面なのか下面なのかは識別困難であった。
- ・ 「土砂化」箇所は、カート式レーダ、ハンディ式レーダ共に比較的容易に識別できた。
- ・ 「表面劣化」及び「うき」は、カート式レーダでは識別困難であった。
- ・ まず車載式レーダを用いて損傷が進行する可能性の高い範囲をスクリーニングし、その後カート式やハンディ式レーダを用いた詳細調査で細密なデータを取得することで損傷範囲・深さを推定する方法が効率的と考えられる。

【ハンディ式電磁波レーダレーダを用いた滞水検知に関する解析手法の検討】

- ・ RPM 法と逆散乱解析法の一つである CSI 法を融合した提案方式を用いることで、既存の距離点画像法に比べ対象の空洞（乾燥状態）、滞水（注水状態）を明確に判別できた。

【超音波探査】

- ・ アスファルト舗装面からの床版上面の滞水及び土砂化の検出について、超音波非破壊計測装置を用いて検出することはできなかった。
- ・ コンクリート面からの土砂化の兆候とされる水平クラックの検出について、超音波非破壊計測装置を用いて検出できる可能性が得られた。

第5章 参考文献

- 1) 物理探査学会：物理探査ハンドブック，手法編，第7章，pp.403-404，1998
- 2) 西山大三，松井邦人，菊田征勇，東滋夫：舗装を構成する各層の密度，減衰係数および弾性係数の推定法の開発，土木学会論文集 E Vol.64 No.4，pp.572-579，2008.11

第6章 電磁波レーダを用いた床版滞水推定 AI の構築

本章では、床版上面の滞水検知の効率化・省力化を目的に、人工知能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床版滞水推定 AI を構築した。床版滞水推定 AI の内容や模型供試体を用いて行った推定精度の検証結果、及び実橋への床版滞水推定 AI の適用結果について述べる。

6.1 床版滞水推定 AI

6.1.1 概要

前章までで、床版上面の滞水及び劣化検知に対する、各非破壊検査技術の適用性の検証結果について記した。特に電磁波レーダについては、平面コンター図や縦断スライス図を観察することで、床版上面の滞水や土砂化等の床版状態をある程度視覚的に検知できることが確認できた。しかし、滞水や土砂化等の有無の判断は、熟練の解析技術者が平面コンター図や縦断スライス図を1つずつ確認した上で行っており、多大な労力を要しているのが現状である。また、判断基準が定性的であり、判断する人間により結果にばらつきが生じるおそれがある。

膨大な量の道路橋を効率的に維持管理していくためには、劣化が進行・顕在化する前に劣化の兆候を早期検知し予防保全を行う必要がある。床版上面の滞水検知についてもより効率化・省力化が求められる。また、現場で広く活用していくためには、経験の乏しい技術者でも滞水の有無を判断できるよう分かりやすい判断基準とする必要がある。

以上のような課題への対応策として、人工知能（以下、AI という）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手法（以下、床版滞水推定 AI）の検討を行った。

6.1.2 床版滞水推定 AI の構築方針

機械学習の手法には、「教師あり学習」と「教師なし学習」の2種類がある。「教師あり学習」は、入力と正解が対になったデータを入力し、その関係性を再現するようなモデルを生成する手法である¹⁾。一方、「教師なし学習」は、正解のないデータを入力し、抽出した特徴のパターンを基に類似したグループを見つけ、それぞれのモデルを生成する手法である¹⁾。床版滞水推定 AI 構築においては、電磁波レーダ計測により取得される波形データが健全箇所と滞水箇所では異なる波形を示すことに着目し、車載式電磁波レーダ計測により取得した電磁波波形データを入力データ、舗装開削後に床版水分計で取得した床版上面水分量を正解データとする教師あり学習を行うこととした。床版滞水推定 AI の機械学習のイメージを図-6.1.1 に示す。

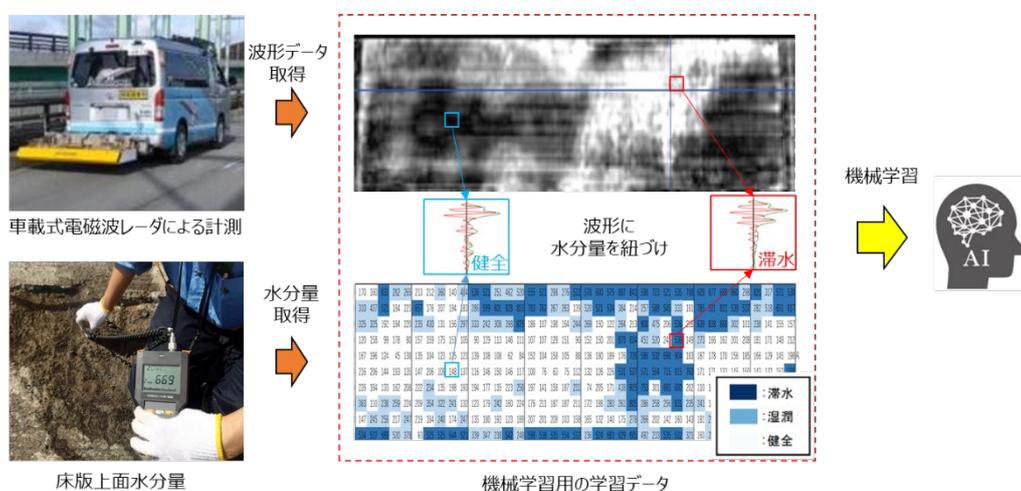


図-6.1.1 床版滞水推定 AI の機械学習のイメージ

6.1.3 学習データの取得及び加工

床版滞水推定 AI 構築に必要な学習データ（電磁波形データ及び床版上面水分量）を取得するため、中部地方に位置する I 橋において、道路管理者の協力の下、調査橋梁の補修工事の工程に合わせて調査を実施した。本橋は調査時点で供用後 41 年が経過した単純非合成鉄桁橋であり、床版下面の一部に遊離石灰を伴う 2 方向ひび割れが確認されている。I 橋の外観写真及び橋梁諸元をそれぞれ写真-6.1.1 及び表-6.1.1 に示す。

調査は、工事による交通規制が行われる前に車載式電磁波レーダによる計測を行い、補修工事による舗装開削後に床版上面の水分量測定を実施した。用いた車載式電磁波レーダの仕様及び水分計の仕様は、それぞれ 3.3 及び 4.3 の電気抵抗式水分計と同様である。

電磁波レーダの計測結果及び床版上面水分量計測結果を図-6.1.2 及び図-6.1.3 に示す。床版上面水分量の測定は対象橋梁の下り線（図-6.1.2 赤枠部）のみ実施しており、計測ピッチは橋軸方向、橋軸直角方向共に 50cm 間隔のメッシュ割で計測を行い、メッシュ内で最も水分量が高いとみられる箇所の数値を記載している。電気抵抗式水分計は、計測面の水分量をカウント値（電気抵抗換算値）として表示できるものであり、カウント値が大きければ水分量が多いことを意味する。カウント値は、既往の研究²⁾よりコンクリート表面の水分状態との関係が図-6.1.4 のとおり整理されている。

取得した 2 つのデータは、調査方法及び使用機器が異なることから位置関係が合っていないため、座標合わせの処理を行い双方のデータの位置関係を対応させた。また、電磁波レーダは橋軸方向及び橋軸直角方向に 7.5cm の間隔でデータを取得しているのに対し、水分カウント値は 50cm 間隔で取得しているため、水分カウント値 1 データの範囲内（50cm×50cm）に約 44 個の電磁波レーダの波形データが存在している。そのため、44 個の反射波のうち、振幅が正の側で最大となる波形データを 44 個のデータの代表値とし、水分量データと紐づけることとした。この処理によって、正解データと対となる波形データを決定した。



写真-6.1.1 I 橋 外観写真

表-6.1.1 I橋 橋梁諸元

供用年	1978年(昭和53年)
供用後経過年数	44年
上部工形式	単純鋼非合成鉄桁橋×1連
橋長	20.00m
床版構造	RC床版

単位：m

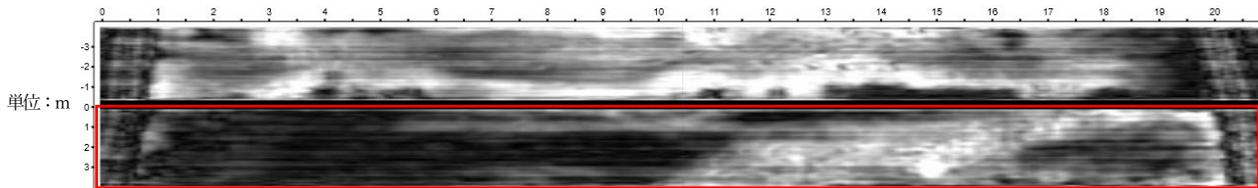


図-6.1.2 車載式電磁波レーダ計測結果(平面コンター図)

単位：cm

A1	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500	1550	1600	1650	1700	1750	1800	1850	1900	A2	
0	170	160	833	282	265	213	212	360	140	484	536	521	251	462	520	555	521	298	276	532	578	600	579	887	841	598	723	521	535	708	628	877	688	860	298	820	317	571	530		
50	310	437	521	184	223	657	176	207	194	183	286	599	601	828	851	783	762	267	263	139	520	521	524	384	214	257	588	545	333	181	785	521	822	539	537	282	518	651	817		
100	325	325	192	184	220	235	430	131	156	297	333	242	308	398	875	186	107	198	164	244	269	150	122	264	213	900	475	206	536	218	639	838	868	302	101	238	141	155	157		
150	120	158	99	178	80	157	159	175	151	105	90	129	113	146	111	107	107	128	151	90	152	150	201	870	834	452	520	247	536	149	273	166	162	201	208	181	171	148	212		
200	167	196	124	45	138	135	104	123	125	123	139	108	108	62	84	152	104	158	105	88	136	180	189	176	726	586	532	698	904	183	187	178	170	156	185	166	129	145	198		
250	216	206	144	193	135	147	206	109	148	137	116	146	150	146	117	100	76	63	75	112	132	126	226	531	537	571	564	715	915	763	171	171	132	145	150	143	132	152	599		
300	226	184	133	162	208	222	234	135	198	193	194	177	135	223	250	197	141	158	187	231	74	205	171	438	915	753	301	665	600	202	110	163	231	72	145	132	240	210	169		
350	363	110	238	259	224	209	354	322	241	132	123	179	242	160	224	176	211	187	187	211	172	188	283	261	805	286	258	256	831	235	241	189	304	199	250	163	329	167	522		
400	147	245	256	217	247	219	184	240	174	247	135	180	192	123	189	207	201	209	103	158	165	132	140	175	278	266	202	142	160	143	181	231	165	225	67	138	229	113	149		
450	534	537	688	520	378	93	525	525	644	521	339	347	238	542	248	598	538	535	554	532	236	524	683	629	685	492	233	535	532	321	160	283	522	522	609	298	644	719	489		

図-6.1.3 床版上面水分量計測結果

コンクリート表面の水分状態	カウント値の目安									
①絶乾状態	10	55								
②乾燥状態	60	132								
③表面乾燥状態	137	230								
④湿潤状態	235	520								
⑤滞水状態	521	744								
	100	200	300	400	500	600	700			
	電気抵抗式水分計(カウント値)									

図-6.1.4 カウント値とコンクリート表面の水分状態の関係

6.1.4 分類モデルの構築

電磁波レーダの波形データを入力データ、床版上面水分量を正解データとして教師あり学習を行い、電磁波レーダ計測により取得した波形データを入力することで、その橋梁の床版上面の水分カウント値を推定し、その値に応じていくつかの水分状態に分類する分類モデルを構築する。水分カウント値による床版状態の分類基準は、図-6.1.4 のコンクリート水分状態とカウント値との関係を参考に、「健全部」「湿潤部」「滞水部」の3つのクラスへ分類する仕様とした。表-6.1.2 に水分状態の分類基準を示す。また、この分類基準に従いI橋における床版上面水分量の測定結果を分類した正解データの分布を図-6.1.5 に示す。縦軸・横軸はそれぞれ基点からの距離 (cm) を示しており、白色が健全部、薄い水色が湿潤部、濃い青色が滞水部を示している。

表-6.1.2 水分状態の分類基準

床版状態	分類基準
健全部	水分量 ≤ 230
湿潤部	$230 < \text{水分量} \leq 520$
滞水部	$520 < \text{水分量}$

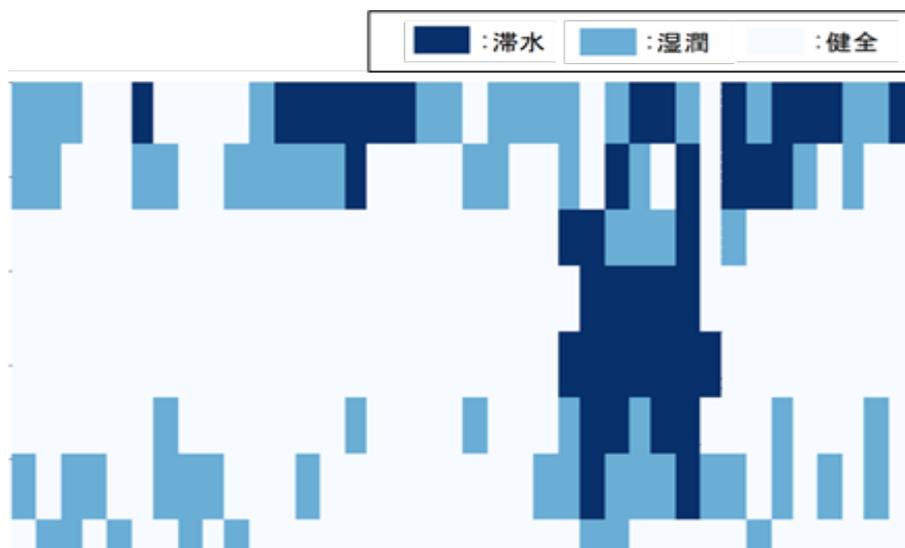


図-6.1.5 正解データの分布

分類モデル構築に用いる電磁波形データは、取得した深さ方向 71 サンプル全てを含むデータとし、以下に示す手順でモデル構築を実施した。

(1) アルゴリズム (分類方法) の検討

AI が入力された波形データを表-6.1.2 に示した分類基準に従って分類していくうえで、最適なアルゴリズムの検討を行った。

教師あり学習で使用されるアルゴリズムの中から、分類精度や計算コストの観点より複数のアルゴリズムを選択し、各アルゴリズムを用いた推定モデルの構築を行った。表-6.1.3 に今回検討を実施したアルゴリズムの一覧、表-6.1.4 に各アルゴリズムの主要パラメータを示す。機械学習前の前処理として、各アルゴリズムに応じた特徴量の標準化または正規化を実施した。パラメータの設定については、デフォルト値を基本としアルゴリズムの違いによる精度の違いに着目した。なお、通常は精度を向上させるために使用するデータの傾向に合わせてパラメータの値を設定するのが望ましいが、本研究では実施していない。

表-6.1.3 検討アルゴリズム一覧

手法	アルゴリズム	前処理手法
回帰	ロジスティック回帰	標準化
	SVM	標準化
木	決定木	正規化
	ランダムフォレスト	正規化
ニューラルネットワーク	ニューラルネットワーク	標準化

表-6.1.4 各アルゴリズムの主要パラメータ

アルゴリズム	ハイパーパラメータ
ロジスティック回帰	ペナルティ項: L2正規化 C: 1.0
SVM	カーネル: rbf C: 1.0 γ : 0.01
決定木	深さ: 10
ランダムフォレスト	深さ: 30 決定木数: 100
ニューラルネットワーク	中間層の階層数: 2 各中間層の変数数: 1層目が30, 2層目が10 各中間層の活性化関数: ReLU 最適化アルゴリズム: 勾配降下法 学習率: 0.01

(2) 機械学習によるモデル構築と交差検証

各アルゴリズムに応じた前処理を行った学習データを用いて機械学習を実施し、分類モデルを構築した。さらに構築した分類モデルの汎化性能の評価のため、K 分割交差検証を実施した。この検証手法は、データを K 個のグループに分割し、1 つのグループを評価用データ、それ以外のグループを学習用データとして精度検証を行う手法である³⁾。評価に使用するデータを K 回入れ替えることで、K 回の精度検証を行うことが可能である。本検証では 5 分割の交差検証を実施した。交差検証のイメージを図-6.1.6 に示す。

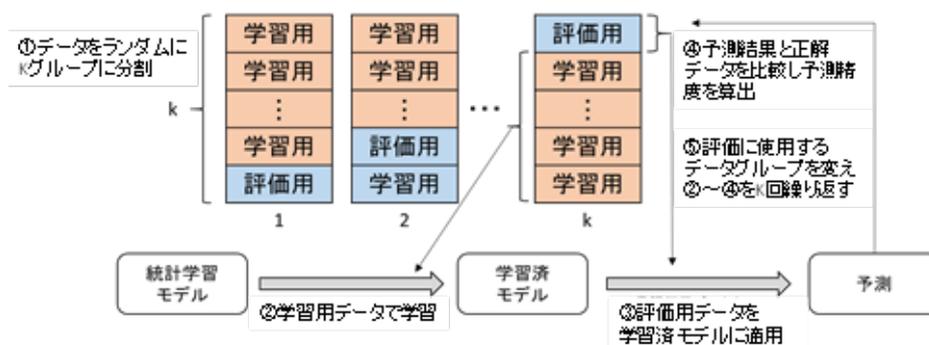


図-6.1.6 交差検証のイメージ

(3) 分類モデルの精度評価

構築した分類モデルが、入力された波形データをどの程度の精度で推定することができたのかを検証するため、分類モデルの精度評価を実施した。

評価はまず表-6.1.2 に示したクラス（健全部・湿潤部・滞水部）ごとに個別指標で評価し、その後全体指標で総合的に評価した。用いた個別指標及び全体指標を表-6.1.5 及び表-6.1.6 に、個別指標の概念図を図-6.1.7 に示す。適合率は間違いの少なさを、再現率は漏れの少なさを表す指標である。例えば適合率が高く再現率が低い場合は、正確に分類できているが分類できた数が少ないモデルであることを意味する。逆に再現率が高く適合率が低い場合は、漏れなく分類できているが誤判定が多いことを意味する。F 値は 1 に近いほど精度が良いことを意味する。

表-6.1.5 個別指標

指標	特徴
適合率	Aと予測したデータの内、実際にAであるものの割合
再現率	実際にAであるもののうち、Aであると予測されたものの割合
F値	適合率と再現率の双方を用いた評価尺度 総合的に各クラスに対する予測精度を表す指標 $F - measure = \frac{2(適合率 * 再現率)}{適合率 + 再現率}$

表-6.1.6 全体指標

指標	特徴
正解率	予測した結果の内、予測が正解だったものの割合 予測に対して答えがどの程度当たっているかを示す指標
マクロ平均F値	各クラスのF値の平均値 各クラスの分類精度を総合的に評価する指標

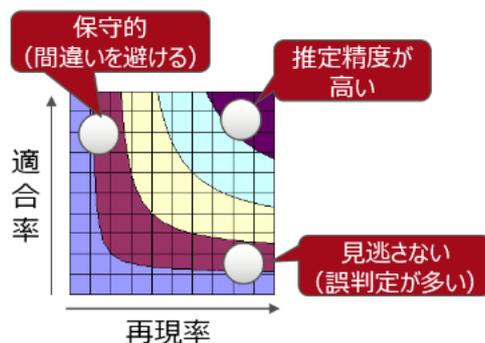


図-6.1.7 個別指標のイメージ

各アルゴリズムによる分類精度（個別指標）を図-6.1.8に、分類精度（全体指標）を表-6.1.7に示す。ランダムフォレストのみ分類した各クラスのF値が全て8割以上の精度を示し、全体指標でもマクロ平均F値、正解率とも最も高い値となった。ランダムフォレストにより分類したデータの分布を図-6.1.9に示す。図-6.1.5同様白色が健全部、薄い水色が湿潤部、濃い青色が滞水部を示しており、図-6.1.5に示した正解データ（床版上面水分量計測結果）の分布と類似した結果を示した。

以上の結果より、最も高い精度を示したランダムフォレストを用いて分類モデルの構築を行い、このモデルを床版滞水推定AIとした。

<table border="1"> <thead> <tr><th></th><th>値</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>適合率</td><td>0.73</td></tr> <tr><td>再現率</td><td>0.63</td></tr> <tr><td>F値</td><td>0.67</td></tr> </tbody> </table> <p>健全部</p>		値	適合率	0.73	再現率	0.63	F値	0.67	<table border="1"> <thead> <tr><th></th><th>値</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>適合率</td><td>0.62</td></tr> <tr><td>再現率</td><td>0.65</td></tr> <tr><td>F値</td><td>0.65</td></tr> </tbody> </table> <p>湿潤部</p>		値	適合率	0.62	再現率	0.65	F値	0.65	<table border="1"> <thead> <tr><th></th><th>値</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>適合率</td><td>0.76</td></tr> <tr><td>再現率</td><td>0.82</td></tr> <tr><td>F値</td><td>0.79</td></tr> </tbody> </table> <p>滞水部</p>		値	適合率	0.76	再現率	0.82	F値	0.79
	値																									
適合率	0.73																									
再現率	0.63																									
F値	0.67																									
	値																									
適合率	0.62																									
再現率	0.65																									
F値	0.65																									
	値																									
適合率	0.76																									
再現率	0.82																									
F値	0.79																									
a)ロジスティック回帰																										
<table border="1"> <thead> <tr><th></th><th>値</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>適合率</td><td>0.86</td></tr> <tr><td>再現率</td><td>0.74</td></tr> <tr><td>F値</td><td>0.79</td></tr> </tbody> </table> <p>健全部</p>		値	適合率	0.86	再現率	0.74	F値	0.79	<table border="1"> <thead> <tr><th></th><th>値</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>適合率</td><td>0.75</td></tr> <tr><td>再現率</td><td>0.79</td></tr> <tr><td>F値</td><td>0.77</td></tr> </tbody> </table> <p>湿潤部</p>		値	適合率	0.75	再現率	0.79	F値	0.77	<table border="1"> <thead> <tr><th></th><th>値</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>適合率</td><td>0.81</td></tr> <tr><td>再現率</td><td>0.88</td></tr> <tr><td>F値</td><td>0.85</td></tr> </tbody> </table> <p>滞水部</p>		値	適合率	0.81	再現率	0.88	F値	0.85
	値																									
適合率	0.86																									
再現率	0.74																									
F値	0.79																									
	値																									
適合率	0.75																									
再現率	0.79																									
F値	0.77																									
	値																									
適合率	0.81																									
再現率	0.88																									
F値	0.85																									
b)SVM																										
<table border="1"> <thead> <tr><th></th><th>値</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>適合率</td><td>0.80</td></tr> <tr><td>再現率</td><td>0.68</td></tr> <tr><td>F値</td><td>0.74</td></tr> </tbody> </table> <p>健全部</p>		値	適合率	0.80	再現率	0.68	F値	0.74	<table border="1"> <thead> <tr><th></th><th>値</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>適合率</td><td>0.70</td></tr> <tr><td>再現率</td><td>0.74</td></tr> <tr><td>F値</td><td>0.72</td></tr> </tbody> </table> <p>湿潤部</p>		値	適合率	0.70	再現率	0.74	F値	0.72	<table border="1"> <thead> <tr><th></th><th>値</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>適合率</td><td>0.73</td></tr> <tr><td>再現率</td><td>0.79</td></tr> <tr><td>F値</td><td>0.76</td></tr> </tbody> </table> <p>滞水部</p>		値	適合率	0.73	再現率	0.79	F値	0.76
	値																									
適合率	0.80																									
再現率	0.68																									
F値	0.74																									
	値																									
適合率	0.70																									
再現率	0.74																									
F値	0.72																									
	値																									
適合率	0.73																									
再現率	0.79																									
F値	0.76																									
c)決定木																										
<table border="1"> <thead> <tr><th></th><th>値</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>適合率</td><td>0.94</td></tr> <tr><td>再現率</td><td>0.81</td></tr> <tr><td>F値</td><td>0.87</td></tr> </tbody> </table> <p>健全部</p>		値	適合率	0.94	再現率	0.81	F値	0.87	<table border="1"> <thead> <tr><th></th><th>値</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>適合率</td><td>0.85</td></tr> <tr><td>再現率</td><td>0.89</td></tr> <tr><td>F値</td><td>0.87</td></tr> </tbody> </table> <p>湿潤部</p>		値	適合率	0.85	再現率	0.89	F値	0.87	<table border="1"> <thead> <tr><th></th><th>値</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>適合率</td><td>0.87</td></tr> <tr><td>再現率</td><td>0.95</td></tr> <tr><td>F値</td><td>0.91</td></tr> </tbody> </table> <p>滞水部</p>		値	適合率	0.87	再現率	0.95	F値	0.91
	値																									
適合率	0.94																									
再現率	0.81																									
F値	0.87																									
	値																									
適合率	0.85																									
再現率	0.89																									
F値	0.87																									
	値																									
適合率	0.87																									
再現率	0.95																									
F値	0.91																									
d)ランダムフォレスト																										
<table border="1"> <thead> <tr><th></th><th>値</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>適合率</td><td>0.51</td></tr> <tr><td>再現率</td><td>0.44</td></tr> <tr><td>F値</td><td>0.47</td></tr> </tbody> </table> <p>健全部</p>		値	適合率	0.51	再現率	0.44	F値	0.47	<table border="1"> <thead> <tr><th></th><th>値</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>適合率</td><td>0.66</td></tr> <tr><td>再現率</td><td>0.70</td></tr> <tr><td>F値</td><td>0.68</td></tr> </tbody> </table> <p>湿潤部</p>		値	適合率	0.66	再現率	0.70	F値	0.68	<table border="1"> <thead> <tr><th></th><th>値</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>適合率</td><td>0.80</td></tr> <tr><td>再現率</td><td>0.87</td></tr> <tr><td>F値</td><td>0.84</td></tr> </tbody> </table> <p>滞水部</p>		値	適合率	0.80	再現率	0.87	F値	0.84
	値																									
適合率	0.51																									
再現率	0.44																									
F値	0.47																									
	値																									
適合率	0.66																									
再現率	0.70																									
F値	0.68																									
	値																									
適合率	0.80																									
再現率	0.87																									
F値	0.84																									
e)ニューラルネットワーク																										

図-6.1.8 各アルゴリズムによる分類精度（個別指標）

表-6.1.7 各アルゴリズムによる分類精度（全体指標）

手法	アルゴリズム	分類精度	
		マクロ平均F値	正解率
回帰	ロジスティック回帰	0.70	0.70
	SVM	0.81	0.81
木	決定木	0.73	0.73
	ランダムフォレスト	0.88	0.88
ニューラルネットワーク	ニューラルネットワーク	0.66	0.67

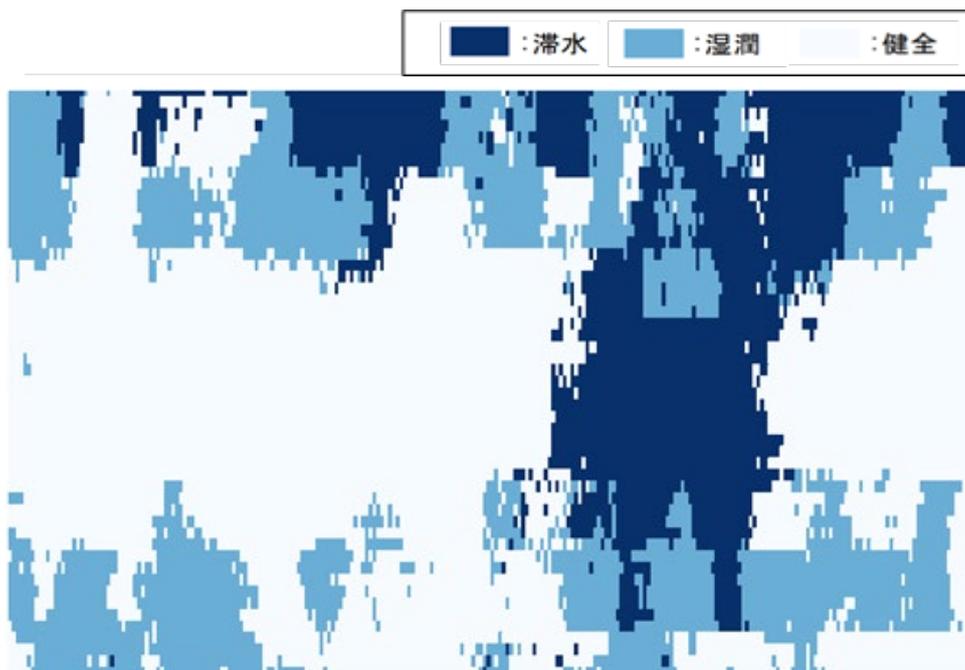


図-6.1.9 ランダムフォレストによる分類結果

6.2 模型供試体を用いた床版滞水推定 AI の推定精度検証

6.2.1 概要

前節で、アルゴリズムにランダムフォレストを用いた分類モデルを構築することで、高い分類精度を有すること、この分類モデルを用いて分類したデータ分布が正解データ（床版上面水分量計測結果）の分布と類似していることを示した。しかし、これは学習データに用いた1橋のみに対する結果であり、舗装厚や床版厚、床版かぶり厚さ等諸条件の異なる他の橋梁に対して、同様の推定精度が確保できるか検証する必要がある。

そこで、5章で記した土木研究所が保有する滞水を模擬可能な模型供試体を用いて、床版滞水推定 AI の推定精度の検証を実施した。

6.2.2 計測した模型供試体

検証には、5.1 で示した模型供試体のうち、No.1～No.4 を用いて行った。用いた模型供試体の外観写真及び構造図をそれぞれ写真-6.2.1 及び図-6.2.1 に再掲する。



写真-6.2.1 模型供試体 外観写真

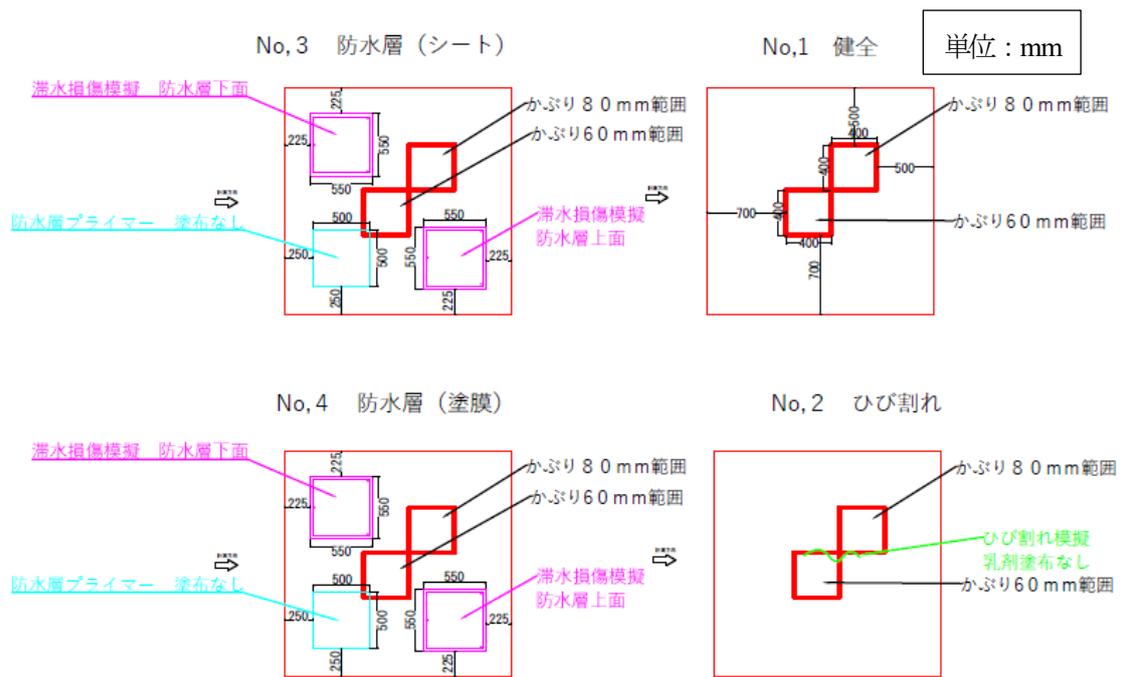


図-6.2.1 模型供試体 構造図

6.2.3 検証方法

検証は、電磁波レーダを用いて滞水部が既知な模型供試体の計測を行い、取得された波形データを床版滞水推定 AI に入力することで、出力された滞水推定結果が模型供試体の滞水部と合致しているか確認することで行った。床版上面への滞水を模擬可能な供試体 No.3 及び 4 は、電磁波レーダ計測の直前に十分な注水を行った。計測には、5.3 で使用した手押し型電磁波レーダ装置を用いた。電磁波レーダ装置の外観及び仕様をそれぞれ写真-6.2.2 及び表-6.2.1 に再掲する。電磁波レーダの有効幅員幅が 0.6m であるため、模型供試体の幅に合わせて複数回走行して計測を行った。



写真-6.2.2 手押し型電磁波レーダ装置外観 (左：正面, 右：側面)

表-6.2.1 手押し型電磁波レーダ装置仕様

項目		仕様	性能
測定速度		～80km/h	手押し型で計測する場合は、歩行速度で計測を実施
距離測定	測定方式	車速信号取得	精度±0.3%以内
電磁波レーダ (3D-Rader社製)	測定方式	マルチステップ周波数方式	周波数を高速で切り替えながらデータを取得
	周波数	200MHz～3GHz	最大探査深度1.5m程度 (比誘電率に依存)
	アンテナ	アンテナ幅0.9m	有効測定幅員幅0.6m 橋軸方向7.5cm間隔、橋軸直角方向7.5cm間隔 深さ方向1.0cm間隔 (比誘電率に依存)
記録媒体		HDD記録	

6.2.4 検証結果

各供試体の平面コンター図と滞水推定結果の比較を図-6.2.2 に示す。滞水推定結果の縦軸及び横軸は、それぞれ測定の起点からの横方向の測定距離と縦方向の測定距離を表している。なお、測定の起点は必ずしも模型供試体の端部とはなっていない。

まず供試体 No.1 (健全) では、平面コンター図の濃淡は全面にわたり一様となっており、床版上面に滞水が生じていないことが確認できる。一方、滞水推定結果を見ると、右端及び左端、さらに中央付近に滞水部が推定された。また、それ以外の部分も全体的に湿潤部と推定された。

供試体 No.2 (ひび割れ) では、平面コンター図の下から 2/3 程度の範囲が白くなっている。これは、ひび割れを模擬した箇所から雨水が浸入したことにより床版上面に滞水が生じたものと思われる。滞水推定結果でもほぼ同様の範囲に滞水部が推定されており、比較的精度良く推定されていた。一方、コンター図で一様に見える範囲については、全体的に湿潤部と推定された。

供試体 No.3 (シート防水) 及び供試体 No.4 (塗膜防水) では、ともに平面コンター図の左上及び右下に白い部分が確認された。これは滞水を模擬した位置と合致しており、適切に滞水が模擬できていることを示している。滞水推定結果でも同様の箇所を滞水部と推定しており、滞水を模擬した箇所については精度良く推定できていることが確認された。一方、供試体 No.4 の右上は非滞水箇所にも関わらず一部滞水部が推定された。また、それ以外の部分も全体的に湿潤部と推定された。

No.1 及び No.4 で、非滞水箇所滞水部が推定された理由は定かではないが、一般的に教師あり学習では学習データ (電磁波レーダの波形と床版水分量のセット) の数が多いほど精度が向上するとされており、学習データ量の不足が1つの原因と考えられる。そのため、推定精度を向上させるためには、別の橋梁で新たな学習データを整備し、それを構築済の学習モデルに追加学習させる必要があると考えられる。

また、全供試体を通して、健全部になると想定していた非滞水箇所が湿潤部と推定されたことについては、表-6.1.2 に示す現在の閾値では通常のコンクリートの含水状態でも湿潤部に分類されることを示している。適切に分類するためには健全部と湿潤部の閾値の見直しが必要であるが、その閾値を決めることは困難であることから、湿潤部の範囲も含めて健全部とし、健全部と滞水部の2クラスへの分類に変更することとした。

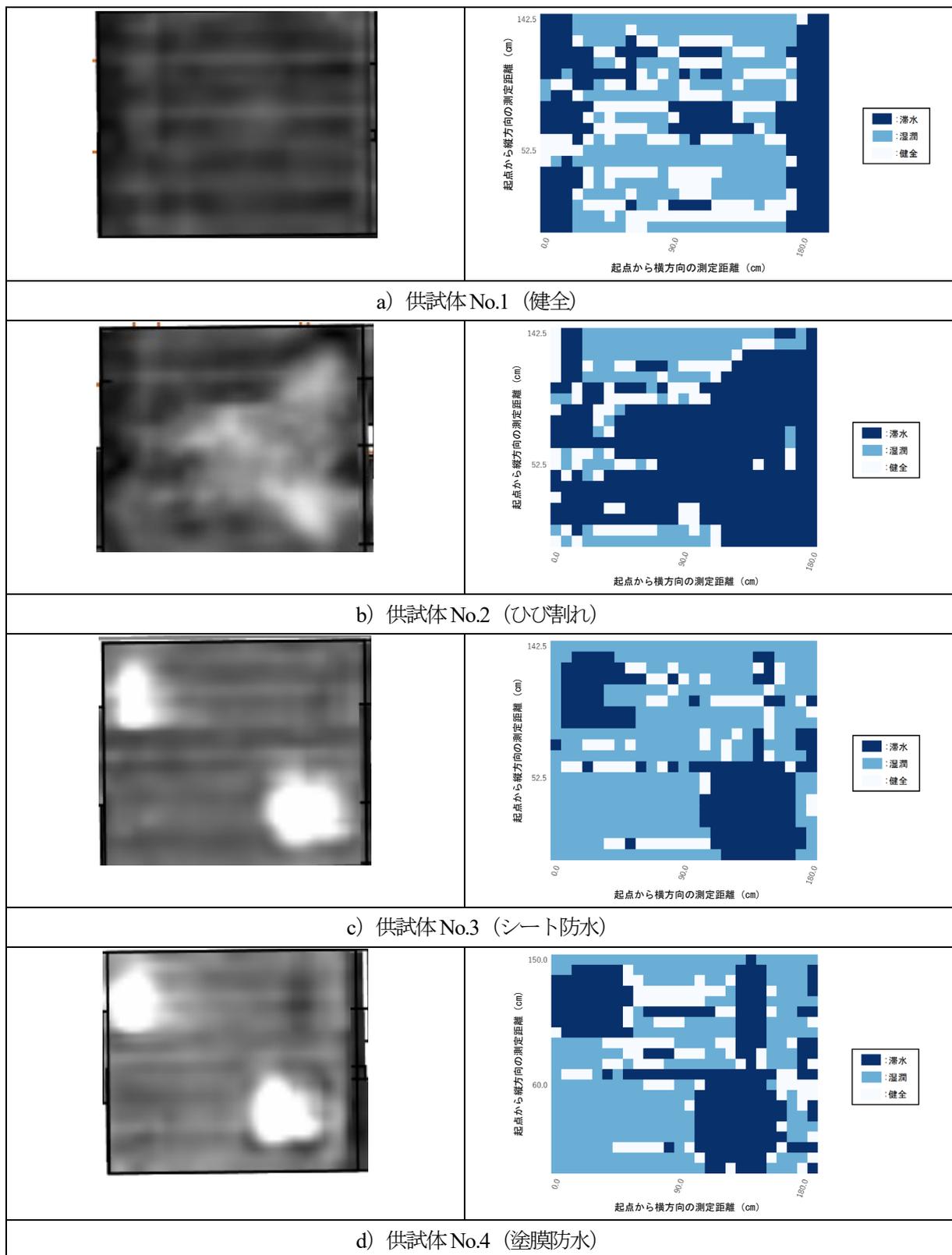


図-6.2.2 平面コンター図と滞水推定結果の比較

6.2.5 まとめ

床版滞水推定 AI の推定精度の検証を目的に、電磁波レーダを用いて滞水位置が既知な模型供試体の計測を行い、取得された波形データを床版滞水推定 AI に入力することで、出力された滞水推定結果が模型供試体の滞水部と合致しているか確認した。以下に得られた知見を以下に示す。

- (1) 十分注水し滞水を模擬した箇所及び舗装ひび割れを模擬した箇所から水が浸入した範囲について、正しく滞水部と推定された。
- (2) 供試体 No.1 及び No.4 で、健全部となるはずの箇所で滞水部が推定された。学習データ量の不足が1つの原因と考えられ、推定精度向上のためには、別の橋梁で新たな学習データを整備し、それを構築済の学習モデルに追加学習させる必要があると考えられる。
- (3) 全供試体を通して、非滞水箇所が湿潤部と推定され、健全部と湿潤部の区別は現時点の推定精度では困難であることが確認された。適切に分類するためには健全部と湿潤部の閾値の見直しが必要であるが、その閾値を決めることは困難であることから、現時点では湿潤部の範囲も含めて健全部とし、健全部と滞水部の2クラスへの分類に変更することとした。

6.3 新たな学習データの整備及び追加学習による推定精度向上

6.3.1 概要

床版滞水推定 AI の推定精度向上を図るため、他橋梁において新たな学習データを整備し、及びそれを構築済みの分類モデルに追加学習することを試みた。

6.3.2 対象橋梁

追加学習に使用する新たな学習データ（電磁波形データ及び床版上面水分量測定結果）の取得は、富山市が管理する Y 橋において行った。Y 橋の外観写真及び橋梁諸元をそれぞれ写真-6.3.1 及び表-6.3.1 に示す。



写真-6.3.1 Y 橋 外観写真

表-6.3.1 Y 橋 橋梁諸元

供用年	1972 年（昭和 47 年）
供用後経過年数	50 年
上部工形式	単純鋼合成鈹桁橋×3 連
橋長	88.00m
支間長	29.2m+29.2m+29.2m
床版構造	RC 床版

6.3.3 学習データの取得

車載式電磁波レーダ計測は橋面全体について実施した。学習データの取得に用いた機器は、6.1.3 と同様の車載式電磁波レーダ及び電気抵抗式水分計である。床版上面水分量の測定は、道路管理者による橋梁補修工事に伴う通行止め区間内において、工事受注者が行う舗装開削に併せて実施した。計測ピッチは、6.1.3 同様橋軸方向、橋軸直角方向共に 50cm 間隔のメッシュ割で計測を行った。新たに取得した電磁波レーダの計測

結果（一部抜粋）及び床版上面水分量測定結果（一部抜粋）を図-6.3.1 及び図-6.3.2 に示す。橋長が長い為一部データを抜粋して示している。図-6.3.1 の赤線及び黄線の範囲の水分量測定結果が、図-6.3.2 の赤線及び黄線の範囲となっている。図-6.3.2 は橋軸直角方向共に 50cm 間隔のメッシュ割になっており、メッシュ内で最も水分量が高いとみられる箇所の数値を記載している。なお、今回の測定結果では床版面が全体的に乾燥しており、6.1 の表-6.1.2 に基づく滞水部は橋梁全体で確認されなかった。データ取得後は、座標合わせの処理を行い双方のデータの位置関係を対応させた。

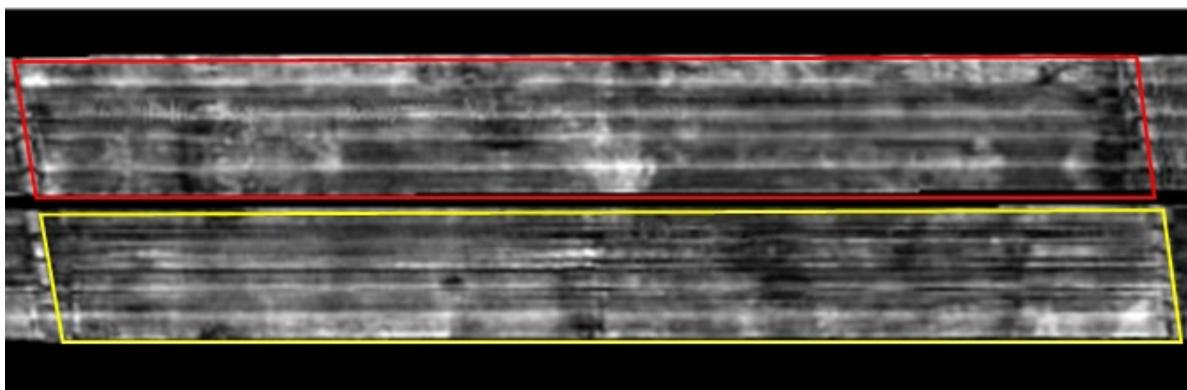


図-6.3.1 車載式電磁波レーダ計測結果（平面コンター図）

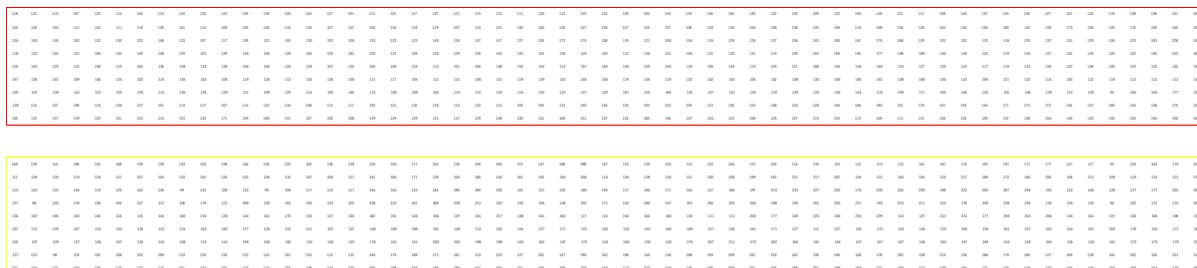


図-6.3.2 床版上面水分量測定結果

6.3.4 床版滞水推定 AI への追加学習

取得した学習データを用いて、構築済の分類モデルの追加学習を実施した。モデル構築に用いるアルゴリズムは、6.1 同様ランダムフォレストとした。追加学習後の分類モデルについても、6.1.4 同様 K 分割交差検証を実施した。追加学習後の分類モデルによる分類精度(個別指標)を図-6.3.3 に示す。

	値		値
適合率	0.96	適合率	0.83
再現率	0.92	再現率	0.91
F値	0.94	F値	0.87

健全部

滞水部

図-6.3.3 追加学習後の分類モデルによる分類精度（個別指標）

6.3.5 模型供試体を用いた追加学習後の分類モデルの推定精度検証

追加学習後の分類モデルが追加学習前の分類モデルと比較して推定精度が向上したかを確認するため、追加学習後の分類モデルを用いて 6.2 と同様の供試体を用いて滞水推定を行い、追加学習前の滞水推定結果との比較を行った。追加学習前及び追加学習後の滞水推定結果の比較を図-6.3.4 に示す。なお、前節で述べたとおり、追加学習に併せてクラスの分類を 3 クラス（滞水部、湿潤部、健全部）から 2 クラス（滞水部、健全部）へ変更したため、追加学習後の滞水推定結果は 2 色となっている。

比較を見ると、追加学習後も追加学習前と同様 No.1 及び No.4 の非滞水箇所滞水部が推定されているものの、わずかではあるがその範囲が小さくなっていることが確認できた。供試体 No.4 でもわずかではあるが右上の非滞水箇所滞水部が推定されていた滞水部の範囲が小さくなっていた。一方、供試体 No.3 の左上の滞水箇所滞水部の範囲が小さくなってしまい、推定精度が低下していた。考えられる原因としては、追加学習に用いた教師データの健全部と滞水部でのデータ量のアンバランスが挙げられる。6.3.3 で述べたとおり、今回の調査橋梁は床版面が全体的に乾燥しており、取得できた教師データは全て健全部であり、滞水部の教師データは取得できなかった。そのため、追加学習できたのは健全部のみであり滞水部の学習ができていない。そのアンバランスが滞水部の推定精度の低下につながったものと考えられる。

以上より、追加学習による推定精度向上の可能性は示唆されたものの、確実に精度向上につなげるためにはデータ量に偏りのないバランスの取れた教師データを整備する必要があることが確認された。

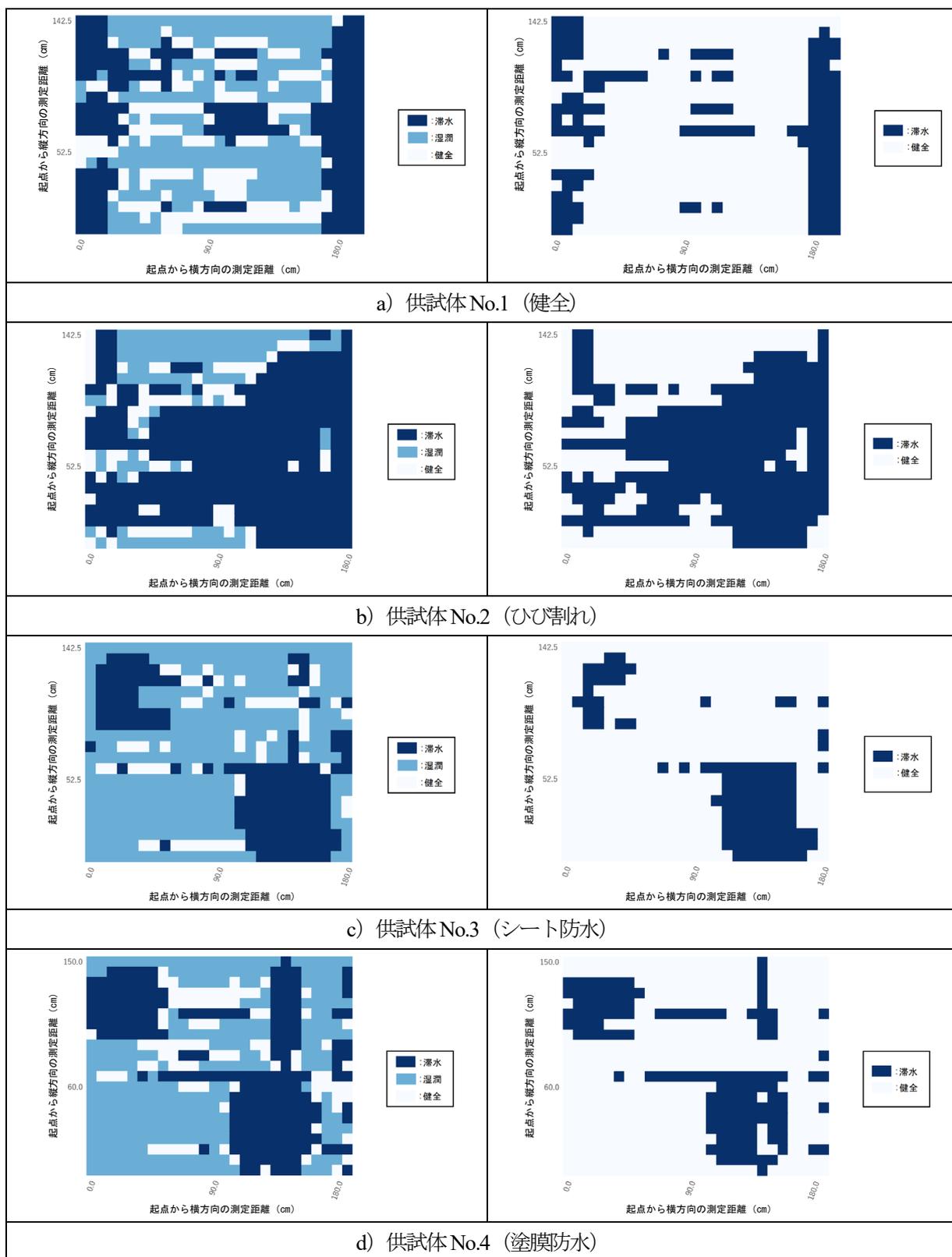


図-6.3.4 追加学習前及び追加学習後の滞水推定結果の比較

6.3.6 まとめ

本節では、床版滞水推定 AI の推定精度向上を図るため、他橋梁において新たな学習データを整備し、及びそれを構築済の分類モデルに追加学習することを試みた。

その結果、追加学習による推定精度向上の可能性は示唆されたものの、確実に精度向上につなげるためにはデータ量に偏りのないバランスの取れた教師データを整備する必要があることが確認された。

6.4 床版滞水推定 AI の実橋への適用

6.4.1 概要

模型供試体を用いた推定精度検証により、構築した床版滞水推定 AI が滞水を模擬した箇所についてはある程度の精度で滞水推定できることを確認した。しかし、実際の現場では模型供試体と異なり、床版の不陸や舗装の劣化により舗装厚が一樣ではなく、滞水の程度も現場により異なるものと考えられる。

以上より、床版滞水推定 AI を実橋に適用した場合にどのような結果が得られるか確認を行った。

6.4.2 対象橋梁

対象橋梁は G 橋（上り線）及び G 橋（下り線）とし、3.3 及び 4.4 で車載式電磁波レーダを用いて取得した電磁波形データを使用して滞水推定を行った。

6.4.3 適用結果

滞水推定結果のみでは分かりづらいため、路面画像等と重ね合わせることで見え方の確認を行った。G 橋（上り線）の滞水推定結果と路面画像との重ね合わせを図-6.4.1 に、滞水推定結果と 3.3 で示した床版上面付近の平面コンター図（解析結果）の重ね合わせを図-6.4.2 に示す。図-6.4.1 の赤破線は舗装打継目位置を示している。また、図-6.4.2 の黄線部は「舗装剥離、浅い土砂化、水平クラック等の疑いあり」、赤線部は「深い土砂化、床版上面の滞水等の疑いあり」であることを示している。

図-6.4.1 のように路面画像と重ね合わせることで、打継目や補修痕と滞水の関係が視覚的に把握できる。滞水が生じやすいと考えられる舗装打継目近傍に滞水が推定されることを想定したが、図-6.4.1 のとおり舗装打継目近傍には滞水は推定されず、A1 橋台及び A2 橋台付近に集中して推定されていた。

続いて図-6.4.2 を見ると、床版滞水推定 AI により滞水が推定された範囲は、平面コンター図の黒い範囲とよく合致していることが確認できる。平面コンター図（解析結果）と比較すると、赤線及び黄線部となっている範囲と概ね合致した。しかし滞水が推定されなかった範囲についても、解析結果では赤線及び黄線部となった判定された範囲が確認された。これは、床版滞水推定 AI が滞水のみを対象としているのに対し、平面コンター図（解析結果）は滞水を含む健全な状態と異なる全ての状態を対象としているためと考えられる。

次に G 橋（下り線）の滞水推定結果と路面画像との重ね合わせを図-6.4.3 に、滞水推定結果と 4.4 で示した床版上面付近の平面コンター図（解析結果）の比較を図-6.4.4 に示す。図-6.4.3 より、舗装打継目近傍に多く滞水が推定されているのが確認できる。また図-6.4.4 より、床版滞水推定 AI により滞水が推定された範囲は、平面コンター図（解析結果）の黄線部及び赤線部となっている範囲と概ね合致した。

以上の結果から、今回確認した範囲では、構築した床版滞水推定 AI は実橋においても平面コンター図等を人間が 1 つずつ確認して判断する方法と同程度の精度で滞水推定できていることが確認できた。床版滞水推定 AI を用いることで、これまでの方法と比較して滞水推定にかかる時間及び労力を大幅に削減することができ、RC 床版の効率的な維持管理に寄与することが期待される。

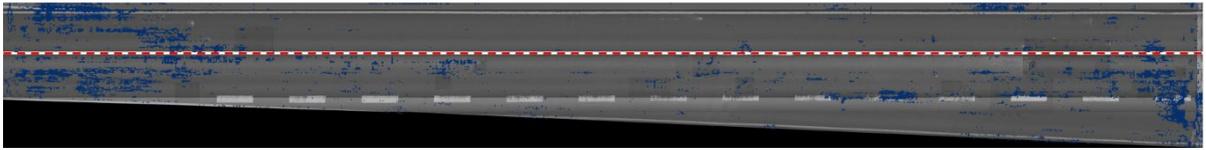


図-6.4.1 G橋（上り線） 滞水推定結果と路面画像の重ね合わせ

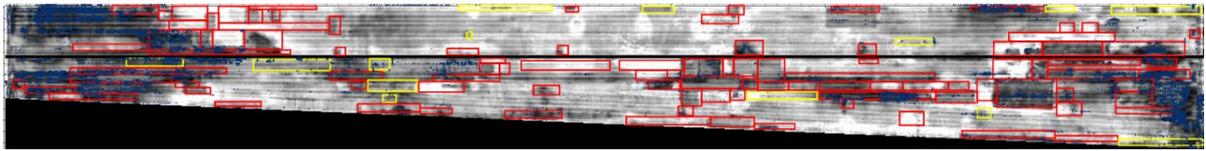


図-6.4.2 G橋（上り線） 滞水推定結果と平面コンター図（解析結果）の重ね合わせ

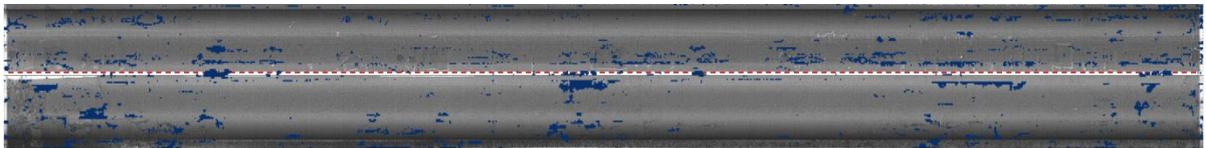


図-6.4.3 G橋（下り線） 滞水推定結果と路面画像の重ね合わせ

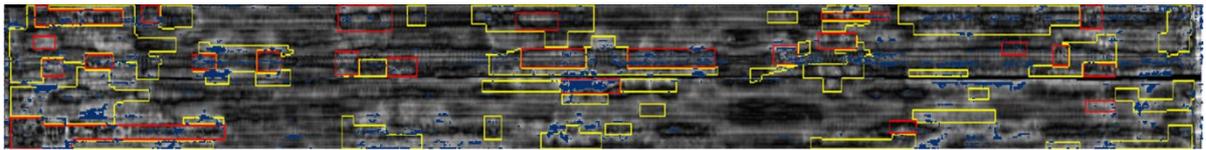


図-6.4.4 G橋（下り線） 滞水推定結果と平面コンター図（解析結果）の重ね合わせ

6.4.4 まとめ

本節では、床版滞水推定 AI を G 橋（上り線）及び G 橋（下り線）で取得した電磁波形データに適用した結果の確認を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) G 橋（上り線）における滞水推定結果を 3.3 で示した平面コンター図（解析結果）と重ね合わせた結果、床版滞水推定 AI により滞水が推定された範囲は、解析結果で「舗装剥離、浅い土砂化、水平クラック等の疑いあり」又は「深い土砂化、床版上面の滞水等の疑いあり」と判定された範囲と概ね合致した。しかし滞水が推定されなかった範囲についても、解析結果では変状の疑いありと判定された範囲が確認された。これは、床版滞水推定 AI は滞水のみが対象であるのに対し、3.3 で示した解析結果は滞水を含む健全な状態と異なる全ての状態を対象としているためと考えられる。
- (2) G 橋（下り線）における滞水推定結果を 4.4 で示した平面コンター図（解析結果）と重ね合わせた結果、床版滞水推定 AI により滞水が推定された範囲は、解析結果で「舗装剥離、浅い土砂化、水平クラック等の疑いあり」又は「深い土砂化、床版上面の滞水等の疑いあり」と判定された範囲は概ね合致した。

以上の結果から、今回確認した 2 橋分の範囲では、構築した床版滞水推定 AI は平面コンター図等を人間が 1 つずつ確認して判断する方法と比較して、ある程度同じ精度で滞水推定できていることが確認できた。床版滞水推定 AI を用いることで、滞水推定にかかる時間及び労力を削減することができ、RC 床版の効率的な維持管理に寄与することが期待される。

本節では G 橋を対象として適用性の確認を行ったが、舗装厚や橋梁諸元等の条件が変化することで床版滞水推定 AI の滞水推定精度も変化する可能性は否定できない。今後は、更に複数の橋梁において床版滞水推定 AI の適用性の確認を実施し、床版滞水推定 AI の適用条件等について整理していく予定である。

6.5 まとめ

本章では、床版上面の滞水検知の効率化・省力化を目的に、人工知能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床版滞水推定 AI を構築した。以下に得られた知見を示す。

【模型供試体を用いた推定精度検証】

- ・ 床版滞水推定 AI で滞水推定した結果、十分注水し滞水を模擬した箇所及び舗装ひび割れを模擬した箇所から水が浸入した範囲について、正しく滞水部と推定された。
- ・ 供試体 No.1 (健全) 及び No.4 (滞水模擬, 塗膜防水層有) で、健全部となるはずの箇所で滞水部が推定された。学習データ量の不足が 1 つの原因と考えられ、推定精度向上のためには、別の橋梁で新たな学習データを整備し、それを構築済の学習モデルに追加学習させる必要があると考えられる。
- ・ 全供試体を通して、非滞水箇所が湿潤部と推定され、健全部と湿潤部の区別は現時点の推定精度では困難であることが確認された。

【新たな学習データの整備及び追加学習による推定精度向上】

- ・ 構築済の分類モデルに新たな学習データを追加学習させることで、推定精度向上の可能性は示唆されたものの、確実に精度向上につなげるためにはデータ量に偏りのないバランスの取れた教師データを整備する必要があることが確認された。

【床版滞水推定 AI の実橋への適用】

- ・ G 橋 (上り線) における滞水推定結果を車載式電磁波レーダ計測により作成した平面コンター図 (解析結果) と重ね合わせた結果、解析結果で「舗装剥離, 浅い土砂化, 水平クラック等の疑いあり」又は「深い土砂化, 床版上面の滞水等の疑いあり」と判定された範囲のほうが大きく滞水が推定されていない箇所もあったものの、滞水が推定された箇所については解析結果で「舗装剥離, 浅い土砂化, 水平クラック等の疑いあり」又は「深い土砂化, 床版上面の滞水等の疑いあり」と判定された範囲と概ね合致した。
- ・ G 橋 (下り線) における滞水推定結果を車載式電磁波レーダ計測により作成した平面コンター図 (解析結果) と重ね合わせた結果、滞水が推定された箇所と解析結果で「舗装剥離, 浅い土砂化, 水平クラック等の疑いあり」又は「深い土砂化, 床版上面の滞水等の疑いあり」と判定された範囲は概ね合致した。
- ・ 今回検証した 2 橋分の範囲では、構築した床版滞水推定 AI は平面コンター図等を人間が 1 つずつ確認して判断する方法と同程度の精度で滞水推定できた。

また、現場にて床版滞水推定 AI を用いた滞水検知を実施する際の参考資料として、巻末に「車載式電磁波レーダを用いた床版上面の滞水検知に関する手引き (案)」を添付した。

第6章 参考文献

- 1) 本橋洋介：人工知能システムのプロジェクトがわかる本—企画・開発から運用・保守まで—，p.99，2018
- 2) 谷倉泉，榎園正義，後藤昭彦：床版防水工における水分計の適用性に関する研究，構造工学論文集，Vol.59A，pp.1112-1123，2013
- 3) 多田智史：あたらしい人工知能の教科書 プロダクト/サービス開発に必要な基礎知識，p.184，2016

謝辞

3章及び4章の実橋調査に関して、東北地方整備局仙山河川国道事務所にご協力いただいた。

6章の床版滞水推定 AI の学習データ整備に関して、中部地方整備局飯田国道事務所にご協力いただいた。

この場を借りて、本調査研究にご協力頂いた関係各位に感謝いたします。

参考資料

車載式電磁波レーダを用いた
床版上面の滞水検知に関する手引き（案）

令和5年3月

目次

第1章 総 則	1
1-1. 目的	1
1-2. 用語の定義	3
第2章 車載式電磁波レーダ	4
2-1. 測定原理	4
2-2. 仕様	6
2-3. 床版上面点検に用いる場合の適用条件	8
第3章 点検	9
3-1. 一般	9
3-2. 点検のための調査	10
3-3. 点検対象橋梁の選定	10
3-4. 点検ルートを選定	10
3-5. 点検時期の選定	11
3-6. 点検	11
第4章 点検結果の作成	12
4-1. 一般	12
第5章 点検結果の活用	17
5-1. 一般	17
参考資料	18

第1章 総則

1-1. 目的

本手引き(案)は、コンクリート床版の土砂化の発生要因と考えられる床版上面の滞水を早期に検知するため、非破壊検査手法である電磁波レーダを用いた滞水の検知手法を示したものである。

道路橋では、2014年の道路法改正により5年に1度の頻度で近接目視を基本とする点検(以下、定期点検)が義務化されており、既設床版の劣化・損傷状況については、主に床版下面からの外観目視および舗装面のひび割れ等の発生状況の目視確認により行われている¹⁾。しかし、輪荷重による疲労、材料劣化等により生じるコンクリート床版上面の土砂化は舗装のポットホールや床版下面のひび割れおよび漏水痕などの外観変状との相関が明確でなく、現状の定期点検では床版上面の土砂化の発生や進行を見落とすリスクを抱えている。

加えて、1991年のスパイクタイヤ粉じんの発生防止に関する法律の施行以降、凍結防止剤の散布量が増加したことにより²⁾、コンクリート床版上面の土砂化が顕在化しており、塩分を含んだ水が床版へ浸入し、床版下面に変状が発生していなくても床版上面が土砂化している事例が報告されている。図-1.1は供用後10年経過した橋梁の舗装開削後のコンクリート床版上面の状況であり、全体的に土砂化が発生していることが確認できる。また、図-1.2は前回の定期点検時には明確な変状が見られず対策不要と判定されていた箇所で、数年後に床版下面の抜け落ちが発生した事例である。



図-1.1 舗装開削後の土砂化が進行した事例



(a) 前回の定期点検時

(b) 床版下面の抜け落ち時

図-1.2 床版下面の抜け落ち事例

このように、床版の土砂化は劣化の進行が速いことが特徴となっている。これらは、路面からの水が床版上面に浸入し、輪荷重による疲労劣化を促進するだけでなく、凍害、塩害等のコンクリートの劣化を誘発することが原因と推察される。

現在想定している、輪荷重によるコンクリート床版の土砂化の劣化メカニズムのイメージ図を図-1.3に示す。まず、降雨後に舗装の施工目地、伸縮装置、地覆境界、舗装のひび割れ等から水が浸入し、床版上面に滞水が生じる。排水不良により滞水が常態化することで、コンクリート床版内部の空隙が水で充填され、ここに走行車両の輪荷重が作用すると空隙内の水が収縮できずに水圧が生じ、周囲のモルタルが破碎され脆弱化層が生じる。さらに水の浸入、輪荷重の作用を繰り返すことで、脆弱化層が拡大し土砂化が進行し、最終的に床版の陥没に至ることとなる。

土砂化の進行を防ぐためには、土砂化の要因と考えられる床版上面の滞水を早期検知することが重要である。床版上面の滞水の有無は舗装や床版下面の劣化状況からある程度推測することは可能だが、舗装や床版下面に劣化が生じているような段階では、既に床版上面の土砂化が進行していることが多い。また、舗装開削により局所的な滞水を確認することは可能であるが、橋梁全面の滞水箇所を面的に把握することはできず、潜在的な劣化リスクを抱えている箇所を全て特定することは困難である。

このように、膨大な量の道路橋を効率的に維持管理していくためには、潜在的な劣化リスクを抱えている箇所をスクリーニングし、図-1.3の①または②の段階で、劣化が進行する前に予防保全対策を実施することが重要である。

以上より、非破壊検査技術の一つである電磁波レーダを使用した床版上面の滞水の検知手法を手引き(案)として示した。なお本手引き(案)は、「AIを活用した道路橋メンテナンスの効率化に関する共同研究」の点検AI(床版の土砂化等)開発グループにおける平成30～令和3年度までの取組みをもとに作成したものである。本共同研究は令和5年度まで実施予定であるため、令和4年度以降に得られた知見についても適宜反映していく予定である。また、本手引き(案)で紹介する「床版滞水推定AI」は、現在開発途上段階であるため第三者が自由に使用できるものとして公表していないが、興味をお持ちの方は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まで問い合わせ願いたい。

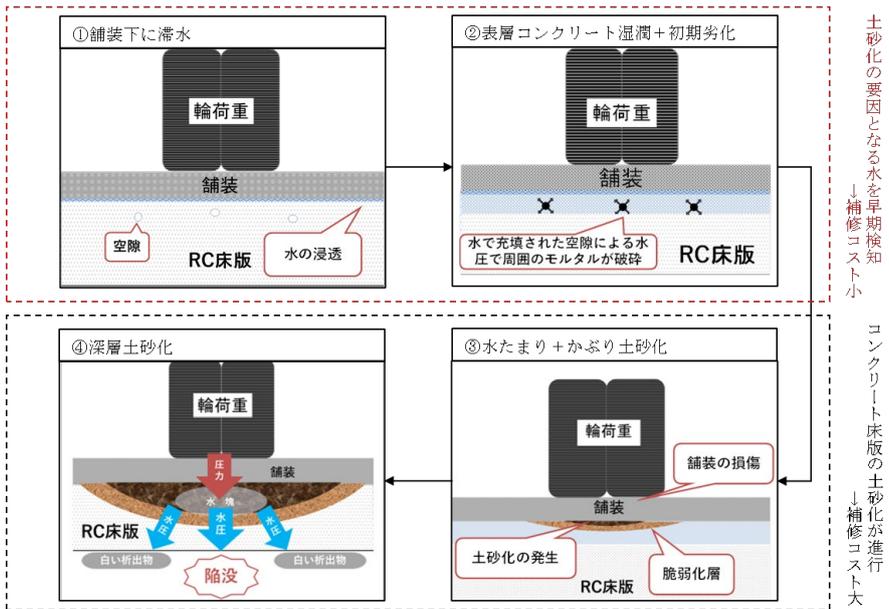


図-1.3 コンクリート床版の土砂化の劣化メカニズムイメージ

1-2. 用語の定義

本手引き（案）で用いる用語の定義は、次による。

- コンクリート床版の土砂化

床版上面の滞水と輪荷重の影響などにより、コンクリートが骨材とモルタルに分離したところに、土粒子が混入し、土砂のような状態となる劣化現象。

- 車載式電磁波レーダ

自動車に積載し、走行しながら測定が可能な電磁波レーダ。

- 床版滞水推定 AI

車載式電磁波レーダにより取得した道路橋の測定データを入力することで、道路橋の床版上面の滞水状況を推定するアプリケーションプログラム。

- 変状

何らかの原因で、コンクリートやコンクリート構造物に発生している、本来あるべき姿ではない状態。

- 劣化

時間の経過に伴って進行する変状。

- 凍害

コンクリート中の水分が凍結と融解を繰り返すことによって、体積膨張と水分供給によりコンクリート表面から徐々に劣化する現象。

- 塩害

塩化物イオンが鋼材表面の不動態皮膜を破壊し、鋼材の腐食が促進され、腐食生成物の体積膨張により、コンクリートのひび割れや剥離、鋼材の断面減少を引き起こす現象。

- 比誘電率

媒質と真空の誘電率の比。

第2章 車載式電磁波レーダ

2-1. 測定原理

電磁波レーダは、透過した媒質と異なる比誘電率を持つ媒質の境界で反射する性質を利用することで、物質内部を非破壊で探査し、各媒質の深さ方向の位置を推定する非破壊検査手法である。

電磁波レーダ法は、透過した媒質と異なる比誘電率を持つ媒質の境界で反射する性質を利用し、物質内部を非破壊で探査する非破壊検査手法である。探査原理は、図-2.1に示すように電磁波を媒質中に送信器から放射し、反射した電磁波（以下、反射波）を受信アンテナで受信し、反射波が返ってくるまでの時間から深さ方向の位置を推定するものである。平面的な位置は、距離計を内蔵した装置を移動させることで位置情報を得る。

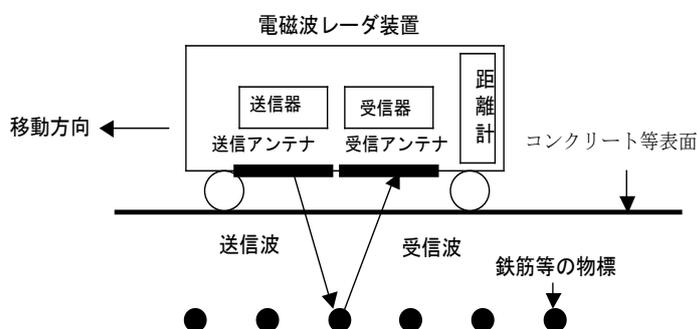


図-2.1 電磁波レーダの原理

電磁波の速度は、真空中の速度 ($3 \times 10^8 \text{m/s}$) が基準となり各媒質に対する固有の速度で伝わる。各媒質内での伝播速度は、各媒質の固有の比誘電率に依存し、式(1)の速度で進む。

$$V = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

ここで、

V : 各媒質における電磁波の速度 (m/s)

ϵ_r : 各媒質の比誘電率

反射物体までの距離は、送信時刻と反射波の受信時刻の時間差から、式(2)で求める。

$$D = \frac{1}{2} \cdot V \cdot T \quad (2)$$

ここで、

D : 反射物体までの距離 (m)

T : 送信時刻と反射波の受信時刻の時間差 (s)

電磁波が媒質の異なる境界面に達すると、その境界面で一部反射し残りは透過する。境界面に電磁波が垂直に入射する場合、この反射と透過の割合は境界面で接する二つの媒質の比誘電率によって決まり、

式(3)により反射強度として表すことができる⁴⁾。比誘電率の概略値を表-2.1に示す。アスファルトとコンクリートでは比誘電率に大きな差はなく、アスファルト舗装とコンクリート床版が密着している場合は、反射強度は小さい値となる。一方、水の比誘電率はアスファルトやコンクリートと比較して大きいため、舗装下に滞水が生じていた場合は、反射強度は大きい値となる。電磁波レーダの測定結果を図化した場合、この反射強度の違いが白黒の濃淡となって表示される。

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (3)$$

ここで、

R : 反射強度

ϵ_{r1} : 上層の媒質の比誘電率

ϵ_{r2} : 下層の媒質の比誘電率

表-2.1 比誘電率の概略値

媒質	比誘電率
アスファルト	2~4 (乾燥状態)
	6~12 (湿潤状態)
コンクリート	4~10 (乾燥状態)
	10~20 (湿潤状態)
水	81

なお、電磁波レーダは、ハンディ式、カート式、車載式のように様々な機器があるが、測定箇所とその目的に照らして適切な機器を選択し、使用する必要がある。

2-2. 仕様

車載式電磁波レーダの仕様は次の通りとする。

- ①測定速度 : 80km/h 以下 (推奨 40km/h)
- ②距離測定 : 車速信号取得 (精度±0.3%以内)
- ③放射方法 : マルチステップ周波数方式 (200MHz~3000MHz)
- ④アンテナ幅 : 1.8m (有効幅員 1.5m)
- ⑤チャンネル数 : 21 (走行方向 7.5cm 間隔, 走行直角方向 7.5cm 間隔, 深さ方向 1.0cm 間隔)

ここでいう車載式電磁波レーダとは、自動車に搭載でき、走行しながら測定可能な電磁波レーダをいう。最速 80km/h 走行での測定が可能であるため、交通規制を伴わず一度に広範囲を測定可能である。しかし、アンテナ面と路面との間の空間で多重反射が生じ、記録品質はやや低下する。車載式は短時間で強い電磁波を射出するパルス式と、一定周波数の電磁波を連続的に送信するステップ周波数式に大別され、結果として得られる両者の記録断面に大きな相違はないが、詳細な分析を行う際に注意が必要となる場合がある。一方、車載式として普及している装置の周波数特性等に大きな相違はなく、床版調査に対する特性に大きな差はない。

表-2.2 に示す装置は、3D-RADAR 社の DX アンテナシリーズである。送受信方式はステップ周波数式で、送受信帯域は 200~3000MHz である。

電磁波レーダの有効幅員は 1.5m であるため、橋梁の幅員に合わせて複数回走行して測定する。測定により電磁波レーダによる反射信号が取得される。反射信号は、橋軸および橋軸直角方向に 7.5cm 間隔、深さ 1.0cm 間隔で取得され、複数に分割して測定した反射信号のデータは合成されて、一つの橋梁データになる。取得した電磁波の反射強度の大小に応じて、256 階調のモノクロの平面コンター図に変換され視覚化される (図-2.2)。さらに、平面コンター図の任意の断面における縦断図又は横断図の出力も可能である (図-2.3)。

表-2.2 車載式電磁波レーダ機材諸元の例⁵⁾

項目	性能	機材外形
電磁波レーダ	3D-Radar 社製 エアカップル型 DX アンテナシリーズ	
測定可能走行速度	80km/h 以下	
放射方法	マルチステップ 周波数式	
周波数帯域	200MHz ~ 3GHz	
電磁波レーダ幅	1.8m	
有効探査幅	1.5m	

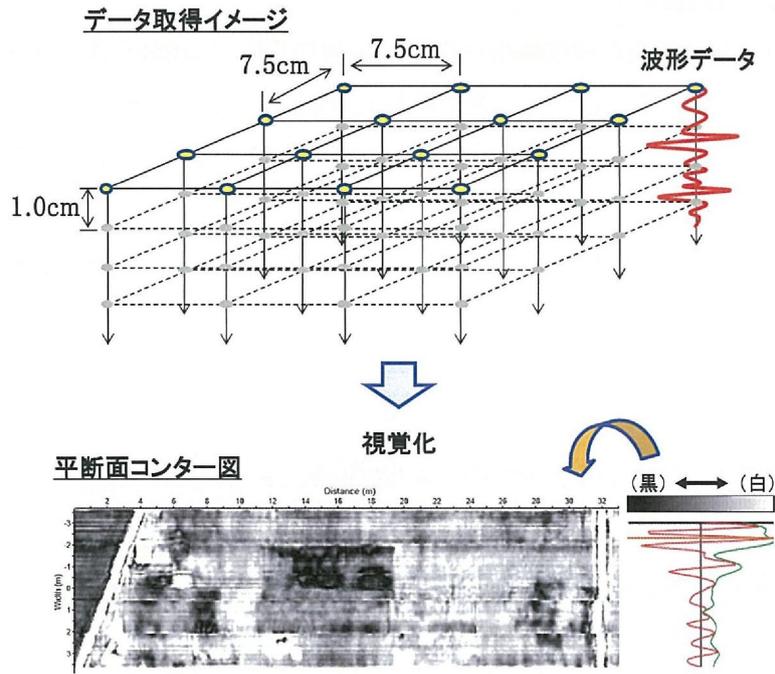


図-2.2 平面コンター図イメージ⁵⁾

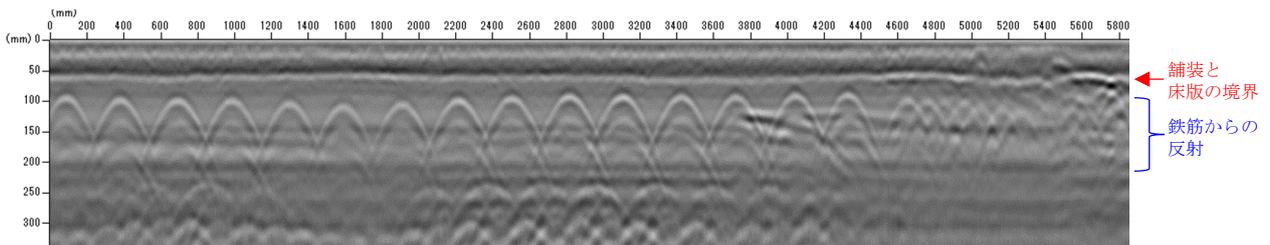


図-2.3 縦断図イメージ

2-3. 床版上面点検に用いる場合の適用条件

車載式電磁波レーダを用いた床版上面点検は、以下のような条件下で実施することが望ましい。

(1) 構造条件

- ・アスファルト舗装内やコンクリート床版内に異なる比誘電率を持つ媒質が混入されていないこと。
- ・コンクリート床版内に鋼繊維が混入していない又は鋼繊維入りコンクリートによる床版上面増厚を行っていないこと。

(2) 走行条件

- ・点検車両が安全に走行可能なこと。

(3) 環境条件

- ・測定路面が乾燥していること。

(1) 電磁波は、透過した媒質と異なる比誘電率を持つ媒質の境界で反射する性質を有している。アスファルト舗装内やコンクリート床版内に異なる比誘電率を持つ媒質が混入されていると、その媒質で電磁波が反射されることで電磁波レーダの測定結果に影響が生じ、床版上面の滞水を正確に検知することが困難となるため、異なる比誘電率を持つ媒質が混入されているアスファルト舗装やコンクリート床版を使用した橋梁での測定は避けることが望ましい。

異なる比誘電率を持つ媒質が混入されている具体例としては、アスファルト舗装の場合はガラス入りアスファルト舗装、コンクリート床版の場合はSFRC（鋼繊維補強コンクリート）等が挙げられる。

(2) レーダを搭載した点検車両の標準的な車幅は約2.0mである。点検対象の橋梁は、点検車両が安全に走行できるよう車幅にある程度の余裕を加えた幅員を有する橋梁とするのが望ましい。

(3) 降雨等により測定路面が湿潤状態である場合、路面上の水により電磁波の反射が生じてしまい、滞水を正確に検知することが困難となるため、路面乾燥時に測定するのが望ましい。

第3章 点検

3-1. 一般

車載式電磁波レーダを用いた点検は、十分な事前調査及び適切な点検計画を立案した上で、適切な安全管理のもと実施しなければならない。

車載式電磁波レーダを用いた点検にあたり、事前調査が不十分の場合、2-3に示した適用条件を満足しない橋梁であることが点検後に判明するなど、点検が無駄になる可能性がある。また、車両走行により点検を行うため、他の車両や歩行者との衝突事故または物損事故の危険性は必然的に通常の点検手法よりも高くなる。このことを念頭に置き、事前調査及び適切な点検計画を立案した上で、十分な安全管理のもと実施することが重要である。

車載式電磁波レーダを用いた点検の手順を図-3.1に示す。

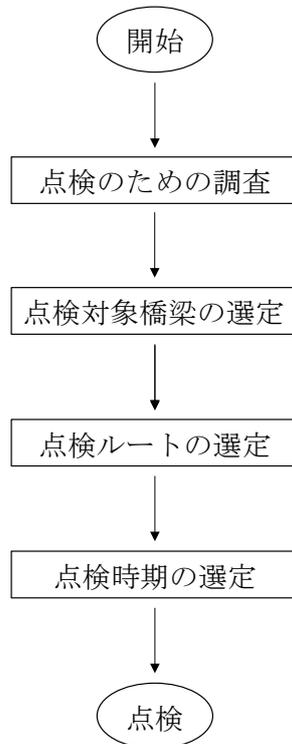


図-3.1 車載式電磁波レーダを用いた点検の手順

3-2. 点検のための調査

車載式電磁波レーダを用いた点検の実施にあたっては、円滑かつ手戻りのない点検を実施することを目的に、必要な情報を得るための調査を行わなければならない。

車載式電磁波レーダを用いた点検の実施にあたり、橋梁の完成図や過去の点検記録、現地の交通状況等を調査するとともに、必要に応じて現地調査を実施し、点検に必要な情報を入手する必要がある。表-3.1に調査項目の例を示す。

表-3.1 点検のための調査項目の例

調査項目	調査内容
橋梁諸元	建設年度、構造形式、寸法、舗装・床版の使用材料、調整コンクリートの有無等
供用環境	交通量、凍結防止剤散布の有無、橋の重要度等
劣化状況	舗装面及び床版下面の劣化程度、劣化進行度
維持管理履歴	過去の点検記録、補修の有無・範囲・工法

3-3. 点検対象橋梁の選定

点検対象橋梁の選定にあたっては、点検のための調査結果に基づき、点検の優先度の高いものから選定することを原則とする。

舗装面に多数のポットホールがある場合や、床版下面の広範囲にエフロレンスが生じている場合等は、既に床版上面の土砂化が進行していることが考えられるため、それらを長期間放置した場合は、陥没に至るおそれもある。そのため、過去の点検記録や舗装面及び床版下面の損傷程度から点検の優先度を設定し、その優先度の高いものから選定することを原則とする。

なお、優先度に大きな差がない場合や、優先度の高い順に選定すると橋梁間の移動距離が長くなり、著しく非効率な点検になる場合等はこれによらない基準で選定してもよい。

3-4. 点検ルートを選定

点検ルートは、点検対象橋梁の架橋位置や交通状況等を考慮し、安全かつ効率的に点検可能なルートを選定しなければならない。

点検ルートは、安全に点検可能であることを第一として選定しなければならない。よって、移動距離の上では短いルートであっても、幅員が狭く車両のすれ違いが困難なルートや、生活道路や通学路等なるべく避けたほうがよい。転回箇所についても同様に安全に転回できる箇所を選定する必要がある。その上で、通勤・退勤時間帯に交通量が増加する路線の点検が昼間になるようにする等効率的な点検ルートを選定したほうがよい。

3-5. 点検時期の選定

点検時期は、車載式電磁波レーダを用いた点検の適用条件を考慮し、適切な時期を選定しなければならない。

2-3(3)に記載したとおり、電磁波レーダを用いた点検は路面乾燥時に実施することが望ましい。したがって、降雨の多い梅雨の時期や、降雪地域では冬季をなるべく避けて点検時期を選定したほうがよい。

3-6. 点検

車載式電磁波レーダを用いた点検は、点検の安全性が確保できる範囲内で、なるべく車線全幅に対して行うことを原則とする。

車載式電磁波レーダの1回での測定可能な幅は約1.5mであり、車線全幅にわたり点検するためには同じ車線を複数回走行する必要がある(図-3.2)。この場合も、現地の交通状況に応じて点検の安全性が確保できる範囲内で実施するものとする。

また、歩車道の境界や中央線付近は測定不可能であることからデータが欠損することに留意する必要がある。

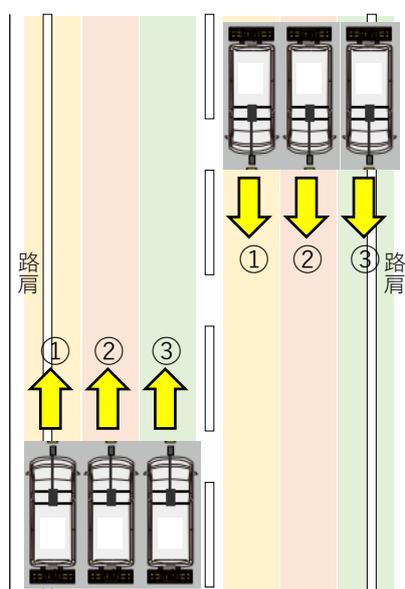


図-3.2 1車線点検時の複数回走行イメージ

第4章 点検結果の作成

4-1. 一般

取得した電磁波レーダの測定データを用いて、床版上面の滞水及び劣化状況を推定するために必要な点検結果を作成する。

電磁波レーダの測定データを用いた点検結果の作成手順を図-4.1に示す。なお、本手順は一例であり、これと異なる手順を否定するものではない。なお、定期点検時に床版上面の滞水状況に関する情報があれば、滞水箇所に着目したより細やかな点検の実施が可能となることから、床版上面滞水推定はなるべく定期点検実施までに行うほうがよい。

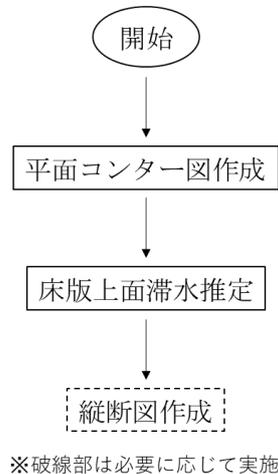
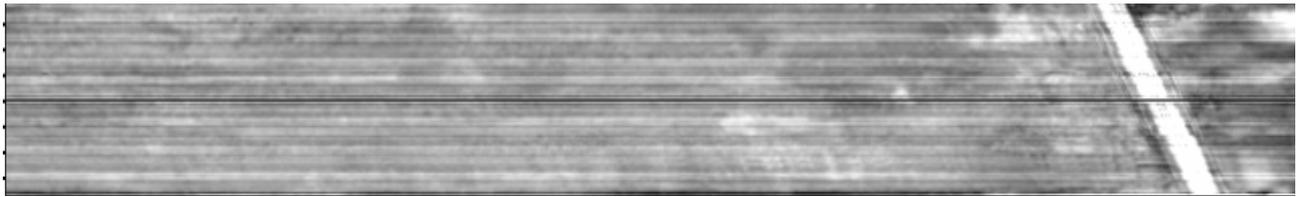


図-4.1 点検結果の作成手順

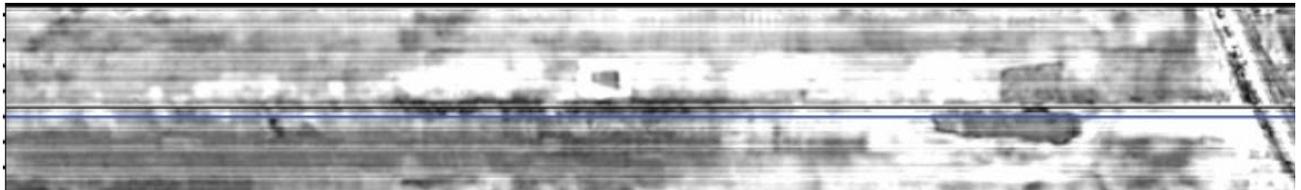
(1) 平面コンター図

平面コンター図とは、図-2.2 のとおり深さ方向に 1cm 間隔に取得した電磁波レーダの測定データを深さ方向に重ね合わせ、反射強度の違いを白黒の濃淡として表現したものである。反射強度は接する二つの媒質の比誘電率によって決まり、表-2.1 で示したとおりアスファルトやコンクリートの比誘電率と比較して水の比誘電率は大きいため、水分の有無により反射強度が変化する。反射強度に差がない、つまり水分が存在しない場合は濃淡に変化の少ない様な色合いで表示され、水分が存在する場合は濃淡の入り混じったまだら模様で表示される。まだら模様の濃淡は水分の有無により変化するが、水分の存在する箇所が濃い又は淡いというわけではなく、同一箇所でも確認する深さにより濃淡が変化する。そのため、周囲と比較して濃淡が異なるかどうかという視点で確認する必要がある。

濃淡が一様な場合及びまだら模様が見られる場合の平面コンター図を図-4.2に示す。



(a)濃淡が一様な場合



(b)まだら模様が見られる場合

図-4.2 平面コンター図

(2) 床版上面滞水推定

床版上面滞水推定は、電磁波レーダ測定により取得した測定データを入力データとして、土木研究所にて構築した床版滞水推定 AI に入力することで、床版上面の滞水推定結果を出力することである。入力データとして、電磁波レーダ測定を行った座標情報及び各座標における反射強度値をまとめた CSV ファイルを作成する必要がある。

床版滞水推定 AI へのデータ入力、ブラウザで床版滞水推定 AI を起動した後、画面上に入力データをドラッグ&ドロップする。一定時間経過するとその下に滞水推定結果が出力される。滞水推定結果は推定された水分量に応じて青色（滞水）及び白色（滞水でない）の2色で表現されている。このうち、青色（滞水）が推定されている場合は、その大きさ及び推定箇所を確認し、必要に応じて縦断図の作成を行い床版劣化の有無の確認を行う。床版滞水推定 AI 及び床版滞水推定 AI に入力する入力データの仕様を表-4.1 及び表-4.2 に、床版滞水推定 AI の動作イメージ及び滞水推定結果例を図-4.3 及び図-4.4 に示す。

表-4.1 床版滞水推定 AI の仕様

項目	仕様
システム種別	サーバ・クライアント方式
想定最大同時アクセス数	10
使用可能なブラウザ	Google Chrome, Microsoft Edge

表-4.2 入力データの仕様

項目	仕様
ファイル形式	CSV 形式
ファイル内の情報	電磁波レーダ測定でデータを取得した座標値及び各座標での反射強度
座標値の種類及び座標の範囲	x 軸（走行直角方向，7.5cm 間隔）， $0 \leq x$ y 軸（走行方向，7.5cm 間隔）， $0 \leq y$ z 軸（深さ方向，1cm 間隔）， $0 \leq z \leq 70$

床版点検AIアプリケーション

(1) 設定値を入力してください

- ・ 滞水推定方法
- ・ 特徴量の使用範囲
- ・ 舗装厚 (1) 対象橋梁の舗装厚を入力

(2) 車載式データをドロップしてください

(2) 電磁波レーダによる橋梁の
測定データ (csv データ) をドラッグ&ドロップ

(3) 水分量出力結果

(3) 滞水推定結果を出力

図-4.3 床版滞水推定 AI の動作イメージ

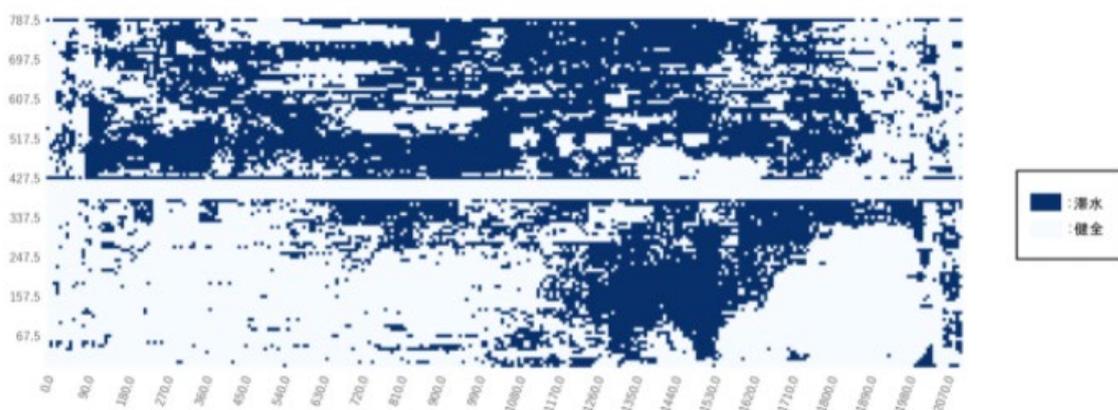


図-4.4 滞水推定結果例

(3) 縦断図作成

縦断図とは、平面コンター図の橋軸方向の任意の縦断面を深さ方向にスライスしたものであり、反射強度の違いを深さ方向に濃淡で表現したものである。床版の状態によって見え方が異なり、濃淡及び形状の違いで水分の有無や床版劣化の可能性を確認することが可能である。状態別の縦断図の例を図-4.4～図-4.6に示す。床版上面に滞水がなく床版劣化も生じていない場合は、図-4.4のように舗装と床版の境界面の濃淡が一樣に映る。一方、床版上面に滞水がある場合は、図-4.5の赤破線部のように滞水がある箇所の反射が大きくなり、舗装と床版の境界面の濃淡が一樣でなくなる。さらに床版が劣化している場合、舗装と床版の境界面にがたつきが確認される。図-4.6は路面上に土砂噴出も確認されており、土砂化が生じていると考えられる。

なお、縦断図は任意の縦断面に対して作成するものであり、橋梁全体分を作成するのは困難である。したがって、床版上面滞水推定結果を確認し、局部的に集中して滞水が推定される等床版損傷のおそれのある箇所に限定して作成するのが望ましい。

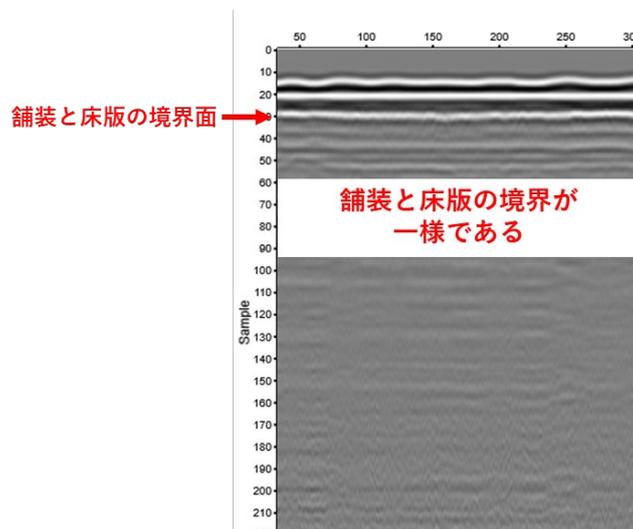


図-4.4 床版が健全な場合

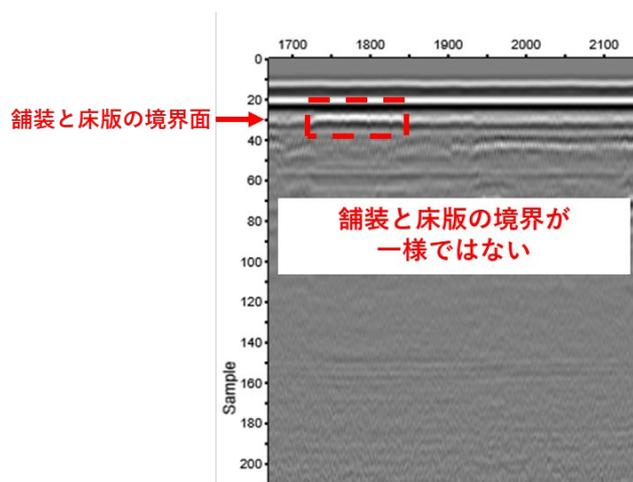


図-4.5 床版上面に滞水がある場合

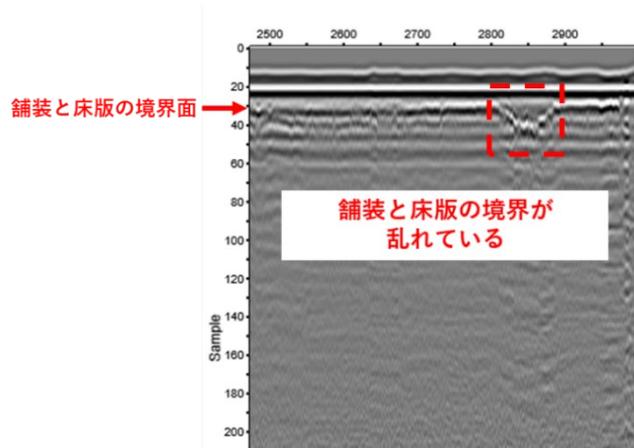


図-4.6 床版に劣化がある場合

第5章 点検結果の活用

5-1. 一般

車載式電磁波レーダを用いた点検結果を活用し、床版上面の損傷状態の診断及び措置方法の検討を行う。

車載式電磁波レーダを用いた点検結果を活用することで、目視では確認できない床版上面の診断・措置につなげることが可能となる。例えば、床版上面滞水推定を行い舗装打継目周辺、路肩部、及び伸縮装置付近に滞水が推定された場合、施工打継目、地覆、及び伸縮装置との境界の目地部から雨水が浸入した可能性が考えられる。このような場合の措置としては、止水シールや目地充填材等による止水、あるいは舗装の打換えによる排水がある。

滞水推定結果に加えて、舗装面や床版下面の損傷状況を組み合わせることにより、優先順位を付けながら適切な予防保全を行うことができると考えられる。点検結果の活用フローの一例を図-5.1 に示す。なお、床版上面滞水推定の精度はまだ十分ではなく、あくまで対策が必要な橋梁を絞り込むスクリーニングの位置付けであることに留意する。床版上面滞水推定により滞水の可能性のある橋梁のスクリーニングを行った後、滞水推定面積や路面状況に応じて縦断面図の作成や削孔・開削調査を行い、床版上面の状態を診断した上でその状態に合った措置を実施する必要がある。

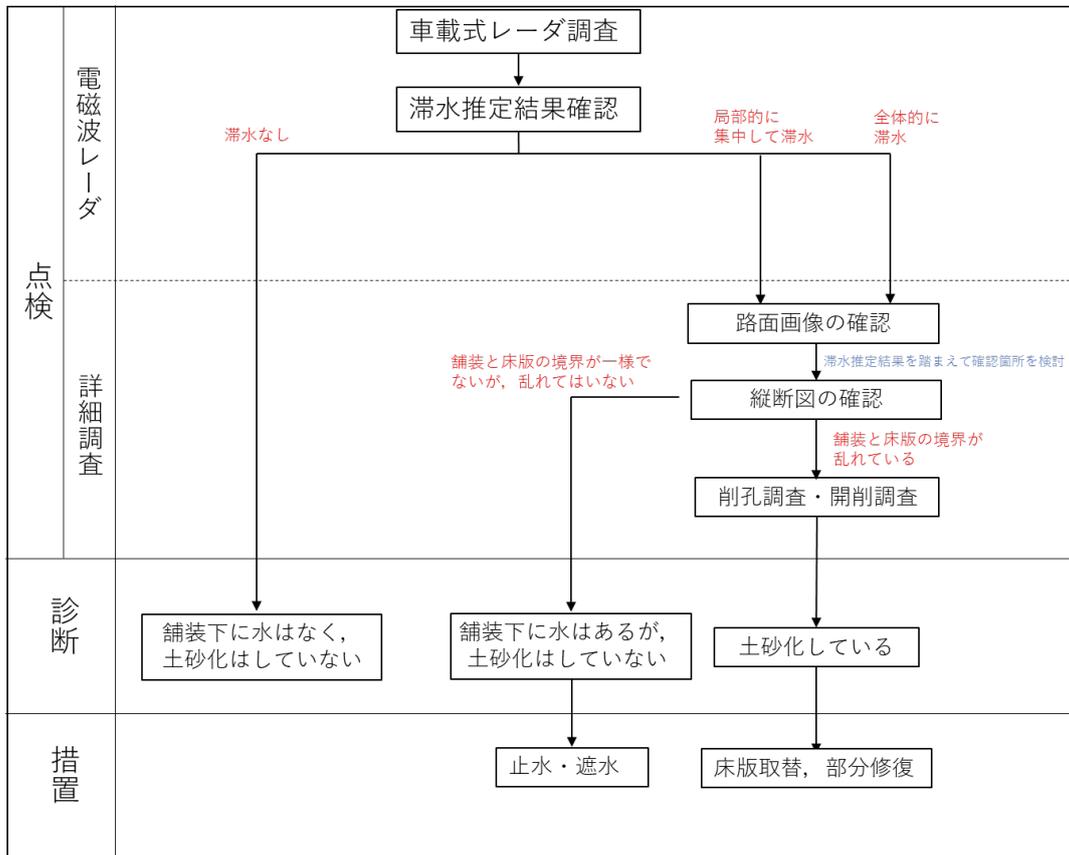


図-5.1 点検結果の活用フロー例

参考資料

1. 滞水推定結果の出力例

ここでは、滞水推定 AI を用いて出力した様々な橋梁の滞水推定結果事例を示す。

(1) 床版が健全と想定される橋梁（新設橋梁）

建設年度が新しく、比較的健全と想定される橋梁の滞水推定結果と路面画像の重ね合わせである。各橋梁の諸元を表-1.1 に、滞水推定結果と路面画像の重ね合わせを図-1.1～図-1.5 に示す。

表-1.1 橋梁諸元

橋梁名	構造形式	建設年度
A 橋	単純 PC プレテン T 桁 (A1-P1) + 単純鋼鈹桁 (P1-P2) + 5 径間連続 PC コンボ (P2-P7) + 単純 PC ホーステン T 桁 (P7-P14) + 3 径間連続 PC プレテン T 桁 (P14-A2)	H28
B 橋	7 径間連続プレテン方式 PC 中空床版	H30
C 橋	4 径間連続非合成鋼鈹桁	H30
D 橋	3 径間連続プレビーム合成桁	R2
E 橋	プレビーム合成桁ポータルラーメン	R1

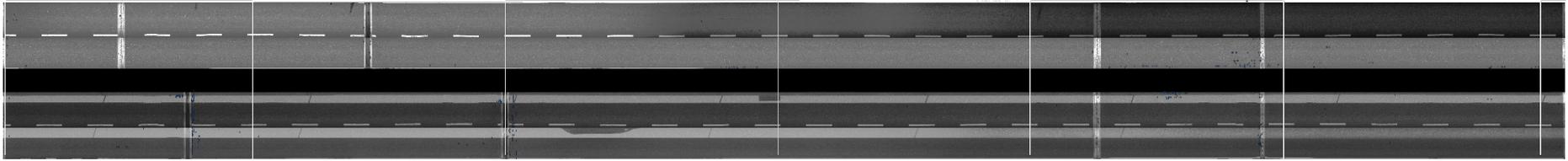


図-1.1 滞水推定結果と路面画像の重ね合わせ (A 橋)

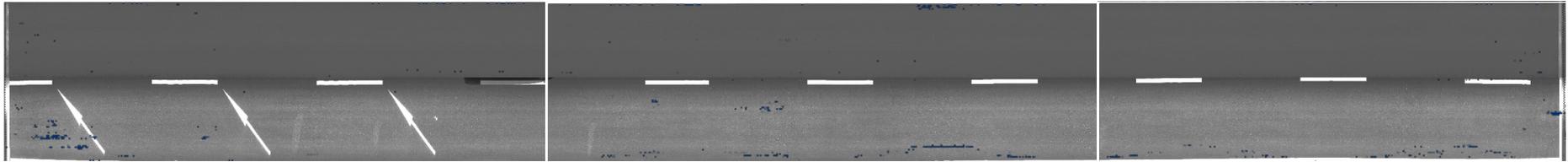


図-1.2 滞水推定結果と路面画像の重ね合わせ (B 橋)



図-1.3 滞水推定結果と路面画像の重ね合わせ (C 橋)

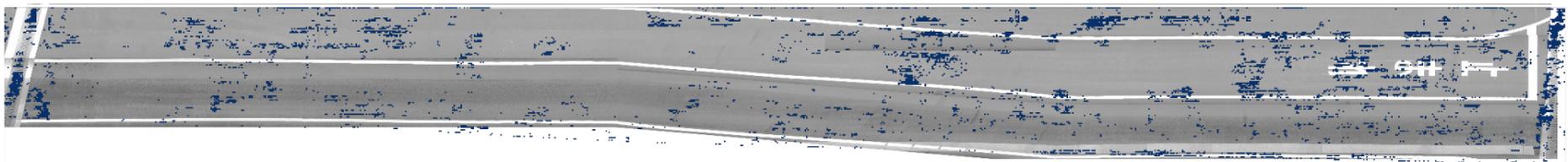


図-1.4 滞水推定結果と路面画像の重ね合わせ (D 橋)

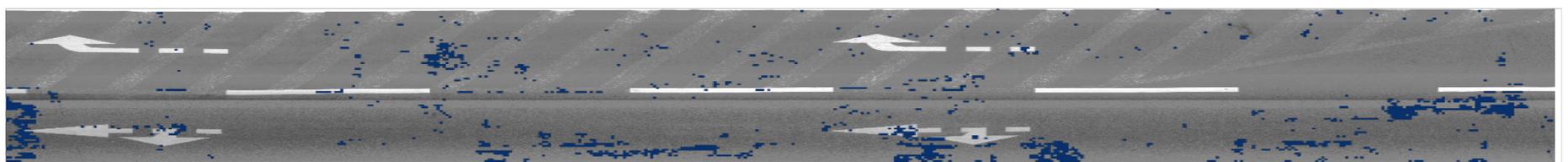


図-1.5 滞水推定結果と路面画像の重ね合わせ (E 橋)

(2) 床版が劣化していると想定される橋梁

建設から一定の年数が経過しており、比較的床版上に滞水や床版劣化が生じていると想定される橋梁の滞水推定結果と路面画像の重ね合わせである。各橋梁の諸元を表-1.2 に、滞水推定結果と路面画像の重ね合わせを図-1.6～図-1.7 に示す。

表-1.2 橋梁諸元

橋梁名	構造形式	建設年度
F 橋	3 径間連続非合成鋼鈹桁	S49
G 橋	3 径間連続非合成鋼鈹桁	S61

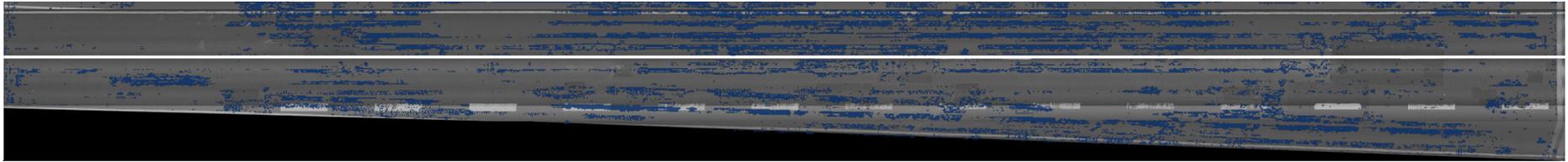


図-1.6 滞水推定結果と路面画像の重ね合わせ (F 橋)

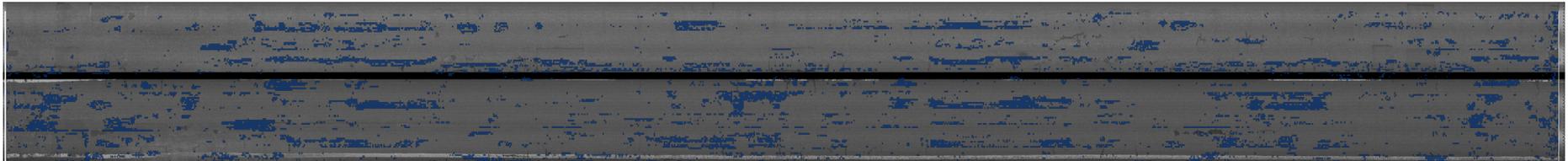


図-1.7 滞水推定結果と路面画像の重ね合わせ (G 橋)

(3) 調整コンクリートを有する橋梁

橋面上に排水勾配確保のため調整コンクリートが施工されている橋梁の滞水推定結果と路面画像の重ね合わせである。調整コンクリートの状況写真と比較すると、調整コンクリートのない部分が滞水有と推定されている。このように調整コンクリートが施工されていると、その影響を受け滞水が正しく推定されないおそれがある。橋梁の諸元を表-1.3 に、滞水推定結果と路面画像の重ね合わせを図-1.8、調整コンクリートの状況を写真-1.1 に示す。

表-1.3 橋梁諸元

橋梁名	構造形式	建設年度
H橋	単純プレテン方式 PC 中空床版	R2

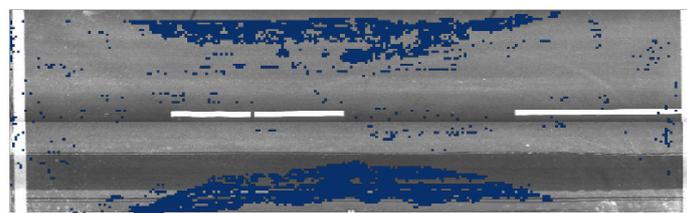


図-1.8 滞水推定結果と路面画像の重ね合わせ (H橋)



写真-1.1 調整コンクリートの状況

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路橋定期点検要領，p.36，2019.
- 2) 国土交通省道路局：橋梁定期点検要領，p.54，2019.
- 3) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：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，pp.6-32，2007.
- 4) 松井繁之：移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について，コンクリート工学年次論文報告書，Vol.9，No.2，pp.627-632，1987.
- 5) 国土交通省：点検支援技術 性能カタログ，pp.2-3-73-2-3-82，2022.
(<https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/inspection-support/pdf/14.pdf>，閲覧日：2023.3.2)

共同研究報告書

Cooperative Research Report of PWRI

No.582 March 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