土木研究所資料

道路橋コンクリート床版の土砂化に関する調査 - 撤去床版の劣化状況と土砂化の調査方法-

令和5年3月

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 先端材料資源研究センター

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。

土木研究所資料 第4442号2023年3月

道路橋コンクリート床版の土砂化に関する調査

- 撤去床版の劣化状況と土砂化の調査方法-

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

上席研究員	上仙	靖*1
上席研究員	石田	雅博*2
総括主任研究員	田中	良樹
研究員	岩谷	祐太
交流研究員	夏堀	格
先端材料資源研究センター		
上席研究員	古賀	裕久
主任研究員	櫻庭	浩樹
研究員	小沢	拓弥
*1 令和4年3月まで, 役職は	当時	
*2 令和4年4月から		

要旨

道路橋コンクリート床版の土砂化の症状やその起点となる劣化機構は、これまでの事例などから複数あり 得ると考えられる.橋ごとの土砂化の症状と発生原因や影響因子を把握するため、撤去されたコンクリート 床版を用いて、塩害、コンクリートのASR、凍結融解などの可能性を想定して、コンクリートの基礎的な材 料物性や塩化物イオン濃度分布を調査した.また、土砂化中間層の拡がりを把握するため、微細ひび割れの 発生状況を調査した.本報告では、これまでに実施した3橋の撤去床版の調査結果をまとめるとともに、土 砂化中間層の調査方法を提示する.

キーワード:コンクリート床版,土砂化,土砂化中間層,塩化物,微細ひび割れ

目	次
н	

1.	はし	じめに	۲ ·····	1
2.	対象	象床胤	反の概要	3
	2.1	Ki≮	看	3
	2.2	Ka	橋	17
	2.3	G橋	द ग	29
3.	調査	至方法	去	46
	3.1	調査	室項目	46
	3.2	コフ	7採取	47
	3.3	測分	Ĕ	52
	3.	.3.1	圧縮強度試験	52
	3.	.3.2	深さ毎の物性測定	52
	3.	.3.3	塩化物イオン濃度分布測定	59
	3.	.3.4	中性化深さ測定	62
	3.	.3.5	微細ひび割れ観察	63
	3.	.3.6	骨材調査	66
	3	37	EPMA 分析 ······	72
				. –
4.	結	見 - ・		75
4.	結 5. 結 5. 4.1	 県 · 圧約	宿強度,弾性係数 ······	75 75
4.	結 5. 結 5 4.1 4.2	見 一 正 縦 ご	宿強度,弾性係数 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	75 75 75 77
4.	結 5 4.1 4.2 4	果 · 圧納 深さ 2.1	宿強度,弾性係数 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	75 75 75 77 ·77
4.	結 5 4.1 4.2 4. 4. 4. 4.	果 · 圧納 深さ 2.1 2.2		75 75 77 ·77 ·81
4.	結 5 4.1 4.2 4. 4. 4. 4. 4. 4. 4. 4.	果 · 圧約 深さ 2.1 2.2 2.3	 宿強度,弾性係数 さ毎の物性 深さ毎の飽水状態の含水率 深さ毎の超音波伝播速度 深さ毎の静弾性係数 	75 75 77 ·77 ·81 ·85
4.	結 5 4.1 4.2 4. 4. 4. 4.3	展 正 縦 こ 2.1 2.2 2.3 塩 们	 宿強度,弾性係数 答毎の物性 深さ毎の飽水状態の含水率 深さ毎の超音波伝播速度 深さ毎の静弾性係数 比物イオン濃度分布(全塩分) 	75 75 77 ·77 ·81 ·85 101
4.	結 4.1 4.2 4. 4. 4. 4.3 4.4	た	 宿強度,弾性係数 答毎の物性 深さ毎の飽水状態の含水率 深さ毎の超音波伝播速度 深さ毎の静弾性係数 比物イオン濃度分布(全塩分) 生化関連分析結果 	75 75 77 .77 .77 .81 .85 101 109
4.	結	果 正新 深さ 2.1 2.2 2.3 塩伯 中性 4.1	 宿強度,弾性係数 答毎の物性 深さ毎の超音波伝播速度 深さ毎の静弾性係数 比物イオン濃度分布(全塩分) 生化関連分析結果 中性化深さ 	75 75 77 .77 .81 .85 101 109
4.	結	 E F F F F F F F F F F F F F F F F F F F	宿強度,弾性係数 答毎の物性 深さ毎の飽水状態の含水率 深さ毎の超音波伝播速度 深さ毎の静弾性係数 比物イオン濃度分布 (全塩分) 生化関連分析結果 中性化深さ 可溶性塩分	75 75 77 .77 .81 .85 101 109 109 112
4.	結	 民 千 王 深 2 2.1 2.2 2.3 中性 4.1 4.2 4.3 	宿強度,弾性係数 答毎の物性 深さ毎の飽水状態の含水率 深さ毎の超音波伝播速度 深さ毎の静弾性係数 と物イオン濃度分布(全塩分) 生化関連分析結果 中性化深さ 可溶性塩分 モルタル細孔径分布, CaCO3含有量	75 75 77 ·77 ·81 ·85 101 109 109 112 113
4.	結	 E F F F F F F F F F F F F F F F F F F F	宿強度,弾性係数 答毎の物性 深さ毎の飽水状態の含水率 深さ毎の超音波伝播速度 深さ毎の静弾性係数 比物イオン濃度分布(全塩分) 生化関連分析結果 中性化深さ 可溶性塩分 モルタル細孔径分布, CaCO3含有量 町ひび割れ観察結果	75 75 77 77 77 81 .85 101 109 109 112 113 114
4.	結	 E 正常 2.1 2.1 2.2 2.3 4.1 4.2 4.3 5.1 	宿強度,弾性係数 答毎の物性 深さ毎の飽水状態の含水率 深さ毎の超音波伝播速度 深さ毎の静弾性係数 と物イオン濃度分布(全塩分) 生化関連分析結果 中性化深さ 可溶性塩分 モルタル細孔径分布, CaCO3含有量 町Oび割れ観察結果 樹脂含浸程度の確認	75 75 77 ·77 ·81 ·85 101 109 112 113 114 114
4.	結 結 4.1 4.2 4. 4. 4. 4.3 4.3 4.4 4.3 4.4 4.5 4. 4.5 4. 4. 4. 4. 4. 4. 4. 4. 4. 4.	 E 正深 2.1 2.2 2.3 4.1 4.2 4.3 5.1 5.2 	宿強度,弾性係数 答毎の物性 深さ毎の飽水状態の含水率 深さ毎の超音波伝播速度 深さ毎の静弾性係数 と物イオン濃度分布(全塩分) 生化関連分析結果 中性化深さ 可溶性塩分 モルタル細孔径分布, CaCO3含有量 町ひび割れ観察結果 樹脂含浸程度の確認 コンクリートコアによる結果	75 75 77 ·77 ·81 ·85 101 109 112 113 114 114 114
4.	結 結 4.1 4.2 4. 4. 4.3 4.3 4.4 4.3 4.4 4.5 4. 4.5 4. 4. 4.5 4. 4. 4. 4. 4. 4. 4. 4. 4. 4.	 E 深 2.1 2.2 2.3 4.1 4.2 4.3 5.1 5.2 5.3 	縮強度,弾性係数 <	75 75 77 ·77 ·81 ·85 101 109 112 113 114 114 114 124 135

4	1.6.1	岩種構成, 岩種分析	56
4	1.6.2	ASR の反応性と症状の有無 1	64
4	1.6.3	粗骨材の細孔分析	76
4	1.6.4	粗骨材の凍結融解抵抗性 1	85
4.7	EPN	MA分析結果	96
4	1.7.1	中性化深さ	96
4	1.7.2	EPMA 分析	97
5. 土花	砂化の	D調査方法としてのコンクリート板の微細ひび割れ観察	204
5.1	コン	~クリート板の微細ひび割れ観察で見られた床版劣化の特徴	204
5.2	土矿	沙化中間層の調査方法としての有効性及び課題	209
6. ま	とめ		211
謝辞			212
参考	文献		213

1. はじめに

道路橋のコンクリート床版の土砂化とは、アスファルト舗装(以下,As舗装という)の下で、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をいう¹⁾. そのとき、硬化セメントペーストは脆く崩れやすい状態または崩れて粒の状態である.また、床版の土砂化が発見されたときには、既に複数の症状が見られ、これまでの事例から、橋によってその起点となる劣化機構が異なる可能性がある¹⁾⁻⁷⁾.いずれの症状も、路面からの水の浸入の影響が疑われるが、劣化機構、損傷過程を含めて不明な点が多い.また、舗装を剥いで明らかに土砂化した範囲だけでなく、その周囲のコンクリートにも水平ひび割れなどの劣化の兆候が見られることがある.この土砂化の中間層はハンマーで打音しても分からない場合があり、補修後の再劣化を防止するには、その補修範囲を適切に設定する必要がある.

従来,国内の道路橋 RC 床版は,疲労による抜け落ちが主たる損傷形態であり,路面水の浸入によって疲 労耐久性が著しく低下することから,2002 年以降,新設の道路橋では,床版と橋面舗装の間に防水層を設置 することが義務付けられている^{8,9}. 1990 年代にスパイクタイヤの使用が規制され,それに伴い一般道にお いても交通安全の観点から,凍結防止剤(塩化物)が路面に多量に散布されるようになっており,防水層の 役割は一層重要となった.しかし,それ以前に建設された既設道路橋は,橋面舗装の全厚打換えの時に防水 層が設置されることはあるが,防水層が設置されていない場合が多い¹⁰.特に,近年よく報告されるように なった床版上面のコンクリートの土砂化が,塩化物によって促進される可能性がある場合,今後さらに土砂 化が急激に増加することが懸念される.

土木研究所では、土砂化が生じていた可能性のある、劣化で撤去された RC 床版を用いて、その症状と発 生原因や影響因子に関する調査を行っている^{1),3),6),11)}. 土砂化の起点となる劣化機構には、塩害や、コンクリー トの ASR、凍結融解(粗骨材の凍結融解を含む¹²⁾) などが想定されることから、それらの判断材料となる、 コンクリートの基礎的な材料物性や塩化物イオン濃度分布を調査した. また土砂化した床版の周囲に存在す ると考えられる土砂化の中間層において同様のデータを収集するとともに、土砂化中間層の拡がりを把握す るため、微細ひび割れの発生状況を調査した.

これまで、それらの結果を踏まえて、現場における土砂化への対処として、路面からの水が床版コンクリートに接しないように床版防水に配慮することで予防保全し、土砂化が発生してしまった後の補修では、その中間層が存在することを意識して、明確に土砂化している範囲よりも0.5~1m程度広い範囲のコンクリートを全厚打換えること、言い換えると、従来は補修範囲をできるだけ小さめにしていたが、土砂化の場合はできるだけ広めにすることを提案している⁴⁻⁷.一方、土砂化が生じた際に、その原因を現場で明確にするには、本資料で示すような網羅的かつ多角的な調査が望まれるが時間や費用の面で難しく、また画一的な調査だけでは却って情報が偏る恐れもあり、個々の現場毎に原因究明を行うことが適当とは必ずしも言えない.

本資料では、これまで行った Ki 橋、Ka 橋及び G 橋の 3 橋それぞれの撤去床版の調査結果をデータ集としてまとめるとともに、土砂化中間層の範囲に関するデータ蓄積に向けて、劣化した RC 床版を撤去する際に

1

おける調査方法案を提示する.なお,3 橋の結果はそれぞれその一部を速報の観点から既に公表しているが ^{1),3),6),11)},本資料では,掲載できていなかった写真やデータ等を追加して集約することとした.これまでの考 察は割愛したので適宜,既往の文献^{1),3),6),11)}も参考にされたい.

2. 対象床版の概要

表-2.1.1 に,調査対象とした3橋のRC床版の概要を示す.様式は,文献¹⁾の付録1を参考とした.以下2.1 ~2.3 に,各橋の撤去前の状況と定期点検結果に基づき,対象とした床版の概要を示す.

2.1 Ki橋

Ki橋は,秋田県能代市に位置する道路橋である.2 連の非合成鋼箱桁橋であり,完成年度は1978年である. 図-2.1.1 に,Ki橋の床版取替前の外観を示す.床版は,2013年に取替工事が実施されるまで35年間供用さ れた.架橋位置は,冬期の日最低気温(気象庁の過去の気象データ:能代市の過去30年平均値)が-1.6℃と なり,冬季に凍結防止剤の散布が行われていた.交通量は2013時点で12,601台/12hであり,大型車混入率 は21.8%と比較的多い.

1999~2000 年に行われた As 舗装打換えの際に防水層が施工されており. 舗装を上り下りで分割施工する ため, センターライン(以下, CL という)付近に舗装,防水層の打継目が設けられた. 抜け落ちが生じた ときには,舗装の打継目に沿って As 舗装に亀甲状のひび割れや浮き,補修跡が多数見られた. 水の噴き出 し,土砂化,抜け落ちはいずれもこれらの As 舗装の補修跡に近い箇所で見られた. 図-2.1.2 に,床版上面の 土砂化の状況を示す. 舗装打継目には,ほぼ橋梁全長にわたって軽微なひび割れや開きが生じていた.

床版取り替え²⁾の際に、下り線側の床版から、下面の劣化程度が異なる3体のRC床版、供試体No.1~3 を、1.5m×7.6mのパネルに切り出した状態で土木研究所に搬入した.図-2.1.3~4に、Ki橋の床版切り出し 位置を、図-2.1.5に、床版撤去の作業状況をそれぞれ示す.また、図-2.1.6に、供試体No.1~3それぞれの採 取付近における撤去前の路面状況を示す.撤去床版のコンクリートは、供試体No.2の一部に見られた床版上 面の部分補修箇所を除き、建設当時のままであり、切断面に最大寸法20~25mm程度の粗骨材が見られた.

図-2.1.7~8 に,2008 年定期点検時の路面と床版下面の状況を示す.また,図-2.1.9 に,2013 年の撤去前調 査時における床版下面の状況を示す.2008 年の定期点検時に,ある程度のひび割れが見られるが,2013 年の 状況から比べると,床版下面に目立った損傷は見られなかった.前掲図-2.1.6 に示した舗装のひび割れや補 修跡も2008 年の点検時には見られなかった.2013 年の抜け落ち時,床版下面には,疲労による明確な格子 状のひび割れは確認されず,抜け落ち,吹き出しや土砂化が見られた車線下を中心に,漏水痕と亀甲状のひ び割れが見られた.道路管理者の調査では,コンクリートの詳細調査の結果,吸水率が比較的高い粗骨材が 使用されていたこと,吸水膨張性が高い粗骨材が含まれていたこと,細骨材,粗骨材ともに川砂利でASRの 反応性骨材が含まれ,ASRの兆候が見られたことなどが報告されている²⁾.

3

	橋梁名	Ki 橋	Ka 橋	G 橋
	橋梁形式	非合成鋼箱桁橋	非合成単純鈑桁橋	非合成連続鈑桁橋
	主桁本数	2	4	5
	上下区分	上下一体	上下一体	上り
	車線数	2	2	2
	有効幅員(m)	12.5 (うち歩道部 3.0)	8.0	9.5
	竣工年 (年)	1978	1972	1973
	適用基準	昭和 47 年	昭和 39 年	昭和 47 年
	舗装厚(mm)	50(車道部)	-	60*
	舗装打換え時期(直近) (年)	_	_	2007
	防水層の有無	有(1999~2000年に敷設)	無	有(2007年に敷設)
	防水層の種類	_		シート系*
設	床版厚(mm)	210	190	210
計	床版支間(mm)	2250	2300	2150~3213
余件	大規模改築・更新・修繕の有無	床版更新済み	床版更新済み	床版更新済み
	柳勢	平野部	山間部	平野部
		小ず	山市市	小ボ
	浦宝合除産(浦宝の予相程度)	1 (ごく軽微)	2 (軽微) ~3 (やや大)	0 (庫宝の可能性あり)
	张古池陕及(张古•271 芯住及) 孤立指公	1 (C、程政) 毎	2 (程版) 5 (((八))	6 (床台の) f記(18) 5) 毎
	流 代 温力 海岸線からの距離 (l_{rm})	10 PL F	10 17 1	10 17 1
		古	10 以上	10 以上
		白斑畑		白佐畑
	味当り18 년 本平(赤官庄,口官庄) ませけよ 刘の廷将	口官哇	口官垤	口官垤
		_		_
	保結防止剤の涙及・飲布回剱			_
	交通量(台/12h, 台/24h)	12601 台/日 (撤去時点)	10418 台/12h	42085 台/12h
	大型車混入率(%)	21.8	20.2	8.6
庙	設計基準強度 (N/mm²)	21 (推定)	_	-
角	実強度(コア強度) (N/mm²)	26~34	_	-
コン	粗骨材の種類(川砂利,砕石)	川砂利	川砂利	川砂利
ク	細骨材の種類(川砂,海砂,砕砂)	川砂	川砂	川砂
リ	内在塩の有無(海砂等)	—		-
ŀ	反応性骨材の有無	有	有	有
材	低品質骨材の有無	吸水膨張性が高い粗骨材	—	-
个个	その他記載事項	—	—	-
補	上面増厚補強の有無	有 (部分的)	有(部分的)	有(部分的)
110 補	上面の補修補強の種類	コンクリート	コンクリート	コンクリート
強	下面の補修補強の有無	無	無	有 (部分的)
履歴	下面の補修補強の種類	_	_	炭素繊維シート接着
	路面からの塩分浸透の有無	有	有	有
+8	床版下面からの塩分浸透の有無 (飛来塩分、打継月漏水等による)	無	有	有
傷	床版下面のひび割れ状況	漏水箇所に亀田状7トアメ害リわ.	部分的にひび割れ	部分的にひび割れ
状況・変		有 部分的 (朱甫道谙界		
	床版下面の遊離石灰の有無,状況	新生产的 (少年) (少年) (少年) (少年) (少年) (少年) (少年) (少年)	有	有,部分的
状発生	床版下面の漏水状況の有無,状況	1,部分的(歩車直境界, 舗装打継目)	有	有,部分的
二履歴	橋面舗装のひび割れ等損傷の有無	有(舗装打継目に沿って顕 著)	有	有,部分的
	上面増厚補強の損傷の有無	有	有	有(浮き)
	下面の補修補強の損傷の有無	—	—	有(部分的浮き)

表-2.1.1 対象床版の概要(1/2)

注)凍害危険度は、長谷川寿夫、藤原忠司著、凍害(技報堂出版、1988.2.) ³による.

*土木研究所資料第 4410 号 4による.

	橋梁名	Ki 橋	Ka 橋	G 橋
	疑われる劣化原因(中性化、	主として塩水の浸入による凍	主として塩水の浸入による塩	主として塩水の浸入による塩
対	塩害, 凍害, ASR, 初期欠陥等)	害, ASR と疲労	害, 凍害, ASR と疲労	害. ASR と疲労
策於		コア凍結融解試験, 骨材吸		
((() () () () () () () () () () () ()	劣化程度の判定に用いた調査方法*	水率試験, ASR 分析, 圧縮	-	-
実		強度試験, 塩分分析等		
施内容	床版の対策が必要となった理由	抜け落ち,床版劣化	床版劣化	床版劣化
	床版の対策	床版の取り替え	床版の取り替え	床版の取り替え
	床版の対策を選定した理由	予防保全	予防保全	予防保全
	共通			
	床版下面の外観目視	0	0	0
	床版下面のたたき	-	—	-
	舗装面の外観目視	0	0	0
	舗装面のたたき	-	—	-
	削孔等による内部ひび割れの確認	0	—	-
	圧縮強度試験	0	—	-
	中性化深さ測定	0	—	-
	鉄筋かぶり測定	0	-	-
	塩化物イオン濃度測定	0	-	-
	コンクリートの含水分布測定	-	—	—
	塩害			
劣	浮き箇所のはつり調査	_	_	_
化	自然電位等によるコンクリート中	_	_	_
原因	の鋼材腐食調査			
の調	EPMA による塩分浸透状況調査	-	_	_
而查	ASR			
方	静弾性係数の測定	0	-	-
12	骨材の岩種,鉱物の調査	\cap	_	_
	(反応性骨材の有無)			
	反応リムの有無	0	-	-
	ASR ゲルの有無	0	-	-
	残存膨張量の測定	-	-	-
	凍害			
	コンクリートの細孔分析	-	-	-
	骨材の種類	0	-	-
	骨材の密度,吸水率	0	-	-
	骨材の安定性試験	0	-	-
	骨材の細孔分析	-	-	-
	骨材の取り出し,骨材の凍結融解	骨材の取り出しのみ	_	_
	木版取替年または撤去年 (年)	2013	2018	2020
	特記事項	2013 年 4 月に RC 床版の抜 け落ちが発生.	_	_

	表-2.1.1	対象床版の概要	(2/2)
--	---------	---------	-------

*) この表では既往の調査内容を示す.



(a) 側面



(b) 第1径間,下面(A1-P1間)



(c) 第5径間,下面(P4-A2間)図-2.1.1 対象橋梁の外観



(a) 橋面アスファルト舗装を全面剥がした状況



(b) 土砂化部の拡大,ただし撮影方向は横向き(図(a)の赤矢印方向に撮影)

図-2.1.2 舗装打継目付近の土砂化の事例(Ki橋,床版撤去時)4)





図-2:1.3 Ki橋の床版切り出し位置⁴⁾



図-2.1.4 Ki橋の床版切り出し位置の状況⁴⁾



図-2.1.5 Ki橋の床版撤去作業の状況



(a) 供試体 No. 1, 舗装補修前 5)



(b) 供試体 No. 1, 舗装部分補修後

注) 黄色枠線は、供試体の位置と推定される範囲を示す.図-2.1.6 Ki橋 供試体 No. 1~3 採取付近の撤去前の路面状況



(c) 供試体 No. 2



(d) 供試体 No. 3

注) 黄色枠線は,供試体の位置と推定される範囲を示す. 図-2.1.6 Ki橋 供試体 No.1~3 採取付近の撤去前の路面状況(続き)



(a) 第1,2径間





(c) 第4径間

(d) 第5径間





(a) 第1径間図-2.1.8 2008 年定期点検時の床版下面の状況



(b) 第2径間



(c) 第3径間



(d) 第4径間図-2.1.8 2008 年定期点検時の床版下面の状況(続き)



(e) 第4径間(続き)



(f) 第4径間(続き)



(g) 第5径間 図-2.1.8 2008 年定期点検時の床版下面の状況(続き)



(h) 第5径間(続き)図-2.1.8 2008 年定期点検時の床版下面の状況(続き)



(a) 第1径間



(b) 第1径間(続き)



(c) 第1径間(続き)図-2.1.9 撤去前調査時の床版下面の状況(2013年5月10日)

2.2 Ka橋

Ka橋は,長野県北佐久郡軽井沢町に位置する道路橋である.橋長26.7mの単純非合成鈑桁橋であり,完成 年度は1972年である.図-2.2.1にKa橋の床版取替前の外観を,図-2.2.2に一般図を示す.床版は,2018年 に取替工事が実施されるまで46年間供用された.架橋位置は,冬期の日最低気温(気象庁の過去の気象デー タ:軽井沢の過去30年平均値)が-9℃,日平均気温でも氷点下となるような寒冷地であり,冬季に凍結防止 剤の散布が行われていた.交通量は10,418台/12hであり,大型車混入率は20%と比較的多い.

図-2.2.1(b), (c)より, CL 付近, 地覆付近及び車輪走行位置付近で舗装の部分補修が行われていることがわかる. 図-2.2.1(d)より, A2 側でも舗装の補修跡が確認されており, 橋面上で複数の舗装の補修跡や路面のひび割れが確認された. なお, 床版防水は未施工であった.

また、図-2.2.3 に調査に用いた撤去床版の切り出し位置を示す.撤去された床版パネルのうち,主に No.17 及び横断方向に連続した No.27, 28 の計 3 パネルを抽出し調査に使用した.図-2.2.4~5 に, No. 17 及び No. 27, 28 それぞれの撤去前の舗装路面と舗装除去後の床版上面の状況を示す.舗装撤去時の床版上面の損傷状況は, 排水枡のある G1 側地覆付近が水みち,滞水ができやすいため土砂化が顕著であり,橋軸方向に連続して確 認された.図-2.2.3 に示したとおり,横断方向の勾配は G4 から G1 へ向けて下がる片勾配であり,縦断方向 は A1 側が低い.図-2.2.6(a),(b)に, No.7,27 の床版上面地覆部の土砂化の状況を示す.また,図-2.2.6(c)に 示すように, No. 28 では CL 付近で著しい土砂化が確認された.No. 27,28 の 2 パネルは CL 付近で舗装の部 分補修が行われており,さらに No.27 では床版上面のコンクリートの部分補修も行われていた.コンクリー トの部分補修の際には,既に土砂化が顕在化していた可能性がある.No.17 でも,CL 付近で床版上面のコン クリートの部分補修跡が見られた.図-2.2.7 に,2017 年に行った事前調査時の床版下面の状況を示す.床版 下面に,部分的に漏水を伴うひび割れが見られていた.同図(i)より,No.28,CL 付近の床版上面に著しい土 砂化が見られた箇所の下面(楕円破線で示す付近)には,漏水を伴うひび割れが生じていた.なお,切断面 の確認から,床版コンクリートには川砂利が使用されていた.

図-2.2.8 に, Ka 橋の 2013 年定期点検時における床版下面の状況を示す. 2009 年定期点検で床版下面のひ び割れ,漏水・遊離石灰が確認され,対策区分 S(詳細調査が必要な損傷)と判定されたため実施した調査 において,床版上面の土砂化が確認された. 2011 年にはひび割れ注入や断面修復が実施されたが, 2013 年の 定期点検では,床版ひび割れ,漏水・遊離石灰が確認されており,対策区分 C(速やかに補修する必要のあ る損傷)と判定された.

17



(a) 側方から撮影



(b) 路面, A1 側から撮影 (その1)

図-2.2.1 Ka橋の床版取替前の状況(2017.11)



(c) 路面, A1 側から撮影(その2)⁴⁾



(d) 路面, A2 側から撮影⁴⁾

図-2.2.1 Ka橋の床版取替前の状況(2017.11,続き)





図-2.2.2 Ka橋の一般図



図-2.2.3 撤去床版の切り出し位置



(a) 舗装路面



(b) 床版上面
 図-2.2.4 Ka橋パネル No. 17の舗装路面と床版上面の状況⁴⁾
 (上:2017年事前調査時,下:2018年更新時)



(a) 舗装路面



(b) 床版上面
 図-2.2.5 Ka 橋パネル No. 27, 28 の舗装路面と床版上面の状況⁴⁾
 (上:2017 年事前調査時,下:2018 年更新時)





(a) パネル No.7の地覆付近
 図-2.2.6 Ka 橋の撤去後の床版上面の劣化状況
 (上:2019年撤去後,下左:2018年撤去時,下右:2017年事前調査時)





(b) パネル No. 27 の地覆付近
 図-2.2.6 Ka 橋の撤去後の床版上面の劣化状況(続き)
 (上:2019 年撤去後⁴⁾,下左:2018 年撤去時,下右:2017 年事前調査時)



(c) パネル No. 28 の CL 付近
 図-2.2.6 Ka 橋の撤去後の床版上面の劣化状況(続き)
 (上: 2019 年撤去後⁴⁾,下: 2017 年事前調査時)





(a) 路面 (A1 側から)

(b) 下面(A1 側から)



(c) 撤去床版 No.5 付近下面の状況(G2-G3)



(d) 撤去床版 No.7, 11 付近下面の状況(G2-G3)



(e) 撤去床版 No.5 付近下面の状況(G1-G2)



- (f) 撤去床版 No.5,7 付近下面の状況(G2-G3)
- 図-2.2.7 Ka橋, 2017年事前調査時の床版下面の状況



(g) 撤去床版No. 17付近下面の状況



(h) 撤去床版 No. 17 と No. 27, 28 の間の状況(G2-G3)



(i) 撤去床版 No.27, 28 付近下面の状況(G2-G3)



(j) A2 付近,床版下面の状況(G2-G3)



撤去床版 No.27 付近下面の状況(G1-G2)

(k)

(l) 支間中央付近,床版下面の状況(G1-G3)

図-2.2.7 Ka橋, 2017 年事前調査時の床版下面の状況(続き)



(a) 路面 (A1 側から)



(b) 下面 (A1 側から)



(c) 撤去床版 No.5 付近下面の状況(G2-G3)



(d) 撤去床版 No.7, 11 付近下面の状況(G2-G3)



(e) 撤去床版 No.5 付近下面の状況(G1-G2)
 (f) 撤去床版 No.5 付近下面の状況(G1-G2, 拡大)
 注) No. 17, 27, 28 下面の写真は見られなかった.
 図-2.2.8 Ka 橋, 2013 年定期点検時の床版下面の状況

2.3 G橋

G橋は、宮城県仙台市に位置する、片側2車線で上下線が分離している自動車専用道路である.橋長 101.0mの3径間連続非合成鈑桁橋であり、完成年度は 1973 年である.図-2.3.1 にG橋の床版取替前の外観を、図-2.3.2 に一般図を示す.床版は、2020年に取替工事が実施されるまで 47年間供用された.架橋位置は、冬季の日 最低気温(気象庁の過去の気象データ:軽井沢の過去 30年平均値)が-1.2℃となり、冬季に凍結防止剤の 散布が行われていた. 交通量は 2015年の調査で 42,085台/12h、大型車混入率は 8.6%である.

図-2.3.3~4 に調査で使用した G 橋の撤去床版の切り出し位置を示す.また,図-2.3.5 に,撤去床版の路面 状況を示す.撤去後の床版厚は 200mm であり,かぶりは概ね確保されていた.切り出した床版下面は連続 繊維シート補強が施工されており,数箇所でシートの浮きが若干生じている状態であった.また図-2.3.6 に 示すとおり,格子窓の多くに白色析出物と漏水が確認された.図-2.3.7 に示すように床版を切り出す前に現 地で実施したコンクリート水分計による床版下面の水分量調査では,格子窓部のコンクリートの水分が多い ことを確認している.図-2.3.8 のとおり,一部の格子窓では計測範囲を超えた水分量であったことが確認さ れた.また,G2-G3 間では床版上面の補修が実施されておりコンクリート上面から概ね深さ 70mm 程度ま での範囲がセメント系補修材で打換えられていた.現地調査時に終点側の舗装のパッチ補修部で土砂化が確 認されたが,撤去床版に外観上土砂化は確認されなかった.

図-2.3.9~13 に, G 橋の 2007 年, 2012 年, 2017 年それぞれの定期点検における路面と床版下面の状況を 示す.端部を除き鋼桁の塗装は健全な状態であった. 2017 年に実施された定期点検では, 全径間で床版下面 に格子状のひび割れ, 漏水・遊離石灰, コンクリートの浮き等の損傷が確認されており, 対策区分判定は C2

(橋梁構造の安全性の観点から速やかに補修等を行う必要がある)と判定されている.その時には床版防水 層とスラブドレーンは設置されていたが,定期点検時に舗装に泥状の析出物が確認されていた.また 2007 年 の定期点検では,調査の対象とした撤去床版の G2-G3 間下面で 2.6m×2.0m の範囲にコンクリートの浮きが 確認されていた.床版に関する補修履歴としては,2007 年に橋面防水工,2009 年に水切り工と床版補修工, 2015 年に床版の部分打換えが実施されている.連続繊維シート補強の施工は定期点検の記録より2009 年に 施工された.



(a) 第1径間





(c) 第1径間





図-2.3.1 G橋(2019年3月現地調査時の状況)





※「↓」は輪荷重位置を示す。

(c) 断面図

図-2.3.2 G橋, 第1径間の一般図


図-2.3.3 G橋の床版切り出し位置



図-2.3.4 撤去床版 No.1 の切り出し位置(A1 からの距離)



注) 黄色枠線は、供試体の位置と推定される範囲を示す.(a) CL 付近、舗装打継目



(b) 供試体 No.1 図-2.3.5 G橋 供試体 No.1 切り出し付近の撤去前の路面状況



注) 黄色枠線は、供試体の位置と推定される範囲を示す.(c) 路肩付近、舗装のひび割れ



(d) 橋面舗装ひび割れと石灰分図-2.3.5 G橋 供試体 No.1 切り出し付近の撤去前の路面状況(続き)



注) 黄色枠線は、供試体の位置と推定される範囲を示す.

(e) 乾燥途中の路面



(f) A1 側から撮影 図-2.3.5 G橋 供試体 No.1 切り出し付近の撤去前の路面状況(続き)



(g) A1 側から撮影(近接,その1)



(h) A1 側から撮影(近接,その2)
注)黄色枠線は、供試体の位置と推定される範囲を示す.
図-2.3.5 G橋 供試体 No.1 切り出し付近の撤去前の路面状況(続き)



(a) 第1径間, 0201から支間中央付近を撮影



(b) 床版 0203



(c) 床版 0203, 連続繊維シートの浮き



(d) 床版 0203, 格子窓のひび割れと漏れ



(e) 床版 0203, 格子窓のひび割れと石灰分

図-2.3.6 撤去前調査時の床版下面の状況(2020年1月10日)



(a) 測定点 A



(b) 測定点 B (図-2.3.6(d)の位置)

図-2.3.7 コンクリートの含水状態の測定状況



(a) 水分計による D 値の実測値(見上げて撮影した画像に追記)
注) FFF は計測範囲を超過したことを表す



注) D 値:値が大きいほど,水分が多いことを表す指標.着色のない範囲は上限値(1000)を超過した範囲 図-2.3.8 床版 0203の撤去前における含水状態と撤去床版 No.1の範囲



(a) 第1径間,路面,2007年

(b) 第1径間,床版下面,2007年



(c) 第1径間,路面,2012年

(e) 第1径間, 路面, 2017年



(d) 第1径間,床版下面,2012年



(f) 第1径間, 床版下面, 2017年





(a) 床版下面,損傷図における浮きの位置



(b) 床版 0303 下面の浮き

図-2.3.10 2007 年定期点検時の第1径間,床版下面の浮き



(a) 床版下面,損傷図



(c) 床版下面 0503 (写真 8)

図-2.3.11 2012 年定期点検時の第1径間,床版下面のひび割れ



(a) 床版下面



(b) 橋面舗装

図-2.3.12 G橋, 2017年定期点検時の第1径間の状況



(a) 床版 0502





(c) 床版 0403 拡大



(d) 床版 0305



(e) 床版 0304 付近の路面

図-2.3.13 2017 年定期点検時の第1径間,床版下面と路面の状況

3. 調查方法

3.1 調査項目

表-3.1.1.1 に、各調査対象橋梁における調査項目を示す.

	調査項目	Ki 橋	Ka 橋	G 橋
	外観調査	0	0	ONo.1 のみ
	圧縮強度試験	0	0	0
酒ナゴトの	a) 深さごとの飽水状態の含水率測定	0	_	—
保さことの	b) 深さごとの超音波伝播速度測定	0	—	—
初注側足	c) 深さごとの静弾性係数測定	0	0	0
塩化	物イオン濃度分布測定(全塩分)	0	0	0
	中性化深さ	0	0	0
	可溶性塩分分析	0	—	0
	モルタル細孔径分布分析	_	_	\bigcirc
	コアの微細ひび割れ観察	0	0	0
コン	クリート板での微細ひび割れ観察	0	0	—
	切断面のひび割れ観察	0	0	0
岩種棒	^{毒成,} 岩種分析,ASR 反応性の有無	0	0	—
	粗骨材の細孔分析*	0	0	—
粗骨柿	オ (粒子及び砂利) の凍結融解試験	0	0	—
粗骨	材(砂利)の密度及び吸水率試験	0	0	—
	粗骨材(砂利)の安定性試験	0	0	—
	EPMA	—	—	0
	調査対象パネル数	3体	3体	1 体
	調査対象コア数	43 本	39本	19本

表-3.1.1.1 調查項目一覧

注)パネル数、コア数は、本文で対象とする数量を示す.

*) コンクリート中での粗骨材粒子の凍結融解抵抗性を表す EDF を算出するための細孔分析

3.2 コア採取

3.2.1 Ki橋

図-3.2.1.1 に, Ki 橋の供試体の形状寸法,外観とコア採取位置を示す.1回目は2017年5月,2回目は2019 年2月にコア採取を行った.図中,舗装打継目のあった CL の位置と,概ねの車輪走行位置も示す.供試体 No.1, No.2 に見られた土砂化は,いずれも舗装打継目を中心に発生していた.採取コアは,圧縮強度試験及 び中性化深さ測定用にφ68mmのコア12本,静弾性係数等,深さ方向の物性変化測定用にφ100mmのコア 8本(1回目採取時)及びφ68のコア10本(2回目採取時),塩化物イオン濃度(全塩分)分布測定用にφ 68mmのコア9本,可溶性塩分分析及び骨材調査用にφ68mmのコア1本,骨材調査用にφ68mmのコア2 本,及び治具等に用いるφ100mmの予備のコア1本とした.深さ方向の物性変化測定用コアは,微細ひび割 れ観察にも用いた.削孔コア一覧を表-3.2.1.1に示す.

コア C13~C15(1回目採取)及び C21~C23(2回目採取)は、鉄筋を含まないように貫通コアを湿式で 採取し、採取直後に JIS A 1152 により、上縁、下縁の中性化深さの測定を行った.コア E11~E18(1回目採 取)及び E21~E26(2回目採取)は湿式で採取した.E11~E18は超音波伝播速度の測定も行うため φ 100mm のコアとしたことから、鉄筋を完全に避けて抜くことが難しい状況であった.そのため、φ 100mm 確保と削 孔のし易さを優先して、あえて鉄筋がコアの中心にくるように削孔位置を決めることとした.コア CL13~ CL15(1回目採取)のみ乾式で削孔した.なお、コア採取が困難な箇所の塩分測定は、下面からドリル法に より試料採取した(CL11, CL12).

3.2.2 Ka橋

図-3.2.2.1 に, Ka 橋の供試体の形状寸法,外観とコア採取位置を示す.採取コアは,全て φ 68mm で,圧縮 強度試験及び中性化深さ測定用に 9 本,深さ毎の静弾性係数測定及び微細ひび割れ観察用に 18 本,塩化物 イオン濃度(全塩分)分布測定用に 10 本及び骨材調査用に 2 本とし,鉄筋を可能な限り避けて湿式で採取し た.削孔コア一覧を表-3.2.2.1 に示す.

圧縮強度試験用コアは、床版上面で健全部と考えられる箇所より各3本を採取した.パネルNo.17の塩分 分析用コアは2本,静弾性係数用コアは4本とした.パネルNo.27,28の塩分分析用コア及び静弾性係数用 コアは、土砂化部から健全部にかけて中間層を確認する目的で採取した.なお、採取したコアでは、水平ひ び割れが見られたコアとコア削孔時に割れたコアが見られたため、削孔後の孔の中を観察して、水平ひび割 れかコア削孔時の割れかを判別した.

3.2.3 G橋

図-3.2.3.1 に、G 橋の供試体の形状寸法,外観とコア採取位置を示す.撤去床版の搬入は2020 年3 月に行われており、1 回目のコア採取は搬入の9 箇月後、2 回目のコア採取はさらにその1 年後に実施した.採取コアは、圧縮強度試験用に3本、深さ毎の静弾性係数測定及び微細ひび割れ観察用に5本、塩化物イオン濃度分布測定用に5本、塩化物イオン濃度分布測定,可溶性塩分分析及び中性化深さ測定用に4本、モルタル細孔径分布分析用に1本、EPMA 分析用に1本とした. 圧縮強度試験及び深さ毎の静弾性係数測定用のコア

47

はφ68mm として鉄筋を含まないよう採取し、塩化物イオン濃度測定及び中性化深さ測定、コンクリートの 細孔等分析用のコアはφ100mm として鉄筋が含まれるのを許容して採取した.採取時から破断していたコ アは床版上面の補修が行われた G2-G3 間側に多く見られ、コアのひび割れや鋼材の腐食が確認された. EPMA 分析用のコアはφ170 とした.

調本市口	コア		 削孔コア					
前 <u></u> 道」但日	本数	供試体 No.1	供試体 No.2	供試体 No.3				
圧縮強度試験及び中性化深さ測定	12	C13, C21~C23	C14, C21~C23	C15, C21~C23				
深さ方向の物性測定	8	E11~E16	E17	E18				
塩化物イオン濃度(全塩分)分布測定	0	CL13, CL21~	CL14, CL21 \sim	CI 15				
	9	CL23	CL23	CLIS				
骨材調査	2	R1, R2	—	—				
可溶性塩分分析及び骨材調査	1	—	R2	—				
深さ方向の物性測定及び微細ひび割	10		E21. E24					
れ観察	10	E21~E26	E21~E24	_				
治具等に使用	1	_	予備	_				

表-3.2.1.1 Ki橋における削孔コア一覧

表-3.2.2.1 Ka橋における削孔コア一覧

調本百日	コア		削孔コア					
調査項日	本数	供試体 No.17	供試体 No.27	供試体 No.28				
圧縮強度試験及び中性化深さ測定	9	17-C1~17-C3	27-C1~27-C3	28-C1~28-C3				
深さ方向の物性測定及び微細ひび割	10	17 E1 - 17 E4	27-E1~27-E5	29 E1 = 29 E(2)				
れ観察	18	1/-E1~1/-E4	27-Е7~27-Е8	28-E1~28-E0-2				
塩化物イオン濃度(全塩分)分布測定	10	17-S1~17-S2	27-S1~27-S3	28-S1~28-S5				
骨材調査	2	_	_	28-R1~28-R2				

表-3.2.3.1 G橋における削孔コア一覧

調査項目	コア本数	削孔コア
圧縮強度試験	3	圧縮-1, 圧縮-2, 圧縮-4
深さ方向の物性測定及び微細ひび割れ観察	5	弹性-1~5
塩化物イオン濃度(全塩分)分布測定	5	塩分-11~15
塩化物イオン濃度(全塩分)分布測定,可溶 性塩分分析及び中性化深さ測定	4	塩分-21~24
モルタル細孔径分布分析	1	材料-3
EPMA 分析	1	EP



図-3.2.1.1 Ki橋の供試体の形状寸法,外観とコア削孔位置









3.3 測定

3.3.1 圧縮強度試験

圧縮強度試験体については、各橋とも、JISA 1132 に準拠しコアの直径に対して高さが2倍になるように 上下端を切断・整形した.その後、圧縮強度試験前にコアをイオン交換水に7日間浸漬し、JISA 1108 及び JISA 1149 に準拠して圧縮強度試験及び静弾性係数試験を行い、圧縮強度及び静弾性係数を測定した.

3.3.2 深さ毎の物性測定

a) 深さ毎の飽水状態の含水率測定

コンクリートの飽水状態の含水率の測定には,市販の二極端子を有する電気抵抗式コンクリート水分計(K 社,HI-800)を用いた.Ki橋の供試体 No.1から採取したコア8本(E11~E18)を対象として,イオン交換 水に7日間浸漬して吸水させた.イオン交換水から取り出し表面水を拭き取った後,3分間気中にて乾燥後 に測定を開始した.コアの下面側端部より10mmの位置から20mm間隔で端子をコア表面に押し当て,水分 計に表示される値(カウント数)を読み取った.測定は橋軸方向及び橋軸直交方向の2方向について,各2 回ずつ行った.

測定値のキャリブレーションを行うため、後述の静弾性係数の測定を含むすべての測定を完了した後、健 全部から採取したコアからコンクリート試料(φ100mm×50mm)を3個切り出し、60℃の乾燥炉で24時間乾 燥した後、イオン交換水中に浸漬し、浸漬開始後0、1、2、3、5、8、24時間後に、上記と同様に含水率を測 定するとともに、試料の表乾質量を測定した.次に105℃の乾燥炉で24時間乾燥させて試料の絶乾質量を測 定した.得られた結果をもとに表示値(カウント数)と飽水状態の含水率との関係を求め、これより試料の 飽水状態の含水率を算出した.

また深さ毎の飽水状態の含水率測定及び,深さ毎の超音波伝播速度測定を実施する前に,採取したコンク リートコアの両端を研磨し,イオン交換水に浸漬した.浸漬7日目に含水率の測定を,9日目に超音波伝播 速度の測定を行い,その後静弾性係数測定までは気中乾燥させた.なお,供試体 E17 は破断しているため, 破断部にボンドを充填して硬化させた後供試体を成形した.



図-3.3.2.1 水分計の外観



図-3.3.2.2 含水率の測定位置

カウント数と含水率の関係を図-3.3.2.3 に示す. 図より,以下の式(1)により試料の飽水状態の含水率を算出 した. キャリブレーション用の供試体採取位置を図-3.3.2.4 に,キャリブレーション測定データを表-3.3.2.1 に 示す. 健全なコアである E16 から 1 体,予備コアから 2 体切り出した. E16 は上端から 10mm を除いた 50mm を切り出し,予備コアは静弾性試験に用いる 65mm のスペーサーを切り出し,静弾性測定終了後に 50mm に 成形した.

含水率(%)=0.0177x-1.1077 (1) x:カウント数



図-3.3.2.3 カウント数と実測含水率の関係



図-3.3.2.4 キャリブレーション用供試体の採取位置

浸	浸漬時間(h)		0	1	·	1		2		3	4	5		3		24	105℃絶乾
	質量(g)	855	5.5	87	4.6	87	78.1	88	30.0	88	1.3	88	2.1	88	33.0	825.0
	飽水状態 含水率(<u></u>	その ※)	3.5	57	5.	67	6	.05	6	.25	6.	39	6.	47	6	.57	0
T1 (直交	橋軸	直交	橋軸	直交	橋軸	直交	橋軸	直交	橋軸	直交	橋軸	直交	橋軸	
E16	水分計	Ŀ	0	0	384	387	406	393	415	408	418	412	421	418	435	423	
	カウント数	中	0	0	374	383	393	403	402	416	403	418	403	418	422	426	
		下	0	0	352	381	391	402	398	413	400	421	405	426	399	432	
	カウント数平	均	0	1	37	77	3	98	4	109	4	12	4	15	4	23	
	質量(g))	821	.1	84	2.7	84	46.9	84	48.6	849	9.7	85	0.6	85	52.3	795.2
- 7 (井	飽水状態 含水率(%	水状態の 3.15 水率(%)		5.64 6.10		6.29 6.41		6.51		6.70		0					
- 予備			直交	橋軸	直交	橋軸	直交	橋軸	直交	橋軸	直交	橋軸	直交	橋軸	直交	橋軸	
	水分計	Ŀ	0	0	398	437	408	446	432	450	433	456	438	460	444	461	
U	カウント数	中	0	0	358	440	390	442	401	445	410	449	417	454	436	460	
		下	0	0	362	380	410	391	422	409	428	412	432	414	435	410	
	カウント数平	均	0	1	39	96	4	15	4	127	43	31	43	36	4	41	
	質量(g))	841	.8	86	3.2	86	57.5	86	59.4	87	1.2	87	2.3	87	73.5	815.0
マ (曲	飽水状態 含水率(<u></u>	そう そう	3.1	8	5.	58	6	.05	6	.26	6.4	45	6.	57	6	.70	0
丁頒			直交	橋軸	直交	橋軸	直交	橋軸	直交	橋軸	直交	橋軸	直交	橋軸	直交	橋軸	
	水分計	上	0	0	402	401	414	410	428	425	430	426	434	430	448	443	
4	カウント数	中	0	0	376	403	384	412	415	418	419	420	428	423	453	433	
		下	0	0	409	415	418	421	426	428	429	428	433	437	443	438	
I	カウント数平	均	0)	4(01	4	10	4	123	42	25	43	31	4	43	

表-3.3.2.1 キャリブレーション測定データ(Ki橋)

b) 深さ毎の超音波伝播速度測定

コンクリートコア側面について,超音波測定器を用いて透過法による超音波伝播時間の測定を行った. 供試体の直径を伝播時間で除すことで超音波伝搬速度(m/sec)を求めた.コア8本を対象として,コア の下面側端部より10mmの位置から高さ方向へ20mm間隔で測定を行った.イオン交換水から取り出し, 3分間気中で乾燥させた後,測定を開始した.測定は橋軸と並行方向及び直交方向2方向で,各2回ずつ の測定を行った.

測定位置を図-3.3.2.5 に示す.測定には超音波測定器(T 社, ESI-10)を使用した.使用したセンサーは 音速センサーΦ20mm×125mm で公称周波数は 28kHz である.



図-3.3.2.5 超音波伝播速度の測定位置

c) 深さ毎の静弾性係数測定

Ki橋(1回目)

圧縮強度試験で測定した同じ床版パネルのコアにおける圧縮強度試験結果より推定される最大荷重の 約 1/3 を載荷荷重として,負荷と除荷を 3 回繰り返し行った.試験機の載荷板との摩擦の影響を除去する ため,上下の載荷板とコアの間に,治具用コアから切り出したΦ100mm×65mmのコンクリートコアをそ れぞれ配置した.

圧縮載荷の際,コアの側面の高さ方向に 20mm 間隔で変位計を設置して,各高さにおける載荷方向の 変位を測定した.変位は橋軸直交位置付近の2か所で測定した.静弾性係数測定の概要図を図-3.3.2.6 に 示す.また変位計は,コアの周囲に配置したマグネットベースに取り付けて固定した.

供試体載荷時の変位及び荷重の記録には動ひずみ計を使用した.変位計にはカンチレバー型変位計を 使用し、5Hz(0.2秒間隔)でデータを記録した.供試体 E18 については、2mm ストロークの変位計で測 定した後、一部の変位計を 5mm ストロークのものに交換し、再度測定を行った.



図-3.3.2.6 静弾性係数測定の概要図(Ki橋(1回目))

Ka 橋・G 橋・Ki 橋(2回目)

図-3.3.2.7 に変位計設置図,図-3.3.2.8 に静弾性係数測定概要図を示す.Ka 橋及び G 橋から採取したコ アの測定の際は,変位計を支持する治具をマグネットベース山形鋼に変更した.Ki 橋の1回目の測定で は,土砂化の調査にもかかわらず治具との隙間の影響で床版上縁側の測定が適切でなかったことから,以 降の試験時はコアを上下反転して測定を行った.ただし,G 橋のコア弾性-3 はコアの上下反転を行って いない.



図-3.3.2.7 静弹性係数測定変位計設置図(Ka橋・G橋・Ki橋(2回目))





図-3.3.2.9 試験状況

Ka 橋及び G 橋の測定結果から文献^{3),4)}に基づき,平均ひずみ,静弾性係数,付加ひずみを算出した. 各高さでの変位から次式を用いて変位 60mm 毎の平均ひずみに換算した.

$$\varepsilon_i = (u_{i+3} - u_i)/L$$

ここに,

*ε*_i : i 点から(i+3)点間の平均ひずみ(i=0,1,2,...)

u_i: i 点における実測変位(両側面の2点の平均値,最下端が*u*₀)

L : 3p

p : 測定間隔(=20mm)

3 サイクル目の載荷時における載荷荷重の 50~100%の範囲を対象として応力-ひずみデータの回帰式 を求め、その傾きを深さ毎の静弾性係数 E とした.

回帰式と横軸の交点におけるひずみを付加ひずみとした(図-3.3.2.10).1 サイクル目以降の除荷後に残留ひずみが生じたが、初期点を0として、原点から回帰式との交点を付加ひずみとした.



3.3.3 塩化物イオン濃度分布測定

塩化物イオン濃度分布測定は各橋とも JIS A 1154 に準拠して測定した.塩化物イオン濃度測定コア一覧を 表-3.3.3.1 に示す.全塩化物イオン濃度及び可溶性塩化物イオン濃度を測定したコアに〇をつけている.

CL11, CL12, R を除く Ki 橋で採取した9本のコア,Ka 橋で採取した10本のコアに対し,コア上縁から 深さ方向に20mm 間隔で切断して各深さの試料とし,全塩化物イオン濃度を測定した.ただし,割れの生じ ているコアは約20~30mm を目安に各ブロックを等分するように切断位置を調整した.コア採取が困難な2 箇所 (CL11, CL12) については下面からドリル法により試料を採取し,全塩化物イオン濃度を測定した. Ki 橋の供試体 No.2 (B2) から採取したコア R は,非中性化領域に当たる深さから図-3.3.3.1 のとおり湿式ダ イヤモンドカッターを用いて試料を切り出し,全塩化物イオン濃度及び可溶性塩化物イオン濃度を測定した.

G橋では,採取した9本の各コアの下面から10mm間隔で切断して各深さの試料とし全塩化物イオン濃度 を測定した.ただし,割れが生じているコアは割れの位置に応じて切断し試料とした.またコア塩分-21~24 から作製した試料のうち,下面から10mmごとに50mmまでの5試料×4本=20試料については可溶性塩化物 イオン濃度の測定も実施した.

橋梁名	供試体名	コア番号	全塩化物イオン濃度測定	可溶性塩化物イオン濃度測定
		CL11	0%	_
	No.1	CL 12	○※	—
		CL 13	0	-
	No.2	CL 14	0	—
	No.3	CL 15	0	_
V:		CL21	0	_
K I 1间	No.1 (B1)	CL22	0	_
		CL23	0	_
		CL21	0	_
	$N_0 2$ (B2)	CL22	0	_
	NO.2 (B2)	CL23	0	_
		R2	0	0
Va 捧	No. 17	17-S1	0	_
		17-S2	0	_
	No.27	27-S1	0	_
		27-S2	0	_
		27-S3	0	_
民は一同		28-S1	0	_
		28-S2	0	_
	No.28	28-S3	0	—
		28-S4	0	_
		28-S5	0	_
		塩分-11	0	_
		塩分-12	0	_
		塩分-13	0	_
		塩分-14	0	_
G 橋	—	塩分-15	0	_
		塩分-21	0	0
		塩分-22	0	0
		塩分-23	0	0
		塩分-24	0	0

表-3.3.3.1 塩化物イオン濃度測定コア一覧

※CL11, CL12のみコアではなくドリル削孔にて試料を採取した.







3.3.4 中性化深さ測定

各橋とも JIS A 1152 に準拠して、全てのコンクリートコア側面に 1%フェノールフタレイン溶液を噴霧す ることで中性化深さの測定を行った. Ki, Ka 橋では採取直後のコア側面に噴霧し、床版上縁側及び下縁側で それぞれ 5 点測定し、その平均値を中性化深さとした. G 橋では、採取したコアを乾式のコンクリートカッ ターで長手方向に割裂した面に噴霧し、コア塩分-21~24 は床版下縁側のみで 9 点測定し、その平均値を中 性化深さとした. コア材料-3 では、床版上縁側及び下縁側でそれぞれ 5 点測定し、その平均値を中性化深さ とした. また、コア EP について、フェノールフタレイン噴霧による中性化深さ測定結果と EPMA(Electron Probe Micro Analyzer)による面分析との比較を行うため、4 箇所から分析試料①~④(縦 80mm×横 80mm)を 切り出し、測定面にフェノールフタレイン溶液を噴霧することで中性化深さの測定を行った(後掲 3.3.7). 床版下面側で 8 点測定しその平均値を中性化深さとした. なお、コア EP の床版下面側は一部炭素繊維シー トで被覆されていた.

加えて、中性化領域ではコンクリート中の CaCO₃含有率が高く、細孔量が小さくなるとされている⁵ことから、中性化深さの結果を補足するため、G 橋のコアのうち材料-3 について水銀圧入式ポロシメータによる モルタル細孔径分布測定及び CaCO₃含有量の分析を行った.細孔径分布測定に使用した機器を図-3.3.4.1 に、 CaCO₃含有量の分析に使用した機器を図-3.3.4.2 に示す.



図-3.3.4.1 モルタル細孔径分布測定機器



図-3.3.4.2 示差熱天秤分析機器

3.3.5 微細ひび割れ観察

床版が土砂化した部分の周囲には、土砂化には至っていないが健全な状態でもない中間的な部分、すなわ ち土砂化中間層が存在すると考えられる. 土砂化中間層が補修されず残っていると、土砂化部分の補修を実 施しても再劣化につながる可能性がある. 土砂化中間層には、床版内部に目視では確認できない微細なひび 割れが生じていることが確認されている.⁶そこで、床版内部に生じている微細ひび割れの確認手法として、 撤去床版より採取した深さ毎の静弾性係数測定用コンクリートコア及び撤去床版をスライスしたコンクリー ト板に対して、蛍光樹脂の含浸による微細ひび割れ観察を行った. 観察した微細ひび割れ供試体の一覧を表 -3.3.5.1 に示す. 微細ひび割れ観察は、①供試体採取→②供試体の乾燥→③真空状態下での樹脂含浸→④カッ ター切断→⑤ブラックライト照射下での微細ひび割れ観察の流れで行う. コンクリート板の微細ひび割れ観 察までの流れを図-3.3.5.1 に示す.

コンクリートコアは、蛍光剤を混ぜた樹脂(以下、蛍光樹脂)を含浸させたのち、ダイヤモンドカッター で半分に切断しその断面を観察した.また、念のため樹脂含浸の程度を再度確認するため、樹脂含浸後の半 割コアの切断面に近いほうから 20mm の範囲を板状に切り出し、再度蛍光樹脂を含浸させたのちダイヤモン ドカッターでさらに半分に切断し、その断面を観察した.この試料を 20mm 板という.コア及び 20mm 板の 観察手順を図-3.3.5.2 に示す.

コンクリート板は、湿式のコンクリートカッターを用いて撤去床版を板状に薄く切断した.コンクリート 板の幅はできるだけ鉄筋に沿って切断しないように 50~80mm とした.真空タンクのサイズに合わせて、長 さ 800mm のコンクリート板とした.

微細ひび割れに含浸させる樹脂は、既往の文献⁷⁾を参考に低粘度エポキシ樹脂とし、用いる蛍光剤は蛍光 顔料とエポキシ樹脂用着色剤の2パターンとした.蛍光顔料は低粘度エポキシ樹脂に対して0.3%添加、エポ キシ樹脂用着色剤は低粘度エポキシ樹脂に対して1%添加した.

コア及び20mm板の乾燥方法は、①105℃の乾燥炉中で24時間乾燥(以下,105℃-乾燥機-24h)、②常温で 真空状態にした容器に乾燥剤(酸化カルシウム)を入れ1週間乾燥(以下,常温-乾燥剤-1w)、③常温で真空 状態にした容器に乾燥剤(酸化カルシウム)を入れ4週間乾燥(以下,常温-乾燥剤-4w)、④60℃の乾燥炉に 入れ1週間乾燥(以下,60℃-乾燥炉-1w)、及び⑤60℃の乾燥炉に入れ4週間乾燥(以下,60℃-乾燥炉-4w) の5パターンとした.また乾燥後の樹脂含浸方法は、樹脂含浸後に①気泡が出なくなるまで真空引き(以下, 真空引き-無気泡)、②1時間真空引き後23時間真空状態を保持(以下,真空引き-23h)の2パターンとした. コアの段階では①のみとした.

コンクリート板の乾燥方法は、105℃の乾燥炉で1週間乾燥(以下、105℃-乾燥炉-1w)させた.その後、 コンクリート板を入れた容器を密閉し、1時間真空引き後、真空状態を保ったまま蛍光樹脂を流し込んだ. その後樹脂が硬化するまで真空状態を保持した.真空状態の保持時間は供試体によって変えており、1時間 真空引き後23時間真空状態を保持したものを真空引き-23h、5時間真空引きし、19時間真空状態を保持した ものを真空引き-19h、5時間真空引きしたのみのものを真空引き-5hと表現した.ただし、コンクリート板の うち、最初に行ったKa橋の6枚は、真空タンクに樹脂注入口がなかったため、事前の真空処理後に一旦真 空タンクを開けて樹脂を流し込んだ.この点について改善するため、真空タンクに樹脂注入口を追加した.

63

以降のコンクリート板4枚(うちKa橋はNo.17①, No.28③)の樹脂含浸では、真空状態を保持したまま、 樹脂を流し込んだ.

橋梁	供試体種別	本数	蛍光剤種別	乾燥方法	含浸方法
Ki 橋	コア	18	エポキシ樹脂用着色剤	105℃-乾燥機-24h	真空引き-無気泡
Ka 橋	コア	11	蛍光顔料	105℃-乾燥機-24h	真空引き-無気泡
Ka 橋	コア	7	エポキシ樹脂用着色剤	105℃-乾燥機-24h	真空引き-無気泡
G橋	コア	5	エポキシ樹脂用着色剤	105℃-乾燥機-24h	真空引き-無気泡
Ki 橋	20mm 板	10	エポキシ樹脂用着色剤	常温-乾燥剤-4w	真空引き-23h
Ka 橋	20mm 板	5	蛍光顔料	常温-乾燥剤-1w	真空引き-23h
Ka 橋	20mm 板	6	エポキシ樹脂用着色剤	常温-乾燥剤-1w	真空引き-23h
Ka 橋	20mm 板	1	蛍光顔料	常温-乾燥剤-4w	真空引き-23h
Ka 橋	20mm 板	3	蛍光顔料	60℃-乾燥炉-1w	真空引き-23h
Ka 橋	20mm 板	3	蛍光顔料	60℃-乾燥炉-4w	真空引き-23h
Ki 橋	コンクリート板	1	エポキシ樹脂用着色剤	105℃-乾燥炉-1w	真空引き-23h
Ka 橋	コンクリート板	6	エポキシ樹脂用着色剤	105℃-乾燥炉-1w	真空引き-23h
Ka 橋	コンクリート板	1	エポキシ樹脂用着色剤	105℃-乾燥炉-1w	真空引き -5 h
Ka 橋	コンクリート板	1	蛍光顔料 エポキシ樹脂用着色剤	105℃-乾燥炉-1w	真空引き-5h
G 橋	コンクリート板	1	エポキシ樹脂用着色剤	105℃-乾燥炉-1w	真空引き-19h

表-3.3.5.1 観察した微細ひび割れ供試体



STEP1:撤去床版切断



STEP2:乾燥



STEP3:真空下で樹脂含浸



STEP4:カッター切断

図-3.3.5.1 コンクリート板の微細ひび割れ観察までの流れ



図-3.3.5.2 コア及び 20mm 板の観察手順

3.3.6 骨材調查

骨材調査の試験項目ごとに,使用するコア番号,対象試料の一覧を表-3.3.6.1 に示す. コアの寸法は ϕ 68mm,長さ約 200mm,コンクリートブロックの寸法は幅 80mm,長さ 800mm,高さ 200mm である.試 験項目の詳細は(1)~(5)に示す.このうち,(1)~(3)における岩種判定やASR の反応性の調査は, 岩石学的調査の経験にある技術者に依頼した.

試験項目	橋梁	コア番号,	対象試料			
(1) 出籍構式	Ki 橋	B1	-R1			
(1) 石裡們成	Ka 橋	28-	-R1			
		B1-R1	相骨材			
	Ki 橋	B1-R2	0 粒子			
(2) 岩種分析		B2-R2	2 不立 1			
	V。 掭	28-R1	粗骨材			
	「私」「同	28-R2	8粒子			
		B1-R1				
(3) ASR の反応性と	Ki 橋	B1-R2				
(J) ASK の反応住と 定世の右無		B2-R2				
迎扒07有黑	K a桥	28-R1				
	「「「」「「」	28-R2				
		B1-R1				
	Ki 橋	B1-R2	岩種分析と			
(4)粗骨材の細孔分析		B2-R2	同一の知母材			
	Ka框	28-R1				
	IXは (同)	28-R2				
	V: 香	No.2 のコンクリー	粗骨材 23 粒子			
(5) 粗骨材の凍結融解	K I 1前	トブロック	と骨材群(約 750g)			
抵抗性	V。 场	No.11, 17, 27, 28 の	粗骨材 20 粒子			
	Na 作	コア約30本	と骨材群(約 750g)			

表-3.3.6.1 試験項目に使用するコア番号

(1) 岩種構成

Ki橋のコア B1-R1, Ka橋のコア 28-R1 を長軸方向に切断して得られた切断面について, 短径 5mm 以上の 骨材を粗骨材, それ未満を細骨材として扱い, 粗骨材の種類や形状, 岩種の観察を実体顕微鏡下で行なった. 粗骨材の各岩石種の構成割合は, コンクリートの切断面に 5mm 間隔の直線を引き, 岩石種ごとにこの線と 交わる長さを積算し, 積算長さを積算総延長で除して求めた (JCI-DD4の線積分法).

(2) 岩種分析

Ki橋のコア B1-R1 における岩種構成割合の算出結果をもとに,Ki橋のコア B1-R1,B1-R2,B2-R2 から粗 骨材 9粒子,Ka橋のコア 28-R1 における岩種構成割合の算出結果をもとに,Ka橋のコア 28-R1,28-R2 から 粗骨材 8粒子を選定した.選定した粗骨材について,骨材周囲のモルタル部を含む厚さ 15~20µm 程度の鏡 面研磨薄片を作製し,これを偏光顕微鏡観察に供し,骨材を構成する鉱物の種類を特定するとともに,岩種 を分類した.

(3) ASRの反応性と症状の有無

実体顕微鏡下で岩種を判別する際や, 偏光顕微鏡観察において, アルカリシリカ反応(ASR)の兆候(反応リムの形成, ASR ゲルの滲出, 骨材のひび割れなど)が見られた粒子について記録した.

(4) 粗骨材の細孔分析

コンクリート中での粗骨材粒子の凍結融解抵抗性を表す EDF を得るために、コンクリートから採取した 粗骨材粒子それぞれの細孔分析を行う.前項(2)の岩種分析に供した粗骨材 17粒子について、それらを観 察した切断面と対の切断面から対応する粗骨材 17粒子をハンマーやタガネで取り出し、湿式ダイヤモンド カッターを用いて適度に切り込みを入れた.その後、粗骨材に付着した水を風乾させ、粗骨材表面に付着し たモルタルやひび割れによる破断面に付着した ASR ゲルを耐水研磨紙で可能な限り取り除き、ニッパを用 いて 2mm 角程度の小片に加工した試料を本項目の試験に供した.なお、測定には水銀圧入式ポロシメー ター(M 社製, AutoPoreIV 9520)を用いた.

ガラス製試料容器(試料室容積 5ml, キャピラリ容積 0.392ml)に、試料中の細孔容積が試料容器のキャ ピラリ容積の 25~90%となるように試料を量り取り、ポロシメーターにセットし、容器内に水銀を注入し た. 次いで、容器ごとに圧力を加え、水銀を試料の細孔に圧入し、その量を測定した. 圧力は段階的に増加 させた. 加える圧力と水銀が圧入される細孔の大きさに関係式(γ=0.484 N/m, θ=130°)があるので、これに より各圧力に相当する細孔径を算出し、一方、各圧力における水銀の圧入量を、その時点までに水銀が圧入 された細孔の量とし、両者より細孔径分布を求めた.

また,平均細孔直径約4.5nm~約45µmにおける測定結果(約220µmの測定値は除外)をもとに,細孔容量及びメディアン細孔直径(細孔容積基準)を求めた.これらの値に基づき,コンクリート中の粗骨材の凍結融解抵抗性の指標である EDF を次式により算出した^{10,11}.

67
EDF = (0.579 / PV) + 6.12 MD + 3.04

ただし, PV:細孔直径 4.5nm 以上の細孔容量, MD:細孔直径 4.5nm 以上の細孔容積分布に基づくメディアン細孔直径, EDF は 100 以下とする.

(5) 粗骨材の凍結融解抵抗性

Ki橋のコンクリートブロック,Ka橋のコア群から,図-3.3.6.1 に示すようにジョークラッシャーを用いて 粉砕し,粗骨材を取り出した.取り出した粗骨材は,図-3.3.6.2 に示すように 5%希釈塩酸に 24 時間浸漬し て,水洗いする工程を3回繰り返して骨材に付いたモルタル分の除去を行った.モルタル分を除去した後の 粗骨材は,粒度分布の測定を行った後(図-3.3.6.3),20mm ふるいに残ったもののうち外観や質感が異なる 粗骨材粒子を任意に約20個選定した.また,20mm と15mm ふるいに残ったもののうち半々ずつ無作為に 骨材群(約750g)を抽出して,本項目の試料とした.なお,粒度分布の測定を行った結果(表-3.3.6.2),粗 骨材の最大寸法は20mmであったと考えられる.

既往の文献^{8,9}を参考に,各試料は塩水(3%NaCl水溶液)に24時間浸漬を行った後(図-3.3.6.4),粗骨材 粒子は1つずつ家庭用ラップで包み(図-3.3.6.5),骨材群は直に1,000cc程度のポリ容器に入れて塩水(3% NaCl水溶液)で満たした.各試料を入れたポリ容器は,凍結融解試験機を用いて(図-3.3.6.6),凍結8時間, 融解8時間の1サイクル16時間として,30サイクルの凍結融解を繰り返した.そして,試験終了後に 10mm ふるいから抜け落ちる粒子の割合(以下,骨材損失率)を測定した.また,凍結融解の温度設定は, ポリ容器内の温度が-19℃~5℃となるように,試験機のブライン温度を-20℃~18℃に制御した.試験中は 各試料を入れたポリ容器の中心温度が設定温度に達しているかを確認するために,水と750gの砕石骨材を 入れたポリ容器の中心部分に,熱電対を設置し温度測定を行った.その試験中の温度履歴を図-3.3.6.7 に, 図中の No.1~6の温度履歴の測定箇所対応表を表-3.3.6.3 に示す.

なお、凍結融解試験で使用しなかった残りの粗骨材を用いて、JIS A1110 に準拠して密度及び吸水率試験 を行った.また、15mm 以上の骨材群(各 50 個を 2 試料ずつ)を用いて、JIS A1122 に準拠して安定性試験 (岩石)を行った.ただし、試料が少ないので、試験後に 15mm ふるいを通過したものを損失分にして、損 失質量率と損失数を算出した.

68



図-3.3.6.1 ジョークラッシャーによる粉砕 図-3.3.6.2 希釈塩酸浸漬によるモルタル除去



(a)Ki橋のコンクリートブロックから採取



(b)Ka橋のコア群から採取

図-3.3.6.3 取り出した粗骨材の外観

×	·····································	
ふるいサイス	粒度分/	(1) (%)
(mm)	Ki 橋	Ka 橋
25	0.0	0.0
20	44.7	41.4
15	40.1	38.5
10	13.7	18.8
5	1.4	1.5
粗骨材の総量 (g)	2,854	2,968

表-3.3.6.2 取り出した粗骨材の粒度分布と総量

注) 試験規格は JISA 1102 に準じた.





図-3.3.6.4 骨材群の3%塩水への浸漬

図-3.3.6.5 粗骨材粒子のラップ包装



図-3.3.6.6 凍結融解試験時の様子

グラフNo.	測定箇所
1	_
2	ブライン温度
3	ポリ容器内水中温度
4	ブライン温度
5	ブライン温度
6	—

表-3.3.6.3 凍結融解試験温度履歴の測定箇所対応表

*グラフNo.1,6については試験には関係ないもの であるため「-」の表示にした。



図-3.3.6.7 凍結融解試験の温度履歴

3.3.7 EPMA 分析

G橋より採取したコンクリートコア EP について、フェノールフタレイン噴霧による中性化深さの測定 と EPMA (Electron Probe Micro Analyzer)による面分析を行った.暴露面は炭素繊維シートで被覆されてお り、格子窓部でコンクリートが一部露出していた(図-3.3.7.1~3.3.7.4).分析試料(縦 80mm×横 80mm) は図の赤破線で示した4箇所から切り出した.



図-3.3.7.1 分析試料の切り出し位置





図-3.3.7.3 コア写真(床版下面側)



注)赤い×印を中心に φ 170mm のコア EP を採取した. 図-3.3.7.4 G橋, コア EP の採取位置付近の状況

試験手順を a)~e)に,使用した分析装置及び測定条件を表-3.3.7.1 に示す.

a)コンクリートカッターを用いて試料を縦 80mm×横 80mm に切り出した.

b)中性化深さの測定後、切り出した試料を補強するためエポキシ樹脂で包埋する.

c)測定面を粗研磨した後、ダイヤモンド研磨パッドを用いて鏡面研磨を行う.

d)2-プロパノール(IPA)で超音波洗浄し, 試料中の水分及びガスを除去するため, 減圧乾燥により 48 時間以上乾燥させる.

e)真空蒸着装置(N社 JEE-400)にて導電処理(炭素蒸着)を行い, EPMA 測定用試料とする.

分析装置	電子プローブマイクロアナライザ(EPMA) N 社製 JXA-8230
加速電圧(kV)	15
照射電流(A)	2×10 ⁻⁷
測定範囲(mm)	縦 80×横 80
ピクセル数	縦 800×横 800
ピクセルサイズ (mm)	0.1×0.1
ビーム径(mm)	0.1
照射時間 msec/pix	50
測定元素	Cl, Na, Ca, S (4元素)
標準試料	Cl:塩化ナトリウム(NaCl), Na:曹長石 (NaAlSi ₃ O ₈), Ca:珪灰石(CaSiO ₃), S:重晶石(BaSO ₄)

表-3.3.7.1 装置及び測定条件

4. 結果

4.1 圧縮強度, 弾性係数

各橋における圧縮強度試験及び静弾性係数試験の結果を表-4.1.1.1 に,圧縮強度と静弾性係数の関係をプロットしたものを図-4.1.1.1 に示す.なお,Ka橋のNo.27 は木片が混入していた1体のコア(27-C2)を除外,No.28 は吸水過程で進展したと考えられる水平ひび割れが確認された1体のコア(28-C3)を除外しコア2本の平均値としている.

Ki橋では、全コアの平均値が圧縮強度で 32.9N/mm²、静弾性係数で 21.6×10³ N/mm²であった. コア C14 の 圧縮強度は平均より 10 N/mm² 以上小さいが、外観調査では床版上下面ともコア採取箇所の周囲に損傷は確 認されておらず、この理由は定かではない.静弾性係数は全てのコアで大きな差は見られなかった.

Ka 橋では、全コアの平均値が圧縮強度で 25.7N/mm²、静弾性係数で 20.2×10⁹ N/mm²であった.各供試体において、圧縮強度・静弾性係数とも大きな差は見られなかった.

G橋では、全コアの平均値が圧縮強度で27.4N/mm²、静弾性係数で16.4×10³N/mm²であった。圧縮強度は圧縮-2が他と比べて若干大きいものの、顕著な差は見られなかった。一方、静弾性係数は圧縮-2が他と比べて3割程度も小さかったが、コアにはひび割れ等の損傷は確認されず、静弾性係数が小さかった原因は不明である。

図-4.1.1.1 には、各橋梁の試験結果とともにコンクリート標準示方書の圧縮強度と静弾性係数の関係式¹⁾ をプロットした線を示している.全ての供試体において、圧縮強度に対する静弾性係数の値がコンクリート 標準示方書の関係式より下回っていた.

			見掛け密度	最大荷重	圧縮強度	静弹性係数	/#*
橋梁	供試体名	コノ番号	(g/cm ³)	(kN)	(N/mm ²)	(×10 ³ N/mm ²)	佩考
	No.1	C13	2.26	151	35.8	20.7	コア1体の値
	No.2	C14	2.22	94.7	22.4	19.3	コア1体の値
17. 压	No.3	C15	2.28	174	40.8	22.5	コア1体の値
K1 临	No.1 (B1)	C21, C22, C23	2.27	124	34.7	22.3	コア3体の平均
	No.2 (B2)	C21, C22, C23	2.27	106	28.9	21.5	コア3体の平均
	No.3 (1B3)	C21, C22, C23	2.28	126	34.8	23.2	コア3体の平均
	No.17	17-C1, 17-C2, 17-C3	2.31	114	30.9	19.3	コア3体の平均
Ka橋	No.27	27-C1, 27-C3	2.27	88.9	24.0	18.8	コア2体の平均
	No.28	28-C1, 28-C2	2.30	105	27.9	22.3	コア2体の平均
		圧縮-1	2.27	98.1	26.8	18.2	コア1体の値
G橋	—	圧縮-2	2.30	108	29.4	12.6	コア1体の値
		圧縮-4	2.28	96.0	26.1	18.5	コア1体の値

表-4.1.1.1 圧縮強度試験及び静弾性係数試験の結果



図-4.1.1.1 圧縮強度と静弾性係数の関係

4.2 深さ毎の物性

4.2.1 深さ毎の飽水状態の含水率

Ki 橋にて実施した深さ毎の7日吸水後の飽水状態の含水率測定結果を表-4.2.1.1~表-4.2.1.2及び図-4.2.1.1に示す. 飽水状態の含水率は空隙率を表す指標の1つであり,深さ方向の劣化の変化を推測する 手がかりの1つとなる可能性がある.図-4.2.1.1中の太線は,土砂化部から採取したコアの結果を示す. 土砂化部から採取したコアの含水率は,概ね含水率6%より高い傾向が見られた.また,コアE17を除き, 目視可能なひび割れが見られる箇所の方が含水率が高い傾向が見られた.ただし,電気は抵抗が小さく流 れやすい経路を通る性質があるため,本測定結果が電極を当てている高さの含水率を正確に測定できて いるとは限らない.

E14 	
场盐十百	
橋軸方向	
3.8	
4.7	
5.3	
5.1	
6.1	
5.8	
6.2	
5.1	
6.3	
5. 7	
6.4	
6. 0	
5.4	
5.4	
5.4	
5.4	
6.5	
6.1	
7.8	
6.9 7.4 ¹⁾	
_	

表-4.2.1.1 飽水状態の含水率測定結果(1)(Ki橋)

供試体の		含水率(%)														
下面側端部からの		E	E15			E	E16			E	E17			E	18	
距離(mm)	直到	[交方向 橋軸方向		直交方向		橋軋	橋軸方向		直交方向 橋		橋軸方向		直交方向		曲方向	
10	6.8	55	4.6	4 4	5.7	56	5.8	56	5.0	47	6.6	54	5.0	50	4. 2	41
10	4.3	0.0	4.3		5.6	0.0	5.4	0.0	4.4	,	4. 2	0.1	4.9	0.0	4.0	
30	5.4	4.8	5. 2	5.0	5.3	54	6.0	56	4. 7	45	6. 2	56	5.4	55	7.1	6 2 ³⁾
50	4. 2	4.0	4.8	0.0	5.4	0.4	5.2	0.0	4.2	1.0	5.0	0.0	5.6	0.0	5.4	0. 2
50	5.9	52	6.0	57	6.1	6.0	6. 7	65	6.6	56	6.9	6 8 ¹⁾	5.3	6 1	6.9	64
50	4.4	0.2	5.4	0.7	5.9	0.0	6.3	0.0	4.6	0.0	6.8	0.0	6.9	0. 1	5.9	О. т
70	5.0	12	7.0	6 5 ³⁾	6.1	58	6.5	58	6.5	6.0	6.3	6.2	4. 3	36	6.1	6 1
70	3.4	ч. <i>2</i>	6.1	0.0	5.5	0.0	5.1	0.0	5.5	0.0	6. 2	0.2	3.0	5.0	6. 1	0.1
00	6.1	59	4. 7	4.8	5.8	5.0	6.3	59	7.7	7 4 ¹⁾	5.6	5 4 ²⁾	5.6	57	7.4	64
30	5.6	0.0	5.0	4.0	4.2	0.0	5.5		7.1	7. 1	5.1	0.4	5.8	0.7	5.3	0. 4
110	5.5	6 1	5.8	54	5.8	55	5.5	54	7.1	6 Q ¹⁾	7.0	6 2 ¹⁾	5.0	47	5.3	52
110	6.6	0.1	5.0	0. 4	5.2	0.0	5.3	0. т	6.8	0.0	5.4	0.2	4.4	т. /	5.2	0.2
130	6.0	63	5.7	5 /	6.0	57	6.0	6 1	4.8	56	2. 5	1 5 ¹⁾	6.0	55	5.2	5 8
150	6.5	0.0	5.0	0. 4	5.4	5.7	6.2	0.1	6.4	0.0	6.6	ч. о	5.1	0.0	6.3	5.0
150	5.7	57	5.4	6.4	5.5	5 /	6. 2	57	5.6	1 6 ¹⁾	5.5	5 0 ³⁾	6.0	53	5.5	53
150	5.8	0.7	7.4	0. 4	5.3	0. 4	5.2	0.7	3.6	т. о	4.5	0.0	4.7	0.0	5.1	0.0
170	3.7	1 9	5.1	53	5.8	56	6.5	58	4.9	17	4. 7	58	5.4	1 9	5.5	51
170	6.1	т. v	5.6	0.0	5.5	0.0	5.1	0.0	4.5	т. /	6.9	0.0	4.3	т. v	4.8	0.1
100	3.8	4.6	4.8	55	5.7	5.3	5.2	47					4.1	3 9	5.9	57
190	5.4	т. U	6.2	0.0	5.0	0.0	4.3	т. /					3.8	0.5	5.6	0.7

表-4.2.1.2 飽水状態の含水率測定結果(2)(Ki橋)



図-4.2.1.1 深さ方向の飽水状態の含水率分布(水中浸漬7日)

4.2.2 深さ毎の超音波伝播速度

Ki橋にて実施した超音波伝播速度の測定結果を表-4.2.2.1~4.2.2.2 及び図-4.2.2.1 に示す.全体的に、下端付近に比べて、上端付近の速度が遅い傾向が見られたが、土砂化部から採取したコアと比較的健全なコアとの明確な違いは見られなかった.

供試体の							超	音波伝持	番速度((m/s)						
下面側端部からの		E	11			E	12			E	13			E	E14	
距離(mm)	直え	を方向	橋車	由方向	直到	交方向	橋車	由方向	直	交方向	橋車	由方向	直交	を方向	橋軋	曲方向
10	3539	2501	3868	2060	3323	3133 1)	4120	1102	3724	2750	3809	2021	4211	1285	4141	1195
10	3642	2091	3868	3000	3523	3423	4086	4103	3795	3759	3853	3031	4358	4200	4229	4100
30	3441	2516	4124	1101 2)	3486	3560	4616	1716 3)	3780	2752	4320	1102 3)	4008	1066	4024	4074
	3590	3010	4124	4124	3652	2009	4816	4/10	3724	3752	4664	4492	4124	4000	4124	4074
50	3502	2572	3992	2061	4103	1170 3)	4069	4005	3710	2717	4057	1105 3)	3564	2665	4516	1610 ³⁾
50	3642	3072	3929	2901	4243	4173	4120	4095	3724	3/1/	4193	4120	3766	3005	4708	4012
70	3945	20022)	3539	24061)	3879	A1263)	3748	2710 1)	3465	2520	3738	2720	3780	סדדט	3669	2702
70	4040	3993	3453	3490	4392	4130	3748	3740	3590	3520	3738	3730	3766	3773	3738	3703
00	3738	2750	3406	2120 1)	3639	3630 1)	3599	26061)	3430	25401)	3838	2022	3629	2721	3527	2520
90	3780	3759	3453	3430	3639	2028	3612	3000	3669	5049	3868	3000	3838	3734	3552	2029
110	3724	2720 1)	3564	2571	3599	25001)	3403	2157 1)	3564	2617 1)	3603	2616	3642	2710	3795	2752
110	3752	3730	3577	3071	3599	2099	3511	3437	3669	3017	3629	3010	3853	3740	3710	3752
120	3577	25071)	3590	2500 1)	3474	2527	3599	2567	3327	2201 1)	3272	2267 1)	3710	2750	3780	7070
130	3616	2097	3453	3022	3599	3037	3535	3007	3441	3304	3261	3207	3795	3752	3795	3707
150									3669	26021)	3272	224E1)	3766	2002	3976	2076
150									3696	3063	3418	3345	3838	3002	3976	3970
170													3809	2060	3766	2700
170													3929	2009	3809	3/00
100													3696	2752	3683	2660
190													3809	3703	3656	2009

表-4.2.2.1 超音波伝播速度測定結果(1)(Ki橋)

供試体の		超音波伝播速度(m/s)														
下面側端部からの		E	E15				E16			E	E17		E18			
距離(mm)	直ず	を方向	橋	曲方向	直ず	を方向	橋	橋軸方向		直交方向		軸方向	直交方向		橋軸方向	
10	4020	4007	4172	4100	4045	4007	3902	2010	3929	2014	3724	0710	3683	0701	4008	4050
10	4154	4087	4225	4198	4028	4037	3917	3910	3898	3914	3696	3710	3780	3/31	4107	4058
20	3972	4001	3972	2000	3798	2007	3658	0705	3696	2002	3780	2700	3360	0407	4495	46003)
30	4069	4021	4020	3990	3857	3827	3812	3/35	3669	3083	3780	3780	3514	3437	4708	400Z°/
50	3748	2700	3849	2004	3566	2000	3645	26700	3502	25201)	3465	25201)	3564	0577	3824	20203)
50	3849	3/99	3879	3864	3685	3020	3713	36/89	3577	3539"	3590	35281/	3590	3577	4040	3932°
70	3748	0755	3706	07073)	3443	2505	3631	0050	3502	0514	3642	0040	3465	2500	3824	0001
70	3762	3/55	3748	3121%	3566	3505	3672	3652	3527	3514	3642	3642	3710	3588	3838	3831
00	3791	0040	3599	2050	3252	0047	3516	2525	3642	00001)	3316	0055 2)	3795	0700	3766	0010
90	3895	3843	3706	3053	3443	3347	3554	3535	3683	366217	3395	33552	3766	3780	3853	3810
110	3426	0540	3185	2200	3431	2505	3631	0050	3430	04411)	3395	20002)	3960	2004	3683	0000
110	3665	3546	3426	3306	3579	3505	3672	3652	3453	3441''	3178	32862	4008	3984	3710	3090
100	3380	0000	3248	0007	3467	0550	3504	0554	3338	0040	3465	0.400	3824	0054	3738	0717
130	3357	3368	3426	3337	3645	3556	3605	3554	3349	3343	3527	3496	3883	3854	3696	3/1/
150	3586	0504	3323	0075	3592	0070	3741	0755	3360	00701)	4008	10003)	3853	0001	3710	0700
150	3462	3524	3426	3375	3755	36/3	3769	3755	3383	33720	4158	40833	3868	3861	3853	3782
170	3586	0040	3258	0004	3727	0744	3713	0710	3838	07051)	3824	00402)	3914		3929	
170	3706	3646	3269	3264	3755	3/41	3713	3/13	3752	3795"	3868	38463	3898	3906	4008	3969
100	3087	0014	3438	0.400	3579		3408	8					3898	0007	4090	1000
190	3334	3211	3486	3462	3579	3579	3339	33/3					3976	3937	4073	4082

表-4.2.2.2 超音波伝播速度測定結果(2)(Ki橋)



図-4.2.2.1 深さ方向の超音波伝播速度分布(水中浸漬9日)

4.2.3 深さ毎の静弾性係数

(1) Ki橋

a)1 回目調査

図-4.2.3.1~4.2.3.2 に, コア E11~E18 の深さ毎の静弾性係数 E'。及び付加ひずみ ɛ'。を示す. 各値の 60mm の測定範囲内にひび割れや鉄筋が含まれているものはそれぞれ図中に示した. 軸直角方向に鉄筋を含む 場合に静弾性係数が低下するとの報告があるが¹⁾,結果からは明確な鉄筋の影響は見られなかった. 比較 的健全な箇所から採取したコアは,変位の値が小さいため E'。のばらつきが大きくなる傾向が見られた. また,土砂化部から採取したコアは比較的健全な箇所から採取したコアに比べて E'。が小さい傾向が認め られた. 比較的健全な箇所から採取したコアには目視可能なひび割れは見られなかったが,その中ではコ ア E15 の上部付近の E'。が他のコアに比べて小さい傾向が見られた.

図-4.2.3.2 中に参考として示した最上縁の値は,治具との隙間の変位を含むためいずれも極端に大きい. 土砂化部から採取したコア E11~E13 及び E17 はいずれも付加ひずみが大きい.付加ひずみが大きい箇所 は,いずれも目視可能な水平ひび割れが見られたことから,大きい付加ひずみの主たる要因は水平ひび割 れによると考えられる.鉄筋が入っていることで付加ひずみが特段に大きくなることはないようである. コア E15 は,土砂化部から採取したコアではなく,目視可能なひび割れが見られたわけではないが,コ ア上縁付近で付加ひずみがやや大きい傾向が見られた.

b)2 回目調査

表-4.2.3.1~表 4.2.3.2 及び図-4.2.3.3~図-4.2.3.6 に,供試体 No.1 (B1) で2回目に採取したコア B1-E21 ~E26,供試体 No.2 (B2)から採取したコア B2-E21~E4の深さ毎の静弾性係数 E'。及び付加ひずみ ɛ'。を示す.1回目調査同様,ひずみを算出した標点間(60mm)の鉄筋,ひび割れ,さらに接着層(破断面・割れ)の有無を図中に示した.ひび割れが確認された層と接着処理を行った層,さらにその両方の層では,弾性係数の低下と付加ひずみの増加が顕著に表れた.特に B1-E21, B1-E22, B2-E21 については,複数の水平ひび割れ等が生じていたためと推定される.



図-4.2.3.1 Ki橋における深さ毎の静弾性係数 E'。



図-4.2.3.2 Kiにおける深さ毎の付加ひずみ ɛ'。

	床版上縁からの距離	(mm)	0-60	20-80	40-100	58.9-115	78.9-135	98.9-155	118.9-175	138.9-195
D1 E21			30	50	70	86.95	106.95	126.95	146.95	166.95
BI-E21	弹性係数E	(kN/mm ²)				9.05	8.60	9.37	12.81	11.12
	付加ひずみɛ'。	(×10 ⁻⁶)				2659	2346	1333	716	854
	床版上縁からの距離	(mm)	0-60	20-80	40-100	58.7-115	78.7-135	98.7-155	118.7-175	138.7-195
D1 E22			30	50	70	86.85	106.85	126.85	146.85	166.85
DI-E22	弹性係数E	(kN/mm ²)				9.42	7.69	8.26	8.23	10.10
	付加ひずみɛ'。	(×10 ⁻⁶)				2220	1888	1104	1250	907
	床版上縁からの距離	(mm)	0-60	22.8-75	42.8-95	62.8-115	82.8-135	102.8-155	122.8-175	142.8-195
D1 E22			30	48.9	68.9	88.9	108.9	128.9	148.9	168.9
B1-E25	弹性係数E	(kN/mm ²)		15.18	16.53	14.56	12.64	12.50	12.44	13.92
	付加ひずみɛ'。	(×10 ⁻⁶)		1119	582	541	245	486	276	662
	床版上縁からの距離	(mm)	0-60	20-80	40-100	60-120	80-140	100-160	120-180	140-192
D1 E24			30	50	70	90	110	130	150	166
D1-E24	弹性係数E	(kN/mm ²)	22.48	20.32	32.68	24.22	21.18	28.10	21.75	23.97
	付加ひずみɛ'c	(×10 ⁻⁶)	86	119	309	111	115	100	80	598
	床版上縁からの距離	(mm)	0-60	20-80	40-100	60-120	80-140	100-160	120-180	140-196.4
D1 E25			30	50	70	90	110	130	150	168.2
D1-E23	弹性係数E	(kN/mm ²)	18.96	19.50	16.87	24.72	18.99	20.82	21.87	21.92
	付加ひずみɛ'。	(×10 ⁻⁶)	175	164	492	321	451	0	128	269
	床版上縁からの距離	(mm)	0-60	20-80	40-100	60-120	80-140	100-160	120-189.6	
D1 E26			30	50	70	90	110	130	154.8	
D1-E20	弹性係数E	(kN/mm ²)	13.16	18.54	16.26	26.90	24.14	26.07	18.91	
	付加ひずみɛ'c	(×10 ⁻⁶)	680	370	309	39	140	90	787	

表-4.2.3.1 深さ毎の静弾性係数及び付加ひずみ(供試体 B1)



図-4.2.3.3 Ki橋における深さ毎の静弾性係数(供試体 B1)



図-4.2.3.4 Ki橋における深さ毎の付加ひずみ(供試体 B1)

	床版上縁からの距離	(mm)	0-60	20-80	40-100	60-120	80-140	100-160	120-180	140-200
D2 E21			30	50	70	90	110	130	150	170
B2-E21	弾性係数E	(kN/mm ²)		9.34	7.26	3.84	3.57	3.36	6.28	6.37
	付加ひずみɛ'。	(×10 ⁻⁶)		1928	2804	5166	4033	4587	1168	2305
	床版上縁からの距離	(mm)	0-60	20-80	40-100	60-120	80-140	100-160	120-180	140-185.4
D2 E22			30	50	70	90	110	130	150	162.7
B2-E22	弹性係数E	(kN/mm ²)	9.00	9.71	12.97	25.40	17.45	20.85	26.76	21.00
	付加ひずみɛ'。	(×10 ⁻⁶)	1364	1335	331	238	326	305	99	351
	床版上縁からの距離	(mm)	0-60	20-80	40-100	60-120	80-140	100-160	120-180	140-192.5
D2 E22			30	50	70	90	110	130	150	166.25
B2-E23	弹性係数E	(kN/mm ²)	29.98	24.76	20.76	23.63	18.66	22.18	24.31	18.83
	付加ひずみɛ'。	(×10 ⁻⁶)	-131	111	168	153	-76	122	-6	383
	床版上縁からの距離	(mm)	0-60	20-80	40-100	60-120	80-140	100-160	120-180	140-203.3
D2 E24			30	50	70	90	110	130	150	171.65
D2-E24	弹性係数E	(kN/mm ²)	16.23	15.81	20.23	25.63	25.63	20.58	20.72	20.58
	付加ひずみɛ'。	(×10 ⁻⁶)	68	9	109	143	151	33	84	301

表-4.2.3.2 深さ毎の静弾性係数及び付加ひずみ(供試体 B2)

B2-E21 は試験中に圧壊しひび割れが発生したため、弾性係数は小さく、付加ひずみは大きな値となっている.



図-4.2.3.5 Ki 橋における深さ毎の静弾性係数(供試体 B2)



図-4.2.3.6 Ki橋における深さ毎の付加ひずみ(供試体 B2)

(2) Ka 橋²⁾

表-4.2.3.3~4.2.3.5及び図-4.2.3.7~図-4.2.3.12に深さ毎の静弾性係数及び付加ひずみの測定結果を示す. ひずみを算出した標点間(60mm)の鉄筋,水平ひび割れ,接着層(破断面・割れ)の有無も併せて示す. 供試体No.27及びNo.28に着目すると,水平ひび割れがある箇所では付加ひずみが発生するが,27-E6,27-E6-2,28-E7では付加ひずみの発生が確認されていない.これらのコアでは明確な水平ひび割れが確認さ れたが,無収縮モルタルの充填により整形した箇所であったため,この部分については付加ひずみが発生 しなかったと考えられる.ただしこれらのコアでは,静弾性係数の低下は水平ひび割れ部で確認されてお り,微細なひび割れもあったものと推察される.

排水枡付近及び CL 付近の土砂化部直下(27-E1, 27-E2, 28-E7)は、水平ひび割れがあり、付加ひずみの発生及び静弾性係数の低下が確認された. 補修材とコンクリートの界面が良好であったにもかかわらず、補修部直下(27-E6, 27-E6-2)でも水平ひび割れ、付加ひずみの発生及び静弾性係数の低下が確認されており、補修時の土砂化撤去範囲の設定が土砂化部のみでは不十分であることが推察される. 床版上に土砂化が見られなかった土砂化部周辺で, 27-E3, 27-E5, 28-E4 においても水平ひび割れがあり、付加ひずみの発生及び静弾性係数の低下が確認された. しかし, 28-E5 は土砂化部直近で採取したコアであるが、水平ひび割れや材料劣化の傾向は見られなかった. また, 28-E3 や 28-E2 といった土砂化部から 1m 程度離れた箇所では、劣化の傾向が見られないことから、供試体 No.28 のパネルでは、中間層は土砂化部のごく近傍のみで発生していると考えられる.

中間層では高い塩分濃度を示しているが,静弾性係数の低下や付加ひずみの発生がなく比較的健全と 考えられる 27-E1 や 27-E2 の下部や 28-E1, 28-E2, 28-E3 付近では塩分含有量が低いため,塩水の供給が 中間層形成の要因となっている可能性がある.

	床版上縁からの距離	(mm)	0-60	20-80	40-100	60-120	80-140	100-160	120-180	140-202
A 17 E1			30	50	70	90	110	130	150	171
AI/-EI	弹性係数E	(kN/mm ²)	15.90	15.74	16.61	17.38	18.81	16.57	17.34	18.78
	付加ひずみɛ'。	(×10 ⁻⁶)	-14	19	199	142	365	701	713	700
	床版上縁からの距離	(mm)	0-60	20-80	40-100	60-120	80-140	100-160	120-180	140-197.8
A 17 E2			30	50	70	90	110	130	150	168.9
A1/-E2	弹性係数E	(kN/mm ²)	19.57	17.47	19.09	21.24	22.08	25.05	24.30	19.62
	付加ひずみɛ'。	(×10 ⁻⁶)	69	23	134	94	139	189	16	806
	床版上縁からの距離	(mm)	0-60	20-80	40-100	60-120	80-140	100-160	120-185.5	
A 17 E2			30	50	70	90	110	130	152.75	
AI/-E3	弹性係数E	(kN/mm ²)	18.79	19.97	19.02	18.92	16.69	16.12	15.27	
	付加ひずみɛ'。	(×10 ⁻⁶)	148	135	211	120	380	302	794	
	床版上縁からの距離	(mm)	0-60	20-80	40-100	60-120	80-140	100-160	120-180	140-190
A 17 E4			30	50	70	90	110	130	150	165
A1/-E4	弹性係数E	(kN/mm ²)	9.73	9.04	9.56	9.48	11.22	12.43	17.71	13.81
	付加ひずみɛ'。	(×10 ⁻⁶)	963	822	731	799	554	528	386	2072

表-4.2.3.3 深さ毎の静弾性係数及び付加ひずみ(供試体 No.17)



図-4.2.3.7 深さ毎の静弾性係数(供試体 No.17)



図-4.2.3.8 深さ毎の付加ひずみ(供試体 No.17)

	床版上縁からの距離	(mm)	0-60	18-78	38-98	58-118	78-138	98-158	118-178	138-198	158-210
4 07 E1			30	48	68	88	108	128	148	168	184
A2/-E1	弾性係数E	(kN/mm ²)		19.06	18.74	21.37	20.27	25.59	21.85	30.85	19.78
	付加ひずみɛ'。	(×10 ⁻⁶)		638	684	520	-126	-43	-102	22	107
	床版上縁からの距離	(mm)	0-60	23.2-83.2	43.2-103.2	63.2-123.2	83.2-143.2	103.2-163.2	123.2-183.2	143.2-203.2	163.2-210
A 27 E2			30	53.2	73.2	93.2	113.2	133.2	153.2	173.2	186.6
A27-E2	弾性係数E	(kN/mm ²)		17.35	14.37	12.01	13.33	20.71	14.01	16.94	11.19
	付加ひずみɛ'。	(×10 ⁻⁶)		43	520	536	602	424	310	273	188
	床版上縁からの距離	(mm)	0-60	20-80	40-100	60-120	80-140	100-160	120-180	140-200	160-210.4
A 27 E2			30	50	70	90	110	130	150	170	185.2
A2/-E3	弾性係数E	(kN/mm ²)	39.82	17.75	13.09	17.58	12.97	14.98	12.26	18.59	16.51
	付加ひずみɛ'。	(×10 ⁻⁶)	350	627	303	174	132	773	762	564	942
	床版上縁からの距離	(mm)	0-60	20-80	40-100	60-120	80-140	100-160	120-180	140-200	160-214.2
A 27 E4			30	50	70	90	110	130	150	170	187.1
A2/-E4	弾性係数E	(kN/mm ²)	32.15	11.93	11.53	7.06	10.00	9.96	15.00	21.11	18.64
	付加ひずみɛ'c	(×10 ⁻⁶)	137	968	1190	858	202	58	228	80	302
	床版上縁からの距離	(mm)	0-60	20-80	40-100	60-120	80-140	100-160	120-180	140-200	160-212
A 27 E5			30	50	70	90	110	130	150	170	186
A2/-E3	弾性係数E	(kN/mm ²)	17.44	14.32	26.48	16.79	18.19	24.20	13.75	16.71	16.45
	付加ひずみɛ'c	(×10 ⁻⁶)	262	274	814	168	123	-169	64	81	129
	床版上縁からの距離	(mm)	0-60	20.2-80.2	40.2-100.2	60.2-120.2	80.2-140.2	100.2-160.2	120.2-180.2	140.2-200.2	160.2-210
A 27 E6			30	50.2	70.2	90.2	110.2	130.2	150.2	170.2	185.1
A2/-E0	弾性係数E	(kN/mm ²)	12.64	12.64	14.37	15.44	22.01	33.54	23.31	36.50	19.46
	付加ひずみɛ'c	(×10 ⁻⁶)	190	190	39	184	45	92	50	75	773
	床版上縁からの距離	(mm)	0-60	20-80	40-100	60-120	80-140	100-160	120-180	140-200	160-210.6
A 27 E 6 2			30	50	70	90	110	130	150	170	185.3
A2/-E0-2	弾性係数E	(kN/mm ²)	12.25	8.34	10.77	8.60	15.99	11.05	23.06	11.51	12.17
	付加ひずみɛ'。	(×10 ⁻⁶)	615	406	398	-107	4	41	210	683	1197

表-4.2.3.4 深さ毎の静弾性係数及び付加ひずみ(供試体 No.27)



図-4.2.3.9 深さ毎の静弾性係数(供試体 No.27)



図-4.2.3.10 深さ毎の付加ひずみ(供試体 No.27)

	床版上縁からの距離	(mm)	0-60	20-80	40-100	60-120	80-140	100-160	120-180	140-200	160-225.6
A 20 E 1			30	50	70	90	110	130	150	170	192.8
A28-E1	弾性係数E	(kN/mm ²)	15.24	17.16	23.20		25.82	27.08	28.36	25.37	21.05
	付加ひずみɛ'。	(×10 ⁻⁶)	99	300	242		-34	22	81	0	217
	床版上縁からの距離	(mm)	0-60	20-80	40-100	60-120	80-140	100-160	120-180	140-194	
A 29 E2			30	50	70	90	110	130	150	167	
A26-E2	弾性係数E	(kN/mm ²)	26.36	18.45	16.24	13.41	26.85	20.71	35.33	26.44	
	付加ひずみɛ'。	(×10 ⁻⁶)	446	140	202	227	444	178	-36	91	
	床版上縁からの距離	(mm)	0-60	20-80	40-100	60-120	80-140	100-160	120-180	140-191.7	
A 29 E2			30	50	70	90	110	130	150	165.85	
A28-E3	弹性係数E	(kN/mm ²)	19.70	20.98	18.72	21.23	20.09	22.52	25.80	17.62	
	付加ひずみɛ'。	(×10 ⁻⁶)	-32	176	139	157	-104	157	-89	1195	
	床版上縁からの距離	(mm)	0-60	20-80	40-100	60-120	80-140	100-160	120-180	140-200.7	
A 20 E 4			30	50	70	90	110	130	150	170.35	
A28-E4	弹性係数E	(kN/mm ²)	18.35	14.66	13.87	15.05	12.52	16.55	15.39	16.01	
	付加ひずみɛ'。	(×10 ⁻⁶)	570	767	416	187	-1	119	231	369	
	床版上縁からの距離	(mm)	0-60	20-80	40-100	60-120	80-140	100-160	120-180	140-200	160-209
A 29 E 5			30	50	70	90	110	130	150	170	184.5
A26-E3	弾性係数E	(kN/mm ²)	19.59	23.11	19.40	19.86	24.70	24.40	22.02	26.66	15.80
	付加ひずみɛ'。	(×10 ⁻⁶)	-88	-129	-55	110	174	280	25	0	1463
	床版上縁からの距離	(mm)	0-60	13.7-73.7	33.7-93.7	53.7-113.7	73.7-133.7	93.7-153.7	113.7-173.7	133.7-193.7	153.7-210
A 28 E7			30	43.7	63.7	83.7	103.7	123.7	143.7	163.7	181.85
A28-E/	弾性係数E	(kN/mm ²)				12.83	12.75	15.09	16.36	16.88	19.18
	付加ひずみɛ'。	(×10 ⁻⁶)				304	332	260	352	368	352
	床版上縁からの距離	(mm)	0-60	20-80	40-100	60-120	80-140	100-160	120-180	140-200	160-219.5
A 28 E9			30	50	70	90	110	130	150	170	189.75
A20-E0	弾性係数E	(kN/mm ²)	37.58	17.72	21.42	17.51	19.50	22.92	17.72	20.53	13.30
	付加ひずみɛ'。	(×10 ⁻⁶)	-237	201	34	462	273	-86	-10	147	1050

表-4.2.3.5 深さ毎の静弾性係数及び付加ひずみ(供試体 No.28)

28-E1 の 60-120mm は静弾性係数が取得できなかった. なお, 60mm のコマは鉄筋の直上に貼り付けた.



図-4.2.3.11 深さ毎の静弾性係数(供試体 No.28)



図-4.2.3.12 深さ毎の付加ひずみ(供試体 No.28)

(3) G橋

表-4.2.3.6 及び図-4.2.3.13~4.2.3.14 にそれぞれ弾性係数分布及び付加ひずみ分布を示す. なおグラフで 丸がプロットされている部分は,割れていたコアを接着あるいはひび割れ注入し一体化の処置を施した 部分であり大きいひずみが生じるが,ここでは参考値として示す.コアの下縁についても治具用コアとの 隙間の変位を含む値となっているため同様である.

ひび割れや接着層の影響を受けていない結果に着目すると、「弾性-1」のコアにおける上面からの深さ 80-140mmの測定範囲において110×10⁻⁶の付加ひずみ、「弾性-4」のコアにおける上面から深さの20-80mm の測定範囲において100×10⁻⁶の付加ひずみがそれぞれ確認された.

	床版上縁からの距離	(mm)	0-60	20-80	40-100	60-120	80-140	100-160	120-180	140-200	160-221.2
			30	50	70	90	110	130	150	170	191
形法 从4-1	静弹性係数E	(kN/mm ²)	23.80	11.97	10.83	13.81	23.04	32.61	17.74	53.57	17.25
9年19王-1	付加ひずみɛ'。	(×10 ⁻⁶)	303	542	696	299	112	-1	19	-241	38
	残留ひずみ	(×10 ⁻⁶)	70	121	125	25	-15	-28	9	20	-12
	付加-残留	(×10 ⁻⁶)	233	421	571	274	126	27	10	-260	49
	床版上縁からの距離	(mm)	0-60	20-80	40-100	60-120	80-140	100-160	120-180	140-200	160-219.8
			30	50	70	90	110	130	150	170	190
部計しの	静弹性係数E	(kN/mm ²)	19.25	18.93	20.95	20.30	26.26	21.96	22.39	33.24	24.78
7年11王-2	付加ひずみɛ'c	(×10 ⁻⁶)	9	33	28	-16	-24	-24	-25	-54	207
	残留ひずみ	(×10 ⁻⁶)	27	35	-6	6	0	3	25	-20	28
	付加-残留	(×10 ⁻⁶)	-19	-2	34	-22	-25	-26	-50	-35	180
	床版上縁からの距離	(mm)	0-61.7	21.7-81.7	41.7-101.7	61.7-121.7	81.7-141.7	101.7-161.7	121.7-181.7		
			30.85	51.7	71.7	91.7	111.7	131.7	151.7		
2月14日	静弹性係数E	(kN/mm ²)	12.32	19.32	20.85	21.45	21.46	20.48	26.90		
7年11年-3	付加ひずみɛ'c	(×10 ⁻⁶)	623	174	65	8	12	1	21		
	残留ひずみ	(×10 ⁻⁶)	33	45	29	-30	-34	-18	70		
	付加-残留	(×10 ⁻⁶)	590	130	36	38	47	19	-49		
	床版上縁からの距離	(mm)	0-60	20-80	40-100	60-120	80-140	100-160	120-177.4		
			30	50	70	90	110	130	148.7		
253.244	静弹性係数E	(kN/mm ²)	20.54	19.11	20.28	23.77	23.97	25.10	19.57		
7年11王-4	付加ひずみɛ'c	(×10 ⁻⁶)	185	102	72	39	53	26	246		
	残留ひずみ	(×10 ⁻⁶)	27	36	13	21	2	-7	8		
	付加-残留	(×10 ⁻⁶)	158	66	59	18	51	33	238		
	床版上縁からの距離	(mm)	0-60	20-80	40-100	60-120	80-140	100-160	120-180	140-196.8	
			30	50	70	90	110	130	150	168.4	
251000000000000000000000000000000000000	静弹性係数E	(kN/mm ²)	21.61	19.14	15.43	12.68	18.91	24.65	30.39	31.89	
7半1111-10	付加ひずみɛ'c	(×10 ⁻⁶)	237	470	546	82	-50	-34	36	228	
	残留ひずみ	(×10 ⁻⁶)	164	181	183	188	27	-107	-65	62	
	付加-残留	(×10 ⁻⁶)	73	290	363	-106	-77	73	101	166	



図-4.2.3.14 深さ毎の付加ひずみ(G橋)

4.3 塩化物イオン濃度分布(全塩分)

(1) Ki橋

Ki 橋における塩化物イオン濃度を測定したコア一覧を表-4.3.1.1 に,塩化物イオン濃度分布測定結果を図-4.3.1.1,図-4.3.1.2 及び表-4.3.1.2 に示す.コア採取箇所は前掲図-3.2.1.1 に示す.

供試体 No.1 の As 舗装の打継目から離れている比較的健全な箇所から採取した CL13 では、上面からの塩 化物イオンの浸透がほとんど認められなかった.一方、供試体 No.2 の土砂化が見られた箇所から採取した CL14 は、上面からの多量の塩分浸透が認められた.供試体 No.1 の CL11、No.2 の CL14 ともに、コンクリー ト中の鋼材の発錆限界塩化物イオン濃度を超える箇所が確認された.土砂化が見られない供試体 No.3 の As 舗装打継目付近から採取した CL15 でも、浸透の程度は土砂化部から採取した CL14 に比べて軽微であるが、 上面からの塩分浸透が認められた.

さらに供試体 No.1 と No.2 の再調査時のコア CL21~CL23 では,供試体 No.1 (B1)の健全部から採取した CL21 及び土砂化部から採取した CL22 で,ともに上面付近で若干の塩分浸透はあるものの,全体的に低い濃 度分布が確認された.一方,CL22 と同様土砂化部から採取した CL23 では,上面付近の塩化物イオン濃度は 低いが,深くなるにつれて高くなっていく傾向が確認された.供試体 No.2 (B2)では,全てのコアにおいて 上面付近で高い塩化物イオン濃度が確認された.CL22 及び CL23 では深い位置でも高い塩化物イオン濃度で あり,土砂化した箇所から多量の塩分浸透があったことが認められた.

供試体名	コア番号	採取位置の状況	備考	
	CL11	劣化部(土砂化)	ドリル削孔	
No.1	CL12	劣化部(土砂化)	ドリル削孔	
	CL13	非劣化部	コア削孔	
No.2	CL14	劣化部(土砂化)	コア削孔	
No.3	CL15	非劣化部	コア削孔	
	CL21	非劣化部	コア削孔	
No.1 (B1)	CL22	劣化部(土砂化)	コア削孔	
	CL23	劣化部(土砂化)	コア削孔	
	CL21	非劣化部	コア削孔	
N_{2} (D2)	CL22	劣化部(土砂化)	コア削孔	
1NO.2 (D2)	CL23	劣化部(土砂化)	コア削孔	
	R	劣化部(土砂化)		

表-4.3.1.1 塩化物イオン濃度測定コア一覧(Ki橋)

※供試体名の B1 及び B2 は、再調査を行った際の仮の供試体名





図-4.3.1.2 塩化物イオン濃度分布測定結果(供試体 No.1 (B1), No.2 (B2))

表-4.3.1.2	塩化物イオン濃度分布測定結果	:(供試体 No.2(B2	2) コアRの非中性化領域)
-----------	----------------	---------------	----------------

△按八 (単位容積質量	全塩化物イオン濃度		
主塩分(mass%)	(kg/m ³)	(kg/m^3)		
0.22	2300	5.06		

(2) Ka 橋²⁾

Ka 橋における塩化物イオン濃度を測定したコア一覧を表-4.3.1.3 に、塩化物イオン濃度分布測定結果を図-4.3.1.3 及び図-4.3.1.4 に示す. コア採取箇所は前掲図-3.2.2.1 に示す.

供試体 No.17 では、健全部から採取した A17-S1 では床版上面付近では塩化物イオン濃度が高いものの、 深さ 40mm 以降はほとんど塩化物イオン濃度が確認されなかった.一方、浮き部から採取した A17-S2 では 表面付近の塩化物イオン濃度が非常に高く、かつ深さ 140mm の位置でも高い濃度を示しており、多量の塩 分浸透が認められた.

図-4.3.1.6 は、供試体 No.27 と No.28 のコア採取位置とその位置での塩化物イオン濃度分布を並べたもので ある.塩化物イオン濃度分布のグラフは、縦軸を床版上面からの深さ、横軸を塩化物イオン濃度とし、赤色 のハッチングはコンクリート中の塩化物イオン濃度が 1.2kg/m³を超える範囲を示している.

横断勾配の下流側であり滞水しやすい排水枡付近は塩化物イオン濃度が高い傾向が確認された.特に最も 横断勾配が低い27-S1 は塩化物イオン濃度が非常に高く,深い位置まで塩分浸透していた.CL 付近の補修部 の27-S3 は補修下面の塩化物イオン濃度が高く,また床版下面からの塩化物イオンの浸入も確認された.床 版下面に漏水跡があったことから,横断勾配の高い No.28 側から塩化物イオンを含む水が伝ってきたと考え られる.CL 付近の土砂化部については,土砂化による床版上面のコンクリートの消失及びコア採取時の若 干の欠損により,採取したコアの長さは28-S5 で 136mm, 28-S4 で 120mm であり,全長にわたって塩化物イ オン濃度が 1.2kg/m³を超えていた.総じて土砂化部及び補修部の下部の塩化物イオン濃度は高かった.土砂 化部の直近で採取した 28-S3 は,コアにひび割れがなく健全と判断し深さ 100mm までを計測範囲としたが, その範囲では全て高い塩化物イオン濃度を示した.目視で床版上面が健全と判断された箇所で採取した 28-S2 及び 28-S1 の塩化物イオン濃度は低いが, 28-S1 の上面付近は塩化物イオンの浸透が確認された.コア 採取位置の近傍には舗装補修の打継目に沿った土砂化があったため,舗装補修の打継目から塩分を含んだ水 が浸入したと推察される.ただし,いずれの箇所でも鉄筋腐食によるひび割れやコア採取時に偶然含まれた 鉄筋の腐食は確認されなかった.

供試体名	コア番号	採取位置の状況
NI 17	17-S1	非劣化部
No.1 /	17-S2	劣化部(浮き)
	27 - S1	劣化部(土砂化)
No.27	27-S2	劣化部(土砂化)
	27-83	劣化部(浮き)
	28-S1	劣化部(浮き)
	28-S2	非劣化部
No.28	28-S3	非劣化部
	28-S4	劣化部(土砂化)
	28-85	劣化部(土砂化)

表-4.3.1.3 塩化物イオン濃度測定コア一覧(Ka橋)


図-4.3.1.3 塩化物イオン濃度分布測定結果 (No.17)



図-4.3.1.4 塩化物イオン濃度分布測定結果(No.27, No.28)²⁾

(3) G橋

G 橋における塩化物イオン濃度を測定したコア一覧を表-4.3.1.4 に塩化物イオン濃度分布測定結果を図-4.3.1.8~図-4.3.1.10 に示すコア採取箇所図は前掲図-3.2.3.1 に示す.

主桁直上では、床版上面付近での塩化物イオン濃度に若干の差はあるものの分布に大きな変化は見られず、 下面へ向かうにつれて徐々に塩化物イオン濃度が減少していた.

床版上面未補修部では、塩分-13と塩分-21は同じような分布を示し、床版下面付近では塩化物イオン濃度 がほぼ0に近い値だったが、塩分-22は床版下面で12kg/m³近い塩化物イオン濃度を示し、大きな差が生じた. 塩分-13と塩分-21は床版下面がシート補強されている一方、塩分-22はシートの格子窓部で床版下面が露出 していた.

床版上面補修部では、床版上面の補修厚さは床版上面から 70mm 程度であり、G 橋の設計床版厚は 210mm のため、床版下面から 140~210mm の範囲が補修されていることとなる. 全コアとも床版上面補修範囲に当たる床版下面から概ね 140~210mm の範囲は塩化物イオン濃度が低く、そこから深くなるにつれて塩化物イオン濃度が高くなっていく傾向を示した. 塩化物イオン濃度のピークは全コアとも床版下面から 25~60mm の範囲であった. 塩分-24 は塩分-22 と同様にシートの格子窓部で採取しており、床版下面から 40mm 付近で高い塩化物イオン濃度を示している. 塩分-22 が床版下面で塩化物イオン濃度のピークを示す一方, 塩分-24 では塩分-13, 22 と同様に 40mm 付近をピークに床版下面にいくにつれて濃度が低下していた.

コア番号	採取位置の状況
塩分-11	主桁直上
塩分-12	主桁直上
塩分-13	床版下面シート補強,床版上面未補修
塩分-14	床版下面シート補強、シート内浮き、床版上面補修
塩分-15	床版下面シート補強、床版上面補修
塩分-21	床版下面シート補強、床版上面未補修
塩分-22	床版上面未補修
塩分-23	床版下面シート補強、シート内浮き、床版上面未補修
塩分-24	床版上面補修

表-4.3.1.4 塩化物イオン濃度測定コア一覧(G橋)



図-4.3.1.8 G橋における塩化物イオン濃度分布測定結果(主桁直上)



図-4.3.1.9 G橋における塩化物イオン濃度分布測定結果(床版上面未補修部)



図-4.3.1.10 G橋における塩化物イオン濃度分布測定結果(床版上面補修部)

4.4 中性化関連分析結果

4.4.1 中性化深さ

各橋におけるコンクリートの中性化深さ測定結果を表-4.4.1.1 に示す.露出している床版下面において, Ki橋では0.0~1.3mm までの平均0.2mm, Ka橋では15.0~20.5mm までの平均18.8mm,G橋(シート接着部 含む)では20.0~26.1mm までの平均24.2mmの中性化が確認された.Ki橋では測定値が0mmのコアが複数 あり,かつ中性化が確認されたコアも他の橋梁に比べ著しく中性化深さが小さかった.一方,これと同じ橋 梁で道路管理者が別途行った調査結果によると,約20mmの中性化深さが確認された.調査実施時点で供用 から47年経過した橋梁であったことを考慮すると,中性化深さが0mmであるとは考えづらいことから,中 性化深さが0mmとなった測定の方法に何らかの問題があった可能性がある.

G橋の塩分-11~15 についても中性化深さが 0mm とされており,測定方法が疑われたことから,再度塩分-21~24 で確認を行った.その結果,塩分-21~塩分-24 については中性化が認められた.4.4.2 の図-4.4.2.2 において床版下縁から 20~30mm 付近までの全塩化物イオン濃度と可溶性塩化物イオン濃度の差が小さいことが確認されており,2回目の中性化深さ測定結果は妥当であると考えられる.塩分-21~24 も採取したコアの切断面で中性化深さの測定を行った.フェノールフタレイン溶液を噴霧直後に,中性化領域が明らかに確認できたが,1~2分程度で中性化領域も発色してしまった.再度噴霧すると再び未発色の部分が現れるという状況であった(図-4.4.1.1).割裂せず中性化深さを確認する場合に,コンクリートや採取状況によってはこの点に注意する必要がある.

コア材料-3 については、床版下面に連続繊維シートが施工されていたにも関わらず大きい値を示した. G 橋はシート接着までに 36 年経過していたことから、シート接着時点で下面コンクリートの中性化が進行し ていたと考えられる. G 橋の試料 EP-①②は、空気中に暴露されていた床版下面側の試料であり、約 25mm の中性化が確認された. 試料③④は表に記載していないが、コア中央付近の中性化深さを測定しており、中 性化深さは 0mm であった.

长河内	供試体名	コア番号 試料番号	中性化深さ(mm)		/ 世 书
間 案名			床版下面	床版上面	加方
	No.1	C13	0	1.1	—
Ki 橋	No.2	C14	0	0.8	—
	No.3	C15	0	5.3	—
	No.1 (B1)	C21, C22, C23	1.3	0	コア3体の平均
	No.2 (B2)	C21, C22, C23	0.2	0	コア3体の平均
	No.3 (B3)	C21, C22, C23	0.0	0	コア3体の平均
	No.17	17-C1, 17-C2, 17-C3	21.0	0	コア3体の平均
Ka 橋	No.27	27-C1, 27-C3	20.5	0	コア3体の平均
	No.28	28-C1, 28-C2	15.0	0	コア3体の平均
		塩分-11	0	0	主桁直上部
		塩分-12	0	0	主桁直上部
		塩分-13	0	0	シート接着部
		塩分-14	0	0	シート接着部
		塩分-15	0	0	シート接着部
		塩分-21	26.1	—	シート接着部
		塩分-22	24.5	—	格子窓部
G 橋	No.1	塩分-23	24.3	—	シート接着部
		塩分-24	20.0	—	格子窓部
		材料-3	25.4	1.0	シート接着部
				4.9	細孔分析試料
		ED (1)	25.0	_	格子窓部
		EP-(1)			EPMA 分析試料
		EP-②	24.0		シート接着部
					EPMA 分析試料

表-4.4.1.1 中性化深さ測定結果





(b) 再度噴霧した直後の状態

注)図(b)の後、しばらく時間がたつと図(a)の状態に戻り、再噴霧すると図(b)と同様の状態となった.

図-4.4.1.1 G橋の中性化深さ再測定における測定方法の確認(コンクリートコア 塩分-23の例)

4.4.2 可溶性塩分

Ki 橋及びG 橋における可溶性塩化物イオン濃度の測定結果をそれぞれ表-4.4.2.1 及び図-4.4.2.1 に示す.また,G 橋の全塩化物イオン濃度と可溶性塩化物イオン濃度との差を示したものを図-4.4.2.2 に示す.図-4.4.2.2 において塩分-22 の 0~10mm における値がマイナスになっているのは、測定誤差によるものと考えられる. 中性化が進行すると、中性化部ではフリーデル氏塩が分解され塩化物イオンが細孔溶液中に溶出し、非中性 化領域に達すると再びフリーデル氏塩が生成されるとされている⁴⁾.図-4.4.2.2 では、30mm までは全塩化物 イオン濃度と可溶性塩化物イオン濃度との差が小さく、30mm 以深に差が大きくなっていることから、床版 下面から 30mm 程度まで中性化が進行しているものと考えられる.

表-4.4.2.1 可溶性塩化物イオン濃度測定結果(Ki橋 供試体 No.2(B2) コア R の非中性化領域)

可溶性塩分	単位容積質量	可溶性塩化物イオン濃度
(mass%)	(kg/m ³)	(kg/m ³)
0.16	2300	3.68



図-4.4.2.1 可溶性塩化物イオン濃度測定結果(G橋)



図-4.4.2.2 全塩化物イオン濃度と可溶性塩化物イオン濃度の差(G橋)

4.4.3 モルタル細孔径分布, CaCO3含有量

G橋のコア材料-3 について実施した水銀圧入式ポロシメータによるモルタル細孔径分布測定及び示差熱天 秤分析による CaCO₃ 含有量測定の結果を表-4.4.3.1 に示す.ここで,細孔率は試料容積に対する細孔容積の 割合を表した値,全細孔容積は測定時の最大圧力までに水銀が圧入された細孔容積の積算値を試料重量で 割った値,全細孔比表面積は細孔形状が幾何学的な円筒であると仮定した全細孔の比表面積である.結果よ り,4.4.1 で中性化が確認された床版下面から深さ 25mm までの範囲では,中性化が確認されていない部分 と比較して細孔率,全細孔容積,全細孔比表面積が減少し CaCO₃ 含有率が増加している.既往研究⁵では中 性化の原因となる炭酸化反応が生じることで CaCO₃ が生成され,空隙を埋める作用が働くことによって細 孔量が減少すると報告されており,本結果も同様の現象が確認された.

床版下面からの 細孔率 全細孔容積 全細孔比表面積 CaCO3含有率 中性化の有無*1 深さ(mm) (%) (ml/g) (m^2/g) (%) 下面~10mm あり 15.4 0.0716 9.51 19.29 10~20mm あり 17.6 0.0855 10.5 18.51 20~30mm ・部あり 18.0 0.0860 19.0 6.53 N/A^{*2} 30~40mm なし 20.1 0.105 26.0 N/A^{*2} 40~50mm なし 20.6 0.110 29.3

表-4.4.3.1 モルタル細孔径分布分析・示差熱天秤分析の結果

*1) 4.4.1 に示した中性化深さ測定結果による.

*2) Not Applicable (該当なし)の略

4.5 微細ひび割れ観察結果

4.5.1 樹脂含浸程度の確認

コンクリートコアに蛍光樹脂を含浸させた後,ダイヤモンドカッターで半分に切断した供試体(コア)の 断面を観察した.また適切に蛍光樹脂が含浸したかを確認するため、半分に切断したコアの切断面に近いほ うから 20mm の範囲を板状に切り出し、再度蛍光樹脂を含浸させたのちダイヤモンドカッターでさらに半分 に切断した供試体(20mm 板)の断面を観察し比較を行った.表-4.5.1.1 に1回目含浸時及び再含浸時の微細 ひび割れ観察の条件の比較を示す.

r						
条件	1回目含浸			再含浸		
	蛍光剤種別	乾燥方法	含浸方法	蛍光剤種別	乾燥方法	含浸方法
1	蛍光顔料	105℃-乾燥機-23h	真空引き-無気泡	蛍光顔料	常温-乾燥剤-1w	真空引き-23h
2	蛍光顔料	105℃-乾燥機-23h	真空引き-無気泡	蛍光顔料	60℃-乾燥炉-1w	真空引き-23h
3	蛍光顔料	105℃-乾燥機-23h	真空引き-無気泡	蛍光顔料	60℃-乾燥炉-4w	真空引き-23h
4	エポキシ樹脂用	10.5% 共振振 201	真空引き-無気泡	エポキシ樹脂用	常温-乾燥剤-1w	真空引き-23h
	着色剤	105 C-印》(波·23 n		着色剤		
	エポキシ樹脂用	105% 共振 48 201	真空引き-無気泡	エポキシ樹脂用	常温-乾燥剤-4w	真空引き-23h
(5)	着色剤	105 C-印刷板-250		着色剤		
6	エポキシ樹脂用	105℃-乾燥機-23h	真空引き-無気泡	蛍光顔料	常温-乾燥剤-4w	真空引き-23h
	着色剤					

表-4.5.1.1 微細ひび割れ観察の条件

(1) 蛍光剤の違いによる比較

乾燥方法と含浸方法が同様で、蛍光剤が異なる場合の含浸結果の比較を図-4.5.1.1~4.5.1.2 に示す.実際に 含浸されているかの確認のため、ブラックライトを当てる前の断面写真も併せて示している.図-4.5.1.1 より、 蛍光顔料、エポキシ樹脂用着色剤とも、目視可能なひび割れに対して適切に含浸され、同程度にひび割れを 観察できることが確認できた.図-4.5.1.2 の蛍光顔料では、目視可能なひび割れに加えて目視では分からない 微細ひび割れが緑色の線で表れており、微細ひび割れ確認に対しても有効であることが確認された.目視で きない微細ひび割れへの含浸が確認されなかったコアは、もともとコアに微細ひび割れが入っていないと考 えられる.エポキシ樹脂用着色剤の有効性は既往の文献で確認されているが の、今回の結果から蛍光顔料で もエポキシ樹脂用着色剤と同様に微細ひび割れを観察できることが確認された.

(2) 1回目含浸と再含浸の比較

コアによる含浸結果と、そのコアから切り出した 20mm 板による再含浸結果の比較を図-4.5.1.3~4.5.1.8 に示す. 表-4.5.1.1 の6条件毎に比較を行った. 比較の結果、いずれの条件においても再含浸による新たな微細ひび割れへの含浸は確認されず、1 回目含浸時と特段の違いは見られなかった.

以上より、今回行った観察方法により適切に樹脂を含浸でき、微細ひび割れが観察可能であることが確認 された.



図-4.5.1.1 乾燥方法:105℃乾燥機-23h,含浸方法:真空引き-無気泡の場合の含浸結果



図-4.5.1.2 乾燥方法:常温-乾燥剤-1w,含浸方法:真空引き-23hの場合の含浸結果



図-4.5.1.3 1回目含浸と再含浸の比較(条件①)



図-4.5.1.4 1回目含浸と再含浸の比較(条件②)



図-4.5.1.5 1回目含浸と再含浸の比較(条件③)



図-4.5.1.6 1回目含浸と再含浸の比較(条件④)







図-4.5.1.8 1回目含浸と再含浸の比較(条件⑥)

4.5.2 コンクリートコアによる結果

床版の劣化部及びその周辺から採取したコンクリートコアの微細ひび割れ観察を行った. 観察したコアー 覧を表-4.5.2.1 に示す.

橋梁	供試体名	コア番号	採取位置の床版上面の状況
		E11	土砂化部
		E12	土砂化部
		E13	土砂化部
		E14	土砂化中間層~健全部
17. 持		E15	土砂化中間層~健全部
	$\mathbf{N} = 1 (\mathbf{D} 1)$	E16	土砂化中間層~健全部
	NO.1 (B1)	E21	土砂化部
		E22	土砂化部
		E23	土砂化部
八 1 1尚		E24	土砂化中間層~健全部
		E25	土砂化中間層~健全部
		E26	土砂化中間層~健全部
		E17	土砂化部
		E21	土砂化部
	No.2 (B2)	E22	土砂化中間層~健全部
		E23	土砂化中間層~健全部
		E24	土砂化中間層~健全部
	No.3	E18	土砂化中間層~健全部
		17-E1	土砂化中間層~健全部
	No.17	17-E2	土砂化中間層~健全部
		17-E3	土砂化中間層~健全部
		17-E4	浮き部
		27-E1	土砂化部
		27-Е2	土砂化部
	No.27	27-ЕЗ	土砂化中間層~健全部
		27-Е4	土砂化中間層~健全部
Ka 棰		27-Е5	土砂化中間層~健全部
IXa [[#]		27-E6	上面補修部
		27-Е6-2	上面補修部
		28-E1	土砂化中間層~健全部
		28-E2	土砂化中間層~健全部
	No.28	28-E3	土砂化中間層~健全部
		28-E4	土砂化中間層~健全部
		28-E5	土砂化中間層~健全部
		28-E7	土砂化部
		28-E8	土砂化中間層~健全部
		弹性-1	上面補修部
		弹性-2	土砂化中間層~健全部
G 橋	No.1	弹性-3	土砂化中間層~健全部
		弹性-4	土砂化中間層~健全部
		弹性-5	上面補修部

表-4.5.2.1 微細ひび割れ観察を行ったコア

(1) Ki橋

供試体 No.1 (B1) における E11~E16 までの微細ひび割れ観察結果を図-4.5.2.1 に, E21~E26 までの微細 ひび割れ観察結果を図-4.5.2.2 に示す. コアは下縁を揃えて表示した. コアによって高さが異なるのは, 土砂 化により床版上面側が欠落しているためである. コア E16 が途中で切断されているのは, 3.3.2 で示したとお りコア E16 の上端から 1cm を除いた 5cm を含水率のキャリブレーション測定用に切り出したためである. 土砂化中間層~健全部から採取したコアについて, 樹脂含浸前の観察写真を確認し, 樹脂含浸せずに目視で 判別可能なひび割れは白矢印で, 目視では判別できない微細ひび割れは黄色矢印で示した.

土砂化部に近い E14, E15, E24, E25 だけでなく,土砂化部から離れた E26 でも微細ひび割れが認められた. 同様に供試体 No.2 (B2) 及び供試体 No.3 における微細ひび割れ観察結果をそれぞれ図-4.5.2.3 及び図-4.5.2.4 に示す.土砂化部に近い E22, E23 で目視可能なひび割れの他,微細ひび割れも確認された.また, CL (舗装打継目)直下から採取された E18 では,コア下縁から伸びる鉛直方向の微細ひび割れが確認された. なお,土砂化部から採取したコアでも複数の微細ひび割れが確認された.

(2) Ka橋

供試体No.17における微細ひび割れ観察結果を図-4.5.2.5に示す.土砂化中間層~健全部から採取した17-E1 ~17-E3 では,17-E1 で下側にコアの割れが生じていた.コア採取時にコアが割れた可能性が考えられる.17 -E1 の床版上面側に鉛直方向の微細ひび割れが確認された.

供試体 No.27 における微細ひび割れ観察結果を図-4.5.2.6 に示す. 27-E6 及び 27-E6-2 にはコア外観観察か ら分かった補修材範囲も示している. 土砂化中間層~健全部から採取した 27-E3 について,床版下面から目 視で確認可能な鉛直方向のひび割れが生じており,そのひび割れから伸びるように微細ひび割れが確認され た. また,補修跡近傍から採取した 27-E4, 27-E5 についても微細ひび割れが確認された. 27-E3 及び 27-E4 に目視で判別可能な大きな水平割れが生じているが,コア採取時に生じた可能性が考えられる.

供試体 No.28 における微細ひび割れ観察結果を図-4.5.2.7 に示す. 土砂化部に近い 28-E4 や 28-E2 だけでなく, 土砂化部から離れた 28-E1 でも微細ひび割れが確認された. 28-E4 に目視で判別可能な大きな割れが生じているが, 27-E3 及び 27-E4 と同様コア採取時に生じた可能性が考えられる.

(3) G橋

微細ひび割れ観察結果を図-4.5.2.8 に示す.この供試体では,床版上面補修の範囲が複雑な形状をしていた. この補修範囲は,コアやコア削孔後の孔内を観察することにより確認した.弾性-1 は主桁上かつ床版上面補 修部に,弾性-2 は主桁上に,弾性-5 は床版上面補修部かつ下面がシート補強されている箇所に位置している. 弾性-1 及び弾性-2 はハンチ部を含むため,他のコアに比べて長くなっている.そのため,G橋は弾性-1 及び 弾性-2 と,残りの弾性-3~5 を別でコア下縁を揃えて表示した.

上面補修部である弾性-1 及び弾性-5 では、床版上面から深さ約 70mm 付近で大きな割れが生じ、さらにその下側に微細な水平ひび割れが確認された.上面補修部では床版上面から概ね深さ 70mm 程度までセメント 系補修材で補修されており、補修材と既設床版の界面の付着が切れて割れていたと考えられる.未補修部で

125

ある弾性-2,弾性-3及び弾性-4でも微細ひび割れが確認された.



図-4.5.2.1 コンクリートコアの微細ひび割れ観察結果 El1~El6(Ki橋 供試体 No.1 (B1))



※コア下縁を揃えて表示

図-4.5.2.2 コンクリートコアの微細ひび割れ観察結果 E21~E26(Ki橋 供試体 No.1 (B1))



図-4.5.2.3 コンクリートコアの微細ひび割れ観察結果(Ki橋 供試体 No.2 (B2))





E18

図-4.5.2.4 コンクリートコアの微細ひび割れ観察結果(Ki橋 供試体 No.3)



※コア下縁を揃えて表示

図-4.5.2.5 コンクリートコアの微細ひび割れ観察結果(Ka橋 供試体 No.17)



図-4.5.2.6 コンクリートコアの微細ひび割れ観察結果(Ka橋 供試体 No.27)



図-4.5.2.7 コンクリートコアの微細ひび割れ観察結果(Ka橋 供試体 No.28)



図-4.5.2.8 コンクリートコアの微細ひび割れ観察結果(G橋)

4.5.3 コンクリート板による結果

微細ひび割れ観察を実施したコンクリート板の一覧を表-4.5.3.1 に示す.各撤去床版におけるコンクリート 板の採取位置を図-4.5.3.1~図-4.5.3.5 に,各コンクリート板の微細ひび割れ観察結果を図-4.5.3.6~図-4.5.3.23 に示す. 微細ひび割れ観察結果は、切断範囲での位置関係が分かるよう上段に切断範囲全体の写真を、中段 に微細ひび割れ観察を行った範囲の樹脂含浸前の観察状況を、下段に樹脂含浸後の観察状況を示した.a)切 断範囲全体の写真の青破線部は微細ひび割れ観察範囲を示している.なお、図-4.5.3.6 のみb)に微細ひび割れ 観察を実施していない範囲の樹脂含浸前の観察状況も示しているが、これは隣接する土砂化発生範囲からの 水平ひび割れの繋がりを示すためである.以下では橋梁毎に観察結果を述べる.

(1) Ki 橋

土砂化発生範囲(図-4.5.3.6 a) 切断範囲全体の写真の青破線部の右側)に隣接した土砂化中間層と考えら れる範囲のひび割れ観察を行った.図には,併せて CL の位置を示した.樹脂含浸前の観察では,隣接する 土砂化発生範囲から伸びる上側鉄筋及び下側鉄筋付近の水平ひび割れや,活荷重によって生じた曲げひび割 れと考えられる床版下面のひび割れが確認された.樹脂含浸後の観察状況でもほぼ同様のひび割れが確認さ れた.それ以外にも図中の矢印で示す位置に目視で確認できなかった粗骨材に沿った微細なひび割れが確認 された.

(2) Ka 橋

供試体 No.17 では、床版上面の浮き発生範囲(No.17①)とその隣接範囲(No.17③)、及び土砂化発生範囲 の隣接範囲(No.17②)の観察を行った.No.17①では、樹脂含浸前の観察で確認できた大きな水平ひび割れ 以外に、コンクリート板中央右寄りに鉛直方向の微細ひび割れが確認された.No.17③では、樹脂含浸後の観 察で鉛直方向の微細ひび割れや鉄筋に沿った微細ひび割れが確認された.No.17②では、樹脂含浸後の観察で 大きな水平ひび割れからさらに伸びた微細な水平ひび割れが確認された.

供試体 No.27 では、床版上面の土砂化発生範囲の隣接範囲(No.27①)及び浮き発生範囲の隣接範囲(No.27 ②)の観察を行った. No.27①で中心から左寄りに大きなひび割れが生じているが、これはカッター切断時に 割れてしまったものである. 樹脂含浸後の観察で、土砂化発生範囲側(右側)に微細な水平ひび割れが複数 確認された. No.27②では、わずかだが浮き発生範囲側(左側)で微細ひび割れが確認された.

供試体 No.28 では、土砂化発生範囲(No.28③)及びその隣接範囲(No.28②)、さらに土砂化範囲と土砂化 中間層を含む範囲(No.28①)の観察を行った.No.28①では、床版上面の土砂化範囲から 400mm 離れた位置 までの連続的な微細ひび割れが認められた.No.28②では、床版上面の土砂化範囲から 50mm 離れた位置ま での微細ひび割れが認められた.ただし、コア採取部分に達していたかは確認できていない.No.28③では、 上側鉄筋のかぶりコンクリートが激しく土砂化しており、下側鉄筋付近に複数の層状の水平ひび割れが認め られた.

(3) G橋

G橋の供試体 No.1 では、床版上面に土砂化は認められなかった。そのため、コアによる調査を行った周辺の断面の観察を行った。樹脂含浸後の観察では、中央付近に3本の鉛直方向の貫通ひび割れが確認されたほか、土砂化発生範囲側(左側)の床版下面付近に微細なひび割れが確認された。

橋梁	供試体 番号	コンクリート板名	蛍光剤種別	乾燥方法	含浸方法	備考
Ki 橋	No.2	_	エポキシ樹脂用 着色剤	105℃-乾燥炉-1w	真空引き-24h	土砂化中間層 ~健全部
No Ka橋 No No	No.17	No.17①	エポキシ樹脂用 着色剤	105°C-乾燥炉-1w	真空引き-24h	浮き部
		No.17②	エポキシ樹脂用 着色剤	105°C-乾燥炉-1w	真空引き-24h	土砂化中間層 ~健全部
		No.17③	エポキシ樹脂用 着色剤	105°C-乾燥炉-1w	真空引き-6h	浮き部周辺
	N- 27	No.27①	エポキシ樹脂用 着色剤	105°C-乾燥炉-1w	真空引き-24h	土砂化中間層 ~健全部
	INO.27	No.27②	エポキシ樹脂用 着色剤	105°C-乾燥炉-1w	真空引き-24h	浮き部周辺
	No.28	No.28①	エポキシ樹脂用 着色剤	105℃-乾燥炉-1w	真空引き-24h	土砂化部及び 土砂化中間層
		No.28②	エポキシ樹脂用 着色剤	105°C-乾燥炉-1w	真空引き-24h	土砂化中間層 ~健全部
		No.28③	蛍光顔料+ エポキシ樹脂用 着色剤	105℃-乾燥炉-1w	真空引き-6h	土砂化部
G 橋	No.1	_	エポキシ樹脂用 蛍光剤	105℃-乾燥炉-1w	真空引き-24h	G1-G2 間

表-4.5.3.1 微細ひび割れ観察を実施したコンクリート板



図-4.5.3.1 コンクリート板の採取位置(Ki橋 供試体 No.2)



図-4.5.3.2 コンクリート板の採取位置(Ka橋 供試体 No.17)



※外観上健全と思われた範囲







供試体 No. 27 の切断面①, 地覆から180~400mmの床版付近

138





供試体 No. 28 の No.28①(黄色破線は切断ライン)付近の床版上面 図-4.5.3.4 コンクリート板の採取位置(Ka橋 供試体 No.28)



図-4.5.3.5 コンクリート板の採取位置(G橋)


図-4.5.3.6 微細ひび割れ観察結果(Ki橋)



図-4.5.3.7 微細ひび割れ観察結果 樹脂含浸写真拡大版 (Ki橋)



図-4.5.3.8 微細ひび割れ観察結果(Ka橋 No.17①③)



図-4.5.3.9 微細ひび割れ観察結果 樹脂含浸写真拡大版 (Ka 橋 No.17①)



図-4.5.3.10 微細ひび割れ観察結果 樹脂含浸写真拡大版 (Ka橋 No.17③)



図-4.5.3.11 微細ひび割れ観察結果(Ka橋 No.17②)



図-4.5.3.12 微細ひび割れ観察結果 樹脂含浸写真拡大版 (Ka橋 No.17②)



図-4.5.3.13 微細ひび割れ観察結果(Ka橋 No.27①)



図-4.5.3.14 微細ひび割れ観察結果 樹脂含浸写真拡大版 (Ka橋 No.27①)



図-4.5.3.15 微細ひび割れ観察結果(Ka橋 No.27②)



図-4.5.3.16 微細ひび割れ観察結果 樹脂含浸写真拡大版 (Ka橋 No.27②)







図-4.5.3.18 微細ひび割れ観察結果 樹脂含浸写真拡大版 (Ka橋 No.28①)



図-4.5.3.19 微細ひび割れ観察結果(Ka橋 No.282③)



図-4.5.3.20 微細ひび割れ観察結果 樹脂含浸写真拡大版 (Ka橋 No.28②)



図-4.5.3.21 微細ひび割れ観察結果 樹脂含浸写真拡大版 (Ka橋 No.28③)







図-4.5.3.23 微細ひび割れ観察結果 樹脂含浸写真拡大版 (G橋)

4.6 骨材調査結果

4.6.1 岩種構成, 岩種分析

(1) Ki橋

Ki 橋のコンクリートコア B1-R1 の切断面において認められた粗骨材の岩種構成割合を表-4.6.1.1 に、切断 面を図-4.6.1.1 に示す. 観察した範囲において, 粗骨材は最大寸法が 20mm 程度で, デイサイト, 花崗岩及 び砂岩などからなる砂利により構成されていた.

	岩石名	記号	構成割合(%)
	デイサイト	Da	21
	花崗岩	Gr	20
火成岩	安山岩	An	9
	玄武岩	Ba	3
	閃緑岩	Di	1
	砂岩	Ss	15
长往山	流紋岩質溶結凝灰岩	Rh	10
堆慎石	凝灰岩	Tf	10
	珪質泥岩	Ssh	5
変成岩	砂岩マイロナイト (断層岩)	Sm	3
	フェロニッケルスラグ	Fs	3

表-4.6.1.1 Ki橋, コア B1-R1 の粗骨材の岩種構成割合



⁽写真左が床版上面側,写真下端のスケールの数値単位はmm)

Ki 橋のコンクリートコア B1-R1, B1-R2, B2-R2 の粗骨材 9 粒子における偏光顕微鏡観察の結果を表-4.6.1.2 に示す. また, 切断面における観察対象の粗骨材と試料名を図-4.6.1.2~図-4.6.1.6 に示す.

コア	試料 名	岩石名	主要な構成鉱物 (構成量比の多いものから順)	反応性鉱 物の有無	ASR の症状
B1-R1	B1	凝灰岩	斜長石,輝石,ガラス*,スメクタイト,不透明鉱物	有	
	B2	フェロニッ ケルスラグ	輝石,橄欖石,不透明鉱物	無	
	В3	デイサイト	斜長石,微晶質~隠微晶質石英*, 黒雲母,緑泥石,白雲母,スメクタイ ト,角閃石,不透明鉱物	有	わずかな反応リムの形 成が認められた
	B4	デイサイト	斜長石,微晶質~隠微晶質石英*, 緑泥石,白雲母,不透明鉱物	有	
	В5	花崗岩	石英, 斜長石, カリ長石, 黒雲母, 緑泥石, ジルコン, 不透明鉱物	無	
	B6	花崗岩	石英, 斜長石, カリ長石, 緑泥石, 黒雲母, 不透明鉱物	無	
	B7	玄武岩	斜長石, 輝石, スメクタイト, 緑泥石, 不透明鉱物	無	
B1-R2	B8	デイサイト	斜長石,微晶質~隠微晶質石英*, 黒雲母,スメクタイト,不透明鉱物	有	反応リムの形成が認め られた
B2-R2	В9	珪質泥岩	微晶質~隠微晶質石英*,オパール*, 石英,粘土鉱物,不透明鉱物	有	反応リムの形成,骨材 内部からセメントペー ストへ進展するひび割 れが認められた

表-4.6.1.2 Ki橋, コア B1-R1, B1-R2, B2-R2 の粗骨材における偏光顕微鏡観察の結果

※ASR の反応性鉱物を示す⁷⁾.



(写真左が床版上面側.写真下端のスケールの数値単位はmm)



図-4.6.1.3 コア B1-R1 の切断面における観察対象の粗骨材(B2:フェロニッケルスラグ, B7:玄武岩)



図-4.6.1.4 コア B1-R1 の切断面における観察対象の粗骨材 (B1:凝灰岩, B3:デイサイト, B4:デイサイト, B5:花崗岩)



図-4.6.1.5 コア B1-R2 の切断面における観察対象の粗骨材(B8:デイサイト)



図-4.6.1.6 コア B2-R2 の切断面における観察対象の粗骨材(B9: 珪質泥岩)

(2) Ka橋

Ka 橋のコンクリートコア 28-R1 の切断面において認められた粗骨材の岩種構成割合を表-4.6.1.3 に、切断 面を図-4.6.1.7 に示す. 観察した範囲において, 粗骨材は最大寸法が 20mm 程度で,砂岩,安山岩及びデイ サイトなどからなる砂利により構成されていた.

	岩石名	記号	構成割合(%)
	安山岩	An	19
本市中	デイサイト	Da	19
八成右	花崗岩	Gr	6
	閃緑岩	Di	5
	砂岩	Ss	24
长在	流紋岩質溶結凝灰岩	Rh	14
堆慎石	チャート	Ch	9
	頁岩	Sh	4

表-4.6.1.3 Ka橋, コア 28-R1 の粗骨材の岩種構成割合



図-4.6.1.7 Ka橋, コア 28-R1 の切断面と実体観察結果 (写真左が床版上面側,写真下端のスケールの数値単位は mm)

Ka橋のコンクリートコア 28-R1, 28-R2の粗骨材 8 粒子における偏光顕微鏡観察の結果を表-4.6.1.4 に示す. また,切断面における観察対象の粗骨材と試料名を図-4.6.1.8~図-4.6.1.12 に示す.

試料 コア	試料 名	岩石名	主要な構成鉱物 (構成量比の多いものから順)	反応性鉱 物の有無	ASR の症状
28-R1	A1	砂岩	石英,斜長石,カリ長石,微晶質~ 隠微晶質石英*,黒雲母,白雲母,粘 土鉱物,不透明鉱物	有	
	A2	砂岩	石英,斜長石,カリ長石,微晶質~ 隠微晶質石英*,粘土鉱物,褐鉄鉱, 赤鉄鉱,不透明鉱物	有	反応リムの形成,骨材 内部の微細な膨張ひび 割れが認められた
	A3	安山岩	斜長石, 輝石, ガラス*, 不透明鉱物	有	骨材内部の微細なひび 割れが認められた
	A4	安山岩	斜長石, 輝石, ガラス*, 不透明鉱物	有	骨材の周囲に ASR ゲル の滲出が認められた
28-R2	A5	砂岩	石英,斜長石,カリ長石,微晶質~ 隠微晶質石英*,粘土鉱物,黒雲母, 白雲母,赤鉄鉱,不透明鉱物	有	骨材内部の微細なひび 割れが認められた
28-R1	A6	デイサイト	斜長石,微晶質石英 [*] ,石英,緑泥 石,黒雲母,褐鉄鉱,不透明鉱物	有	わずかな反応リムの形 成が認められた
28-R2	A7	デイサイト	斜長石, ガラス*, 輝石, トリディマ イト*, 石英, クリストバライト*, 微晶質~隠微晶質石英*, 不透明鉱物	有	わずかな反応リムの形 成,骨材内部の微細な ひび割れが認められた
28-R1	A8	砂岩	微晶質~隠微晶質石英 [*] ,石英,粘土 鉱物,不透明鉱物	有	わずかな反応リムの形 成が認められた

表-4.6.1.4 Ka橋, コア 28-R1, 28-R2 の粗骨材における偏光顕微鏡観察の結果

※ASR の反応性鉱物を示す⁷⁾.



図-4.6.1.8 コア 28-R1の切断面における観察対象の粗骨材(A1:砂岩) (写真左が床版上面側.写真下端のスケールの数値単位はmm.)



図-4.6.1.9 コア 28-R1 の切断面における観察対象の粗骨材(A3:安山岩, A4:安山岩, A8:砂岩)



図-4.6.1.10 コア 28-R1 の切断面における観察対象の粗骨材(A2:砂岩, A6:デイサイト)



図-4.6.1.11 コア 28-R2 の切断面における観察対象の粗骨材(A5:砂岩)



図-4.6.1.12 コア 28-R2 の切断面における観察対象の粗骨材(A7:デイサイト)

4.6.2 ASR の反応性と症状の有無

(1) Ki橋

実体顕微鏡下で岩種を判別する際に、Ki橋のコンクリートコア B1-R1 の切断面(図-4.6.1.1)において、 ASR の兆候が見られた粒子の拡大図を図-4.6.2.1~図-4.6.2.2 に示す. ASR の兆候は、粗骨材ではデイサイト、 流紋岩,流紋岩質溶結凝灰岩,珪質頁岩に反応リムや ASR ゲルの滲み・取り巻きが認められ、一部の流紋 岩質溶結凝灰岩には骨材内部のひび割れも確認できた(図-4.6.2.1).また、細骨材の安山岩では、骨材内部 からセメントペーストへ至るひび割れが確認できた(図-4.6.2.2).

偏光顕微鏡下で観察する際に、Ki 橋のコンクリートコア B1-R1, B1-R2, B2-R2 の切断面において、反応 性骨材の有無と ASR の症状を記録したものを前掲表-4.6.1.2, 観察結果を図-4.6.2.3~図-4.6.2.5 に示す. なお, 観察結果の上図(単ニコル)は、偏光顕微鏡試料から薄片試料を作製し、直線偏光による透過光で観察した もの、図中の下図(直交ニコル)は同じ視野において、さらに偏光板を差し入れることにより鉱物の種類に よって異なる複屈折を干渉色として観察(実際の色ではない)したものである. 観察の結果, 粗骨材 B3, B8 (ともにデイサイト), B9 (珪質泥岩) において ASR の症状が認められ, このうち粗骨材 B9 (珪質泥 岩)では骨材内部からセメントペーストへ進展するひび割れが見られた(図-4.6.2.5). また, ASR が発生し ていた岩石中の反応性鉱物として、微晶質~隠微晶質石英がデイサイト及び珪質頁岩、オパールが珪質泥岩 に認められた.



注) 流紋岩質溶結凝灰岩 反応リムの形成 (縁の暗色部) ASR ゲルの滲出(骨材周囲の濡れ色・白色) 骨材内部のひび割れ(黄矢印)



注) 安山岩(細骨材) ASR ゲルの滲出(骨材周囲の濡れ色・白色) 骨材内部からセメントペーストへ進展するひび 割れ (赤矢印)

図-4.6.2.1 Ki橋, コア B1-R1 の切断面拡大(その1) 図-4.6.2.2 Ki橋, コア B1-R1 の切断面拡大(その2)



注) 粗骨材 B3 のデイサイト(Da)において, 図中の視野ではわずかな反応リムの形成が認められた. この デイサイト中の鉱物には, 微晶質~隠微晶質石英(Cry-Qz)が含まれていた.

図-4.6.2.3 粗骨材 B3 のデイサイト (コア B1-R1)



注) 粗骨材 B8 のデイサイト(Da)において,反応リムの形成が認められた.このデイサイト中の鉱物には, 微晶質~隠微晶質石英(Cry-Qz)が含まれていた.

図-4.6.2.4 粗骨材 B8 のデイサイト (コア B1-R2)



注) 粗骨材 B9 の珪質泥岩(Sms)において,反応リムの形成,及び骨材内部からセメントペーストへ延びる ASR ゲルが充填されたひび割れが認められた(黄矢印).この珪質泥岩中の鉱物には,微晶質~隠微晶質 石英(Cry-Qz)とオパール(Op)が含まれていた.

図-4.6.2.5 粗骨材 B9の珪質泥岩中からセメントペーストへ延びるひび割れ(コア B2-R2)

(2) Ka橋

実体顕微鏡下で岩種を判別する際に, Ka 橋のコンクリートコア 28-R1 の切断面(図-4.6.1.7)において, ASR の兆候が見られた粒子の拡大図を図-4.6.2.6~図-4.6.2.7 に示す. ASR の兆候は,砂岩,安山岩,デイサ イト,流紋岩,流紋岩質溶結凝灰岩に反応リムや ASR ゲルの滲み・取り巻きが認められ,一部のデイサイ トでは骨材内部からセメントペーストへ至るひび割れが確認できた(図-4.6.2.6).

偏光顕微鏡下で観察する際に, Ka 橋のコンクリートコア 28-R1, 28-R2 の切断面において,反応性骨材の 有無と ASR の症状を記録したものを前掲表-4.6.1.4, 観察結果を図-4.6.2.8~図-4.6.2.14 に示す. 観察の結果, 粗骨材 A2, A5, A8 (いずれも砂岩), A3, A4 (ともに安山岩), A6, A7 (ともにデイサイト) において ASR の症状が認められ,このうち粗骨材 A2 (砂岩), A3 (安山岩), A5 (砂岩), A7 (デイサイト) では, 骨材内部に微細なひび割れが確認できた.また,ASR が発生していた岩石中の反応性鉱物として, 微晶質 ~隠微晶質石英が砂岩,デイサイト及びチャートに,ガラスが安山岩及びデイサイトに,トリディマイト及 びクリストバライトがデイサイトにそれぞれ認められた.



注) デイサイト ASR ゲルの滲出(骨材周囲の濡れ色・白色) 骨材内部からセメントペーストへ進展する ひび割れ(赤矢印)

図-4.6.2.6 Ka橋, コア 28-R1 の切断面拡大(その1)



注)安山岩 ASR ゲルの滲出(骨材周囲の濡れ色)

図-4.6.2.7 Ka橋, コア 28-R1 の切断面拡大(その 2)



注) 粗骨材 A2 の砂岩(Ss)において, 微細なひび割れが認められた(矢印). この砂岩中の鉱物には, 微晶 質~隠微晶質石英(Cry-Qz)が含まれていた.

図-4.6.2.8 粗骨材 A2の砂岩,骨材中のひび割れ(コア 28-R1)



注) 粗骨材 A3 の安山岩(An)において, 骨材中に微細なひび割れが認められた(矢印). この安山岩中の 鉱物には, ガラス(Gls)が含まれている.

図-4.6.2.9 粗骨材 A3 の安山岩中の微細なひび割れ(コア 28-R1)



注) 粗骨材 A4の安山岩(An)において,図-4.6.2.7 では ASR ゲルの滲出が認められたが,この図ではひび割 れを確認することができなかった.この安山岩中の鉱物には、ガラス(Gls)が含まれている.





注) 粗骨材 A5 の砂岩(Ss)において, 図中の視野では骨材中の微細なひび割れが認められた(矢印). この砂岩中の鉱物には, 微晶質~隠微晶質石英(Cry-Qz)が含まれている.

図-4.6.2.11 粗骨材 A5 の砂岩中の微細なひび割れ(コア 28-R2)



注) 粗骨材 A6 のデイサイト(Da)において,この視野では反応リムの形成が認められた.このデイサイト 中の鉱物には,微晶質石英(Cry-Qz)が含まれている.

図-4.6.2.12 粗骨材 A6 のデイサイト (コア 28-R1)



注) 粗骨材 A7のデイサイト(Da)において、この視野では骨材中の微細なひび割れが認められた(矢印). このデイサイト中の鉱物には、トリディマイト(Tri)が含まれている.





注) 粗骨材 A8 の砂岩(Ss)において,この視野では反応リムの形成が認められた.この砂岩中の鉱物には, 微晶質~隠微晶質石英(Cry-Qz)が含まれていた.


4.6.3 粗骨材の細孔分析

(1) Ki橋

Ki橋のコア B1-R1, B1-R2, B2-R2 における粗骨材 9 粒子について,測定によって得られた細孔に関する 各種の数値データを表-4.6.3.1 に示す.そして,細孔直径 4.5nm 以上における細孔容量,メディアン細孔直 径(細孔容積基準)及びそれらの値から得られるコンクリート中における粗骨材の凍結融解抵抗性を表す指 標 EDF の一覧を表-4.6.3.2 に示す.また,それぞれ粗骨材粒子ごとの細孔径分布曲線を図-4.6.3.1~図-4.6.3.9 に示す.各図中の細孔直径は,各測定範囲における中央値を示す.

表-4.6.3.1 細孔に関する各種の数値データ(Ki橋, コア B1-R1, B1-R2, B2-R2)

項目	式料名(岩種)	B1 (凝灰岩)	B2 (フェ¤ニッケルスラク゛)	B3 (デイサイト)	B4 (デイサイト)	B5 (花崗岩)	B6 (花崗岩)	B7 (玄武岩)	<u>B8</u> (デイサイト)	B9 (珪質泥岩)
全細孔容積	(ml / g)	0.0376	0.0256	0.0434	0.0232	0.0153	0.0221	0.0505	0.0765	0.0457
全細孔比表面積	(m^2/g)	7.47	0.634	6.90	3.15	0.735	0.747	8.41	5.04	8.70
かさ密度	(g / ml)	2.41	3.27	2.34	2.44	2.53	2.49	2.43	2.13	2.31
見掛け密度(真密度)	(g / ml)	2.65	3.57	2.61	2.59	2.63	2.64	2.76	2.55	2.58
細孔率	(%)	9.06	8.37	10.2	5.65	3.85	5.51	12.2	16.3	10.6
ステム使用率	(%)	35	21^{*}	37	28	14*	15^{*}	47	37	73

注) ステム使用率が 25%以下の場合,装置の精度保障外であることから,測定結果に多少の誤差が生じている可能性がある.

表-4.6.3.2 粗骨材粒子の細孔容量 PV,メディアン細孔直径 MD 及び EDF

(Ki橋, コア B1-R1, B1-R2, B2-R2」

試料名		B1	B2	В3	B4	В5	B6	B7	B8	В9
細孔容量 PV	(ml/g)	0.0219	0.0115	0.0280	0.00985	0.00691	0.0100	0.0299	0.0610	0.0318
メディアン細孔直径 MD (細孔容積基準)	(µm)	0.0198	0.964	0.0412	0.0562	0.231	0.148	0.0577	0.111	0.0263
EDF	_	29.6	59.4	24.0	62.2	88.3	61.8	22.7	13.2	21.4



図-4.6.3.2 粗骨材 B2 (フェロニッケルスラグ)の細孔径分布曲線 (コア B1-R1)

細孔直径(µm)



図-4.6.3.3 粗骨材 B3 (デイサイト)の細孔径分布曲線(コア B1-R1)







図-4.6.3.5 粗骨材 B5(花崗岩)の細孔径分布曲線(コア B1-R1)



図-4.6.3.6 粗骨材 B6(花崗岩)の細孔径分布曲線(コア B1-R1)







図-4.6.3.8 粗骨材 B8 (デイサイト)の細孔径分布曲線 (コア B1-R2)



図-4.6.3.9 粗骨材 B9(珪質泥岩)の細孔径分布曲線(コア B2-R2)

(2) Ka橋

Ka橋のコア 28-R1, 28-R2 における粗骨材 8 粒子について,測定によって得られた細孔に関する各種の数 値データを表-4.6.3.3 に示す.そして,細孔直径 4.5nm 以上における細孔容量,メディアン細孔直径(細孔 容積基準)及びそれらの値から得られるコンクリート中における粗骨材の凍結融解抵抗性を表す指標 EDF の一覧を表-4.6.3.4 に示す.また,それぞれ粗骨材粒子ごとの細孔径分布曲線を図-4.6.3.10~図-4.6.3.17 に示 す.各図中の細孔直径は,各測定範囲における中央値を示す.

表-4.6.3.3 神北に	-)) りつ ()	・悝の釵恒アー	グ(Ka 憍,	$\Box f 28$ -RI,	28-R2)
---------------	-------------	---------	----	-------	------------------	--------

ゴ日	料名(岩種)	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	
人如了应建	((19石)	(19石)		(女山石)	(砂石)	0.0919		(11少石)
生神孔谷楨	(mi / g)	0.0217	0.0406	0.256	0.0331	0.0290	0.0212	0.0690	0.0164
全細孔比表面積	(m^2 / g)	0.563	3.52	13.5	0.844	1.01	0.404	1.09	0.005
かさ密度	(g / ml)	2.50	2.39	1.51	2.51	2.42	2.49	2.22	2.53
見掛け密度(真密度)	(g / ml)	2.64	2.65	2.45	2.74	2.61	2.63	2.62	2.64
細孔率	(%)	5.43	9.72	38.5	8.32	7.02	5.28	15.3	4.15
ステム使用率	(%)	15^{*}	42	49	21*	21^*	15^{*}	32	15^{*}

注) ステム使用率が 25%以下の場合,装置の精度保障外であることから,測定結果に多少の誤差が生じている可能性がある.

表-4.6.3.4 粗骨材粒子の細孔容量 PV,メディアン細孔直径 MD 及び EDF

(Ka橋, コア 28-R1, 28-R2)

試料名		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
細孔容量 PV	(ml/g)	0.00805	0.0243	0.195	0.0165	0.0154	0.00696	0.0525	0.00288
メディアン細孔直径 MD (細孔容積基準)	(µm)	0.133	0.0419	5.85	0.648	0.124	0.449	1.95	30.5
EDF	_	75.8	27.1	41.8	42.0	41.3	88.9	26.0	100







図-4.6.3.11 粗骨材 A2(砂岩)の細孔径分布曲線(コア 28-R1)



図-4.6.3.12 粗骨材 A3 (安山岩)の細孔径分布曲線 (コア 28-R1)







図-4.6.3.14 粗骨材 A5(砂岩)の細孔径分布曲線(コア 28-R2)



図-4.6.3.15 粗骨材 A6 (デイサイト)の細孔径分布曲線 (コア 28-R1)



図-4.6.3.16 粗骨材 A7 (デイサイト)の細孔径分布曲線 (コア 28-R2)



図-4.6.3.17 粗骨材 A8(砂岩)の細孔径分布曲線(コア 28-R1)

(3) EDF の比較結果

Ki橋の粗骨材 9 粒子, Ka 橋の粗骨材 8 粒子について, コンクリートの凍結融解抵抗性を表す指標 EDF の 比較結果を図-4.6.3.18 に示す. 既往の文献⁸⁾では, EDF の値が 40 未満の場合には, 凍結融解抵抗性が低いと されている. 図より, 粗骨材 B1, B3, B7~B9, A2~A5, A7 では, 凍結融解抵抗性が低い傾向にあり, このう ち薄片の偏光顕微鏡観察で ASR 反応性鉱物を含む粗骨材 B9, A2, A3, A5, A7 ではいずれも EDF が比較的低く, 薄片で見られたひび割れが ASR によるものではなく, 凍結融解作用によるものである可能性もあると考え られる.



注) EDF: 粗骨材のコンクリート中での凍結融解抵抗性を表す. 点線: EDF が 40 未満の場合に凍結融解抵抗性が低いとされる⁸. 下線: 薄片の偏光顕微鏡観察で ASR 反応性鉱物を含む粗骨材粒子を示す.

図-4.6.3.18 Ki橋, Ka橋から抽出した粗骨材粒子の凍結融解抵抗性 EDF

4.6.4 粗骨材の凍結融解抵抗性

(1) 骨材損失率

Ki 橋から採取した粗骨材 23 粒子, Ka 橋から採取した粗骨材 20 粒子, 骨材群(約 750g)の凍結融解試験の結果を表-4.6.4.1~4.6.4.3 に示す. なお, 骨材損失率は, 試験終了後に 10mm ふるいから抜け落ちる粒子の割合から求めた.

粗骨材粒子	試験前質量	試験後質量	骨材損失率	破壊
No.	(g)	(g)	(%)	形態
1	9.2	8.0	13.0	表層破壊
2	18.9	18.7	1.1	小片欠け
3	13.8	13.6	1.4	表層破壊
4	14.8	3.3	77.7	全体崩壊
5	9.0	8.3	7.8	小片欠け
6	11.5	10.3	10.4	表層破壊
7	19.3	19.3	0.0	なし
8	10.4	8.2	21.2	割れ
9	26.0	5.0	80.8	全体崩壊
10	17.1	17.0	0.6	小片割れ*
11	14.9	14.2	4.7	表層破壊
12	33.1	33.0	0.3	表層破壊
13	22.3	19.5	12.6	表層破壊
14	28.2	23.7	16.0	割れ
15	20.8	14.7	29.3	割れ
16	15.2	15.2	0.0	なし
17	28.3	28.3	0.0	なし
18	21.0	21.0	0.0	なし
19	11.0	10.9	0.9	小片欠け
20	24.2	24.2	0.0	なし
21	18.6	17.4	6.5	小片欠け
22	12.1	11.5	5.0	小片欠け
23	14.9	14.9	0.0	なし

表-4.6.4.1 Ki橋から採取した粗骨材 23 粒子の凍結融解試験結果

※) 粗骨材全体にひび割れが生じていたもの.

粗骨材粒子	試験前質量	試験後質量	骨材損失率	破壞
No.	(g)	(g)	(%)	形態
1	24.1	23.9	0.8	小片割れ*
2	12.7	12.7	0.0	なし
3	17.0	17.0	0.0	なし
4	22.6	22.5	0.4	なし
5	13.6	11.5	15.4	表層破壞
6	7.6	0.5	93.4	全体崩壊
7	16.7	15.4	7.8	小片割れ*
8	17.1	17.1	0.0	なし
9	27.5	27.5	0.0	なし
10	13.7	4.9	64.2	全体崩壊
11	16.5	15.6	5.5	小片欠け
12	19.8	19.7	0.5	なし
13	18.4	17.6	4.3	小片欠け
14	11.7	11.6	0.9	なし
15	11.9	0.6	95.0	全体崩壊
16	9.8	4.0	59.2	全体崩壊
17	8.3	7.6	8.4	表層破壊
18	16.5	12.3	25.5	割れ
19	19.0	18.3	3.7	表層破壊
20	12.1	11.5	5.0	小片欠け

表-4.6.4.2 Ka橋から採取した粗骨材 20粒子の凍結融解試験結果

※:粗骨材全体にひび割れが生じていたもの.

表-4.6.4.3 Ki橋, Ka橋から採取した骨材群の凍結融解試験結果

骨材联		粒度分布(残留%)						
月 1/1 中十	20mm	15mm	10mm	(%)				
Ki	37.7	40.4	12.9	9.0				
Ka	44.7	42.1	11.1	2.1				

(2) 粗骨材の破壊形態

Ki 橋及び Ka 橋から採取したそれぞれの粗骨材における試験前後の外観状況を図-4.6.4.1~4.6.4.2 に示し, 外観変状で見られた破壊形態を前掲表-4.6.4.1~4.6.4.2 に併記した. 粗骨材の破壊形態について,破壊の程度 が軽微なものから順に小片欠け,表層破壊,割れ及び全体崩壊の4種類に分類した⁹.割れは骨材が2分, 3分されるものを表し,小片欠けはその程度が軽微なものを表す. そして,表層破壊は骨材が表層から破壊 したようなものを表し,全体破壊は元の形状がなくなるほど細分化されたものを表す.

表-4.6.4.1 及び表-4.6.4.2 より,骨材損失率が約 15%以下の粗骨材は,破壊形態が小片欠けや表層破壊のように比較的軽微な損傷であったが,小片欠けの一部では,粗骨材全体にひび割れが生じているものもあった. 一方で,骨材損失率が約 15%~30%の範囲にある粗骨材では,骨材が 2 分,3 分されるような割れが生じており,さらに骨材損失率が約 60%を超えるような粗骨材では,全体崩壊のように損傷が激しいものであった.すなわち,粗骨材単体として,骨材損失率が約 15%を超えるような粗骨材は,凍結融解の影響を受けやすいものであることがわかる.

ただし、コンクリートコアや板による断面観察では、凍結融解試験で見られた粗骨材の破壊形態のうち、 例えば図-4.6.4.2(r)で見られるような粗骨材の割れに沿ってコンクリート中にも微細ひび割れが生じているこ とが確認できたが、例えば図-4.6.4.2(f)のような全体崩壊は、少なくとも観察時には認められなかった.



(a)No.1 (表層破壊)



(c)No.3 (表層破壊)

2^{****}3 4 5 6 7 2^{****}3 4 5 6 7

(e)No.5 (小片欠け)

2***3456782****345678

(g)No.7 (なし)



(b)No.2 (小片欠け)



(d)No.4 (全体崩壊)



(f)No.6 (表層破壊)



(h)No.8 (割れ)



8

注) 左図が試験前,右図が試験後 図-4.6.4.1 Ki橋から採取した粗骨材粒子と骨材群の外観状況



(s)No.19(小片欠け)(t)No.20(なし)注) 左図が試験前,右図が試験後図-4.6.4.1 Ki橋から採取した粗骨材粒子と骨材群の外観状況(続き)





(v)No.22 (小片欠け)



(w)No.23 (なし)



(x)骨材群注) 左図が試験前,右図が試験後図-4.6.4.1 Ki橋から採取した粗骨材粒子と骨材群の外観状況(続き)





図-4.6.4.2 Ka橋から採取した粗骨材粒子と骨材群の外観状況(続き)



(u)骨材群 注) 左図が試験前,右図が試験後 図-4.6.4.2 Ka橋から採取した粗骨材粒子と骨材群の外観状況(続き)

(3) 密度及び吸水率試験の結果

凍結融解試験で使用しなかった残りの粗骨材を用いて、15mm 以上の骨材群(各 50 個を 2 試料ずつ)を 抽出し、密度及び吸水率試験を行った結果を表-4.6.4.4 に示す.

	骨材群 No.	Ki-1	Ki-2	Ka-1	Ka-2
1	空気中の表乾の試料質量(g)	861.6	813.0	931.1	944.3
\bigcirc	水中のかごと試料の				
4	見掛けの質量 (g)	882.3	856.3	946.6	951.5
0	水中のかごの見掛け				
0	の質量 (g)	371.2	371.2	371.2	371.2
	水中の試料の見掛け				
4	の質量 (g)	511.1	485.1	575.4	580.3
(5	表乾密度				
0	(1)/((1)-4) (g/cm ³)	2.458	2.479	2.618	2.594
(絶乾密度				
(8)	(1)/((1)-4) (g/cm ³)	2.373	2.404	2.575	2.539
(11)	乾燥後の試料の質量(g)	831.7	788.3	916.0	924.3
(19)	吸水率				
(12)	(1)-(1)/(1)×100 (%)	3.6	3.1	1.6	2.2
	平均值 (%)	3.	4	1.	9

表-4.6.4.4 Ki橋, Ka橋から採取した骨材群の密度及び吸水率試験の結果

(4) 安定性試験の結果

凍結融解試験で使用しなかった残りの粗骨材を用いて、15mm以上の骨材群(各 50 個を 2 試料ずつ)を 抽出し、安定性試験を行った結果を表-4.6.4.5、試験後の外観の様子を図-4.6.4.3に示す.

骨材群	試験前質量	及び粒数	試験後質量	及び粒数	損失質量率	損失数	
No.	(g)	(個)	(g)	(個)	(%)	(個)	
Ki-1	500.1	50	448.8	46	10.3	4	
Ki-2	495.5	50	442.9	47	10.6	3	
Ka-1	549.8	50	521.6	48	5.1	2	
Ka-2	527.4	50	504.3	48	4.4	2	

表-4.6.4.5 Ki橋, Ka橋から採取した骨材群の安定性試験の結果

注) 試験後に15mm ふるいを通過したものを損失分にして,損失質量率と損失数を算出した.



(a)Ki橋の骨材群



(b)Ka橋の骨材群 図-4.6.4.3 安定性試験後の外観状況

4.7 EPMA 分析結果

4.7.1 中性化深さ

コア EP より切り出した試料 EP①~④において, EPMA 分析の研磨前に実施した中性化深さの測定時 における発色状況を図-4.7.1.1 に示す. 前述 4.4.1 のとおり,中性化が確認された試料 EP①, ②の平均中 性化深さは,それぞれ 25.0mm 及び 24.0mm であった.



(a)試料 EP①(格子窓)



(c)試料 EP③



(b)試料 EP② (シート部)



(d)試料 EP④

注)写真上が床版下面側. 図-4.7.1.1 コア EP の中性化深さの測定時における発色状況 4.7.2 EPMA 分析

各試料の外観写真及び EPMA 面分析結果を図-4.7.2.1~図-4.7.2.4 に示す.また,図-4.7.2.5 に試料 EP① ~④を1枚にまとめたものを示す.図中において,カラーバーの上方の色で表示されている部分ほど,当 該元素の濃度が高く,赤>橙>黄>緑>青>黒の順に濃度が低くなる.図-4.7.2.1(a)に示すように,試料 EP①では床版下面に供用下で生じたひび割れが見られた.同図(f)にひび割れの拡大図を示す.

EPMA 分析では、中性化深さの測定結果と硫化物イオンの濃縮現象が確認された位置が概ね一致する ことが確認できる¹⁰⁾.塩化物イオンとナトリウムイオンについて、試料 EP①及び②の床版下面表層付近 に着目すると、両イオンともシート接着部では濃度が低く、格子窓部では濃度が高い傾向が確認された.

試料 EP②の塩化物イオンの分布とコア EP の外観を比較したものを図-4.7.2.6 に示す.シート接着部の 試料 EP②の塩化物イオンに着目すると、シートが接着されていない境界部付近も塩化物イオンの割合が 低い傾向であった.シート接着前の塩化物イオン濃度分布は定かではないが、シートを接着したことで、 水や塩化物イオンの外部からの供給や外部への排出が部分的に遮断され、それぞれの境界条件に変化が 生じたことで塩化物イオンがコンクリート内部で 3 次元的な移流、拡散により移動したと考えられる. これらの点は、既往の知見と解析的な検討を踏まえて検証が必要である.



図-4.7.2.1 外観写真及び EPMA 面分析結果(試料 EP①,格子窓)



図-4.7.2.2 外観写真及び EPMA 面分析結果(試料 EP2),シート接着部)



図-4.7.2.3 外観写真及び EPMA 面分析結果(試料 EP③)



図-4.7.2.4 外観写真及び EPMA 面分析結果(試料 EP④)



図-4.7.2.5 外観写真及び EPMA 面分析結果(試料番号①~④全体)



図-4.7.2.6 試料 EP②(シート非接着部)の塩化物イオンの分布とコア EP の外観

5. 土砂化の調査方法としてのコンクリート板の微細ひび割れ観察

5.1 コンクリート板の微細ひび割れ観察で見られた床版劣化の特徴

(1) Ki 橋

これまでのコアによる微細ひび割れ観察では、土砂化中間層の特徴の1つである水平ひび割れが見られる 範囲は特定しにくかった.あえて言えば、Ki 橋の供試体 No.1 では明らかに土砂化している範囲から概ね 300mm の範囲と考えていた.

Ki 橋の供試体 No.2 で行ったコンクリート板の観察(図-4.5.3.6)では、水平ひび割れの範囲は明らかに土 砂化している範囲から概ね 300mm の範囲で、コンクリート板の微細ひび割れ観察でも同程度であることを 確認した.供試体 No.1 に比べて No.2 の明らかに土砂化していた範囲は狭かったが、土砂化中間層の範囲は No.1 と同程度であることが確認された.

(2) Ka 橋

コンクリート板による微細ひび割れ観察を行った No.28③では、上側が激しく土砂化しているだけでなく、 下側鉄筋付近に層状の水平ひび割れが認められた(図-5.1.1). 通常の塩害では一般的に鉄筋を結ぶように明 確な水平ひび割れが1本生じる傾向があるが、ここでは上下にも複数本の水平ひび割れが生じており、塩害 単独の場合のひび割れ性状と異なっていた. このような複数本のひび割れを残したまま上面のみ補修しても すぐに再劣化してしまう可能性が高いため、明らかに土砂化している範囲は上面補修ではなく全厚打換えを 行うことが重要である¹¹⁾. なお、このような複数本の水平ひび割れは Ki 橋のコアによる観察でも見られた. Ka 橋のコンクリート板による観察により、同様の傾向を確認できるだけでなく、コアによる観察に比べて微 細ひび割れが生じている範囲をより確実に把握できるとともに、第三者に分かりやすく伝えられることが確 認できた.

一方 No.28①の比較的軽微な土砂化範囲では,鉄筋を結ぶようにひび割れが生じているものの,それより 上側のかぶりコンクリートに水平ひび割れはなく,床版表面付近のみ劣化していた(図-5.1.2).鉄筋から斜 め上に向かって生じたひび割れは鉄筋の腐食膨張によるものと考えられる.No.28①では,塩害による上側鉄 筋の腐食だけでなく,凍害によるコンクリートの表面劣化が並行して生じていた.この位置は,橋面アスフ ァルト舗装の部分補修の打継目のあった箇所付近であり(図-3.2.2.1),部分補修されたアスファルト舗装にひ び割れも見られたことから,その打継目から路面へ塩水が浸入して塩害による上側鉄筋の腐食とそれに起因 するコンクリートのひび割れが生じただけでなく,その周囲で局所的に上面のコンクリートの凍害が生じた ものと考えられる.

供試体 No.28 は横断勾配の高い側であったことから,路面水の滞水がほとんどなく,この打継目付近 以外は CL 付近の舗装打継目付近を除き床版の劣化は認められなかった.

Image: No.283
Image: No.282

Image: No.283
Image: No.282

Image: No.282

図-5.1.1 微細ひび割れ観察結果 (No.2823)



走行方向

走行直角方向

図-5.1.2 微細ひび割れ観察結果 (No.28①)

(3) G橋

撤去床版には現場から搬入時点で土砂化は生じていなかったものの、床版上面補修の履歴があり、過去に 床版上面が劣化していたと考えられる.4.5.2のコアによる微細ひび割れ観察結果によると、弾性-1及び弾性 -5 で既設コンクリートと補修材の付着切れが認められた(図-5.1.3).撤去床版で実測した結果、上側主鉄筋 の中心は床版下面から145mm付近にあり、床版上面補修部の範囲に位置していた.また、4.3の床版上面補 修部における塩化物イオン濃度分布では、上面補修部より深い位置で2kg/m³を超える塩分浸透が認められた (図-5.1.4).上面補修前は上側主鉄筋位置も同等以上に塩分が浸透していたと考えられることから、塩害に よる上側主鉄筋の腐食により床版劣化が生じていたものと考えられる.

また,弾性-1,弾性-5 とも補修材との付着切れ箇所の下にも微細な水平ひび割れが生じていた.この水平 ひび割れは,床版補修の前に既に発生していた可能性が考えられるほか,補修材の付着が切れた後に路面水 が浸入し,既設コンクリートの水平ひび割れを誘発した可能性もあると考えられる.

コンクリート板の微細ひび割れ観察では、鉛直方向の貫通ひび割れが鉄筋に沿う形で複数認められた(図-5.1.5).また、下側の配力筋を中心として放射状に生じている微細ひび割れも認められた.貫通ひび割れについては、初期の乾燥収縮を含め供用下で既に生じていた可能性があるが、コンクリート板に鉄筋を含むため樹脂を含浸するための乾燥過程でコンクリートの変形を鉄筋が拘束することにより生じた可能性もあり、更なる精査が必要である.なお、同様の手順で観察を行った Ki 橋、Ka 橋のコンクリート板にも鉄筋が含まれていたが、G 橋ほど明確な貫通ひび割れは認められなかった.G 橋の床版では下縁に近いほうが塩化物イオン濃度が高い場合があり、少なからず下面から塩化物イオンの浸入があったと考えられる.しかしG 橋は内陸に位置し、飛来塩分が供給源である可能性は低いことから、床版上面からの塩水がこの貫通ひび割れを通じて床版下面に供給された可能性がある^{3,12)}.



図-5.1.3 コアによる微細ひび割れ観察結果(G橋)



図-5.1.4 G橋における塩化物イオン濃度分布測定結果(床版上面補修部から採取したコア)

鉛直方向の微細ひび割れ



図-5.1.5 G橋のコンクリート板で見られた鉛直方向の貫通ひび割れ

5.2 土砂化中間層の調査方法としての有効性及び課題

コアによる微細ひび割れ観察の場合,観察できる範囲が断片的であり,かつコア間のひび割れは観察でき ないため,床版内部のひび割れ状況を連続的に把握しづらいことが課題であった.また,コアに鉄筋を含ん でいない場合,鉄筋とひび割れの位置関係が把握しづらかった.今回試行したコンクリート板による微細ひ び割れ観察では,コアによる観察に比べて広範囲の床版内部状況を連続的に観察でき,鉄筋とひび割れの位 置関係の確認も容易であることから,土砂化中間層の調査方法としてより明解な結果を得ることのできる有 効な調査方法であると考えられる.また,橋梁毎に床版内部のひび割れ性状等の違いを視覚的に把握するこ とができるため,土砂化の原因推定のための調査方法としても有益であると考えられる.

ただし、図-5.2.1 の赤丸部のように目視で明確に確認できるひび割れがあるにも関わらず、蛍光エポキシ 樹脂が含浸していなかった事例が確認された.真空状態にした際にひび割れから空気が除去しきれずに含浸 しなかった可能性や、樹脂含浸後の切断時に樹脂が除かれてしまった可能性が挙げられる.この原因につい て今後確認していく必要がある.

表-5.2.1 に、撤去床版の調査におけるコンクリートコア及びコンクリート板による微細ひび割れ観察のメ リット、デメリットの比較表を示す.コンクリート板による観察は、コンクリートコアによる場合と比較し て一度に広い範囲を観察可能で確認しやすい利点がある反面、観察までの準備作業にかかる負担が大きく、 作業者に一定のノウハウの蓄積が必要である.また、前述したとおり目視可能なひび割れに樹脂が含浸され なかった理由の確認と改善方法の検討や、微細ひび割れに適した乾燥方法の検討、コンクリート板の観察に 適した撮影方法、精度良く効率的に撮影するための補助装置の製作等更なる確認・改善が必要である.



a)樹脂含浸前の観察状況



b)樹脂含浸後の観察状況 図-5.2.1 蛍光エポキシ樹脂の含浸不良

		コンクリートコアによる場合	コンクリート板による場合
土砂化	水平方向の観察範囲	狭い 70~100mm	広い 800mm
中間層	中間層の範囲	複数のコアを使用する必要あり.	1 試料で確認できる場合が多い.
の確認	(微細ひび割れの範囲)	断片的	複数試料でさらに広範囲に把握できる.
	確認しやすさ、説明しやすさ	やや劣る	よい
調査の 作業性	試料採取	一般のコア削孔機で可. 中間層の確認には、複数本の採取が必 要となるが、作業性は比較的良い.	大型のコンクリートカッターを要する. 安全確保,撤去床版の設置準備が必要. 1試料のために2ラインの切断が必要.
	鉄筋の影響	採取時,コア径を小さくすれば鉄筋を 避けられる場合がある. 観察時,鉄筋を含まない場合に,鉄筋の 影響が分かりにくい場合がある.	採取時,切断ラインに平行な鉄筋が切断 位置と一致しないように配慮する必要が ある.重ね継手がある場合に,試料の厚 さが大きくなり,試料が重くなる. 観察時,切断ラインを直交する鉄筋の位 置が明確で,劣化との関連を把握しやす い傾向にある.
	炉乾燥,真空引き	小型の乾燥炉, デシケータで可能.	大型の乾燥炉,真空タンクが必要. 通常,試料の重さに耐える容器が必要. 樹脂を流し込む間も真空の保持が必要.
	樹脂含浸	1本当りの樹脂量は少ない.	1 試料当りの樹脂量が多い. 樹脂を流し込むのに時間がかかる.
	樹脂充填後の切断	小型のコンクリートカッターで可.	大型コンクリートカッターを要する*. 安全確保,撤去床版の設置準備が必要.
	撮影	ブラックライトの光量, ピントの面的 な偏りが小さく, 作業性がよい. 微細ひび割れを撮影しやすく, 所要の 品質を得やすい.	800mm の範囲にできるだけ均等にブラ ックライトを当てる必要がある.またカ メラと試料面の角度の調整,800mm 試料 面に対するピント合わせなど,カメラの 設定に配慮がいる.

表-5.2.1 撤去床版の調査におけるコンクリート板による微細ひび割れ観察のメリット、デメリット

*) 撤去床版からの切り出しはワイヤーソーでもよいが, 蛍光樹脂含浸後の切断は, 観察しやすくするため, 大型コンクリートカッターで一度に切断する必要がある. 6. まとめ

道路橋 RC 床版の土砂化の症状,範囲と発生原因や影響因子を明らかにするため,また,今後の床版土砂 化を調査する際の方法を明らかにするため,床版上面に土砂化が生じていた可能性のある3橋からの撤去床 版を用いて,さまざまな材料劣化を想定してそれぞれに関連する調査を行った.詳細調査はまだ途中段階で あるが,一旦データ集としてまとめておくこととした.本資料では,新たな調査結果を含めて,これまでの 調査結果を再整理して示した.

土砂化が生じてしまった場合に、その補修範囲を適切に設定する必要があることから、土砂化中間層を意 識して暫定的な補修範囲の目安を示しているが、今後もその裏付けを確実にするための基礎データを収集す る必要がある. 道路橋の床版更新関連の報告などで、床版上面や切断面の土砂化の状況を示した事例が見ら れる. しかし、これまで床版内部の微細ひび割れを広い範囲にわたって観察、記録する方法がなく、微妙な 劣化の段階である土砂化中間層やその範囲を把握するための記録がほとんど残されていない. このことから、 個々の現場において、土砂化した床版を撤去する際に、その症状と土砂化中間層の範囲を明確に記録する調 査方法(案)を提示した. 具体には、比較的広い範囲の床版内部の状況を視覚的に把握することができる、コ ンクリート板での微細ひび割れ観察が、実務的に対応可能で、記録として分かりやすいと考えた. 土砂化し た床版を廃棄する前に、1橋につき1箇所だけでもよいので、土砂化した周囲の床版内部の微細ひび割れの 状況を調査、記録して、共有、蓄積することで、土砂化中間層の範囲の設定をより確実にできると考える. また、それだけでなく、床版土砂化の現状把握や原因究明にも大いに役立つと考える.

本資料で示した,これまでのさまざまな詳細調査は,時間,費用ともに負担が大きく,個々の現場で行う には適していない.しかし,研究機関等において,土砂化の起点となる原因を調査する場合には,ここで示 したように一つの劣化機構にとらわれず多角的に調査し,症状や環境条件などをよく観察する必要がある. 本資料は,その調査事例として参考になると考える.

今後の課題

従来のコンクリートコアによる方法ではなく,比較的大きいコンクリート板での微細ひび割れ観察を実際 に試行錯誤して,その有効性を示したが,次に示すとおり,方法の細部についてさらに精査する必要がある.

- 1) 目視で観察できるひび割れの一部には、蛍光エポキシ樹脂が見られず、注入の不備か、切断時に除かれてしまったのか、原因を確認して適宜改善する必要がある.
- 2) ここで示したように、コンクリート板には、鉄筋を含むことが想定され、樹脂含浸前に行う乾燥工程に おいて、収縮ひび割れをもたらす可能性がある.その点についてさらに精査する必要がある.
道路橋床版の土砂化に関する調査については、平成 30 年度及び令和元年度の国土交通省国土技術研究会の指定課題「道路橋コンクリート床版の土砂化対策に関する調査研究」を通じて、国土交通省国道・技術課、 国土技術政策総合研究所、東北地方整備局、北陸地方整備局、中部地方整備局、九州地方整備局及び北海道 開発局、並びに土木研究所のつくば、寒地の関係チームが連携して相互の情報共有を図った.本文で示した G橋に関して、床版更新時の現地調査及び部材や資料の提供は、その一環として、東北地方整備局にご協力 いただいた.

Ka 橋に関しては,平成28年度に実施した「RC 床版上面の劣化に関する調査」の一環として,床版更新の資料を提供していただくとともに,更新時の現地調査及び部材の提供を,関東地方整備局長野国道事務所にご協力いただいた.

Ki橋の撤去床版は,平成25年度の床版更新時に現地調査させていただくとともに,部材の提供及び関連 資料の提供に関して東北地方整備局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いただいた関係各位に改めて感謝いたします.

コンクリートの微細ひび割れの観察のうち、その基礎となる含浸樹脂の配合や大型真空タンクの形状寸法 などは、コンクリートコアでの微細ひび割れの観察に精通する、一般社団法人日本建設機械施工協会 施工 技術総合研究所の渡邉晋也氏にご指導いただいた.ここに深く感謝の意を表します. [1章]

- 田中良樹,玉越隆史,村井啓太,藤本圭太郎:道路橋コンクリート床版の土砂化部周辺の変状に関する 調査,コンクリート工学年次論文集, Vol. 40, No. 2, pp. 1315-1320, 2018.
- 2) 道路橋床版の複合劣化に関する調査研究小委員会:道路橋床版の維持管理マニュアル 2016, 鋼構造シリ ーズ 27, 土木学会, 2016.
- 山本健太郎,田中良樹,上仙靖:道路橋コンクリート床版の土砂化中間層に関する調査,コンクリート 構造物の補修,補強,アップグレード論文報告集, Vol. 19, pp. 531-536, 2019.10.
- 4)田中良樹、上仙靖:道路橋コンクリート床版の土砂化に関する調査〜土砂化中間層とその適切な除去範囲〜、土木技術資料、Vol. 61、No. 7、pp. 53-54、2019.
- 5) 国土交通省道路局国道・技術課,国土技術政策総合研究所,東北地方整備局,北陸地方整備局,中部地 方整備局,九州地方整備局及び北海道開発局,国立研究開発法人土木研究所:道路橋コンクリート床版 の土砂化対策に関する調査研究,土木研究所資料,第4398号,2020.3.
- 6) 藪雅行,上仙靖ほか:床版防水に配慮した橋面舗装の打換え技術に関する研究-道路橋コンクリート床版の土砂化対策-,土木研究所資料,第4410号,2021.
- 7) 田中良樹, 寺田剛, 渡邉真一, 上仙靖, 藪雅行: 道路橋コンクリート床版の土砂化対策~床版防水に配 慮した橋面舗装の打換え技術の提案~, 土木技術資料, Vol. 62, No. 6, pp. 40~45, 2020.
- 8) 道路橋示方書·同解説, I 共通編, 日本道路協会, 2002.
- 9) 道路橋床版防水便覧, 日本道路協会, 2007.3.
- 10) 田中良樹, 上仙靖, 藪雅行, 川上篤史: 橋面アスファルト舗装の防水性向上の取組み~道路橋コンクリート床版の予防保全に向けて~, 土木技術資料, Vol. 63, No. 12, pp. 8-11, 2021.
- 夏堀格,田中良樹,上仙靖:連続繊維シートで補強された道路橋 RC 床版における塩分浸透が及ぼす土 砂化への影響,コンクリート構造物の補修,補強,アップグレード論文報告集,Vol. 22, pp. 535-540, 2022.10.
- 12) 田中良樹,石田雅博,村越潤:道路橋における凍結融解とASRの影響を受けたコンクリートの劣化調査, 土木学会論文集 E2, Vol. 72, No. 3, pp. 214~233, 2016.7.

[2章]

- 道路橋床版の複合劣化に関する調査研究小委員会:道路橋床版の維持管理マニュアル 2016,鋼構造シリーズ 27,土木学会,2016.(再掲)
- 2) 赤平勝也, 佐々木博臣, 菊地淳: 複合劣化による鉄筋コンクリート床版の抜け落ち損傷事例について, 第8回道路橋床版シンポジウム論文報告集, 土木学会, pp. 37-40, 2014.10
- 3) 長谷川寿夫,藤原忠司:凍害,技報堂出版, 1988.2.

- 4) 藪雅行,上仙靖ほか:床版防水に配慮した橋面舗装の打換え技術に関する研究-道路橋コンクリート床版の土砂化対策-,土木研究所資料,第4410号,2021.(再掲)
- 5) 国土交通省道路局国道・技術課,国土技術政策総合研究所,東北地方整備局,北陸地方整備局,中部地 方整備局,九州地方整備局及び北海道開発局,国立研究開発法人土木研究所:道路橋コンクリート床版 の土砂化対策に関する調査研究,土木研究所資料,第4398号,2020.3.(再掲)
- 6) 山本健太郎,田中良樹,上仙靖:道路橋コンクリート床版の土砂化中間層に関する調査,コンクリート 構造物の補修,補強,アップグレード論文報告集,Vol. 19, pp. 531-536, 2019.10.(再掲)
- 7) 夏堀格,田中良樹,上仙靖:連続繊維シートで補強された道路橋 RC 床版における塩分浸透が及ぼす土 砂化への影響,コンクリート構造物の補修,補強,アップグレード論文報告集, Vol. 22, pp. 535-540, 2022.10.(再掲)
- [3章]
- 山本健太郎,田中良樹,上仙靖:道路橋コンクリート床版の土砂化中間層に関する調査,コンクリート 構造物の補修,補強,アップグレード論文報告集, Vol. 19, pp. 531-536, 2019.10.(再掲)
- 2) 夏堀格,田中良樹,上仙靖:連続繊維シートで補強された道路橋 RC 床版における塩分浸透が及ぼす土 砂化への影響,コンクリート構造物の補修,補強,アップグレード論文報告集, Vol. 22, pp. 535-540, 2022.10.(再掲)
- 3)田中良樹,玉越隆史,村井啓太,藤本圭太郎:劣化したコンクリートコアの高さごとの弾性特性測定, 第73回土木学会年次学術講演会概要集 V, pp. 807-808, 2018.8.
- 4)田中良樹,玉越隆史,村井啓太,藤本圭太郎:道路橋コンクリート床版の土砂化部周辺の変状に関する 調査,コンクリート工学年次論文集, Vol. 40, No. 2, pp. 1315-1320, 2018.(再掲)
- 5) 佐伯竜彦, 大賀宏行, 長瀧重義: コンクリートの中性化の機構解明と進行予測, 土木学会論文集, No. 414, pp. 99-108, 1990.
- 6) 藪雅行,上仙靖ほか:床版防水に配慮した橋面舗装の打換え技術に関する研究-道路橋コンクリート床版の土砂化対策-,土木研究所資料,第4410号,2021.(再掲)
- 7) 渡邉晋也,後藤昭彦,松本政徳,宮永憲一:打撃工法によるハツリ処理で生じた微細ひび割れの定量的 評価方法と打継ぎ界面の付着強度に関する研究,コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, pp. 775-780, 2013.
- 8) 渡辺博志,片平博,伊佐見和大,山田宏:骨材がコンクリートの凍結融解抵抗性と乾燥収縮に与える影響と評価試験法に関する研究,土木研究所資料第4199号,2011.3.
- 9) 片平博, 伊佐見和大, 渡辺博志:砂利粗骨材の耐凍害性評価法に関する研究, 土木学会年次学術講演会 概要集, V-65, pp. 861-862, 2010.
- Kaneuji, M., Winslow, D. N. and Dolch, W. L. : The relationship between an aggregate's pore size distribution and its freeze thaw durability in concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 10, No. 3, pp. 433-441, 1980.
- 11) 金氏真: 粗骨材の細孔径分布とコンクリートの凍結融解抵抗性との関係, セメント・コンクリート, No.

415, pp. 155-160, 1981.9.

[4章]

- 中田善久,太塚秀三,毛見虎雄:異形鉄筋を含んだ高強度コンクリートコアの圧縮強度性状に関する検討,コンクリート工学年次論文集,Vol.28,No.1,pp.479-484,2006.
- 2) 山本健太郎,田中良樹,上仙靖:道路橋コンクリート床版の土砂化中間層に関する調査,コンクリート 構造物の補修,補強,アップグレード論文報告集, Vol. 19, pp. 531-536, 2019.10.(再掲)
- 3) 夏堀格,田中良樹,上仙靖:連続繊維シートで補強された道路橋 RC 床版における塩分浸透が及ぼす土 砂化への影響,コンクリート構造物の補修,補強,アップグレード論文報告集, Vol. 22, pp. 535-540, 2022.10.(再掲)
- 4) 小林一輔: コンクリートの炭酸化に関する研究, 土木学会論文集, No. 433, pp. 1-14, 1991.
- 5) 佐伯竜彦, 大賀宏行, 長瀧重義: コンクリートの中性化の機構解明と進行予測, 土木学会論文集, No. 414, pp. 99-108, 1990. (再掲)
- 6) 渡邉晋也,後藤昭彦,松本政徳,宮永憲一:打撃工法によるハツリ処理で生じた微細ひび割れの定量的 評価方法と打継ぎ界面の付着強度に関する研究,コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, pp. 775-780, 2013.(再掲)
- 7) ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会報告書,日本コンクリート工学会,2014.7.
- 8) Kaneuji, M., Winslow, D. N. and Dolch, W. L.: The relationship between an aggregate's pore size distribution and its freeze thaw durability in concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 10, No. 3, pp. 433-441, 1980. (再掲)
- 9) 田中良樹,石田雅博,村越潤:道路橋における凍結融解とASRの影響を受けたコンクリートの劣化調査, 土木学会論文集 E2, Vol. 72, No. 3, pp. 214-233, 2016.7.
- 10) 小林一輔, 白木亮司, 河合研至: 炭酸化によって引き起こされるコンクリート中の塩化物, 硫黄化合物 及びアルカリ化合物の移動と濃縮, コンクリート工学論文集, Vol. 1, No. 2, p. 69-82, 1990.
- 田中良樹、上仙靖:道路橋コンクリート床版の土砂化に関する調査〜土砂化中間層とその適切な除去範囲〜、土木技術資料、Vol. 61, No. 7, pp. 53-54, 2019.(再掲)
- 12) 本荘清司,藤原規雄,葛目和宏,牧博則:凍結防止剤による塩害で劣化した鋼橋 RC 床版の詳細調査, コンクリート構造物の補修,補強,アップグレード論文報告集, Vol. 11, pp. 529-536, 2011.10.

土木研究所資料 TECHNICAL NOTE of PWRI No.4442 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