

報告 道路橋 RC 床版の土砂化周辺部に生じたひび割れ観察

小沢 拓弥*1・田中 良樹*2・中村 英佑*3・古賀 裕久*4

要旨：道路橋 RC 床版で確認されたコンクリートの土砂化について、その周辺部に生じていた床版内部のひび割れ状況を詳細に把握するために、コンクリートコアとコンクリート板を用いた蛍光エポキシ樹脂含浸によるひび割れ観察を行った。その結果、土砂化の直下部では、無数の微細ひび割れや上側主鉄筋から下側主鉄筋までの領域で層状ひび割れ、土砂化の隣接部では、土砂化の直下部から連続した水平ひび割れや一部に微細ひび割れが観察された。床版撤去後の劣化状況の記録方法として、コンクリート板による調査方法は、土砂化やその周辺部に生じたひび割れの特徴を可視化できる点で有効な手段であることを示した。

キーワード：コンクリート, 土砂化, 微細ひび割れ, 水平ひび割れ, 可視化, 蛍光エポキシ樹脂

1. はじめに

近年、道路橋の鉄筋コンクリート床版（以下、RC 床版）では、床版内部のコンクリートに複数の水平ひび割れが生じる事例や、アスファルト舗装下で床版上面のコンクリートに土砂化が生じる事例が報告されており、維持管理の負担となっている¹⁾。一般に、土砂化した RC 床版の補修では、土砂化部位のみを除去して補修材で上面補修されるが、数年で再劣化して補修を繰り返す事例も報告されている²⁾。

筆者らは、土砂化により撤去された RC 床版（以下、撤去床版）を用いて、その症状と発生要因や影響因子に関する調査を行っている¹⁻⁵⁾。既往の調査結果¹⁻³⁾より、土砂化の周辺部には、土砂化には至っていないが健全な状態でもないコンクリート（以下、中間層）が存在していることを確認している。この中間層では、目視や打音検査では判別できない微細なひび割れが生じていること、版厚方向の静弾性係数の低下や付加ひずみが発生していることが特徴として挙げられる。

補修範囲は、補修費や交通規制の期間に関わるため、可能な限り劣化している範囲や深さのみを補修しようと判断がなされる。中間層が認識されていない状態では、補修の際に中間層が残存する可能性があるため、数年で再劣化して補修を繰り返すことが想定される。このため、土砂化の再劣化を防ぐ 1 つの方法として、この中間層を残さないような除去範囲を設定する必要がある。

中間層の範囲を視覚的に把握するため、これまでは、コンクリートコアを用いた蛍光エポキシ樹脂含浸によるひび割れ観察を行った¹⁾が、観察範囲が断片的であり、床版内部のひび割れ状況を連続的に把握することが難しかった。この課題に対応する方法として、比較的広範囲の床版内部のひび割れ状況を連続的に把握することがで

きる、コンクリート板を用いたひび割れ観察の方法を提示した^{4,5)}。また、床版撤去後に、土砂化した周囲の床版内部のひび割れ状況を正確に記録することは、補修範囲を定めるための基礎データに繋がるだけでなく、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。土砂化の全国的な実態を早期に把握するためには、共通的な調査方法を提案する必要がある。この観点からも、床版撤去後の劣化状況の記録方法として、広く利用できるような方法を提案することは、重要であると考えている。

本稿では、土砂化が確認された 2 橋の撤去床版を用いて、土砂化の周辺部に生じた床版内部のひび割れ状況を詳細に把握するために、コンクリートコアとコンクリート板を採取して、蛍光エポキシ樹脂含浸によるひび割れ観察を行った結果を報告する。加えて、土砂化の周辺部に生じていたひび割れの特徴を整理するとともに、コンクリート板による調査方法の特徴と留意点を述べる。

2. 対象橋梁

調査対象とした 2 橋の撤去床版の概要を以下に示す。対象橋梁では、車輪走行位置ではなく、センターライン付近のアスファルト舗装の打継目に沿って、RC 床版上面にコンクリートの土砂化が生じていた（図-1）。そこで、床版撤去後に土砂化部の断面を観察すると、Ki 橋では多数の骨材に割れが見られたが、Ka 橋ではモルタ



(a)Ki 橋 (b)Ka 橋
図-1 アスファルト舗装の開削後にセンターライン付近で確認された RC 床版上面の土砂化

*1 (国研)土木研究所 先端材料資源研究センター 研究員 (正会員)

*2 研究当時：(国研)土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 総括主任研究員 博(工)(正会員)

*3 (国研)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 博(工)

*4 (国研)土木研究所 先端材料資源研究センター 上席研究員 博(工)(正会員)

ル部のみが脆弱化していた(図-2)。これらのことから、対象橋梁では、土砂化の要因として、輪荷重による影響以外にも、凍結防止剤を含む路面水の浸入による、コンクリートの凍害やアルカリシリカ反応(ASR)等の材料劣化が起因している可能性が想定される。

2.1 Ki 橋²⁾

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。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℃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2013年時点で12,601台/12hであり、大型車混入率は21.8%と比較的多かった。

1999~2000年に行われたアスファルト舗装の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、センターライン付近に打継目が設けられた。抜け落ちが生じたときには、この打継目に沿ってアスファルト舗装に亀甲状のひび割れや浮き、補修跡が多数見られた。加えて、抜け落ちや土砂化が確認された箇所はいずれも舗装の補修跡に近い箇所であった。

2.2 Ka 橋³⁾

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の単純非合成鋼桁橋であり、完成年度は1972年である。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-9.0℃、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2010年時点で10,418台/12hであり、大型車混入率は20.2%と比較的多かった。

2009年の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)と判定された後に実施した調査において、床版上面の土砂化が確認された。土砂化が確認された箇所は、センターライン付近の打継目に沿った箇所のほか、片勾配で排水しやすい側の地覆付近でも確認された。

3. 土砂化の周辺部に生じたひび割れ観察

3.1 観察方法

ひび割れ観察の手順を以下に示す。ひび割れ観察は、試料の採取、試料の乾燥、真空状態下での蛍光エポキシ樹脂の含浸、試料の切断と研磨、紫外線ライト照射下でのひび割れ観察の順で行った。

それぞれの撤去床版について、試料の採取位置を図-3、採取した試料の概要を表-1に示す。試料の採取位置は、床版上面で土砂化や浮きが確認できる位置とそ

の隣接した範囲とした。試料は、φ68mm及びφ100mmのコンクリートコアを計8本、幅約50~80mm×長さ約800mmのコンクリート板を計4枚とした(本稿で示す試料数)。コンクリートコアは、湿式で採取した。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、撤去床版を主鉄筋方向に沿って板状に切断し、採取した。板幅は切断方向と平行の主鉄筋を含まないよう約50~80mmとし、長さは樹脂含浸に使用する真空タンクのサイズに合わせて約800mmとした。

採取した試料は、105℃に設定した乾燥炉にコンクリートコアの場合では1日、コンクリート板の場合では1



図-2 土砂化部直下における床版断面の例

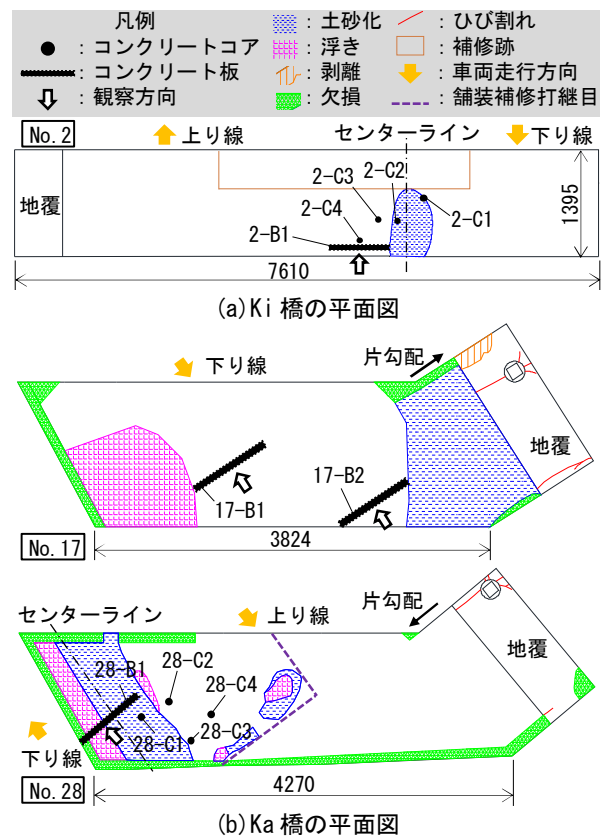


図-3 対象橋梁の形状寸法、試料の採取位置(単位:mm)

表-1 試料の概要

橋梁	試料の種類別	本数	試料名	採取位置
Ki 橋	コア	2本	2-C1, 2-C2	土砂化部
Ki 橋	コア	2本	2-C3, 2-C4	土砂化の周辺部
Ka 橋	コア	1本	28-C1	土砂化部
Ka 橋	コア	3本	28-C2, 28-C3, 28-C4	土砂化の周辺部
Ki 橋	板	1枚	2-B1	土砂化の周辺部
Ka 橋	板	1枚	17-B1	浮きの周辺部
Ka 橋	板	1枚	17-B2	土砂化の周辺部
Ka 橋	板	1枚	28-B1	土砂化部

週間入れて、試料中に含まれる水分を蒸発させた。その後、試料を真空タンク内に入れ、真空状態(-0.1MPaまで減圧)で樹脂を強制的にコンクリート内部へ含浸させ、樹脂が硬化するまで真空状態を保持した。含浸させた樹脂は、既往文献⁶⁾と同様に低粘度エポキシ樹脂を使用し、蛍光剤としてエポキシ樹脂用着色剤を1wt%添加した。

樹脂が硬化した後は、コンクリートカッターを用いて試料を深さ方向に切断し、切断面を研磨して観察面とした。この観察面に紫外線ライトを照射した状態で、蛍光発色するひび割れをデジタル一眼レフカメラにより撮影することで、図-4の紫外線写真を得た。ただし、撮影した紫外線写真は、写真ごとく発色の差があったため、ひび割れをより明確化させる目的でグレースケール化して示した。また、それぞれのひび割れの特徴を分類するため、図-4(b)に示すように、紫外線ライト照射前に視認できたものをひび割れ(図中の黄矢印)、照射後において初めて視認できたものを微細ひび割れ(図中の赤矢印)とした。加えて、コンクリートコアの観察結果では、図-4(c)に示すように、樹脂含浸されていない骨材の割れ(図中の丸印)も表示した。なお、画像上で微細ひび割れの幅を測定した結果、約0.05mm以下であった。

3.2 コンクリートコアの観察結果

コンクリートコア 2-C1~2-C4, 28-C1~28-C4 にお

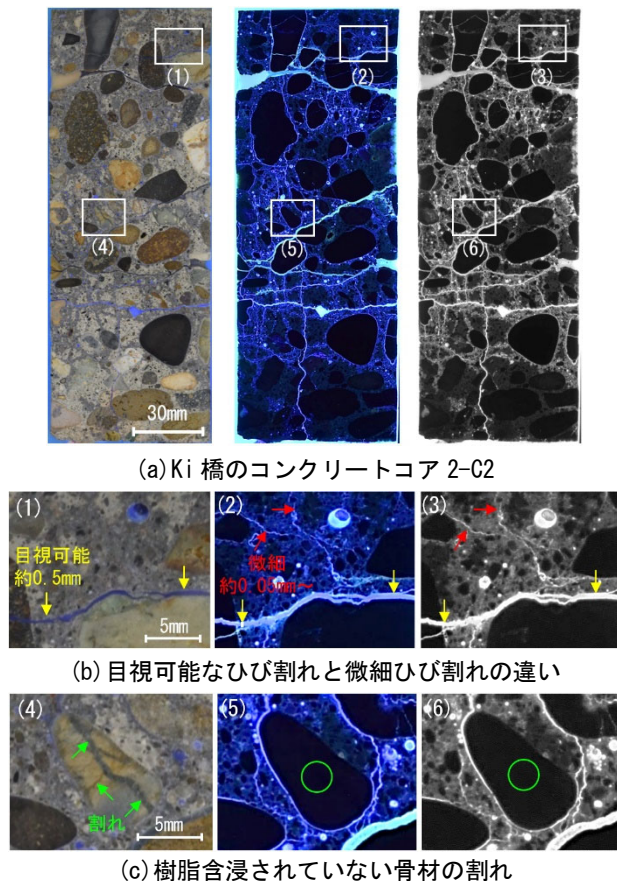


図-4 紫外線ライト照射下で撮影した写真の例(左:照射前, 中央:照射後, 右:グレースケール化)

るひび割れ観察の結果を図-5に示す。図はコンクリートコアの中央を切断した断面図である。また、Ka 橋の28-C2~28-C4については主桁上から採取しているため、床版下面側の位置が28-C1と異なる。なお、コア径については2-C1が100mm, それ以外が68mmである。

(1) Ki 橋のコンクリートコア (2-C1~2-C4)

土砂化部で採取した2-C1及び2-C2において、コンクリートコア全体に無数の微細ひび割れと、多数の骨材に割れが確認できた。ひび割れや微細ひび割れは、水平方向に卓越している傾向があり、主に上縁側で発生していた。骨材で見られた割れは、ひび割れが骨材を貫通している場合と、ひび割れ周辺で骨材のみが割れている場合(樹脂含浸されていない骨材)があった。次に、土砂化の周辺部で採取した2-C3においても、土砂化部と連続していると推測される水平方向のひび割れと、複数の微細ひび割れが確認できた。2-C4では、鉛直方向のひび割れが確認できたが、鉄筋位置との関係は不明であった。

(2) Ka 橋のコンクリートコア (28-C1~28-C4)

土砂化部で採取した28-C1において、浮いている上面側と下側鉄筋付近におけるコンクリートの一部で蛍光発色していることが確認できた。上面側のコンクリートは、前掲図-2で示したように、モルタル部が脆弱化してい

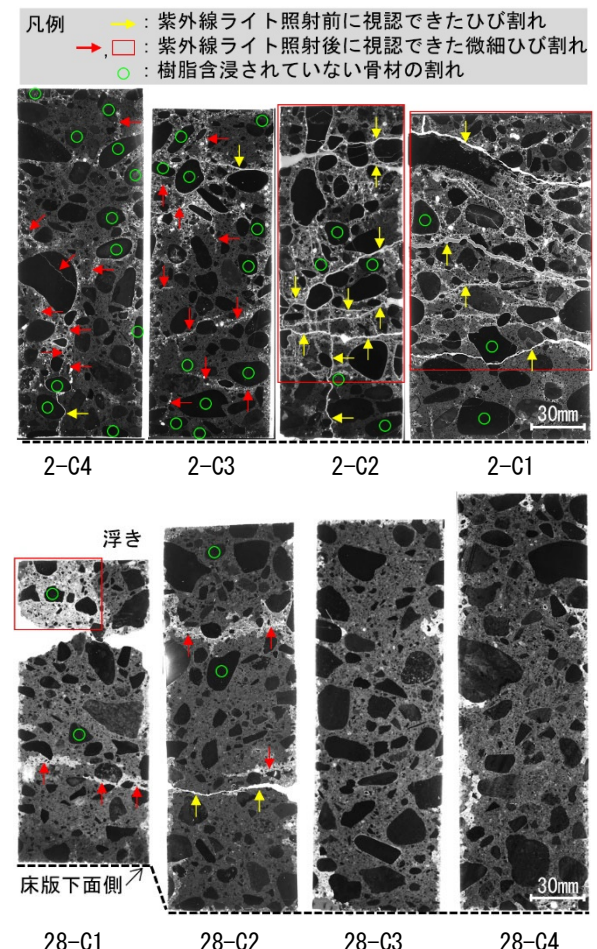


図-5 コンクリートコアの観察結果(上:Ki 橋, 下:Ka 橋)

る箇所において蛍光発色しているものと考えられる。一方で、下側鉄筋付近のコンクリートは、一見ひび割れが生じているようには見えなかったが、発色箇所を拡大するとモルタル部に微細ひび割れが視認できた。加えて、この位置は28-C1の周辺部で採取した28-C2でも概ね同様の位置（ハンチ分の高さを考慮）でひび割れが生じていることから、連続したひび割れであると考えられる。なお、土砂化の周辺部で採取した28-C3及び28-C4では、変状が確認できなかった。

3.3 コンクリート板の観察結果

コンクリート板 2-B1, 17-B1, 17-B2 及び 28-B1 におけるひび割れ観察の結果を図-6 に示す。ここでは、連続した鉛直方向と水平方向のひび割れを鉛直ひび割れと水平ひび割れ、粗骨材寸法程度の間隔で複数の水平ひび割れが発生している状態を層状ひび割れとした。図中では、これらのひび割れを枠線の色で分類し、紫外線ライト照射前と後においてそれぞれ視認できたひび割れ、微細ひび割れの両方を併せて表示した。

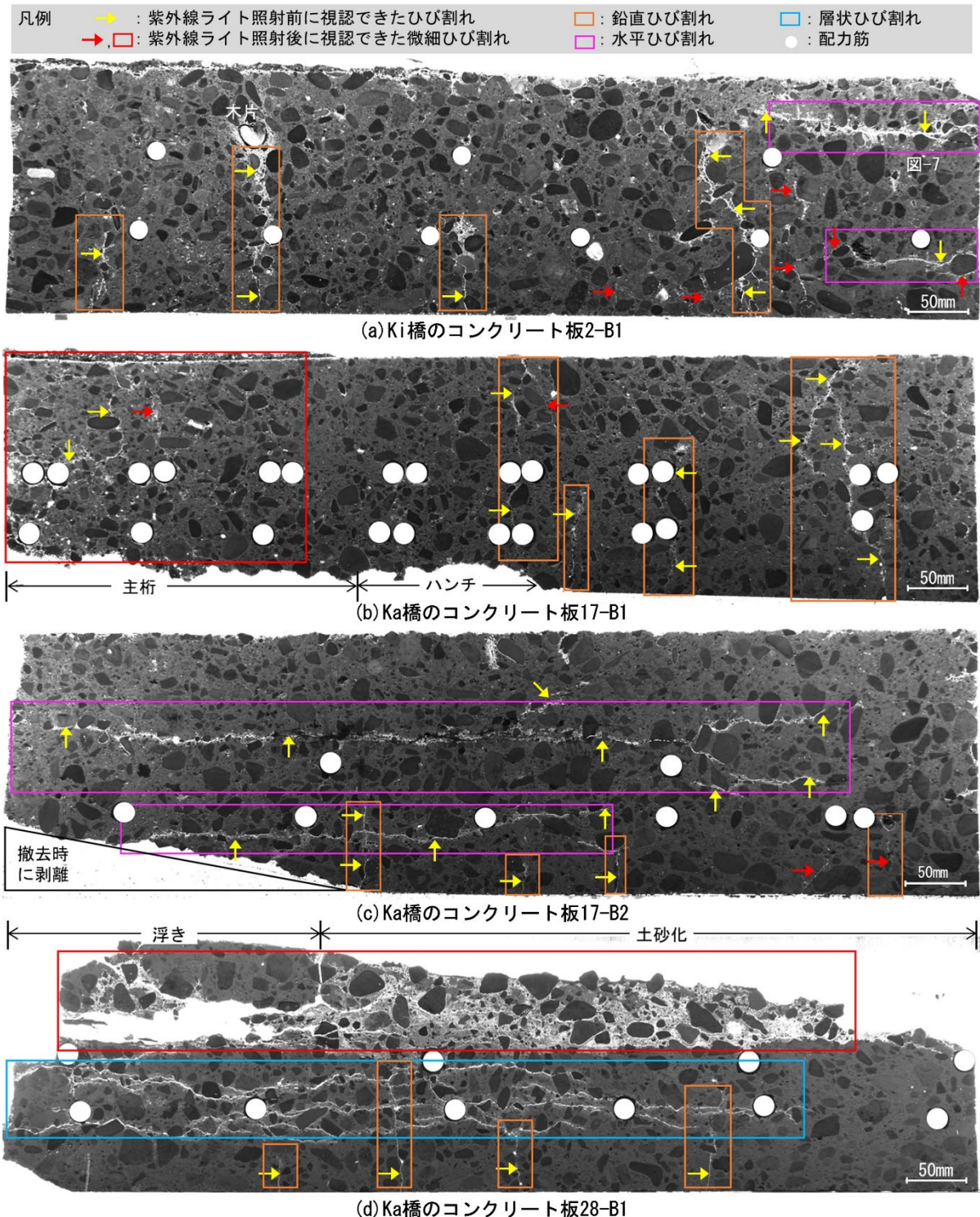


図-6 コンクリート板の観察結果

(1) Ki 橋のコンクリート板 (2-B1)

図-6(a)より、土砂化の周辺部で採取した 2-B1 において、床版下面からの鉛直ひび割れと、土砂化部側に水平ひび割れが確認できた。鉛直ひび割れは、概ね配力筋位置で生じており、紫外線ライト照射前において視認できるひび割れ幅であった。水平ひび割れは、土砂化部で生じているひび割れと連続しており、明らかに土砂化が生じていた範囲から約 150mm まで広がっていた。また、水平ひび割れの発生位置は、概ね上下の主鉄筋位置で生じており、ひび割れ幅が下側と比較して上側の方が明らかに太かった。上側の水平ひび割れを拡大して観察すると、ひび割れ周辺における多数の骨材で割れが見られる特徴があった(図-7)。

(2) Ka 橋のコンクリート板 (17-B1)

図-6(b)より、浮きの周辺部で採取した 17-B1 において、貫通した鉛直ひび割れと、浮き部側で無数の微細ひび割れが確認できた。鉛直ひび割れは、床版断面内を貫通しており、概ね配力筋位置で生じていた。微細ひび割れは、枠内全体に発生しており、ひび割れの方向性に規則性がなかった。加えて、この微細ひび割れは、モルタル部だけに生じており、骨材には割れが見られなかった。

(3) Ka 橋のコンクリート板 (17-B2)

図-6(c)より、土砂化の周辺部で採取した 17-B2 において、床版下面からの鉛直ひび割れと、板全体にわたる水平ひび割れが確認できた。鉛直ひび割れは、配力筋位置とは異なる箇所発生しており、紫外線ライト照射後に初めて視認できた微細ひび割れもあった。また、観察範囲において、水平ひび割れは、土砂化側に生じている水平ひび割れと連続していなかったが、床版切断時の断面を確認したところ、土砂化部で生じていた水平ひび割れと概ね一致した位置であった。

(4) Ka 橋のコンクリート板 (28-B1)

図-6(d)より、土砂化部で採取した 28-B1 において、床版下面からの鉛直ひび割れ、上側配力鉄筋のかぶりコンクリートで無数の微細ひび割れ、上側主鉄筋から下側主鉄筋までの領域で層状ひび割れが確認できた。鉛直ひび割れは、配力筋位置とは異なる箇所発生しているが、紫外線ライト照射前において視認できるひび割れ幅であった。微細ひび割れは、主にモルタル部だけに生じており、周囲のモルタル部のひび割れを伴わない骨材単体での割れは見られなかった。また、層状ひび割れは、土砂化の直下部だけに生じており、28-B1 の隣接位置で採取したコンクリートコア 28-C2 では確認できなかった。

4. 考察

(1) 土砂化の周辺部に生じたひび割れの特徴

観察結果を踏まえて、土砂化の周辺部に生じたひび

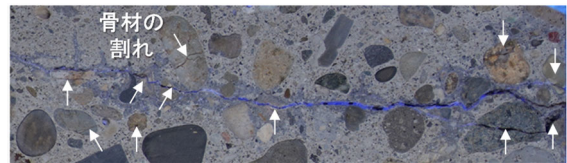


図-7 水平ひび割れ周辺における多数の骨材の割れ

表-2 土砂化の周辺部に見られたひび割れの特徴

採取位置	対象橋梁	特徴
土砂化の直下部	共通	・無数の微細ひび割れが生じていた ・ひび割れが骨材を貫通している場合があった
	Ki 橋	・ひび割れ周辺で多数の骨材のみが割れている場合があった
	Ka 橋	・上側配力鉄筋のかぶりコンクリートでモルタル部だけに微細ひび割れが生じていた ・上側主鉄筋から下側主鉄筋までの領域で層状ひび割れが生じていた
土砂化の隣接部	共通	・土砂化の直下部と連続した水平ひび割れが最大で板全体にわたって生じていた
	Ki 橋	・水平ひび割れ周辺で多数の骨材のみが割れていた
浮きの隣接部	Ka 橋	・浮き部側のモルタル部だけに微細ひび割れが生じていた

割れの特徴を表-2 に整理した。今回の調査では、いずれの試料においても土砂化部とその周辺部のコンクリートには、深さ方向と水平方向ともにひび割れが見られた。土砂化の直下部では、無数の微細ひび割れや上側主鉄筋から下側主鉄筋までの領域で層状ひび割れ、土砂化の隣接部では、土砂化の直下部から連続した水平ひび割れや一部に微細ひび割れが観察された。なお、鉛直ひび割れは施工時の温度応力や乾燥収縮の影響、供用中の輪荷重による影響等の要因が考えられるため、ここでは除いた。

次に、Ki 橋のひび割れの特徴としては、周囲のモルタル部のひび割れを伴わない骨材単体での割れが多数見られたことが挙げられる。この要因として、コンクリートの詳細調査の結果⁵⁾より、凍結融解抵抗が低い粗骨材が含まれていたこと、ASR の反応性骨材が含まれていたことから、骨材の凍結融解や ASR によって割れた可能性が考えられる。また、Ka 橋のひび割れの特徴としては、土砂化の直下部でモルタル部のみが脆弱化していたことが挙げられる。この要因として、モルタル部の凍結融解により脆弱化した可能性が考えられる。ただし、これらの特徴と土砂化の発生原因との関係は必ずしも明確でなく、今後も調査を進めていく予定である。

(2) コンクリート板による調査方法の特徴と留意点

これまでのコンクリートコアによるひび割れ観察では、土砂化周辺部の特徴の一つである水平ひび割れの範囲を特定しにくかった。例えば、コンクリートコア 2-C1~2-C4 と比較してコンクリート板 2-B1 の観察結果の方が、床版内部のひび割れ状況を連続的に把握できるため、明らかに土砂化している範囲から概ね 150mm の位置までは水平ひび割れが連続していることが確認できる。このため、床版撤去後の劣化状況の記録方法として、コ

表-3 コンクリート板による調査方法の特徴と留意点

調査の特徴	水平方向の観察範囲	・ 広範囲を観察できる（本稿では 800mm）
	中間層の範囲	・ 1 試料で確認できる場合が多い ・ 複数試料でさらに広範囲を把握できる
	確認しやすさ、説明しやすさ	・ 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
調査の留意点	試料採取	・ 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である ・ 1 試料のために 2 ラインの切断が必要である
	鉄筋の影響	・ 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 ・ 樹脂含浸を行う前の乾燥工程において、収縮ひび割れをもたらす可能性がある
	炉乾燥、真空引き	・ 大型の乾燥炉、真空タンクが必要である ・ 試料の重さに耐える容器が必要である ・ 樹脂を流し込む間も真空の保持が必要である
	樹脂含浸	・ 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	・ 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である
	撮影	・ 均等に紫外線ライトを当てる必要がある ・ カメラと観察面の角度の調整、ピント合わせなど、カメラの設定に配慮がいる

※コンクリートコアによる調査方法と比較した場合

コンクリート板による調査方法は、コアによる方法と比較して、土砂化やその周辺部に生じたひび割れの特徴を可視化できる点で有効な手段であることを示した。加えて、橋梁ごとに床版内部のひび割れ状況の違いを視覚的に把握できるため、土砂化の原因推定のための調査方法としても有効であると考えられる。前述したように、RC 床版の補修時には、微細ひび割れも含めた水平ひび割れが残らないように補修範囲を設定する必要があるため、撤去の際に劣化状況を記録、蓄積し、その傾向を分析することで先々の補修に活かしていく必要がある。

表-3 に、コンクリート板による調査方法の特徴と留意点を整理して示した。コンクリート板によるひび割れ観察は、コンクリートコアによる場合と比較して、一度に広範囲を観察可能で確認しやすい利点がある。一方で、ひび割れ観察までの準備作業に手間がかかり、作業者に一定のノウハウの蓄積も必要である。特に、紫外線ライトの当て方やカメラの設定によって、撮影される紫外線写真に発色の差があったため、ひび割れの見え方が異なった。このため、コンクリート板の観察に適した紫外線ライト照射下での撮影方法の検討や、紫外線写真から微細ひび割れを定量的に評価する手法の検討が必要である。

5. まとめ

本稿では、土砂化の周辺部に生じた床版内部のひび割れ状況を詳細に把握するため、撤去床版からコンクリートコアやコンクリート板を採取して、蛍光エポキシ樹脂含浸によるひび割れ観察を行った結果を報告した。観察結果から、対象橋梁に限定した範囲で、以下のような結論が得られた。

- (1) 土砂化とその周辺部のコンクリートには、深さ方向と水平方向ともにひび割れが見られた。土砂化の直下部では、無数の微細ひび割れや上側主鉄筋から下側主鉄筋までの領域で層状ひび割れ、土砂化の隣接部では、土砂化の直下部から連続した水平ひび割れや一部に微細ひび割れが観察された。
- (2) 床版撤去後の劣化状況の記録方法として、コンクリート板による調査方法は、広範囲の床版内部のひび割れ状況を連続的に観察できるため、土砂化やその周辺部に生じたひび割れの特徴を可視化できる点で有効な手段であることを示した。加えて、橋梁ごとに床版内部のひび割れ状況の違いを視覚的に把握できるため、土砂化の原因推定のための調査方法としても有効である可能性を示した。

謝辞

撤去床版の提供をはじめ、本調査にご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 国土交通省、(国研)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，https://thesis.pwri.go.jp/files/doken_shiryuu_4398_00.pdf（閲覧日：2023 年 12 月）
- 2) 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.
- 3) 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，コンクリート建造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol. 19，pp. 531-536，2019.
- 4) 岩谷祐太，田中良樹，小沢拓弥，夏堀格，石田雅博，古賀裕久：コンクリート板による RC 床版の土砂化中間層に生じた微細ひび割れ観察の有効性の検証，第 78 回土木学会年次学術講演会概要集，V-89，2023.
- 5) (国研)土木研究所：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－，土木研究所資料，第 4442 号，<https://thesis.pwri.go.jp/files/204208178664b9d3689be2d.pdf>（閲覧日：2023 年 12 月）
- 6) 渡邊晋也，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.