

報告 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

田中 良樹*1・玉越 隆史*2・村井 啓太*3・藤本 圭太郎*4

要旨：舗装打継目付近でコンクリートの土砂化が見られた道路橋床版からコアを採取して、位置や深さごとの静弾性係数等の物性や塩分含有量の測定を行った。その結果、土砂化部周辺には、深さ方向にも水平方向にも、土砂化と健全の中間的な物性のコンクリート、すなわち土砂化の中間層が存在していたことがわかった。土砂化の中間層の特徴として、静弾性係数の低下や圧縮载荷初期の付加ひずみの発生が見られた。付加ひずみは、コアで目視可能な水平ひび割れが見られる場合に顕著に認められ、目視可能なひび割れがない場合でも発生する事例があった。また、塩分含有量が多い部位ほど、付加ひずみが大きい傾向が見られた。

キーワード：静弾性係数、付加ひずみ、塩化物、超音波伝播速度、含水率

1. はじめに

道路橋の鉄筋コンクリート床版（以下、床版）の主たる損傷形態は疲労であったが、1990年代のスパイクタイヤの使用禁止以降、一般道でも凍結防止剤の使用が増加して、それに由来する塩害事例も報告されている^{1),2)}。近年は、疲労や鉄筋腐食だけでなく、床版コンクリートに多数の水平ひび割れが生じる事例や、アスファルト舗装（以下、As 舗装）下で床版上面コンクリートの土砂化が生じる事例が報告されるようになり、道路橋の床版の損傷形態が多様化している^{1),4)}。

床版上面のコンクリートの土砂化とは、As 舗装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いる状態をいう。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既に崩れて粒の状態である。土砂化の発生位置は、橋面のほぼ全面に見られる場合やAs 舗装の打継目付近に見られる場合もあり、車輪走行位置直下に限らない。このことから、疲労以外にも土砂化の要因があると考えられる。これまでの事例では、路上からAs 舗装の打継目等を通じて侵入した土粒子と混在して、まさに土砂の状態になっていた事例もあれば、As 舗装を剥いだだけでは一見普通の硬化コンクリートのように見えても、ハンマー等を用いて手で簡単に鉄筋の下まで掘れるような状態になっていた事例もある²⁾。また、土砂化の中には、粗骨材の多くに割れが生じている場合と、粗骨材の割れがほとんど見られない場合がある。路面から水の浸入、特に塩水の浸入により、コンクリートの凍害やアルカリシリカ反応（ASR）、あるいはそれらの複合的な劣化が生じることが想定され、土砂化の原因として疑われる。しかし、土砂化の症状、劣化原因、損傷過程のいずれもまだ解明されていない部分が多い。

As 舗装下でコンクリートが土砂化すると、As 舗装の

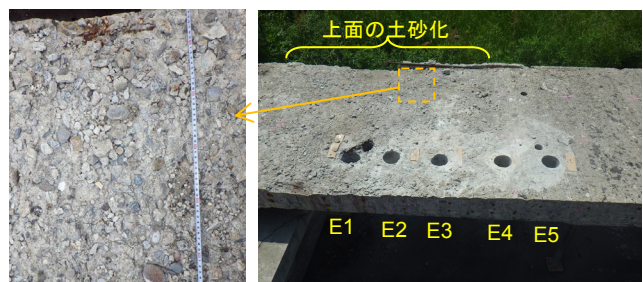


図-1 供試体 No.1 の土砂化の事例

損傷を招き（As 舗装の劣化が先行する場合もあり得る）、走行性、通行の安全性を妨げる恐れがあるとともに、As 舗装のひび割れからさらに路面水を床版上面に引き込んで土砂化の範囲を拡げることとなる。土砂化の範囲が輪荷重走行位置に進展すれば、水により加速する疲労と組み合わせると床版の抜け落ちを引き起こす可能性が高くなると考えられる。

土砂化が見られた床版は、一般に床版上面から土砂化した部位を除去して補修用のコンクリートで埋め戻される。しかし、数年で再劣化して、橋面の補修を繰り返すことが報告されている^{4),5)}。これに対して、補修の材料や工法の見直しが試されているが、材料、工法以外の原因として、劣化部位の除去が必ずしも適切に行われていないことも想定しておく必要がある。

土砂化した部分の周囲には、土砂化に至っていないが健全な状態でもない中間的な部分（中間層）が存在することが想定される。しかし、中間層が認識されていない状態では、補修の際に除去されずに残存する可能性がある。中間層が残存する場合、その後の補修効果が十分に得られなかったり、As 舗装の早期劣化をもたらしたりすることが懸念される。土砂化の予防保全として床版防水が一層重要であることから、適切な橋面舗装、適切な補修方法の確立に

*1 (国研)土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 主任研究員 (正会員)

*2 (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 博士(工学)

*3 (国研)土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 研究員 工修

*4 (国研)土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 交流研究員 工修

向けた課題の一つとして、土砂化の中間層を意識して、劣化部位の適切な除去範囲を設定する必要がある。

35年間供用された道路橋において、As舗装の打継目からの水の吹き出しや床版の抜け落ちが生じ、その際の詳細調査で、ASRの兆候や土砂化など、床版の劣化が概ねAs舗装の打継目に沿って広範囲に見られたことから、全床版の取り換えが行われた³⁾。その際に、劣化程度が異なる3体の切り出された床版パネルを入手した。これらの撤去床版を用いて、土砂化の中間層の存在を確認するとともに、その特徴を表す指標を検討するため、土砂化した箇所と比較的健康な箇所からコアを採取して、採取箇所、深さに応じたコンクリートの物性の違いを調査した。

2. 撤去床版の概要³⁾

対象の床版は、1978年に竣工した2連の非合成連続鋼箱桁橋の床版であり、2013年の床版全面取り換えに至るまで35年間供用された。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た。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(図-1)、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。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。

2008年の定期点検時に、これらの箇所を含めて、床版下面に目立った損傷は見られなかった。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。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わかった。

床版取り換えの際に、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。撤去床版のコンクリートは、一部の補修跡を除き、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。

3. 方法

3.1 コア採取

図-2に、供試体の外観とコア採取位置を示す。図中、舗装打継目のあったセンターラインの位置と、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。

採取するコアは、圧縮強度試験用にφ70mmのコア3

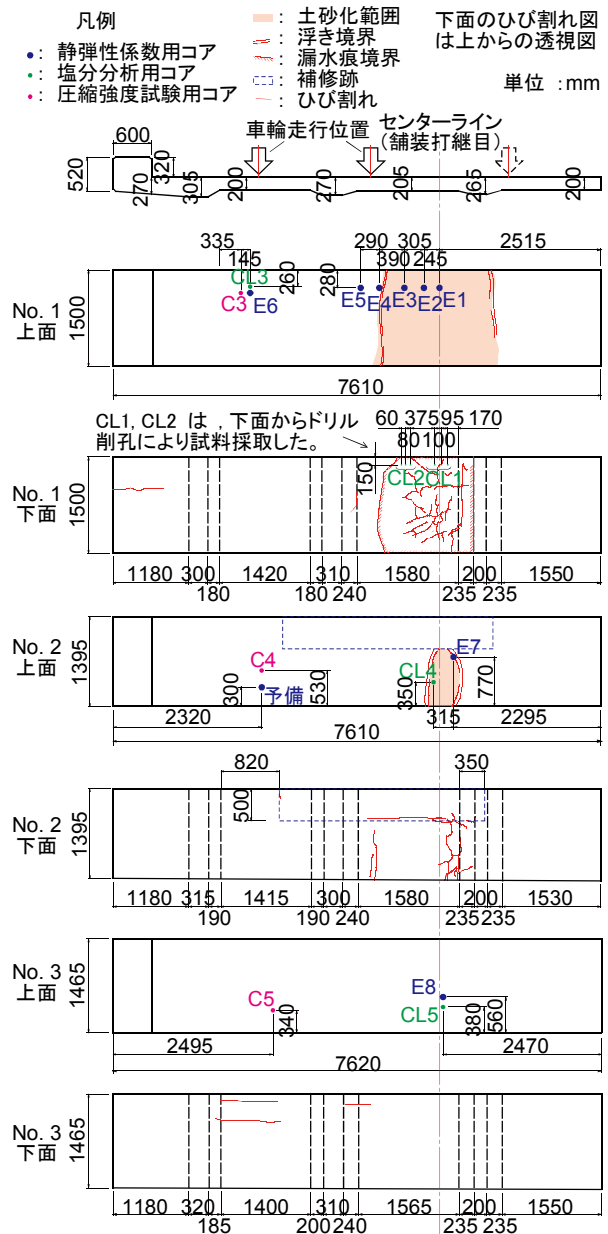


図-2 供試体の形状寸法、外観とコア削孔位置

本、静弾性係数等、深さ方向の物性変化調査用にφ100mmのコア8本、塩分含有量測定用にφ70mmのコア3本、治具等に用いるφ100mmの予備のコア1本とした。コアC3～C5は、鉄筋を含まないように貫通コアを湿式で採取した。C3～C5は、採取直後に、JISA1152により、上縁、下縁の中性化深さの測定を行った。コアE1～E8は湿式で採取した。E1～E8は、超音波伝播速度の測定も行うため、直径100mmのコアとしたが、鉄筋を完全に避けて抜くことが難しい状況であった。φ100mm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。E1～E8のコア採取前に、削孔位置における床版上面の反発度をJSCG-504により測定した。コアCL3～CL5は乾式で削孔した。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 (CL1, CL2)。

3.2 測定

(1) 圧縮強度試験 (C3~C5)

上下端を切断して $\phi 70\text{mm} \times 140\text{mm}$ の圧縮強度試験用コアとした。圧縮強度試験前にコアをイオン交換水に 7 日間浸漬した。圧縮強度試験は JIS A1108, 同 A1149 に準じて行い, 各コアの圧縮強度, 静弾性係数 (60mm のひずみゲージによる), ポアソン比を測定した。

(2) 深さごとの物性測定 (E1~E8)

土砂化周辺のコンクリートの劣化程度は, 深さ方向にも変化していることが想定されることから, コア E1~E8 を用いて, コンクリートの含水率, 超音波伝播速度, 静弾性係数 (測定順) をそれぞれ深さごとに測定した。

深さごとの含水率及び超音波伝播速度は, いずれもコアの側面で, コアをはさんだ両面から端子, 探触子を当てて測定した。深さ方向に 20mm 間隔で測定するとともに, 測定位置を 90° ずらして同様に測定を行った (各 2 回繰り返し)。端子, 探触子を当てる位置にひび割れや鉄筋がある場合は, それらに直接接触しないように測定位置を少しずらした。

1) 深さごとの含水率測定

コンクリート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。測定前にイオン交換水に 1 週間浸漬した状態で, 電気抵抗の指標と考えられるカウント値を読み取った。表面の水分を布で拭き取った後, 数分間は値の変化が急であったことから, 拭き取りから 3 分間空中に放置した後, 測定を行った。測定対象とするコンクリートの電気抵抗と含水率の関係を別途確認しておき, カウント値から含水率に換算した。

2) 深さごとの超音波伝播速度測定

超音波伝播速度の測定においても, 含水状態の影響を受けることから, 床版内での相対比較のためすべて飽水状態にして測定した。超音波伝播速度は, 超音波測定器 (T 社, ESI-10), $\phi 20\text{mm}$, 28kHz の探触子及びグリズを用いて, 透過法により測定した。

3) 深さごとの静弾性係数測定

土砂化周辺のコンクリートは, ひび割れが著しく, 一般のひずみゲージを用いた静弾性係数の測定ができない場合があると想定される。このことから, 深さごとの静弾性係数を測定するため, 図-3 のように, 各コアの側面に, 高さ方向に 20mm 間隔で変位計 (T 社, CE-2) とコマを設置して, 圧縮荷重を行い, 各高さでの荷重方向変位を測定することとした。コマは, ひずみゲージ用の瞬間接着剤で接着した。

載荷荷重は, コア C3~C5 で測定した圧縮強度から推定される最大荷重の約 1/3 として, 負荷と除荷を 3 回繰

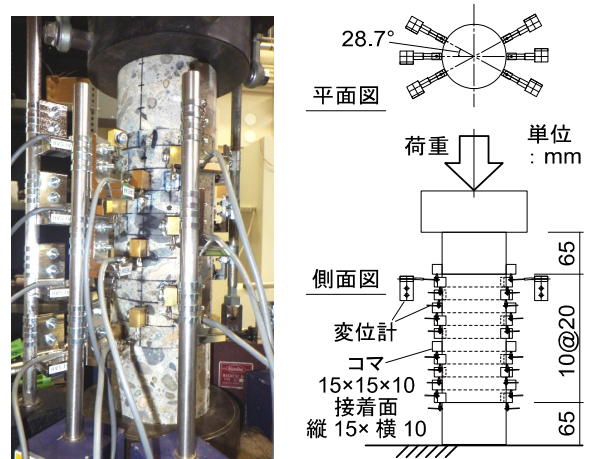


図-3 深さごとの静弾性係数の測定状況と測定方法

表-1 圧縮強度試験結果及び中性化深さ

供試体番号, コア番号	No.1, C3	No.2, C4	No.3, C5
見掛け密度 (g/cm^3)	2.26	2.22	2.28
最大荷重(kN)	151	94.7	174
圧縮強度 (N/mm^2)	35.8	22.4	40.8
静弾性係数 ($\times 10^3 \text{N}/\text{mm}^2$)	20.7	19.3	22.5
ポアソン比	0.17	0.26	0.13
中性化深さ(mm)	7.0	0.0	0.0

注 1) 中性化深さは上縁の値。下縁はすべて 0.0mm。

注 2) コア C3 は, 水中浸漬中に軽微なポップアウトが生じた。

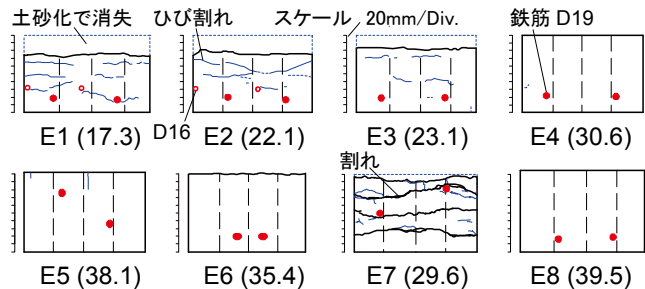


図-4 コア側面の状況 (括弧内はコア削孔前の反発度)

返し行った。上下の圧盤とコアの間に, 予備のコアから切り出した $\phi 100\text{mm} \times 65\text{mm}$ のコンクリートコア (治具用コア) をそれぞれ配置した。コアの端面はできるだけ平坦に研磨しておき, 部分的な断面欠損部は W/C30% 程度のセメントペーストでキャッピングした。治具用コアとの接触面には接着剤や緩衝材は配置しなかった。載荷中の荷重, 変位は動ひずみ測定装置を用いて 5Hz で連続的に測定した。測定した変位データは, 同じ高さの 2 点の値を平均した上で, 高さ 60mm の範囲の平均ひずみに換算した。これを 20mm ずつ高さ方向にずらして, 深さ方向の静弾性係数の分布を求めた。なお, 最上端のコマを治具用のコアに設置したため, 治具と測定用コアの間のわずかな隙間の変位を含めて測定していた。

(3) 塩化物イオン濃度分布測定 (CL3~CL5)

コア上縁から深さ方向に 20mm 間隔で切断して, 各高さの試料とした。コンクリート中の塩化物イオン濃度 (全塩分) は JIS A 1154 に従って測定した。ドリル削孔の試料 CL1, CL2 も塩分分析は同様に行った。

4. 結果

4.1 コンクリートの基本性状

表-1 に、圧縮強度試験結果を示す。供試体 No.1~3 の圧縮強度がそれぞれ異なっていた。

4.2 コアの観察

図-4に、E1~E8のコア側面に見られたひび割れと鉄筋の位置を示す。土砂化境界部のE4を除き土砂化した箇所から採取したコアには、いずれも複数の水平ひび割れが見られた。舗装打継目に近いE1, E7で水平ひび割れがより多く見られた。また、いずれも上方にひび割れが多い傾向が見られた。ひび割れは、鉄筋位置でも見られたが、鉄筋に関係がないと思われる深さでも見られた。粗骨材の割れが多く見られ、ひび割れに沿った粗骨材の割れも見られた。床版上面のたたきによる調査では、土砂化した範囲のほとんどでコンクリートの浮きが確認されたが、土砂化の境界付近から採取したコア E4 に水平ひび割れは見られなかった。なお、E7は、試料採取時に水平ひび割れで分断されていたので、エポキシ樹脂系パテでコアの形に整形した。樹脂の影響は必ずしも明確ではないが、本文では参考値として結果を示す。また、E5は、上端部に曲げひび割れが見られるとともに、曲げ上げ部のものと思われる鉄筋が斜めに入っていた。

4.3 深さごとのコンクリートの性状

図-5に、比較的健全なコアE8の応力-ひずみ関係(3回目の载荷)を示す。比較のため、E8と同じ供試体No.3から採取した圧縮強度試験用コアC5の結果も示す。E8のデータは、C5のひずみ測定位置と概ね同じ位置である深さ60~120mm間の平均ひずみを示す。一般的なコンプレッションメータと同様に、この調査で使用した変位計による60mm間の平均ひずみの測定は、ひずみゲージによる測定と同様の結果が得られると考えられる。

図-5にはまた、コアE1(3回目の载荷)を例に劣化が見られたコアの応力-ひずみ関係を示した。コアE1~E8の結果より、概ね劣化の程度に応じて、载荷初期に大きいひずみが発生すること、载荷荷重の1/2程度以上は概ね直線に近い応力-ひずみ関係が見られること、繰返し载荷では2回目以降、概ね同じ応力-ひずみ関係が得られることがわかった。本文では暫定的に、これらの特長を表す指標として、図-5のように、3回目の载荷時における载荷荷重の50~100%の範囲の応力-ひずみデータの相関式を求め、本文ではその傾きを深さごとの静弾性係数 E'_c とする。また、载荷初期の大きいひずみについては、比較的健全なコアで見られないことから劣化によるものと考えられ、ここでは便宜的に相関式と横軸との交点におけるひずみを付加ひずみ ϵ'_c とした。

図-6に、コアE1~E8の深さごとの E'_c 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るもの

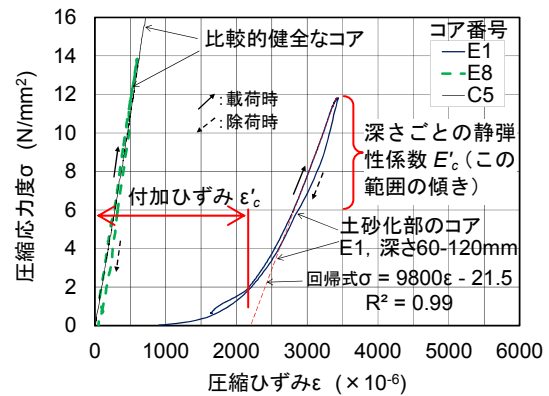


図-5 比較的健全なコア E8, C5 及び土砂化部から採取したコア E1 の応力-ひずみ関係の例

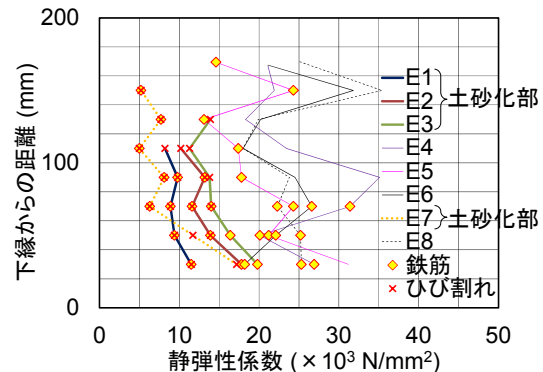


図-6 深さごとの静弾性係数 E'_c

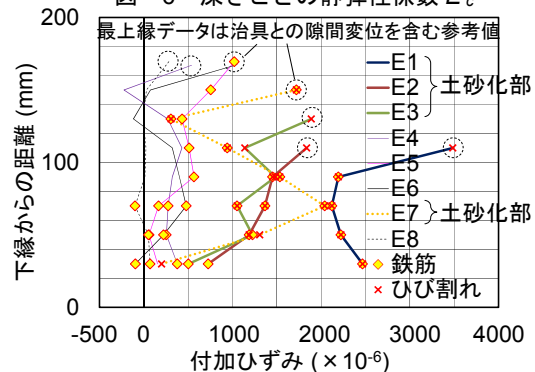


図-7 深さごとの付加ひずみ ϵ'_c

は、それぞれ記号で示した。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⁹⁾、図-6の結果では、明確な鉄筋の影響は見られなかった。比較的健全なコアは、変位の値が小さいため、 E'_c のばらつきが大きくなる傾向が見られた。これらの点を踏まえた上で、図-6より、次の傾向が見られた。

- 土砂化部から採取したコアは全体に E'_c が小さい。
- 比較的健全なコア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E5の上部付近の E'_c が他のコアに比べて小さい傾向が見られた。

同様に、図-7に、コアE1~E8の深さごとの付加ひずみを示す。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E1~E3及びE7は、いずれも付加ひ

ずみ ϵ'_c が大きい。 ϵ'_c 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 E5 は、土砂化部から採取したものではなく、目視可能なひび割れが見られたわけでもないが、コアの上縁付近で付加ひずみがやや大きい傾向が見られた。

図-8 に、深さごとの E'_c と付加ひずみ ϵ'_c の関係を示す。両者の間にある程度の相関性が見られるが、比較的健全なコアの E'_c のばらつきが大きく、 ϵ'_c に比べて判定のしきい値の設定が難しい傾向にあると考えられる。

図-9 に、深さごとの超音波伝播速度の測定結果を示す。全体に、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。

図-10 に、深さごとの含水率の測定結果を示す。この床版コンクリートの場合、概ね含水率 6%を境に、土砂化部から採取したコアの含水率はそれより高い範囲が広く見られ、比較的健全なコアの含水率はそれより低い傾向が見られた。コア E7 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。

4.4 コンクリート中の塩化物イオン濃度

図-11 に、コンクリート中の塩化物イオン濃度の測定結果を示す。As 舗装の打継目から離れて、比較的健全な箇所から採取した CL3 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ず、初期の塩化物イオン濃度に近い値を示すものと考えられる。一方、土砂化が見られた箇所から採取した CL4 は、上縁からの多量の塩分浸透が認められた。供試体 No.1 (CL1)、同 No.2 (CL4) とともに、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見られた。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コア CL5 でも、浸透の程度は土砂化部から採取した CL4 に比べて軽微であるが、上縁からの塩分浸透が認められた。

5. 土砂化の中間層に関する考察

5.1 対象床版の土砂化部周辺のコングリートの物性

上面で土砂化が見られた範囲のほとんどでコンクリートの浮きが認められ、採取したコアを確認したところ、土砂化の下方のコンクリートに複数の水平ひび割れが見られた。また、土砂化部から少し離れたコア E5 のように、コア側面で目視可能なひび割れがない場合でも、上縁付近で付加ひずみがやや大きくなるなど、比較的健全なコアと異なる性状を示す場合があった。これらのことから、対象床版の土砂化部の周囲には、深さ方向にも、平面的に広がる方向にも、土砂化と健全な中間的な物性

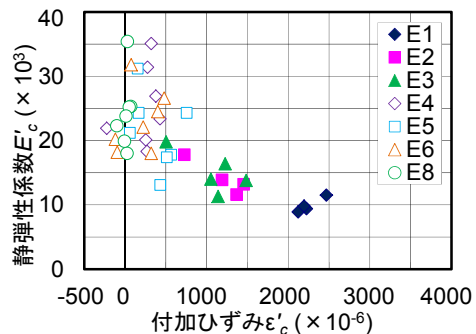


図-8 深さごとの静弾性係数 E'_c と付加ひずみ ϵ'_c の関係

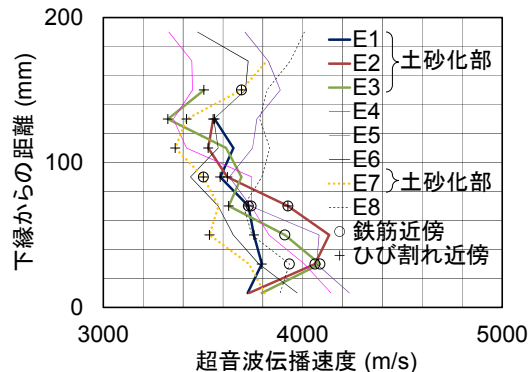


図-9 深さごとの超音波伝播速度の測定結果

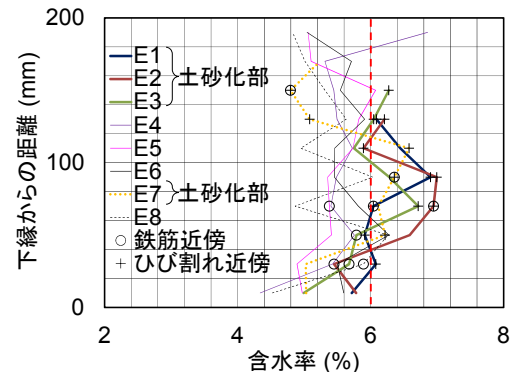


図-10 深さごとの含水率の測定結果

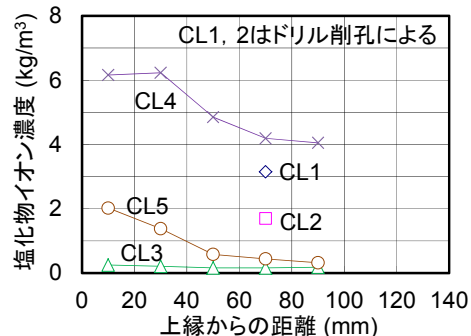


図-11 コンクリート中の塩化物イオン濃度の測定結果

となっているコンクリートが存在すると思われる。なお、水平ひび割れがある場合は付加ひずみが顕著であったが、水平ひび割れが目視で確認できない場合であっても付加ひずみが見られたのは、コンクリート中に微細ひび割れが発生していることによると推察される。

付加ひずみが生じる状態では、As 舗装を支持する機能が低下するとともに、補修用コンクリートとの一体的な挙動が得られ難くなると推察される。コア E5 のよう

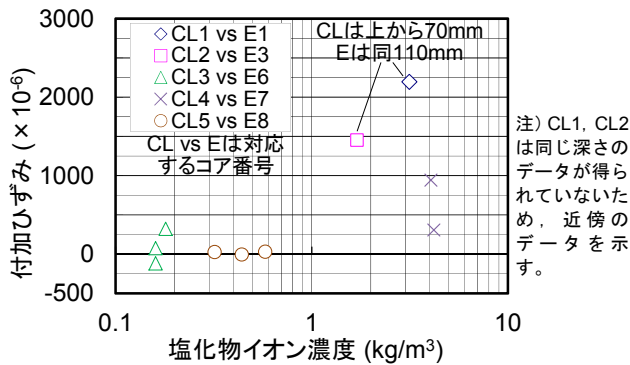


図-12 塩化物イオン濃度と付加ひずみの関係

な比較的軽微な劣化の兆候を判別するためには、付加ひずみ ϵ'_c の測定など何らかの測定が必要である。参考として、この床版の場合、劣化の兆候が見られたのは、付加ひずみ ϵ'_c が 500×10^{-6} 以上の場合であった（図-8）。なお、図-4 に記したように、E5 上縁の反発度は比較的健全なコアと同等であり、反発度では E5 の変化を判別できなかった。

図-12 に、直近のコア同士のデータを用いて、塩化物イオン濃度と付加ひずみの関係を示す。データはまだ限られているが、コンクリート中の塩化物イオン濃度が高い部位ほど、付加ひずみ ϵ'_c が大きい傾向が見られた。塩化物イオン濃度が高いほどコンクリートの飽水度が高くなり⁷⁾、ASR、凍害ともに発生の可能性が高くなると考えられることから、土砂化や土砂化の中間層の形成に塩化物イオンの浸入が影響している可能性があると考えられる。

5.2 土砂化の中間層の進展過程の推定

供試体 No.2 の土砂化の範囲が同 No.1 に比べて小さかったが、同 No.2 の水平ひび割れの発生位置は同 No.1 と同等の深さに至っていた。このことから、対象とした床版の事例では、深さ方向の劣化の進展の方が、平面方向の拡がりよりも速い傾向にあったと考えられる。土砂化した部分の底には路面からの塩水が滞水して、その下のコンクリートが長期に湿潤状態に置かれることが想定される。また、大気中に比べて、塩水が滞水する箇所での塩分浸透は著しく速い傾向にある⁸⁾。一旦土砂化が発生した後は、床版の深さ方向に劣化が加速的に進展すると推察される。

土砂化部周辺のコンクリートは、その程度に応じて水平ひび割れが多くなる傾向が見られた。凍結融解や ASR により粗骨材に割れが生じて水平ひび割れが生じる場合、起点となる粗骨材位置だけでなく、まだ健全な部位にもひび割れは進展すると考えられる。水平ひび割れに塩水が浸入すると、表面張力によってひび割れの端部付近まで塩水が早期に拡がり、塩分浸透範囲が平面的に拡がる要因の一つになると推察される。

6. まとめ

対象床版に限定した範囲で、次の結果が得られた。

- 1) 対象床版の土砂化部周辺には、深さ方向にも、平面的に拡がる方向にも、土砂化と健全の中間的な物性のコンクリート、すなわち土砂化の中間層が存在していたと考えられる。土砂化の中間層の特徴として、静弾性係数の低下や圧縮載荷初期の付加ひずみの発生があげられる。
- 2) 付加ひずみは、コア側面で目視可能な水平ひび割れが見られる場合に顕著に認められた。ただし、目視ではひび割れが分からない場合でも付加ひずみが発生する事例があった。
- 3) コンクリート中の塩化物イオン濃度が高い部位で、付加ひずみが大きくなる傾向が見られた。

本調査で、目視だけでは判別しにくい土砂化の中間層が存在し得ることがわかったことから、今後、多様な土砂化の調査事例を拡充するとともに、As 舗装上からの調査方法の開発、実用化といった課題に取り組み、補修時の除去範囲を判定する方法を検討する必要がある。

謝辞

国土交通省東北地方整備局の方々をはじめ、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) 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
- 2) 村越潤，田中良樹：道路橋鉄筋コンクリート床版の劣化形態の多様化と防水対策，土木施工，55-6，pp.68-71，2014.6
- 3) 赤平勝也，佐々木博臣，菊地享：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
- 4) 藤原英之：道路橋コンクリート床版の「土砂化」に関する調査報告，JBEC レポート，10，pp.11-17，2014
- 5) 例えば，和田吉憲，松本政徳，渡邊晋也：床版上面の断面修復に浸透性接着剤を用いた場合の疲労耐久性向上に関する検討，第 8 回道路橋床版シンポジウム論文報告集，土木学会，pp.81-86，2014.10
- 6) 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，28-1，pp.479-484，2006
- 7) MacInnis, C. and Whiting, J. D. : The frost resistance of concrete subjected to a deicing agent, *Cement and Concrete Research*, Vol. 9, pp. 325-336, 1979
- 8) 田中良樹，藤田学，河野広隆，渡辺博志：高強度コンクリートの塩分浸透抵抗性，コンクリート工学年次論文集，23-2，pp.517-522，2001.7