

セメントコンクリート舗装の三次元損傷診断

Diagnosis of three dimensional damage for pavement of cement concrete

○森吉 昭博

AKIHIRO MORIYOSHI (moriyoshi@cap.ocn.ne.jp)

マテリアルサイエンス ラボラトリー

Material Science Laboratory

亀川 正之

MASAYUKI KAMEGAWA (kamegawa@shimadzu.co.jp)

株式会社島津製作所 分析計測事業部 NDI ビジネスユニット

Shimadzu Corporation

滝 克彦

高塩 創

千 容星

KATSUHIKO TAKI

HAJIME TAKASHIO

YONGSUNG CHEON

(taki@nvs.co.jp)

(takashio@nvs.co.jp)

(cheon@nvs.co.jp)

日本ビジュアルサイエンス株式会社

Nihon Visual Science, Inc.

概要

本研究では施工後1年を経過し、寒冷地で融雪剤が多用され、供用されているコンクリート舗装(30cm)の内部の様々な損傷形態をマイクロフォーカスX線CTスキャナーと三次元画像解析ソフトウェアを用いて解析した。従来法では不可能とされてきた材料内部の亀裂をカラーで三次元表示することで、コンクリート内部の砂利化やポップアウト現象を診断する方法についても提案する。CTを利用すると、コンクリート構造物の寿命予測、ライフサイクルコスト(LCC)の推定や補修深さを高度に求めることが可能である。

キーワード:コンクリート、割れ、損傷評価、コンピュータ断層撮影(CT)、融雪剤、陰イオン界面活性剤、土木構造物

1. 緒言

コンクリートの砂利化現象(写真-1,2)が生じると、鉄筋の回りでコンクリートが溶出し、空洞化することが日米欧で知られている。このため、橋梁等の安全性が問題となるが、原因が明確でないため、補修では様々な手法を模索しているのが現状である。1985年以降、世界中でこの現象が急激に増加しているため、この現象はコンクリート構造物の維持管理上、重要な課題のひとつとなっている。写真-3に砂利化したコンクリート橋の上部に舗設されていたアスファルト舗装(厚さ10cm)の表面の状態を示す。

コンクリート構造物の寿命はコンクリート表面の観察によって診断され、内部の品質については種々の方法を用いて推定しているに過ぎないため、本研究では土木材料の内部構造をマイクロフォーカスX線CTスキャナーを用いて三次元的に解析する手法を検討し、これらの問題について考察した。



写真-1 砂利化した床版



写真-2 裏側の黒い染み



写真-3 亀裂と白い物質

2. コンクリートの内部損傷の評価方法

コンクリート舗装から車両走行の方向を考慮し、矩形に切り取った大きな試料(幅:2.5cm,長さ,厚さ:各30cm)から、さらに試料片(No.0~No.8の深さ毎の合計9本、図-1でNo.4,6,7は未撮影:2.5×2.5×8cm)を小さく切り出し、島津製作所製マイクロフォーカスX線CTスキャナー inspeXio SMX-225CTで、それぞれを撮像した。この結果、16bit グレースケール, 512×512pixels×1440枚, 画素サイズ 0.06×0.06×0.06mmの断層画像が出力された。三次元画像解析ソフトウェア(ExFact Analysis 2.0 for Porous/Particles, Nihon Visual Science, Inc.)を用いて、このデータから試料内部の亀裂を検出した。

これは3DMA(Medial Axis)と呼ばれる画像解析手法を用いて、二値化した三次元画像を細線化することで、骨材粒子や空隙、亀裂の複雑なネットワーク構造を抽象化された三次元モデルとして可視化し、さらに亀裂の太さをレインボーカラーで表現している。この試料寸法(2.5×2.5×8cm)と撮像条件においては、分解能の限界から4画素(0.24mm)相当の亀裂幅を安定的に検出することができた。CTの撮像時間は1試料で3分程度、画像解析時間は30分程度であった。

以上の方法により、亀裂の幅、位置、形状、分布等を定量化し、かつその構造を三次元的に自由に観察することで、コンクリート舗装の内部の種々の損傷を理解し、損傷の種類やその程度を画像等から特定することができる。

3. コンクリートの損傷と呼吸作用

木材が呼吸することは知られているが、コンクリートも呼吸し、コンクリートは空気中および表面の有害な有機物を吸収、排出することで短期間に劣化することが筆者等により見出されている。この呼吸作用は空気中のオングストローム単位の大きさの有害物質を含む湿気(融雪剤を含む)を介するため、防水層と言われている厚さ10cmのアスファルト層も簡単に浸透して、コンクリート床版まで達する。ここでは温度が相対的に低いため、湿気が結露して、有害有機物がアスファルト舗装を溶解し、コンクリート床版中のモルタルと急激な化学反応して、脱カルシウムを引き起こし、セメント中のカルシウム成分が溶出することが実験室および現場でも確認されている。すなわち、コンクリートの砂利化現象はセメント成分の一部がカルシウム塩となる脱カルシウム化といえる。ここでセメントのカルシウム塩には水溶性カルシウムと難溶性カルシウムの2種類が存在する。このうち水溶性カルシウムは外部に溶出するため、骨材とモルタル部との界面に空隙が発生する。一方、アスファルト舗装の表面の白い物質(写真-3参照)は黒いアスファルト分が陰イオン系界面活性剤で溶出し(写真-2,3)、内部の石粉が析出したと考えられるが、このような現象は亀裂の多いコンクリート床版の橋でよく見られる。なお、鉄筋の回りの空洞化はコンクリート中に浸透した有害物質を含む湿気が、冷えた鉄筋の回りで結露し、コンクリートが溶出したためと考えられる。

4. 現場採取のコンクリート舗装の現状

コンクリート舗装(厚さ:30cm)は施工後1年経過したものを使用した。寒冷地で融雪剤(エチレングリコール系)を冬季に多量に表面に散布すると、4~5時間後に4~5万個の骨材が舗装の表面からポップアウトし、かつ舗装表面には縦亀裂が1本発生していた。舗装を切り取って、pHを確認するためフェノールフタレン溶液をこの切断面に塗布すると、切断面は健全と思われる(pH 8以上)ピンク色を示したが、全面的に短期間で中性化した。ポップアウトした骨材を調査すると膨張成分であるイライトを含む骨材のポップアウトが多い。しかし、セメントの外から浸透した界面活性剤とセメント成分の一部が2種類のカルシウム塩を作り、このうちの水溶性カルシウムは外部に溶出するため、骨材表面に隙間ができ、この隙間に難溶性カルシウム塩と界面活性剤により骨材から溶出した難溶性のカルシウム塩の2つのゲルが骨材周辺部に生成される。従って、蛇紋岩のように膨張性成分を全く含まない骨材も陰イオン系界面活性剤により骨材表面の隙間に難溶性のカルシウム塩のゲルを作るため、他のポップアウトした骨材と同じような2つのゲルが凍結で膨張して蛇紋岩もポップアウトしていると思われる(図-2)。エチレングリコール系融雪剤と劣化したセメントペースト硬化物の化学成分を分析すると、陰イオン系界面活性剤やセメントに有害な各種有機物が検出された。

5.1 CT断層画像の観察結果

図-1より舗装表面から約10cm下のコンクリート試料(No.3)では特に一群の緑色の亀裂(幅:0.96mm)が見られた。このため、この試料(No.3)で二次元の白黒のCTの断面画像(図-3)を観察すると、骨材の周囲でセメントモルタル部が広い箇所や大きな空隙が存在するところに細かい亀裂が集中していた。これは砂利化が顕著であったコンクリート試料と同じであった。細かい亀裂の発生部ではセメントモルタル分が多いため、収縮し易いと考えられる。

このコンクリート舗装の内部には施工1年で亀裂が多数発生しているが、このような亀裂は30年前の古いコンクリート構造物では見当たらないこと、実験室で新しく作製した試料でもこのコンクリートに似た状態の亀裂が多数観察され、またモルタル部に局所的な炭酸化が多く観察されることから、セメントの品質にも関係していると考えられる。従って、この現場のコンクリートは硬化中に収縮亀裂が内部のモルタル部ですでに発生し、これに冬季の融雪剤の散布や外気温の低下による熱応力が加わり、この亀裂幅がさらに広がったため、融雪剤中の水より浸透力の優れた陰イオン系界面活性剤がここに浸透して、セメントや骨材の脱カルシウム化が進展したと考えられる。このため、コンクリートのモルタル部や骨材周辺部でこれらが化学反応して水溶性カルシウムとして溶け出し、脱カルシウム化が進展し、骨材周辺部に空隙や亀裂が発生する。

5.2 レインボーカラーによる三次元の亀裂解析結果

図-1より厚さ30cmのコンクリート舗装でも内部の亀裂状況は深さ方向で異なる。No.5より下の試料では赤い亀裂(幅:0.24mm)が多く、これより上のコンクリートとは明らかに亀裂状況が異なっている。

この原因はコンクリートが2層に打設されたためと思われるが、第1層目のコンクリート試料(No.0)は明らかに亀裂が極端に少ない。これは転圧時の振動締固機の振動でコンクリートに添加した重いAE減水剤(比重:1.06)が分離し、沈降したためと考えられる。この試料(No.0)では図-2に示すように各骨材の裏側にネットメロン状の亀裂が存在するため、骨材はポップアウト寸前の状態にあると思われる。

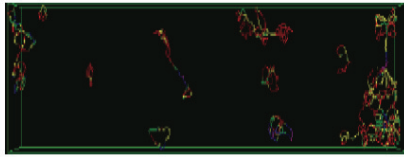
試料No.3では一群の緑色の亀裂(幅:0.96mm)があり、先のCTの二次元断面の白黒の画像(図-3)からもこの細かい亀裂がモルタル部で確認できることなどから、この箇所ではコンクリートの砂利化がすでに内部から始まっていることを示している。

図-1 三次元亀裂解析結果

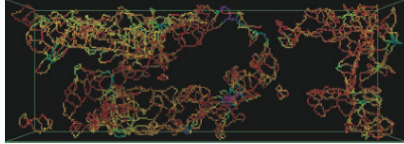
図-2 CT断層像

図-3(下) 試料の3D回転図面(75度)

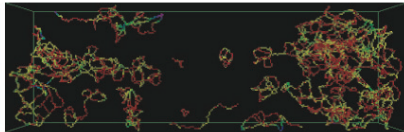
舗装表面



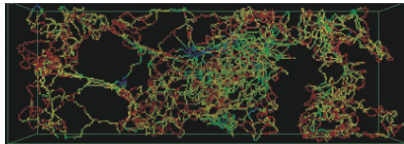
No. 0 8.12%, 1.44mm



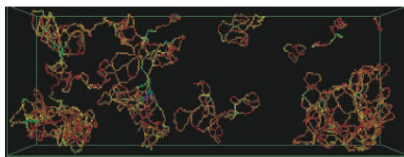
No. 1 22.5%, 1.2mm



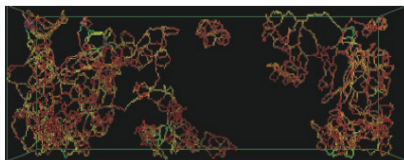
No. 2 14.2%, 1.2mm



No. 3 26.6%, 1.2mm

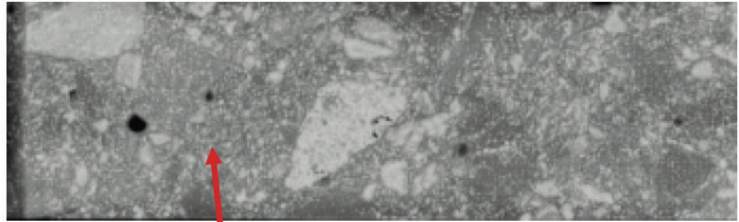


No. 5 16.1%, 1.2mm



No. 8 15.4%, 1.2mm ※ No. 4, 6, 7 は未撮像

深い

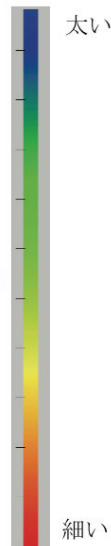


No. 3 のCT断層像
多数の細かい亀裂

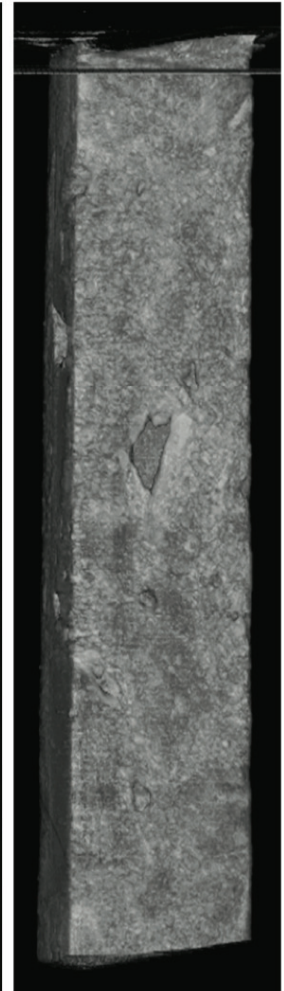
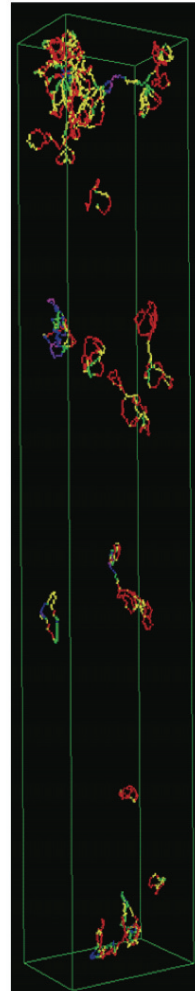
No. 0 試料
(2.5×2.5×8cm)

右: CTデータの
3Dボリューム
レンダリング像

左: 細線化された
内部亀裂分布の
3D表示



亀裂幅:



6. まとめ

以上の結果から、CT を使うと舗装のポップアウトや砂利化現象が特定できた。また、CT を使ってコンクリート構造物の損傷の程度が診断できることから、コンクリート構造物の寿命予測だけでなく、補修深さも正確に把握できる可能性がある。

このようにCTを使った評価方法は、構造物の寿命予測やリスク回避、土木材料の質的向上やライフサイクルコストの算定方法にも直結すると思われる。

この手法は日本のオリジナルの技術であるため、日本がリードしてこの技術が様々な分野で世界の標準(仕様)とされることを期待したい。