

次世代スマート舗装品質管理システム について～PaveScan RDMによる面管理への移行～

株式会社植木組 技術開発部 担当課長 品田 惇貴
SHINADA Junki

1 はじめに

社会インフラの老朽化が進む中、施工段階における品質確保は、維持管理の効率化と長寿命化に直結する重要な論点である。アスファルト舗装は供用後の補修が可能である一方、初期の締固め不足や局所的な密度ムラは、供用開始後にひび割れ、わだち掘れ、ポットホール等の損傷を誘発し、結果として維持管理費の増大につながる。したがって、施工時点で所定の品質を確実に満足させる管理手法の確立が求められている。

従来の品質管理は、切取コアによる密度試験を標準としてきた。しかし、施工範囲に対して限られた点数による点管理であり、施工面全体の密度分布を把握することは難しい。一般的な運用では、1ロット（施工面積3,001～10,000 m²）あたり10孔程度の採取にとどまる。加えて、削孔から復旧までに手間と時間を要し、交通規制下での安全面の負担や、復旧部が将来の損傷起点となり得る点も課題として挙げられる（写真-1、写真-2）。

こうした背景から、施工直後に非破壊で密度を連続的に計測しながら、面的に施工品質を“見える化”し、直ちに施工ヘフィードバックする手法が目ざされている。

現在、舗装分野においては面的管理（ヒートマップやログデータの納品・共有）を前提としたデジタル技術の適用が体系化されつつある。密度については、電磁波レーダ技術によりアスファルト混合物の比誘電率から密度を非破壊・連続的に推定する移動式アス



写真-1 切取コアの採取状況



写真-2 切取コア採取直後と供用後の様子

ファルト舗装密度計測装置 (Rolling Density Meter: 以下RDM) の適用が進んでいる (写真-3)。

本稿では、次世代スマート舗装品質管理の実装例として、PaveScan RDMを用いた現場の試行事例を取り上げ、従来の切取コアによる品質管理の代替または補完し得る管理手法としての技術的有効性、作業性、ならびに今後の展開について整理する。

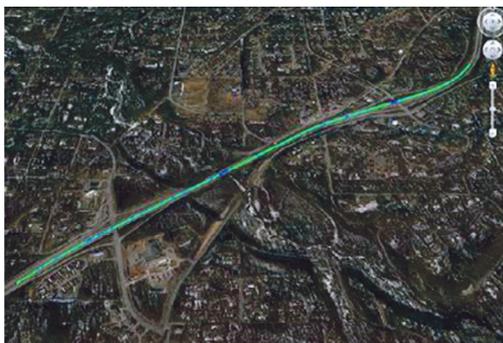


写真-3 PavScan RDM (GSSI 社 HP より)

2 次世代スマート舗装品質管理とは

舗装工事における品質管理では、施工完了後に切取コアを採取し、室内試験により、かさ密度から基準値に対する締固め度を算出し、帳票で合否を判定する枠組みが一般的である。この場合、施工完了から品質確認までに2~3日を要することが多く、施工中の是正に繋げることは困難である。

これに対し、次世代スマート舗装品質管理の要点は次の3点に集約される。第一に、施工直後に非破壊で面的なデータを取得し、密度ムラを可視化することで、品質確認を「施工後」ではなく「施工中」へ移行できる点。第二に、面的に可視化された品質情報を関係者間(発注者・監督員・施工者)の共通言語として用いることで、合意形成と説明性を高められる点。第三に、位置座標付きのログデータ※1(※1：RTK-GNSS搭載型機種の場合)としてGoogle Earthなどの電子地図上に記録し、将来の維持管理や補修計画にも反映可能な“施工時の品質履歴”として残せる点である(写真-4)。

写真-4 Google Earthでの表示例
(移動式電磁波密度計 運用手順マニュアル案)

現在、舗装分野では、ICTローラによる転圧回数、赤外線による温度、散乱型RIによる表面密度など、複数のデジタル計測技術を組み合わせて面的に品質を把握する考え方が整理されつつある。この枠組みにおけるPaveScan RDMの強みは、歩行速度程度で走行計測しながら、施工面全体をほぼカバーする密度分布データを取得し、等高線図(ヒートマップ)として品質を可視化できる点にある。すなわち、低密度領域を視覚的に抽出し、施工直後に結果をフィードバックすることで、追加転圧や施工条件の見直しといった意思決定や改善につなげられることは、品質確保と手戻り低減の両面において有効である。また、橋梁上のアスファルト舗装においても、従来の切取コア採取方法では床版を損傷するリスクがあったが、非破壊による計測は有効な品質管理手段となる。

3 PavScan RDMの概要

3.1 計測原理

PaveScan RDMは地中レーダ(GPR)技術を用い、2GHz帯(高周波)の電磁波を路面に照射し、透過波・反射波から比誘電率を連続的に計測し、アスファルト舗装密度を非破壊で評価するシステムである。

なお、比誘電率は材料の電気的特性を表す指標であり、取得した比誘電率は、事前に作成した回帰式(比誘電率-密度の関係式)により密度へ換算される。回帰式は、対象とするアスファルト混合物の種類に応じて事前に設定することが前提となる。

3.2 機器構成と計測仕様

PaveScan RDMは、手押しカート型装置にセンサを搭載した形態であり、センサは最大3チャンネル(L・C・R)設置可能である。また、舗装表面から約23cmの高さに配置され、進行方向に0.75cm間隔でデータを取得し、3.0cm間隔で平滑化された値がタブレット端末にリアルタイム表示される(写真-5)。推奨計測速度は1.5m/s(歩行速度程度)で、標準センサ間隔は40cmであるが、10~20cm間隔での高密度計測にも対応する。



写真-5 タブレット端末の表示状況

3.3 計測モード (連続モード/コアモード)

PaveScan RDMは、走行しながら面的分布を取得する「連続モード」と、特定の対象箇所では停止して計測する「コアモード」を備える。実際の現場運用時には、連続モードで密度ムラの傾向(相対分布)を把握し、コアモードで代表断面・重点箇所を確認することで、面的把握と点的確認を両立できる(写真-6、写真-7)。



写真-6 連続モードによる計測状況



写真-7 コアモードによる計測状況

3.4 キャリブレーション (校正) の考え方

現場計測に先立ち、事前準備として締固め度100/98/96/94%の4水準以上で供試体(ホイールトラック供試体 30×30×5cm)を作製し、比誘電率と密度の関係性を示す回帰式を作成することが「電磁

波密度測定装置を用いたアスファルト舗装の密度管理要領(試行案)」で示されている。供試体作成後、室内測定装置(Mix Design Module: 以下、MDM)により比誘電率を測定するとともに、供試体のかさ密度を計測し、対象混合物の比誘電率-密度の関係を求める(写真-8)。

本稿で記載する試行現場についても事前準備として同趣旨に基づき、マーシャル供試体作成方法で供試体を作製し、回帰式を導出した。この回帰式を用いてPaveScan RDMの計測結果を密度換算し、切取コア結果との整合を比較した。



写真-8 MDM 計測状況 (GSSI社HPより)

4 現場試行結果

4.1 現場試行概要

(1) 測定条件

当該現場は幹線道路の舗装修繕工事において、既設舗装の撤去に伴い、本線を仮回すために構築した迂回路施工区間を対象とし、計測対象エリアは約380m²とした(写真-9)。

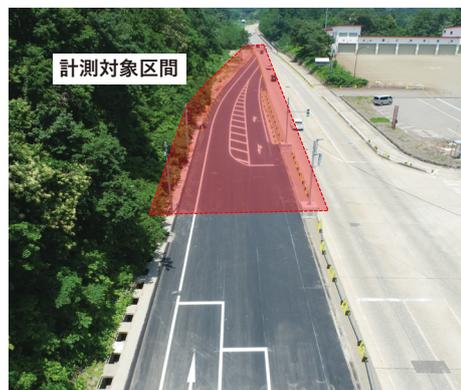


写真-9 計測対象区間

計測時の路面温度は60℃以下を目安とし、赤外線温度計により随時確認することとした。また、水分管理として転圧時の散水量を最小限とし、散水を行った場合は水分が完全に蒸発したことを目視で確認した後、計測することとした。

ただし、本試行時には施工直後の計測ができず、施工後に降雨があったため、路面の十分な乾燥を確認したうえで計測を実施した。測定は2日間に分けて行い、各測定日には路面温度と表面水分の状況を確認してから測定を開始した。乾燥確認は主として目視（表面水沢・水膜の有無）により実施した。ただし、日陰部や既設舗装境界部など、局所的に乾燥遅延の影響が残る可能性がある。

連続モードでは、代表区間を走行しながら、ほぼ全面をカバーする密度分布データを取得して、比誘電率－密度の等高線図（ヒートマップ）を作成し、面的な傾向を評価した。コアモードでは、代表断面として4測点を設定し、各測点で横断方向に5箇所（計20地点）を測定した。各地点では4回測定し、平均値を採用した。

表－1 試行現場計測概要

試行現場概要		
計測日	7月17日	7月24日
天候	曇り	晴れ
路面状況	乾燥	乾燥
対象面積	380m ²	
延長(最大)	90m	
計測点数(コアモード)	20地点	
混合物	密粒度アスコン(20FH)	
供試体作成方法	マーシャル供試体作成方法	
回帰式	式	$\rho = 0.2589 \varepsilon + 1.1646$
	決定係数	$R^2 = 0.98$

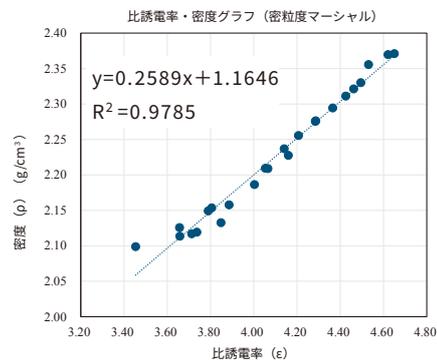
4.2 計測結果

(1) 事前準備(MDMによる回帰式の算出)

MDMおよびかさ密度の測定結果では、比誘電率3.4～4.6に対し、かさ密度2.10～2.37g/cm³の範囲となり良好な相関($R^2 = 0.9785$ (≈ 0.98))を確認した。最小二乗法により導出した回帰式は、 ρ (かさ密度) = 0.2589ε (比誘電率) + 1.1646とし、本試行現場における密度換算式として採用した(図－1)。

(2) 従来手法(切取コア)による試験結果

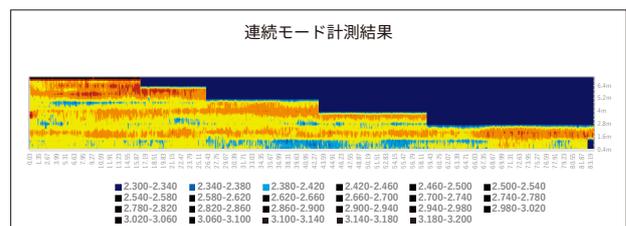
切取コア(3箇所)の採取結果は、かさ密度2.32～2.38g/cm³、締固め度98.0～100.8%、平均99.0%であり、いずれも所定の基準値を満足した。



図－1 比誘電率と密度の関係式

(3) 連続モードによる試験結果

連続モードでは、路肩付近でやや高密度、既設舗装との接続部付近で相対的に低密度となる傾向が確認された。推定密度は概ね2.33～2.74g/cm³に分布し、平均2.48g/cm³であった。切取コアの採取結果との比較においては、PaveScan RDMによる換算密度が数%高めに評価される傾向を確認した(図－2)。



図－2 連続モード密度等高線図

(4) コアモードによる試験結果

コアモードの計測結果では、締固め度の平均値が100%を上回り、比誘電率も校正時のレンジを上回る最大5.67を確認した。これは単一要因ではなく、回帰式が比誘電率3.4～4.6の範囲で構成される一方で、現場の計測結果では外挿領域の値が含まれたこと、マーシャル供試体作成時と現場のロー転圧時との性質の異なる応力が与える舗装内部の構造差に伴う影響、さらに路面・舗装内部の残留水分により比誘電率が上昇し、密度増加と区別できずに過大推定となった可能性などが重複した結果と推察される。

5 考察および今後の展開

5.1 品質管理上の有効性

従来のコア密度試験では測点数が限定され、施工エリア全体の密度ムラや局所的な低密度部の面的な

把握は困難であった。PaveScan RDMの連続計測モードでは、車線方向×幅員方向の密度分布を密度等高線図で可視化し、低密度領域を視覚的に抽出可能である。施工直後に結果をフィードバックし、即座に追加転圧等の是正判断を実施できる点は、品質確保と手戻り低減の両面において有効である。

5.2 作業性・安全性について

従来の切取コア採取では、削孔～復旧を含め1時間あたり3～4箇所程度であるのに対し、PaveScan RDMはコアモードで約20箇所/時、連続モードで約3,000m²/時の測定が可能であり、本試行区間では短時間で面的データを取得した。さらに放射線源を用いないため取扱資格を要せず、舗装体を非破壊で評価可能である点、従来のコア抜き箇所の補修が不要となる点も、時間・品質・安全の面から現場の負担低減に寄与する。

5.3 管理者側から見たメリット

密度分布をヒートマップで提示でき、従来の数値表中心の品質確認から、直感的に理解しやすい形で示すことが可能となる。潜在的な低密度部を早期に把握・是正することで、わだち掘れ・ポットホール等の損傷抑制、ライフサイクルコストの低減、走行快適性・交通安全性の向上が期待できる。

5.4 運用にあたっての留意点

PaveScan RDMの推定精度は回帰式の妥当性、適用レンジ、路面の水分状態、測定速度の安定性等に依存する。本試行では降雨後に路面の乾燥状態を確認したものの、締固め度100%超の推定値が多く見られた。これは回帰式が乾燥状態を前提としているため、まだ残存していた舗装内部の水分により、比誘電率上昇を密度増加と誤認し、過大評価した可能性も推察される。運用上は、施工直後に路面の乾燥を確認したうえで計測することを原則とし、必要に応じて少数箇所では切取コアと併用しながら管理することが合理的である。

5.5 供試体作成方法と回帰式への影響

本試行ではマーシャル供試体に基づき回帰式を作

成したが、供試体作成時の締固め機構と現場におけるローラ転圧の違いが、比誘電率－密度関係の現場適合性に影響する可能性がある。ホイールトラッキング供試体やジャイレトリー供試体は、ニーディングによる締固め方法が現場転圧に近い内部構造を再現しやすいとされる。したがって今後は、供試体作成方法を複線化して回帰式を再構築し、現場コア密度との比較を通じて推定密度の妥当性と現場整合性の向上を図りたい。

6 おわりに

本稿では、次世代スマート舗装品質管理システムの実装例として、PaveScan RDMの現場試行結果を基に、面的密度管理の技術的有効性を整理した。非破壊かつ面的な密度分布をリアルタイムに把握できることに加え、作業時間の短縮と品質の見える化を同時に実現する有効な手段であるといえる。一方で、密度推定値は回帰式の適用レンジ、供試体作成方法、路面の含水状態等の影響を受け得る。

今後は本試行で得られた知見をもとに、現場の締固め性状に近いジャイレトリー供試体やホイールトラッキング供試体を用いた回帰式の構築に加え、比較データを蓄積しながら他現場での試行を重ねていき、PaveScan RDMを活用した新たな品質管理手法の定着に向け、取組みを推進したい。

【謝辞】

本試行の実施にあたり、PaveScan RDMをご提供いただいた大陸建設株式会社工事サポート部の取締役部長、峰健吾氏をはじめ関係各位には、試行実施に向けた各種調整等、多大なるご支援を賜りました。また、北海道科学大学工学部都市環境学科舗装研究室の准教授、中村博康氏をはじめ関係各位には、技術習得のための試行機会をご提供いただくとともに、取扱い上の留意点のご教示ならびに当社試行データに対する助言等、終始ご指導を賜りました。さらに、発注者ならびに監督職員の皆様のご理解とご協力により、現場での試行機会を得ることができました。ここに記して深甚なる謝意を表します。