

## 非破壊密度測定システム PaveScan RDM を用いた 中郷地区舗装修繕工事の品質管理高度化について

工事名 令和6年度 中郷地区舗装修繕工事  
工事場所 新潟県上越市中郷地先  
会社名 株式会社 植木組  
発表者 小野塚 晃

### 1. はじめに

アスファルト舗装は、施工時に適切な締固め管理を行い、所定の密度を確保することで、交通荷重に対する耐荷力と耐久性を発揮する。密度不足は荷重分散性能や疲労抵抗性の低下を招き、早期損傷の要因となる一方で、過度な締固めは空隙減少に伴う脆さの増大を招くことが知られている。現行の品質管理では切取コアによる現場密度試験が標準的であるが、施工範囲に対し、少数点での点管理（一般的な運用では1ロット（3,001～10,000m<sup>2</sup>以下）あたり10孔を採取）に留まり、全体の密度分布を把握しにくいこと、採取・埋戻し【写真-1】に手間とコストを要し、補修箇所が供用後のひび割れ等の損傷起点となるリスクを内在することが課題である。また、公道工事では交通規制下での作業となり、施工後早期の交通開放が求められる一方で、施工直後に締固め度を面的かつ迅速に把握し、是正へ反映する手段が乏しい。

これらの課題に対し、電磁波レーダ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。国内では、『電磁波密度測定装置を用いた密度管理要領（試行案）』が整備され、面的評価の枠組みが提示されている。

本稿では、中郷地区舗装修繕工事の一部区間にRDM（PaveScan RDM）を試行適用し、従来のコア抜き試験に代わる、或いはそれを補完する品質管理手法としての技術的妥当性、作業性および今後の展開可能性を整理した。



写真-1 コア採取状況

### 2. 工事および適用技術の概要

#### (1) 工事概要

本工事は国道18号（新潟県上越市中郷区藤沢地内）における舗装修繕工事であり、主な工種はコンクリート取り壊し、コンクリート舗装、アスファルト舗装、半たわみ性舗装等である。既設舗装撤去に伴い本線仮回しの迂回路施工が必要であった。

#### (2) 対象区間

対象区間は、迂回路（KNo. 63～KNo. 67 付近）における約380m<sup>2</sup>（延長約80m、幅員約5～7m）の表層アスファルト舗装とした【写真-2】。

縦断方向の計測ラインは合計6ラインとし、横断方向の計測箇所は車線中央付近および端部付近を含めて5箇所とし、端部から0.4m以内は安全性・計測安定性を考慮し、データ取得対象外とした。舗装材料には密粒度アスファルト混合物（新20FH）を用いた。



写真-2 計測対象区間

### (3) 適用技術 (RDM) の概要

PaveScan RDM (GSSI 社製) は、地中レーダ (GPR) 技術を用いて、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。2GHz 帯の電磁波を路面に照射し、透過波と反射波から比誘電率を連続的に計測する。取得比誘電率は、回帰式 (比誘電率-密度の関係式) に基づき密度に換算される。

機器構成は、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。

測定モードは 2 種類あり、連続モードでは走行しながら面的な密度分布を取得でき【写真-3】、コアモードでは特定箇所まで停止して測定が可能である【写真-4】。推奨計測速度は 1.5m/s (歩行速度程度)、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可能である。

なお、GNSS 搭載タイプでは計測データと位置情報を自動で紐づけ、ヒートマップ出力が可能である。本試行では GNSS 非搭載機を用いたため、位置管理はキロポストおよびマーキングにより行った。

### (4) 事前準備

現場計測に先立ち、締固め度 100/98/96/94% の 4 水準以上で供試体 (ホイールトラッキング供試体 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管理要領案で示されている。具体的には、供試体作成後、室内測定装置 Mix Design Module (以下、MDM) により電磁波の透過・反射を測定し、対象混合物の比誘電率-密度の関係を求めるものである。

本工事中でも同趣旨に基づき、マーシャル供試体作成方法で供試体を作製した。締固め温度は 80~140℃、突固め回数は 5~50 回として変化させ、目標密度の異なる 3 水準

(90/95/100%) について各 5 供試体 (合計 40 体) を準備した。かさ密度算出後、各条件の最大値・最小値を除く 3 供試体 (N=3) を評価対象とし、比誘電率-密度の回帰式を導出した【図-1】。



写真-3 連続モード計測状況



写真-4 コアモード計測状況

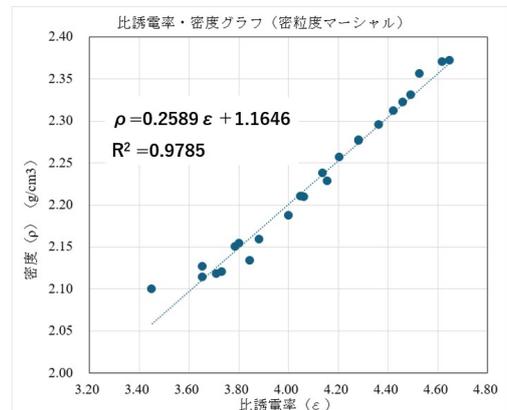


図-1 比誘電率と密度の関係

## 3. 検証方法

### (1) 測定条件

現場計測においては、路面温度 60℃以下での計測を目安とし、赤外線温度計により路面温度を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するとともに、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に計測を行うこととした。ただし、今回は施工直後の計測が叶わず、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 7 月 17 日および 7 月 24 日の 2 回に分けて行い、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 (表面光沢・水膜の有無) により行ったが、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。

### (2) 測定モード別の実施内容

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、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 No. 63+5, No. 63+10, No. 63+15, No. 64 の 4 測点を設定し、各測点で横断方向 L2, L1, C, R1, R2 の 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。

## 4. 結果

### (1) 室内キャリブレーション（比誘電率-密度の回帰式）

比誘電率とかさ密度の結果として、比誘電率 3.4~4.6 に対してかさ密度 2.10~2.37g/cm<sup>3</sup> の範囲で良好な相関が得られ、全 24 データに対する決定係数 R<sup>2</sup> は 0.98 であった。最小二乗法により導出した近似式は、 $\rho$ （かさ密度）=0.2589× $\epsilon$ （比誘電率）+1.1646 とし、本工事における PaveScan RDM 測定値の密度換算の回帰式として採用した。

### (2) 従来方法（コア抜き）による試験結果

計測対象エリアにおける 3 箇所でもコア抜き試験を実施した結果、かさ密度は 2.32~2.38g/cm<sup>3</sup>、締固め度は 98.0~100.8%、平均 99.0%であり、いずれも規定値を満足した。

### (3) RDM（連続モード）による試験結果

連続モードの計測では、手元に設置されたタブレット端末により、リアルタイムで計測データが表示される【写真-5】。比誘電率データを基に、密度等高線図を作成し、対象区間の締固め状況を可視化した【図-2】。

その結果、路肩付近でやや高密度、既設舗装とのジョイント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/cm<sup>3</sup> に分布し、平均 2.48g/cm<sup>3</sup> であった。ただし、推定密度には回帰式の適用範囲外や含水等の影響により上振れが生じ得るため、面的分布の把握と相対比較を主目的として評価した。実際のコア抜き結果との比較では、絶対値として PaveScan RDM 換算密度がコア密度より数%高めに評価される傾向が確認された。

### (4) RDM（コアモード）による試験結果

コアモードの計測結果では、締固め度が 100%を超える測点が多数確認された。4 測点×横断 5 箇所（計 20 地点）の結果、締固め度の平均は 106.5%、最大は 111.4%であり、比誘電率も校正時レンジを上回る最大 5.67 が確認された【表-1】。これは単一要因ではなく、(a)回帰式が比誘電率 3.4~4.6 の範囲で構築されているのに対し、現場で最大 5.67 が観測され外挿となった点、(b)マーシャル供試体と現場転圧における舗装内部の構造差に伴う影響、(c)路面・舗装体内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過大推定となった可能性などが重なった結果と考えられる。



写真-5 計測時の操作部表示状況

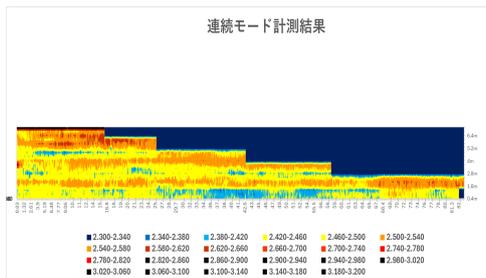


図-2 連続モード密度等高線図

表-1 コアモード計測結果一覧

測点	n	比誘電率 (平均±SD)	密度 (g/cm <sup>3</sup> ) (平均±SD)	締固め度 (%) (平均±SD)
No.63+5	5	5.20±0.19	2.511±0.050	106.3±2.1
No.63+10	5	5.19±0.31	2.507±0.079	106.1±3.3
No.63+15	5	5.30±0.27	2.537±0.069	107.4±2.9
No.64	5	5.18±0.32	2.505±0.082	106.1±3.5

n: 測定点数 (L2, L1, C, R1, R2の5点)、SD: 標準偏差  
各点で2回×2セット、計4回測定し平均値を算出

## 5. 考察および今後の展開

### (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られ、施工エリア全体の密度ムラや局所的な低密度部を面的に把握することが困難であった。RDMの連続計測モードにより車線方向×幅員方向の密度分布を密度等高線図で可視化でき、低密度領域を視覚的に抽出できる。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につなげられる点は、品質確保と手戻り低減の両面で効果が大きい。

## (2) 作業性・安全性について

コア抜き密度試験は採取・復旧を含め1時間あたり3~4箇所程度であるのに対し、RDMはコアモードで約20箇所/時、連続モードで約3,000m<sup>2</sup>/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できた。さらにRDMは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り、従来のコア抜き箇所の補修が不要であることから、時間・品質の面で優れる。

## (3) 管理者側からみたメリット

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低減、走行快適性・交通安全性の向上が期待できる。

## (4) 適用にあたっての留意点

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%超が多発する結果となった。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、過大評価したものと考えられる。運用上は、施工直後の乾燥確認後の計測を原則とし、現時点では整合確認のため、小数点でのコア試験との併用が合理的であると考えられる。

## (5) 供試体作製方法と回帰式への影響について

本試行で用いた回帰式はマーシャル供試体に基づく、比誘電率と密度の関係から作成したが、この供試体作製方法が推定値の上振れ(基準密度比100%超)に寄与した可能性がある。マーシャル供試体はランマーによる打撃転圧であるのに対し、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型の締固めにより、現場のタイヤローラー転圧に近い内部構造を再現しやすい。すなわち、同一混合物であっても締固め機構の違いが供試体内部の骨材・空隙の分布状況に影響し、結果として比誘電率-密度の回帰式の安定性(相関)や、現場適用時の推定値の偏りに差が生じ得る。したがって本試行で確認された100%超は、施工の締固めが良好であったことに加え、マーシャル供試体ベースの回帰式を現場へ適用したことによる、内部構造差の影響が重なった結果である可能性がある。今後は、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併用して回帰式を再構築し、現場コア密度との比較に基づき、推定密度の妥当性と現場整合性を一層高めたい。

## (6) 課題

今後の課題として、含水条件を前提とした計測可否判定・乾燥確認の客観化・再計測ルールの整備、MDM供試体の締固め方式(ホイールトラッキング・マーシャル・ジャイレトリー)に関する統一ルールの確立、2層以上で混合物が異なる場合の層・配合別校正と計測計画の簡素化、ならびに同時期に複数現場で異なる混合物の校正を並行実施する際のプラント負担増への対応(標準配合の代表式化や補正係数運用等)の検討が求められる。

## 6. おわりに

本稿では、令和6年度中郷地区舗装修繕工事においてRDMを試行適用し、室内キャリブレーションと現場計測結果を基に、面的密度管理の有効性と適用上の留意点を整理した。RDMは非破壊かつ面的に密度分布を把握でき、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。その一方で、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ため、今後は供試体作成方法の標準化と現場コアとの比較データを蓄積し、本工事で得られた知見をもとに、他現場での適用事例を重ね、RDMを活用した新たな品質管理基準の構築を目指したい。

以上