

舗装と盛土構造の点検・診断自動化技術の開発

(公財)岐阜県建設研究センター ○加藤 一郎

岐阜大学 国際会員 八嶋 厚, 沢田和秀, 村田 芳信

(株)セロリ 遠藤 哲哉

1. はじめに

2次元表面波探査の全自動化による盛土と舗装の一体的点検・評価技術を開発することを目的として、従来手法による舗装評価技術である維持管理指数(MCI; Maintenance Control Index)ならびに FWD(Falling Weight Deflectometer)試験との比較検証実験を、新規建設道路と供用後20年以上経過し劣化損傷が頻発している道路との双方において実施した。その結果、2次元表面波探査結果は、MCIやFWD結果を効率よく評価できること、ならびに舗装の劣化原因となる道路下の力学特性を定量的に把握できることが分かった。

また、牽引式電気探査の同時測定による土質分類により、計測結果の精度向上や液状化評価も可能となる。これらの新技术と道路の施工記録や点検記録などの情報と併せ、劣化原因に基づいた道路の維持補修の実施による、効率的で効果的な新しい道路維持補修マネジメントシステムの開発を目指す。

2. 研究の背景と目的

(1)適切な道路維持管理上の課題

国・県・市町村等の各道路管理者は、道路の穴ぼこやひび割れ等の異常が発見された場合、その度合いに応じて応急措置(アスファルトによる穴ぼこの充填)や補修工事(オーバーレイや打替え舗装等)を行う。

しかし、その発生原因が盛土部など路盤・路床より深い箇所にある場合には、それを特定し除去することは難しく、根本的な解決に至らないため同様な劣化・損傷が繰返され、結果として維持補修費の増加等を招いているケースがある。

写真-1は、舗装の打替え後もひび割れが広範囲に発生し、さらに穴ぼこも発生したため応急措置を施した状況である。こうしたケースでは以下のような影響が生じている。

①維持管理のトータルコストの増加

舗装は定期的にオーバーレイ(OL)や打替えを行う必要があるが、劣化・損傷原因を除去しないと補修工事の実施間隔が短くなりトータルコスト(長期的な維持管理費)が上昇するため、できるだけライフスパンを伸ばす長寿命化が求められる。図-1は舗装の経過年数と劣化・損傷の進行具合の関係を示したものである。



写真-1 補修済み箇所における異常の再発とその補修例

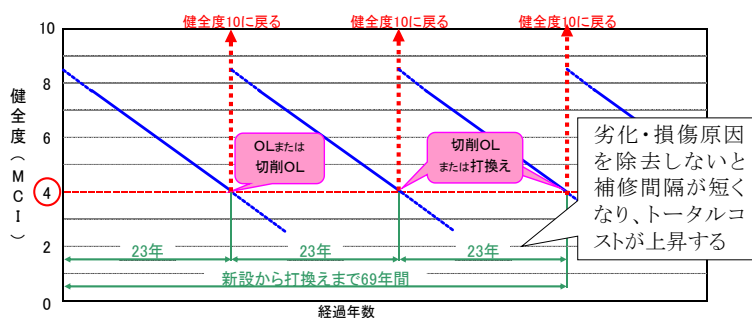


図-1 舗装の劣化予測と補修工法および管理水準

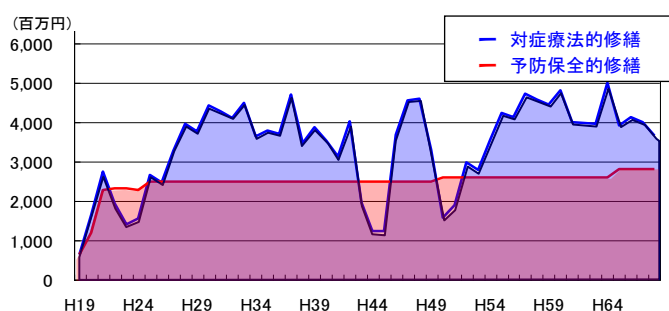


図-2 予防保全による舗装のライフサイクルコストの低減の概念グラフ

Development of automation technique for check and diagnosis of pavement and earthfill structure.

I.Kato(Construction Research Center of Gifu Prefecture),A.Yashima,K.Sawada and Y.Murata(Gifu University) and T.Endo(Celery,Co.Ltd)

なお、岐阜県メンテナンスプランでは舗装の 50 年間のトータルコストについて、予防保全的に適切な補修工事を行うことで、事後処理的な対応に比べて 27%削減できるものと算定している（図-2）。

②補修工事に伴う通行規制・通行止めの増加

③通行時の安全性・快適性の低下

④交通事故・道路事故の誘発

この他にも、間接的に行政への不満や不信感の増加等の影響が懸念される。

(2)道路の地下深部の異常把握の重要性

山間部の道路では盛土・擁壁・補強土壁等の様々な構造が用いられているものの、通常の道路パトロールでは主に路面を対象とした目視点検が基本であり、盛土部の地盤の緩み等の道路地下の状況を把握することは難しい。そのため、従来は路面の沈下等の異常が現れてからボーリングや動態観測等を行うのが一般的であった。

しかし、地震や豪雨等により崩落や液状化等が発生すると大きな影響を与え、復旧には多大なコストや時間が必要となることから、事前の状況把握と対策が重要である（写真-2 は豪雨による盛土部の崩壊例）。

道路の表層付近の地下の状態を評価する手法としては、錘を落下させて生じるたわみ量から舗装の剛性等を評価する FWD 試験等が実用化されている。表層や路盤の剛性を精度よく評価できるものの、それより深い部分（地下 3m 以上）に存在する脆弱な部分や、切土・盛土の境界部分等を抽出することは難しい。これら地下深部を的確かつ効率的に調査する手法が十分に確立されていないのが現状である。

さらに、ボーリングや FWD 試験等は専門の業者しか実施できず、委託の費用や日数も必要となることから頻繁には実施されていない。行政職員が自ら簡単に実施できる手法があれば、低コストで多くのデータが得られる等のメリットが生じる。

(3)舗装管理指標の課題

現在、岐阜県では舗装の性能確認のために維持管理指数（MCI）を調査し、先に述べた長期的な道路維持の最適化を図る「岐阜県メンテナンスプラン」にも活用しているが、MCI は路面のひび割れ率とわだち掘れ量に基づいており、極浅い舗装部の健全性評価にとどまる。他に、原位置における舗装構造評価や荷重伝達性能評価を目的として、FWD 試験が用いられるが、特定の専門業者に委託する必要がある他、MCI と同様に劣化・損傷原因の解明や除去には至らず、トータルコストの削減には寄与しない恐れがある。

(4)研究目的

本研究は、前項の(1)～(3)で述べた課題の解決を目的として、2次元表面波探査の全自動化技術の研究開発、牽引式電気探査との併用（ハイブリッド計測）による2次元表面波探査結果の信頼性向上技術の研究開発、2次元表面波探査から得た地盤のS波速度による舗装ならびに盛土の点検・診断技術の研究開発に取り組んでいる。

また、それら新技術のもとで取得されるデータと、従前より道路管理者が獲得している道路情報を地理情報システム GIS 上で一体管理する道路維持補修マネジメントシステムの構築も合わせて進めている。

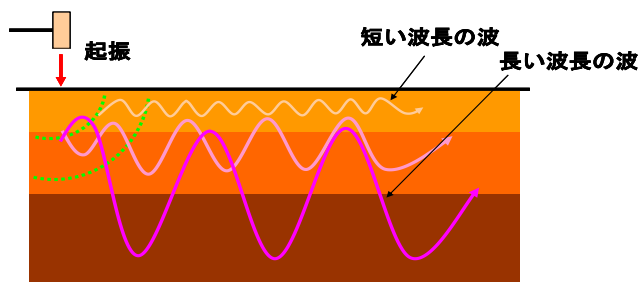
3. 研究内容

(1)2次元表面波探査法の全自動化技術

2次元表面波探査法は、地表に多数の地震計を並べて、地表面への打撃による発生する表面波を観測・解析し、地盤内のS波速度分布を評価するものである。測定が簡便で、深さ10数mの深さまで評価可能なことから、盛土の品質評価をはじめ種々の対象への適用が図られている。（図-3）



写真-2 豪雨による盛土部の崩壊



表面波の特徴

- 表面波の伝播速度はS波速度に敏感である
- 表面波の伝播速度はS波速度の0.9～0.95倍
- 波長の違いが探査深度の違いとなる
- 起振効率が良い(表面波67%、S波26%、P波7%)
- 測定が簡単である
- 逆転層があっても探査可能である

図-3 表面波探査の測定原理と特徴

これまで、路面上での2次元表面波探査には、一般的にランドストリーマを用いられていたが、本研究では、探査作業の自動化技術¹⁾に着目し、現場の計測から結果評価を全て自動で行う仕組み(以下、全自動化技術という)の実現を図る(写真-3)。現時点における全自動化技術の現場実験では、ランドストリーマ法に比べて約3倍となる平均330 m/hの計測速度を達成している。今後、牽引用電動車の導入等のシステム改良により、測定速度500 m/hを開発目標とする。

さらに、路面下10 m程度のS波速度構造を計測(地震計24基, 0.5 mピッチ)すると同時に、極表層のS波速度をより細かく判別できるように、地震計を細かく配置した短測線(地震計24基, 0.2 mピッチ)でも測定することとし、舗装評価の高精度化を図る。

(2)牽引式電気探査との併用(ハイブリッド計測)

路盤や路体には、礫質土や改良土の他、細粒分の多い土やスレーキングにより泥濘化しやすい材料も含まれることがある。また、沖積低地等の軟弱地盤上では、路体は砂質土や細粒土であることも一般的で、計測されたS波速度を材料の土質によって正しく評価する必要がある。

一方、地盤中の電気の伝わりやすさを示す電気比抵抗値は、土の間隙率ならびに地中の水分量によって変化することから、土質判別や地下水位判定の有力な情報となる。

このことから、地中電気比抵抗とS波速度を計測し、双方の情報を併せることで精度の高い盛土の安定性評価ならびに地盤の液状化危険度の判定が可能となる。

本研究では、路面での地中電気比抵抗の計測には、写真-4に示す牽引式電気探査装置(Ohm-Mapper, Geometrics社製)を用いて、2次元表面波探査を同時に計測し、同時に自動解析した結果をリアルタイムで確認できる仕組みを開発する。

(3)舗装や盛土等の評価への適用性

FWD試験は、図-4左図に示すように、交通規制による路面上で49kNの衝撃载荷による路面のたわみ量を载荷点と任意の離隔点において計測するもので、計測された各点のたわみ量もしくはたわみ量差から、アスファルト層の評価(損傷指数、図-4右図参照)、下層路盤の評価、路床の評価が行われる。試験は、試験装置を搭載した専用の車両を用いて、道路延長20～25 m間隔で実施され、測定速度は約500 m/hである。

図-5には、某高速道路128k090～129k267間において、切土地盤、切盛境界、盛土地盤それぞれ210 m間を1.0 mアレイ(1.0 mピッチ24 ch受振器での同時測定、測線長23 m)のランドストリーマ方式で計測したS波速度断面図(上段)と、このS波速度断面において地表より深さ2.6 mまでの平均S波速度 $AV_{S2.6}$ を求め、FWD試験結果であるアスファルト層の損傷指標 $D_r(AS)$ (中段, $= (D_0 - D_{90}) / T$)ならびに路盤評価のたわみ量差(下段, $D_{90} - D_{150} \leq 0.08$ mmの場合開削調査を要する)との関係を示す。S波速度 $AV_{S2.6}$ と損傷指標なら



写真-3 自動化試作機による現地調査



写真-4 電気比抵抗探査の事例

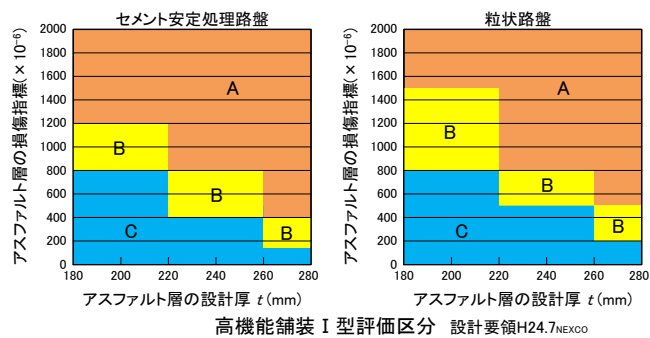
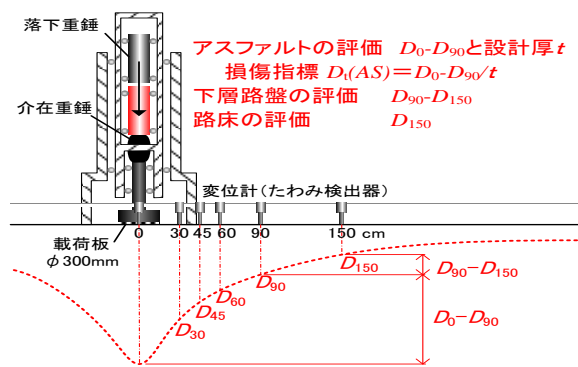


図-4 FWD 試験によるたわみ量計測(左)と損傷指標によるアスファルト層の評価(右)

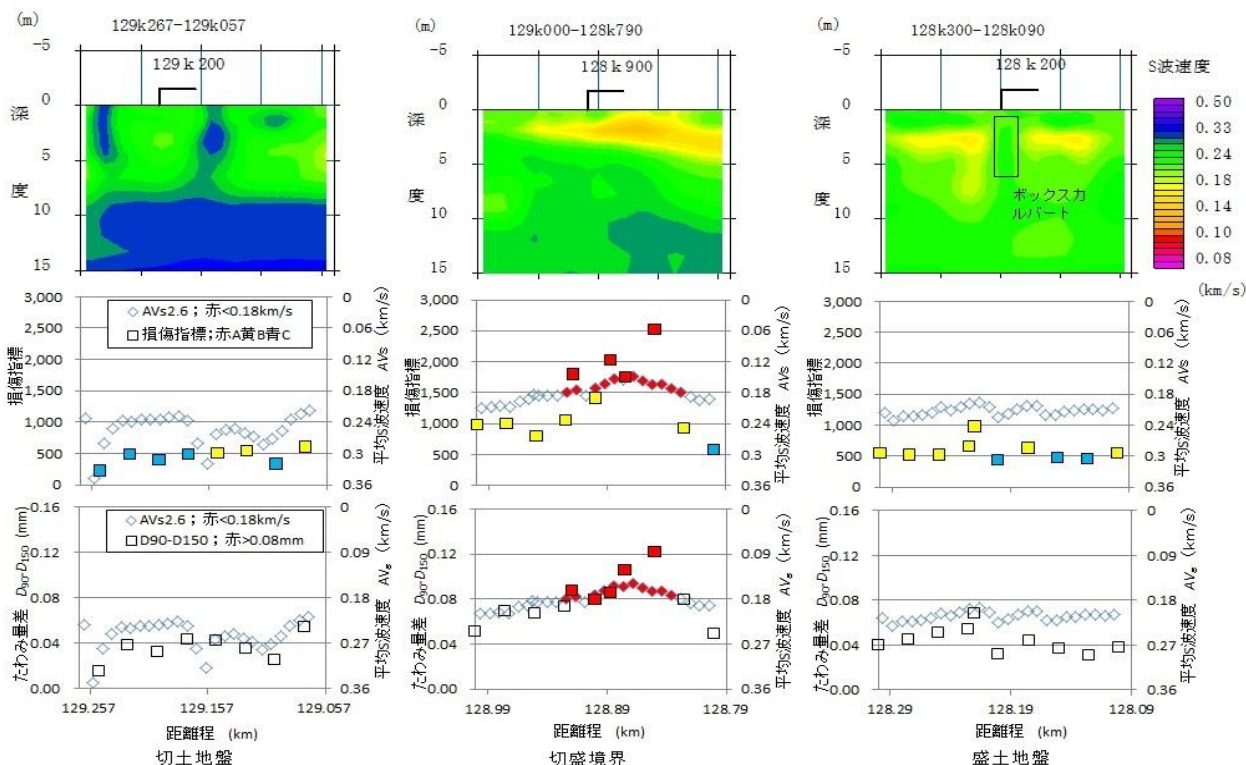


図-5 2次元表面波探査によるS波速度断面図(上)と平均S波速度と損傷指指標ならびにたわみ量差との関係

びにたわみ量差は逆相関の関係にあることが分かる。さらに、FWD 試験結果に基づくそれぞれの評価は、 $AV_{s2.6} \leq 0.18$ km/s を基準とすることで、ほぼ等しい評価ができる(赤色表示)ことが分かる。

本研究では、2次元表面波探査から求めた表層の平均S波速度を用いて、従来の舗装評価を連続的(路線延長2m毎)に可能にするとともに、舗装劣化の原因となる路床や盛土の評価を行うことで、繰り返しのない効果的な道路の修繕を実現し、併せて災害時の安定評価(盛土の地震時安定ならびに液状化危険度評価)を踏まえた盛土の補強対策の実現を目指す。

4. 実証実験

地盤条件、盛土材料や施工時期等の異なる条件下で複数の現場で実証実験を行い、開発装置の稼働性や利便性の確認、探査結果の舗装評価の適用性ならびに精度を検証した。ここでは竣工直後の道路(県道A線)と、供用後20年以上経過し劣化損傷が頻発している道路(県道B線)における実証実験結果を報告する。

(1) 県道A線

設計計画交通量N6(旧C交通)として建設された、橋梁取付部の盛土区間から平坦部に至る300m(上下

延べ 600 m) 区間において、全自動化装置による 2 次元表面波探査と牽引式電気探査、およびこれに先立ち FWD 試験を実施した(写真-5)。図-6 に当該区間の設計舗装構造を、図-7 には上り線の FWD 試験結果を示す。



写真-5 県道A線における実証実験

FWD 試験の結果、載荷点たわみ量 D_0 は平坦部でも $300 \mu\text{m}$ 程度であり、N6 の許容たわみ量 $400 \mu\text{m}$ (0.40mm)²⁾ 以下に収まっている。FWD 試験結果からは路床の現状 CBR、残存 T_{A0} 、アスコン層の弾性係数、舗装が破壊するまでの累積 49kN 換算輪数等も算出でき³⁾、これによる残存 T_A は設計 $T_A=26.0 \text{ cm}$ に対し約 30 cm 前後、アスコン弾性係数は 6000 MPa 以上と一般的な値に対して良好な結果となった。一方、疲労破壊輪数については、平坦部の一部で設計を下回る値が見られた(最小約 3.4 百万回)。また、現状 CBR については平坦部での平均が 11% となり設計値の半分程度となったため、引き続き詳細の確認等の対応が必要と思われる。

設計交通量 N6 (1,000以上3,000未満) N-7,000,000 輪/10 年

	TA
表 層 (再生密粒度アスコンtop20) t=5cm	5.0
基 層 (再生粗粒度アスコンtop20) t=5cm	5.0
上層路盤 (再生瀝青安定処理) t=10cm	8.0
上層路盤 (粒度調整砕石M-30) t=10cm	3.5
下層路盤 (再生クラッシャーRC-30) t=18cm	4.5
	$\Sigma TA = 26.0$
路床 (CBR20以上) t=80cm	

図-6 調査区間の建設舗装断面図

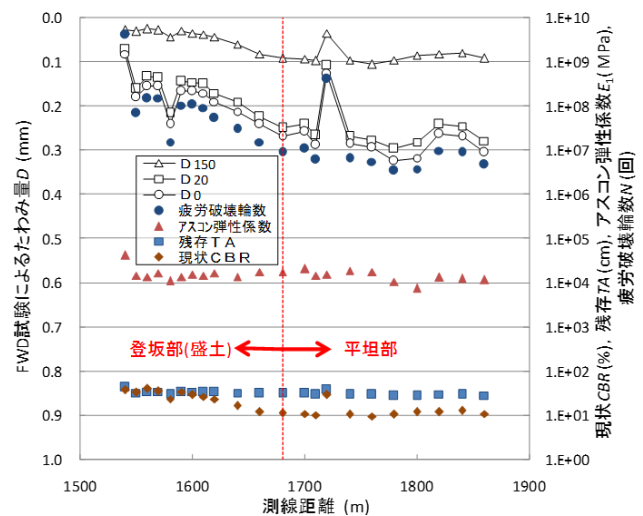


図-7 FWD試験結果

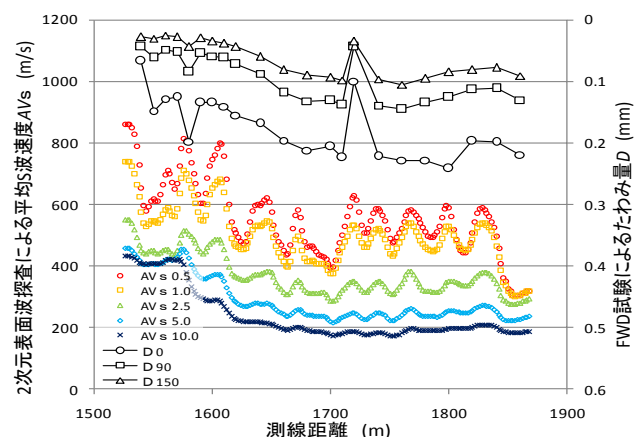
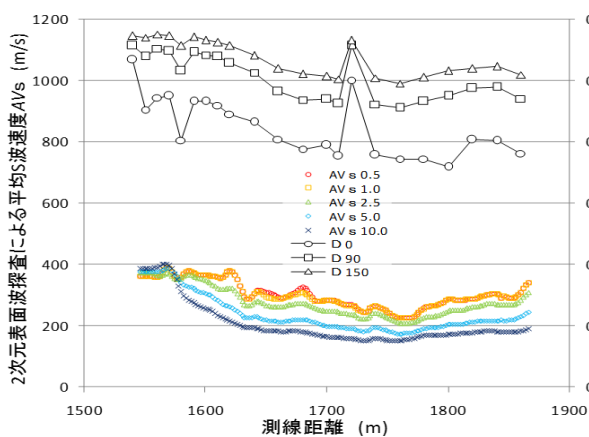


図-8 2次元表面波探査によるs波速度断面(下図)と、任意の深さまでの平均S波速度 AV_s と FWD 試験による測定たわみ量 D の分布図(上図) (※左図:地震計間隔 1.0m、右図:同 1.0m+0.2m)

図-8 の下段には、全自動 2 次元表面波探査による S 波速度断面図を示す。左図は長測線の 1.0m アレイの

みによる S 波速度断面図で、右図は長測線 1.0m アレイと短測線 0.2m アレイの双方による S 波速度断面図を示す。測線（距離）の 1525m～1580m 間は橋梁への取り付け盛土となっており、1580m 以降は平坦部である。橋梁の橋台背後に当たる測線 1525m～1580m 間は、取り付け盛土の側面を補強土壁で構築しており、盛土の沈下対策として基礎地盤を深さ 8.5m までセメント混合処理による地盤改良を行っている。

図-8 の S 波速度断面では、左図の 1.0 m アレイの結果がアスファルト層や路盤といった極表層の高速層を捉えておらず、地盤の構造のみを反映している。一方、右図の 0.2 m アレイが、 $AV_{50.5}$ が 700m/s 以上となることを捉えており、アスファルト層や路盤の速度を反映していることが分かる。ただし、確認されたアスファルト層や路盤の速度は、目玉状に高速度域が分布しており一様でない。

また、平坦部では左右いずれの結果も深さ方向に速度が低下し、深さ 3 m 付近に大きな速度境界がみられる。さらに、平坦部の深さ 3 m 以深の測線 1700 m～1770 m 間に、周りより S 波速度が低い部分の確認され、一様な軟弱地盤では無いことが分かる。

図-9 には、同区間の牽引式電気探査結果である比抵抗断面図を示す。比抵抗の違いから大きく上下 2 層に区分できる。平坦部では深さ 3 m 付近を境としており、擦りつけ盛土部では上り坂とともに境界の深さが増すことが分かる。上層については、取り付け盛土と平坦部の境界にあたる測線 1680 m を境として、盛土側の比抵抗が大きくなる。また、所々に比抵抗の高い部分が目玉状に分布しており、S 波速度と同様にアスファルト層ならびに路盤の不均質さが疑われる。

さらに、下層の測線 1680～1740 m 間に低比抵抗部分が確認され、これも S 波速度と同様に基礎地盤の軟弱層が一様でないことを示すと考えられる。

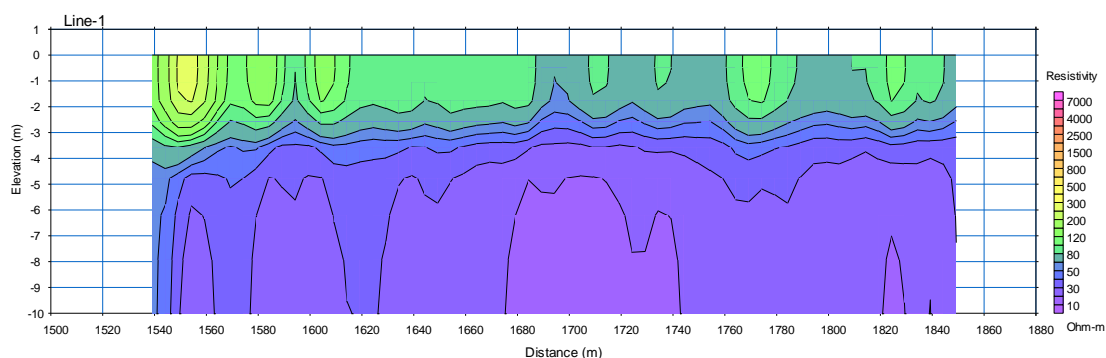


図-9 牽引式電気探査による比抵抗断面自動解析結果（上り線）

図-10 には、S 波速度と比抵抗のクロスプロットから土質を推定して示す。深さ 3 m 付近で土質が変わり、浅部は砂から礫主体、深部はシルトから粘土主体であると考えられる。深さ 3 m 以深の平坦部では、測線 1680～1770 m 付近を中心に粘土分が多いと考えられるが、これは比抵抗断面における低比抵抗部、S 波速度断面における低速度部に相当する。

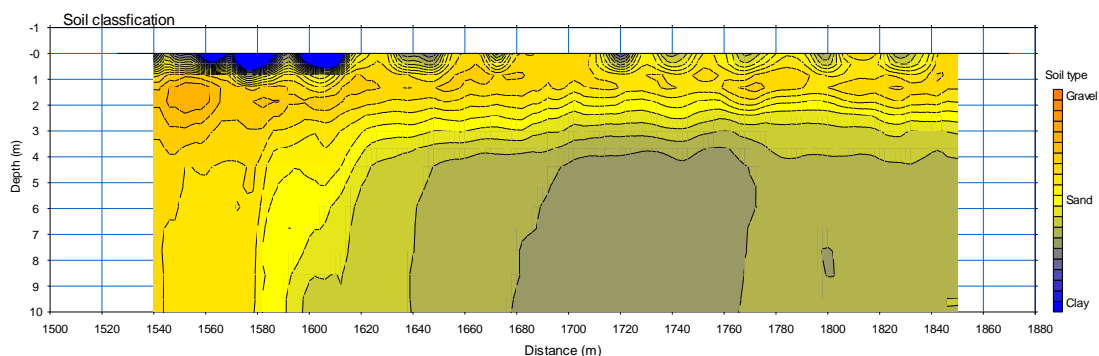


図-10 S 波速度と比抵抗のクロスプロットによる土質判定結果（上り線）

前述のとおり、当該区間は同一の設計舗装構造にあるが、盛土部と平坦部では計測たわみ量に大きな差が出ており、さらに同様の地盤構造と考えられた平坦部においても、S 波速度ならびに比抵抗の異なる区間が

確認された。このように、舗装構造以深の盛土や地盤の性状が、FWD 試験結果に影響を及ぼすと判断される。

先の図-8の上段には、それぞれの2次元表面波探査結果に基づく任意の深さまでの平均S波速度 AV_s と FWD 試験による計測たわみ量 D を、併せて示す。左図の1.0mアレイの平均S波速度と計測たわみ量には逆相関が確認できる。また、測線距離1740m付近には横断函渠(幅2.0m程度)が敷設されているが、これにFWD試験は大きく影響を受けるものの、探査ではほとんど影響を受けないことが分かる。一方、右図の0.2mアレイでは、表層の舗装部ならびに路盤部の高速度層の結果を反映するが、凹凸が激しいことがわかる。しかし、FWD試験ではそのようなばらつきは見られないことから、今後、2次元表面波探査の解析において、舗装構造を考慮した手法などの適用により、この原因究明と解析精度の向上に努めたい。

(2) 県道B線

図-11には、平地区間の道路において、全自動化技術による0.5mアレイ2次元表面波探査により求めたS波速度断面図(上図)と、同区間を牽引式電気探査により求めた比抵抗断面図(下図)を示す。S波速度断面では、目玉状の不規則な速度低下域が終点側に向かって徐々に深く分布する様子が分かる。比抵抗断面では、S波速度の低下域と同様に、距離程170~200m間で比抵抗が低下、さらに距離程220m付近より表層の

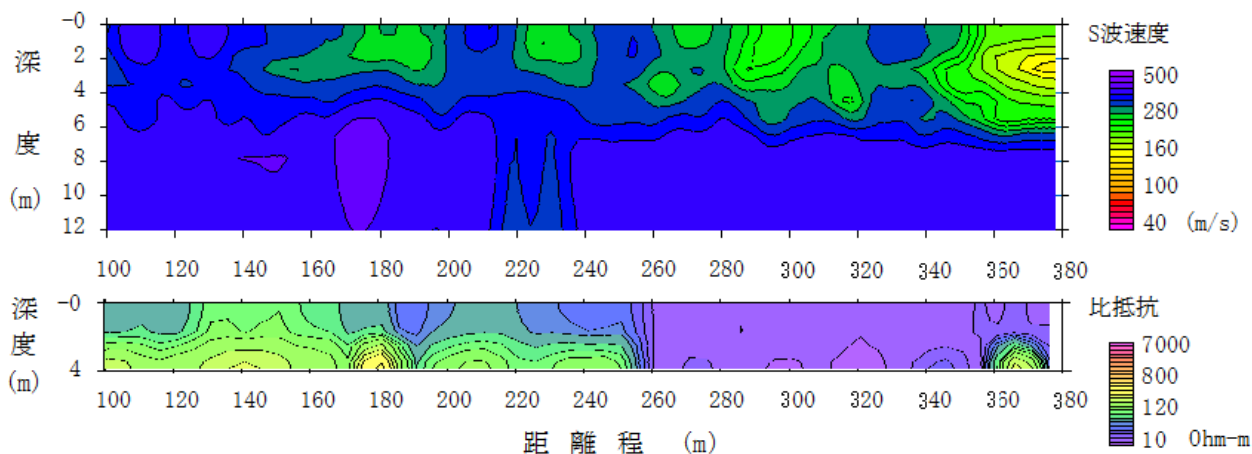


図-11 0.5mアレイ2次元表面波探査によるS波速度断面(上図)と牽引式電気探査による比抵抗断面(下図)

比抵抗が低下をはじめ、距離程260mを境にはっきりと終点側に比抵抗が低くなる。現地には、かつて距離程170m~220m付近にため池が分布し、距離程260mから終点側は谷底低地となり軟弱な沖積層が分布する。このように、2次元表面波探査と電気探査を併用することで、探査結果のみから土質区分(例:粘土または砂等)や地盤の判別(例:沖積地盤または洪積地盤等)を可能とし、2次元表面波探査結果に基づいた地盤評価の信頼性を高めることが可能と考えられる。

次いで、2次元表面波探査の結果から、任意の深さまでの平均S波速度 AV_s を求め、別途実施されたMCIによる舗装評価の指標 MCI_0 と併せて図-12に示す。

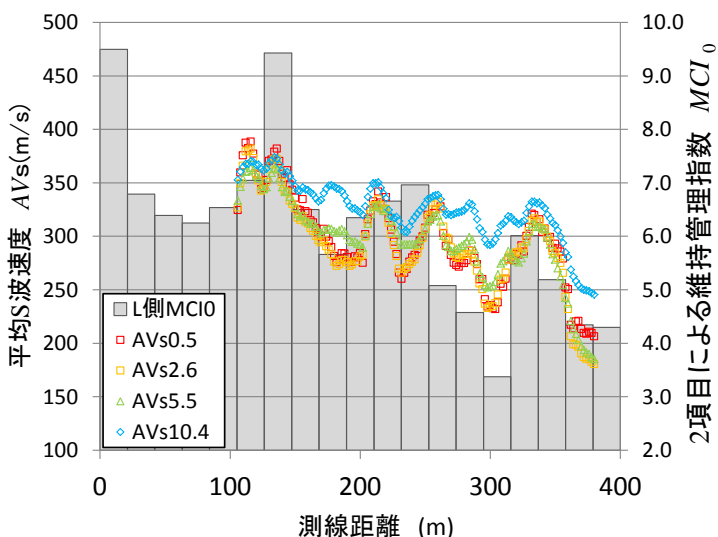


図-12 0.5mアレイ2次元表面波探査による任意の深さまでの平均S波速度 AV_s と維持管理指数 MCI_0 の分布

MCI_0 は、ひび割れ率 C (%) と わだち掘れ量 D (mm) を用いて算出される舗装評価指数 ($MCI_0 = 10 - 1.51C^{0.3} - 0.30D^{0.7}$) で、小さいほど舗装の劣化が大きいことを示す。図-12より、 AV_s と MCI_0 には正の相関関係が見られる。さらに、特に表層の AV_s

と深さ 10m 付近の AV_s との差が大きくな場合に MCI_0 の低下が著しい。すなわち、路盤下の路床や地盤の硬軟の差が大きくな部分で路面の劣化現象が進んでいることを表していると考えられる。

(3) 実証試験による成果と課題の整理

- 2次元表面波探査による表層の平均 S 波速度と FWD 試験結果の強い逆相関関係を確認した。
- 2次元表面波探査による表層の平均 S 波速度と MCI との相関関係を確認した。さらに表層と深部の平均 S 波速度差が、ひび割れ率もしくはわだち掘れ量等の現象と大きく関与することが分かった。
- 牽引式電気探査による比抵抗断面図は、盛土地盤の判別ならびに土質判別に有効である。
- 長測線 1.0m アレイ (24ch) と短測線 0.2m アレイ (24ch) による 2次元表面波探査により、アスファルト層ならびの路盤層の極表層の S 波速度を計測することができた。同時に、アスファルト層ならびに路盤の S 波速度に大きなばらつきが確認され、今後この影響を含めた評価方法が課題となった。
- 全自動 2次元表面波探査装置と牽引式電気探査による、効率的で汎用的な探査の実現可能性を確認した。一方、現行の全自動装置は準備・撤去に時間を要している他、計測時のノイズの排除等に改善の余地があるため、迅速な連続計測の実現に向けて更なる開発努力が必要である。
- FWD 試験結果ならびに MCI 結果の原因評価に、S 波速度断面ならびに比抵抗断面が有効であることが、異なる条件下 (建設直後の道路と、供用後 20 年以上経過した道路) においても確認できた。

5. おわりに

本研究では弾性波探査等を活用した舗装および盛土部の健全性評価手法の確立を目指すとともに、最終的には、それを利用した新たな道路維持管理の手法を図-13 の通り提案したい。

今回の研究と並行して、GIS とデータベースを軸としたマネジメントシステムを構築し、そこでは円滑・迅速な対応と既存データの活用、新たに取得したデータの登録・蓄積の実現を進めて行く。

簡便・迅速・廉価に道路の地盤深部までを連続的に評価できる装置の開発は、道路の長寿命化や

災害対策等の観点からも非常に有用である。また、計測やデータ処理の自動化に伴い、高度に専門的なノウハウは不要となるため、例えば行政職員が独自に計測することができ業務の効率化・迅速化も図れる。

引き続き 2次元表面波探査の精度の向上や自動化技術の確立に向けて研究を進め、適正な道路維持管理や利用者へのサービスの向上等の実現を図るとともに、岐阜県における新たな道路維持の取組み事例としても確立できるよう着実に取り組んで行きたい。

なお、この開発は独立行政法人科学技術振興機構の研究成果展開事業 (先端計測分析技術・機器開発プログラム) による成果であり、関係各位に謝意を表したい。

参考文献

- 1) 特願 2011-087132 ; 表面波探査装置及び表面波探査装置による地震波の測定方法, 特許第 5682891 号, 2015. 1. 23 登録
- 2) 日本道路協会 : 道路の維持修繕ガイドブック 2013 (2013)、18-19
- 3) (財)道路保全技術センター : 活用しよう! FWD 試験 (2005)、73
- 4) 林宏一・稲垣富士・北尾馨・北高穂 (2013) : 河川堤防における S 波速度と比抵抗のクロスプロットを用いた土質の統計的な推定、物理探査学会第 128 回学術講演会講演論文集、174-177

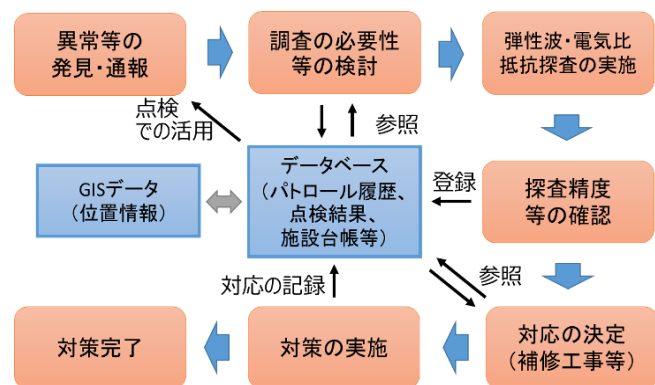


図-13 新たな道路維持管理のフロー(案)