

## 老朽化吹付け法面の弾性波探査によるモニタリングの適用性

吹付け法面 弾性波探査 健全性評価

○国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所 正会員 山本 剛  
 サンコーコンサルタント(株) 事業本部 相澤 隆生  
 (株) キンキ地質センター本社 正会員 太井子 宏和  
 日本工営(株) 大阪支店 斎藤 義之  
 応用地質(株) 関西支社 正会員 利岡 徹馬  
 (財) 道路保全技術センター近畿支部 正会員 満下 淳二  
 関西大学環境都市工学部 国際会員 梶見 晴重  
 京都大学大学院工学研究科 正会員 松岡 俊文

### 1. はじめに

日本列島は4枚のプレートが衝突する位置にあり、世界中に起こった地震の約10%は我が国とその周辺で発生している。このため地盤は多くの力を受け、亀裂や断層が発達している。さらに地形が急峻であり、台風の常襲地帯でもある。従って地盤は豪雨による浸食や風化の進行がしやすい状況にある。

このような我が国において、高度経済成長期に多くの道路が造られ、切土法面は安定化対策としてコンクリートやモルタル吹付け工が多く見られるようになった。しかし、地象・気象状況が厳しいため、構造物自体の老朽化や背面地山の劣化の進行が早い。そのため、全国の道路法面には、「要対策箇所」および「要点検箇所(カルテ対応)」が合計約180,000箇所(平成19年3月現在)存在する。そのうち未対策として残されている道路法面は約65,000箇所である。近年、崩落事故も生じており、道路管理者への責任を追求される事例も発生している。

これに対して国や地方自治体等の道路管理者は、財政状況が悪化する中で、老朽化法面を主に目視による道路防災点検や巡回等を定期的に実施することにより対応しているのが現状である<sup>1)</sup>。

道路法面を維持管理するための調査として、コンクリート吹付け工の表面を対象とした熱赤外線映像法探査や打音探査、背面地山を対象とした弾性波探査、電気・電磁探査が検討されている<sup>2)3)</sup>が、系統的な検討がなされる事例が少なく、弾性波探査を用いた手法に限ってもさまざまな方法があり、共通するフィールドでの比較検討試験が実施される例は少ない。

本論文は、国道42号の同一法面を対象に各種の物理探査手法を使用した実証実験<sup>4)5)</sup>の中から、弾性波探査を用いた法面調査結果を報告し、弾性波探査手法の法面健全性評価への適用性について検討したものである。

### 2. 弾性波探査手法の選定

筆者らは、弾性波を用いた探査手法の適用試験を実施するにあたり、地質調査に用いられることが多い、屈折法弾性波探査、反射法地震探査、および高密度表面波探査の3手法を選定した。これらの手法について以下に概説する。

#### 2.1 屈折法弾性波探査

屈折法弾性波探査(弾性波探査、屈折法地震探査)は、地表でカケヤ叩き等によって人工的に弾性波(P波またはS波)を発生させ、地下の速度の異なる境界面を屈折して伝播する屈折波を測定することにより、地下の速度構造を求める手法である(図-1)。

#### 2.2 反射法地震探査

反射法地震探査(反射法探査)は、地表でカケヤ叩き等によって人工的に弾性波(P波またはS波)を発生させ、その弾性波が地中

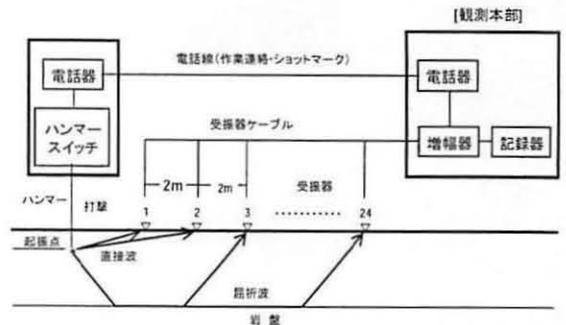


図-1 屈折法弾性波探査の測定概念

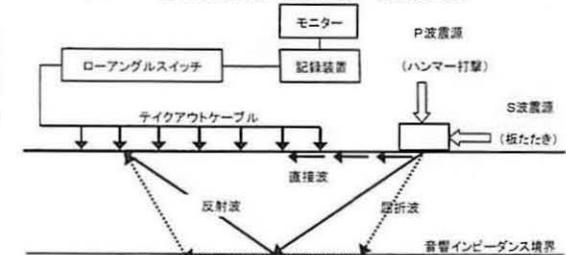


図-2 反射法地震探査の測定概念

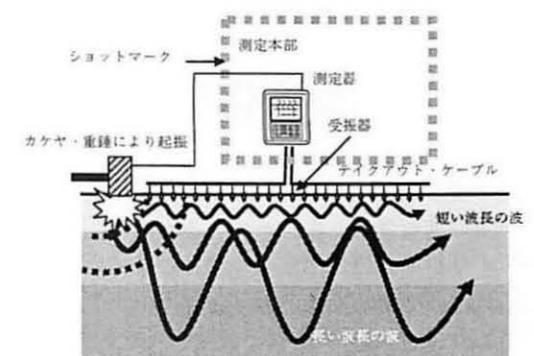


図-3 高密度表面波探査の測定概念

を伝播し音響インピーダンス境界（速度×密度の変化する境界）から反射して地表に戻ってくる微弱な反射波を測定することにより、地下の速度の異なる境界面、および地下の速度構造を求める手法である(図-2)。

### 2.3 高密度表面波探査

高密度表面波探査は、地盤の地表付近を伝わる表面波（レイリー波）を多チャンネルで測定・解析することにより、深度 20m 程度までの地盤の S 波速度を求める手法である（図-3）。この S 波速度は地盤の動的特性の把握や検討等には不可欠なパラメータであり、高密度表面波探査を用いることにより広範囲に、かつ簡便に把握することができる。

## 3. 実証試験の概要

流れ盤等の地質構造、岩級区分境界、および地盤物性を明らかにする手法として、弾性波を用いた調査手法の適用性を検討するために、国道 42 号の法面 3 箇所（表-1）において実証試験を実施した。

表-1 実証試験地点の概要

	地点(1)	地点(2)	地点(3)
所在地	和歌山県西牟婁郡白浜町	和歌山県西牟婁郡白浜町	和歌山県日高郡みなべ町
種別	切土	切土	盛土
築経過年	約 45 年	約 45 年	約 37 年
最大法高	17m	7m	12m
法勾配	1:0.5～1:0.7	1:0.8～1:1.0	1:1.5
構成地質	新第三紀砂岩泥岩互層	新第三紀砂岩泥岩互層	新第三紀礫岩層（基盤）
地質構造	受け盤	流れ盤	塊状・無層理
法面工	コンクリート吹付け	コンクリート吹付け	コンクリート張り

### 3.1 屈折法弾性波探査

地点(1)～地点(3)において測線を設定し、斜面上の実距離 2.0m 間隔に振源・受振点を設定した。受振点では吹付け法面にハンマドリル等で孔を開け、受振器を地山に取り付けた。振源は、P 波ではそのまま表面をハンマ打撃し P 波を発生させ、S 波では表面に長さ 1 m 程度の木製の打撃板を設置して板叩き法によって S 波を発生させた。

### 3.2 反射法地震探査

地点(1)～地点(3)において屈折法弾性波探査と同様に、測線の設定、および振源・受振点を設定した。屈折法弾性波探査との違いは、ほぼ全ての受振点で起振することである。

### 3.3 高密度表面波探査

地点(3)の法面に縦横断の測線を設定した。測線に沿って上下動受振器 24 個を 1m 間隔で地表（コンクリート張り面上）に配置し、地表でカケヤによる起振を行った。受振器は、平坦面では三脚台座を使用して、傾斜地では粘土を用いて水平を確保した(図-4)。

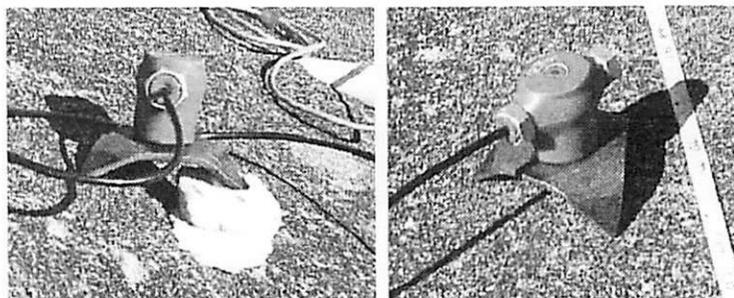


図-4 高密度表面波探査受振器設置状況

## 4. 実証試験結果

### 4.1 屈折法弾性波探査および反射法地震探査(S 波)

地点(1)の屈折法弾性波探査結果では、P 波および S 波の速度層境界は一致し、強風化部に相当する第一速度層は、斜面および法肩で厚く、頂上の平坦部では薄い。また、風化岩に相当する第二速度層は、斜面方向に緩やかに傾斜する傾向が認められる。確認のために実施したボーリング孔の基盤深度と第二速度層の下面深度はほぼ一致する。反射法地震探査では、ボーリング孔で実施した PS 検層データを用いた VSP<sup>6)</sup>解析結果と対比すると、風化層内の構造は VSP と一致するものが認められる。基盤内の構造は VSP とは必ずしも一致しないが、基盤内の受け盤構造が得られており、本調査地の地質構造と良く一致する(図-5)。

### 4.2 屈折法弾性波探査および反射法地震探査(P 波)

地点(2)の屈折法弾性波探査結果では、P 波および S 波の速度層境界は一致し、強風化部に相当する第一速度層が地表付近に 2～3m 程度の厚さでほぼ一様に分布する。第二速度層下面となる基盤は、深さ 10m 程度に分布しているが、確認ボーリングが浅いため、基盤の直接確認はしていない。反射法地震探査では、風化層内の構造が地質構造の走向・傾斜と良く一致する。また、強風化層である第一層下面からの反射波が顕著に認められる(図-6)。

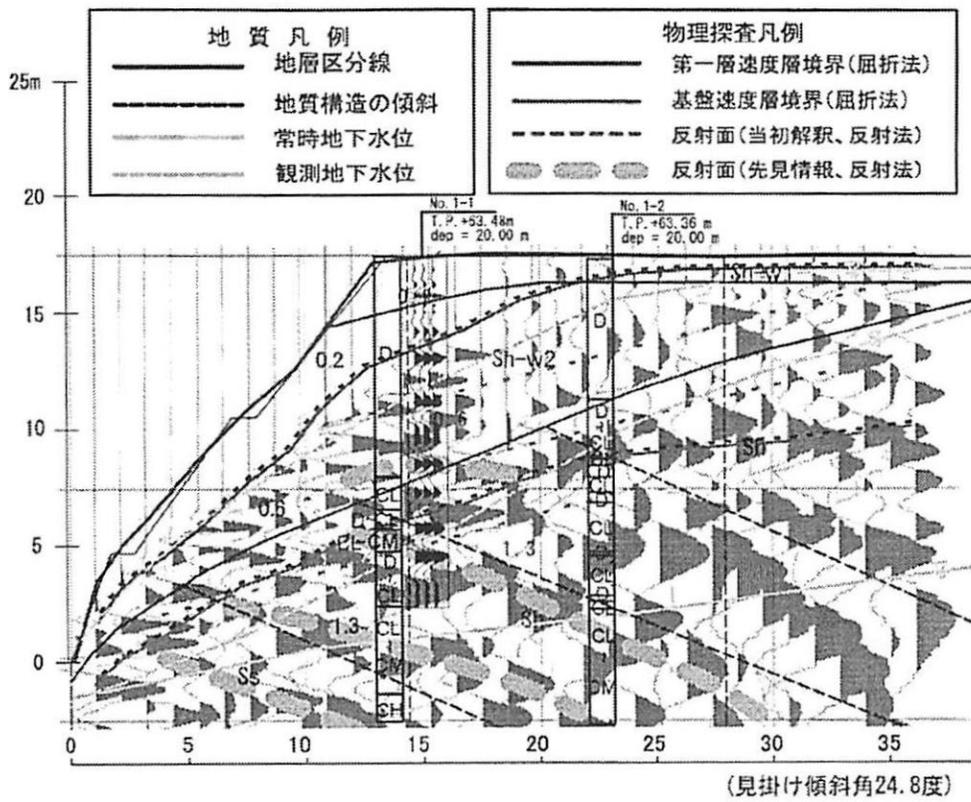


図-5 屈折法および反射法地震探査結果 (地点(1))

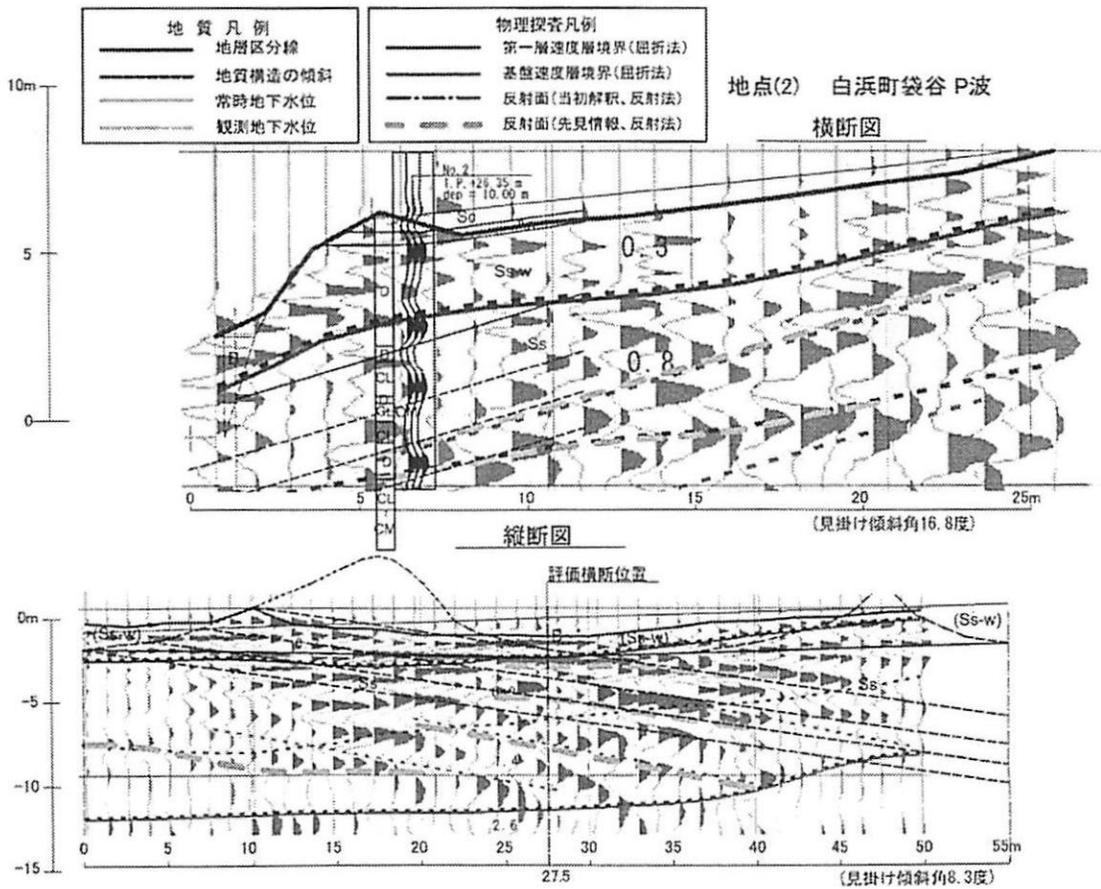


図-6 屈折法および反射法地震探査結果 (地点(2)) 上段：横断面 下段：縦断面

### 4.3 高密度表面波探査と屈折法および反射法地震探査結果 (S波)

地点(3)の横断測線における高密度表面波探査結果では、上段部分の盛土部 (B) および下段部分の礫岩の風化部 (Cg-w) を低速度部として捉えている。また、堅硬な礫岩部 (Cg) を高速度部として捉えている。孔内速度検層の結果と比較すると、上段部分の盛土部 (B) の下の厚さ 4m 程度の部分は低速度部であり、表面波探査結果と良く一致する(図-7上)。

縦断測線における高密度表面波探査結果では、 $V_s=0.4\text{km/s}$  の境界がほぼ堅硬な礫岩の上面形状と一致する(図-7下)。同じ横断測線における屈折法弾性波探査結果では、S波の速度層境界はP波の速度層境界と一致し、第一速度層 ( $V_s=0.2\text{km/s}$ ) が盛土 (B) および礫岩の風化部 (Cg-w) に相当する(図-8)。第二速度層 ( $V_s=0.6\text{km/s}$ ) の基底は、堅硬な礫岩 (Cg) の上面付近に相当する。同じ横断測線における反射法地震探査結果のうちP波およびS波の両方で、図中矢印で示す破線部分に堅硬な礫岩 (Cg) の上面からの回折波と考えられる波群が認められた。一方、基盤内の地質構造としては不明瞭であり、礫岩が塊状・無層理の岩盤であるため、反射法地震探査結果 (S波) では反射波が現れにくかったことが考えられる。

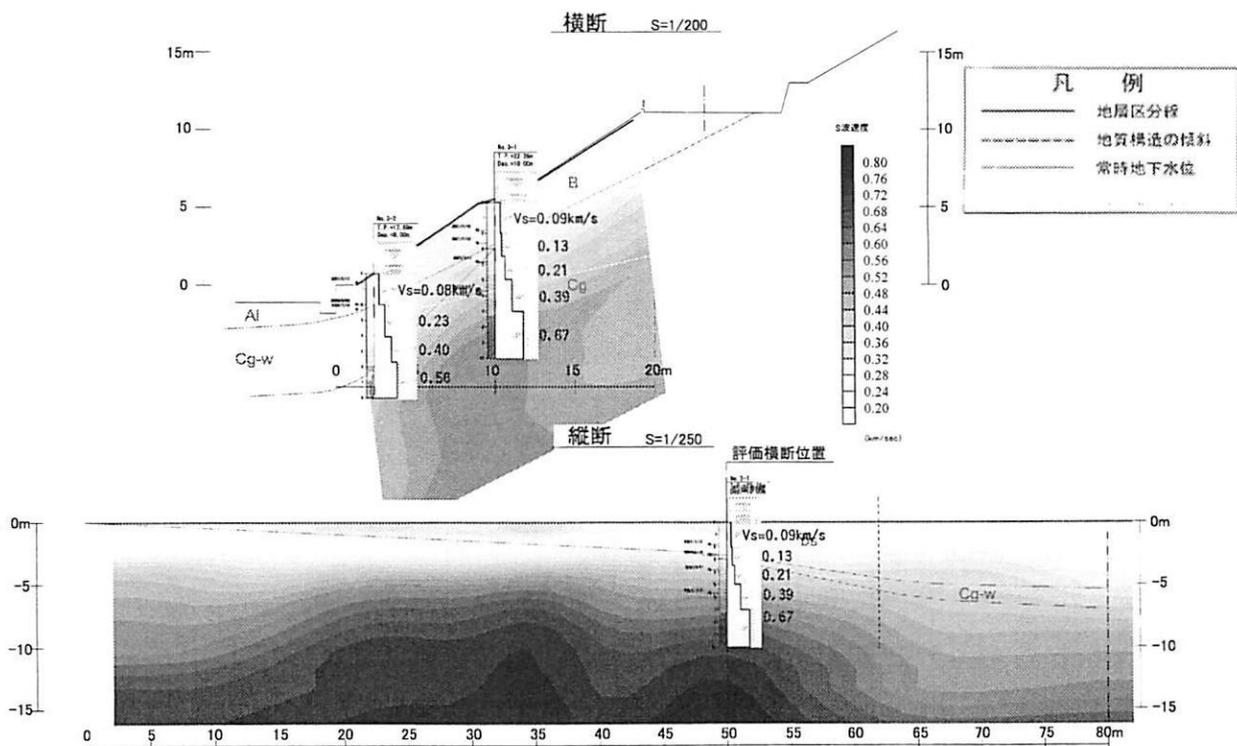


図-7 高密度表面波探査結果 (地点(3) 上段：横断図, 下段：縦断図)

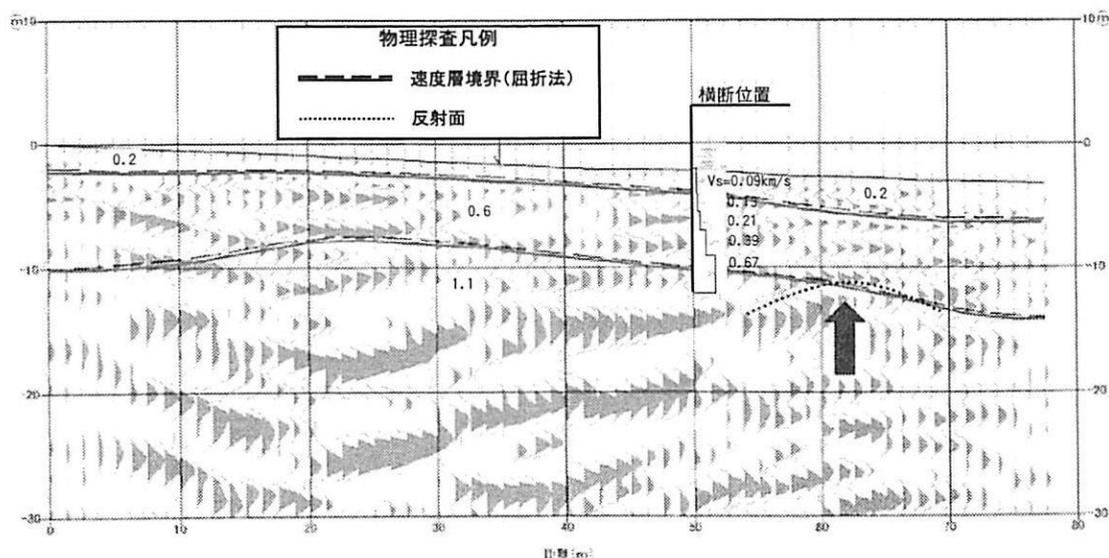


図-8 屈折法および反射法地震探査結果 (地点(3) S波：縦断測線)

## 5. 道路法面健全性評価における弾性波探査の適用性

### 5.1 屈折法弾性波探査

屈折法弾性波探査結果では、法面背面地山の強風化部、弱風化部、基盤岩の分布とP波・S波速度、および基盤の形状を捉えることができた。また、実施個所ではP波とS波の速度層境界が一致しており、強風化、弱風化、基盤の単純な3層構造として法面背面地山をモデル化できることがわかった。屈折法弾性波探査は、従来より様々な土木地質調査に用いられてきた手法であり、法面縦横断を問わず様々な形状の道路法面に対応できる特徴がある。

本手法を道路法面調査に適用し、より良好な結果を得るためには、表層を保護する吹付けコンクリート等に孔を開け、地山に直接受振器を設置する必要がある。また、起振点では、地山を直接打撃し吹付けコンクリートの影響を低減する必要がある。受振点および起振点において孔を開けることにより、吹付けコンクリートの厚さやラス網等の施工条件にかかわらず、それらの調査結果におよぼす悪影響を避けることができる。結果の解釈時には、ボーリング調査により割れ目や風化の程度等の地盤状況との対比を行うほか、岩石物性との対比を行うことが挙げられる。

### 5.2 反射法地震探査

反射法地震探査では、地盤のP波・S波構造として、風化帯の層内構造および基盤層内の構造を捉えられることがわかった。特に、基盤内であっても砂岩泥岩互層のように物性に違いが認められる場合には、これら地質境界を反射面として捉えて、流れ盤・受け盤等の基盤内の地質構造を知ることが可能である。反射法地震探査は、地盤内の地質構造を把握する調査に有効と考えられる。また、本手法も屈折法弾性波探査と同様、様々な形状の道路法面に対応できる。

本手法を道路法面調査に適用し、より良好な結果を得るためには、屈折法弾性波探査と同様の受振点と起振点の処置を行う他、受振点では、地山に直接受振器を設置したほうがよい。起振源および受振点間隔を、今回実施した2.0mよりも短く1.0m程度にすることにより、結果断面の解釈をより詳細に行なうことが期待できる。また、ボーリング調査およびボーリング孔を利用したVSP解析を実施し、反射波の検証を行うことが挙げられる。

### 5.3 高密度表面波探査

高密度表面波探査結果では、N値との相関の高いS波速度<sup>7)</sup>を求めることにより、地盤の硬軟、盛土と地山の境界、弱部等の把握が可能であることがわかった。ただし本手法は、比較的高低差の少ない場合に適用性が高いため、探査対象は盛土法面に限定される。しかし本手法は、表面保護コンクリート等が地山に密着する場合は、他の物理探査手法のように法面保護コンクリート等に削孔する必要が無いために作業時間が短縮できること、ならびに解析が比較的容易かつ効率的であり、他の探査手法より経済的であることが挙げられる。

### 5.4 まとめ

道路法面健全性を評価する上で、道路管理者が特に着目する探査対象項目は、a)土や岩盤の物性(硬軟・風化度合等)、b)地層境界・空洞(吹付け面直下)・不均一性、およびc)地下水位である。

今回の検証の結果、弾性波探査は、a)土や岩盤の物性、およびb)地層境界と不均一性については、調査ボーリングや物性試験による精度検証が望ましいが、健全性評価に必要な情報が得られることがわかった。さらにそのアウトプットは、点情報ではなく断面情報として、硬軟、風化、割れ目が速度の違いや連続する波形群として現れるため、法面の地盤状況を可視化してわかりやすく表現することができる。空洞は弾性波探査では捉えることができず、コア抜き調査やレーダ探査による確認が必要である。一方、c)地下水位については、弾性波探査からその存在を捉えることができなかった。地下水が飽和状態で存在する場合は、不飽和部よりもP波速度が上昇することが知られており、他の探査手法との組合せ等による精度向上を期待したい。

## 6. 今後の課題と展望

### 6.1 課題

道路法面健全性評価において、法面の劣化が時間の経過と共に進行する過程を把握するためには、弾性波探査等を用いた長期間のモニタリングによりその差分を捉えることが必要である。図-9は、実証試験結果から得た各弾性波探査手法の特徴から、老朽化吹付け法面の健全性評価を実施する場合のイメージをまとめたものである。各手法の適用性は、目的とそれに見合うコスト、および精度によりおのずと決まるが、今後の課題として以下のことが挙げられる。

#### (1) 屈折法弾性波探査

・作業効率を向上させて安価に実施できることが望ましい。

#### (2) 反射法地震探査

・詳細構造を得るためには受振点間隔2.0mでは粗いため1.0mの測定を実施する。

・反射波抽出に関するデータ処理技術の向上を図る。

・作業効率を向上させて安価に実施できることが望ましい。

#### (3) 表面波探査

・起伏の少ない平坦面での適用となる。

- ・良好な SN 比のデータを取得することが必要。
- ・表面保護コンクリートと地山に隙間がある場合の対処方法の検討が必要。

## 6.2 展望

弾性波探査は、表面の吹付けコンクリート等の影響を比較的受けずに地盤の内部を立体的に可視化することができる。今回の実証試験は、実際の道路法面の現場で実施したものであり、これまで目視という表面情報を主体とした法面の健全性の評価に対して、内部構造まで踏み込んだ情報を基に、健全性の評価が現在の技術でも可能であることがわかった。これまであまり道路法面の健全性評価に使われてこなかった技術であり、法面に適した機器の開発は発展途上である。今後も道路法面の老朽化は進行する。しかし道路管理者の財政状況が改善されない中で、さらなる安全で効率的な道路保全が求められるであろう。このような状況下のもと、これまで以上の探査技術の向上や機器の開発が期待される。

また、他の物理探査手法と組み合わせた複合調査<sup>8)</sup>、法面の劣化に大きな影響を及ぼすと考えられる地下水探査の技術開発、および時間間隔において複数回測定を実施することにより、地盤の状況変化を連続的に捉えて災害防止に利用する等、モニタリング手法としての利用が期待される。

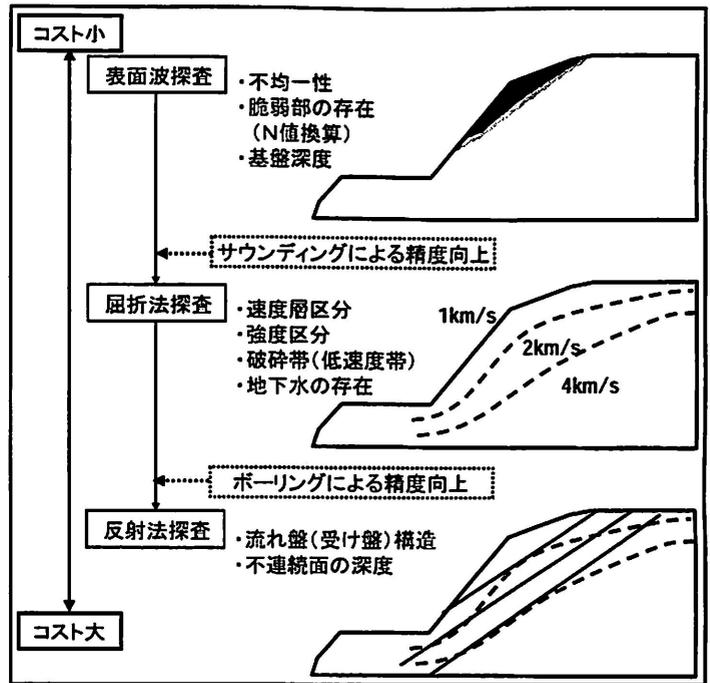


図-9 弾性波探査による法面健全性評価のイメージ

## 参 考 文 献

- 1) 財団法人道路保全技術センター：道路防災点検の手引き（豪雨・豪雪等），pp.1～68，2007.
- 2) 楠見晴重：老朽化吹付け法面の調査手法，ベース設計資料，No.134 土木編，pp.30～33，2007.
- 3) 社団法人物理探査学会斜面等健全性検討研究委員会：老朽化吹付け法面の調査・対策の手引き，鹿島出版会，pp.1-193，2006.
- 4) 山本剛・糸川政孝・船曳誠二：道路法面の健全性評価に関する取組み，土木学会誌，Vol.92，No.10，pp.64-67，2007.
- 5) 国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所道路法面健全性検討委員会：第3回土木技術講演会「探査技術の法面健全性評価への適応性」資料，2008.
- 6) 建設産業調査会：最新地盤調査ハンドブック，第11章物理探査，pp.303-305，1995.
- 7) 今井常雄・麓秀夫・横田耕一郎：日本の地盤における弾性波速度と力学的性質，第4回日本地震工学シンポジウム，pp.89-96，1975.
- 8) 中村真・楠見晴重：併用探査による降雨に伴う斜面内の地下水挙動のモニタリング手法，材料 Vol.56，No.9，pp.828-832，2007.