

## 道路高盛土の耐震安全性評価のための現地計測・管理手法の検討

研究予算：運営交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 26

担当チーム：地質・地盤研究グループ，防災地質チーム

研究担当者：稲崎富士，倉橋稔幸

### 【要旨】

近年、地震時や強雨時に道路盛土が崩落する事故が頻発し、交通ネットワークの災害時の維持・耐久性向上のために危険箇所の効果的な抽出と経済的効率的な対策工の実施が求められていた。その前提として崩落危険度を説明する地盤モデルの構築と検証、盛土の内部構造・物性分布を的確に把握することが不可欠である。しかし従来盛土斜面で適用されてきた調査・解析手法は、特定断面における単点、あるいは群列土質調査ボーリングと、その断面に対する円弧すべり計算を標準としてきたため、盛土縦断方向の不均質構造の影響の評価や、内部物性構造の経時変化すなわち劣化を評価することが困難であった。高精度で盛土内物性構造を2次元あるいは3次元で把握することができ、さらに地震時の過渡的応答や長期的な劣化を計測評価することが可能な現地計測技術を開発して適用すれば、連続的な土工構造物である道路盛土の健全度評価、維持管理をより効率的に推進することが可能となる。そこで本研究では、いくつかの現場計測要素技術の開発を進めるとともに、それらを実際の道路盛土現場で実施して適用性を検証した。

キーワード：道路高盛土，内部物性構造，物理探査，ハイブリッド表面波探査，高速電気探査。

### 1. はじめに

近年、強震動や豪雨負荷を受けて道路盛土が崩落する事故が頻発している。災害時にも交通ネットワークを維持し、日常的な自然災害にも耐えうる強健な道路を維持するためには、全線にわたる日常的な健全度評価と脆弱箇所の効果的な抽出が重要である。

図-1は、道路盛土箇所の縦断方向の不均質性とそれに起因する局所安全率分布を示した概念図である。従来の盛土斜面調査・解析手法においては、特定断面において単点、あるいは群列土質調査ボーリングを実施し、その結果からせん断特性を推定し、特定断面に対して円弧すべり計算を実施して安定性を評価するという手順が一般的であった。しかし、ボーリング実施点および円弧すべり計算断面が、対象盛土内で最も脆弱な箇所であるか否かについては検証が困難であった。これは、調査地点・断面の設定が、のり変状の有無など主として地表徴候に基づいて実施されていることによる。盛土内部情報、あるいは切り土面や旧地形面情報の重要性は認識されてはいても、効果的経済的な盛土内部情報取得方法の提案・適用は進展しておらず、また設計施工図面等が残存していない場合もある。このため、これまでの安定解析では盛土縦断方向の不均質物性構造の影響

はほとんどの場合検討対象外とされていた。これは被災を受けた道路盛土に対する事後調査においても同様で、安定化対策の実施と道路ネットワークの早期復旧が優先されるため、被災のメカニズム解明や盛土内不均質物性構造の確認とその空間的広がり

の把握のための調査解析は留保されがちであった。高精度かつ低コストで盛土内物性構造を2次元あるいは3次元で把握することができ、さらに地震時の過渡的応答や長期的な劣化を計測評価することが可能な現地計測技術を開発して適用すれば、連続的な土工構造物である道路盛土の健全度評価、維持管理をより効率的に推進することが可能となると期待される。これまでの調査研究によって、地震時の盛土崩壊や融雪期ののりすべりなどは、盛土内の水の

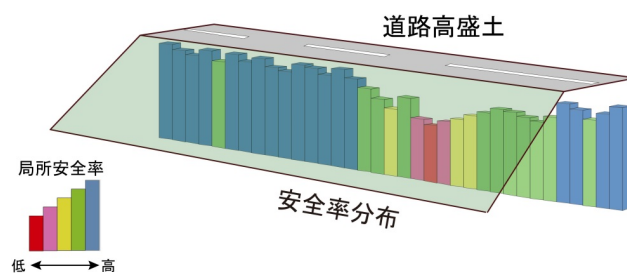


図-1 道路盛土の縦断方向の安全性分布の概念図

存在状態の変化，すなわち局所的な集中，過剰間隙水圧の発生，部分的な体積含水率の上昇が主たる要因となっていることが知られている<sup>1)</sup>。そこで本研究では，道路盛土の内部物性構造とその変化を把握することが可能なくつかの現場計測要素技術の開発を進め，それらを実際の道路盛土現場で実施して適用性を検証した。

## 2. 現場計測要素技術開発

本研究において実施した主要要素技術開発の概要を，現地での適用計測結果も含めて以下に示す。

### 2.1 ハイブリッド表面波探査技術の開発

弾性波探査の一種である表面波探査は，地盤の表面を伝わる表面波（レイリー波）の特徴である周波数によって伝播速度が異なるという速度分散性を利用してS波速度層構造を推定する探査法であり，大きく能動的表面波探査法と受動的表面波探査法に別けることができる。能動的表面波探査法は，所定の地点で地表をかけ矢などで打撃し，発生した表面波を直線状又は曲線状の測線上に展開した地震計アレイで測定し，測定データから位相速度を求めることにより，S波速度層構造を推定する。一方受動的表面波探査は，地表に生じる常時微動を面的に展開した地震計アレイで測定し，測定データから位相速度を求めることにより，S波速度層構造を推定する。

能動的表面波探査は，空間分解能が高く，さらにランドストリーマー<sup>2)</sup>を採用することで作業性が飛躍的に向上し，河川堤防等の調査に広く用いられている<sup>3)</sup>。ただ探査解析深度が15m程度と浅く，道路高盛土などに対しては盛土下層部や基礎地盤部の情報が十分に得られないという限界があった。さらに交通量の多い道路近傍では通行車両によって生じられる表面波がノイズとなり，盛土下部や基礎地盤内部の物性構造情報を得ることが困難となる場合があった。

一方受動的表面波探査は，探査解析深度が数10mないし数km程度と深いものの相対的に空間分解能が低く，表層部解像度が良くないという問題があった。さらに従来の受動式表面波探査は，地震計を面的に展開する必要があったため，直線的な測線上での連続的な探査を実現することが困難であるという問題があった。しかし近年，直線的に展開した地震計アレイを用いても受動的表面波探査が可能であることが見出された<sup>4)</sup>。受動的表面波探査は微動を測定するが，道路通行車両が生起する交通振動も微動の一種である。したがって道路近傍に直線状に地震計アレイを展開し，交通振動を測定することで受動的表面波探査が可能であり，地表下50m程度までのS波速度構造を把握できることがわかってきた<sup>5)</sup>。

従来能動的表面波探査と受動的表面波探査とは，異なる測定装置，測線展開および異なった解析方法

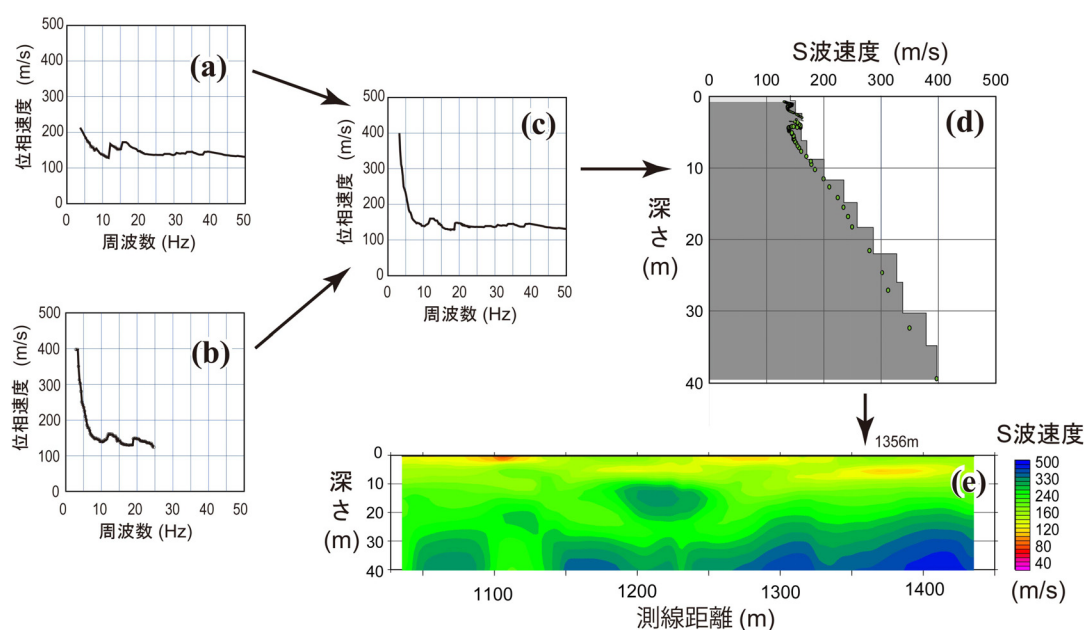


図-2 ハイブリッド表面波探査の概念図

(a): 能動的表面波探査位相速度分散曲線； (b): 受動的表面波探査位相速度分散曲線； (c): 合成位相速度分散曲線； (d): 1次元速度構造インバージョン結果； (e): S波速度構造断面

を用い、別々の探査方法として適用されてきた。これに対し本研究において検討したハイブリッド表面波探査は、同一の測定装置、同一の測線ではほぼ同時に表面波探査を実施することを特徴とする。ハイブリッド表面波探査におけるデータ処理解析過程を図-2に示す。同一の探査装置を用い、同一測線上取得されたデータを解析し、まず同一地点の能動的表面波探査位相速度分散曲線（同図(a)）と受動的表面波探査位相速度分散曲線（同図(b)）を得る。これを合成し、単一の位相速度分散曲線（同図(c)）を決定する。この分散曲線をインバージョン解析し、特定地点の1次元S波速度構造（同図(d)）を構築し、以上の解析を測線上の多点で実施し、最終的に2次元S波速度層構造断面（同図(e)）が提供される。

ハイブリッド表面波探査の現地適用結果例を図-3、図-4に示す。探査を実施したのは関東地方整備局宇都宮国道事務所が4車線化工事を施工していた新4号春日部古河バイパス五霞交差点付近の盛土区間である。探査実施当時、同バイパスの新利根川橋舗装工に伴い西側の2車線が閉鎖され、仮工事用道路として使用されていた。この道路の外側側帯部に2m間隔で地震計を配列し、測線を設定した。まず路面をかけ矢で打撃して表面波を発生させ、能動的表面波探査を実施した。つぎに東側2車線を対面通行する車両が発生する交通振動を測定する受動的表面波探査を実施した。測定時の通行量は約1,000台/h、大型車の混入率は約90%であった。

図-4に示したS波速度構造断面において特徴的であるのは、まず表層約5mのS波速度が、測線ほぼ全域で350m/s程度と、高い値を示すことである。この高速度層の厚さは、盛土層の層厚、周辺地表面高とほぼ一致した。S波速度とN値との関係式<sup>6)</sup>から、盛土層のN値は40程度と見積もられ、締まった礫質材料で構成されていることが推定された。なお測線距離50mより左側の部分は相対的にS波速度

が低くなっている。この区間は五霞交差点からの斜路とその延長部にあたり、本線とは異なる盛土構造を有していると考えられる。つぎに5m以深は、深度約35mまで相対的低速度層が再現されている。当該層のS波速度は180~210m/s程度で、部分的には250m/s程度の値を示す。この地域の表層には、N値5以下の粘性土・ローム層の下位にN値10~20程度の砂優勢層が分布する。当該低速度層はこれらの未固結更新統に対比が可能である。軟弱な沖積層ではないことから、大規模な沈下等の地盤災害の発生の可能性は小さいと判断される。深さ35m以深では、S波速度が大きくなり、概ね300~350m/sの値を示す。締まった砂礫層の出現が想定されるが、近傍には参照可能なボーリング調査データが少なく、詳細は不明である。

以上に示したように、ハイブリッド表面波探査は交通量の多い幹線道路においても適用が可能であることが実証された。今後、地震時の道路盛土の不安定化・崩壊などが発生する可能性の評価、盛土下の地盤内の不均質構造の把握や地盤物性の推定等に活用が期待される。



図-3 ハイブリッド表面波探査現場作業写真

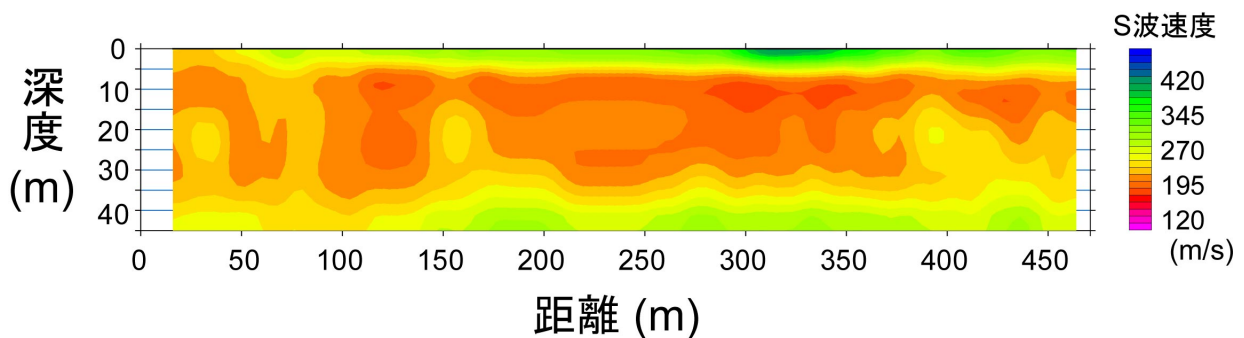


図-4 ハイブリッド表面波探査解析断面例



## 2.2 高速電気探査装置の試作と盛土斜面内地下水動的挙動の把握への適用

盛土斜面内の地下水の流動や地震時や大雨時の局所的過剰間隙水圧の発生など過渡的、動的な挙動を直接把握するには、間隙水圧センサプローブの多点多深度配置、高速でのデータ収録が必要とされるが、経費の面で非現実的であり、配置するプローブによる場の擾乱も懸念される。非破壊で面的な測定が可能な手法の開発と適用が期待されていた。

直流電気探査は、地すべり地の地下水賦存状態やすべり面の把握、地下水源調査等に多用されてきており、道路斜面内の地下水流動把握にも適用が期待される。しかし従来の電気探査装置は、測定時の電極切替え操作に時間を要し、リアルタイムでの面的な探査が困難であった。そこで本研究において、新たに高速かつ多点で測定が可能な多チャンネル同時通信型高速電気探査装置を試作した<sup>7)</sup>。この装置は、同時に24電極に通電することができ、加えて24電極の電位応答を同時に測定できる。符号分割型信号を送信することで、最高速では約10秒の間に576点のデータを取得することが可能である。従来の電

気探査装置では同程度のデータ取得に1時間程度を要していた。このために同時刻の比抵抗構造を把握することが原理的に不可能であった。これに対し本装置を使用すれば、ほぼリアルタイムに全電極組み合わせのデータを取得することが可能となり、間接的ではあるが地下水の浸透やパイピングなどの過渡的な現象を、比抵抗変動として捉えることが可能になると期待された。

図-5 に符号分割型信号送信技術の概念図を示す。この技術は携帯電話通信に利用されているCDMA技術と原理的には同じであり、0および1の各々に対応する符号信号(同図(a))をランダムに組み合わせた送信信号コード(同図(b))を生成する。各々の電流電極から異なった信号コードを送信し地面に通電すると、ある電位電極の応答信号としては、それらすべてが重畳した同図(c)に示すような時間応答信号が得られる。この応答信号と各送信信号コードとの共分散を計算することで、個別の送信信号コードの応答を分離することができる。試作物であるため、図-5(右)に示すように、多くの函体で構成され、その接続通信確立等の手順が煩雑となるが従来

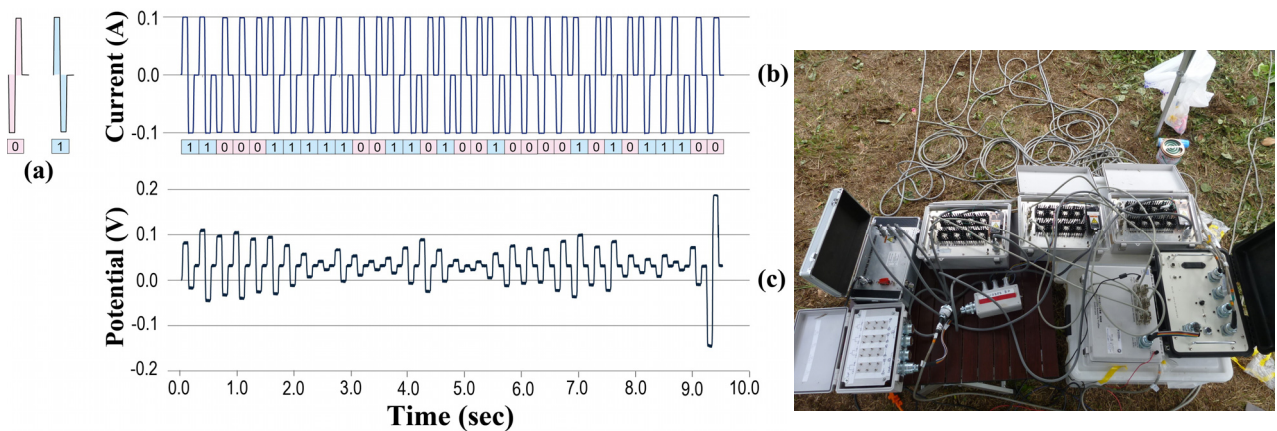


図-5 高速電気探査装置の外観(右)および特徴的信号処理概念図(左)

(a): コード構成符号信号; (b): 送信信号コード例; (c): 応答電位波形例<sup>8)</sup>

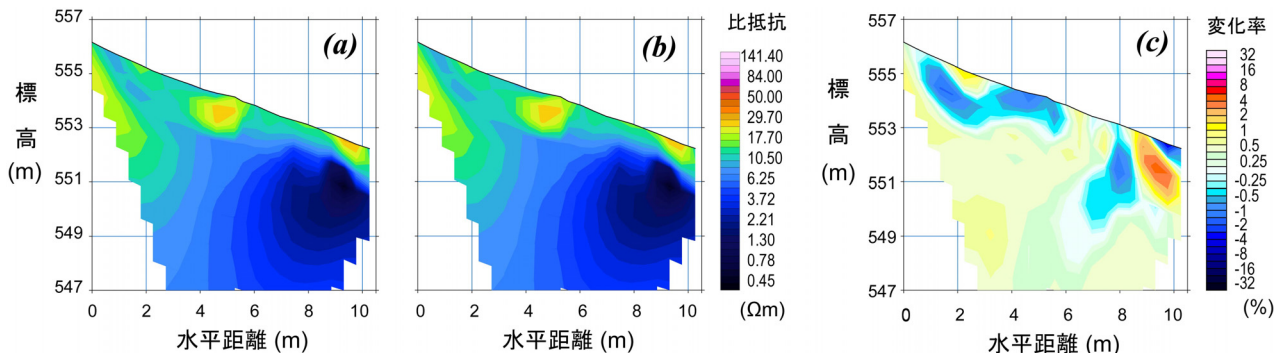


図-6 高速電気探査によるランマー加震応答測定例(盛土のり傾斜方向測線比抵抗断面)

(a): 初期比抵抗断面; (b): ランマー加震直後比抵抗断面; (c): 比抵抗変化率の空間分布

の直流電気探査装置では得ることができなかった、ほぼリアルタイムでの比抵抗変動を捉えることが可能になった。

図-6は、高速電気探査装置を用いて道路盛土斜面内の地下水の動的応答を比抵抗変化として捉えた事例である。地震時の盛土斜面内地下水の局所的過剰間隙水圧発生の有無を捉えるには、長期的なモニタリング測定が必要とされる。しかし設定したモニタリング期間内に自然地震が発生する保障はない。人工地震と組み合わせたモニタリング測定は確実に過渡的応答を捉えることができるが、大規模な人工地震を発生させることは現実的ではない。そこで路盤締固めに使用されるランマーを使用し、盛土斜面上で電気探査測線近傍を打撃加震し、加震前中後の比抵抗変動を測定した<sup>8)</sup>。約10分のランマー加震前後の盛土斜面測線下の比抵抗断面(同図(a), (b))は見かけではほぼ同じで、変動を見出すことは困難である。しかし両者の変化率を計算した断面図(同図(c))には、加震による比抵抗変化が明瞭に捉えられている。すなわち、ランマー加震によって測線下方(標高551m, 水平距離9m)の表層部で比抵抗値が最大7%上昇した。この部分は表層約1mが相対的高比抵抗となっており、加震により間隙水が移動し、同図(b)の測定時、すなわちランマー加震直後には復水していなかったと解釈することができる。一方測線上部(標高553~555m, 水平距離1~6m)では、表層部の比抵抗が2%程度低下したゾーンが带状に連なっている。ランマー加震によってこのゾーンに地下水が集中したと推定することができる。このゾーンは、加震前後の比抵抗断面では斜面最上部の表層から連続する低比抵抗帯と一致する。この結果からは、元来的に斜面内に通水ゾーンが形成されていて、加震により周辺から絞り出された間隙水がそのゾーンに集中した、という過渡的流動モデルを想定することが可能である。

### 2.3 加震時間隙水圧応答の現地計測手法検討

地震時に盛土斜面内部の地下水が非排水状態で応答し、部分的に過剰間隙水圧が発生して有効応力が低下することが盛土すべりを誘発する、というモデルが提唱されている<sup>1)</sup>。しかし、それらは不十分な調査データに依存した単純なモデル化過程に依っており、盛土内部の構造、特に空間的な地下水の存在状態を把握することができないでいた。そこで本研究では盛土内部の地下水の存在状態を把握すること

が可能な原位置計測手法を、現地適用実験を主体とした検討により開発すること、特に局所的に人工的に過剰間隙水圧を発生させ、有効応力の低下の程度を計測することが可能なツール・計測手法を開発することを達成目標の一つに設定した。しかし本研究開始直前に2011年東北地方太平洋沖地震が発生し、所全体が地震関連緊急調査研究にシフトすることになり、実施中の他の研究課題に対しても見直しが求められた。本研究においても、間隙水圧計測ツールの新規開発を断念し、既存の間隙水圧計測プローブを構成し直し再利用することとした。

間隙水圧計測に使用したのは、液状化調査研究において製作したサイスミックコーンである<sup>9)</sup>。このプローブは径44mm, 長さ75cmで、3成分の加速度計をとダイヤフラム式間隙水圧センサを内蔵しており、地震動と間隙水圧応答を同時に計測することが可能である。プローブは水深を変えて出力電圧を測定し、校正係数を求めている。

後述する札幌近郊中山峠道路の盛土斜面での計測事例を図-7に示す。プローブを斜面の特定点(図-8参照)で深さ1.1mまで人力で押し込み、盛土斜面上の電気探査測線の近傍を打撃加震した際の応答を測定した。サンプル間隔は毎秒1650点、入力レンジ $\pm 5VDC$ を24bit分解能でほぼ連続して収録した。

図-7(a)は、連続ランマー加震時に観測された間隙水圧レベルのテア(突然の上昇下降)である。プロ

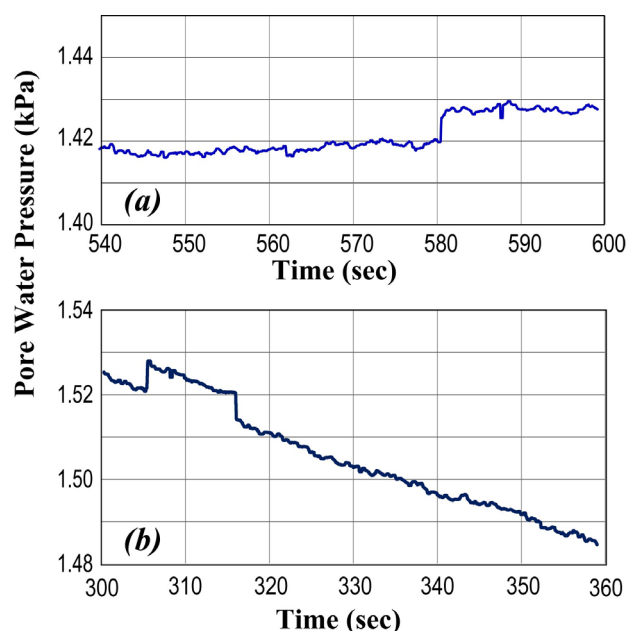


図-7 ランマー加震時の間隙水圧応答例

(a): 間隙水圧のテア変動例;

(b): 加震再開直後の単調低減と一時的上昇

ープ設置深度が浅く、当初の水頭が 15cm 程度しか確保できなかったが、継続加震により、580 秒の時点で 0.01kPa 上昇した。一方同図(b)は、一時ランマー加震を中断し、再開した直後約 1 分間の間隙水圧応答である。単調に間隙水圧が低下しているものの、一時的にテアが生じたことが記録されている。このうち単調低減は、ランマー加震で上昇した間隙水圧が、加震休止により静水圧状態に回復している消散過程を示すものと解釈することができる。実際、加震再開約 6 分後には、間隙水圧が上昇に転じた。これに対し約 10 秒間のテアは、ランマー加震により局所的な間隙の閉塞と回復が捉えられたものとの解釈が可能である。

従来盛土内の間隙水圧測定は、静水圧測定を前提として 1 時間間隔など極めて離散的な計測が標準となっていた。一方地震時の堤体内の過剰間隙水圧の発生と液状化過程の観測成功事例<sup>10)</sup>や液状化再現実験時の過剰間隙水圧検出事例<sup>11)</sup>が実証したように、高速サンプリングによってはじめて地震時の動的な過剰間隙水圧の発生過程の把握ができるようになってきた。近年、高速・高ダイナミックレンジで、かつ低消費電力型のデータロガーが低廉に導入できるようになってきている。複数の間隙水圧センサを道路盛土斜面内に配置し、このデータロガーと組み合わせることで盛土内部の地下水の挙動を空間的に把握することが可能となり、道路盛土内部の空間的不均質物性構造の把握と地震時の動的挙動モニタリング・崩壊危険度評価に活用が期待される。

### 3. 開発技術の道路盛土斜面への適用検討

本研究において開発した主要要素技術の適用性を検証することを目的として、道路盛土斜面に対する総合的な現場計測調査実験を実施した。その概要を以下に示す。

#### 3.1 計測調査サイト

総合的な盛土斜面計測調査を実施したのは、北海道札幌市の一般国道 230 号通称中山峠道路の 35.7KP 付近の道路盛土斜面である<sup>8)</sup>。対象区間は無意根山の東麓山裾に位置し、巨大な地すべり土塊の末端部に片切り片盛りで構築された片側 1 車線の主要幹線道路の谷側盛土斜面にあたる。道路斜面の崩壊は、一般に降雨を主要原因とすることが知られているが、北海道では融雪期に少ない雨量でも斜面災害が発生する傾向があることが指摘されている<sup>12)</sup>。中山峠道

表-1 計測項目および測定条件。

測線	計測項目	測定条件等
H0: L=76/95 m	高速電気探査	1 m 間隔
	ハイブリッド表面波探査	1 m 間隔
H1/H2/H3 L=23.5/23.5/71.5 m	高速電気探査	0.5 m 間隔
	V1/V2/V3 L=42.5/23.5/23.5 m	
3D 高速電気探査	同ランマー加震モニタリング	0.5 m 間隔
	表面波探査	0.25 m 間隔
	コーン貫入試験	7 点(V1 上)
	V4 L=23.5 m	
V4 L=23.5 m	高速電気探査	0.5 m 間隔
	P1 D=1.1 m	
	間隙水圧応答測定	1650 回/秒

路においても融雪期に通行止めを伴う道路斜面災害が発生し<sup>13), 14)</sup>、発生メカニズムの究明と合わせて融雪量を考慮した新たな管理基準の設定の検討が進められている<sup>15)</sup>。当該区間では斜面災害は発生していなかったものの、過年度に近傍で斜面崩壊が発生したこと、斜面中腹で湧水が恒常的に認められたことから予防保全対応として斜面保護工が実施されることになっていた。

この斜面保護工の施工前の 2013 年 11 月、および施工後の 2014 年 6 月に、2 次におわって現地計測を実施した。

#### 3.2 計測項目および測線設定

適用した探査計測手法とその主要な測定条件を表-1 に、また盛土斜面上での測線配置を図-8 に示す。対象盛土斜面ではのり中腹で恒常的湧水が認められ、浸潤部には湿地性植生が繁茂していた。その湿潤部を中心に、横断 3 測線 (H1/H2/H3)、縦断 3 測線 (V1/V2/V3) を設定した。また比較対照測線 (V4) を対策工区間外に設定し、2013 年 11 月および 2014 年 6 月に比較測定を実施した。さらに H1/H3 および V1/V3 で囲まれた区画において小規模稠密 3D 比抵抗探査を実施した。ランマー加震はこの区画の 4 辺上において実施した。また V1 測線上の 7 点において土研式簡易貫入試験を実施した。盛土表層部の間隙水圧応答測定は V1 測線上に人力で削孔した P1 孔で実施した。

対策工区間では斜面安定対策として表土の剥ぎ取り、法面保護ふとんかご設置、水抜き用水平ボーリング (12 本) および排水パイプ打ち込み (433 本)



が施工された。これにより対策工区間内の測線では同一条件での繰り返し測定ができなくなった。そこで第2次測定時には新たに道路わきに H0 測線を設定して電気探査およびハイブリッド表面波探査を実施した。

道路縦断方向測線の解析断面を図-9 に示す。このうち、上中の2断面は斜面对策工竣工後の2014年融雪期に H0 測線で探査したハイブリッド表面波探査お

よび電気探査結果を、下の断面は2013年積雪期前に H3 測線で実施した電気探査結果を示す。まず特徴的なのは、測線右側（街側）から左側（峠側）に傾斜する  $V_s=450$  m/s 以上の高速度層が捉えられていることである。この S 波速度断面は、変状発生部付近に向かって盛土および下位の地すべり土塊が厚層化している構造を表したものと解釈することが可能である。一方 H0 測線の比抵抗断面では、対策工施工

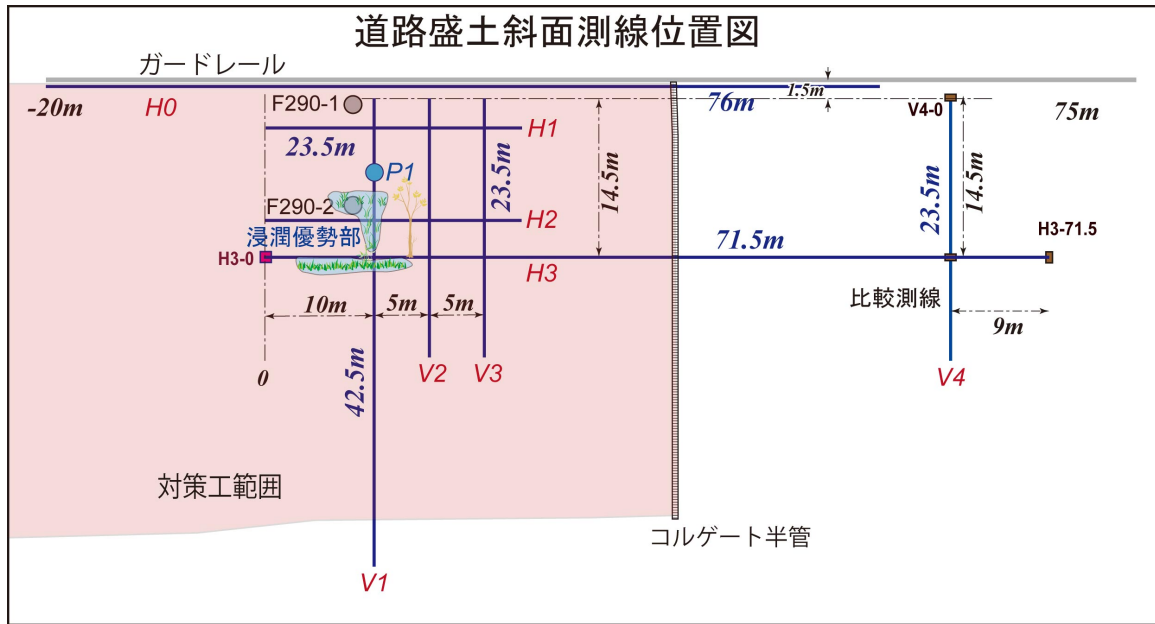


図-8 変状発生道路盛土斜面上の探査測線配置図<sup>8)</sup>

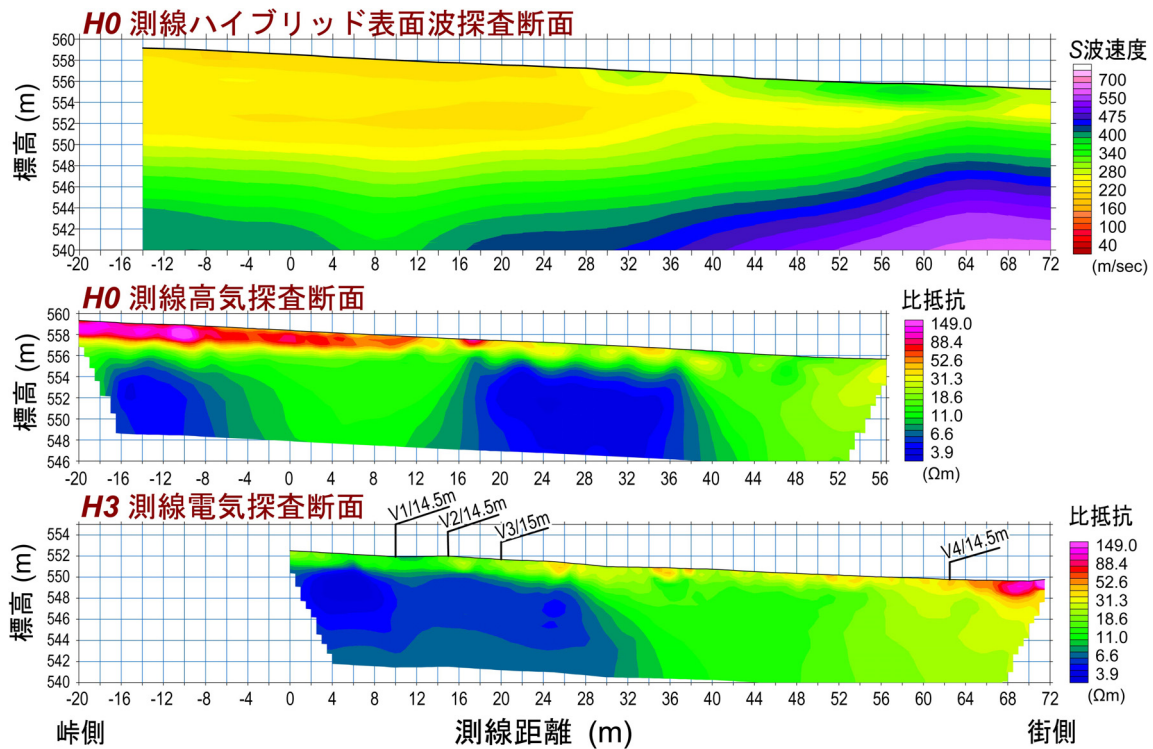


図-9 道路縦断方向測線解析結果断面図<sup>8)</sup>

境界である測線距離38mを境に比抵抗構造が異なること、対策区間ではほぼ5m間隔で表層部に高比抵抗異常が出現していることが特徴的である。対策区間では前述のように水抜き水平孔が10m間隔、排水パイプが2m間隔で配置されており、それらの影響を受け、排水パイプ周辺では含水状態が異なっているものと解釈することができる。測線距離4~16m間は湿潤優勢部に対応するが、相対的に高比抵抗になっている。排水対策工の効果が捉えられている可能性がある。H3測線の比抵抗断面は対策工施工前に実施した結果を示したものであるが、盛土内部構造が測線距離32mを境に大きく異なっており、湿潤部が低比抵抗帯として明瞭に捉えられていた。

この盛土内の不均質構造は、下の図-10に示すように、のり勾配方向盛土横断方向測線断面にも明瞭に捉えられている。すなわち盛土上部に比べて、湧

水・浸潤が認められたのり中部から下部にかけて、低比抵抗帯がごく浅部にまで進展してきていることがわかる。これは、湿潤優勢部を横断するV1測線で特に顕著である。一方斜面表層が乾燥し、低草丈草木類が繁茂していた位置に設定したV4測線での探查結果は、他の測線に比べて全般的に高比抵抗であることがわかる。この測線では2013年積雪期前と2014年融雪期直後に比較測定を実施したが、断面形状はほぼ同じであった。

以上に示すように、山岳道路盛土斜面の内部物性構造把握を目的として本研究で開発した各種要素技術を適用した。その結果、従来は看過されていた道路盛土の縦断方向の不均質構造を低コストでかつ高分解能で把握できることがわかった。またランマー加震のような負荷を加え、それによる地下水の動的応答を捉える方法として高速電気探査を適用したと

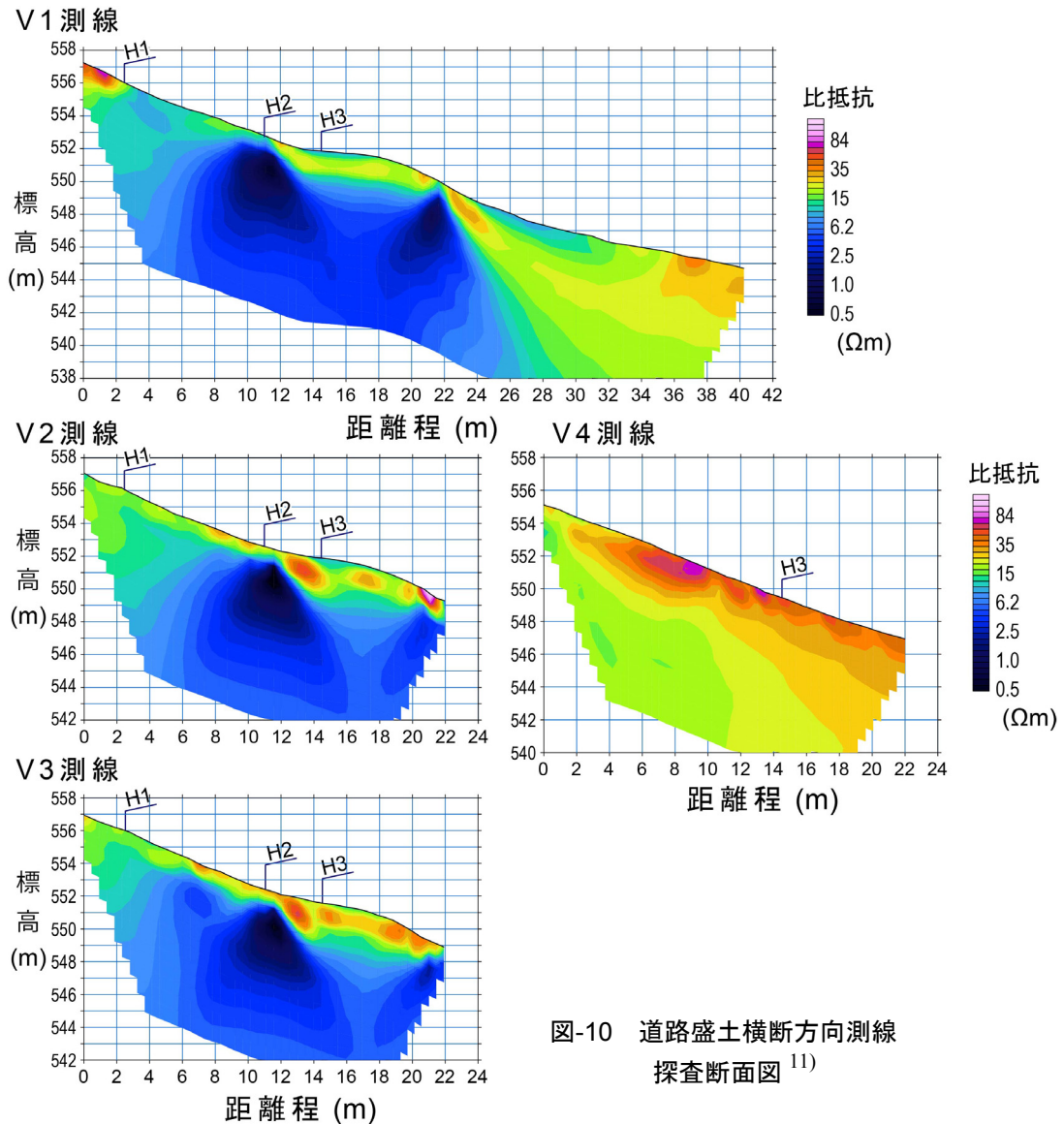


図-10 道路盛土横断方向測線  
探查断面図<sup>11)</sup>



ころ、地下水流動に伴うと解釈することが可能な微小な比抵抗変化を捉えられることがわかった。限定的ではあるが、間隙水圧計による連続モニタリングによっても過渡的な間隙水圧変動を検出できており、これらを組み合わせることで道路盛土斜面内の地下水の空間的かつ動的な挙動を把握できることがわかった。

なお本計測調査にあたっては国土交通省札幌道路事務所計画課佐々木克典前課長および貴田勝太郎現課長に便宜を図っていただいた。また寒地土木研究所岡崎健治主任研究員には現場計測作業を手伝っていただいた。記してここに謝意を表する次第である。

#### 4. まとめ

地震時や強雨時に道路盛土が崩落して交通ネットワークが遮断される事故が頻発したことから、道路盛土の健全度評価、特に原位置で連続的・空間的な内部不均質構造を把握可能な手法の開発と適用への期待が高まってきている。従来盛土斜面で適用されてきた調査・解析手法は、特定断面における単点、あるいは群列土質調査ボーリングと、その断面に対する円弧すべり計算を標準としてきたため、解析の対象とする断面の選定が不適切な場合、安定解析の信頼性が損なわれかねない。空間的な不均質構造の影響の評価に加え、降雨時の斜面内の特定箇所への地下水の集中、地震時の局所的な非排水状態の生成と過剰間隙水圧の発生など、経時変化を捉えることも必要とされる。そこで本研究では、高精度で盛土内物性構造を2次元あるいは3次元で把握することができ、さらに地震時の過渡的応答や長期的な劣化を計測評価することが可能な現地計測の要素技術を開発し、それを実際の道路盛土に適用して検証する、という2段階の調査研究を遂行した。本研究において開発した要素技術として、ハイブリッド表面波探査法、高速電気探査装置の試作と3次元経時変化モニタリングへの適用、高速連続サンプリングによる動的間隙水圧応答モニタリング手法を特筆することができる。ただし前述のように、2011年東北地方太平洋地震の発生により、研究資源の多くを緊急に割り当てることを余儀なくされたため、本研究単独ではこれらの要素技術開発を推進できなかった。そこで関連研究課題とも連動して要素技術開発に努めた。つぎに開発技術・装置類を実際の道路盛土斜面で適用し、その有用性を検証した。その結果、盛土の縦断方向の不均質構造を明瞭に捉えることができた。

またその不均質物性構造は、盛土斜面の地表微候や変状とも整合的であった。

この要素技術開発および現地検証実験により、盛土斜面内の地下水の集中賦存領域とその内部での流動・動的応答を高速電気探査と間隙水圧連続モニタリングによって把握することが可能であることを検証することができた。

道路盛土斜面の安定解析や劣化評価には、場の状態とその時間応答を定量的に記載することが必要不可欠である。本研究で開発した現場計測技術によって、空間的な物性分布とその経時変化を記載できることがわかった。しかし安定解析等に活用するには、計測物性である比抵抗値やS波速度値を動的せん断特性や間隙水圧応答特性等のパラメータに変換することが求められる。従来方法においてもこれらのパラメータは、N値や粒度特性等から間接的に推定されている。したがって同様の推定式を経験的あるいは岩石物理学的に提案することが可能であるが、そのためには土質試験データや岩石力学情報の集積とその統計的検討、現地および室内実験による計測物性と評価物性の関連性の考究必要であり、関連調査研究の進展が期待される。

#### 参考文献

- 1) 釜井俊孝(2011): 谷埋め盛土における地震動と間隙水圧の観測, 日本地すべり学会誌, Vol/ 48, 334-343.
- 2) 稲崎富士(1992): 地盤調査技術の開発, 地下空間の利用技術の開発報告書, 第3分冊, 2-26, 建設省
- 3) 土木研究所・物理探査学会(編) (2013): 河川堤防の統合物理探査—安全性評価への適用の手引き—, 120p, 愛智出版.
- 4) Hayashi, K. and Kita, T., (2010): Applicability of a spatial autocorrelation method (SPAC) using a linear array in comparison with triangular and L-shaped arrays, *Proceedings of the 23rd symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems (SAGEEP2010)*, 543-551.
- 5) 北 高穂・稲崎富士・林 宏一 (2013): 河川堤防での二次元リニアアレイ微動探査の適用性検, 物理探査学会第128回学術講演会講演論文集, 178-181.
- 6) Inazaki, T., (2006): Relationship between S-wave velocities and geotechnical properties of alluvial sediments, *Proceedings of the 19th Annual*

*Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP2006)*, 1296-1303.

- 7) 今村杉夫・稲崎富士・北 高穂・坂西啓一郎 (2013): 符号分割多点同時通電による高速比抵抗探査装置の開発と適用, 物理探査学会第128回学術講演会講演論文集, 203-206.
- 8) 稲崎富士・倉橋稔幸・坂西啓一郎・今村杉夫 (2014): 山岳道路盛土斜面における稠密比抵抗探査, 物理探査学会第131回学術講演会講演論文集, 42-45.
- 9) 稲崎富士 (1996): S波バイブレータおよびサイミックコーンを用いた原位置地盤液状化ポテンシャルの評価(その1): システム構成および現地予察計測結果, 物理探査学会第94回学術講演会講演論文集, 79-82.
- 10) 松尾 修・日下部毅明・上原浩明・関沢元治・佐藤伸吾 (2004): 2003年宮城県北部地震における締固め改良地盤での地震動・間隙水圧記録, 土木学会第59回年次学術講演会講演概要集, 第1部門, 1547-1548.
- 11) Inazaki, T., (2004.06): In Situ Measurement of the Liquefaction Potential of Soils using a Shear-wave Vibrator, *The Proceedings of 1st International Workshop on Active Monitoring in Solid Earth Geophysics (IWAM04)*, 347-354.
- 12) 大日方昭彦・日下部祐基・伊東佳彦 (2014): 北海道の国道斜面における崩壊等の発生誘因分析について, 第57回北海道開発技術研究発表会, 5p.
- 13) 佐野法彦・佐々木克典・芳賀祐介 (2013): 災害復旧対策工に関する設計の考え方について—国道230号 中山峠法面災害の事例—, 第56回北海道開発技術研究発表会, 6p.
- 14) 西村聡志・尾留川晴好・蛭澤秀則 (2014): 一般国道230号 中山峠災害の復旧工事について—応急&本復旧対策の工事報告—, 第57回北海道開発技術研究発表会, 5p.
- 15) 伊東佳彦・倉橋稔幸・日下部祐基・宍戸政仁・大日方昭彦 (2013): 融雪期の道路斜面災害についての一考察—一般国道230号を例として—, 平成25年度日本応用地質学会北海道支部・北海道応用地質研究会合同研究発表会, 4p.

## RESEARCH ON FIELD MEASUREMENTS AND CONTROL METHODS OF ROAD EMBANKMENTS FOR A SEISMIC SAFETY ASSESSMENT

**Budget** : Grants for operating expenses

General account

**Research Period** : FY2011-2014

**Research Team** : Geology and Geotechnical

Engineering Research Group,

Geological Hazards Research Team

**Authors** : INAZAKI Tomio, KURAHASHI Toshiyuki

**Abstract** : Internal inhomogeneities of a road embankment might affect the stability of the embankment slope when attacked by strong earthquake motion or heavy rain fall. The circular failure analysis method has been widely adopted to assess the slope stability and bearing capacity. However, it has been usually applied to only a representative section along which single or an array boring was conducted to estimate shear strengths of the embankment forming materials. Complex structure and divergences of geotechnical properties in lateral direction or different sections are generally ignored because of difficulty in obtaining spatial structural information and the delineation of geotechnical properties. On the other hand, recent large-scale slope failures reminded us the importance of the 3D information of embankments. Therefore, the authors studied new geophysical techniques for identifying near-surface structure of road embankments in this research project. Hybrid surface wave survey method, 3D time-lapse monitoring using a high-speed resistivity measurement tool newly developed in this research, and transient pore water pressure monitoring during dynamic loading on the slope surface were studied and tested at actual road embankment slope.

Dense and high-resolution geophysical surveys were conducted on an actual embankment slope of a mountain road situated in the heavy-snow region, Sapporo, Hokkaido. The surveys consisted of 2D and 3D resistivity measurements, hybrid surface wave survey, portable dynamic cone penetrometer testing, and pore water pressure monitoring. Stabilization work was to be implemented to the target slope mainly purposed for the groundwater discharge. We conducted the field measurements twice before the snow season in 2013, and just after the snowmelt season in 2014 when the slope surface had been scraped and protected with caged riprap. No obvious change was observed in the resistivity profile along the reference line set outside the stabilized slope zone. In contrast, the resistivities distinctively increased in the groundwater discharged zone. Surface wave survey clearly delineated the deepening of embankment thickness at the surface seepage zone in the slope. In conclusion, small scale inhomogeneous structure in the embankment, which might cause irregular distribution in the slope stability, was clearly identified by means of dense and high-resolution geophysical survey using several methods we developed. In addition, the periodic measurement was useful to evaluate the effect of slope stabilization work and deterioration of road embankments.

**Key words** : road embankment, internal geotechnical properties, geophysical investigation, hybrid surface wave survey, high-speed resistivity measurement.