



発表内容

- 0. 道路盛土・堤防の被災実態・不均質性
 - 道路盛土・堤防の老朽化と被災事例
 - 不均質性とそのオーダーに適合した計測評価法の選択の重要性
- 1. ハイブリッド表面波探査技術とは？
 - どのような技術か(特徴)、何をやる技術か(対象と方法)
- 2. ハイブリッド表面波探査の適用事例
 - 縦断方向(2次元)の不均質構造把握の重要性と適用例
- 3. 「ハイブリッド表面波探査」の展開
 - 計測・解析作業の省力化・効率化に向けて

2017/07/27 土研新技術ショーケースin名古屋

0.1 背景: 頻発する道路盛土・河川堤防等の崩壊被害-1

東名牧之原高盛土地震時崩壊(2009/8月)

(NEXCO中日本地震災害検討委員会報告より引用)

由利本荘市切土斜面崩壊(2013/11月)

(由利本荘市 土砂崩落技術調査委員会報告書より引用)

- 「水が集まりやすい地形・地質条件」: 合致箇所をどのように抽出するか?
- 「(スレーキング)しやすい材料使用可能性盛土」: 「可能性」をどのように把握するか?
- 「高盛土(H>10m)」: 原地形面、切盛り施工実態をどのように把握するか?
- 「原切盛り境界面不明」: 調査設計施工データ参照不能時に合致箇所をどのように抽出するか?
- 「代表断面と空間的不連続」: 限定2次元情報から実3次元空間情報をどのように構築するか?
- 「盛土・地山の不均質・高地下水位」: 言うは易し調べるは難し、どのように把握するか?

2017/07/27 土研新技術ショーケースin名古屋

0.1 背景: 頻発する道路盛土・河川堤防等の崩壊被害-2

九州自動車道熊本地震時盛土崩壊(2016/4月)

宅地造成盛土崩壊(1995/1月)

(国土交通省WEB公開資料より引用)

- 「旧河道付替え部」: 基礎地盤内不均質構造をどのように把握するか? 古い地形の把握方法
- 「橋台背面盛土の締固め不均質」: 活線現道での盛土不均質性をどのように把握するか?
- 「予防保全」: 予兆の把握と評価」: 付替え河川護岸の変状と発生箇所
- 「宅地造成等規制法(2006)改正の契機に
- 「水が集まりやすい地形・地質条件」は人為的に形成される
- 横断形状を底面・側面に分けた2次元すべり安定計算手法が提案
- 深い盛土層下部の状態をどのように把握するか?

2017/07/27 土研新技術ショーケースin名古屋

0.1 背景: 頻発する道路盛土・河川堤防等の崩壊被害-3

東日本震災時堤防崩壊(2011/3月)

利根川
Δ=320km; PGA~300 gal
(国土交通省WEB公開資料より引用)

自専道豪雨時盛土崩壊(2016/6月)

- 被災区間延長が長大(数100m~数km)
- 河川堤防本体盛土が集中的被害、周辺既存構造物被害軽微
- 盛土沈下と縦断亀裂群・側方膨み出しが同時複合発生: 堤体下部・基礎地盤上部液状化を強く示唆
- 発生メカニズムの把握と好発区間の抽出法
- 熊本地震後の豪雨負荷によって自専道の盛土が部分的に崩落、周辺地盤もヒービング
- 詳細物理探査適用結果断面を含めた3D空間情報統合表示の効果検証
- 軟弱地盤、低改良率地盤改良、高盛土、強震動、豪雨負荷複合災害

2017/07/27 土研新技術ショーケースin名古屋

0.2 道路盛土・河川堤防の維持管理の技術的課題

持続可能なインフラ管理の取組み
インフラ管理の今後の課題

今後、点検・診断・計画策定・予防保全といったサイクル全体を、必要な技術力を確保しつつ堪能させることが課題。

定期的な点検を実施

病害の発見と診断

長寿命化計画の策定

予算の確保

修繕設計の実施

修繕の実施

- ・ 病害発生の予測・点検技術の高度化
- ・ 橋梁への緊急対応
- ・ 診断技術力の向上・診断結果のDB化
- ・ 長期的視点からの財政措置
- ・ 設計基準の整備
- ・ 修繕技術の開発・修繕結果のDB化

サイクル全体が堪能するための仕組みづくり

- (1) 技術開発
- (2) 技術基準
- (3) 技術教育(技術者・技術力)
- (4) データベース
- (5) 財政措置

(国土省 社整審 道路科会 41st基本政策部会資料)

0.3 空間的不均質構造とその影響評価の重要性

● 従来の盛土安全率計算は空間的一様性を前提

● 従来のボーリングは0.3次元離散的な情報。円弧すべり計算断面は「代表断面」と言えるか？

● 「平均律」, 「代表値」ではなく「最小律」の視点で弱点箇所検出には2次元全域調査が不可欠！

2017/07/27 土研新技術ショーケースin名古屋

0.4 空間的不均質構造の実態-1: 河川堤防

● 河川堤防は縦断方向にも横断方向にも不均質である

2017/07/27 土研新技術ショーケースin名古屋

0.4 空間的不均質構造の実態-1: 道路盛土

● 材料・施工実態を反映して縦断方向にも横断方向にも不均質

2017/07/27 土研新技術ショーケースin名古屋

1. ハイブリッド表面波探査技術

1.1 ハイブリッド表面波探査技術の概要

由来
能動的 (Active) 表面波探査と受動的 (Passive) 表面波探査を両親とし、土研で新たに生み出された表面波探査技術。両親の特長を受け継ぎ、分布域をより拡大する能力を有するP1ハイブリッド雑音であることから「ハイブリッド表面波探査」と命名。

特長
従来の探査技術は、車両通行振動ノイズの影響を受けやすく、道路盛土での適用が困難であった。当該技術は車両通行振動も信号として利用するため活線道路の盛土でも適用可能。さらに深さ50m程度までを解析できるため、従来技術では困難であった宅地盛土造成地でも適用が可能になった。

特徴的識別
二つの位相速度-周波数分散曲線を合体させ、低周波数(深い深度に対応)から高周波数(表層部に対応)帯域までの分散曲線から地盤のS波速度構造を推定する。

活動域
道路盛土、河川堤防、造成地盛土

登録
特開2016-079193

学名
Passive Wave high-Resolution Interferometry measurements: PWRI 探査

分類
界: 自然科学
門: 地球科学
綱: 地球物理学
目: 観測・計測技術
亜目: 物理探査
科: 弾性波探査
属: 表面波探査
種: ハイブリッド表面波探査

1.1 ハイブリッド表面波探査技術の概要 (続)

能動的探査 (Active Survey)
・人工振源
MASW (CMP-CC)
・フーリエ変換→位相シフト+スタック
● 分解能が高いが、探査深度が浅い
● 交通振動に弱い
● 極表層の構造を把握

受動式探査 (Passive Survey)
・常時微動; 交通振動 (+歩行ノイズ)
LAMS (CMP-SPAC)
・フーリエ変換→空間自己相関
● 分解能劣るが、探査深度は深い。
● 交通振動に強い
● 稍深部の構造を把握

ハイブリッド表面波探査
同一測線・同一機器を用いてほぼ同時(連続的)に測定分散曲線・解析結果の結合
● 広帯域の分散曲線取得
● 高分解能でかつ探査深度深い
● 交通量の多い活線道路(路肩)でも適用可能

適用期待分野
● 海岸汀線水没域、河道、都市域マイクロゾーニング

既適用分野
● 線状土構造物の調査、盛土造成地調査

2017/07/27 土研新技術ショーケースin名古屋

1.2 ハイブリッド表面波探査技術の計測・解析過程

- 従来の表面波探査法は振動を測定する手法であり車両通行などによる振動雑音には弱かった。
- 車両通行によって発生する振動雑音の大部分は表面波である。
- 振動発生源がランダム(不規則に通行、大型車もそれなりに混在)であれば、表面波探査の一種である受動的探査法(微動探査)を適用可能。
- 道路天端センター/路肩部に縦断方向に測線を展開して地震計を等間隔で設置。
- 重交通振動にめげず人工振源による能動的表面波探査を実施。
- 受動的表面波探査を実施: 車両通行振動を測定。
- 測線を撤収して次の箇所へ移る。
- データを解析して2次元のS波速度構造断面を作成。
- 盛土・基礎地盤内の脆弱部(低S波速度部)を抽出・アセス。

2017/07/27 土研新技術ショーケースin名古屋

1.3 ハイブリッド表面波探査技術の計測風景

- 上: 地震計の近傍をかけ矢で打撃する。
- 右上: 車の通行時の振動を測定する。
- 右: 交通量が少ない場合は測線のそばを歩き回る

1.4 ハイブリッド表面波探査技術の測定概念図

車両通行振動 能動的起振 車両通行振動

車両振動に屈している

能動的表面波探査記録例

受動的表面波探査記録例

2 sec

32 sec

1.5.1 能動的表面波探査(片親)の技術的課題

距離 (m)

時間 (msec)

千歳川天端測線

欠測区間

能動的表面波探査の技術的課題

- CMP-CC法適用によって空間解像度は向上。
- 交通振動に弱い(とされていた)。
- 探査深度は低平地では15m程度まで。

1.5.2 受動的表面波探査(片親)の特徴と技術的課題

Microtremor

Two-station SPAC

seismometer

seismometer

従来微動アレイ探査

- 4~10点の微動計($f_0=0.1\text{Hz}$ 程度)を円周/三角形にアレイ展開(数10m~数km)。
- 微動到来卓越方向があっても推定可能。

受動的表面波探査の特徴と技術的課題

- SPAC法解析によりにより位相速度推定。
- 探査深度が深い(数m~数km)。
- 従来は1次元の速度構造のみ。
- 微動が全方位から等方的に到来するという前提条件不確実。
- 専用の低周波帯域地震計(高額!)が必要。

数値計算では到来方向が120度程度でベッセル関数にfitting可能。

卓越到来方位が狭小だと高速側に

1.6 ハイブリッド表面波探査のデータ処理解析過程

能動的表面波探査位相速度分散曲線

ハイブリッド合成位相速度分散曲線

1次元S波速度解析結果

受動的表面波探査位相速度分散曲線

2次元S波速度構造断面図

S波速度 (m/s)

深さ (m)

測線距離 (m)

線上等速移動点震源密度分布

線上等速移動点震源密度分布

測線上の地震計からは、通行車両は遠方に位置する時間が長い。

通行車両を遠方の震源と見なすことが可能(95%が入射角 5° 以下!).

すべての地震計の組み合わせでも同じ条件。

位相速度分散曲線を正確に解析できる。

1.7.1 交通振動を利用したハイブリッド表面波探査

線上等速移動点震源密度分布

- 道路上をほぼ等速で移動する車両が振動源。
- 測線上の地震計からは、通行車両は遠方に位置する時間が長い。
- 通行車両を遠方の震源と見なすことが可能(95%が入射角 5° 以下!).
- すべての地震計の組み合わせでも同じ条件。
- 位相速度分散曲線を正確に解析できる。

1.7.2 歩行者振動を利用したハイブリッド表面波探査

● 任意の地震計ペアに対して車両通行振動と同じく等方な波動場の生成が期待される。

● リニアアレイで2D微動アレイ探査が可能になる。

2. ハイブリッド表面波探査技術の適用事例

2.1 従来技術(片親)との比較事例

● 従来技術(能動的表面波探査)では路面下10m程度までがイメージング限界。

● ハイブリッド表面波探査では、路面下約20m、地盤内部の物性構造もイメージング可能。

2.2 熊本地震被災地での適用事例

● 従来技術(能動的表面波探査)では路面下10m程度までがイメージング限界であるにもかかわらず、偽像データに引きずられて断層破砕帯を解釈。

● ハイブリッド表面波探査では、路面下約30mまでイメージングし、「底」があることを確認。

2.3 揖斐川堤防天端道路での適用事例

● 従来技術(能動的表面波探査)では路面下10m程度までがイメージング限界。しかし詳細な構造をイメージングできる。

● ハイブリッド表面波探査では、路面下約50mまでイメージングし、深さ10-30m間に低速度(軟弱)層があることを確認。

2.4 断層構造急変部での適用事例

● 従来技術(能動的表面波探査)では明瞭ではなかった断層による基盤の速度急変部(測線距離70m附近)がハイブリッド表面波探査技術を活用することによって鮮明になった。

3. ハイブリッド表面波探査の今後の展開

3.1 活動域の拡大

- 河道・ため池、水没堤体、海岸汀線などの水域
- 都市域の実振動マイクロゾーニング

3.2 省力化・作業安全性の向上

- 独立型地震計システムによるワイヤレス計測
- 光ファイバDASを用いたタイムラプス長大区間連続自動観測

(Geometrics社WEB公開資料より) (Stanford Univ. WEB公開資料より) (Nordal Seismic社WEB公開資料より)

補:土研保有道路盛土・舗装・河川堤防の現場計測技術

■ (非接触)高周波表面波探査技術

- 非接触で舗装を伝播する表面波を捉えるシステムを開発.
- 高次モード表面波分散曲線インバージョン解析によって、舗装構造に加えて物性も推定できる.
- 2Dの断面解析により舗装変状部の物性断面構造解析も可能.

■ 高速多チャンネル精密測位GPR

- 最高で $\pm 0.8\text{cm}$ 精度で測位可能. 時速80km高速走査可能. 高速移動時にも1m間隔で測位データ受信.
- IMU/傾斜センサ同期で都市域・傾斜地でも測位可能.
- 地表下3m程度までの構造を把握可能.
- 多チャンネル同時受信GPR仕様により3Dで舗装盛土の不均質構造解析が可能.

■ 高速多チャンネル電気探査技術

- 2次元の比抵抗データを1分間隔で繰り返し自動計測可能.
- 3次元の比抵抗データを5分間隔で自動計測可能.
- 不飽和帯への水浸透過程をほぼリアルタイムでイメージング可能.

■ 3次元表示

- 元来3次元的拡がりを持つ実構造を、地表情報だけでなく、地下空間情報を含めて3D表示. 空間的な関係を理解することが容易に.
- 位置情報付きデータであり、CIM等への取り込みと活用が容易.



まとめ:浅部地盤探査とその調査技術

■ **土構造物**:材料・施工時の不均質性が残りやすい.物性構造の局所的異常が安全性に大きく影響.その把握には面的・連続的イメージングが可能な浅部物理探査が最適.

■ **舗装**:材料的には均質(層構造)で.負荷は上面からで変状は路面に出現しやすい.逆に内部欠陥(空洞・路床変形)を捉えにくい.全体としての健全度評価には内部性状把握が不可欠.GPR,高周波表面波探査が有用.

■ **盛土**:材料・施工上の不均質性の影響を最も受けやすい土構造物.内部性状把握にはハイブリッド表面波探査等による連続的・面的計測を!

■ **地盤**:元地形,改変地形,風化層厚,基礎地盤表面起伏の空間的把握が重要.経費的に安価で空間的分布のイメージング可能な物理探査の活用を!

まずは相談を!

- ★ 道路盛土変状箇所詳細調査
- ★ 河川堤防浸透安全性調査
- ★ 海岸浜汀浸食調査
- ★ 補強土壁変状調査
- ★ 道路法面調査
- ★ アースダム健全性調査

問い合わせ先

- 土木研究所つくば中央研究所
地質・地盤研究グループ 物理探査技術担当
(TEL: 029-879-0884)
URL: <http://www.pwri.go.jp/team/geosearch>
- 土木研究所つくば中央研究所 技術推進本部
(TEL: 029-879-6800)



2017/07/27

土研新技術ショーケースin名古屋