

## 河川堤防を対象とした起伏を有する表層地盤における表面波の伝播特性に関する検討

大成建設(株) 正会員 ○宮永 隼太郎  
東京工業大学 環境・社会理工学院 山中浩明

## 1. 目的

河川堤防の安全性評価では近年、複数の物理探査と既存ボーリング結果や被災原因調査及び施工履歴等のデータを加味して総合的に解析する統合物理探査の適用が提唱されている。そのうちのひとつである表面波探査は表面波の分散性を用いて、深度 20m 程度までの S 波速度構造を推定する手法である。表面波探査による位相速度の解析は調査地が水平成層であると仮定しており、地表面に起伏のある地盤には適用できない場合がある。しかし、河川堤防等の盛土の地表面不整形が探査結果にどのような影響を及ぼすかは十分に議論されていない。

本研究では盛土を模擬した複数の地盤モデルにおいて 3 次元差分法を用いて波動伝播の数値実験を行い、得られた計算波形に FK 法を用いて表面波の位相速度と周波数の関係を求めた。そして、それぞれの地盤モデルの解析結果を比較し、表面波探査における水平成層近似が成り立つ条件と適用範囲を評価した。

## 2. 数値実験条件

## 2.1 3次元地盤モデルの作成

一般に河川堤防の法面勾配は 1:2~3 である。本研究では法面勾配を 1:2、高さ・天端幅を 4m とした。モデル b~d は天端直下の速度構造は同じとした。モデル e は実際の物理探査で得られた堤防の速度構造を参考にした。層構造の形状による影響と 1・2 層目の速度コントラストによる影響について比較した。P 波速度  $V_p$  は S 波速度  $V_s$  の 1.7 倍、密度  $\rho$  は 1 層目を  $1600\text{kg/m}^3$ 、2 層目を  $1700\text{kg/m}^3$  とした。Q 値は  $V_s/42$  とした。

## 2.2 差分計算の条件

時間の離散化は 2 次精度、空間の離散化は 8 次精度で弾性体運動方程式を差分化した。各物理量を 1/2 格子ずらすスタッガード格子 (Virieux, 1986)、地表面より上の物性をすべて 0 として地表を表現する Vacuum formulation (Virieux, 1986, Levander, 1988, Graves, 1996) を採用した。震源は堤防天端の地表面に点震源を仮定して中心周波数 20Hz のリッカー波を上下加振した。地盤モデル端部には吸収境界と吸収領域を設け、モデル終端での人工的な反射波の発生を抑制した。また、1 波長あたりに確保する最低のグリッド数は 24 とした。

## 3. モデル間の位相速度の比較

結果の一例を示す。観測測線は一般的な堤防縦断方向の 1 次元アレイ (観測点間隔 1m) と 2 次元アレイ (横断方向・縦断方向ともに 3.75m) を設定した。2 次元アレイで波動伝播方向を考慮し、より正確な位相速度を求めることを目的とした。

## 3.1 層の形状による比較

モデル b~d において 1 層目は S 波速度  $V_{s1}=150\text{m/s}$ 、2 層目は  $V_{s2}=300\text{m/s}$  とし、1 次元アレイの計算波形では 5m 毎に FK 解析した。測線長から、ここでの FK 解析の適用範囲は約 10Hz 以上である。図 3 はモデル a・b の計算波形、図 4 はモデル b のスナップショットである。震源から直接天端を伝播する波と法尻で散乱し、天端へ反射する波が見られた。後者の波が 1 次元アレイ探査での解析に影響を及ぼす可能性がある。1 次元アレイ・2 次元アレイの計算波形

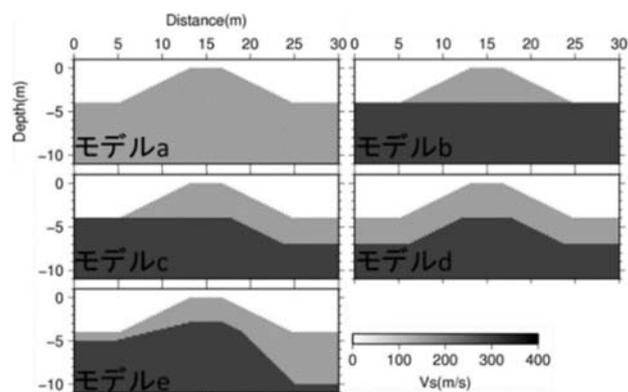


図 1 地盤モデル断面図

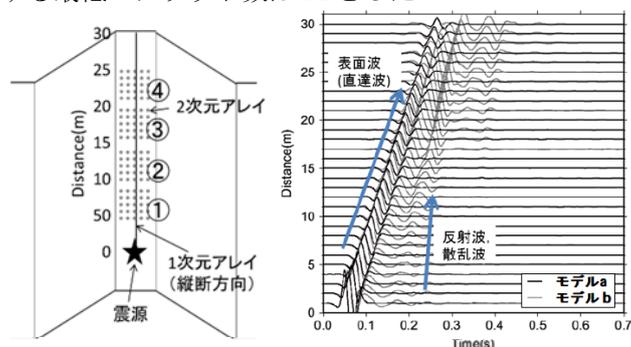


図 2 アレイイメージ

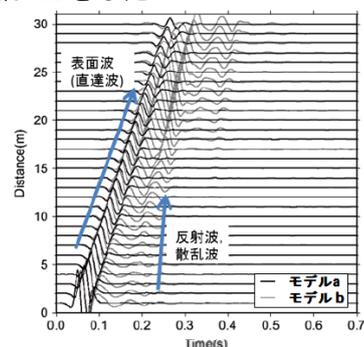


図 3 計算波形 (1次元アレイ)

キーワード 表面波探査, 分散, FK 解析, 位相速度

連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設 技術センター TEL 045-814-7217 FAX 045-814-7258

から求めたFKスペクトルが図5・6である。図5では周波数により理論値との差が見られ、図6(47Hz)では堤坊横断方向の波のスペクトルが見られる。図7は図5から得られた分散曲線である。モデルdは観測点位置によらず、理論値に近い結果が得られた一方でモデルb・cでは震源から離れると理論値との差が大きくなる傾向が見られた。特に20Hz, 40Hz前後で見られ、後者はより顕著である。これにより、層境界が法尻にある場合は散乱波が大きく、位相速度の推定に影響を及ぼすと言える。

### 3. 2 速度コントラストによる比較

モデルb~eにおいて2層目のS波速度 $V_{s2}$ を変えて比較を行った。速度コントラストを考え、 $V_{s2}=375\text{m/s}$ ,  $225\text{m/s}$ とした。 $V_{s2}$ によらず震源に近い波形からは理論値とよく合う結果となったが、震源から遠い波形ではモデルb・cにおいて理論値との差が大きく見られた。モデルeにおいても同様の傾向が見られた。これらから、速度コントラストが2倍程度以上かつ層境界が法尻に近いほど位相速度の推定結果に影響を及ぼす可能性があることが分かった。

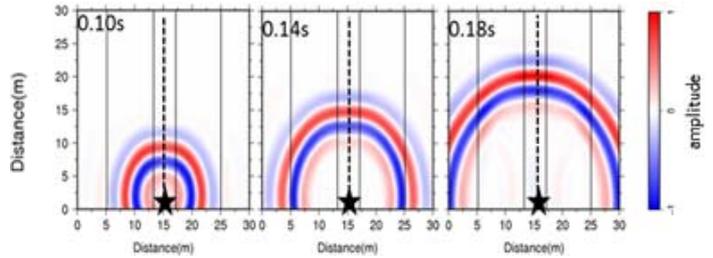


図4 スナップショット (モデルbの波動伝播の様子)

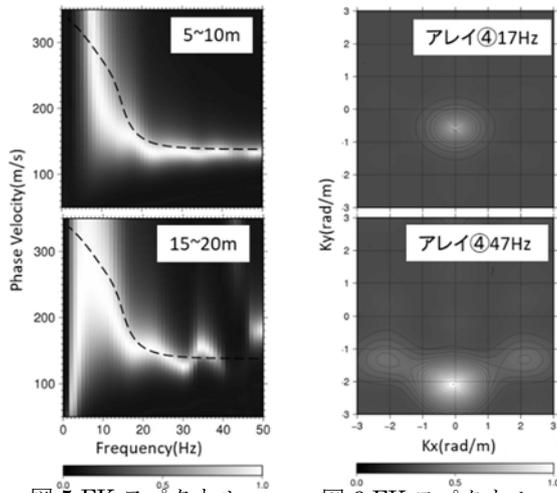


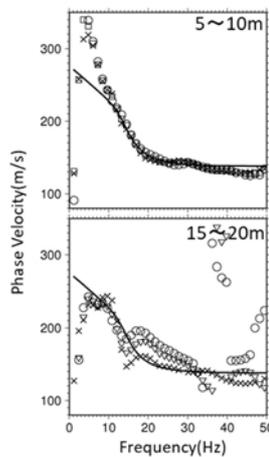
図5 FK スペクトル

(モデルb, 1次元)

点線は理論値

図6 FK スペクトル

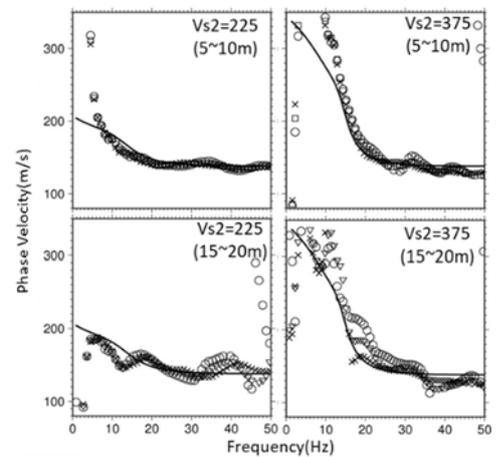
(モデルb, 2次元)



— 理論値 ○モデルb  
▽モデルc ×モデルd

図7 分散曲線

(層形状間の比較)



— 理論値 ○モデルb ▽モデルc ×モデルd

図8 分散曲線

(速度コントラスト間の比較)

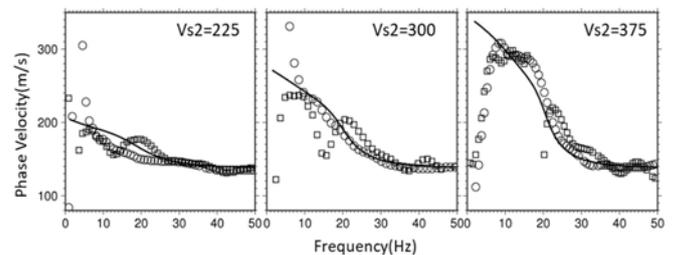
### 4. まとめ

地表面起伏で発生する散乱波により、震源から遠い波形ほど位相速度に変化が見られた。基礎地盤と堤体の速度コントラストが大きくかつ、層境界が法尻に近いほど推定される位相速度に影響を及ぼし、特に高周波ほど影響を受けやすい。しかし、この地盤条件においても、震源から近い波形を用いれば表面波探査は十分適用可能である。また、速度コントラストが大きい場合であっても、層境界が極端に法尻に近い場合でなければ、適用性に影響はないと考えられる。

本論文は、著者のひとりが東京工業大学の修士論文として実施した研究に基づいてまとめたものである。

### 参考文献

- 1) Jean Virieux(1986):P-SV wave propagation in heterogenous media :Velocity-stress finite-difference method, Geophysics, 51(4), 889-901
- 2) Levander A R. (1988):Fourth-order finite-difference P-SV seismograms, Geophysics, 53(11), 1425-1436
- 3) Graves R W. (1996):Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences :Bull Seism, Soc Am, Vol. 86, No. 4, 1096-1106



— 理論値 ○5~10mの波形 □15~20mの波形

図9 分散曲線

(モデルe, 速度コントラストと解析範囲の比較)