

ベンダーエレメント法を用いたせん断波測定の移動床実験への適用

東京大学 工学系研究科 社会基盤学専攻 学生会員 ○福王 翔

東京大学 生産技術研究所 正会員 桑野 玲子

1. はじめに

地盤内部の応力を実測することは、計測機器と土の相互作用を排除できないことから実験・実測共に一般的に難しい。一方、近年要素試験においてBE法を用いた弾性波測定の手法が盛んに研究されてきた^[3]。これは、式(1)のように地盤中を伝わるせん断波速度Vsと土の密度ρ、せん断剛性Gが次式で表されることを利用し、せん断波速度を計測することにより材料の剛性を評価するものである。

$$G = \rho V_s^2 \tag{1}$$

BE(ベンダーエレメント)とは2枚のピエゾ素子を組み合わせ合わせたもので、電圧振動を物理振動に変換し、逆に物理振動を電圧振動に変換する。BEは送受信両方に利用可能であること、サイズが小さく周辺地盤への影響が少ないこと等の利点があるが、模型地盤への適用例は極めて少ないのが現状である。福王ら(2012)により、BE法を模型地盤に適用すると共にトモグラフィ解析を行うことで密地盤の一樣模型地盤におけるせん断波速度分布を推定することができた。本報告では、この手法を移動床実験に適用することで、再分配された応力の評価を試みる。

2. 移動床実験

本研究における移動床実験は海老塚ら(2010)の行ったもの再現した、図1に示す実験装置を用い、底面に設置された5枚の可動床板を上昇・下降させることにより土圧の再配分を行う。移動床には1枚につき荷重計を5つずつ取り付け、床板移動に伴う境界部での土圧変化を計測した。

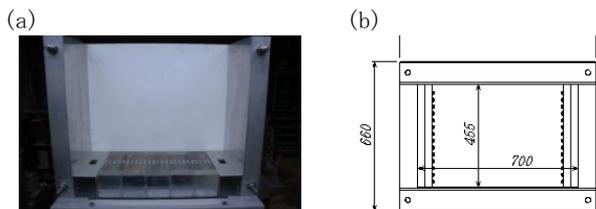


図1 移動床土槽の写真(a)と立面図(b)

3. 弾性波トモグラフィの精度検証

模型地盤周囲にBEを配置してトモグラフィ計測を行うことでBEの各組み合わせにおけるせん断波の伝達時

間データが得られ、これを逆計算することで地盤内部のせん断波速度分布を推定できる。本研究ではトモグラフィ逆解析ソフトとして(株)ダイヤコンサルタントの「E-tomo」を用いた。逆解析によるせん断波速度分布の再現精度及び測定点数の影響を調べるために数値実験を行った。本模型地盤において信号の伝達可能距離である30×40cm^[1]を解析範囲とし、測定点数がそれぞれ24, 39, 59点の場合について計算を行った。図2(a)に示す速度分布モデルに対しまずそれぞれの測定点におけるせん断波の伝達時間データを順解析により求めた。得られたデータに対してE-tomoを用いて逆解析を行うことで元の速度分布モデルを推定した結果のRMS残差を図2(b)に示す。図より測定点数を増やすことでRMS残差は減少し精度の高い結果が得られることが分かる。しかし一方で測定点数の増加に伴ってデータ量が指数的に増加するという問題点もある。図より39点と59点のRMS残差に大きな違いは見られないため、データ処理の煩雑さを考慮して本研究では39点を採用する。

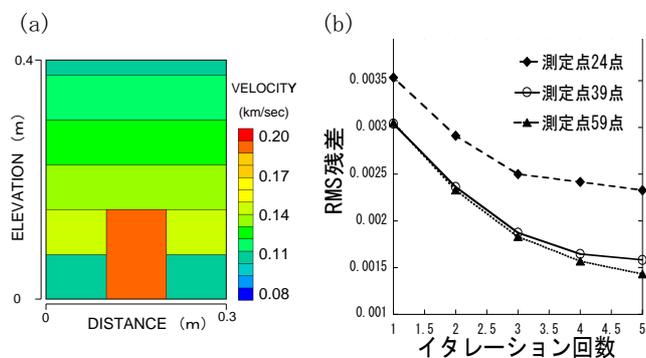


図2 数値実験に用いた速度分布モデル(a)と解析結果のRMS残差(b)

4. 移動床実験への適用

移動床実験の模型地盤中に福王ら(2012)と同様BEを設置してせん断波トモグラフィを行った。まず床板移動前に測定を行い、次に床板の両端2枚ずつを1mm下降させた後に再び測定を行うことにより移動前後の速度構造の違いを推定する。

4. 1 密地盤(相対密度Dr=70%)の場合

解析結果を図3に示す。(a)は移動前、(b)は移動後、(c)は移動後の波線、(d)はスケールである。図より移動前のせん断波速度は上部で遅く下部で速い分布であ

り、重力場での一様地盤をよく再現している。移動後を見ると、せん断波速度は床板中央で高く両端で低い構造になっている。模型実験において床板をさらに10mm まで降下させてすべり線を測定し、せん断波速度の変化量と比較したところ、よく一致した(図6)。

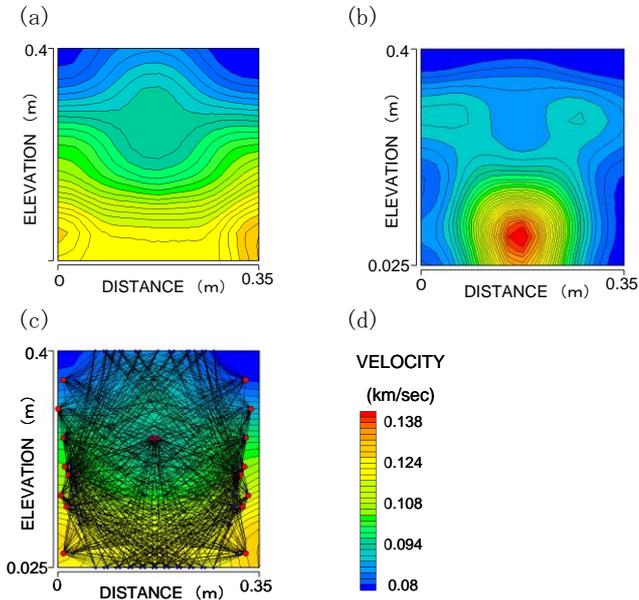


図3 移動前(a), 移動後(b), 変化量(c)の解析結果 (Dr=80%)

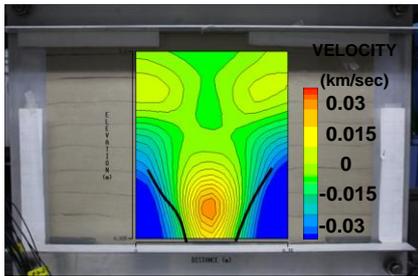


図4 せん断波速度変化量とすべり線の比較

次に解析結果を境界において測定した応力値と比較する。応力 σ はせん断剛性 G と正規化関数 $f(e)$ で表され^[3](式(2)), 正規化関数は間隙比 e の関数である(式(3))。

$$G = 8919f(e) \cdot \sigma^{0.96} \tag{2}$$

$$f(e) = \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \tag{3}$$

解析によるせん断波速度を式(2)(3)により平均主応力に換算した。底面に近い下3行の解析データの応力値とロードセルにより計測した応力値を比較した(図5)。図より変化前は計算と実測でよく一致しているが、変化後の解析値は実際の応力を過小評価していることがわかる。しかし、応力上昇・下降の変化やとの変化位置をよく捕らえられており、応力の再分配を定性的に捕らえることができたと言える。

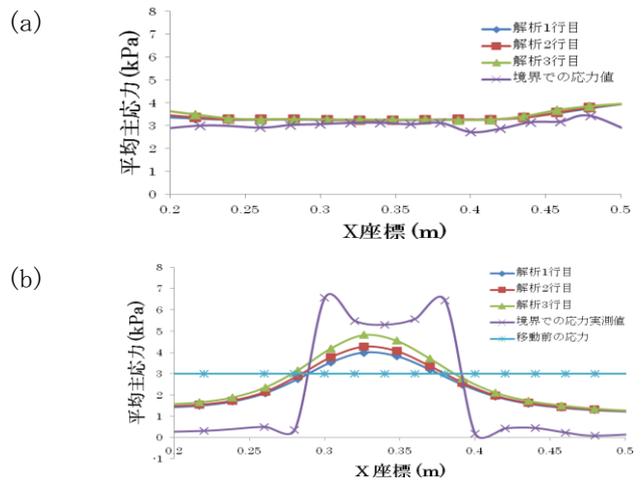


図5 変化前(a)と変化後(b)における計算応力と計測応力の比較

4. 2 緩地盤(相対密度 $Dr=40\%$)の場合

緩地盤に対する解析では図6より妥当な結果が得られなかった。原因として、緩地盤では拘束圧が低く受信信号が微弱であるため、伝達時間の読み取りを行う際の誤差が大きくなってしまふことが考えられる。

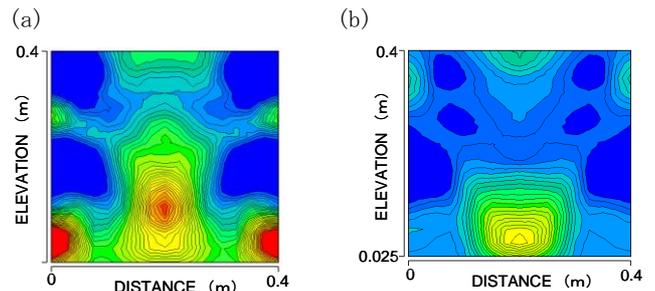


図6 移動前(a)と移動後(b)の解析結果(Dr=40%)

5. まとめ

本研究ではBEを用いたせん断波測定を移動床実験に対して行い変化前後の内部構造を推定した。測定点数を最適化した後にトモグラフィ解析を行ったところ、密地盤では実測値とよく一致する結果が得られ、平均主応力は測定値と定性的に一致した。一方、緩地盤では拘束圧が低く受信信号が微弱であったため地盤の内部状態をよく再現できなかった。

参考文献 [1]福王翔, 桑野玲子, ベンダーエレメント法を用いたせん断波測定の一様地盤への適用, 第47回地盤工学研究発表会, 2012 [2]海老塚裕明, 桑野玲子: 盛土内埋設構造物の作用土圧の評価のための移動床実験, 第45回地盤工学研究発表会, pp. 709-710, 2010 [3]Suwal, L. P and Kuwano, R : Small strain stiffness measurement of sand and gravel using disk shaped piezo-electric transducer, 5th international conference on earthquake geotechnical engineering, 2011