

ベンダーエレメント試験装置系における線形モデルの適用性

秋田大学 学生会員 ○石川光甫 正会員 荻野俊寛 正会員 田口岳志

1. 研究目的・背景

近年、ベンダーエレメント(BE)法は、送信波を系への入力、受信波を出力とした線形系として表現できるとする解釈が一般的になりつつある。本研究は試験装置系が送信 BE, 土供試体, 受信 BE の3つの線形要素からなると考え、その伝達関数を減衰振動および弾性体によってモデル化することで全体系を表現できるとの考えにもとづき、全体系の伝達関数から計算した受信波形と実験から得られた受信波形を比較することで提案するモデルの妥当性を確かめている。

2. 線形系としてのベンダーエレメント試験

BE 試験装置系が線形系であるとき、BE 試験の送信波 $x(t)$ と受信波 $y(t)$ をそれぞれ系への入力、出力とすると、両者には周波数領域において以下の関係式が成り立つ。

$$Y(f) = H(f) \cdot X(f) \tag{1}$$

ここで $X(f)$, $Y(f)$ はそれぞれ $x(t)$, $y(t)$ のフーリエ変換、 $H(f)$ は BE 試験装置系全体の伝達関数を表している。 $H(f)$ が送信 BE, 土供試体, 受信 BE の3つの線形要素からなるとすれば(図-1), それぞれの伝達関数を $H_{be,t}(f)$, $H_s(f)$, $H_{be,r}(f)$ として、式(2)で表すことができる。

$$H(f) = H_{be,t}(f) \cdot H_s(f) \cdot H_{be,r}(f) \tag{2}$$

Sanchez-Saliner et al.¹⁾ は $H_s(f)$ の解析解として、式(3)を与えている。

$$H_s(f) = \frac{1}{4\pi\rho V_s^* 2r} \cdot \left\{ \left[1 + \left(\frac{1}{ja_0} \right) - \left(\frac{1}{a_0} \right)^2 \right] e^{-ja_0} - \left(\frac{V_s^*}{V_p^*} \right)^2 \left[\frac{1}{jb_0} - \left(\frac{1}{b_0} \right)^2 \right] e^{-jb_0} \right\} \tag{3}$$

ここに、 $V_s^* = V_s(1+jD)$, $V_p^* = V_p(1+jD)$, $a_0 = rffV_s^*$, $b_0 = rffV_p^*$ であり、 D は減衰比、 ρ は土粒子密度、 r は波の伝播距離、 V_s , V_p はそれぞれ P 波および S 波速度である。 V_p は土を理想的な弾性体と仮定すれば、ポアソン比 ν と V_s より以下のように表される。

$$V_p = V_s \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{(1-2\nu)}} \tag{4}$$

片持ち梁状に固定された BE の伝達関数が一自由度減衰振動で表現できるとすれば²⁾, $H_{be,t}(f)$, $H_{be,r}(f)$ は式(5)で表される。

$$H_{be,t}(f) = \frac{1}{1 - \left(\frac{f_r}{f}\right)^2 + 2jd_{be}\left(\frac{f_r}{f}\right)} \tag{5}$$

ここに、 d_{be} は BE の減衰比、 f_r は固有振動数である。Lee & Santamarina³⁾ は f_r について、以下の実験式を提案している。

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1.875^4 \frac{E_{be} I}{(\alpha L_{be})^3} + 2\eta V_s^2 \rho(1+\nu)L_{be}}{\rho_{be} b h (\alpha L_{be}) + (\rho_s b^2 L_{be}) \beta} \right]^{1/2} \tag{6}$$

ここに α , β は実験定数、 E_{be} は BE のヤング率、 ρ_{be} は BE の密度、 I は断面二次モーメント、 η は 2、 L_{be} , b , h はそれぞれ BE の長さ、幅、厚さである。式(2)~式(6)を式(1)に代入し、逆 FFT を計算することで、任意の送信波 $x(t)$ に対する受信波 $y(t)$ を計算することができる。計算に用いた各種パラメータの値を表-1 に示す。

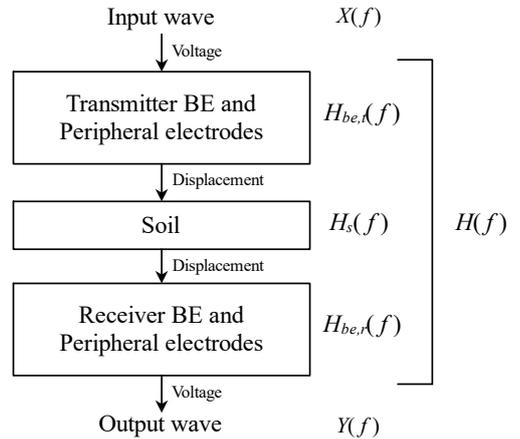


図-1 試験装置系全体の模式図

表1 計算に用いたパラメータ

f_i (kHz)	1	5
ρ (kg/m ³)	1070.2	
V_s (m/s)	45.7	
D	0.03	
r (mm)	119.7	
ν	0.2	
E_{be} (MPa)	3.5×10^3	
b (mm)	12	
h (mm)	1.5	
L_{be} (mm)	5.17	
ρ_{be} (kg/m ³)	7400	
d_{be}	0.13	
α	2.4	
β	1.1	

キーワード 伝達関数 せん断波速度 線形モデル

連絡先 〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1 TEL 018-889-2364

3. 実験

上記の線形モデルによって得られた波形と実験から得られた波形を比較することで妥当性を確かめた。実験に用いた試料は、北海道江別市近郊から採取した江別太泥炭⁴⁾を練返して再構成したものである。直径73.4mm、高さ149.9mmの供試体に対し、 $\sigma=30\text{kPa}$ で三軸等方圧密を行い、3t法による圧密打ち切り後、BE試験を実施した。送信波には1サイクルのsin波およびスイープ波を用いた。スイープ波を用いることで、系全体の伝達関数 $H(f)$ を実験的に求めることができ、また、式(1)から任意の送信波に対する受信波を再構成することができる⁵⁾。

4. 実験結果および考察

通常のBE試験より得られた受信波形とスイープ波を用いた実験結果から再構成した受信波形を図-2 および図-3 に示す。この実験結果の比較から、通常のBE試験の受信波形と再構成した受信波形がよく一致していることが確認できる。 $f_i=1000\text{Hz}$ の受信波形にはゼロクロス点付近にニアフィールドエフェクトによる波形の落ち込みが見られるが、周波数が大きくなると、その歪みはほぼ消失している。また、再構成した受信波ではSN比が大幅に改善されており、電磁ノイズがほぼ完全に除去されている。この結果からスイープ波を用いたBE試験で系全体の伝達関数 $H(f)$ (図-1 参照)を十分な精度で同定することができると分かった。

また、図-2、図-3 に示した再構成した受信波形と式(1)の線形モデルから計算した受信波形を比較して図-4、図-5 に示した。受信波の後半部分では違いが見られるものの、波の到達時間決定に重要な前半部分において両者はよく一致しており、特に、ニアフィールドエフェクトによる波形の歪みがよく再現されている。これにより、パラメータを適切に設定することによって、本研究で提案した線形モデルが実験値をよく再現することが確認できた。

5. 結論

本報告から得られた知見は以下のとおりである。

- ・ベンダーエレメント試験装置系の線形性にもとづいて、送受信ベンダーエレメント系および土供試体系からなる線形モデルを考案した。
- ・線形モデルを用いて計算した受信波と過去に実施した実験の受信波との比較から、考案した線形モデルが実験結果をよく表現しうることを示した。

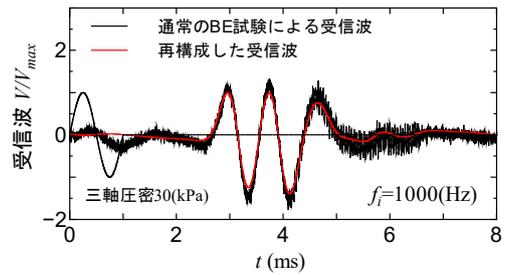


図-2 実験から得られた受信波形 ($f_i=1000\text{Hz}$)

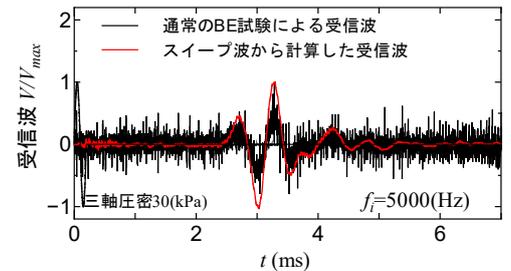


図-3 実験から得られた受信波形 ($f_i=5000\text{Hz}$)

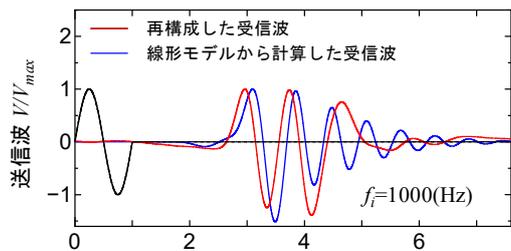


図-4 実験値と線形モデルから計算した波形 ($f_i=1000\text{Hz}$)

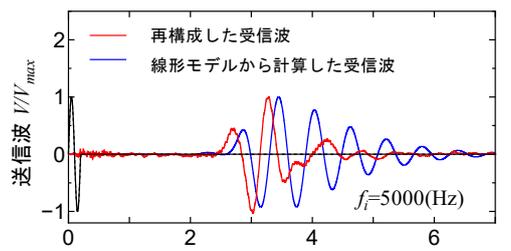


図-5 実験値と線形モデルから計算した波形 ($f_i=5000\text{Hz}$)

【参考文献】 1) Sanchez-Salineró, I. et al.: Analytical Studies of Body Wave Propagation and Attenuation. Report GR, pp. 86-15, 1986. 2) Alvarado & Coop: On the performance of bender elements in triaxial tests, Geotechnique, Vol.62, No.1, pp. 1-17, 2012. 3) Lee & Santamarina: Bender Elements: Performance and Signal Interpretation, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.131, No.9, pp. 1063-1070, 2005. 4) 佐々木ら：大ひずみ域における泥炭の異方性，土木学会東北支部 技術研究発表会，2018(投稿中)。 5) Ogino, T. et al.: A Method for Received Waveform Reconstruction Based on Bender Element Test Using Frequency-swept Signal, Soils and Foundations, Vol.48, No.2, pp. 287-295, 2008.