レーザー変位計およびセルフモニタリングによる

ベンダーエレメントの振動特性の評価

秋田大学 学生会員 〇石川光甫, 正会員 荻野俊寛, 正会員 田口岳志

1. はじめに

ベンダーエレメント(BE)法は得られた受信波の理論的な理解が十分に進んでいないため、S波の到達点の決定が 今もなお難しく,その適用範囲の拡張が求められている.著者らは BE 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(図1)という考えのもと、スイープ波を用いた実験から土供試体系の伝達関数を求め、 これを S 波到達時間の決定に用いることにより BE 法の精度向上を目指している.そのためには送・受信 BE の伝 達関数を全体系の伝達関数から取除く必要がある.本研究は無拘束状態のセルフモニタリング BE の振動特性をレ ーザー変位計およびフィードバック電圧で直接・間接的に測定し,そのために必要な BE 系の伝達関数を同定した. 2. BE 系の伝達関数の測定

図1において BE 試験の送信波 u(t)と受信波 v(t)をそれぞれ系への入力,出力 とするとそのフーリエ変換は U(f), V(f)となり, 系全体の伝達関数は $H_{TOTAL}(f)$ で 表され、以下の関係式が成り立つ.

 $V(f) = H_{TOTAL}(f) \cdot U(f) \quad (1)$

著者らの一人¹⁾はこれまでに, スイープ波を用いて H_{rotal}(f)を実験的に求める手 法を考案している. また, H_{TOTAL}(f)は送信および受信 BE 系の伝達関数 H_{BET}(f), H_{BE.R}(f)と土供試体系の伝達関数 H_s(f)より以下のように表される(図 1).

 $H_{TOTAL}(f) = H_{BE,T}(f) \cdot H_S(f) \cdot H_{BE,R}(f) \quad (2)$ 冒頭で述べたように、本研究は $H_{TOTAL}(f)$ に加えて $H_{BE,T}(f)$ 、 $H_{BE,R}(f)$ を測定するこ とで,式(2)から Hs(f)を実験的に求め,BE 法の精度向上を目指す.これら BE 系の伝達関数を測定する最も単純な方法は、ある入力波に対する出力として、

BEの先端変位 y(t)を測定し、式(3)から求める方法である.しかしながら実際の BE 試験では BE は土中に挿入され るため, y(t)を直接測定することは困難である. そこで, y(t)を測定することなしに BE の伝達関数を求める一つの 方法として,セルフモニタリング BE の利用が考えられる.図 2 はセルフモニタリング BE 系の模式図である.セ ルフモニタリング BE 系では BE 部に入力された電圧 x(t)によって, BE に振動(変位) y(t)が発生し, y(t)に応じた 電圧 z(t)がセルフモニタリング部にフィードバックされる仕組みとなっている(図2右). このとき入力電圧と変位, 変位とフィードバック電圧の間に以下の式が成り立つ.

 $Y(f) = H_{BE}(f) \cdot X(f) \quad (3)$

 $Z(f) = H_{SM}(f) \cdot Y(f) \quad (4)$

ここに, $H_{SM}(f)$ および $H_{BE}(f)$ はそれぞれ,入力電圧と変 位,変位とフィードバック電圧間の伝達関数で,H_{BE}(f) は送信 BE の場合は H_{BE} (f)= H_{BET}(f), 受信 BE の場合は $H_{BE}(f) = H_{BER}(f)$ となる. また,式(3),(4)より式(5)が成 り立つ.

 $Z(f) = H_{SM}(f) \cdot H_{BE}(f) \cdot X(f) \quad (5)$

したがって,式(4)から一旦 H_{SM}を求めれば,式(5)より

入力電圧 x(t)およびフィードバック電圧 z(t)から, y(t)の測定なしに BE の伝達関数 H_{BE}(f)を求めることができる. 3. 実験概要

実験は図2に示すセルフモニタリング BE の下端部を固定し片持ち梁状とし, BE 部に x(t)としてスイープ波およ び sin 波を入力し, セルフモニタリング BE を振動させた. 振動によって生じた BE の先端変位 y(t)およびセルフモ ニタリング部に発生したフィードバック電圧を測定した.入力波はファンクションジェネレータ(FG)により与え, 先端変位はレーザー変位計(KEYENCE LK-H025)を用いて計測した.入力波,先端変位およびフィードバック電圧 はいずれもオシロスコープに入力され,8~64回のアベレージング処理を行なって測定した.なお,セルフモニタ リング BE はエポキシによるコーティングは行なっていない.

4. 結果と考察

4.1 sin 波入力による BE の振動特性

図 3~6 に sin 波を入力した場合の代表的な波形を示す.図 3,4 は送信用 BE,図 5,6 は受信用 BE を用いた場 合の結果である.







図2 セルフモニタリング BE 系

レーザー変位計による先端変位はいずれの場合も 入力波とほぼ等しい周波数で振動しているが、その波 形は入力波と一致しておらず、sin 波入力後も振動が 継続している.これは実際の BE の変形が入力波形に 完全に追随せず、過渡的な減衰振動をすることを表し ている.これは送信用 BE において両者がほぼ一致す るという、これまで他の研究者がとってきた仮定^{例えば} ²⁾と大きく異なる.入力波の振幅が等しいにも関わら ず、周波数 20kHz の場合、先端変位の振幅は 2kHz の 場合よりもかなり小さく、実際の BE の変位振幅は周 波数に強く依存することがわかる.周波数を段階的に 変化させて行なった同様の実験から、本研究で使用し た BE の振動特性として、先端変位は 3kHz 付近で極 大となること,およそ 10kHz 以上では振幅は極端に小 さくなることが分かった.

これに対し、セルフモニタリングによるフィードバ ック電圧は、先端変位と同様な減衰振動を呈している ものの、振幅は±1V 前後と周波数によらずほぼ一定 となっている.実際の先端変位は 20kHz の場合(図 4, 6)、2kHz の場合に比べて約 1/3 程度であったことから、 セルフモニタリングでは高周波数側で実際の変位 がより増幅されていることがわかる.

4.2 BEの伝達関数

図 7,9は入力波をスイープ波とした場合の実験 結果である. スイープ波は幅広い周波数成分を連続 的に含んでいるため、上記の実験で得られた振動特 性を連続した周波数で得ることができる. これらの 波形のフーリエ変換から、式(3)、(4)より、伝達関 数 H_{BE}(f), H_{SM}(f)が得られる.図 8,10 はこれらの 伝達関数のフーリエ振幅スペクトルを示している. これらはそれぞれの系への入力に対する出力の増 幅率が周波数に対してどのように変化するか、を 表しており, H_{BE}(f)の場合, 入力電圧 X(f)に対する 先端変位 Y(f)の増幅率, H_{SM}(f)の場合, 先端変位 Y(f) に対するフィードバック電圧 X(f)の増幅率を表し ている. H_{BE}(f)はおよそ 3kHz でピークを示してい る. これは sin 波を用いた実験結果と一致する. ピ ーク点での増幅率は送信用 BE で約 1.0, 受信用 BE で約 0.3 であり,送信用 BE の方が 3.3 倍大きな変



位を示している. これは送信用(パラレル型)と受信用(シリーズ型)で BE の分極方向が異なるためであると考えられる. 20kHz 付近に小さなピークはあるものの, ピーク点より高い周波数範囲では増幅率はおおむねピーク時よりも2オーダー小さい. 一方, *H_{SM}(f*)の増幅率は周波数がおよそ 10kHz 以下では最大でも5倍程度であるのに対し, 20kHz 以上の範囲では約10倍~100倍以上となっており, sin 波入力時の BE の振動特性が伝達関数からも裏付けられた. 5. 結論

大気中にある無拘束状態のセルフモニタリング BE に対し,直接的および間接的に観測された振動特性およびス イープ波を用いて測定した伝達関数から以下の知見を得た.

・BE 先端変位の挙動は入力波と一致しないことが示された. sin 波入力を受けた BE は減衰振動を呈することが確認された. これは特に送信 BE において, 従来の多くの研究者が仮定している振動特性とは異なるものであった.

・フィードバック電圧の波形は BE 先端変位の挙動と一致しないことが示された.およそ 10kHz 以下の周波数範囲 では先端変位と比較的一致するが、それ以上になると差が拡大し、20kHz 以上では大きく異なることが示された.

【参考文献】1) Ogino et al.: A method for received waveform reconstruction based on bender element test using frequency-swept signal. Soils and foundations 48 (2), 287–295, 2008. 2) Wang et al.: Measurement biases in the bender element test. J. Geot. and Geoenv. Eng. 133 (5), 564–574, 2007.