

ベンダーエレメント試験の受信波再現性におよぼす供試体条件・エレメント寸法の影響

秋田大学 学生会員 ○大瀧 淳司
 同上 正会員 荻野 俊寛
 同上 同上 高橋 貴之
 同上 同上 及川 洋

1. はじめに

筆者らはベンダーエレメント(以下 BE)試験において、試験装置系の周波数応答を利用して任意の送信波に対する受信波をシミュレートする手法を提案し、TSP¹⁾などのスイープ波を用いた BE 試験からの周波数応答を同定することによって、任意の送信波に対する受信波系を計算によって求めることが可能であることを示した²⁾。本報告は供試体条件、BE 寸法が計算結果の再現性に及ぼす影響を検討している。

2. 実験概要

実験は BE を組み込んだ圧密容器、三軸試験装置による BE 試験であり、試料には豊浦砂および、秋田、北海道より採取した泥炭を用いている。所定の圧密応力で圧密を行い、3t 法により圧密を打ち切ったのち、BE 試験を行い送・受信波形を観測している。BE 試験では以下に示す 2 種類の実験を行っている。1. 所定の振動数の sin 波(1 波長分)を送信波とした BE 試験を実施し、受信波を観測する。以後、この受信波を「実験値」と呼び、後述する「計算値」との比較に用いる。2. 以下に示す式によって表されるスイープ波を送信波とした BE 試験から受信波を観測する。

$$X(k) = \begin{cases} \exp(im\pi k^2 / N^2) & 0 \leq k \leq N/2 \\ X^*(N-k) & N/2+1 \leq k \leq N \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{ただし } f = k / N \cdot f_s, \quad 1 \leq k \leq N/2$$

ここに、 $X(k)$ はスイープ波のフーリエ変換、 f は離散化した周波数、 m は整数、アスタリスクは複素共役を表す。以後、式(1)によって表されるスイープ波を TSP と呼ぶ。実験 2. は任意の送信波に対する受信波を計算するのに必要な試験装置系の周波数応答(インパルス応答)を同定するための実験である。本報告では式中のパラメータは $f_s = 20,100\text{kHz}$ 、 $N = 2048,4096$ 、 $m = 150$ とした。2 種類の実験後、スイープ波による実験 2. の結果をもとに実験 1. で送信した送信波に対応する受信波形を計算によって求めた。これを「計算値」と呼ぶ。この計算値と実験値の一致度を BE サイズ、圧密応力、供試体高さ、試験装置が異なる場合について比較することにより、計算値の再現性におよぼすそれぞれの影響を検討する。計算についての詳細は参考文献の 3)を参照されたい。なお、波形の送信・計測・保存は DA および AD コンバータを組み込んだ PC によって行っている。

3. 実験結果および考察

図-1 は代表的な TSP の送・受信波形およびパワースペクトルを示している。パワースペクトルから送信波は周波数特性が全域でフラットであり、受信波は 4kHz 付近にピークをもち 10kHz 以上ではほとんど強度を持っていないことがわかる。これはこの BE 試験装置系が 4kHz 付近の周波数にはよく応答するが、10kHz 以上の周波数にはほとんど応答しないことを示している。後述のようにこのスペクトルは BE サイズ、圧密応力などの条件によって変化する。

図-2 は同一の圧密容器において 2 種類の BE 寸法の受信波形再現性を比較したもので、BE 寸法が大きい場合(高さ 13mm×幅 11mm×厚さ 0.5mm)と BE 寸法が小さい場合(高さ 3.62mm 幅 11mm 厚さ 0.5mm)について比較している。図-2a は TSP の受信波のパワースペクトルを示しており、図-1 に示す受信波のスペクトルに相当する。図-2b、図-2d は送信波の波形を示しており、図-2c、図-2e はその送信波に対する受信波の実験値と計算値を比較している。周波数 1kHz、5kHz の sin 波 1 波長を送信した場合の受信波形の再現性を比較すると、BE 寸法が大きい場合、BE 寸法が小さい場合ともに受信波形が良好に再現されており、再現性に大きな差異は無いことがわかる。BE 寸法が大きい場合・小さい場合において実験 2. によって求めたスイープ波の受信波のパワースペクトル(図-2a)を比較すると、BE 寸法が大きければ比較的

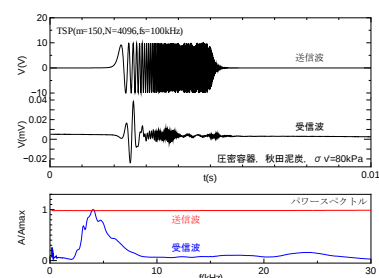


図-1 スイープ波の送受信波形

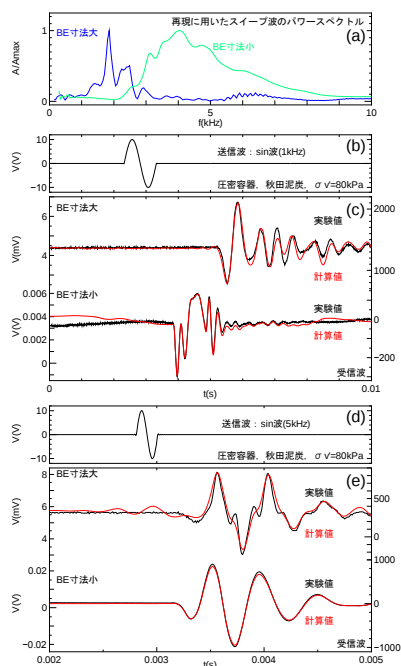


図-2 受信波の計算値に及ぼす BE 寸法の影響

低周波でスペクトルがパワーを有し、BE 寸法が小さければ比較的、高周波でスペクトルがパワーを有することがわかる。これは BE の寸法が小さければ BE は短周期で振動し、寸法が大きければ長周期で振動していることを意味している。

図-2 と同様に図-3 は同一の圧密容器・供試体高さの場合について、圧密応力の違いによる受信波再現性を比較したものである。周波数 5kHz の sin 波 1 波長分送信した場合、二種類の圧密応力において、受信波形は良好に再現できており、受信波形の再現性に大きな差異は無いことがわかる。再現に用いたスイープ波のパワースペクトルを比較すると、200kPa にて圧密した場合は 150kPa にて圧密した場合に比べてスペクトルが高周波でパワーを有していることがわかる。

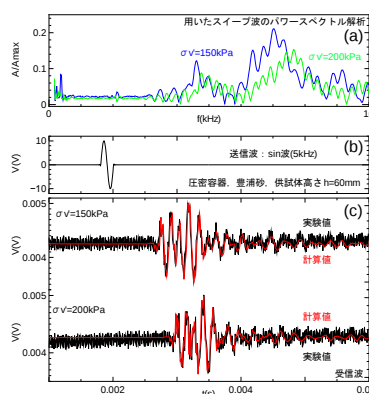


図-3 受信波の計算値に及ぼす圧密応力の影響

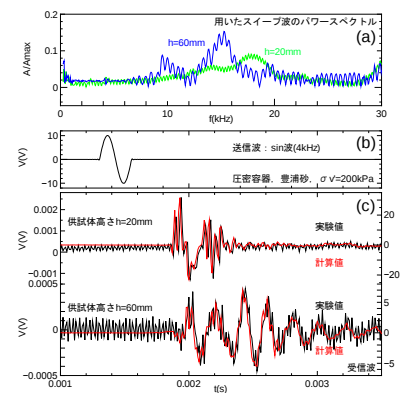


図-4 受信波の計算値に及ぼす供試体高さの影響

同様に図-4 は同一の圧密容器・圧密応力の場合について、供試体高さの違いによる受信波再現性を比較したものである。周波数 4kHz の sin 波 1 波長分送信した場合、供試体高さが 20mm の場合、60mm の場合ともに受信波形を概ね再現できているが、供試体高さ 20mm の場合は実験値の振幅が $\pm 2\text{mV}$ であるのに対して、60mm の場合は実験値の振幅が $\pm 0.5\text{mV}$ であり、供試体高さ 60mm の場合の方が実験値の電圧が低くノイズの影響を受けていることがわかる。これは供試体高さが大きくなることによって埋設されている送・受信 BE 間の距離が大きくなり送信波が受信 BE に到達するまでの減衰が大きくなっていると考えられる。再現に用いたスイープ波のパワースペクトルを比較すると、供試体高さ 20mm の場合は 60mm の場合に比べてスペクトルが高周波でパワーを有していることから送・受信 BE 間の距離が小さくなる程、高周波でスペクトルがパワーを有していることがわかる。

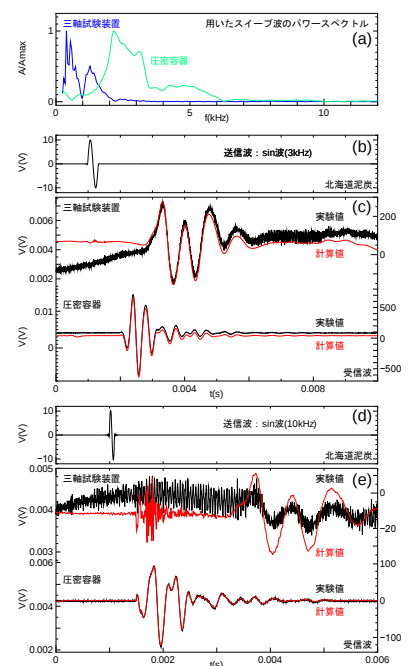


図-5 受信波の計算値に及ぼす試験装置の影響

図-2 と同様に図-5 は同一の試料において圧密試験装置が圧密容器の場合と三軸試験装置の場合について受信波再現性を比較している。圧密容器の場合、周波数 3kHz、5kHz の sin 波を送信した場合の受信波形の再現性を比較すると、ともに受信波形が良好に再現されていることがわかる。また、三軸試験装置の場合については周波数 3kHz、5kHz の sin 波を送信した場合ともに実験値と計算値の一致度が低いことがわかる。しかし、三軸試験装置の場合は、実験値は低周波ノイズによる波形のうねりが見られるが、計算値ではこのうねりが解消されている。受信波のピークは実験値とほぼ一致していることからノイズが多い環境ではむしろ直接測定した実験値よりも計算値の方が有効であると思われる。またスイープ波の受信波のパワースペクトルを比較すると、供試体の周囲が剛体である圧密容器は三軸試験装置に比べて高周波でパワーを有していることがわかる。

4. 結論

本報告から得られた知見は以下の通りである。

1. ベンダーエレメント試験装置の伝達関数はベンダーエレメント寸法、圧密応力、供試体側方の境界条件によって変化するが、TSP を用いることでおおむね良好に受信波形を再現することが出来る。
2. TSP を用いて再現した受信波形は実際の受信波形よりもノイズの影響を受けにくいことから、ノイズが多い測定環境下において受信波形を得る有効な手法となりうる。

謝辞

本研究の一部は第二著者に対する科研費(若手研究(B) 課題番号 19760322)の補助によって行われたものである。ここに記して謝意を表す。

【参考文献】1)Aoshima,N.:Computer-Generated pulse signal applied for sound measurement,*Journal of the Acoustical Society of America*,Vol.69,pp.1484-1486,1981.
2) 荻野俊寛, 及川 洋, 三田地利之: ベンダーエレメント試験装置系のインパルス応答を利用した泥炭のせん断波速度の評価, 地盤工学会北海道支部創立 50 周年記念シンポジウム論文集, pp.71-76,2006. 3)OGINO,T., MITACHI,T., CHAN,K., OIKAWA,H.and TSUSHIMA,M.: A Method for Received Waveform Reconstruction Based on Bender Element Test Using Frequency-swept Signal,*Soils and Foundations*, Vol.48, No.2, 2008.