

研究種目： 若手研究(B)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号： 19760322  
 研究課題名（和文） 室内弾性波試験におけるインパルス応答の同定と受信波形のシミュレーション  
 研究課題名（英文） Impulse response identification and received waveform simulation on laboratory elastic wave tests

## 研究代表者

荻野 俊寛 (OGINO TOSHIHIRO)  
 秋田大学・工学資源学部・講師  
 研究者番号： 80312693

研究成果の概要：代表的な室内弾性波試験であるベンダーエレメント試験において、スイープ波を送信することで試験装置系のインパルス応答が同定可能であることを示した。また、同定したインパルス応答と任意の送信波との畳込みによって、任意の送信波に対する受信波形が再現可能であることを示し、再現した受信波形から十分な精度でせん断波速度を評価できることを示した。加えて三軸試験装置および圧密試験装置による実験結果から、本手法が土の種類や試験装置によらず適用可能であることを示した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,000,000	0	2,000,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,800,000	240,000	3,040,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：ベンダーエレメント試験，インパルス応答，伝達関数

## 1. 研究開始当初の背景

室内弾性波試験の一種であるベンダーエレメント(以下 BE)試験は土供試体中にせん断波を発生させ、供試体中を伝播する波の伝播時間と距離から、せん断波速度を求める試験である。この試験は室内弾性波試験の中でも簡便なうえ、三軸試験装置や圧密試験装置などに付加的に組込んで利用できるメリットから、国内外で徐々に浸透してきているが、この試験にはせん断波速度を求めるのに必要な波の伝播時間を適切に決定することが難しいという大きな問題がある。そのため実際には多数の異なる送信波形をあらかじめ準備しておき、実験時にはこれらすべての送

信波に対する受信波形を測定し、実験後にその中から適切な伝播時間を経験に基づいて取捨選択ことが頻繁に行われている。しかし、この方法は多数の送受信波記録に時間と労力を要すうえ、必ずしもあらかじめ準備した送信波形の中に適切な伝播時間が得られるという保証はなく、効率性、確実性に欠ける方法となっている。

そこで応募者はベンダーエレメント試験装置をひとつの線形系としてとらえ、系のインパルス応答を利用してこの作業の効率的かつ確実に行う手法を考案した。もともとインパルス応答はインパルス(理想的なパルス波)を送信した場合の受信波に相当するが、理

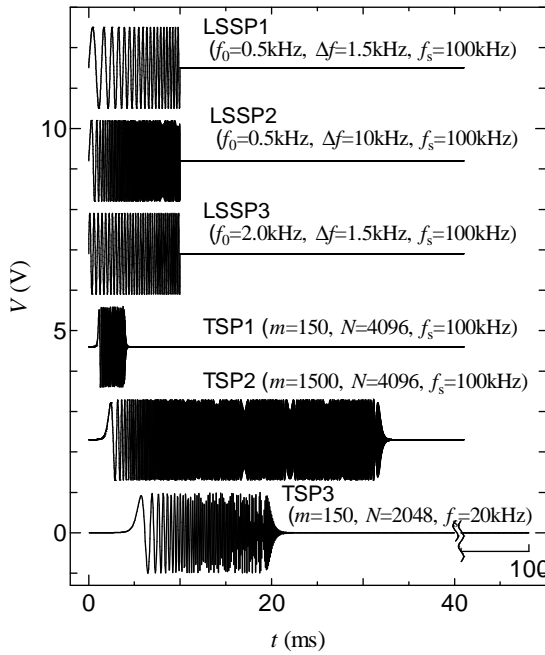


図-1 式(2)および式(3)によるスイープ波の時刻歴

論上、任意の入力に対する応答を求めることができる特徴も持っている。応募者はこの性質に着目し、実験から得られたインパルス応答を用いて、室内弾性波試験の任意の送信波に対する受信波形を数値計算によってシミュレートすることが可能であると考えた。このシミュレーションによって、実験で求めたひとつのインパルス応答から、その状態においてあらゆる送信波を送信した場合の受信波形を実験後に検証することができる。そのため、適切な伝播時間を求めるため様々な波形・振動数の送信波に対する受信波形が多数必要となるベンダーエレメント試験の作業効率化に有効であると考えた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は以下の項目を実験的に明らかにすることである。

- (1) ベンダーエレメント試験装置をひとつの線形系とみなすことができ、インパルス応答が同定可能であること。
- (2) インパルス応答を用いて任意の送信波に対する受信波形が数値計算によってシミュレート可能であること。また、その結果が実験結果と一致すること。
- (3) 様々なベンダーエレメント試験の実施環境においてこの手法が適用可能であり、提案するシミュレート手法に一般性があること。

## 3. 研究の方法

研究フローは、はじめに提案する手法によって受信波形のシミュレートが可能かどうか既存の装置を利用して検討し、次に様々な試料や他のベンダーエレメントを組込んだ装置でもその手法が適用可能か、その一般性を検証するという二段階のプロセスからな

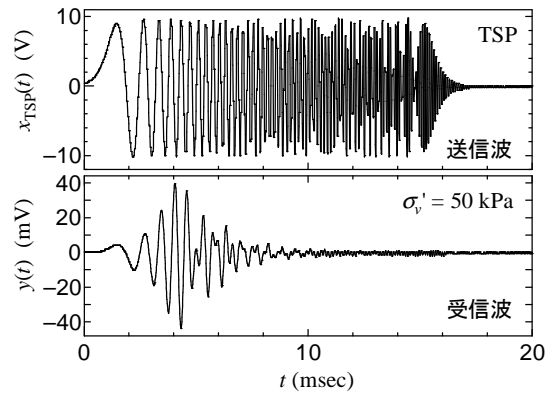


図-2 TSPによる送・受信波の時刻歴

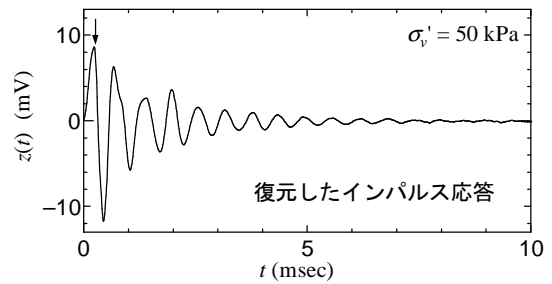


図-3 復元したインパルス応答(σ<sub>v</sub>'=50kPa)

る。各過程の詳細は以下のとおりである。

- (1) 線形性の確認
- (2) スイープ波の設計とインパルス応答の同定
- (3) 受信波形のシミュレートおよび実験結果との比較
- (4) 異なる試料による適用性の検証
- (5) 異なる試験装置での適用性の検証
- (6) スイープ波の設計パラメータ最適化

## 4. 研究成果

### (1) 理論

一般にこのような線形系においては入力と応答の関係は式(1)で示される畳み込みによって表わすことができる。

$$y(t) = \int_0^t x(\tau) z(t-\tau) d\tau \quad (1)$$

ここに、 $y(t)$ 、 $x(t)$ はそれぞれ系に対する応答および入力の時刻歴、 $z(t)$ は系のインパルス応答である。本研究ではの同定に式(2)および式(3)で示される2種類のスイープ波を用いた。

$$x(t) = \begin{cases} A \sin 2\pi(f_0 + t/t_t \cdot \Delta f)t & 0 \leq t \leq t_t \\ 0 & t_t \leq t \leq N\Delta t \end{cases} \quad (2)$$

ただし、 $t = k\Delta t$  ( $k=0,1,2,\dots,N$ )

ここに、 $x(t)$ はスイープ波の時刻歴、 $A$ は振幅、 $f_0$ は初期周波数、 $\Delta f$ は周波数幅、 $t$ は離散化した時間、 $t_t$ はスイープ波の継続時間、 $\Delta t$ はデータの送信間隔、 $N$ はデータ数である。

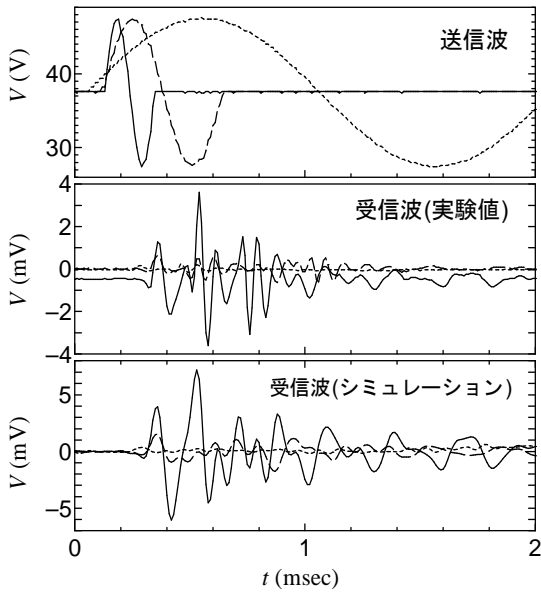


図-4 受信波形の実験値と計算値の比較(一次元圧密, NSF 粘土,  $\sigma_v'=150\text{kPa}$ )

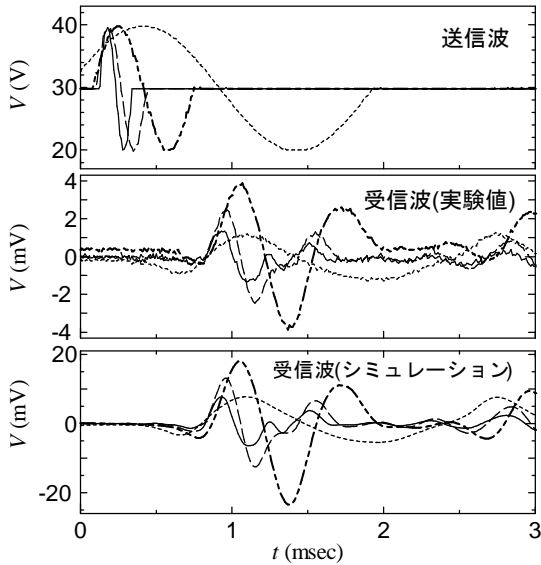


図-5 受信波形の実験値と計算値の比較(等方圧密, 秋田泥炭,  $\sigma_v'=300\text{kPa}$ )

$$X(k) = \begin{cases} \exp(im\pi k^2 / N^2) & 0 \leq k \leq N/2 \\ X^*(N-k) & N/2+1 \leq k \leq N \end{cases} \quad (3)$$

ただし,  $f = k / (N \cdot \Delta t)$   $1 \leq k \leq N/2$

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, 前者を LSSP, 後者を TSP と呼ぶ. 図-1 は代表的な LSSP および TSP の時刻歴波形を示しており, 式中のパラメータを変化させた 6 種類の例を示している. BE 試験装置系のインパルス応答  $z(t)$ を同定するには, 畳み込み演算がフーリエ変換の積と同値であることを利用して, 式(4)によって  $z(t)$ のフーリエ変換  $Z(f)$ を求め,

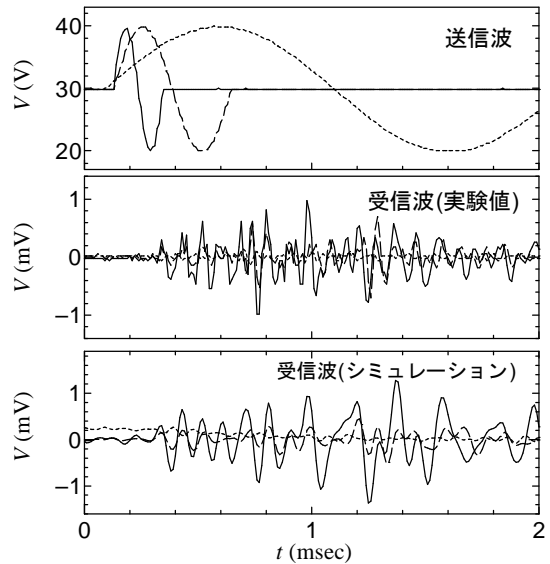


図-6 受信波形の実験値と計算値の比較(一次元圧密, 豊浦砂,  $\sigma_v'=150\text{kPa}$ )

これを逆フーリエ変換することで  $z(t)$ を求める.

$$Z(f) = X(f) \cdot Y(f) \quad (4)$$

ここに,  $Y(f)$ は受信波のフーリエ変換である. また, 任意の送信波に対する受信波形は式(5)によって  $Y(f)$ を求め, これを逆フーリエ変換することで得ることができる.

$$Y(f) = Z(f) \cdot X(f) \quad (5)$$

ここに,  $X(f)$ は送信波に用いる任意の波形のフーリエ変換である.

## (2) 実験

実験は BE を組込んだ三軸試験装置および圧密試験装置による BE 試験であり, 試料には豊浦砂, NSF 粘土および秋田市郊外より採取した泥炭を用いている. 所定の圧密応力で供試体を圧密し 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. 式(2)および式(3)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. 実験では式(2)および式(3)中のパラメータを変化させ, 図-1 に示すように波形や周波数特性の異なるスイープ波を数種類作成し, これらを用いて BE 試験を行っている. これらの実験後, これらの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シミュレートする. これを「計算値」と呼ぶ. この計算値と実験 1. による実験値を比較することで, それぞれのスイープ波による計算値の再現性を検討する.

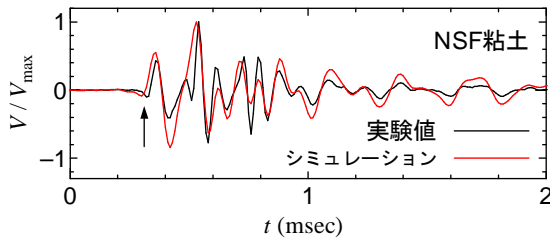


図-7 正規化した受信波形の比較(一次元圧密, NSF粘土,  $\sigma_v' = 150\text{kPa}$ )

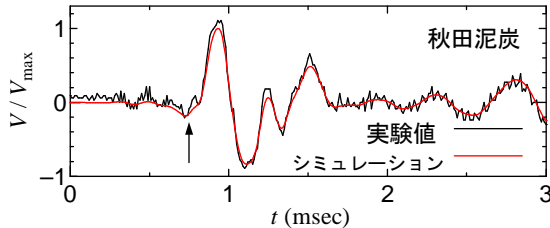


図-8 正規化した受信波形の比較(等方圧密, 秋田泥炭,  $\sigma_v' = 300\text{kPa}$ )

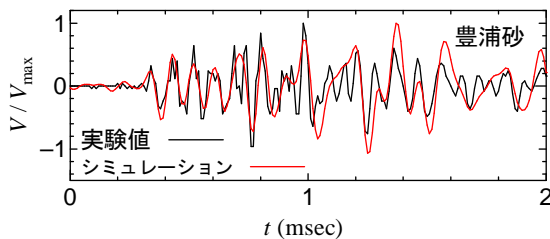


図-9 正規化した受信波形の比較(一次元圧密, 豊浦砂,  $\sigma_v' = 150\text{kPa}$ )

### (3) BE 試験装置系のインパルス応答

図-2 は TSP を用いた BE 試験の代表例であり, 圧密容器内で  $\sigma_v' = 50\text{kPa}$  で圧密した秋田泥炭について送・受信波形を示している. また, 図-3 は式(4)によって図-2 の送・受信波形から復元したインパルス応答の時刻歴を示している. 復元したインパルス応答の波形は減衰振動しており, 従来実施されてきた(例えば矩形波を送信波とした)一般的な BE 試験の受信波形と近い形状を示している. これは前述のように単位パルスを送信した場合の受信波, というインパルス応答の物理的意味から考えても妥当なものであると考えられる.

### (4) インパルス応答を用いた受信波形の再現および再現手法におよぼす試験装置・試料の影響

図-4 は圧密容器内で一次元圧密した粘土供試体の代表的な受信波形について, 計算値と実験結果を比較したもので, 上段には送信波の時刻歴, 中段には実験から得られたそれぞれの送信波に対する受信波形, 下段にはそれぞれの送信波に対する受信波のシミュレーション結果を示している. また, 図-5 および図-6 はそれぞれ豊浦砂および秋田泥炭について図-4 と同様の関係を示したもので, 秋田泥炭については三軸試験装置により等方

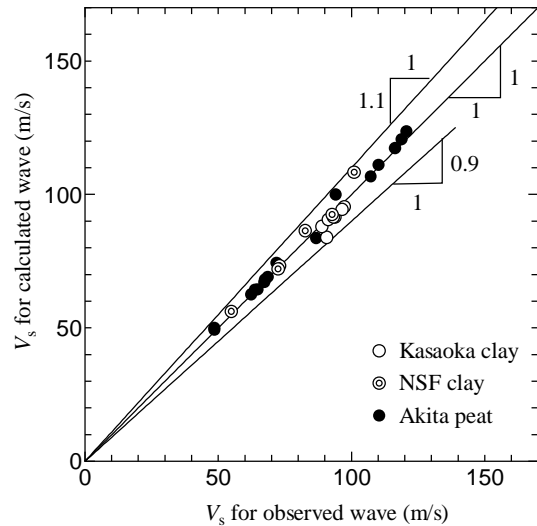


図-10 受信波の実験値および計算値から評価したせん断波速度の比較

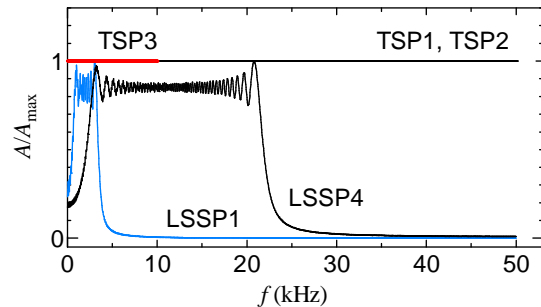


図-11 スイープ波の周波数特性におよぼすパラメータの影響

圧密した供試体について示している. 上段には振動数の異なる数種類の送信波が示されており, それに対応する受信波形の実験値が中段に, 計算値が下段に示されている. 実験値は送信波の振動数の違いによって大きく変化しているが, 計算値(下段)は実験値の傾向とおおよそ対応していることがわかる. 実験値と計算値の最大振幅を比較すると, 粘土試料(図-4)の場合, 実験結果ではおよそ  $4\text{mV}$  であるのに対し, 計算値ではおよそ  $7\text{mV}$  となっており, 計算値の方がやや大きな振幅を示している. この傾向は泥炭試料(図-5)ではさらに顕著になっているが, 砂試料(図-6)の場合, 両者の振幅はほぼ等しくなっており, 試料によって差があることがわかる. また, 試料によって実験から得られた受信波の形状は異なっており, 泥炭は最も高周波成分が少なく, 粘土, 豊浦砂の順に高周波成分が卓越しているが, 計算値はこれをよく再現している. また, 図-4 は圧密試験装置, 図-5, 図-6 は三軸試験装置による結果であるが, 試験装置の違いによる計算値の再現性の差はほとんど見られない.

図-7~図-9 はそれぞれ, 図-4~図-6 に示す受信波形のうち, 送信波の振動数  $5000\text{Hz}$  に対応する受信波の実験値および計算値を振

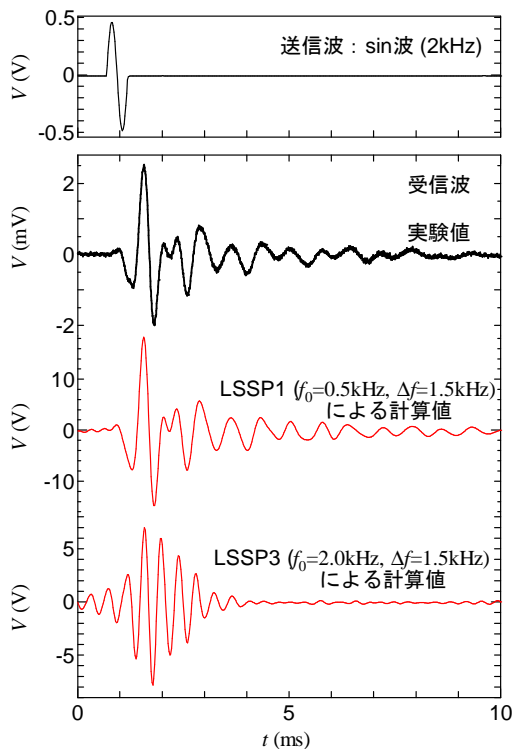


図-12 受信波形の計算値に及ぼす LSSP パラメータ  $f_0$ ,  $\Delta f$  の影響

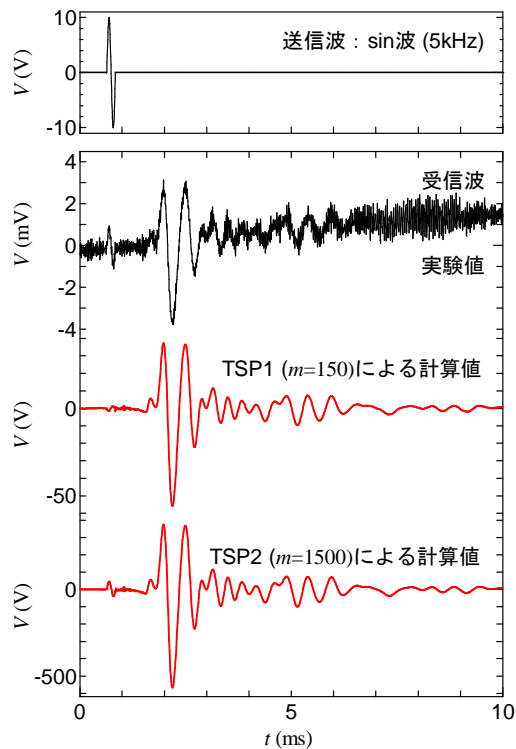


図-13 受信波形の計算値に及ぼす TSP パラメータ  $m$  の影響

幅の最大値で正規化して比較している。両者の波形は特に泥炭で高い一致度を示している。粘土や砂試料においてもピーク点の数やその時刻はおおむね近似しているが、短時間で電圧が何度も変化するような、高周波成分については計算値の再現性がやや低下している。同様の傾向は泥炭においても見られ、全般的に低周波と比べると高周波成分の再現性が低くなっている。各試料における受信波形は泥炭、粘土、砂の順に高周波成分が卓越していることから、結果的に計算値の受信波形の再現性はこれとは逆に砂、粘土、泥炭の順になっている。

(5) 提案手法によって評価した土のせん断波速度

図-10 は実験値および計算値によって得られたせん断波の到達時間  $\Delta t$  から下式によって計算したせん断波速度  $V_s$  を比較している。

$$V_s = L / \Delta t \quad (6)$$

ここに、 $L$  は送・受信 BE 間の距離である。実験値による  $V_s$  と計算値による  $V_s$  の誤差は最大でも 10% 以内となっており、本研究で提案する手法によってせん断波速度の評価が可能であることがわかる。

(6) 受信波再現性におよぼすスイープ波のパラメータの影響

図-11 は図-1 に示すスイープ波のパワースペクトルを示している。TSP の場合、パワースペクトルは全域でフラットであり、どの周波数帯も均一な成分を含んでいるのに対し、

LSSP では周波数成分に幅があることがわかる。これは LSSP の場合、パワーを有する周波数帯を式(2)中の  $f_0$ ,  $\Delta f$  によって定めているためである。実際、表-1 に示す  $f_0$ ,  $\Delta f$  の値と比較すると  $f_0$  は周波数帯の最小周波数に、また  $\Delta f$  は最小周波数からの周波数の幅に対応していることがわかる。ただし、 $\Delta f$  については実際の周波数の幅は  $\Delta f$  よりも広く、LSSP では実際にパワーを有する周波数帯は  $\Delta f$  のおよそ 2 倍となっている。一方、TSP がパワーを有する周波数帯は式(2)に示される  $f$  において、基本振動数 ( $k=1$ ) からナイキスト振動数 ( $k=N/2$ ) までとなっている。例えば TSP1, TSP3 の場合、基本振動数は約 24Hz、ナイキスト振動数は 50kHz となり、パワーを有する周波数の範囲は  $f_0$  のみによって決定することがわかる。

図-12 は周波数 2kHz の sin 波を一波長分送信した場合について、実験値と LSSP を用いて求めた計算値を比較したもので、計算値の再現性に及ぼす  $f_0$  および  $\Delta f$  の影響を比較している。受信波の再現性を比較すると、図-2 のパワースペクトルの周波数帯が 2kHz 付近をカバーしている LSSP1 の場合、受信波形をよく再現できているのに対し、LSSP3 の場合、受信波形の最初の部分が波打つような形状になっており、再現性が低下していることがわかる。このことから LSSP を用いる場合、スペクトルのパワー分布が送信波の周波数帯に包含されるよう、 $f_0$  および  $\Delta f$  を調整

する必要があると考えられる。一方、図-13は同様の関係をTSPを送信波としたBE試験結果をもとに計算した場合について示しており、計算値の再現性に及ぼす $m$ の影響を比較している。図中には周波数5kHzのsin波に対する計算値を示しているが、 $m$ の値に関わらず実験値とよい一致を見せている。これはTSPではパワースペクトルは常にフラットであるため、計算によって再現できる周波数は理論上、ナイキスト振動数( $=f_s/2$ )までとなりことによるものと考えられる。したがって、計算精度の面からは周波数帯全域にわたってフラットな周波数特性を有するTSPはLSSPに比べより有利であると考えられる。

(7) まとめ

本研究から得られた主な知見をまとめると以下のとおりである。

- ① 提案した2種類のスイープ波を送信波としたベンダーエレメント試験から試験装置系のインパルス応答が同定可能であることを示した。
- ② 上記の手法で同定したインパルス応答を用いて任意の波形の送信波に対する受信波形がシミュレート可能であることを示した。
- ③ シミュレートした受信波は高周波が卓越するケースではやや再現性が低下するものの、基本的に試験装置系を構成する土試料の種類や試験装置によらないことを示した。
- ④ シミュレートした受信波から評価した土のせん断波速度と実験値との誤差は最大でも10%以下であった。
- ⑤ 提案した2種類のスイープ波の式に含まれるパラメータとスイープ波の周波数特性の関係を示し、受信波の再現性におよぼすスイープ波の周波数特性の影響について示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① 荻野俊寛, 高橋貴之, 及川 洋, 三田地利之, 対馬雅己: ベンダーエレメント試験および繰返し載荷試験による高有機質土のせん断弾性係数, 地盤工学ジャーナル, Vol. 4, No. 1, pp.125-133, 2009, 査読あり。
- ② Toshihiro OGINO, Toshiyuki MITACHI, Kok Hooi CHAN, Hiroshi OIKAWA and Masaki TSUSHIMA: 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, 査読あり。

- ③ Toshihiro OGINO, Hiroshi OIKAWA, Toshiyuki MITACHI, Masaki TSUSHIMA and Masaru IGARASHI: Shear Modulus Evaluation of Highly Organic Soil Using Various Methods of Bender Element Test, Proceedings of An International Conference on Geotechnical Engineering, pp. 277-284, 2007, 査読なし。

[学会発表] (計7件)

- ① 原田友博, 荻野俊寛, 高橋貴之, 及川 洋: 秋田県および北海道で採取された高有機質土の変形特性 その2 - 繰返し載荷試験による変形係数および減衰比の評価 -, 土木学会東北支部技術研究発表会, CD-ROM, 2009/3/7。
- ② 大瀧淳司, 荻野俊寛, 高橋貴之, 及川 洋: 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, 土木学会東北支部技術研究発表会, CD-ROM, 2009/3/7。
- ③ 本田和寛, 荻野俊寛, 高橋貴之, 及川 洋: 秋田県および北海道で採取された高有機質土の変形特性 その1 - ベンダーエレメント試験によるせん断弾性係数の比較 -, 土木学会東北支部技術研究発表会, CD-ROM, 2009/3/7。
- ④ 荻野俊寛, 三田地利之, Chan Kok Hooi, 及川 洋: ベンダーエレメント試験の受信波再現性におよぼすスイープ波形の影響, 第43回地盤工学研究発表会, pp.327-328, 2008/7/11。
- ⑤ 大瀧淳司, 荻野俊寛, 及川 洋: ベンダーエレメント試験の送信波として用いるスイープ波の最適化, 土木学会東北支部技術研究発表会, CD-ROM, 2008/3/8。
- ⑥ 原田友博, 荻野俊寛, 及川 洋, 高橋貴之: 非排水三軸繰返し試験による泥炭の変形特性の評価, 土木学会東北支部技術研究発表会, CD-ROM, 2008/3/8。
- ⑦ 福嶋 基徳, 荻野俊寛, 高橋貴之, 及川 洋: 非排水三軸繰返し試験による泥炭の変形特性の評価, 土木学会東北支部技術研究発表会, CD-ROM, 2008/3/8。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

荻野 俊寛 (OGINO TOSHIHIRO)  
秋田大学・工学資源学部・講師  
研究者番号: 80312693

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号: