

ベンダーエレメントのサイズがせん断弾性係数の評価に与える影響

Effect of size of bender element on evaluation of shear modulus

北海道大学大学院 学生会員 西田 浩太(Kohta NISHIDA)
 秋田大学 正会員 荻野 俊寛(Toshihiro OGINO)
 北海道大学大学院 正会員 三田地利之(Toshiyuki MITACHI)

1. はじめに

ベンダーエレメント (BE) 試験は試験装置が簡単であり、各種室内試験装置に取り付け可能であるためせん断弾性係数 (G) を求める試験として普及しつつある。BE 試験において G を求める際には受信波形が特に重要な要素であるが、BE のサイズが異なれば振動特性も異なり¹⁾ひいては評価される G の値も異なると思われる。

そこで本文では、サイズの異なる BE が着脱可能なよう、改良した H- 型一面せん断試験装置による試験結果を報告する。

2. 試験概要

2-1 試料

本試験に用いた試料は NSF 粘土 ($\rho_s=2.78\text{g/cm}^3$, $w_L=55\%$, $I_p=26$) である。供試体は液性限界の 2 倍程度になるよう蒸留水を加えて十分に攪拌し、真空に近い状態に保った予圧密セル内で脱気した後、鉛直応力 150kPa で一次元圧密したものをを用いた。供試体は直径 60mm、高さ 40mm の円盤供試体である。

2-2 試験装置, 試験方法

Fig.1 に改良した H- 型一面せん断試験装置のせん断箱と底板 (受信側 BE) を示す。図のように BE はカートリッジ式になっているため着脱が可能となっている。なお、載荷板 (送信側 BE) も同様の加工をしている。用いた BE のサイズは送信側が 1 種類、受信側が 5 種類である (Table.1 参照)。表中のサイズは、エポキシによるコーティングを施し、片持ち梁状としたときの値である。

電圧波形の送信はファンクションジェネレーターを用い、設定電圧は $20V_{p-p}$ とした。送信波形および周波数 (f) を Table.2 に示す。垂直応力 (σ'_v) は 150 200 300 400 200 100 50(kPa) であり、圧密・除荷は 3t 法で打切った。なお、type-4 のみ $\sigma'_v = 200\text{kPa}$ (OCR=2) までしか試験を実施していない。圧密速度は 2.0kPa/min、除荷速度は 1.0kPa/min である。打ち切り後直ちに次に示す 3 種

類の BE 試験を実施した。

- (a) 波動試験としての BE 試験：送信波として Table.1 に示す単発波形を設定し、供試体中を伝達するせん断波速度より G を算出する従来の BE 試験。
- (b) 減衰振動 BE 試験：送信波に 0.05kHz の矩形波を用いた BE 試験で、減衰自由振動によって G を求める BE 試験 (3-1 参照)。
- (c) 連続 sin 波による共振法 BE 試験：送信波に連続 sin

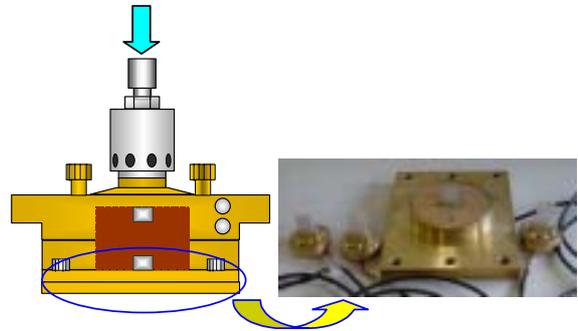


Fig.1 Bottom plate and cartridge

Table.1 Size(encapsulated)

	transmitter	receiver				
		type-1	type-2	type-3	type-4	type-5
free length	10.23	12.63	17.62	11.77	17.15	8.45
width	11.05	11.03	10.92	11.15	11.10	11.23
thickness	1.68	3.00	2.97	1.65	1.53	1.55

Table.2 Test condition

single or continuous	shape	frequency (kHz)
single	square wave	0.05
		1
	sin wave	10
continuous	sin wave	resonant frequency

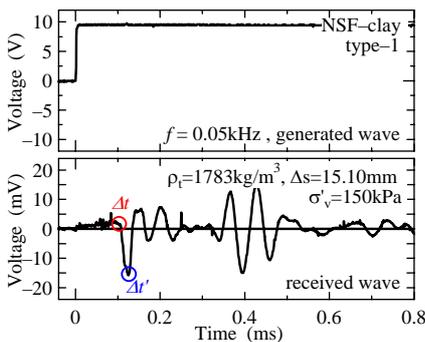


Fig.2 A example of test result

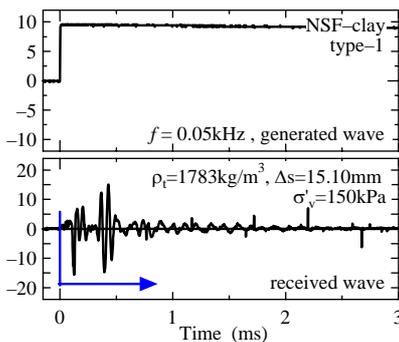


Fig.3 A example of damped free vibration

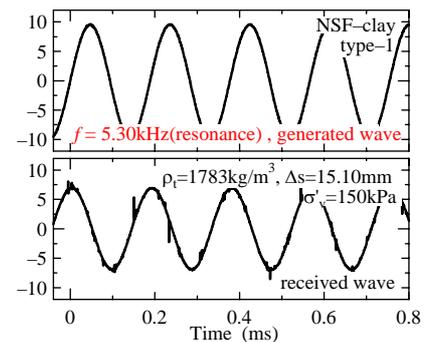


Fig.4 A example of resonance

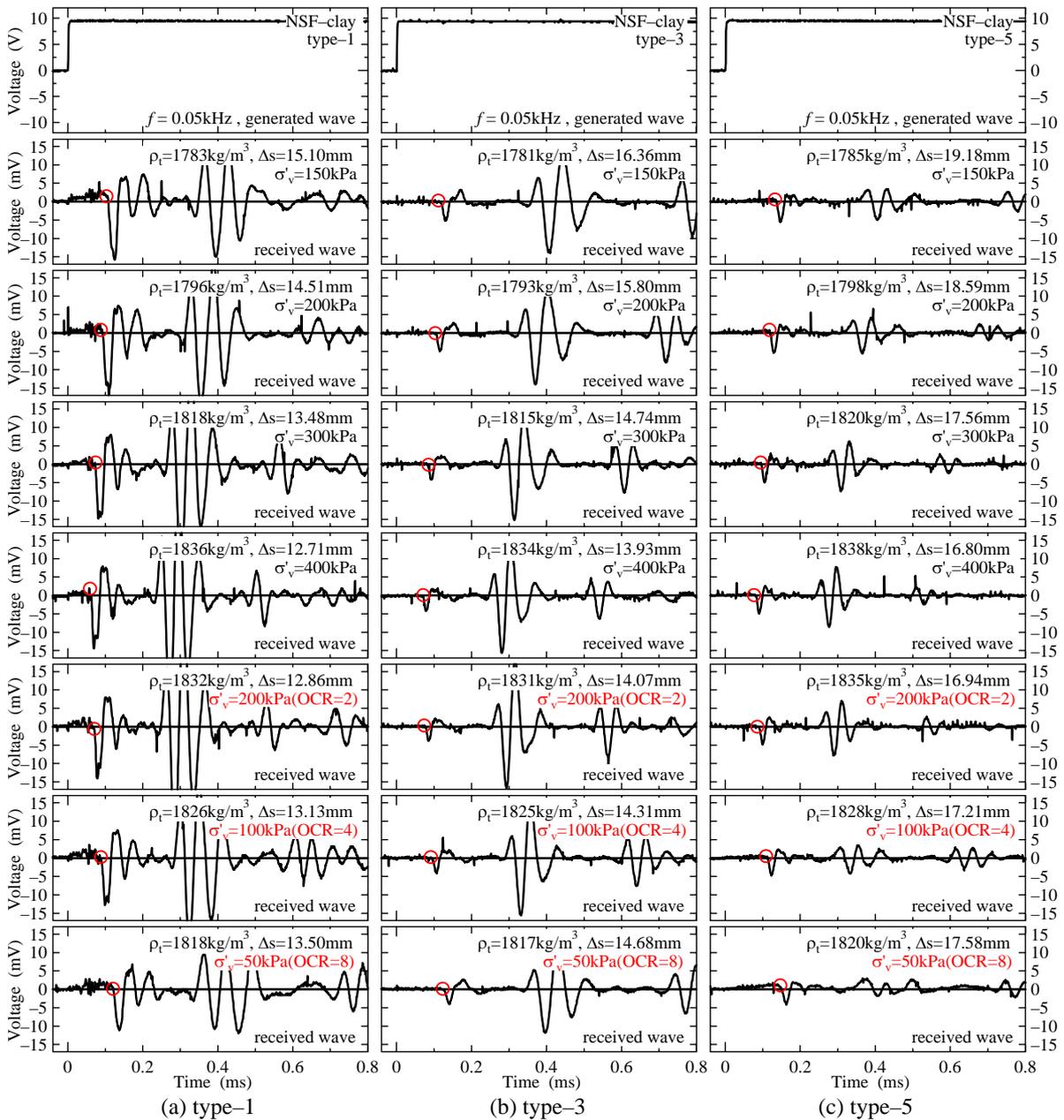


Fig.5 BE test results

波を用い、周波数を漸次増加させて供試体の共振点を探る試験で共振周波数より G を求める (3-1 参照)。

3. 試験結果

3-1 G の算出方法

G を求める代表的な手法として、せん断波到達点を決定し式(1)のように算出する方法がある。

$$G_t = \rho_t \cdot \left(\frac{\Delta s}{\Delta t} \right)^2 \quad (1)$$

ここで G_t は伝播時間から算出した G 、 ρ_t は供試体の湿潤密度、 Δs はせん断波の伝達距離 (BE の先端間の距離)、 Δt はせん断波の伝達時間である。

受信時における BE の初動は送信側 BE と同方向とすると、本試験の場合、送・受信電圧は異極となる。よって Fig.2 に示すように最初の電圧変化点をせん断波の到

達点 (図中の Δt) とした。

BE 試験で矩形波を用いる際、送信側 BE はいわば瞬間的に衝撃力を加えている。Fig.3 に示すような受信波の減衰振動が BE 近傍の供試体の振動をあらわしているとするれば、BE 試験は波動試験としての一面を有する一方で、振動試験としての一面も同時に併せ持っていると言える²⁾。このとき供試体の振動は、供試体の上下端面の境界では変形が生じないことから一次モードであると考えられ、供試体高さ h は波長の $1/2$ に等しい。 G はこのとき減衰自由振動の固有周波数を f_d として式(2)で表される。

$$G_d = 4\rho_t h^2 f_d^2 \quad (2)$$

ここで G_d は f_d から算出した G である。

送信波として連続 sin 波を用い、周波数を漸次増加させていくとある周波数で受信電圧が増大する共振現象が起きる。Fig.4 はその一例を示したものである。このとき

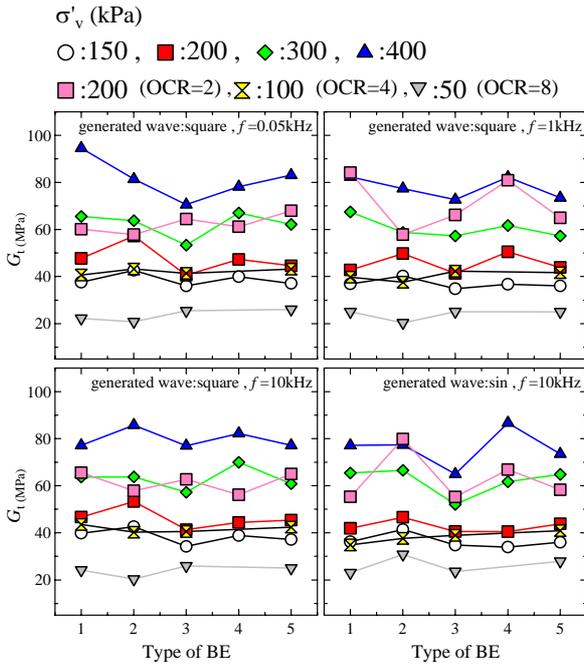


Fig. 6 $G_t \sim$ type of BE relationship

送信側 BE による強制振動によって受信側 BE 近傍の供試体要素が共振していると考えられ、振動は一次モードで減衰振動の場合と同様 h は波長の $1/2$ に等しい。したがって共振周波数を f_r とすれば G は式(3)より求まる。

$$G_r = 4\rho_t h^2 f_r^2 \quad (3)$$

ここで G_r は f_r から算出した G である。

3-2 f_d, f_r の決定

Fig.5 に送信波として 0.05kHz の矩形波を用いた type-1, 3, 5 の電圧変化時刻歴を示す。送信開始時を基準時 (0msec) とし、せん断波到達点と思われる点を δ で示している。Table.1 に示すように、type-1 と 3 は厚さは異なるが自由長がほぼ等しく、type-3 と 5 は自由長は異なるが厚さがほぼ等しい。type-1 のような厚く、自由長が長い方が受信波電圧が大きく、ノイズの影響が小さいことがわかる。

Fig.6 は受信側 BE の違いによって得られる G_t の変化を表したものである。 σ'_v が 400kPa や 200kPa (OCR=2) の場合に若干の差異は見られるものの、数種類の送信波を与えて総合的に判断すると受信側 BE の違いによる G_t の変化はさほど見られない。本試験は一面せん断試験装置で行ったため、伝達距離が短い。そのため type-5 のような薄く自由長が短い BE でもせん断波の到達が確認できるが、三軸試験装置のような伝達距離が長い場合、せん断波が途中で減衰してしまうため受信波の振幅がかなり小さくなると思われる。つまり、受信側 BE が厚く、自由長が長い方がせん断波到達点の同定には有利であるといえる。しかし供試体高さが低い場合、受信側 BE を長くすると必然的に伝達距離が短くなり、near-field-effect の見極めが重要になると思われる。

Fig.7 は type-1 の試験で各応力点における受信波の減衰自由振動 (Fig.3 の矢印より右側) をフーリエ変換した

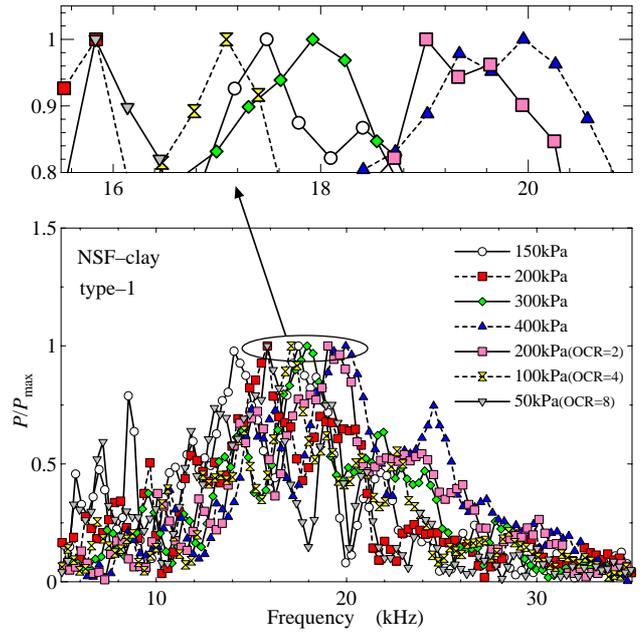


Fig. 7 Power spectrum(type-1)

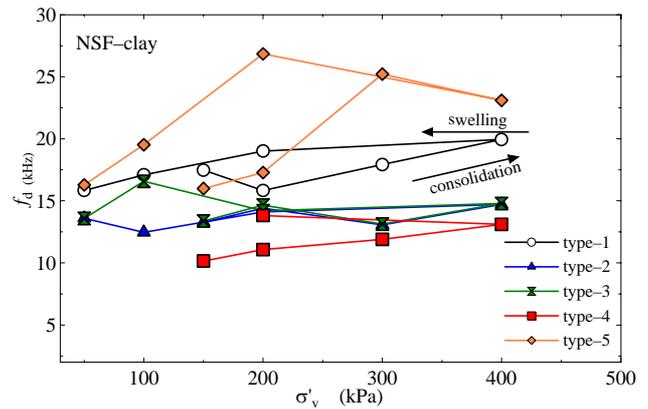


Fig. 8 $f_d \sim \sigma'_v$ relationship

パワースペクトルである。なお、縦軸のスペクトルは最大値で除して正規化している。NSF 粘土の場合、パワースペクトルは 15.8 ~ 20kHz 付近に卓越周波数が認められ、受信波の減衰振動はこの周波数帯によって表されていることがわかる。この周波数成分が BE 近傍の供試体の振動成分と考えられ、受信波形のパワースペクトルのピークによって減衰振動の固有周波数 (f_d) を求める。 G_d はこの f_d を式(2)を代入して算出する。

Fig.8 は圧密・除荷の各段階における f_d を σ'_v に対してプロットしたものである。 f_d は σ'_v の変化に伴い概ね増加・減少していることが確認できる。type-5 がそのような関係になっていないのは、Fig.5(c) に示すように受信電圧が小さいためにノイズの影響を受け、フーリエ変換結果の精度が低下したものと思われる。

共振法 BE 試験から式(3)によって G_r を求めるためには各応力点において共振周波数 (f_r) を探る必要がある。Fig.9 は圧密・除荷の各段階における f_r を σ'_v に対してプロットしたものである。各応力点において存在する f_r は 1 つではなく複数存在するため Fig.9 には 1 番目の f_r (f_{r1})

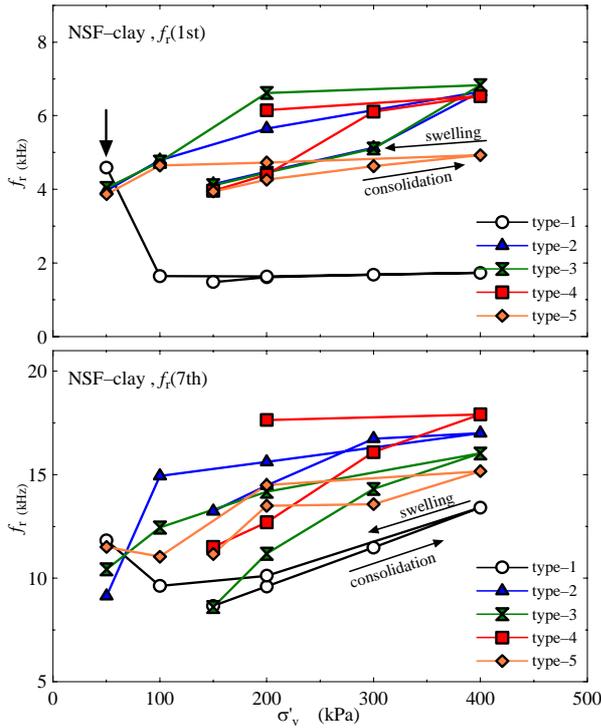


Fig.9 $f_r \sim \sigma'_v$ relationship

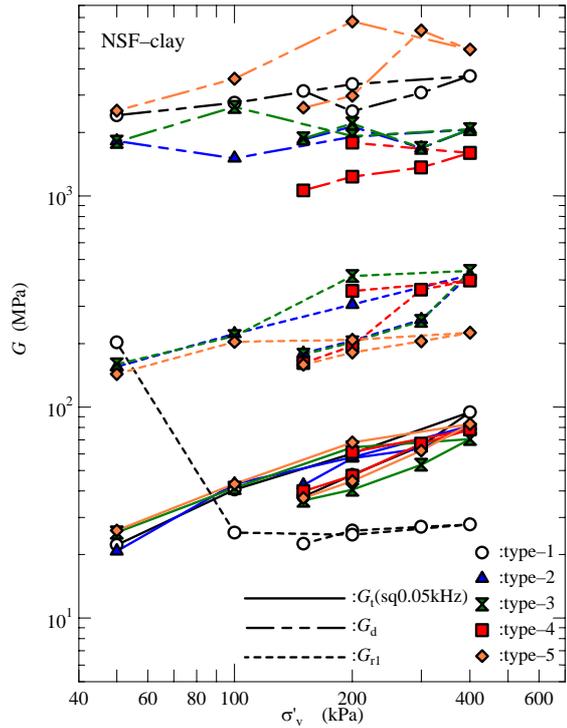


Fig.10 $G \sim \sigma'_v$ relationship

と7番目の f_r (f_{r7}) に対する σ'_v との関係を示している。 f_{r1} , f_{r7} ともに f_d と同様, σ'_v の変化とともに増加・減少している。type-1の f_{r1} は他のBEと比較してかなり小さい値が得られているが、この場合受信波電圧も著しく小さくなり、 $\sigma'_v=50\text{kPa}$ (OCR=8)のときには共振現象が確認できなかった。したがって図中の矢印の値は実際には2次共振周波数であると思われる。他のBE (type-2~5)でもこの図中の f_{r1} より低い周波数帯で共振現象が起きていたと思われるが、受信波電圧が小さすぎたため確認することができなかった。以上より、 f_d , f_r ともにBEのサイズにより異なるものと思われる。

3-3 Gの比較

以上に示した伝達時間から求まる G_t 、減衰振動BE試験から求まる G_d 、共振法BE試験から求まる G_r は1回の試験で同一供試体から算出することができる。Fig.10は各 σ'_v におけるこれら3通りの G を比較したもので、両対数軸上に示している。 G_t は $f=0.05\text{kHz}$ の矩形波を送信したときから求めた値であり、 G_r は f_{r1} を式(3)に代入して算出した値である。3者の関係はtype-1の結果を除けば $G_d > G_r > G_t$ となっており、 G_d は G_t の20~99倍、 G_r は G_t の3~7倍であった。既往の研究²⁾では G_d と G_r はほぼ等しく、両者は G_t の7倍程度大きい値を示すと報告している。しかしこの場合せん断波の到達点を最初のピーク点 (Fig.2の $\Delta t'$)として G_t を算出している。本試験結果において $\Delta t'$ より G_t (G_t')を算出すると、 G_d/G_t' は29~125、 G_r/G_t' は3~10であった。

式(2), (3)を導く過程で側面の境界は自由として考えているが、本試験では供試体はせん断箱に接しており剛な境界となっている。この境界条件の違いが3つの G が大きく異なる第1の原因として考えられる。そのため側

面の拘束条件が自由な三軸試験装置によるBE試験結果と比較して影響を検証する必要がある。

4.まとめ

本研究から得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- (1) H-型一面せん断試験装置を用いて異なる送信波形・周波数によるBE試験を行った結果、せん断波の到達点を受信波電圧変化点とした場合、受信側BEのサイズによる明瞭な G の差異は見られなかった。
- (2) 受信側BEは厚く、自由長が長いほど受信波電圧は大きくノイズの影響を受けにくい。しかし供試体寸法が小さい場合、near-field-effectを考慮して自由長を慎重に決定すべきである。
- (3) 減衰振動BE試験および共振法BE試験からそれぞれ得られる固有周波数 (f_d)、共振周波数 (f_r) は受信側BEのサイズによらず、圧密・除荷に伴い増加・減少する。ただし f_d , f_r の値はBEのサイズにより異なる。
- (4) f_d および f_r からそれぞれ得られる G は、到達時間から得られる G よりもそれぞれ20~99倍および3~7倍大きい値が得られた。今後は三軸BE試験などの拘束条件が異なる試験を行い比較・検討する必要がある。

参考文献

- 1) 西田, 荻野, 三田地, 川口: セルフモニタリングベンダーエレメントの振動特性, 第39回地盤工学研究発表会, 2分冊の1, pp.271-272, 2004.
- 2) 荻野, 三田地, 対馬, 及川: 減衰振動・共振に着目したベンダーエレメント試験による土の変形特性の評価, 土木学会論文集, No.743/ -64, 135-145, 2003.