

Bender/Extender Element 試験による S 波および P 波速度の測定

Measurement of S-wave and P-wave velocities by Bender/Extender Element tests.

北見工業大学大学院 ○ 学生員 堀 智仁 (Tomohito Hori)
北見工業大学工学部 正 員 山下 聡 (Satoshi Yamashita)
北見工業大学工学部 フェロー 鈴木 輝之 (Teruyuki Suzuki)

1. まえがき

Bender Element 試験は、既存の試験装置に取り付けて圧密中やせん断試験中に非破壊的に S 波の伝播速度を測定し、せん断剛性率 G を求めることが出来る。しかし、S 波の伝播時間同定法に関して、試験結果に含まれるノイズや S 波の波長に比べて伝播距離が短い場合に生じる Near field effect 等の影響により国際的な同意は未だに得られていない。

Lings & Greening¹⁾は、パイモルフ型の Bender Element を直列または並列に結線することによって、S 波および P 波速度を測定することが可能であるということを明らかにした。せん断波の伝播時間の解釈を困難にしている Near field effect は P 波によって生ずる²⁾と考えられていることから、S 波の到達地点を選定する上で、P 波の伝播速度を求めることができれば、S 波の到達地点を決定する大きな判断材料となることが考えられる。また、供試体の S 波および P 波速度を求めることにより、ポアソン比やヤング率、体積弾性率等の弾性係数を算出することが可能になるため、Bender Element 試験の付加価値が高まる。

本研究では、S 波速度および P 波速度を測定するための最良の条件を検討した後、実際に供試体の S 波および P 波速度を測定し、Near field effect と P 波との関係を調べ、さらに S 波と P 波速度から求めることができる弾性係数を算出した。

2. 試料と試験方法

2.1 試料

試験に用いた試料は豊浦砂 ($\rho_s=2.650\text{g/cm}^3$, $e_{\max}=0.980$, $e_{\min}=0.615$) である。供試体は乾燥振動法によって所定の密度になるよう締め固めて作製した。供試体寸法は直径 70mm、高さ 150 mm である。

供試体作製後 - 49 kPa の負圧をかけて供試体を自立させて 15 分間放置した後、Bender/Extender Element 試験によって供試体の S 波および P 波速度を測定した。

2.2 Bender/Extender Element

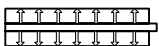
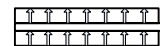
試験に用いた Bender/Extender Element (以下、BE/EE) を表-1および図-1に示す。圧電セラミックスの分極の向きを変えて貼り合わせた2種類の BE/EE (Type-1, Type-2) と、それぞれの Self-monitoring Type と Normal Type の全部で4種類である。BE/EE は表-1に示すように、Type-1, Type-2ともに直列または並列に結線することによって、S 波および P 波を発生させることが出来る。

3. Self-monitoring による入力波形と出力波形の比較

Self-monitoring BE/EE で出力波を観測することによって、ファンクションジェネレーターから入力された波と実際に BE/EE から出力される波との間に時間的な遅延がないかどうかを確認できることや、BE/EE がどのように挙動しているかを調べることができる。

図-2(a)は Type-1および Type-2の Self-monitoring Type の BE/EE を直列または並列に結線したときの試験結果を示したものである。太い線で示したのが入力波形、細い線は出力波形である。試験は $\pm 10\text{V}$ の電圧波形 (sin, pulse) を入力側から送り、BE/EE の変形で生じた電圧を出力側で Self-monitoring するというものである。図より、直列に結線した場合 Type-1, Type-2ともに同様の結果になっており、出力波の振幅は約 $\pm 5\text{V}$ である。それに対し、並列に結線した場合は Type-1および Type-2の出力波の振幅はほぼゼロである。図-2(b)は、波の立ち上がり付近を拡大したものである。なお、直列と並列の縦のスケールを変えて示している。直列に結線した結果では、入力波と出力波の立ち上がりの地点が一致しているため時間的な遅れがないことがわかる。一方、並列に結線した結果では、やはり出力波の立ち上がりは確認できない。並列回路の場合、抵抗にかかる電圧は電源の電圧と同じである。したがって、並列に結線した場合、一つの圧電セラミックスにかかる電圧は直列に結線した場合の2倍になるため、並列の出力波は直列の出力波よりも振幅が大きくなると考えられる。しかし、今回の結果はそれとは異なるものであった。次に、並列に結線し

表-1 分極方向の向きを変えて貼り合わせた BE/EE

結線方法	BE Type	
	Type-1	Type-2
		
直列	S波	P波
並列	P波	S波

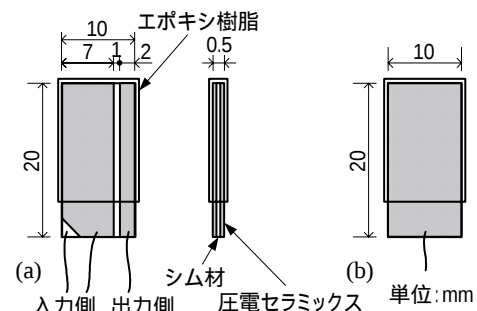


図-1 2 種類の Bender/Extender Element および寸法
(a) Self-monitoring Type (b) Normal Type

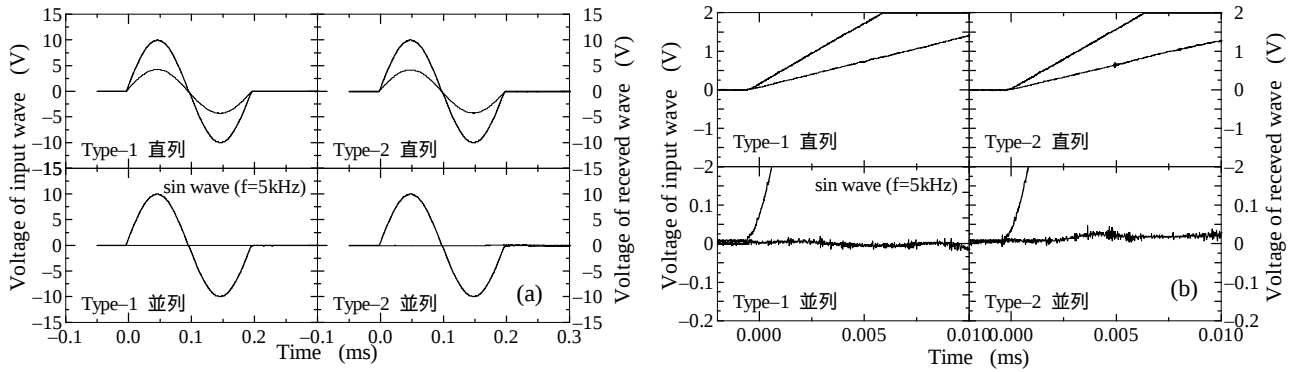


図-2 Type-1 と Type-2 のセルフモニタリング BE の受信波形 (a)波形全体 (b)拡大図

表-2 試験条件

	発信側BE/EE		受信側BE/EE	
S波送信	Type-1	直列	Type-1	直列
	Type-2	並列	Type-1	直列
S波受信	Type-1	直列	Type-1	直列
	Type-2	並列	Type-2	並列
P波送信	Type-2	直列	Type-2	直列
	Type-1	並列	Type-2	直列
P波送信	Type-2	直列	Type-2	直列
	Type-1	並列	Type-1	並列

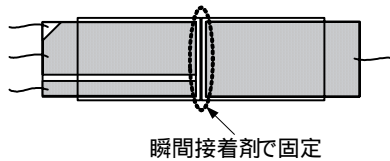


図-3 BE/EE の固定方法

た BE/EE が挙動していないことを確認するために、周波数 $f=4\text{kHz}$ の sin 波で BE/EE を振動させた結果、Type-1 および Type-2 の BE/EE から音が出ていることが確認できた。すなわち、BE/EE は並列に結線した場合でも、S 波および P 波が出ていることを意味している。さらに、波が出ていることを確認するために2つの BE/EE を直接つなげて試験を行った、それについては次節で述べることにする。

3. S 波および P 波速度測定の最良の組み合わせ

並列に結線した BE/EE から波が出ていることを確認すること、S 波および P 波速度を測定する場合、送信側と受信側の BE/EE をどのように結線するのが最良の組み合わせなのかを検討した。試験条件を表-2に示す。同一条件で試験を行うため、図-3に示したように発信 BE/EE と受信 BE/EE を瞬間接着剤で接着して試験を行った。

図-4は、発信側の BE/EE を直列および並列に結線して行った試験結果を示したものである。また、図-5は受信側の BE/EE について調べたものである。受信波形をわかりやすくするため、位相を 180° 変えて行った試験結果も示している。入力波の周波数は $f=5\text{kHz}$ である。図-4および図-5より、並列に結線した BE/EE においても波を送受信することが可能であることが確認できる。このことから、並列の Self-monitoring の結線方法に問題があると考えられる。並列での BE/EE の結線方法を図-6に示す。

送信側 BE/EE に適しているものを調べた結果、図-4より、S 波、P 波ともに直列に結線した結果に比べ、並列で結線

した方が受信波の振幅が大きいことがわかる。それに対し、受信側 BE/EE について調べた図-5では、直列に結線した方が受信波の振幅が大きい。以上の結果から、S 波³⁾および P 波速度を測定する場合、送信側を並列、受信側を直列に結線する組み合わせが最良であると考えられる。

4. S 波および P 波速度の測定

4.1 Near field effect と P 波の関係

図-7は、相対密度 $Dr=80\%$ の豊浦砂供試体に対して行った BE/EE 試験による送・受信波の電圧の時刻歴を示したものである。図中の マークは S 波および P 波の到達地点を示している。BE/EE は Fioravante⁴⁾が提案した方法で供試体の側面に設置し、S 波は伝播・振動方向がともに水平である HH 波を測定した。

図-7(a)に示した周波数 $f=15\text{kHz}$ の S 波の到達地点より前の部分で受信波に乱れが生じている、これが Near field effect である。図-7(b)の結果から周波数 $f=60\text{kHz}$ では Near field effect の影響を受けていない。これは、送信波に高い周波数を用いると Near field effect の影響を受けにくくなるという、筆者らが過去に行った試験結果⁵⁾と一致するものである。P 波の試験結果を示した図-7(c)および(d)では、Near field effect の影響がなく受信波の到達地点を容易に決定することが可能である。

これまでの結果から、Near field effect が P 波によって生じる現象であるとするならば、S 波を送信した際に P 波が発生しているはずである。このことを検証するために、送信側 BE/EE から S 波を発生させて、P 波用の BE/EE で受信することを試みた。その結果を図-8に示す。図中には、図-7での S 波の伝播時間 T_s 、および P 波の伝播時間 T_p も示している。図より、 T_s よりも早い地点で波が到達していることが確認できる。特に、周波数 $f=60\text{kHz}$ の受信波の振幅が大きいことがわかる。この波は T_p よりも若干遅れているが、P 波の影響によって生じているものと考えられる。S 波においても T_s より同程度遅れて波が到達している。受信波が T_p 、 T_s よりも遅れて到達した原因として考えられることとして、P 波を S 波用の BE/EE で受信していることが一因であると考えられるが、明確な原因を明らかにするには至っていない。

図-9は、P 波を発生させて S 波の BE/EE で受信した結果である。図より、 $f=15\text{kHz}$ の結果は T_s より前の P 波の振幅が小さいのに対し、 $f=60\text{kHz}$ の結果では P 波の振幅が大きく、このような P 波の成分が Near field effect に大きく関与していると考えられる。Near field effect と P 波の関係を調

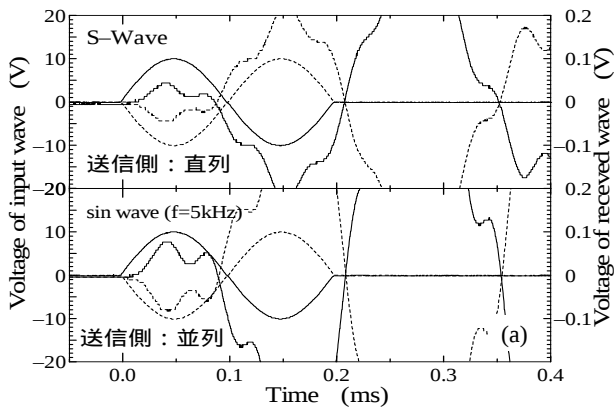


図-4 発信側 BE/EE を並列および直列に結線した試験結果 (a)S 波 (b)P 波

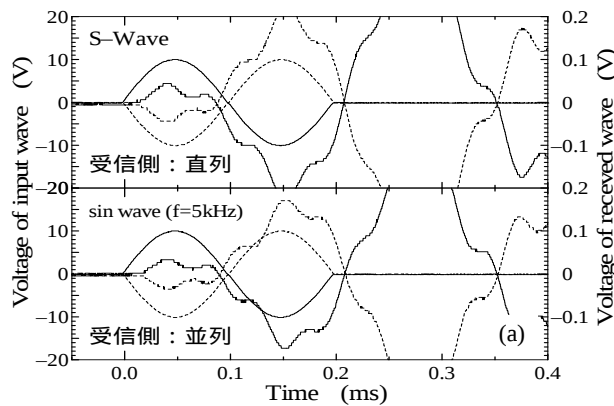


図-5 受信側 BE/EE を並列および直列に結線した試験結果 (a)S 波 (b)P 波

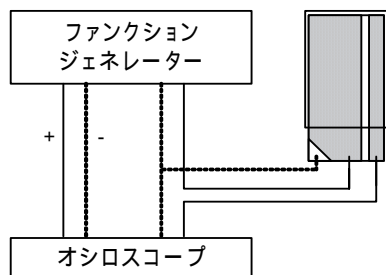


図-6 並列での結線方法

べるために、図-7(a)(b)および図-9(a)(b)をそれぞれ高速フーリエ変換したのが図-10である。図-10は受信波のパワースペクトルを示しており、縦軸のスペクトルをその最大値で除して正規化して示している。図-10(a)で示した、Near field effect の影響が大きい $f=15\text{kHz}$ の結果では、 $f=22.5\text{kHz}$ 付近にピークがあり、 $f=5\text{kHz}$ 付近と $f=60 \sim 65\text{kHz}$ 付近で卓越周波数が認められる。図-10(b)で示した Near field effect の影響が小さい $f=60\text{kHz}$ 結果では、 $f=22.5\text{kHz}$ 付近にピークがみられる。この結果から、 $f=22.5\text{kHz}$ は S 波によるものであると考えられる。一方、図-10(c)より、P 波部分の振幅が小さい $f=15\text{kHz}$ のパワースペクトルは、 $f=15\text{kHz}$ 付近にピークがある。それに対して、P 波部分の振幅が大きい図-10(d)の結果では、P 波成分と考えられる $f=40 \sim 65\text{kHz}$ の間に卓越周波数が多く存在している。図-10(a)と図-10(d)の結果を比較すると、パワースペクトルは同様な傾向を示していることから、Near field effect は P 波の影響によって生ずると考えられる。

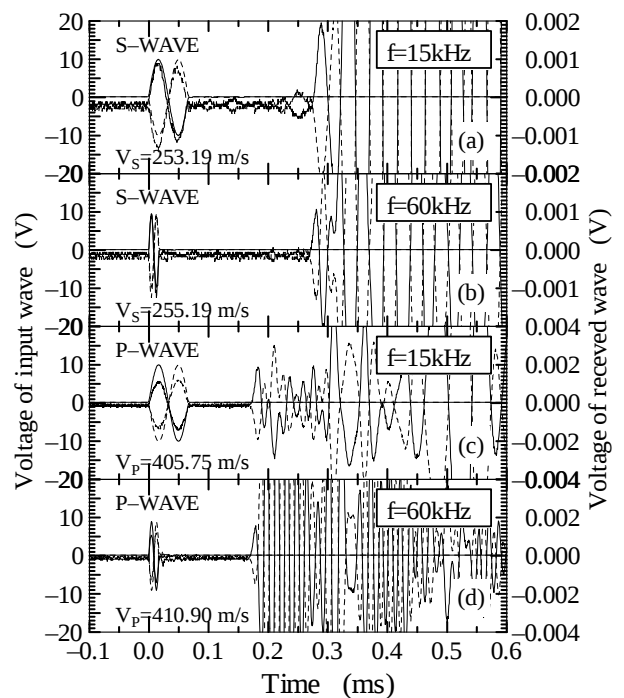


図-7 送信側並列、受信側直列での BE/EE 試験結果

(a)S 波 $f=15\text{kHz}$ (b)S 波 $f=60\text{kHz}$ (c)P 波 $f=15\text{kHz}$ (d)P 波 $f=60\text{kHz}$

4.2 S 波および P 波速度のから算出できる弾性係数

S 波および P 波速度からポアソン比、ヤング率、体積弾性率をそれぞれ式(1)～(3)で算出した。なお、式(1)～(3)は、等方弾性体に対するものである。

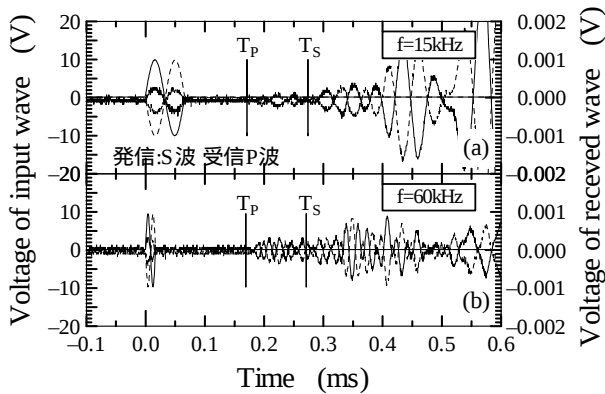


図-8 送信側 S 波，受信側 P 波での BE/EE 試験結果
(a)f=15kHz (b)f=60kHz

$$\nu = \frac{1}{2} \times \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1} \quad \dots (1)$$

$$E = \rho \times V_s^2 \times \frac{3 \times \left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 4}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1} \quad \dots (2)$$

$$K = \rho \times \left(V_p^2 - \frac{4 \times V_s^2}{3} \right) \quad \dots (3)$$

ここで、 ρ は供試体の密度、 V_p は P 波速度、 V_s は S 波速度である。

算出したポアソン比，ヤング率，体積弾性率を表-3に示す。Hoque & Tatsuoka⁶⁾が角柱の豊浦供試体に対して，繰返し载荷によって求めた，鉛直方向と水平方向のヤング率 E_v および E_h から求めたポアソン比 ν_{vh} は 0.163 ~ 0.172 である。今回行った試験の結果は，Hoque らの結果と比較するとやや高い値であるが，大きな差はなく妥当な結果であると考えられる。

5. 結 論

(1) Self-monitoring BE/EE の結果から，直列に結線した場合には，入力波と出力波の間に時間的な遅延はなかった。また，BE/EE の挙動は入力波と同様に挙動していると考えられる。それに対し，並列に結線した場合は，受信波を測定することが出来なかった。したがって，並列に結線する場合，結線方法を考慮する必要がある。

(2) S 波および P 波速度を測定する場合，送信側 BE/EE を並列，受信側 BE/EE を直列に結線する組み合わせが，最も効率の良い組み合わせである。

(3) 受信波を高速フーリエ変換して比較した結果，Near field effect は P 波の影響によって生じているということが明らかになった。

(4) BE/EE の結線方法を直列または並列に変えるだけで，S 波および P 波速度を容易に測定することができた。それによって 様々な弾性係数を算出することが可能となった。

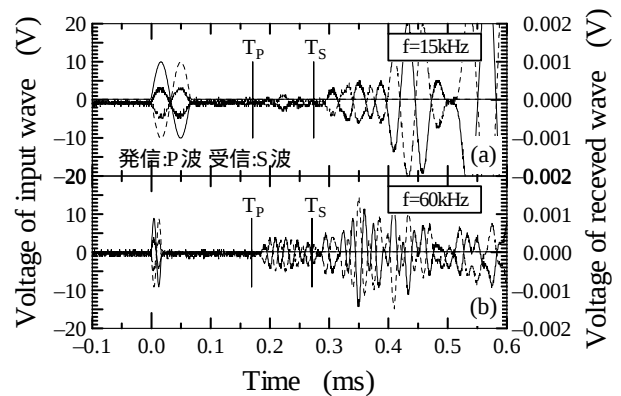


図-9 送信側 P 波，受信側 S 波での BE/EE 試験結果
(a)f=15kHz (b)f=60kHz

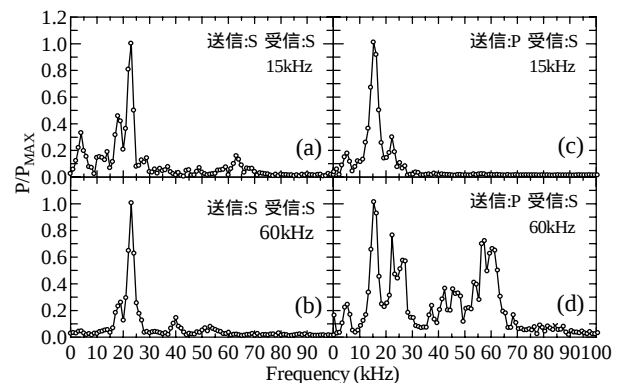


図-10 図-7 および図-9 の受信波のパワースペクトル
(a)図-7(a) (b)図-7(b) (c)図-9(a) (d)図-9(b)

表-3 弾性係数

弾性係数	値	単位
ポアソン比 ν	0.184	-
ヤング率 E	237.56	MPa
体積弾性率 K	125.27	MPa
せん断剛性率 G	100.32	MPa

参考文献

- 1) Lings ML, Greening PD : A Novel Bender/Extender Element for Soil Testing, *Géotechnique* 51(8), pp.713-717, 2001.
- 2) Salinero I. S., Roeset J. M., and Stokoe, K. H. : Analytical studies of body wave propagation and attenuation, Report GR86-15, University of Texas at Austin, 1986.
- 3) Dyvik R., Madhus C.: Laboratory measurement of G_{max} using bender elements, *Advances in the Art of Testing Soils under Cyclic Conditions*, ASCE, pp.186-196, 1985.
- 4) Fioravante V. : Anisotropy of small strain stiffness of Ticino and Kenya sands from seismic wave propagation measured in triaxial testing, *Soils and Foundations*, 40(4), pp.129-142, 2000.
- 5) 堀智仁，山下聡，鈴木輝之：砂と粘土のベンダーエレメント試験に及ぼす諸因子，*地盤工学会北海道支部技術報告集*第44号，pp.273-280，2004.
- 6) Hoque E., Tatsuoka F. : Anisotropy in elastic deformation of granular materials, *Soils and Foundations*, 38(1), pp.163-179, 1998.