ベンダーエレメント試験による S 波および P 波速度の測定

北見工業大学大学院　学生員　○堀　　智仁
北見工業大学工学部　正会員　　山下　聡
北見工業大学工学部　フェロー　鈴木　輝之

1．はじめに

ベンダーエレメント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 S 波速度を測定することが可能である．しかし，S 波の伝播時間同定法に関して，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. そこで, 本研究では, バイモルフ型のベンダーエレメントを直列または並列に結線して, S 波および P 波速度を測定し [1], Near field effect と P 波の関係を調べた.

2．試料と試験方法

試験に用いた試料は豊浦砂（ρ_s=2.650g/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相対密度 Dr=80%になるように締め固めた．供試体寸法は直径 70mm，高さ 150mm である．

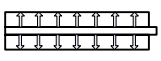
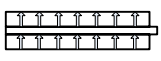
供試体作製後-49kPa の負圧をかけて供試体を自立させた後, 供試体側面にベンダーエレメント（以下, BE）を設置し，S 波および P 波速度を測定した．S 波は伝播・振動方向がともに水平である *HH* 波を測定した．なお，試験に用いた BE は，**表-1** に示す圧電セラミックスの分極方向の向きを変えて貼り合わせた 2 種類（Type-1，Type-2）である．発信電圧は複数の周波数による正弦波（f=5kHz～120kHz）を用い，せん断波速度は得られたせん断波速度の平均値から求めた.

3．試験結果

図-1は，S 波および P 波の送・受信波の波形を示したものでる．図中の△マークは波の到達地点を示している．**図-1(a)**に示した周波数 f=15kHz 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．それに対して，周波数 f=60kHz の結果を示した**図-1(b)**では，Near field effect の影響を受けていない．これは，周波数が高くなると波長が短くなるため，Near field effect の影響が小さくなったと考えられる．一方，P 波の試験結果は，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できる.

Near field effect が P 波によって生じる現象であるならば，S 波受信時に P 波も受信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 から P 波を発生させて，S 波用の BE で受信することを試みた．その試験結果を**図-2**に示す．図中には，**図-1**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，f=15kHz の結果は T_S より前の

表-1 試験に用いたベンダーエレメント

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

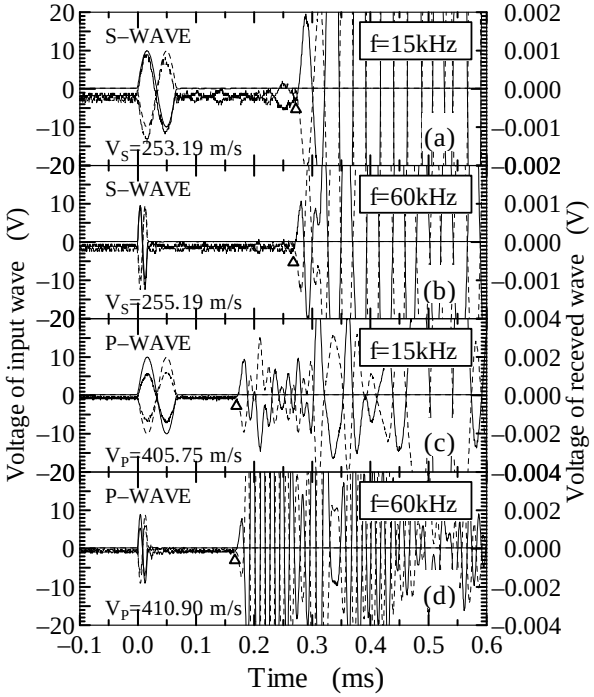


図-1 送信側並列，受信側直列での BE 試験結果

(a)S 波 f=15kHz (b)S 波 f=60kHz (c)P 波 f=15kHz (d)P 波 f=60kHz

ベンダーエレメント試験，せん断弾性係数，P 波速度，S 波速度，ポアソン比

〒090-8507　北海道北見市公園町 165　北見工業大学　土木開発工学科　TEL 0157-26-9490

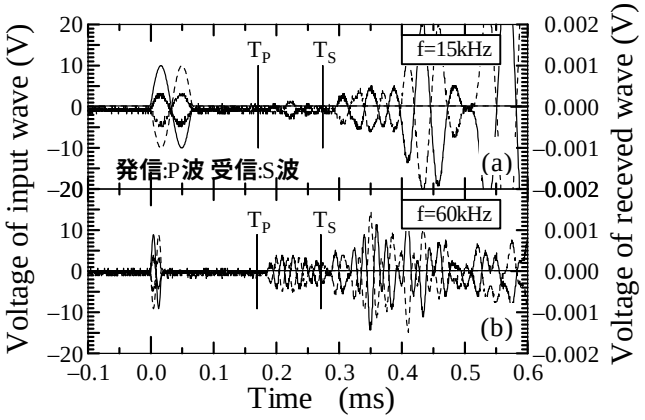


図-2 送信側 P 波，受信側 S 波での BE 試験結果

(a)f=15kHz　(b)f=60kHz

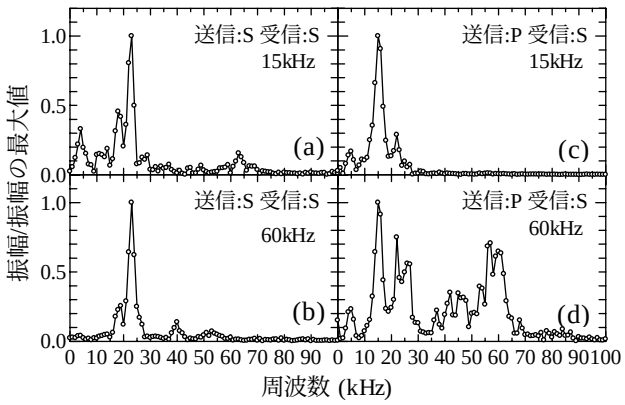


図-3 図-1 および**図-2** の受信波の振幅スペクトル

(a)図-1(a)　(b)図-1(b)　(c)図-2(a)　(d)図-2(b)

P 波の振幅は小さいのに対し，*f*=60kHz の結果では P 波の振幅が大きい．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 波の関係を調べるために，**図-1(a)(b)**および**図-2(a)(b)**をそれぞれ高速フーリエ変換したのが**図-3**である．縦軸は受信波の振幅スペクトルを示しており，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-3(a)**で示した，Near field effect の影響が大きい *f*=15kHz の結果では，*f*=22.5kHz 付近にピークがあり，*f*=5kHz 付近と *f*=60～65kHz 付近で卓越周波数が認められる．**図-3(b)**で示した Near field effect の影響が小さい *f*=60kHz 結果では，*f*=22.5kHz 付近にピークがみられる．この結果から，*f*=22.5kHz は S 波によるものであると考えられる．一方，**図-3(c)**に示した，P 波部分の振幅が小さい *f*=15kHz は，*f*=15kHz 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-3(d)**の結果では，P 波成分と考えられる *f*=40～65kHz の間に卓越周波数が多く存在している．**図-3(a)**と**図-3(d)**の結果を比較すると，振幅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．

次に，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．

$$\nu = \frac{1}{2} \times \frac{\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 2}{\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 1} \qquad \cdots (1)$$

$$E = \rho \times {V_S}^2 \times \frac{3 \times \left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 4}{\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 1} \qquad \cdots (2)$$

表-2 算出した弾性係数

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

$$K = \rho \times \left({V_P}^2 - \frac{4 \times {V_S}^2}{3} \right) \qquad \cdots (3)$$

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-2** に示す．Hoque & Tatsuoka[2)]が角柱の豊浦供試体に対して，繰返し載荷によって求めた，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．

4．まとめ

Near field effect は，P 波によって生じていると考えられる．

BE 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，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．

参考文献

1) Lings ML, Greening PD：A Novel Bender/Extender Element for Soil Testing, *Gèotechnique* 51(8), pp.713-717, 2001.　2) Hoque E., Tatsuoka F.：Anisotropy in elastic deformation of granular materils, Soils and Foundations, 38(1), pp.163-179, 1998.