時間引き延ばしパルスを用いたベンダーエレメント試験による砂および泥炭の位相速度評価

秋田大学　正会員　○荻野俊寛
同上　同上　及川　洋
北海道大学大学院　フェロー会員　三田地利之

1.　はじめに

筆者らはこれまでベンダーエレメント(以下 BE)試験の送信波に TSP(時間引き延ばしパルス : Time Stretched Pulse)を用いる手法を提案してきた [1), 2)]．本報告はこの手法を用いた BE 試験装置系のインパルス応答の同定法および位相速度の評価手法について示しており，砂および泥炭に対する実験結果からそれぞれの位相速度を検討している．

2.　TSP によるインパルス応答

図-1 は送信波に TSP を用いた BE 試験の代表的な送･受信波形を示している．TSP を用いた BE 試験では観測した受信波に TSP 逆フィルタを畳み込むことによって BE 試験装置系のインパルス応答を求めることができる．ここで送信波を $x(t)$，受信波を $y(t)$とし，そのフーリエ変換を $X(f)$，$Y(f)$とすると，送信波 x（t）が TSP のとき，TSP 逆フィルタは $X(f)$の複素共役に等しい．また，畳み込み演算はフーリエ変換の積と同値であるので，結局インパルス応答を $z(t)$とするとそのフーリエ変換 $Z(f)$は式(1)によって表わされる．

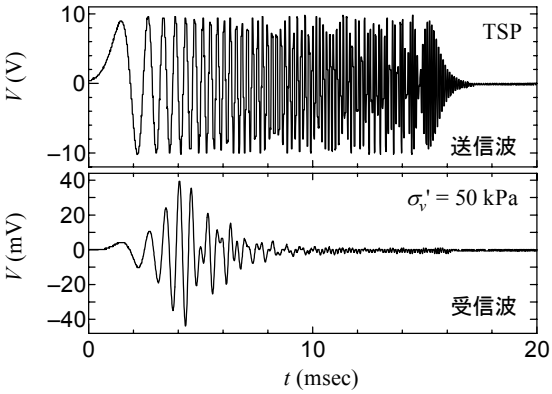

図-1　TSP による送・受信波の時刻歴

$$Z(f) = X(f)^{*} \cdot Y(f) \qquad (1)$$

ここに，記号*は複素共役を表わす．図-2 は式(1)を逆フーリエ変換して得た $z(t)$を示している．ところで，一般的な送信波 x（t）およびその受信波 y（t）について，相互相関関数を求める場合，そのフーリエ変換は式(2)で表わすことができる．

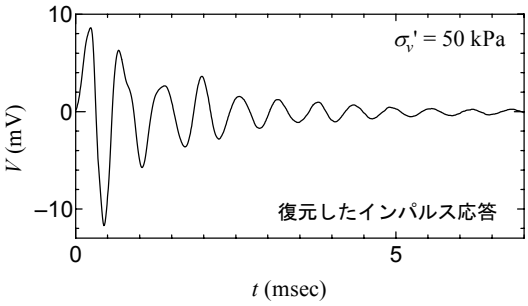

図-2　復元したインパルス応答

$$R_{xy}(f) = X(f)^{*} \cdot Y(f) \qquad (2)$$

ここに，$R_{xy}(f)$は相互相関関数のフーリエ変換である．式(1)および式(2)の右辺はまったく同形であることから，送信波が TSP である場合，インパルス応答を復元することは相互相関関数を求めていることと同義であり，インパルス応答と相互相関関数とは等しくなることがわかる．

3.　TSP を用いた BE 試験による位相速度

送信 BE から振動数 f の連続した sin 波を送信した場合を考える．ある時刻における送信波と受信波の位相差を$\Delta\phi$とすると，波の到達時間Δt は式(3)で表わされる．

$$2\pi f \Delta t = \Delta\phi \qquad (3)$$

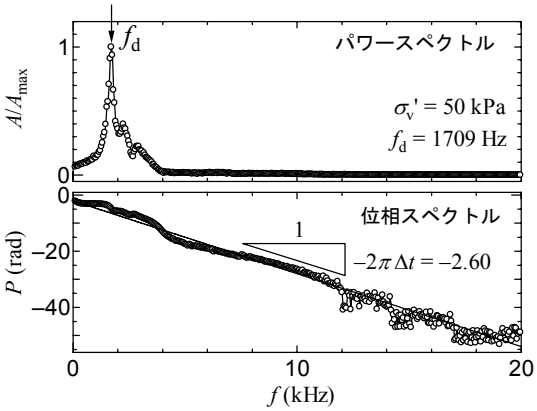

図-3　図-1 の受信波のフーリエスペクトル

したがって，波の伝播距離(BE 先端間の距離)を式(3)のΔt で除すことにより，波の位相速度 V_s を求めることができる．実際の BE 試験では例えば f を漸次変化させて送･受信波を観測して$\Delta\phi$を求めることにより，それぞれの f に対する V_s を連続的に求めることができる．しかしながら，この方法では変化させる f の数だけ測定を繰り返す必要があり，f に応じて連続的に V_s を求める場合には効率的ではない．そのような場合，多くの振動数成分を含んだ波を送信することで，一度の測定でこれらを把握することができる．TSP はパルス波と同じくあらゆる振動数成分を均一に含んでいるため，このような

キーワード　ベンダーエレメント，TSP，インパルス応答，位相速度
連絡先　〒010-8502　秋田県秋田市手形学園町１－１　秋田大学工学資源学部

場合に都合がよい．図-3 は TSP を送信波とした BE 試験の受信波について，フーリエスペクトルを示している．図-3 のうち，下段に示す位相スペクトルは一次の振動数 f_0 における位相を 0 として示している．ここで，この位相スペクトルの位相を $\phi(f)$ とし，$f=f_0$ のときの $\Delta\phi$ を ϕ_0 とすると，式(3)は式(4)で表わされる．

$$2\pi f\Delta t = \phi(f) + \phi_0 \tag{4}$$

ここで，仮に V_s が f によらず一定とすれば，Δt は f によらないため，式(4)の両辺を f で微分すると，

$$2\pi\Delta t = \frac{d\phi(f)}{df} \tag{5}$$

となる．式(5)の右辺は図-3 の位相スペクトルの傾きであるので，Δt が f によらないならば，近似線は直線となり，その傾きから，Δt を求めることができる．これに対し，V_s が f によって変化する場合，Δt を求めるためには何らかの方法で ϕ_0 を求め，式(4)によって Δt を求める必要がある．

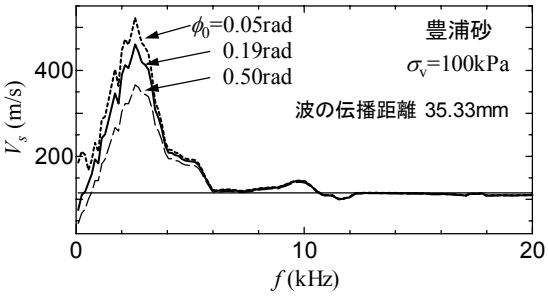

図-4　砂の位相速度(σ_v=100kPa)

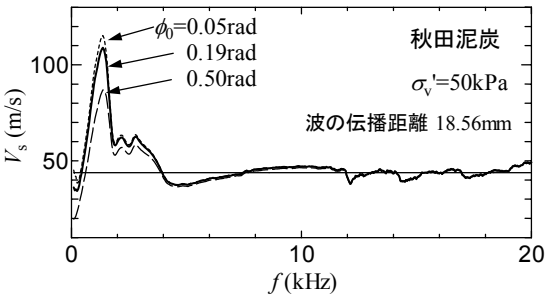

図-5　泥炭の位相速度(σ_v'=50kPa)

4.　実験結果および考察

図-4，図-5 はそれぞれ豊浦砂および秋田市近郊から採取した練り返した泥炭について，TSP を送信波とした BE 試験から求めた V_s を送信波の f に対して示している．なお，BE 試験は圧密容器（ϕ 60×h120mm）内において所定の σ_v'(50 および 100kPa)を載荷して実施している．図中に示す水平な線は V_s が f によらず一定であるとして式(5)から計算した V_s を示している．その値は砂の場合約 115m/s，泥炭の場合，45m/s であり，このとき Δt はそれぞれ 0.307msec および 0.414msec である．一方，V_s が f によって変化するとした場合，式(4)において ϕ_0 を決定しなければならないがそのためには別途試験を行わなければならない．そこでこれらの Δt をおおよその目安として，ϕ_0 の概略値を式(4)より逆算してみると，本報告の場合，f_0=97Hz(砂の場合)，49Hz(泥炭の場合)としてそれぞれ ϕ_0＝0.19rad(砂の場合)，0.13rad(泥炭の場合)である．図-4，図-5 中の実線および破線はこの ϕ_0 の値を基準とし，ϕ_0 を適当に変化させた場合について，V_s を示している．f が小さい領域では ϕ_0 の値によって V_s に差が見られるが，f が増大するにつれ，その影響は小さくなっていることがわかる．これは f の増加に伴い，式(4)中の $\phi(f)$ が増加するため(図-3)，ϕ_0 の値が相対的に小さくなるためである．したがって f が比較的大きい領域においてはこのように概算による ϕ_0 から V_s を求めることが十分可能であると考えられる．また，V_s は振動数によって大きく変化しており，砂，泥炭とも 2kHz 付近でいったんピークを示した後，V_s が f によらないとして計算した V_s の値の付近に収束する傾向を示している．このことは，BE 試験による位相速度が送信波として用いる波の振動数に依存することを意味している．BE 試験における V_s の振動数依存性について，Blewett et al.[3] は Biot 理論と BE 自身の強制振動の観点から検討している．本報告の場合，V_s がピークを示す f と受信波の固有振動数が近い値となっていることから，BE の強制振動による位相の変化の影響が大きいものと考えられ，ピーク付近で適切な V_s の評価を行うにはこの影響を考慮する必要があると考えられる．

5.　まとめ

TSP を送信波に用いたインパルス応答の同定は，TSP を送信波とした送受信波の相互相関関数を求めることと同義であることを示した．また，TSP を送信波としたベンダーエレメント試験から位相速度を求める手法について示し，砂および泥炭試料について実験結果を示した．実験結果において，求めた位相速度は振動数に大きく依存し，特に受信波の固有振動数付近で増加し，ピークを示したが，振動数の増加に伴い収束する傾向を見せた．また，その収束値はおおよそ振動数に依存しないと仮定して求めた場合の位相速度の値と近かった．

【参考文献】1) 荻野俊寛，及川　洋，三田地利之，対馬雅己，西田浩太：種々のベンダーエレメント試験方法によるせん断弾性係数の比較，第 40 回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.223-224，2005.　2) 荻野俊寛，及川　洋，三田地利之，対馬雅己，西田浩太：時間引き延ばしパルスを用いたベンダーエレメント試験による砂のせん断波速度，土木学会論文集 C, Vol. 62, No. 1, pp.169-174，2006.　3) Blewett, J., Blewett, I. J. and Woodward, P. K. : Phase and amplitude responses associated with the measurement of shear-wave velocity in sand by bender elements, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37, pp. 1348-1357, 2000.