

ベンダーエレメント試験における土の減衰振動に着目した動的変形特性の評価

秋田大学
北海道大学大学院
秋田高専

○正会員
フェロー会員
正会員

荻野俊寛
三田地利之
対馬雅己

1 はじめに

泥炭の強度・変形特性を求めるための試験方法開発の一環として、一面せん断試験装置にベンダーエレメントを組み込み、ベンダーエレメント試験(以下 BET)を実施して、動的変形特性の把握を試みた。その結果、通常の BET に加えて減衰振動に着目した新たな手法によってせん断弾性係数および減衰比を求め得ることを、泥炭および粘土についての実験結果によって確認したのでここに報告する。

2 実験概要

ベンダーエレメント(以下 BE)を載荷板および底板に組み込んだ H-II 型一面せん断試験装置のせん断箱内(正方形断面; 一辺 70mm)で所定の圧密応力($\sigma_{v0}'=20, 40, 60, 80\text{kPa}$)で段階的に圧密を行い、各段階の圧密打ち切り時点で BET を実施して送信波および受信波の波形を計測する。送信波にはファンクションジェネレータより、電位差 20V、振動数 40Hz の矩形波を用いている。送・受信波は GP-IB を介してデジタルオシロスコープからパソコンへ転送され、記録される。なお、送受信波の増幅は行っていない。

実験に用いた試料は秋田市近郊から採取した泥炭および市販の粉末状粘土の二種類であり、十分な蒸留水を加え、ミキサーで攪拌したペースト状のものをせん断箱内で直接圧密している。

3 せん断弾性係数および減衰比の算定

図 1 は代表的なベンダーエレメント試験の送・受信波の電位差と時間の関係である。通常の BET では送・受信波の時間差(図中 Δt_1 , Δt_2 等)から供試体中を伝わるせん断波の速度 V_s を求めるが、別の見方をすれば、BET の受信波は送信波によって供試体に力積が与えられたときの自由振動の変位応答に置き換えることができる。つまり BET は送信波が発生している点(図中 A 点)で瞬間的に供試体に衝撃が加えられ、受信波はそれによって生じる供試体の自由振動を測定していることになる。図に示されるように、当然のことながら受信波は減衰振動するので、減衰振動による共振法試験と同様の手法を適用することによって、受信波の波形からせん断弾性係数 G および減衰比 D を求めることができる。減衰振動から求めた G を G_d とすると、 G_d および D は式(1)で表される。

$$G_d = 4h^2 f_0^2 \rho_t, \quad D = \frac{\Delta}{2\pi} \quad (1)$$

ここに、 ρ_t は湿潤密度、 f_0 、 Δ はそれぞれ減衰振動の固有振動数および対数減衰率である。ただし共振法の場合と違って BET では供試体の上端と下端の境界条件はほとんど同じなので、自由振動の波長は供試体高さ h の 2 倍であると考えている。

4 実験結果と考察

図 2 は粘土における代表的な受信波の波形とそのパワースペクトルを示している。図 1 の受信波と比較すると粘土の受信波の電位差は泥炭よりも小さく、応答の大きさには差があるものの、いずれの受信波も減衰振動していることが確認できる。受信波のパワースペクトルには 1900Hz 付近に卓越振動数が認められ、これらの振動数帯の波が減衰振動に最も大きく寄与していることがわかる。これは泥炭についても同じで、図 1 の泥炭の卓越振動数は 1300Hz 付近となっている。図 3 はこれらの卓越振動数のピーク(図中矢印)の振動数 f_p の値を各圧密段階について示したもので、 σ_{v0}' とともに f_p の値も増加していることから、受信波の減衰振動は σ_{v0}' や供試体高さといった供試体の状態の変化に対応して変化していることがわかる。図 4 はこれらの f_p をもとに $f_0=f_p$ として式(1)により計算した G_d を σ_{v0}' に対してプロットしたもので、図中には通常の BET に従って Δt_1 および Δt_2 (図 1 参照)から計

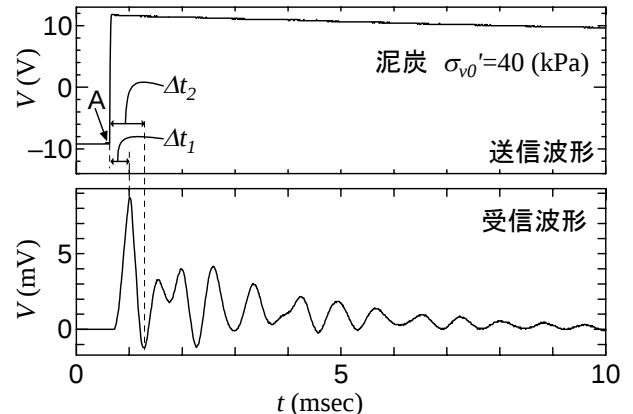


図 1 代表的な送・受信波形(泥炭)

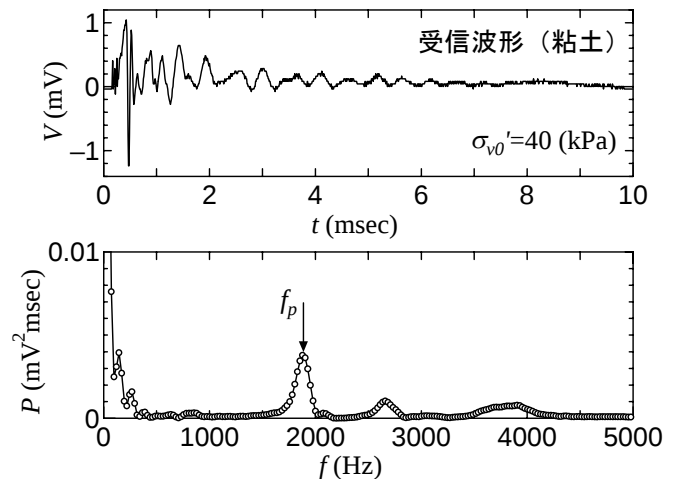


図 2 粘土の代表的な受信波形およびパワースペクトル

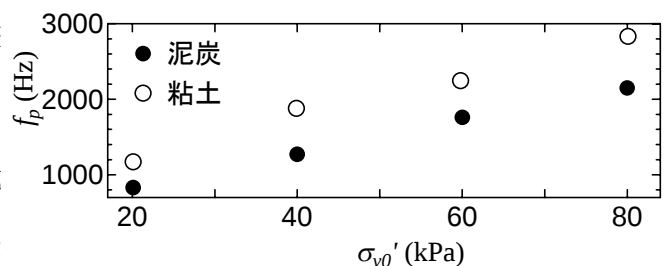


図 3 卓越振動数の変化

算した V_s から求めた 2 通りの G もあわせてプロットしてある。 G_d の値はおおよそ Δt_1 で定義した場合の G と Δt_2 による G との中間に位置しているが、 $G_d - \sigma_{v0}'$ 関係は通常の BET から求めた $G - \sigma_{v0}'$ 関係と類似しているので、 G をよく評価できているといえよう。 なにより、この手法は、例えば Δt を Δt_1 、 Δt_2 いずれとするか等、 Δt の定義方法や、受信波の立ち上がり点・ピーク点が明瞭に現れないため Δt を決定しにくい、といった通常の BET で指摘される問題点に影響されないので、より適切な G の値の算定が可能となる。

図5は泥炭と粘土の G について比較するため、本報告で行った実験結果を含めた、数種類の泥炭、粘土について行った BET の結果^{1), 2)} について、 $G(G_d) - \sigma_{v0}'$ 関係を比較したものである。 泥炭の G の値は試料の違いによって大きな差はなく 20~80kPa の範囲ではいずれも数 MPa 程度となっていて、繰り返し非排水三軸試験による従来の結果³⁾ と近い値となっている。 また両者の位置関係から粘土の G の値は泥炭よりも数倍大きいものの、その変化傾向は泥炭と粘土で大きな差はないようである。

図6は図2に示す受信波の Δ を求めるために、電位差のピーク値(絶対値)とその発生順位の関係を+側、一側の振幅それぞれについて片対数で示したものである。 ただし、 f_p 付近の振動数成分を強調するため、受信波の低周波成分を除去する処理を行っている。 Δ は本来一周期毎の振幅の減少率の対数をとったものであるが、これは図中の近似線の傾きによって表されるので、式(1)から D を求めることができる。 図7は各圧密段階において同様に D を求め、 σ_{v0}' に対してプロットしたものである。 D の値はおおよそ 0.03~0.05 の範囲にあり、これまで報告されている繰り返し非排水三軸試験の値^{4), 5)} と近い値を示している。 泥炭の D は σ_{v0}' が大きくなるにつれ若干減少する傾向を示しており、この点も過去の報告例⁵⁾ と一致している。 一般に粘土についても同様の傾向が認められるようであるが、その依存性は泥炭ほどは強くないようなので⁴⁾、本研究では σ_{v0}' の範囲が小さいこともあり、その影響がほとんど表れていないようである。

泥炭について繰り返し非排水三軸試験などを実施するのは難しかったため、従来、泥炭の動的変形特性を求めた例はほとんどなかったが、BET によって比較的簡単に G を求め得ることがわかってきた²⁾。 特に本報告に示した手法は G だけでなく D も求めることができ、BET の利用可能性をさらに広げるものと考えられる。

5 結論

BET における減衰振動に着目して土の変形特性を求める手法について示し、泥炭、粘土についてせん断弾性係数 G および減衰比 D を求めた。 強度特性や変形特性を求めるための試験実施が困難な泥炭であるが、この手法を含む一連の BET によって泥炭の変形特性を比較的簡単に求め得ることを示した。 泥炭の G は $\sigma_{v0}' = 20 \sim 80 \text{ kPa}$ の範囲で数 MPa 程度、減衰比 D は 0.03~0.05 の値を示した。

【参考文献】

- 1) 荻野・三田地・澁谷・及川：圧密定体積一面せん断試験による粘性土の変形・強度特性，土木学会論文集，No.673/III-54，pp.15-26，2001。
- 2) 三田地・工藤・真田・荻野・神谷：ベンダーエレメント併用一面せん断試験による熱帯性泥炭の強度・変形特性，第56回年次学術講演会，pp.620-621，2001。
- 3) 土岐・能登・熊谷・峯田：泥炭の動的変形特性，土質工学会北海道支部30周年記念「泥炭に関する研究討論会」論文集，pp.51-60，1986。
- 4) Shibuya, S., Mitachi, T., Fukuda, F. and Degoshi, T.: Strain Rate Effects on Shear Modulus and Damping of Normally Consolidated Clay, ASTM, pp. 365-375, 1995。
- 5) 能登・熊谷：泥炭の動的変形特性に関する実験的研究，北海道開発局土木試験所月報，No.393，pp.12-21，1986。

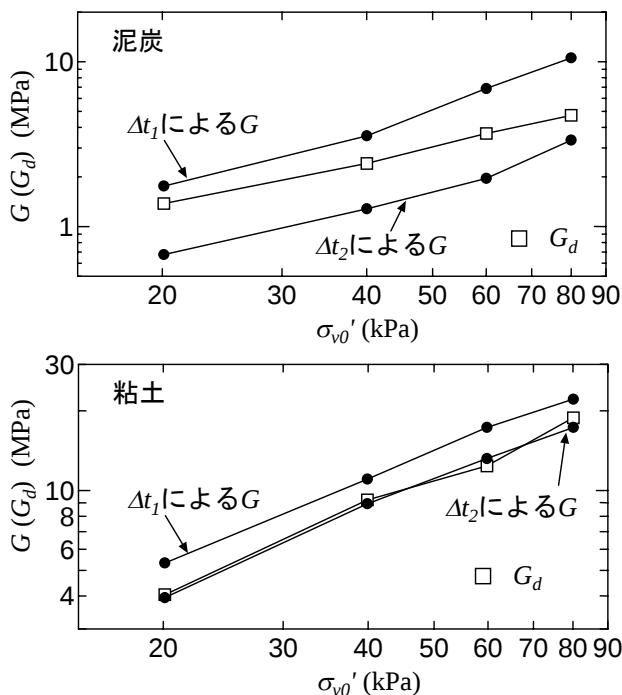


図4 G_d と通常の BET による G との比較

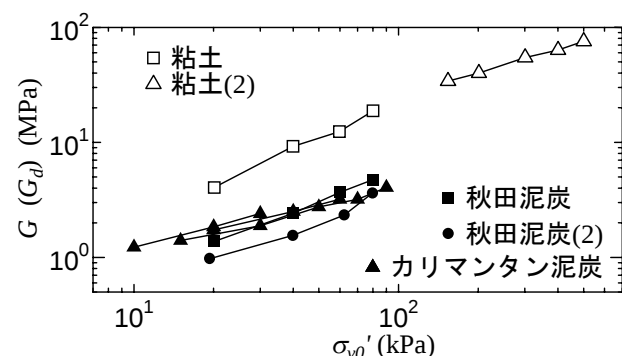


図5 泥炭および粘土の G

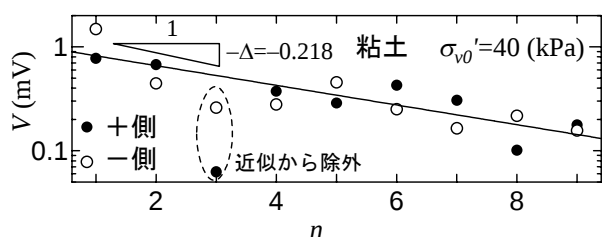


図6 粘土の対数減衰率 Δ

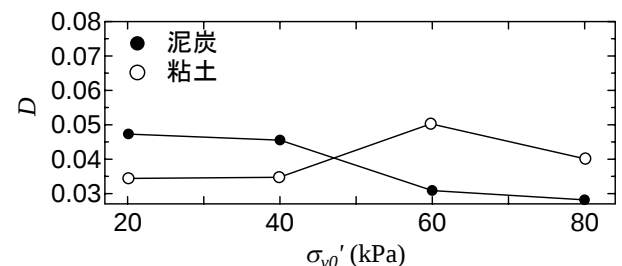


図7 泥炭および粘土の減衰比