

室内ベンダーエレメント試験による せん断弾性係数Gの評価

川口貴之¹・三田地利之²・澁谷啓³・佐野侑房⁴

¹正会員 工修 函館工業高等専門学校助手 環境都市工学科 (〒042-8501 函館市戸倉町 14 番 1 号)

²フェロー会員 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

³正会員 Ph.D. 北海道大学大学院助教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

⁴正会員 工修 函館工業高等専門学校教授 環境都市工学科 (〒042-8501 函館市戸倉町 14 番 1 号)

粘性土を用いたベンダーエレメント試験において、送信波の波形および周波数、伝達距離の違い等が受信電圧時刻歴に及ぼす影響やせん断弾性波到達の見極めを困難にする "near-field-effect" の特徴について検討した。この結果から、せん断弾性波の伝達時間測定方法は送信開始時とせん断弾性波の到達開始時とを結ぶ "start-to-start" とすべきであることを示し、"near-field-effect" を見極めるために、試験時には複数の異なる波形および周波数の送信波を用いるべきであり、所定の圧密応力に達するまでの複数の応力点において試験を行うべきであることを提案した。また、本文で提案した方法を適用して得られた低深度の自然堆積粘土のGは原位置弾性波速度探査試験より得られた G_T との対応関係も良いことを示した。

Key Words : *bender element test, elastic shear wave velocity, travel time, shear modulus, near field effect, small strain range*

1. はじめに

各種室内試験において、 10^{-6} 程度以下のひずみレベルにおける地盤材料のせん断弾性係数Gの測定は工学的に極めて重要である。例えば、土の液化強度はせん断弾性波速度と密接な関連があり、PS 検層に代表される原位置弾性波速度探査より求めた G_T との比較・検討から室内供試体の乱れを評価することもできる^{1,2)}。このような室内試験でGを求める方法の一つに、ベンダーエレメント(以下BEと略記)試験があり、様々な室内試験機に取付け可能であるというメリットもあつてか、近年急速に普及しつつある。また、近年では原位置試験としても応用されている³⁾。

BE試験方法はShirley & Hampton⁴⁾によって開発され、供試体中を伝達するせん断波の速度を測定することにより、微小ひずみ域におけるGが得られるといった極めてシンプルな仕組みである。

しかしながら、せん断弾性波の伝達距離や伝達時間の測定方法など、その試験結果の解釈には困難を伴う。とりわけ、伝達時間の測定方法については、その際の主観

性を減らすために解析手法などの様々な提案がされているが、いまだに国際的コンセンサスは得られていない⁵⁾。

この大きな原因の一つに、せん断弾性波到達時の見極めを困難にする "near-field-effect" がある。これは波長に比べて伝達距離が短い場合にのみ生じ、せん断弾性波に比べて大きい速度の波が受信波時刻歴の初期部分に現れる現象のことである。室内試験ではその供試体の大きさに限界があり、伝達距離を大きくすれば、減衰の影響で受信波形が不明瞭になるなどの点から、この現象を回避することが困難であると考えられ、"near-field-effect" を考慮した伝達時間の測定方法の確立が必要だと思われる。

そこで、本研究では数多くのBE試験を手早くかつ容易に、そして操作上のミスなどが少ない状態で行えるよう、まず始めに送信電圧波形・周波数の測定から、波形の送信、さらには送・受信電圧波形の記録までをパソコンのキーボードから実施可能なせん断弾性波速度測定システムを開発した⁶⁾。

その上で、伝達距離が小さいほどわずかな伝達時間の違いがGの値に大きく影響し、さらに "near-field-effect" を考慮せざるを得ない状況であることから、あえて汎用

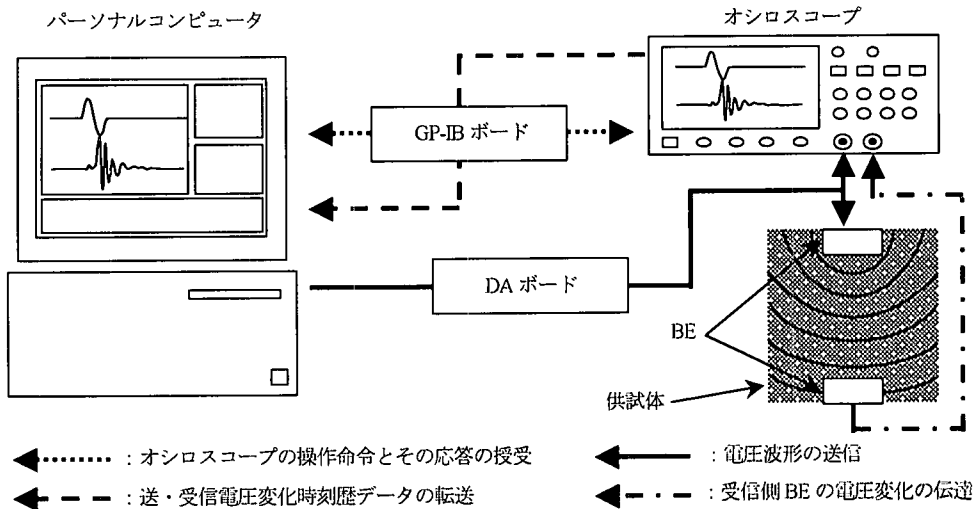


図-1 パソコンを用いたせん断弾性波速度測定システムの概略図

性の高い供試体高さが 2 cm の圧密試験機を標準として BE 試験を行い、波形・周波数・伝達距離を変化させた実験結果をもとに、せん断弾性波の伝達時間測定方法の確立について検討した。なお、実験には市販の NSF 粘土と原位置弾性波速度探査が実施されている乱れの少ない有明粘土を用いている。

2. 試験方法

(1) パソコンを用いたせん断弾性波速度測定システムの開発

図-1 は本システムの概略図である。パソコンからの命令によって電圧波形が DA ボードから送信側 BE とオシロスコープに対して同時に送信され、オシロスコープが受信した送・受信電圧変化時刻歴データが GP-IB インターフェイスを介してパソコンに取込まれ、モニターに表示される仕組みとなっている。

このシステムでは、コマンドを入力することにより、送信電圧波形ならびに周波数、トリガや掃引時間なども設定でき、BE 試験に関わるオシロスコープの操作は一切必要としない。さらに、得られた送・受信時刻歴は自動的にオシロスコープからパソコンに取込まれ、ハードディスクに保存される。

本システムは BE が取付けられている室内試験装置の制御とは独立しており、室内試験開始後いつでも BE 試験が実施可能である。また、可搬式であるために BE が組込まれているいかなる試験装置でも本システム 1 台で実施できる。

図-1 に示した DA ボードの分解能は 16 bit であり、サンプリング周波数は $2 \times 10^3 \sim 2 \times 10^5$ Hz の範囲で設定可

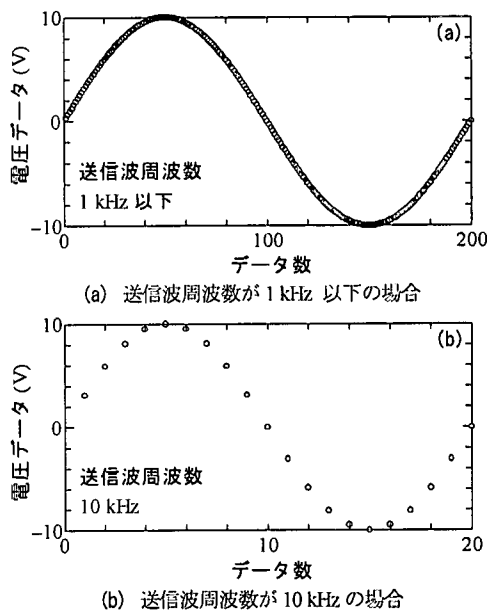
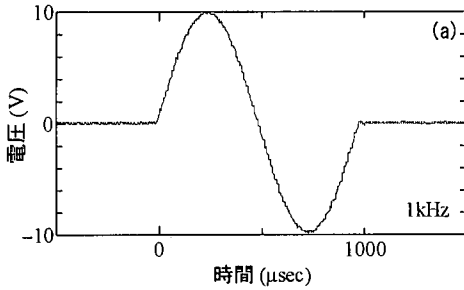


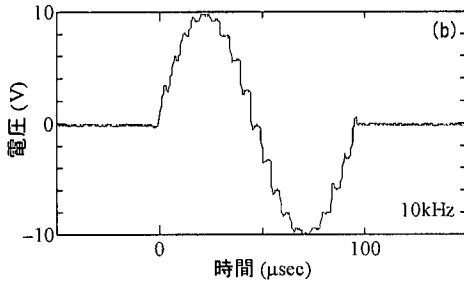
図-2 送信波の作成方法

能である。そこで、送信波の周波数が 1 kHz 以下の場合、一周期を 200 点のデータ群によって作成し (図-2 (a) は sin 波の例)、1 kHz 以上の場合は一周期をサンプリング周波数に応じたデータ数とした (図-2 (b) は 1 周期当たり 20 点で構成した sin 波の例)。

図-3 は 1 kHz (図-3 (a)) および 10 kHz (図-3 (b)) の sin 波を送信した際に得られた時刻歴であり、10 kHz においても十分な精度で sin 波形状を成していることが確認できる。しかし、このように離散的であることが受信波に及ぼす影響について、今後ファンクションジェネレータを用いた場合と比較・検討する必要があると考えて



(a) 送信波周波数が 1 kHz の場合



(b) 送信波周波数が 10 kHz の場合

図-3 sin 波を送信した際に得られた送信波電圧時刻歴

いる。

このようなシステムを開発したことにより、圧密中のある応力点において、波形や周波数を変えた多くの試験をすばやく実施することが可能となり、その際の操作上のミスも軽減できたと考えられる。また、現時点においてせん断弾性波の伝達時間測定方法が確立されていない以上、波形の自動記録は必須だと思われる。

(2) 試料および実験方法

実験には 2 種類の粘性土を使用した。一つは多くの均質な供試体を得る目的で、粉末乾燥状態で市販されている NSF 粘土⁷⁾ (商品名, $w_L = 55\%$, $I_P = 26$) に、含水比が液性限界の 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セル内で十分に脱気した後、鉛直応力 150 kPa で一次元圧密したものを用いた。もう一つは、本文で検討したせん断弾性波の伝達時間測定方法を原位置試料に適用する目的で、大口径シェブルックサンプラーにより地表面下 4 m の地点から採取された「乱れの少ない有明粘土試料⁸⁾」を用いた。試料の含水比は 137%, $w_L = 117\%$ および $I_P = 68$ であった。また、原位置での有効土被り圧は 21 kPa と極めて小さい。

実験には主に鉛直方向に一对の BE を装着した圧密容器⁹⁾ を使用した。なお、送信側 BE は電圧変化が与えられた際に変形が生じることによってせん断波を発生させ、受信側 BE は感知した変位を電圧に変換することによってせん断波の到達を確認する役割を果たしている。また、供試体は $\phi = 6$ cm の円盤形であり、その高さは 2 cm であ

る。なお、供試体高さの違いによる影響を比較・検討する目的で、本文中の一部の実験では BE を装着した一面せん断試験装置¹⁰⁾ も用いている。この供試体は 6 cm × 6 cm の正方形断面で、高さは 4 cm である。

圧密試験機における BE の結線方法については Dyvik & Madshus¹¹⁾ が推奨するように、発信側には並列、受信側には直列の結線を施している。一面せん断試験装置については、結線の容易さから双方ともに並列としており、入力エネルギーは半分になるが、高さが高々 4 cm 程度の供試体を用いた実験では波の読み取りに支障はなかった。

BE 試験におけるせん断弾性波速度 V_s は次式により求める。

$$V_s = L/\Delta t \quad (1)$$

ここで、 L は伝達距離である。本文ではこれを一对の BE の先端間 ("tip-to-tip") の距離としている (3 (2) を参照)。また、せん断弾性係数 G は V_s の測定より次式により算定する。

$$G = \rho_s \cdot V_s^2 \quad (2)$$

ここで、 ρ_s は土の湿潤密度である。

3. ベンダーエレメント試験の解釈に関する在来の研究

(1) 伝達時間の測定方法について

原位置弾性波探査では、起振方向を逆転させることによってせん断弾性波を見極め、起振開始時から受信第 1 波の開始時までを伝達時間とする場合がある (例えば Abiss¹²⁾)。BE 試験における伝達時間測定法の 1 つとして、この手法をそのまま適用することがある。

図-4(a) は BE 試験において矩形波を送信した際の送・受信電圧時刻歴の概念図であり、Dyvik & Madshus¹¹⁾ は図中の S 点から B 点までを伝達時間とし、これにより算出された G は共振法土質試験により求められたものと一致することを報告している。

Jovičić et al.¹³⁾ は矩形波や sin 波を用いた BE 試験や、有限要素法による解析など、様々な方法から伝達時間について検討している。その中の 1 つとして、連続的に sin 波を送信した際に共振する周波数を選び、その時のピーク間の時間差を伝達時間とする方法を紹介している。図-4(b) はこの概念図であり、図中では例として 4 番目のピーク間の距離を伝達時間 T_4 としている。また、この手法による伝達時間は Dyvik & Madshus¹¹⁾ の方法と一致すると報告しており、共振周波数を用いることは "near-field-effect" を避ける有効な方法の一つだとしている。

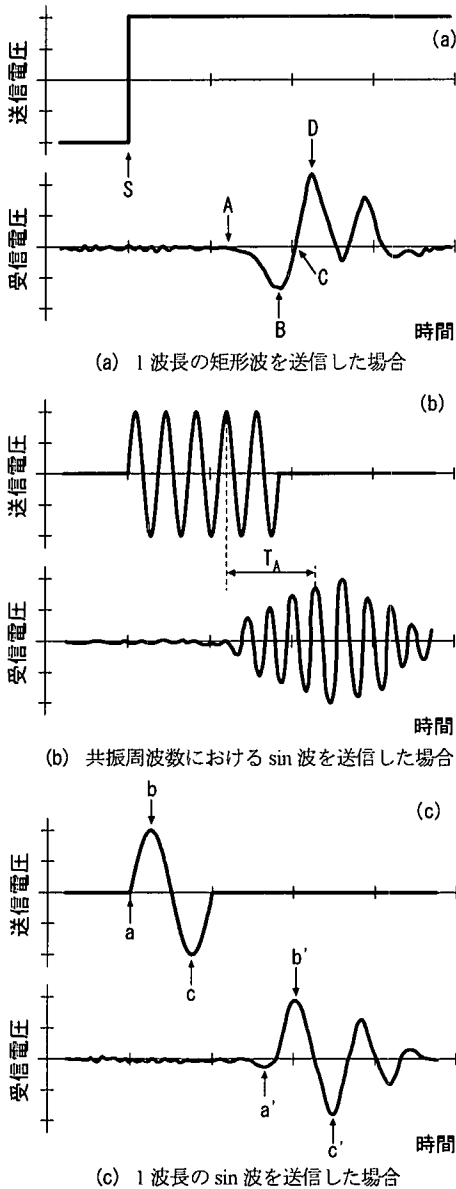


図4 異なる送信方法によって行われたBE試験より得られた送・受信波電圧時刻歴の概念図

Viggiani & Atkinson¹⁴⁾は送信波に1波長のsin波を用いた際に得られた送・受信電圧時刻歴(図4(c))はこの概略図)に対して、クロスコリレーション解析やクロスパワースペクトル解析を行い、それより得られた伝達時間が最も正確だと報告しており、この値は図4(c)中のb-b'間の時間に最も近い。また、同一条件下において矩形波を用いた実験も行っており、図4(a)中のS-AやS-BではGを過大評価すると報告している。なお、Viggiani & Atkinson¹⁴⁾は論文の中で言及はしていないものの、正しいとしている値(b-b')はS-Cまでの時間にほぼ相当しており、Dyvik & Madshus¹¹⁾の結果とは異っている。

(2) "Near-field-effect" について

Salinero et al¹⁵⁾は3次元の等方弾性体中を伝わる波を理論的に数式で表し、その中のせん断波は3つの成分からなることを示している。そのうちの2つはせん断(横, s)波の速度で進行するが、もう1つは圧縮(縦, p)波の速度で進行し、この成分は減衰しやすいために伝達距離が短い場合に限ってせん断波の到達開始時点の確認を困難にすると報告しており、これを"near-field-effect"と呼んでいる。なお、この成分もあくまでせん断波であるため、送信波形を反転することによって、これらのせん断波を区別することはできないとしている。また、Brigoni & Gotti¹⁶⁾はBE試験においても"near-field-effect"が存在することを報告している。

"Near-field-effect"の有無を評価する方法として、伝達距離内に存在する波数がいわれている。Salinero et al¹⁵⁾は送信波の周波数を用いた計算から2以下では影響が大きい、8程度ではほとんどないことを示し、Mancuso et al¹⁷⁾は受信波の周波数を用いた計算から1/4~4の波数で影響が現れやすいとしている。Viggiani & Atkinson¹⁴⁾によって行われた高さ76mmの三軸供試体を用いたBE試験においても、その波数は2~3程度であり、一般の室内試験機を用いて行われるBE試験において、"near-field-effect"の見極めは必要不可欠だと思われる。

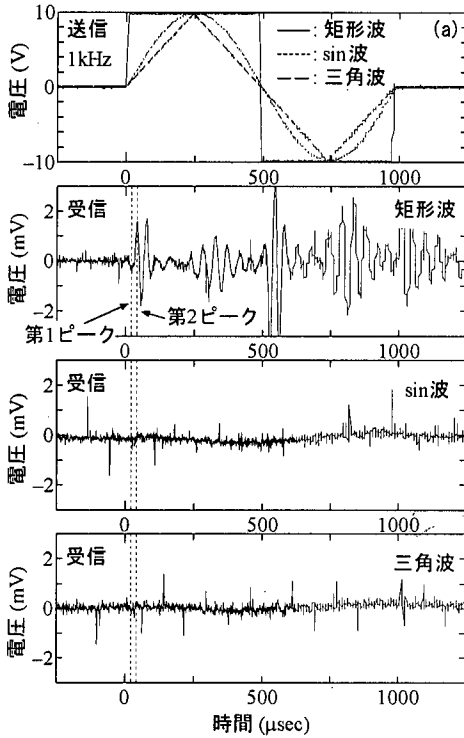
(3) 伝達距離について

伝達距離に関しては"tip-to-tip"が主流となっている。Viggiani & Atkinson¹⁴⁾は供試体高さを変えた三軸供試体に対してそれぞれ3種類の圧密応力でBE試験を行い、"tip-to-tip"が伝達距離としてふさわしいことを示している。ただし、このような伝達距離の議論は、用いている伝達時間が正しいという前提の上になり立っている。4章で提案する伝達時間測定方法はViggiani & Atkinson¹⁴⁾のものとは異なるが、得られる値はほぼ等しいと考えられることより、本文でも"tip-to-tip"を伝達距離とした上で、せん断弾性波の伝達時間測定方法を議論の対象としている。

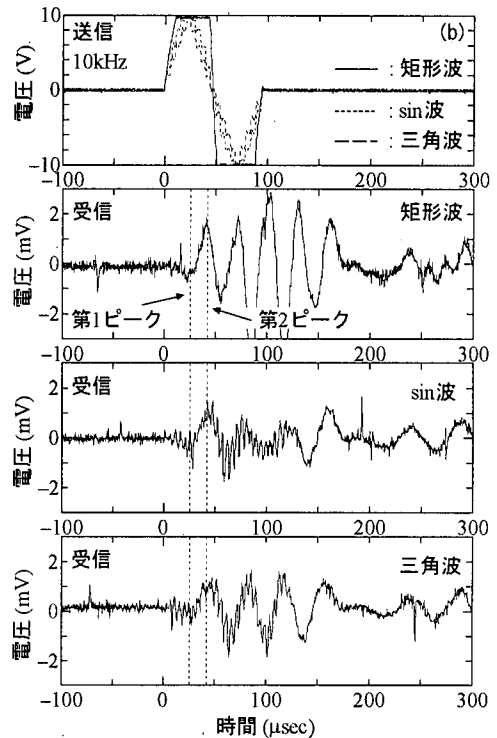
4. せん断弾性波の伝達時間測定方法に関する実験結果および考察

(1) 送信波形・周波数に関する検討

図5は送信波周波数1kHz(図5(a))および10kHz(図5(b))にて矩形波、三角波、sin波を送信した際における送・受信波の電圧変化時刻歴である。これらは、NSF粘土を圧密試験機内で鉛直応力400kPaまで、一次元圧密した後、3t法によって圧密を打切った時点におけるBE試験結果である。図中の点線は矩形波を送信した



(a) 送信波周波数が 1 kHz の場合



(b) 送信波周波数が 10 kHz の場合

図-5 異なる波形を送信した BE 試験より得られた送・受信波の電圧時刻歴

際に得られた受信波の第 1, 第 2 ピークの時刻を示している。

図-5(a)においては、矩形波以外の受信波にせん断波到達を示す明確なピークは見られないが、図-5(b)中の sin 波および三角波を送信した際の受信波の第 1 ピーク、第 2 ピークはノイズの影響で明確に確認できないものの、矩形波のもの（点線）とほぼ同時刻だと考えられ、その振幅は矩形波、sin 波、三角波の順に小さくなっているように見える。

図-6 は周波数 1, 2, 4, 8 kHz での一周期の sin 波と 100 Hz での一周期の矩形波を送信した際における送・受信波の電圧時刻歴である。供試体の圧密条件は図-5 と同じであり、図中の点線についても図-5 と同様である。送信 sin 波の周波数が小さくなるほど受信波の振幅が小さくなり、1 kHz の sin 波に対応するピークはほとんど確認できない状態となっている。しかし、矩形波の受信電圧時刻歴に現れている第 1, 第 2 ピーク（点線）と比較すると、送信 sin 波の周波数、さらには sin と矩形の違いによらずそれぞれのピークはほぼ同時刻であることが推測される。

BE 試験では、送信側 BE の変形は把握不可能であり、周波数が小さい場合などには必ずしも送信側 BE の変形が送信電圧波形の周波数に追従できていない可能性があるものの、図-5 および図-6 の結果から判断すると、受信波の第 1 ピークや第 2 ピークの振幅は、送信波の送信直

後における電圧変化量の大きさに依存しているように見える。また、受信波の初期部分における周波数は必ずしも送信波の周波数に依存しないと考えられる。

いずれにしても、以上のことから送信側 BE に与えた電圧波のピークと、これより生じる BE の運動に伴って実際に発生するせん断波のピークは必ずしも時間的に一致しないことが分かり、ピーク間の時間差を伝達時間とする”peak-to-peak”よりはむしろ、『送信側 BE に電圧変化を与え始めた時点を送断波の発生開始時と考え、せん断波の到達開始時までの時間差を伝達時間とする”start-to-start”』の方がより適当だと思われる。ただし、この際 ”near-field-effect” を見極めることが重要になることは言うまでもない。

なお、このことは図-6 における 4 kHz 以下の実験結果では、ピーク間の時間差は負になってしまうことからわかる。

さらに付け加えると、原位置弾性波速度探査におけるクロスホール法などのように発生したせん断波を 2 箇所直接測定する方法では、得られた時刻歴に対してクロスコリレーション解析などを行うことに問題がないが、BE の運動に伴って実際に発生するせん断波のピークは必ずしも送信電圧波形のピークと時間的に一致しないことを考えれば、この手法を BE 試験に応用することは危険を含んでいると思われる。しかし、3 章で説明した

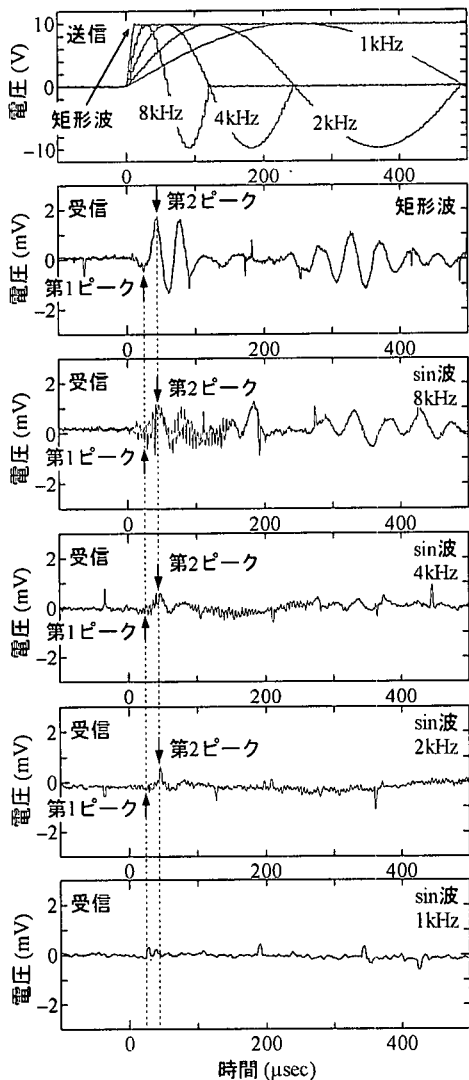


図-6 異なる周波数の sin 波を送信した BE 試験より得られた送・受信波の電圧時刻歴

Viggiani & Atkinson¹⁴⁾ の実験では送信波の周波数が受信波のものとはほぼ一致しており、この場合には開始点 (start) とピークまでの時間は等しくなり、"start-to-start" と "peak-to-peak" から得られる伝達時間は原理的には一致すると考えられる。

(2) 伝達距離の違いに関する検討

実験によって伝達時間の測定方法を模索する場合、供試体密度、圧密、送信波条件が等しく、伝達距離のみが異なる一連の BE 試験結果を比較することが最もシンプルで良い方法だと思われる。

図-7 は圧密試験機 (図-7(a)) と一面せん断試験機 (図-7(b)) を用いて行われた BE 試験結果の比較であり、送信波形を矩形波とし、その伝達距離 L は 0.65 cm (図

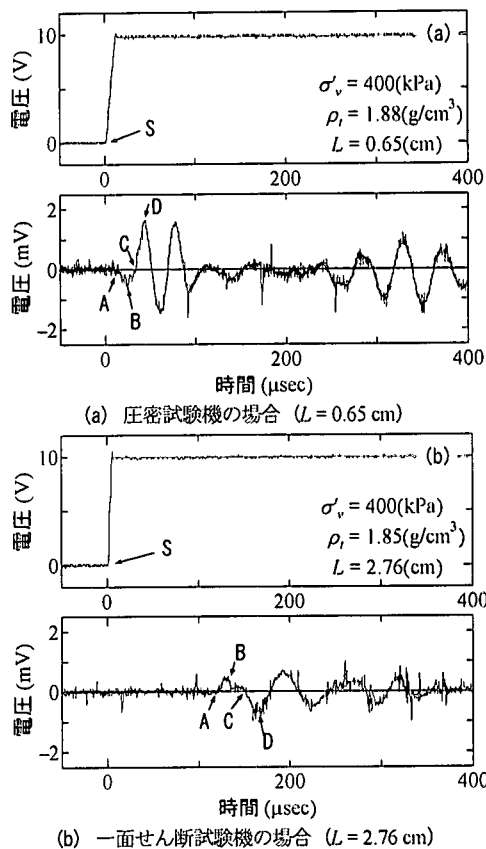


図-7 異なる伝達距離において一波長の矩形波を送信した BE 試験より得られた送・受信波の電圧時刻歴の比較

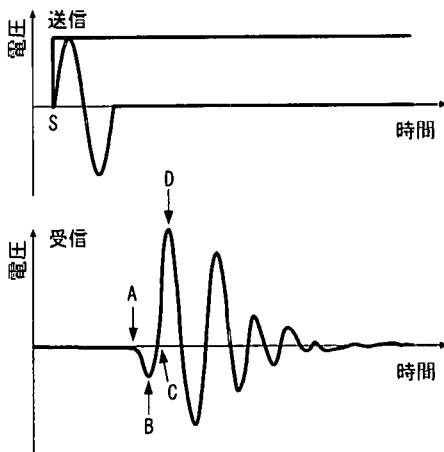


図-8 送・受信電圧時刻歴の概念図

-7(a)) と 2.76 cm (図-7(b)) であった。なお、圧密条件は図-5 および図-6 と同じである。

図-8 は送・受信電圧時刻歴の概念図であり、せん断波の到達点として考えられる 4 つの候補に番号を付している。先の節で検討した結果から送信開始時を S 点とし、受信電圧時刻歴において電圧変化が最初に現れた時点

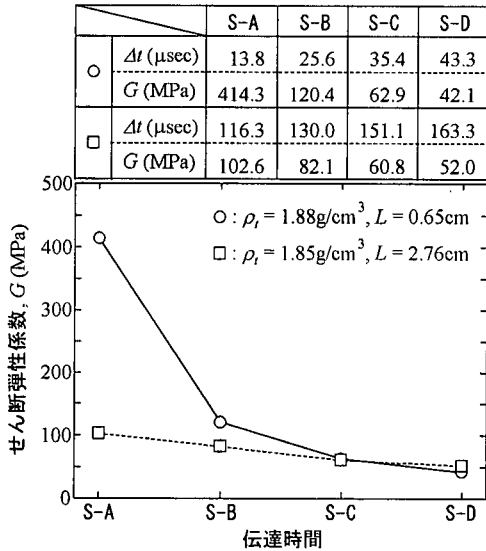


図-9 異なる伝達距離の BE 試験結果における伝達時間測定方法の違いによる G の比較

A 点, 第 1, 第 2 ピークをそれぞれ B, D 点, 第 1, 第 2 ピークの間において電圧が 0 となる時点を中心とした。なお, 図-7 中にはそれぞれに相当する時点が矢印で示している。

図-9 は図-7 中に示した S-A から S-D をそれぞれの伝達時間とし, その時間を用いて算出した G を比較したものであり, S-C 間を伝達時間として計算した際に最も両者の値が近づいている。また, この図より, 伝達距離が大きくなれば, 到達開始点の測定方法による G の誤差は小さくなるのが分かる。

ここで, S-C 間を伝達時間として図-7 に示した実験結果における伝達距離内に存在する波の数を受信波初期部分の周波数を用いて計算すると, それぞれ 1 個 (図-7(a)) と 2.6 個 (図-7(b)) となり, "near-field-effect" を考慮すべき実験結果ということになる。

また, せん断弾性波の送・受信時における BE の運動方向に着目すると, 受信時における BE の初動は送信時と同方向であると考えられる。例えば, 1 対の BE が水平方向に取り付けられているとき, 送信側 BE の初動の向きが下方向であった場合, それによって生じたせん断弾性波が媒体である土中を伝播し, 受信側 BE の初動の向きも下方向であると考えられる (図-10 参照)。ただし, BE の運動に伴って発生する電極の正負は結線方法によって異なるため, 圧密・一面せん断両試験機に取り付けられた BE について調べたところ, 図-7(a), (b) において BE の初動の向きが一致するのは, 両図中の D 点方向へ挙動した際であることが分かった。

以上のことから, 図-7 に示した BE 試験結果では, 図中の A-B で表される部分は "near-field-effect" と考えられ,

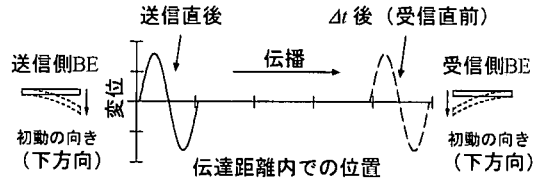


図-10 せん断弾性波の伝播と BE の初動の向きに関する概要図

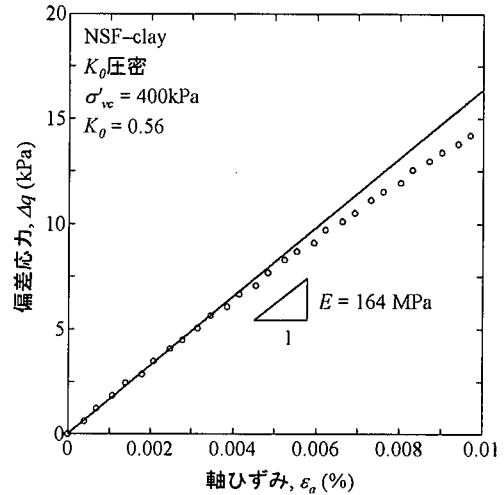


図-11 非排水三軸圧縮試験時における応力～ひずみ関係

せん断弾性波到達開始時は B 点から D 点の間に存在すると考えられる。また, 図-9 に示した結果も踏まえると, この場合 S-C 間が最も真の伝達時間に近いと考えられ, この結果は 3 章 (2) 節で説明した Viggiani & Atkinson¹⁴⁾ が提案する手法により得られた伝達時間を, 送信波に矩形波を用いた実験結果に適用した場合のものとも一致する。

図-11 は多機能三軸試験装置を用いて, 図-7 に示した実験と同じ鉛直応力 ($\sigma_v = 400$ kPa) まで K_0 圧密し, 3t 法にて圧密を打切った後に行った非排水三軸圧縮試験時における応力～ひずみ関係である。なお, 図中の縦軸は圧密終了時の応力点からの偏差応力増分 Δq であり, 供試体は図-7 に示した実験と同条件にて作成されたものを用いている。図中に示すとおり, 5×10^{-5} のひずみレベルにおけるヤング率 E は 164 MPa であった。 K_0 圧密した供試体に対して等方弾性体を仮定することには問題があり, 一つの目安に過ぎないが, この仮定を適用して算出した $G = 55 (= 164/3)$ MPa は図-9 より得られた結果に最も近い。

(3) "Near-field-effect" の特徴に関する検討

先の 2 つの節により, 伝達時間を測定するには "near-field-effect" の見極めが重要であり, そのためには "near-field-effect" の特徴について調べる必要があると思われる。

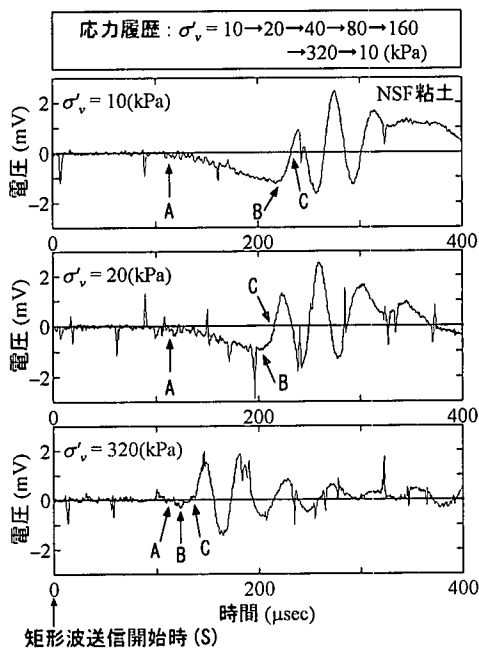
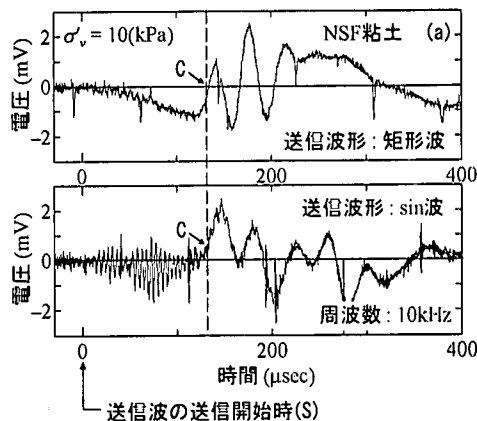


図-12 複数の応力点で行われたBE試験における受信電圧時刻歴の比較

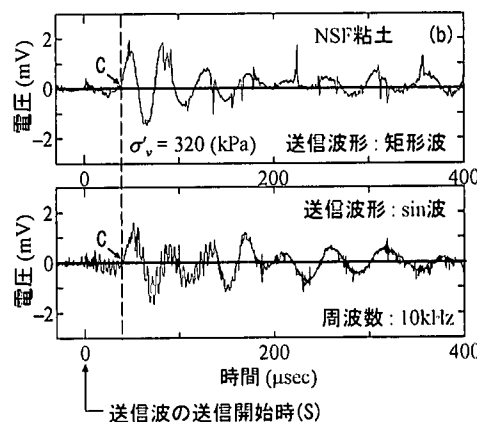
図-12 は圧密応力を段階的に増加させ、その都度 BE 試験を行った結果より得られた受信電圧時刻歴の比較であり、各载荷段階での矩形波送信開始時を基準時 ($t = 0 \mu\text{sec}$) としてデータを整理している。応力履歴は図中に示す通りであり、その各段階において BE 試験を行ったが、図中には代表的な3つの試験結果を示している。また、送信波形については矩形、sin波を用いているが、図-12 は矩形波の場合の受信電圧時刻歴である。

圧密応力の増大につれて、 G が増加しているにもかかわらず、第1波の到達点(図中のA点)は圧密応力によらずほぼ同時点にある。すなわち、A点からB点の部分はまぎれもなく"near-field-effect"による影響であると言える。さらに、この部分は圧密応力の増加とともに徐々に消失しており、"near-field-effect"に起因する波は圧密応力が小さいほど振幅・周期ともに大きいことが分かる。また、"near-field-effect"の縮小ならびに消失を把握するために、BE試験を行う際には所定の圧密応力に達するまでの幾つかの応力点においてBE試験を行うことが必要だと思われる。

図-12内の最上図から明らかなように、低圧密応力の領域では"near-field-effect"に起因する波がせん断弾性波速度の測定に大きく影響を及ぼし、第2ピークを有する波は下方へ大きくシフトしている。場合によっては、第2ピークの電圧が負になることも予想され、図-8におけるC点の選定方法は、明確に見出せるBおよびD点の間における変曲点あるいはその中点とするのが良いと思



(a) $\sigma'_v = 10 \text{ kPa}$ の場合



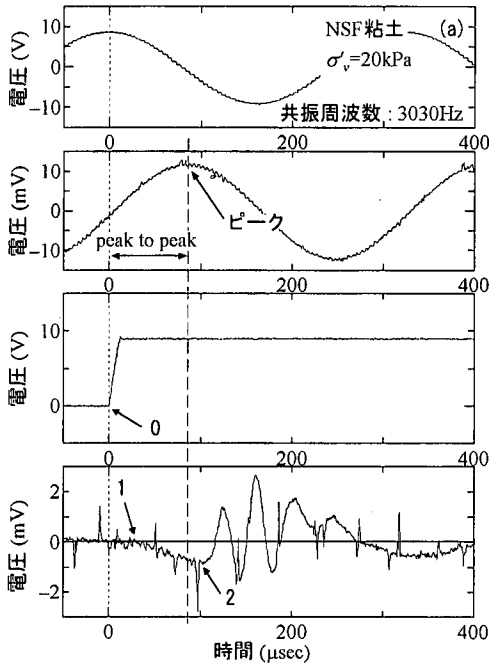
(b) $\sigma'_v = 320 \text{ kPa}$ の場合

図-13 送信波形に矩形波とsin波を用いた場合の受信電圧時刻歴の比較

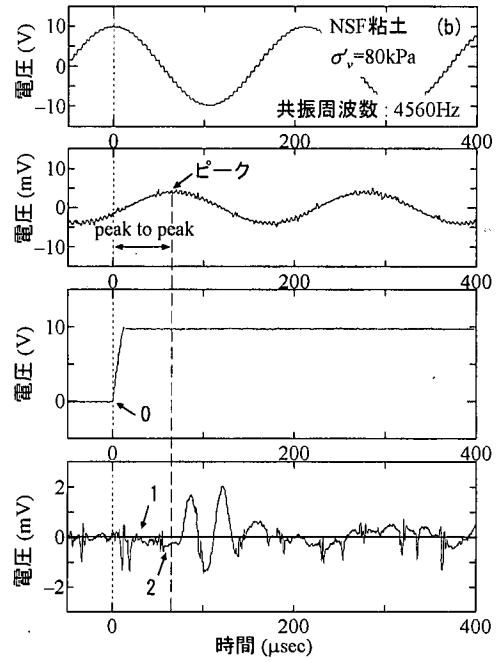
われる。

図-13は鉛直応力 $\sigma'_v = 10$ (図-13(a))および320 kPa(図-13(b))で行われたBE試験において、送信波形に矩形波とsin波を用いた場合の受信電圧時刻歴を比較したものである。図中には図-8におけるC点に相当する箇所を示している。

$\sigma'_v = 320 \text{ kPa}$ における第2ピーク付近までの時刻歴は送信波形によらずほぼ等しいが、 $\sigma'_v = 10 \text{ kPa}$ におけるsin波の受信電圧時刻歴では、矩形波を送信した際に見られる大きな電圧シフト現象が見られない。比較的高周波数のsin波を送信したことにより、"near-field-effect"が縮小・消失したか、あるいは送信波にsin波を用いること自体に電圧シフト現象を抑制する効果があることが考えられる。いずれにしろ、このように送信波形の異なる結果を比較することにより、伝達時間の妥当性を確認できる可能性があるため、同一応力点において複数の異なる波形および周波数でBE試験を行う必要があると思われる。



(a) $\sigma_v = 20$ kPa の場合



(b) $\sigma_v = 80$ kPa の場合

図-14 共振周波数での sin 波を連続的に送信した場合と一波長の矩形波を送信した場合における送・受信電圧時刻歴の比較

(4) 共振周波数に関する検討

試験機内に供試体がセットされたある時点において連続的に sin 波を送信した際、その周波数を変化させると幾つかの周波数において受信波の周波数が送信波の周波数と等しくなり、共振したかのように受信波の振幅が大きくなる¹⁹⁾。本研究ではこの時の周波数を共振周波数と考えた。

これと同種の方法により得られたものであるかは明らかではないが、Jovićić et al¹³⁾ は伝達時間測定法の一つとして共振周波数を用いた際の位相差に相当する時間を用いる方法を挙げている (3章(1)節を参照)。

図-14は、共振周波数での sin 波を連続的に送信した場合と一波長の矩形波を送信した2つの場合における送・受信電圧時刻歴の比較の例である。実験は図-12および図-13に示したものと同様であり、例として $\sigma_v = 20$ (図-14(a)) および 80 kPa (図-14(b)) のものを示している。位相差に相当する時間差は、図-14(a)についてはS-AとS-Bの間に存在する時間に相当し、図-14(b)についてはほぼS-Bの時間に相当しており、一波長の矩形波を送信した際の受信電圧時刻歴において同等な箇所に対応していない。また、これにより算出されるGの値は、本文で提案する方法を用いた場合よりも大きくなる。

図-15は同一の応力点 ($\sigma_v = 20$ kPa) において得られた2つの異なるレベルの共振周波数によって連続的に sin 波を送信した場合の送・受信電圧時刻歴の比較である。2つの共振周波数の結果について比較すると、位相差に

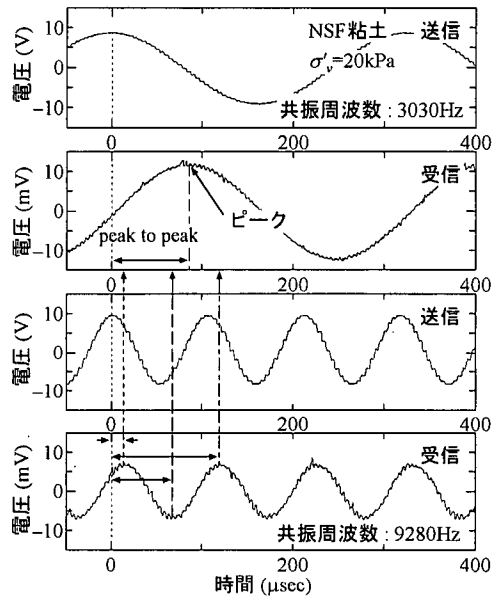


図-15 同一の応力点において得られた2つの共振周波数によって連続的に sin 波を送信した場合の送・受信電圧時刻歴の比較

相当する時間が一致する箇所は伝達時間として考えられる時間内において存在しないことがわかる。なお、実験は図-12および図-13に示したものと同様である。

本研究では試験機の制約上、比較的低周波数領域 (10kHz 以下) のみでの検証であるが、以上の結果より、

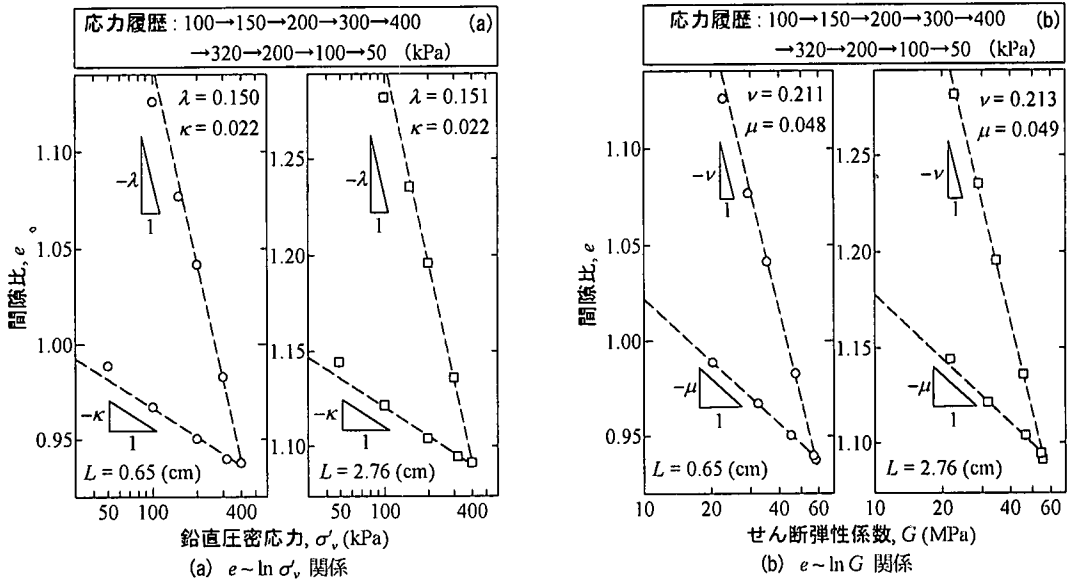


図-16 圧密試験機と一面せん断試験機を用いたBE試験による $e \sim \ln \sigma_v$ 関係と $e \sim \ln G$ 関係の比較

本研究で定義したような共振周波数を用いる際に得られる送・受信電圧時刻歴の位相差に相当する時間は必ずしも伝達時間に直接結びつくものではないと考えられる。

(5) 圧密・膨張に伴う G の変化を利用した評価

微小ひずみ域で行われた非排水繰返し三軸試験より、 $e \sim \ln p'$ 関係と $e \sim \ln E$ 関係には強い相関があることがわかっており¹⁸⁾、図-12 および図-13 に示したような実験から得られる $e \sim \ln \sigma_v$ 関係と $e \sim \ln G$ 関係にも当然強い相関があると考えられる。ここで、 e は間隙比、 σ_v は鉛直有効応力、 p' は平均有効応力であり、 E については 5×10^{-5} のひずみレベルで行った繰返し三軸試験より得られたヤング率である。

図-16 は圧密試験機ならびに一面せん断試験機において圧密応力を段階的に増加させ、その都度 BE 試験を行った結果より得られた $e \sim \ln \sigma_v$ 関係と $e \sim \ln G$ 関係をそれぞれ比較したものである。両試験機で行われた圧密条件は同じであり、応力履歴は図中に示す通りである。 G については、4章(2)節ならびに(3)節で説明した方法(図-8中のS-Cに相当)に従って伝達時間を測定した。

図-17 は、図-15 に示した実験結果を用いた $G \sim \sigma_v$ 関係の比較である。伝達距離が異なり、かつ圧密・膨張に伴って σ_v が変化しているにもかかわらず、両試験機より得られた関係はほぼ等しいことが分かる。また、図-16 に示した両関係は強い相関を示し、圧密・膨張でそれぞれ線形関係を示し、それぞれの傾きもほぼ等しい。

ここで、図-16 中の間隙比については同条件で作成された供試体を用いているにもかかわらず、大きく異なっているが、これは圧密試験機内に供試体をセットする際、リングとの間に隙間が生じ、試験開始時に大きな沈下が

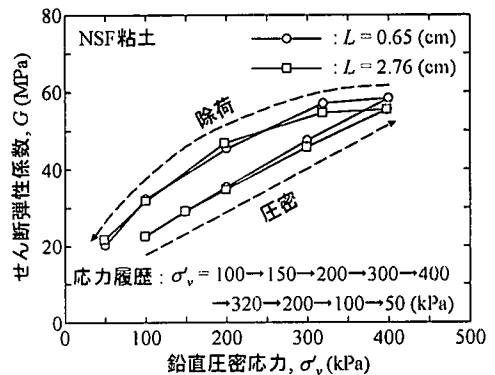


図-17 圧密試験機と一面せん断試験機を用いたBE試験より得られた $G \sim \sigma_v$ 関係の比較

生じたことによるものであることを確認している。

また、図-16 に示した圧密・膨張に伴う $e \sim \ln G$ 関係の線形性は測定した伝達時間を検証するための参考になると考えられ、この観点からも所定の圧密応力に達するまでの幾つかの応力点において BE 試験を行う方が良いと思われる。

なお、図-16 に示した実験では、過剰間隙水圧の消散を確認し、沈下量～時間(対数)曲線が定常状態に入った(直線を示した)時点で BE 試験を行っている。微小ひずみ域における変形係数は排水クリープによって大きく増加することが分かっており、 $e \sim \ln G$ 関係の線形性を指標とする場合には、このように排水クリープの影響の小さい時点で BE 試験を行う方が良いと思われる²⁰⁾。

また、土粒子間にセメンテーションがあるような、乱さない試料を用いる場合には、圧密に伴うその損傷過程において、 $e \sim \ln \sigma_v$ 関係および $e \sim \ln G$ 関係は必ずしも

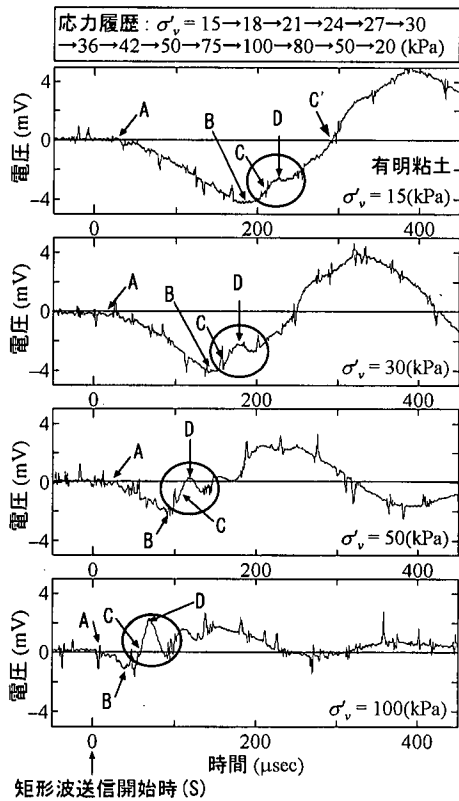


図-18 有明粘土試料を用いたBE試験結果の比較

線形にならない場合があることに注意しなければいけない²¹⁾。

5. 乱れの少ない有明粘土におけるGの評価

図-18は、4章において検討した伝達時間測定方法ならびにBE試験条件を適用して実施した有明粘土試料のBE試験結果であり、その中の幾つかの応力点において得られた受信電圧時刻歴を比較したものである。最大原位置有効土被り圧のおよそ5倍まで圧密し、図中に示す応力履歴中の各応力点でBE試験を行った。また、この図は、各応力点において矩形波送信開始時を基準時($t=0 \mu\text{sec}$)として比較している。なお、使用した試験機は2章(2)節で説明した圧密試験装置である。

図-18より、図-12に示した結果と同様に低応力域において"near-field-effect"による大きな電圧のシフト現象が生じていることがわかる。また、図-18内の最上図のみに着目すると、図中のC点を4章(2)節で説明したC点と解釈しがちである。しかし、図中の○で示した領域に着目すると、圧密応力の増加に伴う"near-field-effect"の低下とともに、新たなピークが明確に現れてきていることが分かる。そこで、○の領域においてピークと思わ

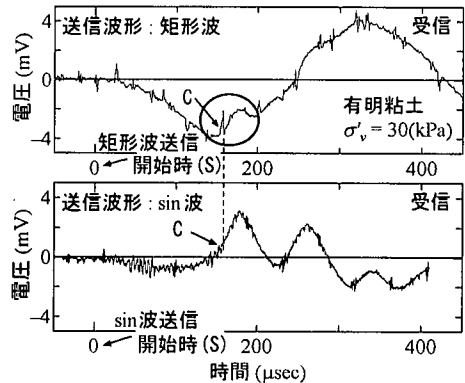


図-19 同一応力点においてsin波と矩形波を送信した際の受信電圧時刻歴の比較

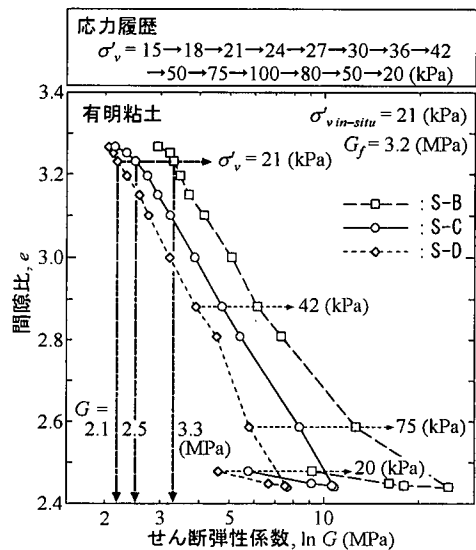


図-20 異なる伝達時間を用いた際の $e-\ln G$ 関係の比較

れる箇所を第2ピークに相当するD点とし、B-D間の受信波における変曲点をC点と定義した。

図-19は同一応力点においてsin波と矩形波を送信した際の結果を比較したものであるが、図-13(a)に示した場合と同様に、sin波を送信した場合に電圧シフト現象は抑制されており、先に述べた方法により選定したC点の妥当性が伺える。

また、図-20はS-B、S-C、S-Dをそれぞれ伝達時間と考えたときのGと間隙比 e との関係であり、S-Cを伝達時間とした場合に最も良好な線形性を示している。

なお、この方法により求めた原位置有効土被り応力に対応するGの値は2.5 MPaであり、これは原位置弾性波探査より得られた $G_f (= 3.2 \text{ MPa})$ よりもわずかに小さい値を示している。これは、試験時に生じる乱れなどを考慮すると、妥当な値だと考えられ²²⁾、BE試験は三軸試験やねじり試験などでは測定困難な低応力域での自然堆積粘土のGを明確な応力条件の下で求めることができる

簡便な室内試験法としてだけでなく、原位置試験より得られた G を補完するものとしても工学的に有用性が高いことが確認されたと思われる。

6. まとめ

本文では、粘性土を用いたBE試験から G を算出する際に最も重要なせん断弾性波速度の測定方法について検討した。本文中に示した実験の大部分は"near-field-effect"が存在するため、せん断弾性波速度の真値は推測の域を出ないと言わざるを得ない。しかし、伝達距離などの幾つかの観点から検討を進め、一般の室内試験機を用いて行われるBE試験の多くで遭遇する、このような状況でのせん断弾性波の伝達時間測定方法(図-8中のS-Cに相当)を提案した。本文から得られた他の結果について以下にまとめる。

- 1) 受信電圧時刻歴に現れている第1, 第2ピークは送信波の周波数, 更には波形の違いによらず同時刻であると考えられ, 送信電圧時刻歴は必ずしも発生したせん断波の時刻歴に相当するものではないことが確認された。
- 2) 1)の結果より, ピーク間の時間差を伝達時間とする"peak-to-peak"よりも, 送信側BEに電圧変化を与え始めた時点を生断波の発生開始時と考え, せん断波の到達開始時までの時間差を伝達時間とする"start-to-start"の方がより適当だと思われる。ただし, このとき"near-field-effect"を見極めることが重要である。
- 3) 圧密応力の増減に伴う"near-field-effect"の変化を見極めるため, また, 得られた G の値を $e \sim \ln G$ 関係の線形性を用いて確認するためにも, 圧密・膨張過程の複数の応力点においてBE試験を行うべきであることが確認された。
- 4) 異なる送信波形を用いた際の受信電圧時刻歴を比較することによって伝達時間測定方法の妥当性を検証できる場合があるため, 一応力点において複数の波形・周波数を用いたBE試験を行うべきであることが確認された。
- 5) 本研究で定義した共振周波数を用いた際に得られる送・受信電圧時刻歴の位相差に相当する時間は必ずしも伝達時間に直接結びつくものではないことが確認された。
- 6) BE試験は, 繰返し三軸試験などでは困難な低応力域での自然堆積粘土の G を明確な応力条件の下で求めることができる簡便な室内試験法としてだけでなく, 原位置試験より得られた G を補完するものとし

ても工学的に有用性が高いことが確認された

今後, 各種地盤材料を用いて, それぞれ可能な限り伝達距離を変えたBE試験を行うことにより, BE試験方法の確立を目指し, 各種室内試験より得られた G や原位置弾性波探査より得られた G_r との比較・検討を行いたいと考えている。

謝辞: 本研究における実験ならびに実験システムの開発に関して, 当時北海道大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻の学生であった谷口浩二氏(現 北海道開発コンサルタント株式会社)ならびに古道知広氏(現 北海道旅客鉄道株式会社), さらに同大学院生の真田昌慶氏に多大な協力を受けた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 時松孝次, 大原淳良: 凍結サンプリング, 土と基礎, 地盤工学会, Vol.38, No.11, pp.61-68, 1990.
- 2) Toki, S., Shibuya, S. and Yamashita, S.: Standardization of laboratory test methods to determine the cyclic deformation properties of geomaterials, *Pre-failure Deformation of Geomaterials*, Balkema, Vol.2, pp.741-784, 1994.
- 3) Nishio, S. and Katsura, Y.: Shear wave anisotropy in Edogawa Pleistocene deposit, *Pre-failure Deformation of Geomaterials*, Balkema, Vol.1, pp.169-174, 1994.
- 4) Shirley, D. J. and Hampton, L. D.: Shear-wave measurements in laboratory sediments, *Journal of the Acoustical Society of America*, 63, No.2, pp.607-613, 1977.
- 5) Shibuya, S.: TC29 report, *Preceeding of 2nd International Symposium on Pre-failure Deformation of Geomaterials*, Balkema, Vol.2. (in print), 2000.
- 6) 川口貴之, 谷口浩二, 三田地利之, 澁谷啓, 古道知広, 佐野信房: パソコンを用いたせん断弾性波速度測定システムの開発, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第40号, pp.143-150, 1999.
- 7) Shibuya, S., Mitachi, T., Fukuda, F. and Degoshi, T.: Strain rate effects on shear modulus and damping of normally consolidated clays, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.18, No.3, pp.365-375, 1995.
- 8) Tanaka, H., Sharma, P., Tsuchida, T. and Tanaka, M.: Comparative study on sample quality using several types of samplers, *Soils and Foundations*, Vol.36, No.2, pp.57-68, 1996.
- 9) Shibuya, S., Hwang, S. C. and Mitachi, T.: Elastic shear modulus of soft clays from shear wave velocity measurement, *Géotechnique*, Vol.47, No.3, pp.593-601, 1997.

- 10) 荻野俊寛, 三田地利之, 澁谷啓, 池亀泰彦 : ベンダーエレメントを組込んだ一面せん断試験装置による粘性土の変形・強度特性の評価, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第39号, pp.1-10, 1999.
- 11) Dyvik, R. and Madshus, C. : Laboratory measurement of G_{max} using bender elements, *Proceeding of American Society of Civil Engineering Annual Convention*, pp.186-196, 1985.
- 12) Abbiss, C. P. : Shear wave measurements of the elasticity of the ground, *Géotechnique*, Vol.31, No.1, pp.91-104, 1981.
- 13) Jovičić, V., Coop, M. R. and Simić, M. : Objective criteria for determining G_{max} from bender element tests, *Géotechnique*, Vol.46, No.2, pp.357-362, 1996.
- 14) Viggiani, G. and Atkinson, J. H. : Interpretation of bender element tests, *Géotechnique*, Vol.45, No.1, pp.149-154, 1995.
- 15) Salinero, I. S., Roessel, J. M. and Stokoe, K. H. : Analytical studies of body wave propagation and attenuation, *Report GR86-15*, University of Texas at Austin, 1986.
- 16) Brigoni, E. and Gotti, M. : Misura della velocità di onde elastiche di taglio in laboratorio con l'impiego di trasduttori piezoelettrici, *Riv. Ital. Geotec.*, Vol.26, No.1, 5-16, 1992.
- 17) Mancuso, C., Simonelli, A. L. and Vinale, F. : Numerical analysis of in situ S-wave measurements, *Proceedings of 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.277-280, 1989.
- 18) 川口貴之, 三田地利之, 澁谷啓 : 繰り返し飽和粘土の小ひずみ域における変形係数の定式化, 土木学会論文集, No.638/III-49, pp.179-191, 1999.
- 19) Lohani, T. N., Imai, G. and Shibuya, S. : Determination of shear wave velocity in bender element test, *Proceedings of the Second International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, pp.101-106, 1999.
- 20) 澁谷啓, 三田地利之, 荻野俊寛, 川口貴之 : 排水クリーブによる粘性土のメタ安定化現象, 土と基礎, 地盤工学会, Vol.47, No.8, pp.21-24, 1999.
- 21) Shibuya, S. : Assessing structure of aged natural sedimentary clays, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.3, pp.1-16, 2000.
- 22) Shibuya, S., Mitachi, T., Yamashita, S. and Tanaka, H. : Effects of sample disturbance on G_{max} of soils - A case study, *Proceedings of the First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Vol.1, pp.77-82, 1995.

(2000. 12. 4 受付)

EVALUATION OF ELÁSTIC SHEAR MODULUS G IN LABORATORY BENDER ELEMENT TEST

Takayuki KAWAGUCHI, Toshiyuki MITACHI, Satoru SHIBUYA and Yoshifusa SANO

Near-field effects are known to mask the correct arrival time of shear wave. The characteristics of near-field effects involved in laboratory bender element test were thoroughly examined in tests on clays. On the basis of test results, it is manifested that the travel time of shear wave should be taken as "start-to-start" between two instants at generation and at reception of shear wave. It is suggested to perform bender element test with input pulse using various kinds of wave form over a wide range of frequency. It is also preferred to employ incremental loading steps to reach the prescribed consolidation stress. It is demonstrated that the G -value of natural clay in laboratory bender element test coincided well with comparable G_f from in-situ seismic survey.