

室内試験による粘性土の各種変形係数の測定および評価

Measurement and evaluation of various deformation moduli of clay in laboratory tests

北海道大学大学院
函館工業高等専門学校
北海道大学大学院
北海道大学大学院
北海道大学

○学 生 員 古 道 知 広(Tomohiro Furumichi)
正 会 員 川 口 貴 之(Takayuki Kawaguchi)
フェロー会員 三 田 地 利 之(Toshiyuki Mitachi)
正 会 員 澁 谷 啓(Satoru Shibuya)
学 生 佐 藤 信 吾(Shingo Satoh)

1.はじめに

数値解析などで用いられる地盤の材料定数としての変形係数を把握することは、工学的に極めて重要である。本研究では、小ひずみ域での変形係数に着目し、粘性土の小ひずみ域における非排水条件下の弾性ヤング率 E_u ならびに排水条件下の弾性ヤング率 E_d 、さらにはせん断弾性係数 G の3種の変形係数について直接測定を行うことを試み、その相互関係を検討している。なお、 E_u および E_d は三軸試験により、 G はベンダーエレメント (BE) 試験によってそれぞれ測定した。

試料については、均質な供試体を数多く作成する目的で、市販されている乾燥粉末状の NSF-clay ($w_L = 55\%$, $I_p = 26$) を液性限界の2倍になるよう蒸留水を加え攪拌し、真空状態の予圧密セル内において十分脱気した後、 $\sigma'_{vc} = 150$ kPa で10日間一次元圧密したものを用いた。

2.試験方法

2.1 ベンダーエレメント試験 (BE 試験)

BE 試験は、供試体中を伝達するせん断弾性波速度を測定することにより、微小ひずみ域における G を容易に算出することが可能な試験方法¹⁾であるが、せん断弾性波の伝達時間測定方法については、いまだに国際的な統一見解が得られていない²⁾。

図1は送・受信電圧時刻歴の概略図であり、図2は伝達距離が異なり同一条件の2つのBE試験において図1中のS・AからS・Dを伝達時間とした際の G を比較したものである。両試験より得られる G はS・Cにおいて最も漸近している。また、この実験事実以外にも“near-field-effect”(NFE)と呼ばれるせん断波の伝達の見極めを困難にするものや、送信波形・周波数の影響などについて検討した結果、伝達時間はNFEを考慮した上で、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がわかった(図1のS・Cに相当)。

2.2 三軸試験

本研究で用いる試験機は高精度デジタルサーボモータを搭載したひずみ制御型三軸試験装置であり、軸ひずみ量を 10^{-7} のオーダーで制御できる²⁾。また、本研究を実施するに当たって排水せん断試験のような低速試験にも対応できるよう、せん断速度を $10^2 \sim 10^5$ (mm/min) の範囲で設定できるように工夫した。さらに、間隙水圧の微小な変化も計測可能にする目的で、直接供試体底部に圧力計を配置し、その効果をより高めるために二重負圧法を用いており、すべての実験において0.97以上のB値が得られている。

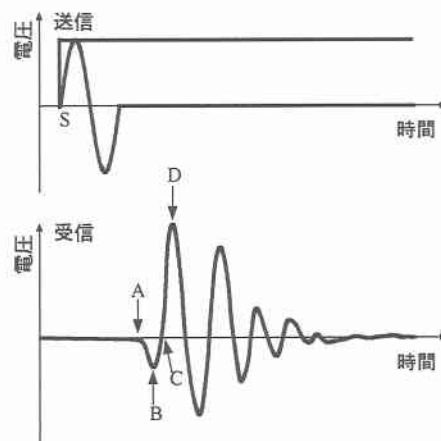
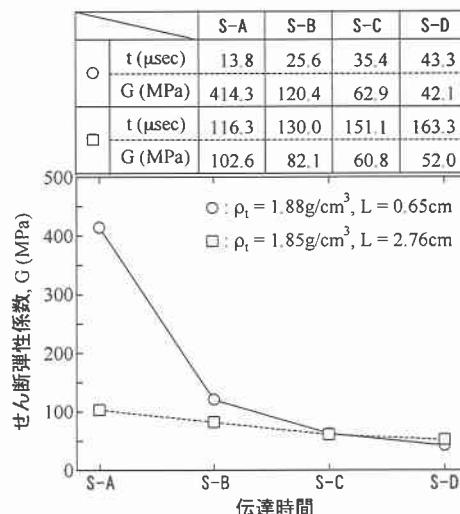


図1 送受信電圧時刻歴の概略図

図2 伝達距離の違う試験による伝達時間と G との関係

3.実験結果と考察

3.1 E_u , E_d , G の定義

一連の実験結果の解釈として、微小ひずみにおける供試体は等方弾性体と仮定している。排水および非排水条件下におけるポアソン比をそれぞれ ν_d , ν_u とし、 $\nu_u = 0.5$ と仮定すると、式1のような関係式が得られる。

$$E_u = 3 \cdot G = \frac{3 \cdot E_d}{2 \cdot (1 + \nu_d)} \quad \dots \text{式 1}$$

3.2 非排水条件下における弾性ヤング率 E_u

E_u については、軸ひずみおよび軸応力の測定精度にさえ留意すれば比較的容易に測定可能であるため、数多くの研究が報告されている。筆者らは、 E_u に及ぼす応力履歴

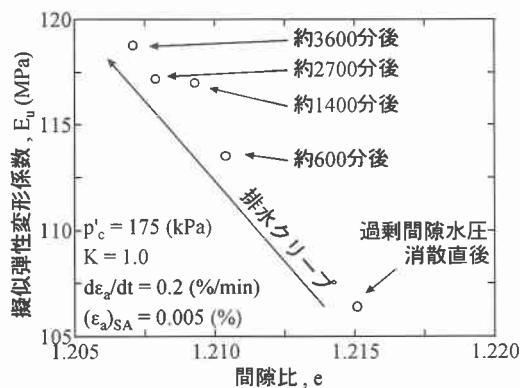


図3 排水クリープによる e の減少に伴う E_u の変化

歴や載荷速度、さらには載荷方法などの影響を考慮した結果、圧密・膨張に伴う E_u の変化が粘性土の $e \sim \log p'$ 特性と強い相関があることに着目し、 E_u を p' の関数とした関係式を提案している³⁾。

図3は上記の研究により得られた圧密応力到達後の排水クリープ（二次圧密）に伴う E_u の変化を示したものであり、 E_u は排水クリープにより顕著に増加することがわかる。この傾向は G に関しても得られており、変形係数を比較・検討する際には、せん断開始時までの圧密時間に細心の注意を払わねばならないことがわかる。

また、図4は載荷速度を0.02～2 (%/min) の範囲で変化した際の応力～ひずみ関係であり、0.005%以下のひずみの範囲で計算された E_u は非排水せん断開始までの応力履歴が等しければ、載荷速度によらずほぼ等しいことがわかる。非排水載荷試験は一般的に図4に示すような比較的大きな速度で行われることが多いために、非排水条件下で生じるリラグゼーション（応力緩和）の影響などを考慮する必要が無いと考えられるが、 E_d については載荷速度を非常に小さくする必要があるために、載荷中に生じるクリープの影響を考慮する必要があると考えられる（3.3 参照）。

3.3 せん断剛性率 G

一般に G は等方弾性体と仮定した E_u から変換して用いられることが多い。そこで、BE 装着型三軸試験装置を用いて、等方圧密後の E_u と G を測定し、更には非排水せん断中に除荷・再載荷をした際に得られる E_u はせん断の進行に伴って減少することが知られていることから³⁾、除荷・再載荷時に BE 試験を行うことにより得られた G と E_u の比較も試みた。

図5はせん断開始時とせん断中（例として $\epsilon_a = 1\%$ ）に行った BE 試験における電圧時刻歴の比較である。せん断の進行に伴い伝達距離は小さくなっているにもかかわらず、伝達時間は大きくなっており、明らかに G が低下していることが分かる。

図6は除荷・再載荷時の応力～ひずみ関係の例である。弾性的な微小ひずみ領域においては、除荷・再載荷時の関係がほぼ等しく、容易に E_u の算定が可能であるが、せん断の進行に伴って両関係の相違は大きくなり、 E_u の算定が困難になる様子がわかる。しかし、図6(b)において、除荷直後における線形部分の傾きはせん断開始時の E_u よりも大きくなることもあり、ここでは、再載荷開始直後の傾きを E_u とした。

図7は除荷・再載荷ならびに BE 試験より得られた E_u および G とその測定が行われた際の軸ひずみの関係である。また、せん断開始時に得られた E_u および G は軸

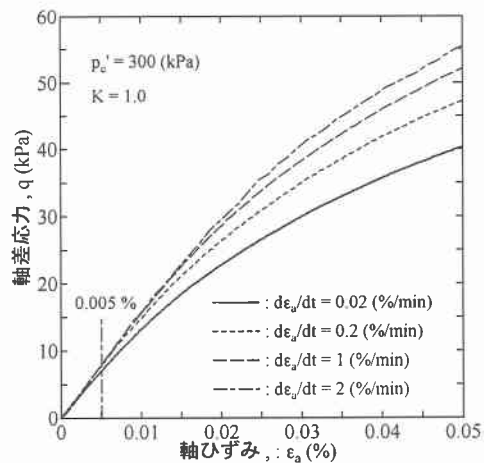


図4 せん断速度を変化させたときの $q \sim \epsilon_a$ 関係

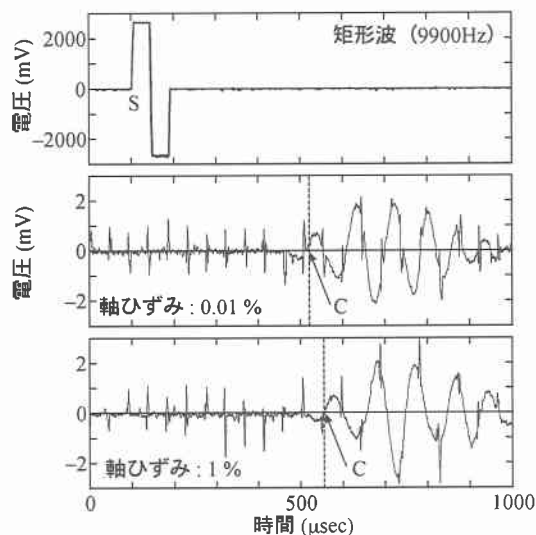


図5 BE 試験(送受信電圧時刻歴)

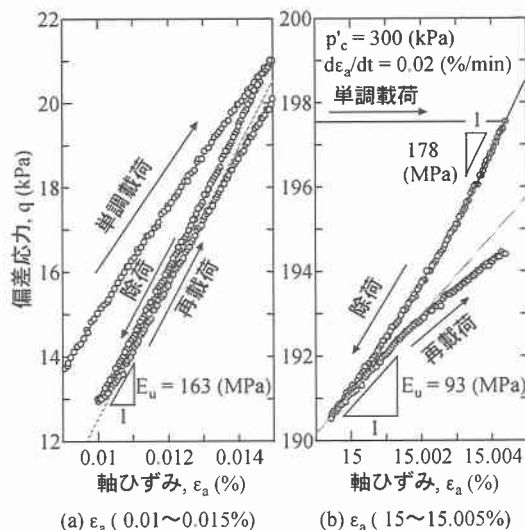


図6 除荷・再載荷過程における軸ひずみ～軸差応力関係

ひずみを 0.001% として表示している。せん断開始時における E_u と $3G$ はほぼ等しく、等方弾性体ならびに非排水試験時のポアソン比を 0.5 とする仮定の妥当性が伺える。また、両変形係数はせん断の進行とともに減少しているが、両者の値にはある程度の差が生じている。この原因としてはせん断の進行にともない E_u の特定が困

難になること（図6参照）や異方性が高まることによって等方弾性体という仮定が成り立たなくなることが考えられるが、せん断中に除荷・再載荷を行った際の再載荷直後における E_u と G の間にある程度の相関を見出すことができたと思われる。

また、本実験は等方圧密後に行われたために等方弾性体という仮定が成立しやすい条件下にあるが、図2の試験結果と同鉛直応力において K_0 圧密三軸圧縮試験を行った際に得られた E_u は 164MPa であり^{1), 2)}、図2の試験結果より得られる $3G$ とほぼ等しい。これは圧密終了後の E_u と G の相関における等方弾性体かつポアソン比を 0.5 とすることの妥当性を示していると考えられるが、今後異方圧密後に同種の試験を行うことによって検証したいと考えている。

図8は、再載荷開始時の平均有効応力と E_u および G との比較である。非排水せん断の進行による平均有効応力の減少と共に E_u および G も減少している。また、図には、1つの供試体において圧密応力を変化させながら、各圧密応力点において微小繰返し載荷を行った結果から得られた E_u の推移についても示している³⁾。この実験結果は排水クリープを可能な限り許さず得られた E_u であるために、 $p'_c=300\text{kPa}$ において本実験結果よりも小さくなっているものの、せん断の進行に伴う E_u ならびに G の減少傾向は、圧密応力レベルの変化に伴うせん断開始直後の E_u ならびに G の推移と類似した傾向を示すと考えられる。

3.4 排水条件下における弾性ヤング率 E_d

E_d は過剰間隙水圧が発生しないせん断速度を用いて実施しなければならず、その速度の設定や、さらには試験の長期化、測定機器の精度などの理由から、とりわけ粘性土に関しては研究されている例が極めて少なく、ポアソン比を 0.2~0.3 と仮定し、 E_u や G から算出されることが多い。

そこで、本研究では E_u の測定で得られたノウハウを生かし、更には 2.2 に説明した試験機の改良を実施し、 E_d の測定を試みた。

実験は、平均有効応力 $p'_c=300\text{kPa}$ まで等方圧密した後、間隙水圧の発生が少ないと想定される範囲内において3オーダー程度変化させた速度で排水せん断試験を行った。このときの圧密打ち切り条件は 3t 法を用い、各試験とも圧密時間をほぼ統一した。せん断速度などの試験条件を表1に示す。

図9は、排水せん断開始直後の応力～ひずみ関係である。線形とみなされる領域内において算出された E_d は、載荷速度の減少とともに小さくなっている。速いせん断速度を用いた No.1 および No.2 は同圧密条件下において行われた非排水試験により得られた E_u とほぼ等しい（図9(a)）。図10は小ひずみ域における過剰間隙水圧発生の様子を示しており、No.1, 2 については小ひずみ域において過剰間隙水圧が発生しており、その挙動は非排水せん断時と酷似しているため、これらの実験は排水条件を満たしていないと考えられる。

このことより、排水条件がほとんど満たされていると考えられる No.3~6 について比較すると、1オーダー程度せん断速度の小さい No.5・6 の E_d は No.3・4 に比べて明らかに小さく、一見 E_d は載荷速度の影響を受けているように思われる（図9(b)）。しかし、No.5 の載荷速度は圧密中に測定した排水クリープ速度の4倍程度、No.6 は1.2倍程度であり、この影響を大きく含んでいるものと推測される。

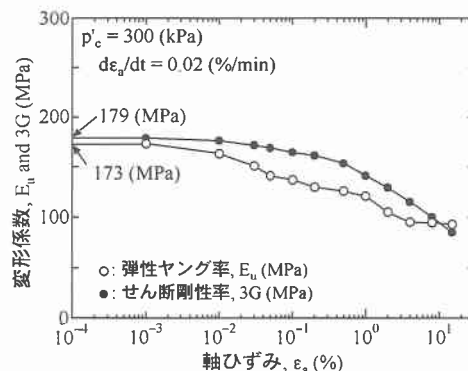


図7 軸ひずみ～ E_u , G の関係

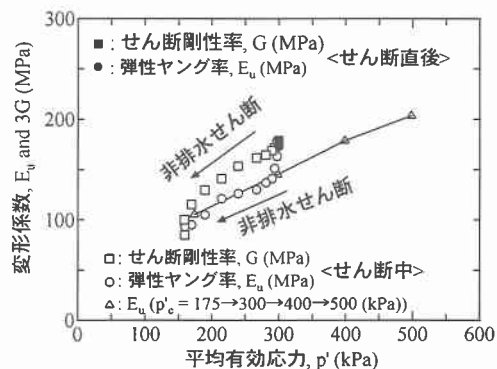


図8 平均有効応力～ E_u , G の関係

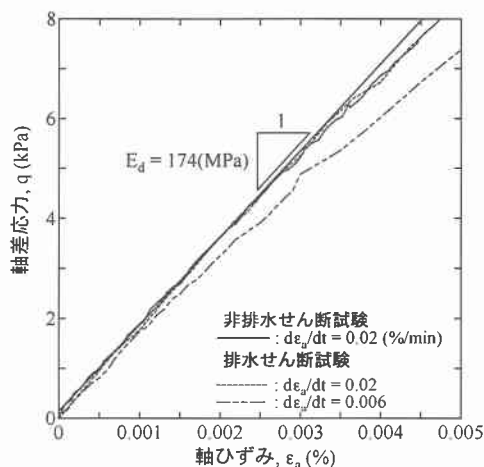


図9(a) $q \sim \varepsilon_a$ 関係 (No.1・2)

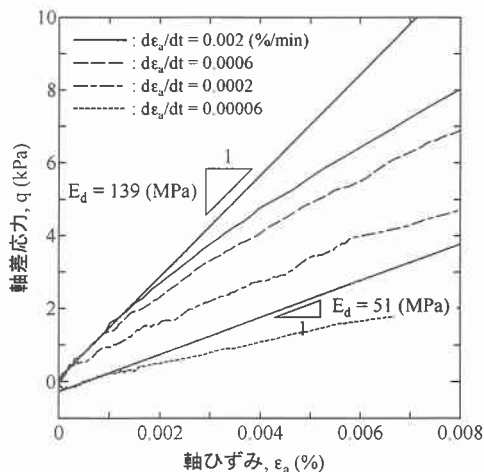


図9(b) $q \sim \varepsilon_a$ 関係 (No.3~6)

そこで、排水せん断中の軸ひずみは式 2 に示すように、排水せん断のみによる成分 (ε_a^d) と軸差応力 (q) 一定の下での排水クリープによる成分 (ε_a^{cr}) との和として与えられると仮定し、図 11 に示す。 $q \sim \varepsilon_a^d$ 関係より E_d を算出することにした (表 1 参照)。これより、No.3~6 の E_d は 140MPa 程度に漸近した。図 12 は、No.5・6 の $q \sim \varepsilon_a$ or ε_a^d 関係の拡大図である。この図から排水クリープによる影響はせん断速度が遅い試験ほど顕著に現れることがわかる。また、一番せん断速度の遅い No.6 に関しては、せん断開始直後に軸差応力の減少が見られる。このことは、せん断初期において、せん断速度よりも排水クリープ速度が大きいことが原因だと推測される。

本来 E_d は過剰間隙水圧が発生しない载荷速度の中で最も速い速度を用いたほうが、排水クリープの影響が小さいということを考えると、これら一連の結果ならびにこの手法の妥当性がうかがえる。ただし、ここで検討した弾性領域外については必ずしも式 2 に示すような関係が成立するとは限らない。また、弾性領域内においても式 2 のようにひずみを各成分の和として表現可能かどうかについては疑問の余地が残るが、弾性領域が存在すると仮定し、この結果を考えると、本手法は一つのアプローチとして有用であると推測される。

次に、これらの実験と同じ圧密条件より得られた E_u は 173(MPa)であったことから、式 1 より、排水条件下のポアソン比 ν_d はおよそ 0.2 となった。この値が地盤の変形問題などにおいて、一般に仮定されている値の範囲内にあることは注目値する。

4. 結論

1. 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、この結果ベンダーエレメント試験による容易な G の測定が可能となった。
2. 圧密終了後の E_u と G の相関に関し、等方弾性体かつ非排水条件下のポアソン比を 0.5 と仮定することの妥当性が伺えた。
3. 単調载荷中に除荷・再载荷を行うことにより得られる E_u と同ひずみ点で行われた BE 試験より得られる G はせん断の進行とともに減少し、その関係にも類似した傾向が見られた。
4. オーダー程度異なる载荷速度で排水試験を行い、排水クリープによるひずみ成分に関して検討した結果、 E_d の測定が可能となった。
5. 等方弾性体ならびに ν_d を 0.5 と仮定し、 E_u および E_d により計算される ν_d はおよそ 0.2 となった。

参考文献

- 1) 川口貴之・谷口浩二・三田地利之・澁谷啓・古道知広・佐野信房 (1999) : 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.
- 2) 川口貴之・三田地利之・澁谷啓・佐野信房 : 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, 土木学会論文集 (投稿中)
- 3) 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

$$\varepsilon_a^d = \varepsilon_a - \varepsilon_a^{cr} \quad \cdots \text{式 2}$$

表 1 試験条件

試験番号	せん断速度 (%/min)	クリープひずみ除去前 E_d (MPa)	クリープひずみ除去後 E_d (MPa)
No.1	0.02	174	174
No.2	0.006	172	173
No.3	0.002	139	142
No.4	0.0006	133	143
No.5	0.0002	110	142
No.6	0.00006	51	142

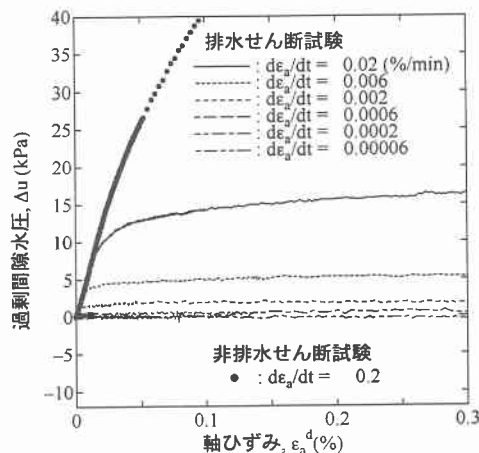


図 10 $\Delta u \sim \varepsilon_a$ 関係 (No.1~6)

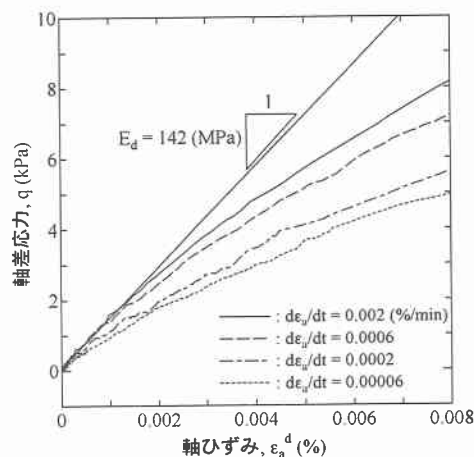


図 11 $q \sim \varepsilon_a^d$ 関係 (No.3~6)

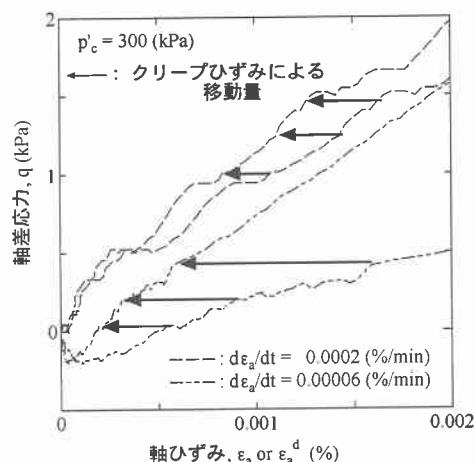


図 12 $q \sim \varepsilon_a$ or ε_a^d 関係 (No.5・6)