ベンダーエレメント付き予圧密容器の開発

Development of consolidometer with bender elements for preparing clay sample

学生員 川村龍平 (Ryuhei Kawamura)
正 員 川口貴之 (Takayuki Kawaguchi)
非会員 伊藤朝陽 (Asahi Ito)
正 員 佐野佶房 (Yoshifusa Sano)

1. はじめに

土要素を直交異方弾性体と考え,各種地盤材料におけ る弾性係数の異方性について研究した例は古くから存在 する(例えば文献 1)).しかし,精緻な実験結果に基 づいて具体的な異方性の程度が報告され始めたのはここ 最近であり,中でも粘性土は土粒子形状が扁平であるこ とが多いために,堆積時に形成された土粒子骨格構造に よる弾性係数の異方性(堆積構造異方性)が大きいとす る報告例が幾つか存在する(例えば文献 2),3)).

そこで筆者らは粘性土の弾性係数における堆積構造異 方性が形成されるメカニズムを把握する一つの足ががり として,高含水比状態(スラリー状態)から液性限界以 下の含水比状態にある粘土供試体を作成する過程でのせ ん断弾性係数 G の変化を観察できるよう,ピストン・ 底盤ならびにセル側面にベンダーエレメント(以下 BE)を取り付けた予圧密容器を開発した.本文では, この予圧密容器の詳細ならびにこれを用いた実験結果に ついて報告する.

2. 試験装置・方法

2.1 BE 付き予圧密容器ならびに BE 試験システム

図 - 1 は開発した BE 付き予圧密容器ならびに BE 試 験システムの概略図である.

実地盤からサンプリングした貴重な試料を用いて室内 土質試験を実施した後,本圧密容器を用いて一体の三軸 円柱供試体(直径 5cm,高さ 10cm)を作成することを 想定し,内径は約 7cm としている.また,容器内試料 の高さはピストンの位置を側面に貼り付けられたスケー ルを目視することで計測する.

予圧密容器のピストン(送信)ならびに容器底盤(受 信)には一対のBEが取り付けられており(以下,鉛直 BE),伝播方向が鉛直で土粒子の振動方向が水平のせ ん断弾性波速度より得られるせん断弾性係数G_{vh}の測定 が可能である.一方,セル側面には二対のBE(図中右 が送信,左が受信)が鉛直方向に約8cmの間隔で取り付 けられており(以下,上側を水平上部BE,下側を水平 下部BE),伝播方向・土粒子の振動方向がともに水平 のせん断弾性波速度より得られるせん断弾性係数G_{hh}の 測定が可能である.なお,セル側面のBEは脱着可能な 金属パーツに固定されており,90度異なる方向にBEが 固定されたものと交換することで水平方向に伝播し,振 動方向が鉛直のせん断弾性波速度より得られるせん断弾 性係数G_{hv}の測定も可能である(本文で示す結果はG_{yb}と *G_{hh}のみ*).また,抜き出し時にはBEが取り付けられて いないものと交換することによってBEや供試体の損傷 を防ぐことができる.

BE試験における送信用BEへの電圧波形供給ならびに 送・受信電圧信号の観察には送信周波数 $0.01\mu \sim 15$ MHz, 振幅 $0 \sim 20$ Vp-p,波形分解能 16bitのファンクションシ ンセサイザ(信号発生器)と最高サンプリングレート 500MS/s,A/D変換分解能 8bitのデジタルオシロスコー プを用いた⁴⁾.オシロスコープに表示された電圧信号は SCSI接続されたMOドライプ内のディスクに記録し,後 にパソコンを用いて伝播時間の同定を行った.なお, 2chのオシロスコープであるため, $G_{vh} \geq G_{hh}$ (二箇所) の測定は配線を繋ぎ換えることで実施した.

2.2 予圧密・BE 試験条件

実施した2つの実験に用いた試料は粉末乾燥状態で市 販されているNSF粘土($\rho_s = 2.78g/cm^3$, $w_L = 55\%$, IP = 26)である.両試験ともに,液性限界 w_L のほぼ2倍(w 110%)になるようこの粉末試料に蒸留水を加えてス ラリー状にし,ミキサーを用いて1時間程度攪拌した. その後,飽和度を高めることを目的として予圧密セル内





図-2 予圧密時の沈下量~時間関係

を真空に近い状態にし,スラリーを所定の量まで少量ず つ引き込み,真空に近い状態のまま約1日放置した.大 気圧に解放した後にピストンを挿入し,試料上部の乾燥 を防ぐ目的でピストン上部に注水し,セル内に所定の空 気圧を載荷した.

1つ目の試験(以下,試験)は予圧密応力の増加に 伴うG_{vh}とG_{hh}の変化を知る目的で,セル内の圧力を 20, 40,80,150kPaと段階的に増加させ,各段階でG_{vh}とG_{hh}の 測定を実施した.80kPaまでの各段階では約 24 時間, 150kPaでは約 72 時間の定応力状態を電空変換機を用い て自動制御した後に抜き出した.その後,試料の上下端 および周面の試料を用いて含水比を測定した後,直径 5cm,高さ 10cmの円柱供試体となるようトリミングし, 三軸試験を実施した.抜き出し後に実施したBE試験や 三軸試験結果等については文献 5)にて詳述する.

2 つ目の試験(試験)は高含水比条件下でのGの変 化と容器内試料の含水比分布の非一様性を把握する目的 で,予圧密応力 20kPaの載荷直後から試験 と同様に 24 時間経過するまでの間に 18 回のBE試験(各回で G_{vb} と G_{hh}を測定)を実施した上で,9層に分けて抜き出し, 各層中央部1箇所,周辺部2箇所の計27箇所における 含水比を測定した.

試験 ・ で実施した全ての BE 試験における送信電 圧信号は振幅±10V,周波数 2,5,10 kHz の sin 波と 10Hz の矩形波とした.

3. 試験結果・考察

3.1 **予圧密試験**

図 - 2 は試験 で得られた予圧密時の沈下量~時 間関係である.試験 では各応力段階とも沈下量の変化 が十分に小さくなり, 3t 法に基づく圧密打切り点(点 線)を越えてから BE 試験を実施し(),各段階の載 荷を終了していることが確認できる.

表 - 1 は試験 で予圧密容器から取り出した試料各部 の含水比をまとめたものであり,表-2 は試験 で得ら れた含水比をまとめたものである.試験の含水比にお ける最大・最小値の差は 5% 強, 試験 では 11% 弱であ リ,低応力・高含水比状態にある方が容器内の含水比分 布の非一様性が高いと考えられる.また,両試験ともに 試料底部の含水比が他の部分に比べてかなり小さく、こ れを除けば(試験 では第9層)試験 で2%弱,試験

で6%弱の違いとなる.

表 - 1 試験 で得られた含水比分布

	а	b	с	d	e	
上端	48.99	49.22	50.06	49.27	49.06	
下端	48.67	46.99	46.52	46.53	45.50	
中央部	50.45	49.25	50.23	50.77	49.60	
	(a~eの単位:%)					

с 上端 中央部 下端

表-2 試験 で得られた含水比分布

層 No.	層厚(cm)	А	В	С		
1	1.4	63.02	65.87	62.63		
2	2.0	62.72	64.05	62.61		
3	2.0	62.63	62.43	62.58		
4	2.0	64.00	64.41	63.65		
5	1.5	64.77	65.49	64.44		
6	1.4	63.17	64.27	64.00		
7	1.4	62.32	62.23	63.02		
8	1.6	60.12	60.73	62.34		
9	1.4	54.87	55.81	55.23		







3.2 BE 試験

図-3 はBE試験における伝播時間同定の例として, 試験 で実施したBE試験の内,予圧密応力 80kPaにお ける鉛直BEと水平上部BEで得られた送・受信電圧信号 を示したものである.送信電圧の開始点を基準として整 理すると,受信電圧信号において波形や周波数にほとん どよらない時点に正の振幅が確認できる.本システムで は送・受信電圧の正負が同じ場合にBEの初動の向きが 一致するよう配線しているため,この振幅の開始点(図 中の実線)をせん断弾性波の到達時点と判断した(初動 の向きを考慮したstart-to-start⁶).なお,伝播距離につ いてはBE試験実施時におけるBE先端間の距離(tip-to tip^{7})とした.

図 - 4 は試験 で得られた予圧密応力の増加に伴う受 信電圧信号の変化を比較したものであり、例として送信 電圧波形に 5kHzのsin波を使用したときの鉛直BEと水平



図 - 5 試験 より得られた受信電圧信号の変化

下部BEの結果を示したものである.いずれの場合にお いても予圧密応力の増加とともに伝播時間(図中の点 線)は小さくなり, *G_{vh}*, *G_{hh}が大きくなっていることが* 伺える.

図 - 5 は試験 で得られた予圧密応力 20kPa の載荷開 始から 24 時間経過後までの受信電圧信号の変化を比較 したものであり,例として送信電圧波形に 2kHz の sin 波を使用したときの鉛直 BE と水平上部 BE の結果を示 したものである.鉛直 BE と水平上部 BE ともに載荷開 始からおよそ 2.5 時間まで(最上段図)の BE 試験では 明確なせん断弾性波が確認できなかったものの,3 時間 以降の試験では伝播時間の同定が可能となった(図中の



図 - 6 試験 より得られたせん断弾性係数の変化 (a): G_{vh}, G_{hh} ~ 経過時間, b): e ~ G_{vh}, G_{hh}関係)

点線).ただし,水平下部 BE については載荷開始から 1 時間での試験から明確なせん断弾性波が現れ,伝播時 間の同定が可能となった.これについては,試験後に容 器から抜き出した試料の含水比分布において下端付近の 含水比が他に比べて低かったことを考慮すると(表-2 参照),応力載荷直後には鉛直方向の含水比分布に表-2 の結果と同程度かそれ以上の格差があり,試料底部か ら含水比が低下し,水平下部 BE 付近の剛性がより早い 段階で高まった(発現した)ことによると推測される.

3.3 せん断弾性係数

図 - 6 は試験 より得られたG_{vh}とG_{hh}の変化を比較し たものである.区別するため,水平上部BEで得られた $G_{hh} \epsilon G_{hh}^{up}$,水平下部BEで得られた値を G_{hh}^{low} とする. 先述したように含水比分布は非一様であるため,本来G の計算に必要な湿潤密度のの不均一性を考慮する必要が ある.しかし,例えば試験 における試料抜き出し直前 の鉛直BEより得られた伝播速度は 72.7m/secであり,表 -2 に示す含水比の最大・最小値を用いて計算される G_{vb}の違いは小さいため(9.0 と 8.6 MPa),含水比の平 均値を用いて計算しても十分に試料全体を代表するGが 得られると判断した.ただし,下端部(第9層)には鉛 直BEが挿入されており,実質的にこの層をせん断弾性 波が伝播する距離はわずかであるため,表-2中の1~8 層で得られた含水比の平均値(63.2%)を用いた (G_{vh}=8.7MPa).なお,載荷中の_{Pt}は先述した含水比の 平均値とスケールを目視することで得られたその時点で の試料体積から計算した.図-6 において載荷開始から およそ 5.5 時間以降では $G_{hh}^{\mu\nu}$ G_{hh}^{low} となっており,こ れ以降はほぼ妥当なG_{vh}とG_{hh}が測定されていると考えら れる.また,この時点において既に G_{hh} の方が G_{vh} よりも わずかに大きく、これ以降常に $G_{hh}>G_{vh}$ であること、更 には間隙比 $e \sim \ln G_{vh}$ 関係はほぼ線形関係にあることが分 かる.なお,この時点での含水比(平均)はおよそ 66.3% であり,液性限界のおよそ 1.2 倍に相当する.よ



って,本システムを使えば液性限界を超える状態でもGの測定が可能であると考えられる.

, より得られた*eとG_w*の関係を片対 図 - 7 は試験 数紙上にプロットしたものである.試験 については伝 播時間の同定が可能だった全ての結果を示している.な お,試験 におけるe,ρ_iは試験 と同様に試料抜き出 し後に得られた含水比の平均値と各時点での供試体体積 より計算した.ただし,試料中央部における含水比の測 定数が少ないため,2倍の重み付けをして平均した.図 中には試験の結果を用いた線形近似線を示しており, 両試験より得られたeとG_wの関係は片対数紙上において 線形関係にあることが分かる.本試験より得られた近似 線の傾き(0.241)は過去に同様な予圧密条件で作成さ れたNSF粘土を用いて実施された三軸試験より得られた eと鉛直方向の非排水ヤング率(E_v)_uとの関係における傾 き(0.234)にほぼ等しく⁸⁾,片対数紙上での $e \geq G_{yh}$ (or (E_v)_u)の線形性は高含水比状態から広範囲にわたって成 立することが推察される.なお,Lohaniら⁹⁾は東京湾粘 土を用いた同様な実験結果を報告している.

図 - 8 は試験 より得られた予圧密応力に伴う G_{vh} と G_{hh} の変化(図 - 8a),更には G_{hh}/G_{vh} の変化(図 - 8b) を比較したものである.なお,図 - 8bにおける G_{hh} は $G_{hh}^{hvv} \geq G_{hh}^{hov}$ の平均値 G_{hh}^{avv} を用いた.全ての応力点にお いて G_{hh} は G_{vh} よりも大きく, G_{hh}/G_{vh} の値は予圧密応力と ともに大きくなっていることが分かる.以上の結果と予 圧密容器内での水平応力は鉛直応力に比べて小さいこと を考慮すると,このような弾性係数の異方性ならびにそ の増大(G_{hh}/G_{vh} の増加)は粘土粒子の堆積構造による ものであり,予圧密応力の増加(一次元圧密の進行)に 伴って配向性が強まったことによると推察される.

4. まとめ

本文で示した BE 付き予圧密容器を開発したことによ り,液性限界を超える含水比から広範囲にわたるせん断 弾性係数ならびにその異方性の変化を観察することが可 能となった.以下に本文で得られた主な知見について簡 単にまとめる.

・片対数紙上におけるeとG_{vh}は線形関係にあり,過去の 研究成果と比較すると,その線形性は高含水比状態か ら広範囲にわたって成立し,その傾きはほぼ等しいこ とが推察される.



・液性限界を超える含水比状態からGhhはGyhよりも大きく、Ghh/Gyhの値は予圧密応力とともに大きくなることが確認された.この結果、このような弾性係数の異方性ならびにその増大(Ghh/Gyhの増加)は粘土粒子の堆積構造によるものであり、予圧密応力の増加(一次元圧密の進行)に伴って配向性が強まったことによると推察される.

参考文献

- Atkinson, J.H. : Anisotropic elastic deformation in laboratory tests on undisturbed London Clay *Géotechnique*, 25(2), pp.357-374, 1975.
- Ling, M.L., Pennington, D.S. and Nash, D.F.T. : Anisotropic stiffness parameters and their measurement in a stiff natural clay, *Géotechnique*, 50(2), pp.109-125, 2000.
- 山口岳志,堀智仁,山下聡,鈴木輝之,浅野静男:堆積構 造が異なる粘土供試体の弾性係数の異方性,地盤工学会北 海道支部技術報告集,第45号,pp.179-186,2005.
- 4) 澁谷啓,古関潤一,川口貴之,加藤正司:地盤材料の室内 せん断試験の基礎から応用まで-3.室内せん断試験装置・ 方法の最近の進展-,地盤工学会誌,土と基礎,第 53 巻, 第 5 号, pp.37-44, 2005.
- 5) 川村龍平,川口貴之,伊藤朝陽,佐野佶房:地盤材料の弾 性係数における異方性に関する考察,地盤工学会北海道支 部技術報告集,第46号,2006(申請中).
- 6) 川口貴之,三田地利之,澁谷啓,佐野佶房: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, No.694, III-57, pp.195-207, 2001.
- Viggiani, G. and Atkinson, J. H. : Interpretation of bender element tests, *Géotechnique*, Vol.45, No.1, pp.149-154, 1995.
- Kawaguchi, T., Mitachi, T. and Shibuya, S. : Drained and undrained elastic moduli of reconstituted clay, *Proc. of the 16th ICSMGE*, Vol. 1, pp.397-400, 2005.
- Lohani, T.N., Imai, G, Tani, K. and Shibuya, S. : G_{MAX} of finegrained soils at wide void ratio range, focusing on timedependent behavior, *Soils and Foundations*, Vol.41, No.5, pp.87-102, 2001.