

不飽和土における各種弾性係数の測定と相関について

神戸大学大学院	学生会員	川尻峻三
神戸大学大学院	非会員	境 芳樹
神戸大学大学院	正会員	澁谷 啓
神戸大学大学院	正会員	加藤正司
函館工業高等専門学校	正会員	川口貴之

1. はじめに

不飽和状態にある盛土の破壊・変形挙動の予測には、要素試験によって広範囲なひずみ領域での単調・繰返し載荷時の変形強度特性に及ぼすサクシオン、密度、拘束圧などの影響を評価する必要があるが、不飽和土の微小ひずみ領域における変形特性に関する研究例は極めて少ないのが現状である。

そこで筆者らは、まず始めに不飽和土の水分状態・サクシオンが微小ひずみ領域での弾性係数などに与える影響を明らかにすることを目的として、不飽和土の試験に対応可能な繰返し三軸試験装置を開発した¹⁾。本文では、豊浦砂を用いて実施した飽和・不飽和供試体の繰返し試験より得られた非排気・非排水条件下での鉛直方向のヤング率 E_v とベンダーエレメント試験（以下、BE 試験）より得られたせん断弾性係数 G の測定結果と得られた弾性係数 (E_v, G) の相関について議論している。

2. 試験条件

試験装置は筆者らが開発した不飽和土の試験に対応した BE 付き繰返し三軸試験装置を用いた¹⁾。試験に用いた試料は豊浦砂 ($\rho_s = 2.635\text{g/cm}^3, e_{\max} = 0.968, e_{\min} = 0.628$) であり、直径 10cm、高さ 21cm の供試体を単一ノズル空中落下法によって作製し、落下高さを変えることによって目標相対密度 $D_r = 50\%$ とした。なお、脱気水を二日間通水させ、拘束圧 $\sigma_c = 125\text{kPa}$ 、背圧 $u_b = 100\text{kPa}$ の状態で供試体を飽和化し、 B 値が 0.96 以上であることを確認した後に試験を実施した。不飽和供試体を用いた試験では、通水後 B 値が 0.96 以上であることを確認した後に拘束圧 $\sigma_c = 125\text{kPa}$ 、間隙空気圧 $u_a =$ 間隙水圧 $u_w = 100\text{kPa}$ を与え、平均基底応力 $p_{\text{net}} = 25\text{kPa}$ を保った状態で、 u_w を減少させて制御することで任意のサクシオン ($s = 10\text{kPa}$) を与えた（不飽和化した）。

図1は供試体に与えた応力履歴と弾性係数の測定点を示したものであり、 $\sigma'_v (\sigma_{v,\text{net}}) = 50, 100, 200, 400\text{kPa}$ 、応力比 $K = 0.5$ の各段階で飽和供試体では繰返し試験より非排水条件下でのヤング率 $(E_v)_u^{\text{sat}}$ と排水条件下でのヤング率 $(E_v)_d^{\text{sat}}$ および BE 試験より $G_{\text{vh}}^{\text{sat}}$ 、不飽和供試体では排気・非排水条件下でのヤング率 $(E_v)_u^{\text{unsat}}$ と排気・排水条件下でのヤング率 $(E_v)_d^{\text{unsat}}$ および BE 試験より $G_{\text{vh}}^{\text{unsat}}$ を測定した後、 σ'_v 一定条件の下で一旦等方応力状態 ($K = 1.0$) にし、各弾性係数を測定した。各応力段階での弾性係数の測定については、飽和供試体の場合には所定の応力状態を約 10 分間保った後に、不飽和供試体の場合には排水量が十分に落ち着いたことを確認した後に BE 試験と繰返し載荷試験を実施した。また、飽和・不飽和供試体に関わらず繰返し載荷時における片振幅軸ひずみ $(\varepsilon_a)_{\text{SA}}$ は 0.005% とした。

3. 試験結果および考察

図2は飽和供試体について平均有効応力 p' に対する $3G_{\text{vh}}^{\text{sat}}$ と $(E_v)_u^{\text{sat}}$ を比較したものである。ここで、等方弾性体を仮定した

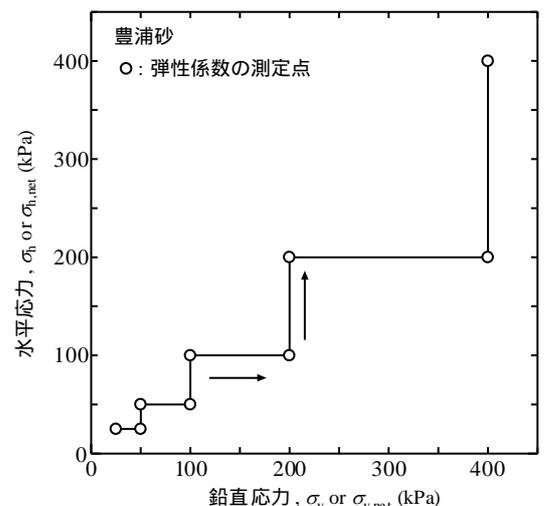


図1 応力経路と弾性係数の測定点

キーワード
連絡先

不飽和土, ヤング率, せん断弾性係数
〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1 神戸大学大学院市民工学専攻 Tel.(078)881-1212

際，せん断弾性係数 G とヤング率 E の関係は， $E = 2(1+\nu)G$ となる．ここで， ν はポアソン比である．非排水条件下におけるヤング率を E_u ，ポアソン比を ν_u とすると， G は排水条件によらないので $E_u = 2(1+\nu_u)G = 3G$ となる．しかし， B 値が完全に 1 でないこと，メンブレンペネトレーションの影響，BE 試験より得られる G と繰返し試験より得られる E_u の測定条件におけるひずみレベルの違い等を考慮すると， E_u と $3G$ は完全に一致することは無く， $E_u \approx 3G$ となることが予想される．ここで，飽和供試体についての結果を見ると $(E_{\nu})_u^{sat}$ と $3G_{vh}^{sat}$ の差は幾分あるものの，ほぼ $(E_{\nu})_u^{sat} \approx 3G_{vh}^{sat}$ となっている．この結果は，非排水条件下における飽和供試体におけるポアソン比が $\nu_u \approx 0.5$ となっていることの裏づけでもある．一方，図 3 は不飽和供試体について p_{net} に対する $3G_{vh}^{unsat}$ と $(E_{\nu})_u^{unsat}$ を比較したものである．明らかに $(E_{\nu})_u^{unsat} < 3G_{vh}^{unsat}$ となっていることが分かる．これは不飽和土の場合，たとえ非排気・非排水条件下でも間隙空気が圧縮することによって体積が変化する．すなわち，非排気・非排水条件下であっても間隙空気の存在により $\nu_u \approx 0.5$ にはならないと言える．この結果から，繰返し三軸試験から不飽和土のせん断弾性係数 $G \sim$ せん断ひずみ γ 関係，履歴減衰率 $h \sim$ せん断ひずみ γ 関係を得るには，ポアソン比の測定が必要であると言えよう．

図 4 は不飽和供試体に対して実施した繰返し試験より得られた $(E_{\nu})_u^{unsat}$ と $(E_{\nu})_d^{unsat}$ を $\sigma_{v,net}$ で整理したものである．一般に，乾燥あるいは飽和状態にある砂質土における排水条件下での鉛直方向のヤング率は鉛直有効応力のみの関数として表現できることが知られている²⁾．本試験より得られた結果を見ると排水条件に関わらず $(E_{\nu})_u^{unsat}$ および $(E_{\nu})_d^{unsat}$ は $\sigma_{v,net}$ に依存していることがわかる．本試験装置は間隙空気圧の供給経路(トップキャップ)に撥水性のポリフロンフィルター等を取り付けていない．そのため排気・非排水条件下では，供試体からの排水を許す(水分移動がある)状態にあることから排水条件下と非排水条件下でのヤング率が同程度の値となったと考えることができる．しかし，サクシオン $s = 10\text{kPa}$ では供試体の飽和度 $S_r = 15\%$ 程度であったことから，もしも完全な非排気条件下であったとしても間隙空気を圧縮するために供試体内では擬似的な排気・排水条件下に近いと考えられる．すなわち，飽和度が低い条件下では $(E_{\nu})_u^{unsat} \approx (E_{\nu})_d^{unsat}$ となることを本試験結果は示唆していると言える．今後は間隙空気圧の影響，載荷速度の影響などについて検討をしていきたいと考えている．

4. まとめ

本研究で得られた結論を以下にまとめる．

- ・ 飽和供試体では $(E_{\nu})_u^{sat} \approx 3G_{vh}^{sat}$ となり，不飽和供試体では $(E_{\nu})_u^{unsat} < 3G_{vh}^{unsat}$ となった．
- ・ 繰返し三軸試験から不飽和土のせん断弾性係数 $G \sim$ せん断ひずみ γ 関係を得るには，ポアソン比の直接測定が必要である．
- ・ 本試験で与えたサクシオン $s = 10\text{kPa}$ と飽和度 $S_r = 15\%$ では排気条件下であれば排水条件に関わらずヤング率は同程度の値となった．

参考文献

1) 境芳樹，川尻峻三，澁谷啓，加藤正司，川口貴之：ベンダーエレメントおよび繰返し三軸試験による不飽和地盤材料の変形特性の測定，第 44 回地盤工学研究発表会，投稿中
 2) Hoque, E. and Tatsuoka, F.: Anisotropy in elastic deformation of granular materials, Soils and Foundations, Vol.38, No.1, pp.163-179, 1998.

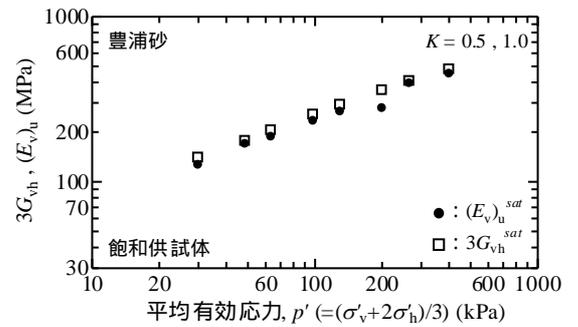


図 2 $3G_{vh}^{sat}, (E_{\nu})_u^{sat} \sim p'$ 関係

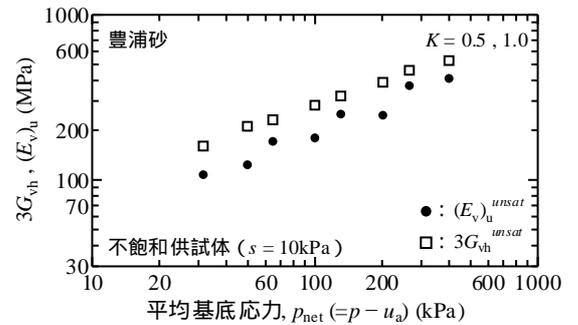


図 3 $3G_{vh}^{unsat}, (E_{\nu})_u^{unsat} \sim p_{net}$ 関係

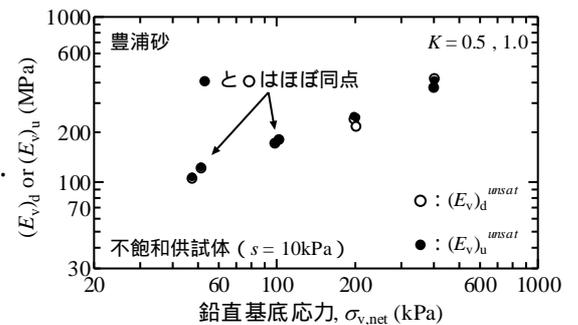


図 4 $(E_{\nu})_d^{unsat}, (E_{\nu})_u^{unsat} \sim \sigma_{v,net}$ 関係