

締固めたベントナイトと砂との混合材の初期降伏応力と膨潤圧の関係

名古屋工業大学 学生会員 崔 紅斌  
 " 正会員 孫 徳安  
 " " 松岡 元  
 " " 徐 永福

締固めた不飽和土の初期降伏応力と初期間隙比の関係に関する研究結果は数多く報告されているが、そのほとんどが非膨潤性不飽和土の試験結果に基づいたものであり、膨潤性粘土を用いた試験結果はほとんどないのが現状である。締固めた不飽和粘土にはサクシオンが存在するため、土粒子間の有効応力が増加し、より強いせん断抵抗を示す。そのため、非膨潤性粘土では浸水によりサクシオンを失うと土の構造が崩れてコラプス現象を示す。また、良く締固めた土ほど変形しにくく、コラプス発生量も少ない特徴がある。締固めた不飽和土のこのような変形特性を構成式の中で表現するためには締固めた不飽和土の初期間隙比と初期降伏応力の関係を明らかにする必要がある<sup>1)</sup>。一方、締固めたベントナイトと砂との混合材は浸水されると膨潤現象を示す。これはベントナイト中のモンモリロナイトという鉱物が水を取り込んで膨らむからである。また、良く締固めた混合材（初期乾燥密が高い）ほど浸水による膨潤ひずみが大きい。そして、拘束圧が大きくなると膨潤変形が抑えられ、ある拘束圧を超えると膨潤より圧縮に転じる傾向もある<sup>2),3)</sup>。

本研究では、純ベントナイトとその砂との混合材を用いて不飽和状態での圧縮試験を行い、過去行った浸水膨潤試験結果<sup>2),3)</sup>と比較・検討することにより各配合率の混合材の初期降伏応力と膨潤圧の関係調べ、その初期降伏応力の予測方法を提案する。

1 試験概要

試料としてはクニゲル V<sub>1</sub>、N<sub>a</sub> 型のベントナイトと豊浦砂である。ベントナイトの物理特性<sup>4)</sup>は、土粒子密度 ρ<sub>d</sub>=2.79g/cm<sup>3</sup>、塑性指数 I<sub>p</sub>=447 である。

本試験では純ベントナイトと50%の配合率 (α = M<sub>B</sub> / (M<sub>B</sub> + M<sub>S</sub>) M<sub>B</sub>:ベントナイトの乾燥質量 M<sub>S</sub>:砂の乾燥質量)の混合材を用いて供試体を作製し、試験を行った。試験は三軸試験機と標準圧密試験機を用いて、不飽和状態での等方圧密試験および一次元圧密試験を主として行った。三軸試験用の供試体は静的締固めにより作製し、標準圧密試験用の供試体は圧密リングの中に所定の質量の試料を入れて、ランマで突固めにより作製した。

不飽和土の一次元圧縮試験は、試験過程で供試体の水分を一定に保つために加湿機で湿度を調整した。

2 試験結果および考察

図1は、純ベントナイトと50%の配合率の混合材における、等方応力状態で浸水膨潤した後のモンモリロナイト間隙比 e<sub>m</sub> (e<sub>m</sub> = V<sub>w</sub> / V<sub>m</sub>, V<sub>w</sub>:膨潤終了後の供試体内部の水体积)と平均主応力 m = (σ<sub>1</sub> + σ<sub>2</sub> + σ<sub>3</sub>) / 3 との関係<sup>2)</sup>を示す。図2は10%~100%の配合率の混合材に対して、標準圧密試験機を用いて行った一次元的な浸水膨潤試験結果<sup>2)</sup>をモンモリロナイト間隙比 e<sub>m</sub> と垂直圧 v との関係で示す。図1と図2より等方力応

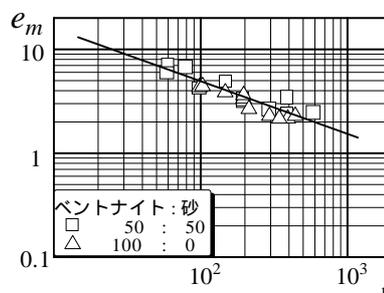


図1 等方応力状態での膨潤終了時のモンモリロナイト間隙比 e<sub>m</sub> と平均主応力 m との関係

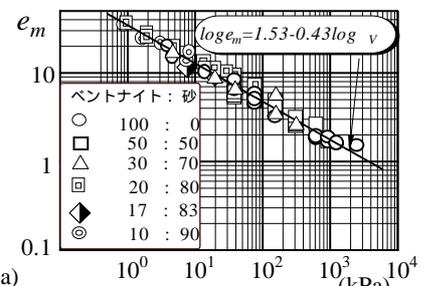
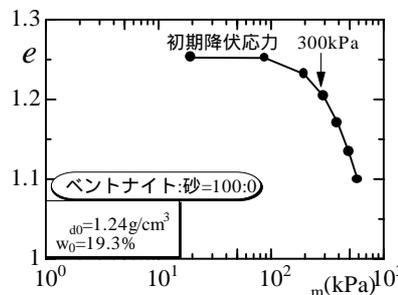
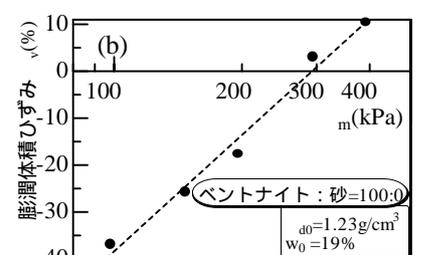


図2 K<sub>0</sub>状態での膨潤終了時のモンモリロナイト間隙比と垂直圧力との関係<sup>2)</sup>

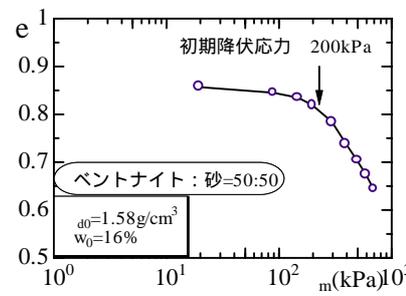


(a) 不飽和状態での等方圧密試験結果

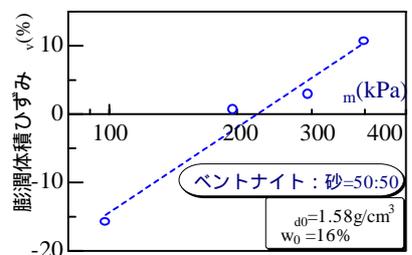


(b) 等方応力状態での浸水による膨潤体積ひずみと平均主応力との関係<sup>3)</sup>

図3 不飽和ベントナイトの初期降伏応力と、浸水による変形を示さない拘束圧(膨潤圧)の関係(ベントナイト:砂=100:0)



(a) 不飽和状態での等方圧密試験結果



(b) 等方応力状態での浸水による膨潤体積ひずみと平均主応力との関係<sup>3)</sup>

図4 不飽和ベントナイトの初期降伏応力と、浸水による変形を示さない拘束圧(膨潤圧)の関係(ベントナイト:砂=50:50)

キーワード：ベントナイト、膨潤、締固め、等方圧密、一次元圧密、初期降伏応力

連絡先：〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町 TEL: 052(735)5483 FAX: 052(735)5483

力状態でも  $K_0$  状態でも膨潤終了時のモンモリロナイト間隙比  $e_m$  と拘束圧との関係は配合率によらずに両対数紙上で唯一な直線関係に成り立つことがわかる。図3は初期乾燥密度  $\rho_{d0}=1.24\text{g/cm}^3$ 、初期含水比  $w_0=19.3\%$  の純ベントナイトを用いて行った不飽和状態での等方圧密試験結果および同じ初期乾燥密度と含水比を持つ供試体に対して異なる平均主応力で浸水膨潤した試験結果を示す。図3(a)より初期降伏応力が約300kPaである。そして図3(b)より約300kPaの平均主応力を境に膨潤より圧縮に転じる傾向が見られる。つまり、初期降伏応力を超えて塑性領域に入ってから混合材全体で吸水に伴うコラプス現象を発生するのが見られる。図4は50%の混合材の試験結果であり、図3と同じように約200kPaという初期降伏応力を超えた応力状態ではコラプス現象が発生するのが見られる。図3,4より不飽和土の降伏応力と浸水により変形を示さない拘束圧(膨潤圧)がほぼ同じである事がわかった。

図5と図6には標準圧密試験機を用いて純ベントナイトと50%の混合材の試験結果を示す。まず、図5(a)は純ベントナイトに対して、初期乾燥密度を変えて行った不飽和状態での圧密試験結果を示す。図5(b)は図5(a)に純ベントナイトの浸水膨潤終了時のデータを加えたものである。図5(c)では図5(a)の試料と同じな初期乾燥密度と初期含水比をもつ供試体の浸水膨潤試験結果を示す。図5より初期乾燥密度  $\rho_{d0}=1.20\text{g/cm}^3$  の供試体において初期降伏応力は約350kPaであり(図5(a)参照)、この降伏応力を境に膨潤より圧縮に転じることが見られる(図5(c)参照)。初期乾燥密度  $\rho_{d0}=1.55\text{g/cm}^3$  の供試体は約1100kPaで降伏し始め、この降伏応力を境に膨潤より圧縮に転じる傾向が見られる。図6は図5と同じ方法で整理した50%の混合材の試験結果を示す。この試験結果より約400kPaで初期降伏が現れ、図5と同じ傾向を示す。図3~図6の試験結果よりベントナイトおよびその砂との混合材は弾性範囲内で浸水されると膨潤傾向を示すが、塑性領域においてはコラプス現象を示す。つまり、塑性領域ではサクシジョンの減少による土の構造の崩れがモンモリロナイトの浸水膨潤より大きくなっている。

図5(b),6(b)より、不飽和土の初期降伏点は浸水膨潤終了時の  $e$ -logp 曲線上にあることが見られる。したがって、不飽和土の膨張係数と初期乾燥密度がわかれば、浸水膨潤終了時の  $e$ -logp 曲線(図5(b),6(b)の実線)より初期降伏応力を予測することができる。この浸水膨潤終了時の  $e$ -logp 曲線は次の方法で決まる。すなわち、混合材の配合率がわかれば、図5(b)と図6(b)に示した膨潤終了時の  $e$ -logp 曲線(実線)は図2の直線より予測することができる。モンモリロナイト間隙比  $e_m$  の定義より、混合材の浸水膨潤終了時の間隙比  $e_2$  と  $e_m$  の間に次の式が成り立つ。

$$e_m = \frac{V_w}{V_m} = w_2 \frac{G_m}{\alpha\beta} = e_2 \frac{G_m}{G_s \alpha\beta}$$

ここで、 $w_2$ :膨潤終了時の含水比、 $e_2$ :膨潤終了時の間隙比、 $G_m$ :モンモリロナイトの比重、 $G_s$ :混合材の比重、 $\alpha$ :配合率、 $\beta$ :ベントナイト中のモンモリロナイト含有率。上式より混合材の膨潤終了時の  $e$ -logp 関係(図5(b),6(b)の曲線)は図2の直線より得られる。すなわち、混合材の  $e$  は図2の  $e_m$  を  $G_m/G_s \alpha\beta$  で割って得られる。

参考文献

- 1) Sun DA, Matsuoka H, Cui HB and Xu YF: An elasto-plastic model for unsaturated compacted soils with different initial densities, 第38回地盤工学研究発表会講演集, 2003(掲載予定).
- 2) 崔 紅斌、孫 徳安、松岡 元、徐 永福: 一次元下でのベントナイトとその砂との混合材の膨潤・圧密特性、第37回地盤工学研究発表会講演集, pp.941-942, 2002.
- 3) 崔 紅斌、孫 徳安、松岡 元: ベントナイトと砂との混合材の三軸応力条件下での浸水膨潤変形特性、第38回地盤工学研究発表会講演集, 2003(掲載予定).
- 4) Komine H. and Ogata N.: Experimental study on swelling characteristics of sand-bentonite mixture for nuclear waste disposal, Soils and Foundations, 39(2): 83-97, 1999.

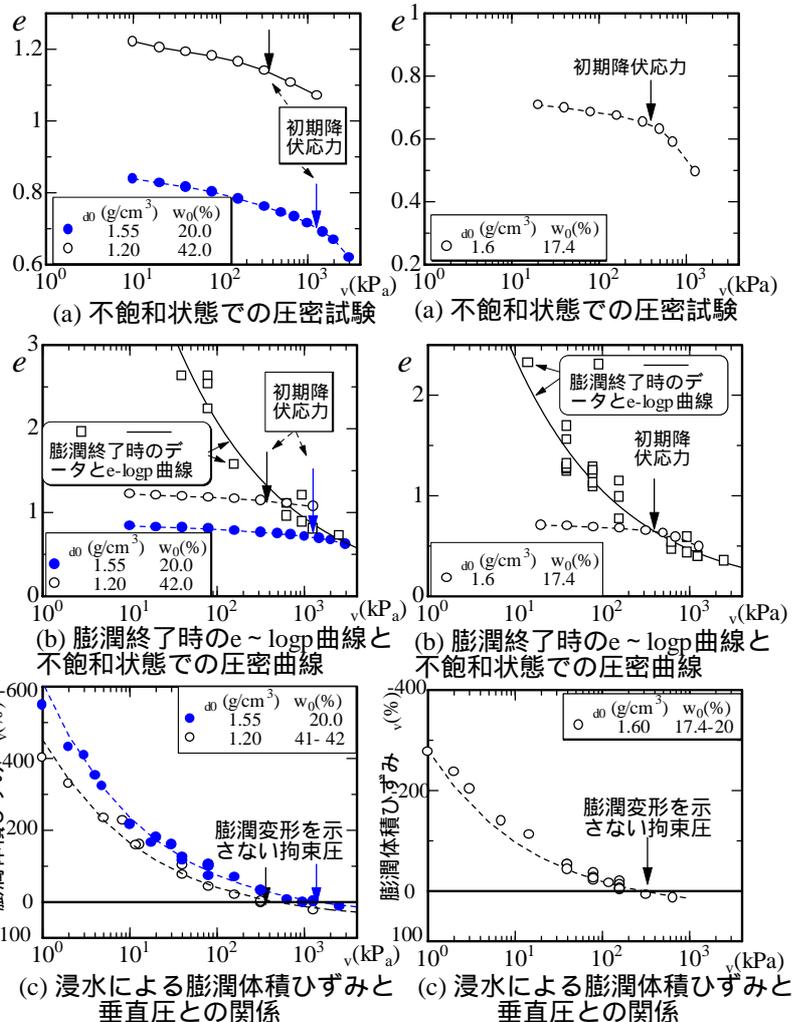


図5 純ベントナイトの試験結果 図6 50%配合率の混合材の試験結果