

ベントナイトと砂との混合材の一次元的な 浸水変形特性

崔 紅斌¹・孫 徳安²・松岡 元³・徐 永福⁴

¹学生会員 工修 名古屋工業大学大学院 社会学専攻(〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)
Email:cui_hongbin@hotmail.com

²正会員 工博 名古屋工業大学大学院 社会学専攻研究員(〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

³フェロー会員 工博 名古屋工業大学大学院 社会学専攻教授(〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

⁴工博 上海交通大学 建筑工程与力学学院(中国 200030 上海市崑山路 1954)

単位乾燥体積当たりのモンモリロナイトの最大吸水量が一定であることに着目し、モンモリロナイト間隙比という概念を用いて、締固めたベントナイトと砂との混合材の浸水による膨潤変形とコラプス変形を統一的に予測できることを示す。また、低配合率の混合材においては、砂の骨格間隙比がその砂の最大間隙比を超えると砂粒子の間で接触が生じるため、浸水終了後のモンモリロナイト間隙比と垂直圧の両対数紙上での唯一的な直線関係(状態線)を利用して浸水による変形量を予測するには適用できる垂直圧の範囲があることがわかった。そこで、砂の骨格間隙比を用いてこの適用応力範囲の予測法を提案・検証した。

Key Words: swelling, bentonite, montmorillonite, swelling pressure, skeleton void ratio

1. はじめに

高い膨潤特性と自己シール性を持つベントナイトは高レベル放射性核廃棄物の深地層処分において緩衝材および埋め戻し材として使われることが期待されている。強度および締固め性能の向上のため砂との混合材も検討の対象となっている¹⁾。

膨潤性粘土であるベントナイトは浸水されると、主成分であるモンモリロナイトが大きく膨らんで砂粒子の間隙を埋め込むことができる。そのためベントナイトと砂の混合材は非常に小さい透水係数を示す²⁾。よく締固めたベントナイトと砂との混合材は、地下水の浸入により膨潤し、周辺の岩盤に対して膨潤圧を作用させることが予想される。また、廃棄物の最終処分場でも遮水層として低配合率のベントナイトと砂などの混合材を締固めて使っている。そこで、膨潤性材料であるベントナイトと非膨潤性材料である砂などの混合材が両材料の配合割合、初期乾燥密度および浸水直前まで受けていた荷重により、どんな浸水変形特性を示すのか、あるいはどれほどの膨潤圧を発生するのかを解明する必要がある。

ベントナイトと砂との混合材の浸水膨潤変形特性

に関して、小峯・緒方³⁾は一次元下でモンモリロナイトの膨潤体積ひずみと垂直圧との唯一的な関係が成立することを明らかにし、この関係式に基づいて浸水膨潤ひずみと膨潤圧を予測する方法を提案した。

一方、Mollins⁴⁾は浸水終了後の水とベントナイトの体積の比と垂直圧の関係が各配合率の混合材によって異なることも主張している。

本研究では、締固めたベントナイトと砂との混合材を対象に、浸水による膨潤挙動だけでなく、土粒子間のサクシヨンの解除による収縮挙動にも着目し、その変形挙動の解明を試みた。また、低配合率の混合材においては、砂粒子の接触により形成された骨格が浸水変形挙動に及ぼす影響を検討している。

2. 試験概要

(1) 試料

本試験に用いた試料は、クニゲル VI, Na 型のベントナイトと豊浦砂である。その物理特性³⁾を表-1に示す。図-1のベントナイトのX線回折図より、この種類のベントナイトは、膨潤性粘土鉱物であるモンモリロナイトと非膨潤性鉱物である長石、方解石、石英などで構成

表-1 試料の物理特性

モンモリロナイトの乾燥密度 (ρ_m)	2.79Mg/m ³
モンモリロナイト以外の鉱物の 乾燥密度(ρ_{mm})	2.79Mg/m ³
豊浦砂の乾燥密度(ρ_{sand})	2.65 Mg/m ³
ベントナイトの液性限界	473.9%
ベントナイトの塑性限界	26.61%
ベントナイトの塑性指数	447.3
モンモリロナイトの含有率(β)	48%

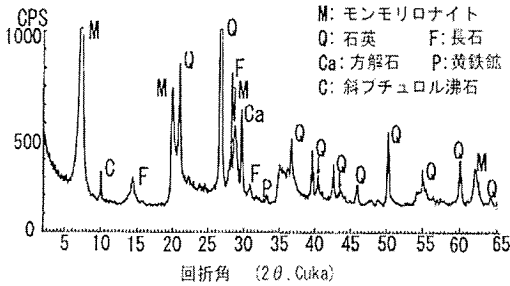


図-1 ベントナイトの x 線回折図

されていることがわかる。

混合材の試料は乾燥したベントナイトと砂を一定の質量比で混ぜた後、純水を加えて所定の含水比まで調製した。本研究ではベントナイトと砂との混合材を対象とすることから、配合率 α を用いてその配合割合を示す。配合率 α とは、ベントナイトの乾燥質量が混合材全体の乾燥質量の中で占める割合を示す。式で示すと

$$\alpha = M_B / (M_B + M_{sand}) \times 100 \quad (1)$$

ここに、 M_B と M_{sand} はそれぞれベントナイトと砂の乾燥質量である。

浸水試験では 100%, 50%, 30%, 20%, 17%, 10% 全部で 6 種類の配合率の混合材を用いた。

(2) 試験装置、供試体および試験方法

図-2 は本試験に用いた試験機の概要図を示す。この試験機は圧密リングの内径が 60mm、高さが 20mm である。ベントナイトは透水係数が非常に小さいことから、浸水時間を短縮するため、試験機に 500mm ぐらいのビニル管をつけて、給水する水頭の高さを上げた。

浸水膨潤用の供試体の作製については、圧密リン

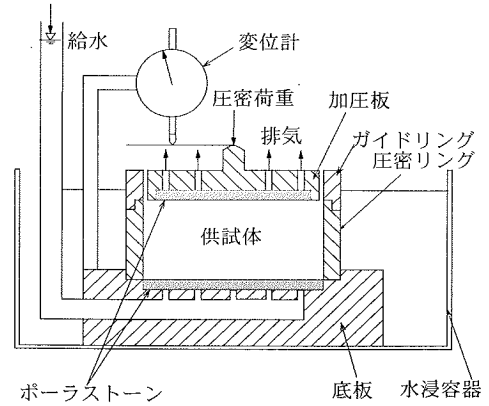


図-2 浸水試験に用いた標準圧密試験機

グにガイドリングを被せた後、所定の質量の試料を投入し、直径 60mm、厚さ 10mm、7mm、5mm の押し出し円盤(鉄の塊)を 1 枚あるいは 2 枚を組み合わせて、円盤が高さ 20mm の圧密リングの中にちょうど入るまでランマでたたきこんで成形させた。その後、薄い小刀で、圧密リングの底の外部に露出した部分を整形し、重さを測り、直径 60mm、高さ 3mm、5mm、10mm および 13mm の供試体を作製した。例えば、高さ 3mm の供試体を作成するために、厚さ 10mm と 7mm の円盤を組み合わせて圧密リングの中にちょうど入るまでたたきこむ。そして、高さ $20 - (10 + 7) = 3$ mm の供試体を作成される。供試体の高さを圧密リング高さ 20mm より小さくしたのは、小さい垂直圧で浸水すると大きい膨潤変形を示すので、膨潤する過程で圧密リングよりはみ出すことを防ぐためである。また、大きい垂直圧では浸水によるひずみが小さいことから、精度を高めるため供試体の高さを大きくした。

コラプス試験用の供試体は、高さ 10mm のガイドリングを高さ 20mm の圧密リングに被せた後、所定の質量の試料を入れて、10mm の押し出し円盤がガイドリングの中にちょうど入るまでランマでたたきこんで高さ 20mm の供試体を作製した。コラプス試験では体積が圧縮されるため、供試体の高さを大きくした。

試験は、供試体を試験機にセットした後、ろ紙などの圧縮を考慮して、まず 5kPa の垂直圧をかけて 1 時間ほど放置してから所定の垂直圧 p まで段階的に圧縮した。給水は供試体の底部から行い、給水すると同時にダイヤルゲージより垂直方向の変形量を計測した。浸水時間は供試体の初期状態によって異なり、変形がほぼ落ち着く(配合率が 100% と 50% の場合には大体 1 ヶ月程度)まで給水を行った。ただし、コラプス試験では浸水による圧縮変形が約 3 日で終了するが、水を十分吸収できるように浸水時間を長

くした。試験終了後の供試体の飽和度はほぼ 100%であった。

3. 浸水終了後のモンモリロナイト間隙比 e_m と垂直圧 p との唯一的な関係

(1) ベントナイトの浸水による膨潤・収縮挙動

図-3 は、配合率 100%のベントナイトの供試体を用いて、初期状態から垂直圧 p まで不飽和状態で圧縮した後に浸水した場合、また、浸水初期から膨潤変形が生じないように垂直圧を調整しながら浸水した場合の間隙比 e と垂直圧 p の関係を示す。

図-3 において、白抜きのプロット(○, □, △, ◇)は、初期乾燥密度 $\rho_{d0}=1.51\text{g/cm}^3$ 、初期含水比 $w_0=21.6\%$ の4つの供試体に対して40, 80, 160, 640kPaまでそれぞれ圧縮し、その後浸水した試験結果である。半塗り(●)は初期乾燥密度 $\rho_{d0}=1.23\text{g/cm}^3$ 、初期含水比 $w_0=1.95\%$ の供試体に対して、2560 kPaまで圧縮し、その後浸水した試験結果である。黒塗りのプロット(▲, ◆, ■, ●)は初期乾燥密度 $\rho_{d0}=0.86\text{g/cm}^3$ 、初期含水比 $w_0=7.9\%$ の4つの供試体を用いて、垂直圧 p がそれぞれ40, 80, 1280, 2560kPaになるまで圧縮し、その後浸水した試験結果である。そして、2重丸と2重四角のプロット(◎, 回)は、初期乾燥密度 $\rho_{d0}=0.86\text{g/cm}^3$ 、初期含水比 $w_0=7.9\%$ (回)と初期乾燥密度 $\rho_{d0}=1.60\text{g/cm}^3$ 、初期含水比 $w_0=21.6\%$ (◎)の2つの供試体に対して行った定体積浸水膨潤試験結果である。この試験では、飽和に至るまで圧密リング内の供試体を鉛直方向に変形しないように垂直圧を調整する。そして、垂直圧が安定したときの値を膨潤圧とする。

同図より、浸水とともに膨潤挙動を示す供試体もあれば、収縮挙動を示す供試体もあるのが見られる。興味深いのは、3種類の初期状態の異なる供試体が異なる垂直圧 p のもとで浸水しても、浸水終了後の間隙比はほぼ一本の $\log e - \log p$ 直線(太い破線)に乗ることである。同図中の40kPaと80kPa、および2560kPaでの試験結果より、浸水直前(あるいは乾燥密度)が異なっても最終的にはほぼ同じ $\log e - \log p$ 直線まで変形するのが見られる。また、定体積浸水膨潤試験より得られた膨潤圧と間隙比の関係もこの線上にのることが見られる。

同図より、この直線の下(位置)より浸水されると膨潤挙動を示すが、上の位置より浸水されると収縮挙動を示すのがわかる。つまり、図-3中の太い破線はベントナイトの浸水終了後の一種の状態線であると考えられる。

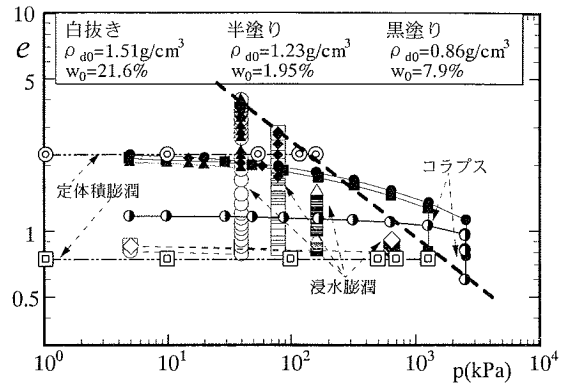


図-3 不飽和状態での圧縮と浸水による間隙比の変化(ベントナイト:砂=100:0)

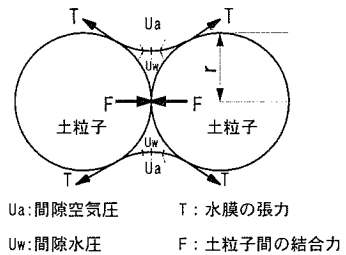


図-4 不飽和状態にある土粒子のモデル

(2) ベントナイトの浸水による膨潤あるいはコラプスのメカニズム

ベントナイトは膨潤性成分であるモンモリロナイトを多く含んでいる。その膨潤機構^{5), 6)}としては、トランプのカードのような結晶構造を示すモンモリロナイトの層間の陽イオンと負の電荷を持つ双極子である水分子が水和することにより、層間を押し広げるためといわれている。

一方、締り固めたベントナイトのコラプス沈下挙動に関する研究報告例はほとんど無く、そのメカニズムについてもはっきりした解釈がないようである。非膨潤性粘土のコラプス現象のメカニズムについては、多くの研究者(例えば Barden⁷⁾, Mitchell⁸⁾)より解釈されているが、それらをまとめると次のようなものである。図-4に示すように、不飽和土の土粒子の間ではメニスカスが形成され、負の間隙水圧を有している(初期含水比が低い試料ほど負の間隙水圧が大きく、Regina 粘土の場合、初期含水比がほぼ0%の時に650~950MPaの大きなマトリックスサクシオンが作用している⁹⁾)。この負の間隙水圧の存在により、土粒子の間に結合力 F が生じる。結合力 F は土粒子の間のせん断抵抗を強める効果があり、飽和土では構成できない構造をも形成(土粒子の間

表-2 浸水試験に用いた供試体の一覧

配合率 (%)	$\rho_{d0}(\text{g/cm}^3)$	$w_0(\%)$	$p(\text{kPa})$
100	0.86-1.67	1.95-42.0	4-2560
50	1.24-1.84	8.6-22.9	14-960
30	1.50-2.30	9.6	5-1280
20	1.45-1.58	14.6-15.5	0.9-1280
17	1.50-1.81	5.0-5.6	2.7-320
10	1.43-1.62	3.1-4.1	0.8-640

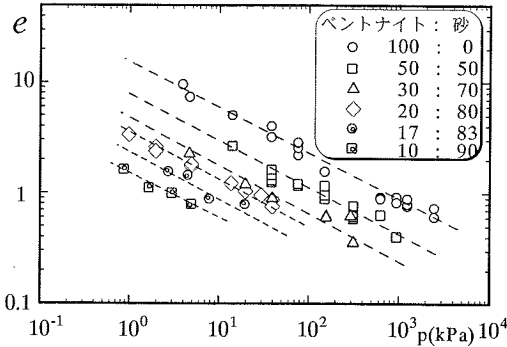


図-5 浸水終了後の混合材の間隙比と垂直圧の関係

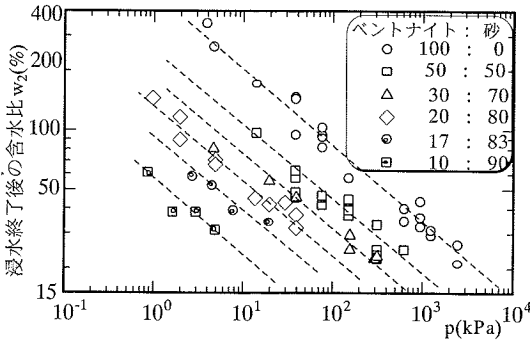


図-6 浸水終了後の含水比と垂直圧の関係

に大きな間隙が存在する)し、大きな載荷荷重に耐えることができる。しかし、この構造は不安定であるため、大きな外部荷重を受けながら浸水すると、サクシジョンの減少とともに構造が崩れてコラプス現象を示すというものである。

膨潤性粘土であるベントナイトの場合は、垂直圧 p が膨潤圧より小さい範囲内で浸水すると、浸水直前の状態より膨潤する。一方、垂直圧が膨潤圧より大きい場合は、水を取り込んだモンモリロナイトが膨潤すると同時に大きな間隙が崩れ、結果的には収縮挙動を示す。つまり、この場合はモンモリロナイトの膨潤と、大きな間隙の崩れが同時に発生すると考えられる。ちなみに、緩衝材や埋め戻し材が岩盤のクリープ変形や地質運動などで膨潤圧より大きい地圧を受けながら浸水する場合には収縮挙動を示すと予想される。

(3) 浸水終了後の $\log e - \log p$ 関係と $\log w - \log p$ 関係

表-2 に浸水試験で用いた供試体の初期乾燥密度、初期含水比と浸水する時の垂直圧の一覧を示す。

図-5 と図-6 は混合材において、浸水終了後の間隙比 e と垂直圧 p との関係、浸水終了後の含水比 w と垂直圧 p との関係を示す図面である。ただし、30%、

20%、17%、10%の配合率の混合材においては、表-2の中から小さい垂直圧 p のもとでの浸水試験結果だけをプロットした(その理由は第4章で説明する)。図中のプロットは試験結果であり、点線はそれぞれの配合率のプロットにもっとも近くて平行になるように引いたものである。図-5より、①同じ配合率の混合材においては両対数座標上で $\log e \sim \log p$ 関係がほぼ一直線上で整理される。②異なる配合率の混合材の間では $\log e \sim \log p$ 関係がほぼ平行している傾向がある。③同じ垂直圧の場合では配合率が高いほど浸水終了後の間隙比が大きい。図-6の浸水終了後の含水比 w と垂直圧 p との関係も図-5と同じ傾向を示す。これは、浸水終了後の供試体がいずれも飽和度 $S_r=100\%$ に達しているため、 $eS_r=G_s w$ の関係式より図-6の縦軸 w (含水比)は図-5の縦軸 e を G_s (比重)で割ったものになるからである。図-6より、同じ垂直圧ではベントナイトの配合率が高いほど、よりたくさん水をとり込んだと理解される。

(4) モンモリロナイト間隙比 e_m の定義および浸水終了後の唯一的な $\log e_m \sim \log p$ 関係

ベントナイトは主にモンモリロナイトが水を取り込んで膨潤する。また、図-3中の $p=40, 80, 2560\text{kPa}$ での浸水試験結果より、同じ垂直圧 p のもとで単位乾燥体積のモンモリロナイトが最も多く吸収できる水の体積は初期乾燥密度に関係なく一定であることがわかった。そこで、ある垂直圧 p のもとで単位乾燥体積のモンモリロナイトが最大に吸収できる水の量は一定であると考えられる。本論文では、この浸水変形後の水の体積とモンモリロナイトの乾燥体積の比をモンモリロナイト間隙比 e_m^{10} と呼ぶ。このモンモリロナイト間隙比は浸水終了後の含水比 w_2 あるいは間隙比 e_2 とベントナイトの配合率を利用して算出することができる。

具体的な式の誘導に入る前、本論文で用いる記号を羅列する。

V_m :モンモリロナイトの乾燥体積

V_{sand} : 砂の乾燥体積
 V_{nm} : 非膨潤性粘土鉱物の乾燥体積
 V_v : 間隙の体積
 V_w : 浸水終了後の供試体中の水の体積
 m_w : 浸水終了後の供試体中の水の質量
 m_m : モンモリロナイトの乾燥質量
 m_{nm} : 非膨潤性粘土鉱物の乾燥質量
 m_{sand} : 砂の乾燥質量
 ρ_w : 水の密度
 ρ_m : モンモリロナイトの乾燥密度
 ρ_{nm} : 非膨潤性粘土鉱物の乾燥密度
 ρ_{sand} : 砂の乾燥密度
 α : ベントナイトの配合率
 β : ベントナイト中のモンモリロナイト含有率
 M_s : 土粒子全体の乾燥質量 ($= m_m + m_{nm} + m_{sand}$)
 V_s : 土粒子全体の乾燥体積 ($= V_m + V_{nm} + V_{sand}$)
 ρ_s : 混合材の乾燥密度 ($= M_s / V_s$)
 G_s : 混合材の比重 ($= \rho_s / \rho_w$)

モンモリロナイト間隙比 e_m の定義より

$$e_m = \frac{V_w}{V_m} = \frac{m_w / \rho_w}{m_m / \rho_m} = \frac{m_w}{m_m} \cdot \frac{\rho_m}{\rho_w} \quad (2)$$

混合材において、モンモリロナイトの乾燥質量 m_m はベントナイトの配合率 α およびモンモリロナイト含有率 β より式(3)で計算できる。

$$m_m = M_s \alpha \beta 10^{-4} \quad (3)$$

式(3)を式(2)に代入すると、モンモリロナイト間隙比と浸水終了後の含水比との関係が次式で表される。

$$e_m = \frac{m_w}{M_s \alpha \beta 10^{-4}} \frac{\rho_m}{\rho_w} = w_2 \frac{\rho_m}{\alpha \beta \rho_w} 10^2 \quad (4)$$

ここに、 w_2 は浸水終了後の含水比である。

ρ_m および β は表-1 に示すような試料の物理特性であるので、式(4)より、浸水終了後の含水比 w_2 と配合率 α が分かれば、モンモリロナイト間隙比 e_m を算出することができる。また、浸水終了後の飽和度 $S_r=100\%$ より、 $e_2 S_r = G_s w_2$ の関係を式(4)に代入すると式(5)のモンモリロナイト間隙比 e_m と浸水終了後の間隙比 e_2 との関係が得られる。

$$e_m = w_2 \frac{\rho_m}{\alpha \beta \rho_w} 10^2 = e_2 \frac{\rho_m}{\rho_s \alpha \beta} 10^4 \quad (5)$$

式(5)より、浸水終了後の間隙比 e_2 と、配合率 α が分かれば、この時のモンモリロナイト間隙比 e_m を算

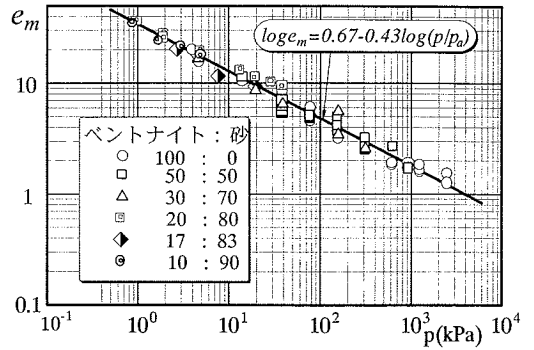


図-7 浸水終了後のモンモリロナイト間隙比 e_m と垂直圧 p の関係

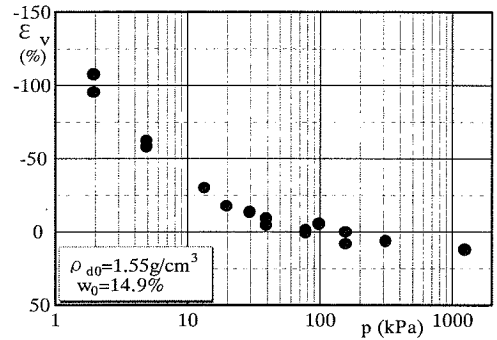


図-8 浸水による変形と垂直圧の関係
(ベントナイト：砂=20：80)

出することができる。

図-7 は、モンモリロナイト間隙比 e_m と浸水終了後の垂直圧 p との関係を両対数座標上で整理したものである(図中の近似式での p_a は大気圧)。ただし、配合率が30%, 20%, 17%, 10%の混合材においては小さい応力範囲での浸水試験結果のみをプロットした(図-5, 図-6 のデータと同じ)。同図より、配合率によらずに $\log e_m \sim \log p$ 関係が一直線上で唯一的に整理されることが見られる。つまり、同じ垂直圧の条件下で、単位乾燥体積のモンモリロナイトが最大に取り込める水の量は一定であることである。そして、その量は垂直圧 p が大きくなるにつれて少なくなるのが見られる。この唯一的な関係の状態線が成立するとすれば、同じ配合率のベントナイトの混合材に対して、垂直圧 p を変えて2つの浸水試験を行い、浸水終了後の含水比をそれぞれ測るだけで、他の配合率の混合材の、浸水直前の状態からの浸水変形ひずみを予測することが可能となる。その具体的な予測方法の流れを本文の最後に示す。ただし、図-7 に示した唯一的な $\log e_m \sim \log p$ 直線関係を利用して、低配合率の混合材の浸水変形量を予測するには垂直圧

により適用できない場合もある。次節で、この適用できない垂直圧の範囲について考察する。

2. 低配合率の混合材において唯一的な $\log e_m \sim \log p$ 関係が適用できる応力範囲

(1) 低配合率の混合材の浸水変形特性

図-8は、配合率20%の混合材の浸水による膨潤ひずみ ε_v と垂直圧 p との関係を示したものである。同図より、垂直圧 p が約40kPaを超えると浸水による変形は膨潤から圧縮に転じるのが見られる。つまり、約40kPaより小さい垂直圧 p の範囲では垂直圧が膨潤圧より小さいため膨潤挙動を示すが、約40kPaを超えた垂直圧 p の範囲では、垂直圧が膨潤圧より大きいため、サクシジョンの減少とともに収縮挙動（コラプス）を示す。

図-9は、配合率30%、20%、17%、10%の混合材に対して異なる垂直圧 p で浸水したすべての試験結果を示したものである。同図より、小さい垂直圧 p で浸水した試験結果は唯一的な $\log e_m \sim \log p$ 直線関係上に整理されるが、大きい垂直圧 p での試験結果は直線より上の方にプロットされているのが見られる。また、配合率が大きくなると、直線上から外れる時の垂直圧 p も大きくなっているのが見られる。したがって、配合率の異なる混合材において、浸水終了後の唯一的な $\log e_m \sim \log p$ 直線関係が成立する応力（外部垂直圧 p ）範囲は異なっている。つまり、図-7に示した状態線の上の方から浸水してもこの状態線までコラプス沈下しないということであるが、これは砂粒子の接触により形成した骨格が混合材のコラプス沈下変形を阻害したためと考えられる。

(2) 砂粒子の接触により形成された骨格が混合材の浸水変形挙動に及ぼす影響

図-10の概念図を用いて、低配合率の混合材の浸水変形特性のメカニズムを説明する。配合率の高いベントナイトの混合材(図-10(a)参照)は、浸水直前の状態から膨潤しても、あるいはコラプスしても浸水終了後には膨らんだモンモリロナイトが砂粒子を挟んでいる形となり、外部垂直圧を全部受け持つことになる(つまり $p_m = p$)。この場合の試験結果は図-7に示した直線関係上にと考えられる。しかし、低配合率の混合材(図-10(b)参照)においては砂粒子の増加あるいは垂直圧の増加により、砂粒子の間で接触が生じ、砂粒子の骨格が形成される。そのため、高い垂直圧では不飽和状態での圧縮線が図-10(c)に示した状態線の上の方に位置する。この時、垂

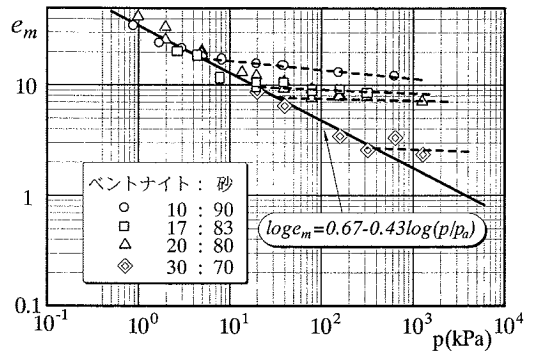


図-9 低配合率の混合材における浸水終了後のモンモリロナイト間隙比と垂直圧の関係

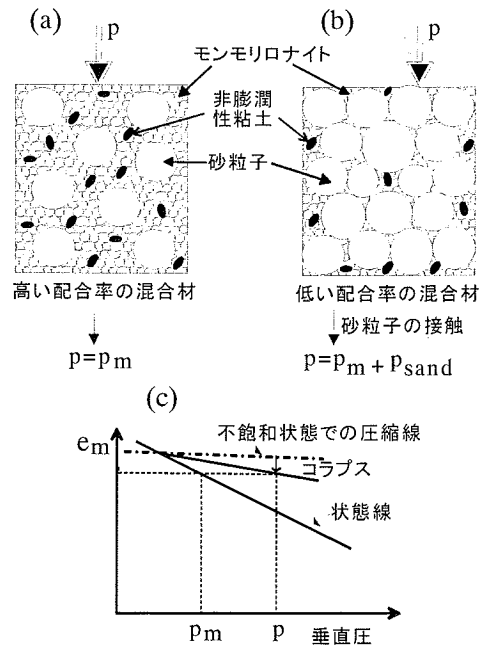


図-10 砂粒子の骨格の形成によるモンモリロナイト間隙比への影響の概念図

直圧は膨潤圧より大きいため、全体的にコラプスしようとする傾向が強い。一方、砂粒子の接触により形成した固い骨格は垂直圧のほとんどを分担し、混合材全体が体積圧縮することを阻害することになる。そのため、浸水により土粒子間のサクシジョンが減少すると、少しの体積圧縮挙動を示す(図-8参照)が、図-10(c)の状態線までは収縮できない。この場合、モンモリロナイトが実際に受ける圧力は外部垂直圧 p よりも小さくなる。このようにモンモリロナイトが小さい垂直圧の状態では浸水して膨潤した結果、よ

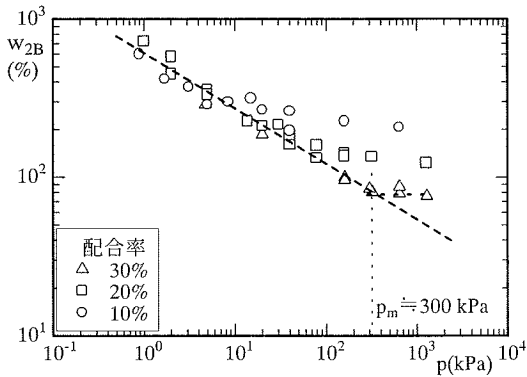


図-11 浸水終了後のベントナイト含水比 w_{2B} と垂直圧 p の関係

りたくさんの水を取り込んで砂粒子の間隙を満たす形になったと考えられる。ただし、この場合でもモンモリロナイト間隙比 e_m と実際にモンモリロナイトが受けている p_m (モンモリロナイトが発揮する膨潤圧と理解してもいい) の関係は図-10(c)に示すような状態線上にあると思われる。

(3) 砂粒子の骨格が形成された条件下でのベントナイトと砂粒子の間隙との関係

混合材に対して、浸水終了後のベントナイトの保水状態を調べる目的で、本節ではベントナイトの含水比 w_{2B} というパラメーターを用いて検討する。

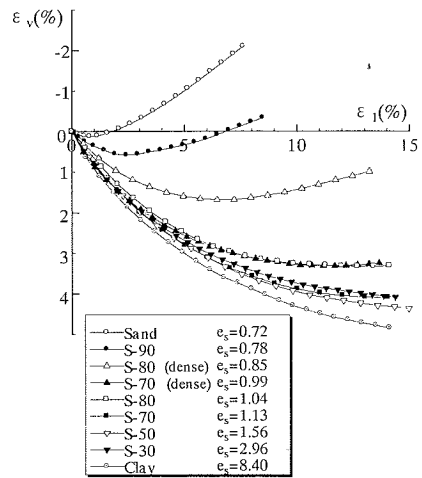
図-6 に示したように、ベントナイトが取り込める水の量は垂直圧の大きさに依存する。そのため、逆に浸水終了後のベントナイト含水比 w_{2B} がわかると、ベントナイトがどれぐらいの垂直圧 p を受けているのかも判断できる。

図-11 は配合率 $\alpha=30\%$, 20% , 10% の混合材において、浸水終了後の含水比 w_2 を配合率 α で割って求めたベントナイト含水比 w_{2B} と垂直圧 p との関係を示す。 w_{2B} を式で示すと式(6)のようになる。

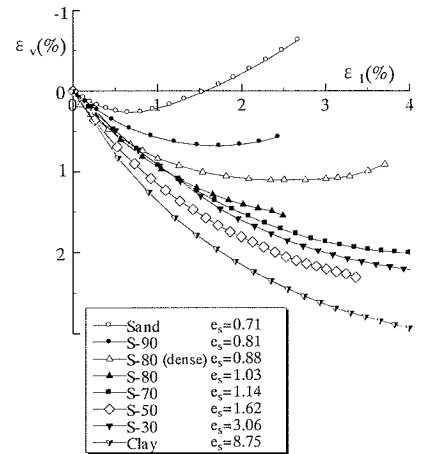
$$w_{2B} = \frac{w_2}{\alpha 10^{-2}} = \frac{m_{w2}}{M_s \alpha} 10^4 = \frac{m_{w2}}{m_B} 10^2 \quad (6)$$

ここに、 m_{w2} は浸水終了後の供試体中の水の質量であり、 M_s は土粒子全体の乾燥質量、 m_B はベントナイトの乾燥質量である。

図-11 より、垂直圧が増加するにつれてベントナイト含水比 w_{2B} はだんだん小さくなる傾向が見られる。そして、砂粒子の接触が生じたと考えられる範囲(破線より外れた領域)では、いずれの配合率の混合材においてもベントナイト含水比 w_{2B} は小さい垂直圧で浸水した時(砂粒子の骨格を形成してい



(a) 三軸圧縮時のダイレイタンスー特性と骨格間隙比関係



(b) 三軸伸張時のダイレイタンスー特性と骨格間隙比関係

図-12 藤森粘土と豊浦砂との混合材のダイレイタンスーと砂の骨格間隙比の関係

い時)の値(例えば $p=0.9\text{kPa}$ 時の $w_{2B}=700\%$)より小さいことが見られる。このことは砂粒子の骨格を形成しても、ベントナイトはもっと膨潤する能力があることを意味している。したがって、砂粒子の骨格が形成されても垂直圧の一部はベントナイトが分担していることがわかる。ベントナイトが砂粒子の接触により形成した骨格の間隙を満たしていない限り垂直圧を分担することはできない。したがって、ベントナイトは図-10(c)に示すように砂粒子の間隙を全部満たして垂直圧の一部(p_m)を分担していると考えられる。(このことは、低配合率の混合材が遮水材としてもふさわしいことを示している)。

(4) 砂の骨格間隙比より低配合率の混合材の唯一のな $\log e_m \sim \log p$ 関係の適用できる垂直圧範囲の推定

低配合率の混合材において、唯一のな $\log e_m \sim \log p$ 直線関係が適用できる垂直圧の範囲を定めるため、砂の骨格間隙比 e_s を用いて検討する。中間土によく使われる砂の骨格間隙比の定義を式(7)に示す。

$$e_s = \frac{V_{\text{砂以外}}}{V_{\text{砂}}} \quad (7)$$

ここで、 $V_{\text{砂}} = V_{\text{sand}}$ 、 $V_{\text{砂以外}} = V_v + V_m + V_{nm}$ である。

図-12 は、藤の森粘土と豊浦砂との混合材を用いて行った平均主応力 $p=980\text{kPa}$ での三軸圧縮・三軸伸張試験によるダイレイタンス挙動¹¹⁾を示す。同図より、三軸圧縮・三軸伸張とも砂の骨格間隙比が豊浦砂の最大間隙比(約 $1.0^{(12)}$)より小さい値でせん断すると正のダイレイタンスを示すのが見られる。また、砂の骨格間隙比が小さくなるにつれて体積膨張する傾向も強まるのが見られる。一方、 e_s が 1.0 より大きい値を示す中間土ではせん断中に負のダイレイタンスだけを示す。つまり、砂の骨格間隙比がその砂の最大間隙比の値になると砂粒子の間で接触し始め、砂の骨格が形成されることを示していると考えられる。

そこで、ある一定の配合率の混合材において砂粒子が接触し始める時(図-9に示した唯一のな $\log e_m \sim \log p$ 直線よりちょうど外れようとする時)、砂粒子の骨格がまだ荷重を受けていないと仮定すると、式(8)と式(9)の2つの関係式が成り立つ。すなわち、両対数座標上で、 $\log e_m \sim \log p$ の直線関係と砂の骨格間隙比 $e_s = \text{砂の最大間隙比 } e_{\text{max}}$ という2つの関係が同時に成り立つということである。

$$\log e_m = a + b \log(p/p_a) \quad (8)$$

$$e_s = e_{\text{max}} \quad (9)$$

ここで、 p_a は大気圧である。

ベントナイトと砂の混合材において砂の骨格間隙比 e_s の定義は次式で表される。

$$e_s = \frac{V_v + V_m + V_{nm}}{V_{\text{sand}}} \quad (10)$$

浸水終了後の飽和度が100%であることから

$$V_v = V_w \quad (11)$$

式(11)を式(10)に代入して、さらに式(2)の水の体積 V_w を代入すると、式(12)が得られる。

$$\text{式(10)より、} \quad e_s = \frac{V_v + V_m + V_{nm}}{V_{\text{sand}}} = \frac{V_m e_m + V_m + V_{nm}}{V_{\text{sand}}}$$

$$\text{上の式より、} \quad e_m = \frac{e_s V_{\text{sand}} - V_m - V_{nm}}{V_m}$$

$$e_m = A e_s + B \quad (12)$$

$$A = \frac{V_{\text{sand}}}{V_m} = \frac{M_s (1 - \alpha / 100)}{\rho_m} = \frac{\rho_{\text{sand}}}{M_s \alpha \beta 10^{-4}} = \frac{\rho_m (1 - \alpha / 100)}{\rho_{\text{sand}} \alpha \beta 10^{-4}} \quad (13)$$

$$B = -\frac{V_m + V_{nm}}{V_m} = -\left(1 + \frac{M_s \alpha (100 - \beta)}{M_s \alpha \beta} \frac{\rho_m}{\rho_m}\right) = -\left(1 + \frac{\rho_m (100 - \beta)}{\rho_m \beta}\right) \quad (14)$$

式(13)と式(14)に下記の3式を用いた

$$m_m = M_s \alpha \beta 10^{-4}$$

$$m_{nm} = M_s \alpha (1 - \beta / 100) 10^{-2}$$

$$m_{\text{sand}} = M_s (1 - \alpha / 100)$$

式(13)と式(14)より、 A および B は配合率 α とベントナイト中のモンモリロナイト含有率 β により定まるパラメーターであり、同じ配合率の混合材においては定数である。そのため、同配合率の混合材において、浸水終了後のモンモリロナイト間隙比 e_m と砂の骨格間隙比 e_s の間に式(12)に示すような線形関係が成り立つ。

式(12)を式(8)に代入すると式(15)が得られる。

$$\log(A e_s + B) = a + b \log(p/p_a) \quad (15)$$

上に述べた砂粒子が接触し始める時、式(8)と式(9)が同時に成り立つことより、式(9)を式(15)に代入すると式(16)が得られる。この式は、ある一定の配合率の混合材が唯一のな $\log e_m \sim \log p$ 直線より外れし始める時の垂直圧 p を求める式である。つまり、式(16)で求めた垂直圧 p より小さい垂直圧範囲では浸水終了後のモンモリロナイト間隙比が唯一の $\log e_m \sim \log p$ 直線上にのるが、この応力を超える垂直圧下では $\log e_m \sim \log p$ 直線から外れることを意味する。

$$\log(p/p_a) = \frac{1}{b} [\log(e_{\text{max}} A + B) - a] \quad (16)$$

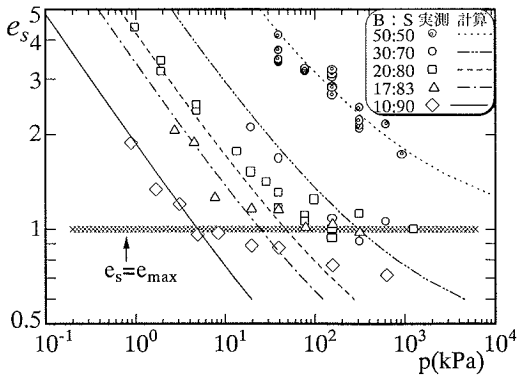


図-13 浸水終了後の砂の骨格間隙比と垂直圧の関係

図-13は、各配合率のベントナイトの混合材において、浸水終了後の砂の骨格間隙比 e_s と垂直圧 p との関係を示すものである。図中の B と S はそれぞれベントナイトと砂を意味する。同図には、図-9 に示したプロット (30%, 20%, 17%, 10%) と 50% の混合材の浸水試験結果を砂の骨格間隙比 e_s で整理して示した。また、同図中の配合率ごとに示した線は式 (15) に基づいて計算した。

式 (8) は図-7 あるいは図-9 に示した唯一的な直線関係を示すが、これを砂の骨格間隙比で整理すると、各配合率の混合材において、浸水終了後の砂の骨格間隙比 e_s と垂直圧 p との関係を示す式 (15) になる。式 (15) において、 A は配合率 α とベントナイト中のモンモリロナイト含有率 β により定まるパラメーターであり、同じ配合率では定数である (式 (13) 参照)。 B はベントナイト中のモンモリロナイト含有率 β だけに関係するパラメーターであり配合率 α とは関係ない (式 (14) 参照)。そして a と b は図-7 に示した両対数座標上での直線関係の近似式より $a=0.67$, $b=-0.43$ となる。したがって、式 (15) は、図-7 の直線関係が成立する場合、各配合率の混合材において、浸水終了後に成立すべき砂の骨格間隙比 e_s と垂直圧 p の関係 (図-13 中の各線) を示す。

図-13 より、同じ配合率の混合材において、小さい垂直圧の範囲では $\log e_s \sim \log p$ 関係がほぼ各線上にのるが、垂直圧が大きくなると各線より外れるのが見られる。また、配合率が大きくなると外れる時の垂直圧 p も大きくなることが見られる。つまり、図-9 で示された現象が図-13 よりも再現されている。ただし、図-13 では各線から外れた時の砂の骨格間隙比が $e_{max}(=1.0)$ より小さいことが見られる。このことは、混合材の中で砂粒子の密度が、砂粒子の接触し始める時の密度 (砂の最大間隙比 e_{max} の時) よりも大きいので、砂粒子の接触が生じたことを示す。

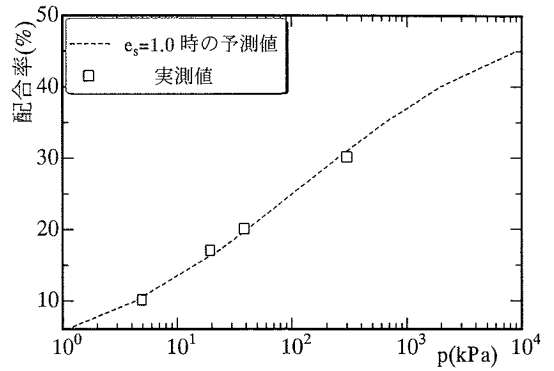


図-14 低配合率の混合材において砂の骨格が形成し始める垂直圧

また、図-13 より、30%, 20%, 17%, 10% の混合材のプロットは、砂の骨格間隙比 e_s が約 1.0 になるところから各線より外れるので、砂の骨格間隙比がこの値になると砂の骨格を形成し始めると考えられる。したがって、各配合率の混合材において式 (15) の適用範囲は砂の骨格間隙比がその砂の最大間隙比 e_{max} より大きい時であることがわかった。

同図中の 50% の混合材においては、示した応力範囲内ではこのような現象が見られない。これは 50% の混合材においては、この応力範囲内で砂粒子の骨格を形成していないことを示している。

図-14 は、各種配合率の混合材が図-9 に示した唯一の $\log e_m \sim \log p$ の直線関係から外れ始める時の垂直圧を示す。予測値 (破線) は式 (16) に基づいて計算した。この場合、式 (16) において、 $e_{max}=1.0$ であり、 β は定数であるため、この式は垂直圧 p と配合率 α の関数になる。同図より、予測値が実測値をよく説明している。

また、混合材において、砂粒子が接触し始める時のモンモリロナイト間隙比 e_m が負にはならない (間隙体積が負にならない) という条件より、次の 2 式が成り立つ。

$$e_s = e_{max} = 1.0 \quad (17)$$

$$e_m \geq 0 \quad (18)$$

これらの式を式 (12) に代入すると、次の関係式が得られる。

$$1.0A + B \geq 0 \quad (19)$$

式 (13) と式 (14) を式 (19) に代入し、表-1 に示したパラメーターを用いて解くと、式 (20) が得られる。

$$\alpha \leq 51.1\% \quad (20)$$

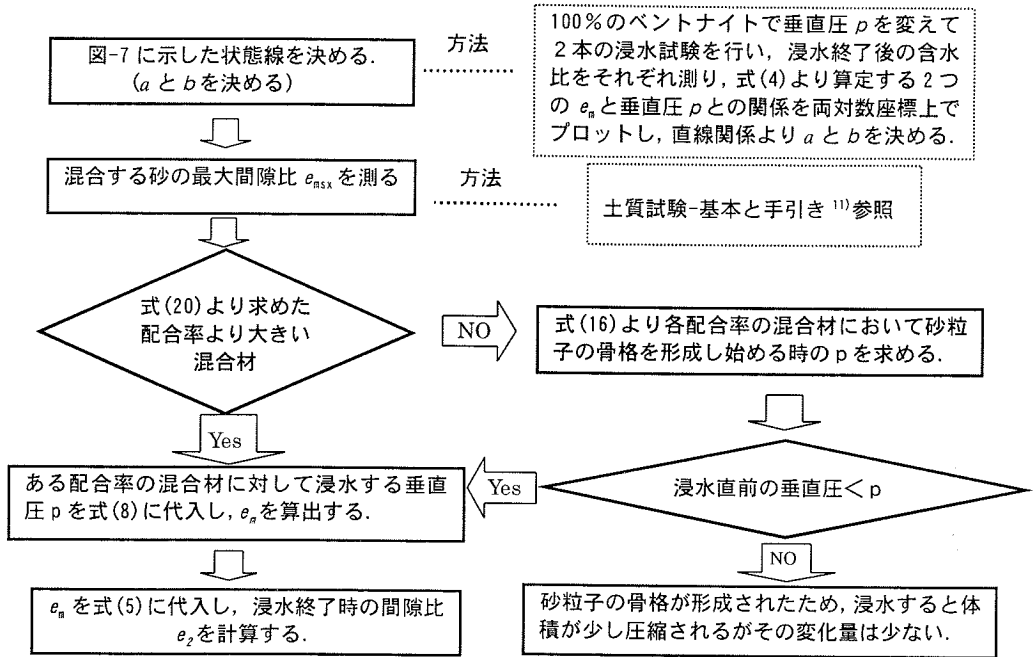


図-15 浸水終了後の間隙比を予測する流れ

つまり、ベントナイトと豊浦砂の混合材において、配合率 α が 51.1% を超えると砂粒子の接触が起こらないこと、あるいは 51.1% を超える混合材においては図-7 に示した唯一的な $\log e_m \sim \log p$ 関係がすべての垂直圧の範囲内で成り立つことを意味する。図-13 より、50% の混合材 (B : S=50 : 50) においては、示した応力範囲内で砂の骨格間隙比が 1.0 以上になっているのが見られ、上述の考え方が正しいことが検証された。

以上の考察より、ベントナイトと砂との混合材の浸水終了後の間隙比の予測方法のフローチャートを図-15 に示す。

5. まとめ

本研究より得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 締固めたベントナイトと砂との混合材は浸水されると、密度、含水比および浸水直前の垂直圧によって膨潤あるいはコラプス挙動を示す。
- (2) 同じ配合率の混合材 (配合率が約 51% を超える混合材) においては、浸水により膨潤してもコラプスしても浸水終了後の間隙比と垂直圧は一本の $\log e \sim \log p$ 直線上で整理される。
- (3) ベントナイトの浸水膨潤は、主にモンモリロナイ

トの吸水によるものであるため、浸水終了後のモンモリロナイト間隙比 e_m と垂直圧 p との関係が配合率に関係なく両対数座標上で唯一的な直線関係に整理される。この線はモンモリロナイトの最大の保水能力 (純水の場合) と垂直圧の関係 (あるいはモンモリロナイトの保水能力と膨潤圧の関係) を示す状態線である。

- (4) 浸水直前の状態が状態線の下方に位置している場合は、浸水されると配合率に関係なく、この状態線まで膨潤する。一方、この状態線の上方より浸水されると状態線までコラプス沈下する。ただし、低配合率の混合材の場合は砂粒子の骨格が形成されるため、状態線まで体積圧縮することができなくなり、モンモリロナイト間隙比と垂直圧の関係が状態線より上方に位置する。
- (5) 浸水直前の状態が状態線の上方に位置する場合には 2 つのケースがある。① 初期含水比の低い試料を用いて締固めて圧縮した場合である。この場合、サクションが大きいので不飽和状態で不安定な構造を形成する。② 低配合率の混合材において、砂粒子が多いため、不飽和状態で圧縮すると砂粒子の間で接触し、固い砂の骨格を形成する場合である。
- (6) 低配合率の混合材は、図-7 に示した状態線の右側まで不飽和状態で圧縮されて浸水すると、膨潤

- することなく状態線まで収縮する傾向を示すが、砂粒子の形成した骨格は収縮を阻害するため、収縮量が小さくなる。また、この時ベントナイトは膨潤により、砂粒子の間を充填するため、水の経路の形成を阻害できる。そして、形成した砂の骨格はせん断強度の増加にも寄与すると思われる。したがって、低配合率の混合材はいい遮水材となりうる。
- (7) 砂の骨格間隙比がその砂の最大間隙比に近い値になると砂粒子の骨格が形成される。
 - (8) 低配合率の混合材において、図-7 に示した状態線を利用して浸水変形量を予測するには垂直圧の適用範囲が存在する。本研究では砂の骨格間隙比という概念を引用して、この適用範囲の定める方法を提案・検証した。
 - (9) 配合率が約 51%を超えるベントナイトと豊浦砂の混合材においては砂粒子の骨格が形成されない。したがって、浸水終了後のモンモリロナイト間隙比と外部垂直圧との間の唯一的な直線関係はすべての垂直圧において成立する。

本研究はベントナイトと砂との混合材の一次元的な浸水試験より得られた成果であるが、実際の問題では 3 次元的に浸水変形するケースが多いと考えられる。今後は横方向も膨潤できる試験装置を用いて、異なる応力状態での浸水変形特性を解明する予定である。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分技術的信頼性、-地層処分研究開発第 2 次取りまとめ-分冊 2、地層処分の工学技術、1999。
- 2) 小峯秀雄、緒方信英：ベントナイト緩衝材・埋め戻し材の透水特性と簡易評価法の提案、土木学会論文集、No.

- 708/III-59, pp.133-144, 2002.
- 3) Komine, H. and Ogata, N.: Experimental study on swelling characteristics of sand-bentonite mixture for nuclear waste disposal, *Soils and Foundations*, Vol.39, No.2, pp.83-97, 1999.
- 4) Mollins, L. H., Stewart, D. I. and Cousens, T. W.: Predicting the properties of Bentonite-sand mixtures, *Clay Minerals* Vol.31, pp.243-252, 1996.
- 5) Yong, R. N. and Warkentin, B. P.: 土質工学の基礎, 山崎不二夫, 山田豊聡監訳, 鹿島出版社, 1972.
- 6) 近藤三二: おはなしベントナイト, (株)豊順洋行, 1994.
- 7) Barden, L., McGown, A. and Collins, K.: The collapse mechanism in partly saturated soil, *Engrg. Geol.*7, pp.49-60, 1973.
- 8) Mitchell, J. K.: Fabric, structure, and proterty relationships, *Fundamentals of Soil Behavior*, John Wiley and Sons, New York, pp.222-252, 1976.
- 9) Fredlund, D. G.: Comparison of soil suction and one-dimensional consolidation characteristics of a highly plastic clay, *Nat. Res. Council Tech. Report No.245*, Division. of Building Res., Ottawa, Ont., Canada, pp. 26, 1964.
- 10) Xu, Y. F., Sun, D. A., Matsuoka, H. and Cui, H. B.: Swelling characteristics of sand-bentonite mixture due to sucking of water, 第 36 回地盤工学研究発表会講演集, pp.221-222, 2001.
- 11) 孫 徳安, 松岡 元, 成瀬浩之, 内田光彦: 密度と配合割合の異なる砂と粘土の混合土の変形・強度特性, 第 33 回地盤工学研究発表会講演集, pp.687-688, 1998.
- 12) 社団法人地盤工学会: 土質試験-基本と手引き-, pp.60, 2001.

(2003. 7. 23 受付)

SWELLING CHARACTERISTICS OF SAND-BENTONITE MIXTURES UNDER ONE-DIMENSIONAL STRESS

Hongbin CUI, De'an SUN, Hajime MATSUOKA and Yongfu XU

Based on the concept that the maximum water volume absorbed by unit volume of montmorillonite is constant, the swelling deformation of sand-bentonite mixtures is uniquely characterized using the void ratio of montmorillonite, which is defined by the ratio of water volume to montmorillonite volume. The relationship between the montmorillonite void ratio and overburden pressure at fully swelling is independent of the initial compaction condition and the sand-bentonite mixture ratio, and is a linear line in their log scale. When overburden pressure is large enough and/or the bentonite ratio of the mixture is small, the measured plots deviate from the line. A method for predicting the limited overburden pressure which is linearly correlated with the montmorillonite void ratio is proposed and verified using the concept of the skeleton void ratio.