

# 不飽和土の水浸後の圧縮曲線に与える締固めの影響について

加藤 正司<sup>1</sup>・榊原 辰雄<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 神戸大学大学院准教授 工学研究科 市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)  
E-mail:skato@kobe-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 伊藤忠テクノソリューションズ (〒541-0051 大阪市中央区久太郎町4-1-3)  
E-mail:tatsuo.sakakibara@ctc-g.co.jp

水浸後の圧縮曲線は不飽和土の基本的な特性の一つであり、現在提案されている不飽和土の構成モデルや状態面の概念において重要な役割を果たしている。この水浸後の圧縮曲線に与える締固めの影響について、締固めたシルト質土供試体を用いて、標準圧密試験装置により水浸後の圧縮試験(水浸圧縮試験)を行い検討した。得られた水浸後の圧縮曲線は、スラリー状態から圧縮して得られる圧縮曲線とは異なる傾向を示した。また、水浸後の圧縮曲線に対して、供試体作製時の締固め回数が影響する可能性があることがわかった。この結果は、水浸後にサクシオンが消失しても、圧縮曲線には締固めにより形成された土骨格構造の影響が残る場合があることを示している。

**Key Words :** *unsaturated soil, soaking, compression curve, compression index, swelling index*

## 1. はじめに

水浸時に生じる体積圧縮現象(以後、コラプスと呼ぶ)は、不飽和土に特有な現象である。この現象は、土粒子間に作用しているサクシオンによる粒子間付着力が水浸により消失し、土骨格剛性が減少することにより生じている。

不飽和土の研究はコラプスと深く関わりを持っている。不飽和土の有効応力式として提案された Bishop の有効応力式<sup>1)</sup>は Jennings & Burland<sup>2)</sup> によってコラプスを説明できないとの批判を受けた。以後の不飽和土の研究は Bishop の有効応力式とコラプスの関係をめぐる議論がその中心となっていたと見ることができる。

それらの研究の中で Coleman<sup>3)</sup> は、サクシオンを独立した応力変数として扱う考え方を提案した。この考え方に基づいて、不飽和土の強度および変形特性に関する研究が進められた。そして、強度に関しては Bishop の有効応力式をモール・クーロンの破壊規準に取り入れたせん断強度式が提案され<sup>4)</sup>、また、コラプスを含めた圧縮変形に関しては状態面の概念が適用できるなどの報告<sup>5),6)</sup> がなされている。現在ではこれらの成果を取り入れた構成モデルが幾つか提案されており<sup>7),8),9)</sup>、それらを用いた現場の挙動予測シミュレーションが行われている<sup>10)</sup>。

不飽和土の構成モデルに関しては、Alonso らに代表されるサクシオン、あるいはサクシオンに対応した応力パラメーターに基づき表現されたモデル<sup>7),9)</sup> や、向後ら<sup>8)</sup> に代表される、不飽和土の有効応力に基づき表現されたモデルが発表されており、それらのモデルに基づいた解析が現在行われている。それらの理論では水浸後の圧縮曲線がモデルの構築において重要なパラメーターとなっている。しかし、不飽和土の水浸後の圧縮曲線に関しては、現在まで整理されたデータが少なく未解明な点が多い。例えば、水浸後の圧縮曲線が、同じ試料をスラリー状態から圧縮したときに得られる圧縮曲線とどの様に対応するのかについては、実験的にも十分確認されていないのが現状である。そこで本研究では、締固め回数を変えて作製したシルト質土供試体を用いて水浸圧縮試験を行い、これらの点に関して実験的検討を加えた。

## 2. 水浸時のコラプスと不飽和土の変形に関する構成モデル

### (1) 水浸時のコラプスと状態面

図-1 は、締固めた土を用いて水浸試験を行ったときに得られる、間隙比 $e$ ～上載圧 $\sigma_v$ 関係の概念図を示して

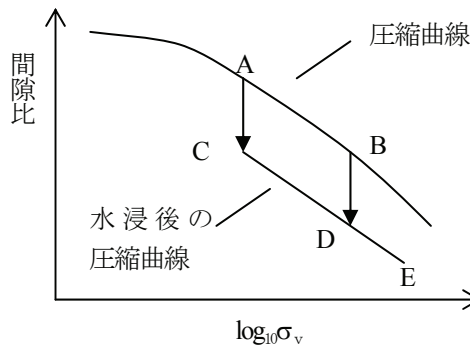


図-1 水浸時の体積圧縮特性の概念図

いる。図に示すように、締固めた土の圧縮曲線は上載圧に対して曲線的な形状になり、正規圧密状態を示す直線部分は応力が高くなって明確に現れない場合が多い<sup>11)</sup>。このような締固め土を用いて、A点の応力状態で試料を水浸させるとコラプスが体積圧縮が生じる。その後、上載圧を増加して圧縮する場合、A→C→D→Eのような間隙比変化を示し、水浸後の圧縮時にはC→Eに示されるような体積変化挙動を示す。さらに同じ土を、A点より大きな上載圧を作用させたB点の応力状態から水浸させた場合、水浸時にコラプスが生じる。その後圧縮すると、間隙比変化はB→D→Eようになる。この時、A点から水浸後に圧縮させた場合(A→C→D)と、A点から圧縮後に水浸させた場合(A→B→D)とでは、A→D間に生じる間隙比変化量はほぼ等しくなる<sup>12)</sup>。締固め土を水浸した場合、以上に述べた体積変化挙動を示すものと考えられている。

コラプスに関する研究では、供試体に与えるサクシオンを制御しない形式の一次元圧密試験装置を用いた水浸試験<sup>2)</sup>が主流をなしていた。一方Bardenら<sup>12)</sup>は、供試体に与えるサクシオンを制御できる一次元圧縮試験装置により水浸過程を含む応力経路による圧縮試験を行い、コラプス時の体積ひずみが応力経路に依存せず発生することを示した。また、コラプス時の圧縮量と応力状態や水分量との関係を明らかにするため、三軸圧縮試験装置を用いた水浸試験<sup>5), 13), 14), 15)</sup>も行われている。

異なる応力下における不飽和土の三軸圧縮試験装置を用いた水浸試験結果から、Matyas & Radhakrishna<sup>5)</sup>は、間隙比～サクシオン～側方基底応力空間において、図-2に示すように一つの状態面が形成されることを報告している(側方基底応力は最小主応力 $\sigma_3$ と間隙空気圧 $u_a$ により $\sigma_3 - u_a$ と定義される)。Fredlund & Morgenstem<sup>6)</sup>は不飽和土の三軸圧縮試験におけるストレスプローブ試験結果に基づきこの考え方をさらに発展させ、間隙比のみならず飽和度および含水比に対してもこのような状態面(構成面)が存在するという考え方を提案した(図-3(a)は、間隙比に関する構成面を示している)。その考え方の中

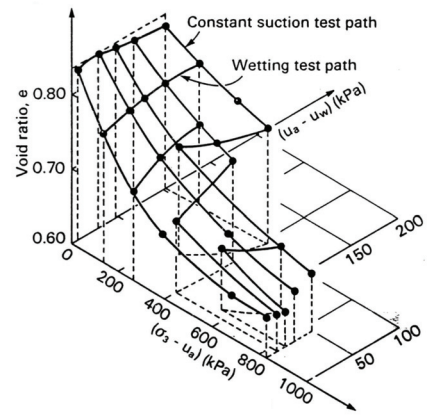
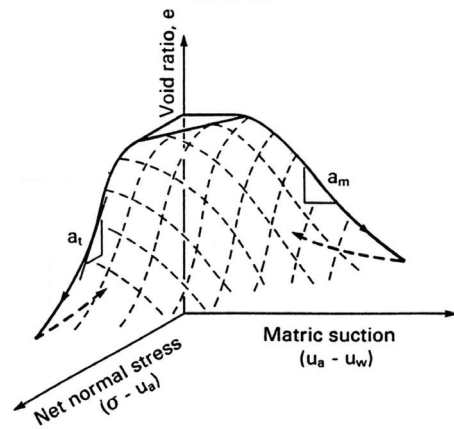
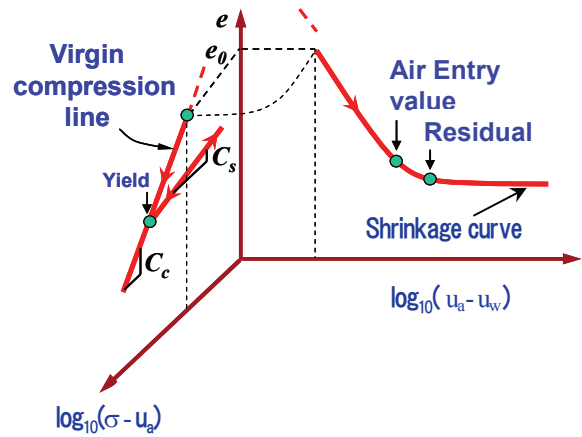


図-2 Matyas & Radhakrishnaによる状態面<sup>5)</sup>



(a) 間隙比の構成面

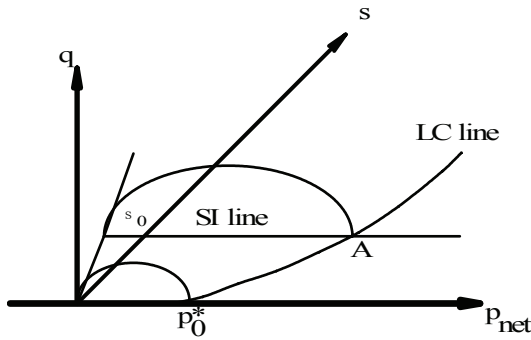


(b) 構成面中の処女圧縮曲線と収縮曲線

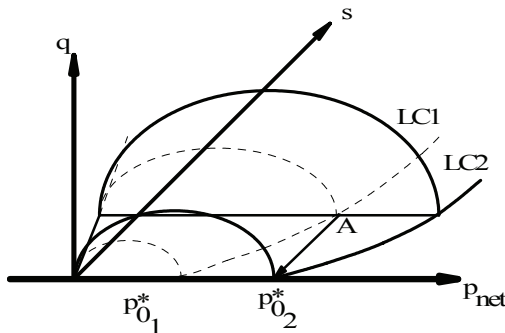
図-3 Fredlund & Morgenstem<sup>6)</sup>による間隙比の構成面

で彼らは、間隙比の構成面に関しては、サクシオンがゼロの面においては構成面は処女圧縮曲線となり、基底応力がゼロの面において構成面は収縮曲線に対応するものとしている(図-3(b))。この「処女圧縮曲線」についてはスラリー状態からの圧縮曲線を示しているものと考えられる。すなわち、水浸過程により土の状態は状態面上を移動してサクシオンがゼロの面へと到達し、その後、

$$f_2 = s - s_0 = 0 \tag{2}$$



(a)  $p_{net} \sim q \sim s$ 空間における降伏曲面



(b) 等方応力条件下の水浸過程における降伏曲面の拡大

図-4 Alonso et al.<sup>7)</sup>による降伏曲面

処女圧縮曲線に沿って圧縮する。このような考え方は、次のように説明される。水浸により飽和度が上昇することによってサクシオンが消失するため、サクシオンによる粒子間付着力も消失する。この結果、粒子間付着力により与えられていた土骨格の剛性もサクシオンの寄与分だけ低下し、その結果、スラリーから圧縮した状態と同じになるとするものである。このような考え方は、後掲図-5 に示すような実験結果には対応している。しかし、本論文で示すような、構造が発達した土の場合は、説明できない場合があるものと考えられる。

(2) 不飽和土の変形に関する構成モデルにおける水浸後の圧縮曲線の役割

これらの研究成果に基づき、近年ではコラプスを含めた変形挙動を説明できる構成モデルがいくつか提案されている。ここでは、その代表として、Alonso らによる構成モデル<sup>7)</sup>の概要、ならびに飽和状態における圧縮曲線の傾きがモデルの中で重要なパラメーターとなっていることについて述べる。

Alonso らによる構成モデルでは、土の弾塑性状態を規定する降伏曲面が、次の2つの式で与えられている。

$$f_1 = q^2 - M^2(p_{net} + p_{su})(p_0 - p) \tag{1}$$

ここに、 $q = \sigma_1 - \sigma_3$  : せん断応力,  
 $p_{net} = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3 - u_a$  : 平均基底応力,  
 $s = u_a - u_w$ ,  
 $\sigma_1, \sigma_3$  : 最大および最小主応力,  
 $u_a, u_w$  : 間隙空気圧および間隙水圧,  
 $M = q/p_{net}$  : 限界状態における応力比,  
 $p_{su} : p_{net} \sim q$  応力面上における限界状態線の  $p_{net}$  軸切片,  
 $p_0$  : 飽和状態での先行圧縮応力,  
 $s_0$  : 不飽和状態での先行サクシオン.

関数  $f_1$  はサクシオン一定面上の降伏線を規定する。また、関数  $f_2$  は SI ラインと呼ばれている (図-4(a))。なお、式(1)中の  $p_{su}$  および  $p_0$  は次式で与えられる。

$$p_{su} = k \cdot s \tag{3}$$

$$\frac{p_0}{p^c} = \left( \frac{p_0^*}{p^c} \right)^{\frac{\lambda(0) - \kappa}{\lambda(s) - \kappa}} \tag{4}$$

ここに、 $k$  : サクシオン増加に伴う粘着力増加を与える定数,

$p^c$  : サクシオン一定条件下での圧縮変形に関する基準応力,

$p_0^*$  : 飽和状態における先行圧縮応力,

$\lambda(0)$  : 飽和状態における圧縮指数,

$\lambda(s)$  : サクシオン一定条件下における圧縮指数,

$\kappa$  : 膨潤指数.

なお、 $\lambda(s)$  は次式で与えられる。

$$\lambda(s) = \lambda(0) [(1-r) \exp(-\beta s) + r] \tag{5}$$

ここに、 $r$  : 最大の圧縮剛性を規定する定数,

$\beta$  : サクシオン増加による圧縮指数の増加を支配する定数.

式(4)は LC ライン (LC line) と呼ばれ、 $s \sim p_{net}$  面上での降伏線を表す (図-4(a))。  $p_{net} \sim q \sim s$  空間において規定される弾塑性状態での応力経路に対して、式(1), (2) および式(4)で規定される降伏曲面は拡大し、それに伴う塑性ひずみ増分は非関連流れ則に従い算出される。例えば、図-4(b)は  $s \sim p_{net}$  応力面上の A 点からサクシオンを減少した場合に降伏曲面の拡大する様子を示している。このモデルにおいては式(4)および式(5)に示されている

ように、飽和状態の処女圧縮曲線の傾き  $\lambda(0)$  が理論上重要なパラメーターの一つであると考えられる。

### 3. 過去の試験結果における水浸後の圧縮曲線の傾向

図-5 は、Jennings & Burland<sup>9)</sup> により一次元圧密試験機を用いて行われたシルトの水浸試験結果を示している。凡例にある Air dried 供試体は、含水比 35% でほぼ液性限界にあるスラリー状態の試料を空気乾燥して作製したものである。また、Soaked 供試体は、Air dried 供試体を上載圧約 10 kPa のもとで水浸して圧縮した供試体であり、Slurry 供試体と異なる圧縮曲線を示していることがわかる。なお、Soaked 供試体と Slurry 供試体の圧縮曲線は、上載圧が 500 kPa を超える領域ではほぼ一致する傾向を示している。

図-6(a), (b), (c) は、市販の粉末粘土（名称：No.5 クレー）の締め固め供試体を用いて、三軸圧縮試験装置により行った等方応力条件下における水浸および水浸圧縮試験結果<sup>10)</sup> を示したものである。実験は図-6(a) に示した  $s \sim p_{net}$  面上の応力経路で行われた。初期応力点である A 点からサクシオン増加後、サクシオン一定で平均基底応力を増加し、その後平均基底応力一定条件でサクシオンを減少する水浸試験と、A 点からサクシオン減少してその後圧縮過程を行う水浸圧縮試験が行われた。図-6(b), (c) は、2 種類の試験の間隙比と飽和度を比較したものである。図-6(c) に示されているように、図中の白抜きのプロットで示されている初期水浸供試体は、水浸されたにもかかわらず圧縮中の飽和度は 90~95% 程度である。さらに、図-6(b) に示されているように、図中の黒いプロットで示されている圧縮後に水浸を行った供試体は、水浸後に同じ応力点（点  $D_0, D_1, D_2$ ）において初期水浸供試体とほぼ同じ間隙比と飽和度を示している。

図-7 は、空気乾燥した状態で保存した市販の粉末粘土（No.5 クレー）試料を用いた標準圧密試験結果<sup>11)</sup> と図-6(b) の結果を比較したものである。この図では標準圧密試験結果に対して静止土圧係数  $K_0$  を 0.5 と仮定して平均主応力を求めて比較を行っている。なお、この標準圧密試験では、試料を圧密容器内に空中落下させて供試体を作製し、その後所定の上載圧が与えられた。この標準圧密試験結果は、図-5 の結果と同様に、△印のプロットで示される水浸後の圧縮曲線とかなり傾向が異なっていることがわかる。空気乾燥状態での試料とスラリー状態の試料の圧縮曲線が一致するかどうかについては明らかではないが、両者がほぼ近いものであるとすると、圧縮曲線が水浸後のものとはかなり異なっていることが

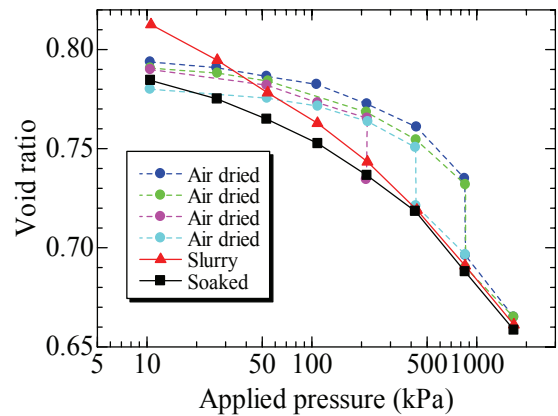
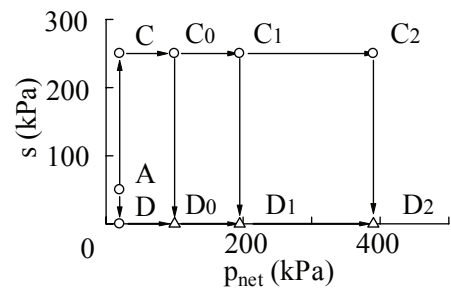
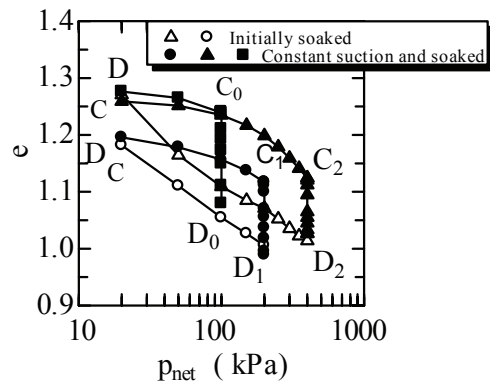


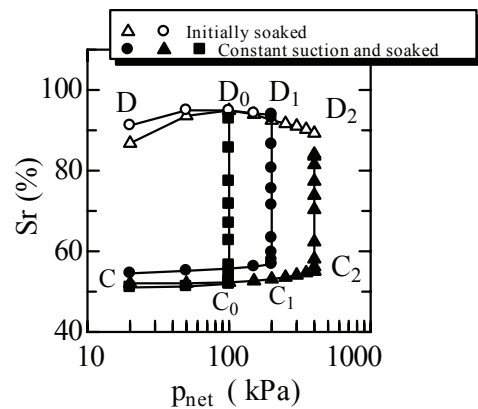
図-5 シルトの水浸試験 (Jennings & Burland<sup>9)</sup>)



(a)  $s \sim p_{net}$  応力面上での応力経路



(b) 水浸試験時の間隙比挙動



(c) 水浸試験時の飽和度変化

図-6 三軸圧縮試験装置による等方圧縮条件での水浸試験結果<sup>13)</sup>

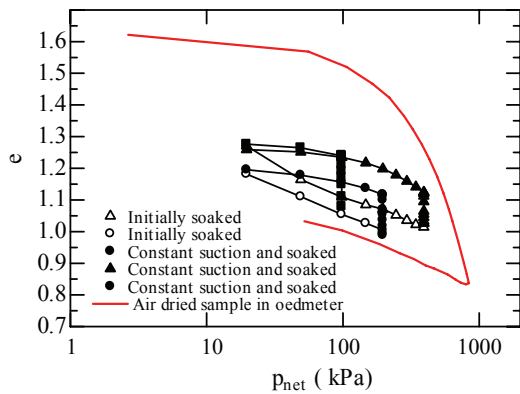


図-7 市販の粉末粘土を用いた締固め供試体の等方圧縮水浸試験結果と乾燥試料の圧縮試験結果の比較

推測される。なお、図-7 の載荷応力の高い領域においては、水浸後の圧縮曲線と乾燥状態の試料の圧縮曲線が一致する傾向を示すかどうかは明らかではない。

さらに、Wheeler & Sivakumar<sup>16)</sup> は、締固めたカオリン供試体を用いて三軸圧縮試験を行い、水浸試料の圧縮曲線とスラリー状態の試料から得られた圧縮曲線が異なる結果を示している。その論文の中で彼らは、このような違いが生じるのは供試体中の土骨格構造の影響によるものであると推測している。

以上の結果を見ると、水浸後試料の圧縮曲線と、スラリー状態の試料 (No.5 クレーの場合は空気乾燥状態の試料) から得られた圧縮曲線では、土構造の違いにより圧縮曲線が異なる傾向を示している。2. (1)節では、水浸によるサクシンの消失により、土骨格剛性が完全に消失してスラリー状態と同じになるという説明を行っているが、これらの結果は、土骨格剛性の影響が水浸後も現れていることを示している。本論文では、このような傾向を考慮して、締固め回数が異なる供試体を用いて水浸試験を行い、水浸による構造の消失過程に与える締固めの影響について検討を行っている。

#### 4. 標準圧密試験装置による締固めたシルト質土の水浸圧縮試験

##### (1) 実験試料

試料は非塑性で土粒子密度  $\rho_s = 2.65 \text{ g/cm}^3$  のシルト質土 (DL クレー) である。試料の粒径加積曲線を図-8 に示す。目標含水比に調整した試料を 2.5 kg ランマーと 10 cm モールドを用いて締固めた。締固めは 3 層に分けて行い、各層 25 回および 50 回の締固め回数により締固め、円柱形のブロックサンプルを作製した。締固め回数 25 回および 50 回の締固め試験結果を、図-9(a), (b)にそれぞれ示している。図中のプロットの傾向から、25 回およ

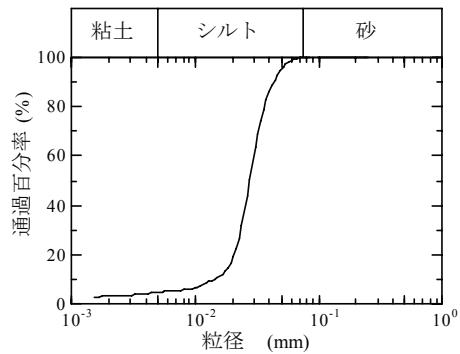
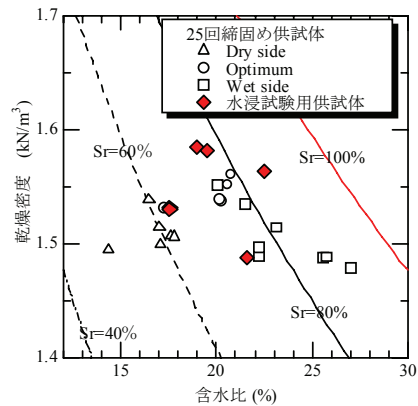
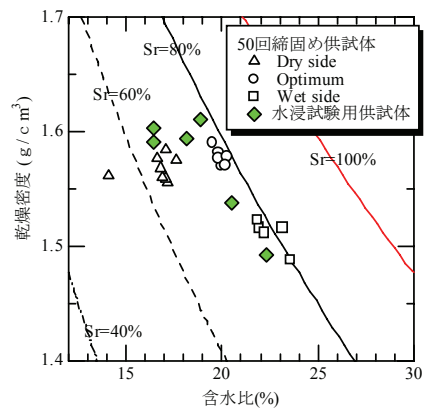


図-8 用いた非塑性シルト質土の粒径加積曲線



(a) 25 回締固め試験結果



(b) 50 回締固め試験結果

図-9 25 回及び 50 回締固め試験結果

び 50 回の締固めにおける最適含水比は 19~20%程度と推測される。この結果に基づき、最適含水比に対して乾燥側、最適含水比付近および最適含水比に対して湿潤側である含水比 17%、20%および 22%に締固めた時の試料の含水比を調整してブロックサンプルを作製した。そして、ブロックサンプルの上下 2 箇所から、直径 60 mm、高さ 20 mm の供試体を成形して試験に用いた。表-1 は、供試体の作製条件および諸元を示している。なお、表中の最右列は、水浸後の飽和度を  $S_r=100\%$  とした場合の含水比である。また、圧縮曲線の比較のため、

表-1 供試体作製条件および諸元

供試体作製方法	目標含水比 (%)	供試体 No.	最大上載圧 $\sigma_{v,max}$ (kPa)	初期含水比 $w_0$ (%)	初期間隙比 $e_0$	初期乾燥密度 $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	水浸後の状態		
							間隙比	乾燥密度 $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Sr=100%を仮定した場合の含水比 (%)
25回縮固め	17	1	2509	17.56	0.731	1.531	0.720	1.541	27.17
		2		17.56	0.732	1.530	0.717	1.543	27.06
	20	1	1254	18.96	0.672	1.585	0.646	1.610	24.38
		2		19.52	0.675	1.582	0.629	1.627	23.74
	22	1	1254	21.57	0.783	1.487	0.601	1.655	22.68
		2		22.53	0.695	1.563	0.652	1.604	24.60
50回縮固め	17	1	2509	16.46	0.667	1.590	0.662	1.594	24.98
		2		16.46	0.654	1.602	0.631	1.625	23.81
	20	1	2509	18.87	0.646	1.610	0.641	1.615	24.19
		2		18.17	0.663	1.594	0.656	1.600	24.75
	22	1	2509	22.28	0.776	1.492	0.757	1.508	28.57
		2		20.52	0.723	1.538	0.699	1.560	26.38
スラリー	55	1	2509	55.50	1.321	1.142			
		2		55.50	1.321	1.142			

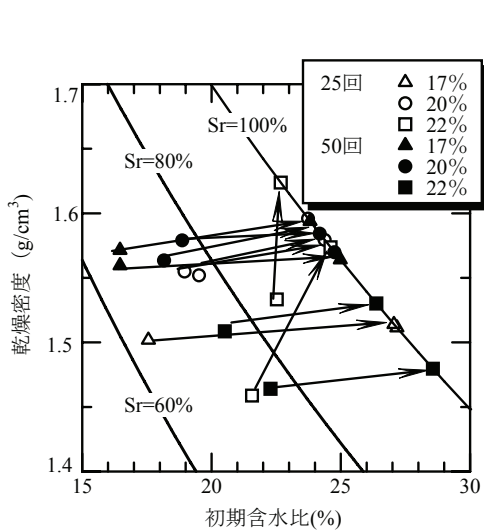


図-10 水浸前後の乾燥密度の変化

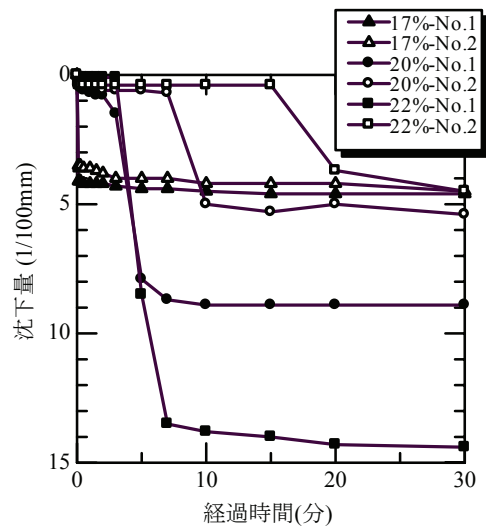


図-11 水浸時の沈下量～時間関係 (25回縮固め供試体)

表-1 に示すように、同じ試料の含水比 55%のスラリー状態からの段階圧密試験<sup>17)</sup>も行った。

2509 kPa) および 9.8 kPa までの除荷過程を行った。

(2) 水浸圧縮試験方法

試験装置には、「土の段階荷重による圧密試験」<sup>17)</sup>に準じた荷重装置と圧密容器を用いた。圧密容器中に試料をセットして荷重装置に設置した後、上載圧 $\sigma_v=20$  kPaを荷重した。この段階の圧縮量が平衡に達したのを確認した後、水浸容器に脱気水を注水して供試体を水浸させた。注水後、水浸中の圧縮量の経時変化を 30 分間測定した。圧縮量が平衡に達したのを確認した後、上載圧 $\sigma_v$ の段階的な荷重過程 (最大上載圧は 1254 kPa または

5. 実験結果及び考察

(1) 水浸過程における挙動

図-10 は、供試体作製時と水浸後の供試体の乾燥密度変化を示したものである。図中の白いプロットは 25 回縮固め供試体の、黒いプロットは 50 回縮固め供試体の結果をそれぞれ示している。□および■印で示される湿潤側の含水比 ( $w=22\%$ ) で締固めた供試体の場合、同じブロックサンプルから切り出したにもかかわらず初期

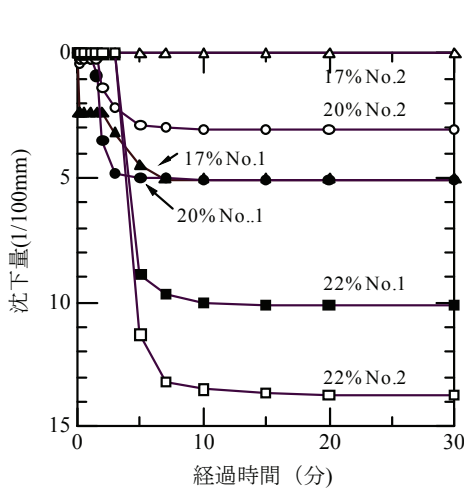


図-12 水浸時の沈下量～時間関係 (50回締固め供試体)

の乾燥密度がかなり異なり、水浸後に□印で示した 25 回締固め供試体の結果では大きく密度増加していることがわかる。その他の含水比で締固めた供試体では、同じブロックサンプルから切り出された供試体の初期乾燥密度は近い値を示し、水浸により生じるコラプスのため乾燥密度が増大しても、水浸後にほぼ同じ乾燥密度を示していることがわかる。

図-11, 12 は水浸時の沈下量～時間関係を、供試体の締固め回数ごとに示したものである。図-11 に示されている 25 回締固め供試体では圧縮量と締固め時の含水比に傾向は見られないが、図-12 に示されている 50 回締固め供試体では、締固め時の含水比が大きくなるほど沈下量が大きくなる傾向を示している。また、同じブロックサンプルから作製した供試体でも、沈下量の大きさが異なる傾向を示しており、そのような違いは 25 回締固め供試体の場合の方が顕著になっている。これらの結果から、締固め時のエネルギーが大きい 50 回締固め供試体では、締固めにより供試体の構造がより安定し、供試体内部での部分的な構造のばらつきが少なくなっているものと考えられる。

(2) 水浸後の圧縮過程および除荷過程における挙動

図-13, 14 は、水浸後の圧縮曲線を締固め回数ごとに示したものである。図-13 の 25 回締固め供試体の結果では、□および■印で示されている含水比 22%の湿潤側で締固められた供試体において、同じブロックサンプルから切り出された供試体でも、水浸時の圧縮量の違いにより圧縮曲線の違いが大きくなっている。図-14 の 50 回締固め供試体の結果においても、△および▲印で示されている含水比 17%で締固められた供試体、および□および■印で示されている含水比 22%で締固められた供試体で、同じような傾向が見られる。

図-15, 16 は、図-13, 14 に示されている圧縮曲線に

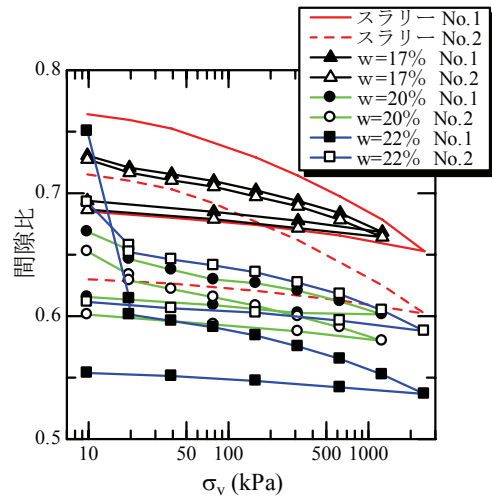


図-13  $e \sim \log \sigma_v$  曲線 (25回締固め)

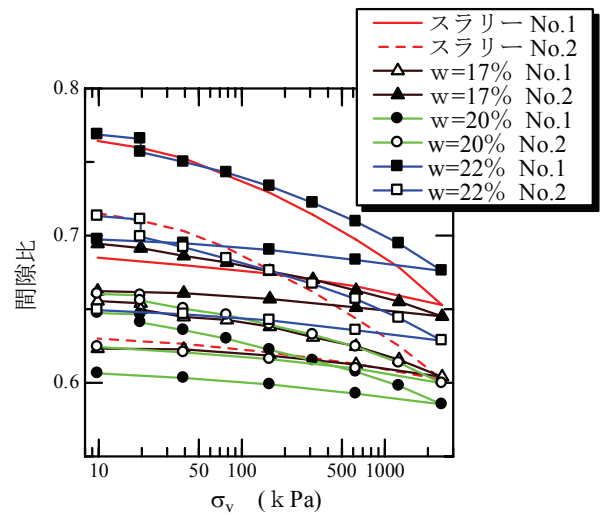


図-14  $e \sim \log \sigma_v$  曲線 (50回締固め)

ついて、スラリー供試体の場合は上載圧 $\sigma_v = 10$  kPaにおける間隙比を基準とし、締固め供試体の場合は上載圧 $\sigma_v = 20$  kPaにおける間隙比を基準とした間隙比変化量を供試体ごとに示したものである。図-15 に示す締固め回数 25 回の場合、水浸後の圧縮曲線の形状に締固め時の含水比の影響が現れておらず、すべての締固め供試体がほぼ同じ圧縮曲線を示していることがわかる。また、上載圧が大きな領域におけるこの圧縮曲線の傾きが、スラリー試料の圧縮曲線の同じ領域における傾きとは異なる傾向を示していることがわかる。一方、締固め回数 50 回の場合、水浸後の圧縮曲線の傾きに締固め時の含水比の影響が現れている。図-15, 16 の結果を比較すると、締固め回数の違いにより、水浸後の圧縮挙動に締固め時の含水比が影響する場合 (図-16) としない場合 (図-15) があることがわかる。また、水浸後の圧縮曲線の傾きは、同じ試料をスラリー状態にして得られる圧縮指数とは異なることがわかる。

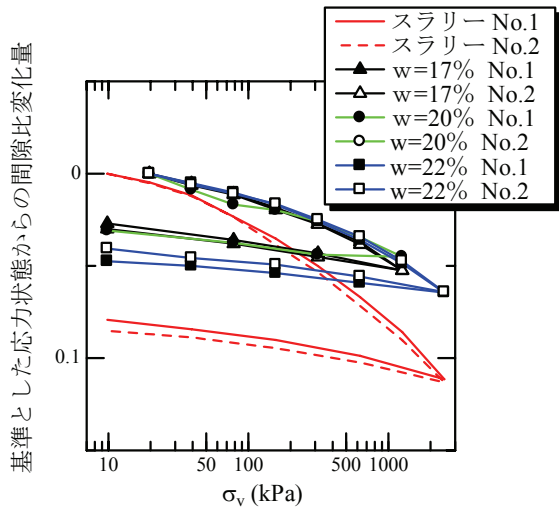


図-15 基準とした応力状態からの間隙比変化量 (25回締固め供試体)

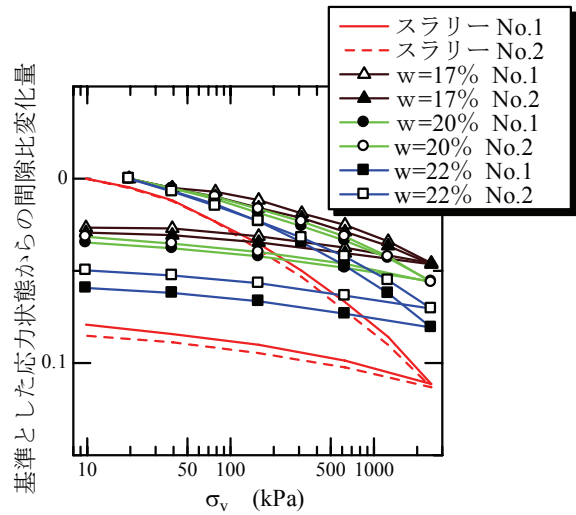
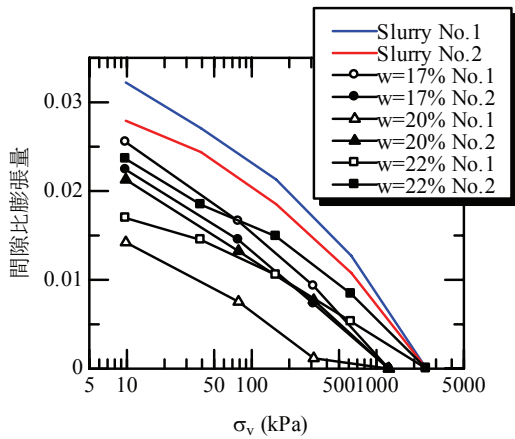
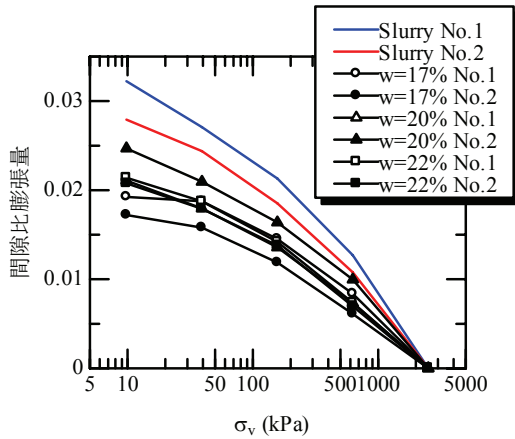


図-16 基準とした応力状態からの間隙比変化量 (50回締固め供試体)



(a) 25回締固め供試体とスラリー供試体



(b) 50回締固め供試体とスラリー供試体

図-17 除荷過程における最大上載荷重状態からの間隙比膨張量の比較

このように水浸後の圧縮曲線に供試体作製時の含水比が影響するという現象は、吸水によるサクシジョンの解放に対して土の構造の強さがどれだけ耐えうるかということが関連しているものと考えられる。すなわち、25回締固めた場合は、土の構造が50回締固めた場合に比べて弱く不安定になっており、このため水浸時のコラプスにより構造が壊れやすく、コラプス後に構造の影響が残らずにユニークな圧縮曲線となったものと考えられる。一方、50回締固めの場合はより安定した構造となっており、水浸時のコラプスによっても構造が壊れにくいため、コラプス後も構造の影響が現れているものと解釈される。このような傾向は、図-11, 12 に示した水浸過程での傾向と対応している。なお、このような土の構造の強さの違いにより水浸後の挙動が異なる現象は、不かく乱沖積粘土の吸水後の一軸試験圧縮試験<sup>18)</sup>においても、吸水過程後の一軸圧縮強度の違いとして観察されている。図-17(a), (b)は、除荷過程について上載圧が最大の状

態での間隙比からの膨張量を、水浸後の締固め供試体とスラリー供試体とで比較したものである。図-17(a)の25回締固め供試体の結果では、締固め時の含水比が高い供試体ほど膨潤曲線の初期の傾きが小さくなる傾向が見られる。図-17(b)の50回締固め供試体の結果では、膨潤曲線の初期の傾きのばらつきは、25回締固め供試体の結果に比べやや小さくなっているようである。さらに、スラリー供試体と締固め供試体を比較すると、図-17(a), (b)の両方の結果において、膨潤曲線の初期の傾きの傾向が異なっていることがわかる。このことは、2種類の供試体の膨潤指数が異なることを意味している。以上を示した結果をまとめると、締固め供試体を水浸後に圧縮して得られる圧縮・膨潤指数が、同じ試料をスラリー状態から圧縮試験して得られるものとは異なる結果となった。2.(2)節で述べたように、不飽和土の変形挙動を予測するための構成モデルにおいて、飽和状態での圧縮指数は重要なパラメーターである。本論文で得られ



た結果は、飽和状態での圧縮・膨潤指数を求める場合に、スラリー状態から試験を行って求めるという、簡単な試験方法から決められない場合があることを意味している。

(3) 構成モデルに用いる水浸後の圧縮曲線の決定方法について

図-5 に示した Jennings & Burland<sup>9)</sup> によるシルトの水浸試験結果では、高い応力域で水浸後の圧縮曲線とスラリーからの圧縮曲線は一致する傾向を示したが、低い応力域においては両者は異なる傾向を示している。この結果は、不飽和土の構成モデルを低い応力領域に適用する時に、飽和状態の圧縮曲線をどのように考えるかという問題を提起する。このことは、降雨時の表層崩壊など、低い応力条件において水浸が生じる場合についてモデルを用いて予測するときの問題となる。構成モデルが現象を表現できればよいという立場であるならば、スラリーからの圧縮曲線を用いるとすることの方が試験は簡単である。そのように取り扱っても、現在の構成モデルで実用的に十分な予測精度が得られるものと考えられる。しかし、不飽和土のコラプス現象の本質を理解する上で、この両者の違いは重要である。

水浸後の圧縮曲線は、厳密な意味で飽和状態となっていない場合がある。例えば、図-6(b)に示した白抜きプロットで示される水浸後の圧縮曲線では、供試体の飽和度は90~95%程度である。また、図-18に示すように、Matyas & Radhakrishna<sup>5)</sup> も同様に水浸後の飽和度が100%となっていない結果を示している。これらの結果においては、水浸後の供試体は完全飽和状態ではなく、いわゆる現場飽和状態<sup>19)</sup> (Field saturation) にあるものと考えられる。これらの結果を考慮すると、Fredlund & Morgenstem<sup>6)</sup> が提案するように、水浸後の圧縮曲線をスラリー状態の圧縮曲線と同じとする考え方は、実際の水浸時に生じる現象と対応しない場合があるものと考えられる。よって、そのようにして得られたパラメーターを用いて挙動予測を行っても妥当な結果は得にくいものと考えられる。図-15, 16の結果から考えると、载荷応力の低い状態で水浸した試料を用いて水浸後の圧縮曲線のパラメーターを決めることが、水浸後に残る土骨格構造の影響も含めた適切な方法であると判断される。

6. 結論

不飽和土の構成モデルの構築において重要な概念であるが、現在まで整理されたデータが少なく、未解明な点が多い水浸後の圧縮曲線について実験的検討を行った。実験では、締固めたシルト質土供試体を用いて水浸圧縮

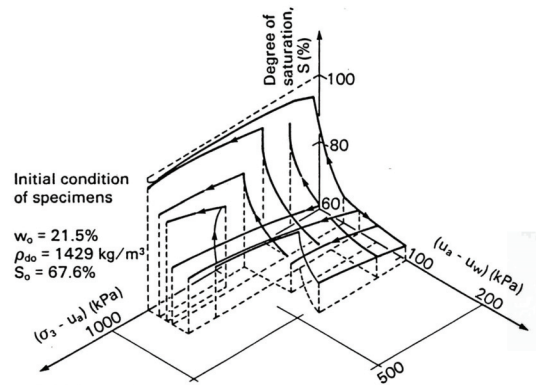


図-18 Matyas & Radhakrishna による飽和度の状態面<sup>5)</sup>

試験を行い、水浸後の圧縮曲線について調べた。得られた実験結果は、以下のようにまとめられる。

- 1) 水浸後の圧縮曲線の圧縮指数は、同じ試料をスラリー状態にして得られる圧縮指数とは異なる傾向を示した。この結果は、過去の試験結果の傾向と同様である。
- 2) 締固め回数の違いにより、水浸後の圧縮挙動に締固め時の含水比が影響する場合としない場合があることがわかった。このことは、水浸後の圧縮曲線の傾きには、水浸前の供試体構造の影響が現れる場合があることを示している。
- 3) 以上の結果は、飽和状態での圧縮指数を求める場合に、スラリー状態から試験を行って求めるという、簡単な試験方法から決められない場合があることを意味している。
- 4) 水浸後の圧縮曲線の除荷過程における膨潤指数についても、締固め供試体とスラリー供試体では異なる傾向を示した。
- 5) 水浸後の圧縮曲線をスラリー状態の圧縮曲線と同じとする考え方は、実際の水浸時に生じる現象と対応しない場合があるものと考えられる。本論文の結果から考えると、構成モデルに必要な場合は、载荷応力が低い状態で水浸させた試料を用いて水浸後の圧縮曲線のパラメーターを決めることが、水浸後に残る土骨格構造の影響も含めた適切な方法であると判断される。

謝辞：常にご指導いただいております神戸大学大学院 澁谷 啓教授に感謝致します。また、本研究におけるデータ計測および解析にご協力いただきました、当時大学院生の寸田 亘君（現京都府）ならびに学部生の平川雄一君（現大成建設株式会社）に深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) Bishop, A.W.: The Principle of Effective Stress, *Teknisk Ukeblad*, Vol.39, pp.859-863, 1959.
- 2) Jennings, J.E. and Burland, J.B.: Limitations to the Use of Effective Stresses in Partly Saturated Soils, *Geotechnique*, Vol.12, No.2, pp.125-144, 1962.
- 3) Coleman, J.D.: Stress/Strain Relations for Partly Saturated Soil, Correspondence, *Geotechnique*, Vol.12, No.4, pp.348-350, 1962.
- 4) Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R. and Widger, R.A.: The Shear Strength of Unsaturated Soils, *Can. Geotech. J.*, Vol.15, No.3, pp.313-321, 1978.
- 5) Matyas, E.L. and Radhakrishna, H.S.: Volume Change Characteristics of Partially Saturated Soils, *Geotechnique*, Vol.18, No.4, pp.432-448, 1968.
- 6) Fredlund, D.G. and Morgenstern, N.R.: Constitutive relations for volume change in unsaturated soils, *Can. Geotech. J.*, Vol.13, No.3, pp.261-276, 1976.
- 7) Alonso, E.E., Gens, A. and Josa, A.: A Constitutive Model for Partially Saturated Soils, *Geotechnique*, Vol.40, No. 3, pp.405-430, 1990.
- 8) Kohgo, Y., Nakano, M. and Miyazaki, T.: Theoretical Aspects of Constitutive Modelling For Unsaturated Soils, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.4, pp.49-63, 1993.
- 9) Kato, S.: A constitutive model for unsaturated soil based on Modified ISMP, *Proceedings of 14th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, pp.691-694, 1997.
- 10) 例えば, 向後雄二: フィルダムの築堤および初期湛水時の応力・変形解析, *ダム工学会第 11 回研究発表会講演集*, pp.4-6, 2000.
- 11) 軽部大蔵, 勝山潤一, 西海健二, 丹羽尚人: 不飽和土の三軸圧縮状態における降伏関数, *土木学会論文集*, No.406 III-11, pp.205-212, 1989.
- 12) Barden, L., Madedor, A.O. and Sides, G.R.: Volume Change Characteristics of Unsaturated Clay, *Proc. ASCE*, Vol.95, SM1, pp.33-51, 1969.
- 13) Lawton, E.C., Frigaszy, R.J. and Hetherington, M.D.: Review of wetting-induced collapse in compacted soil, *J. Geotech. Eng.*, Vol.118, No.9, pp.1376-1394, 1992.
- 14) 加藤正司: 締固めた粘性土の等方応力条件下におけるコラプスとコラプス後のせん断特性, *土木学会論文集*, No.596/III-43, pp.271-281, 1998.
- 15) Kato, S. and Kawai, K.: Deformation characteristics of a compacted clay in collapse under isotropic and triaxial stress state, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.5, pp.75-90, 2000.
- 16) Wheeler, S.J. and Sivakumar, V.: An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil, *Geotechnique*, Vol.43, No. 1, pp.35-53, 1995.
- 17) 地盤工学会編, 土質試験の方法と解説 (第 1 回改訂版), 第 6 編第 3 章土の段階載荷による圧密試験, pp.348-381, 2000.
- 18) 加藤正司, 譽田孝宏, 新海博之: 吸水によるサクシジョンの消失が低拘束圧下の粘土のせん断強度特性に与える影響, *土木学会論文集 C*, Vol. 62, No. 2, pp. 471-487, 2006.
- 19) 地盤工学会編, 不飽和地盤の挙動と評価, p.68, 2005.

(2006. 10. 2 受付)

## EFFECTS OF SOIL STRUCTURE ON COMPRESSION CURVE FOR UNSATURATED SOIL AFTER SOAKING PROCESS

Shoji KATO and Tastuo SAKAKIBARA

Compression curve after inundation represents one of fundamental characteristics for unsaturated soils. Many constitutive models for unsaturated soils contain it as an important parameter. In this paper, we studied the compression curve for compacted silty clay specimen in soaking test with oedmeter test apparatus. From the test results, we found that the compression curve obtained was different from the compression curve for slurry specimen, and that in some case, compaction effort affect on the compression indexes for compacted specimen. These results mean that the compression curve after inundation is essentially different from that for slurry specimen of the same sample.