

# 水浸に伴う不飽和シルトの体積変化挙動

基礎地盤コンサルタンツ(株) 正会員 亀井健史  
同上 正会員 榎本雅夫

## 1. はじめに

不飽和状態の土では、吸水に伴う飽和度の変化によって体積変化が生じる。このような体積変化現象は、砂のような粒状体ではほとんど認められず、細粒分の多い地盤材料において顕著に現れる。一般に不飽和状態の土が吸水すると、飽和度の上昇に伴い体積膨張が生じるが、不安定な構造の土に水が浸透すると急激な沈下を生じることもあり、このような現象は一般にコラプス沈下と呼ばれ、地盤工学上の大きな問題となっている。また、土の膨潤による工学的諸問題の代表例としては、トンネル掘削における地山の張り出し、膨潤による地盤のせん断強さの減少に伴う道路斜面の崩壊、地すべりなどが挙げられ、特に泥岩ではスレーキング現象が地盤工学上大きな問題となっている<sup>1)</sup>。

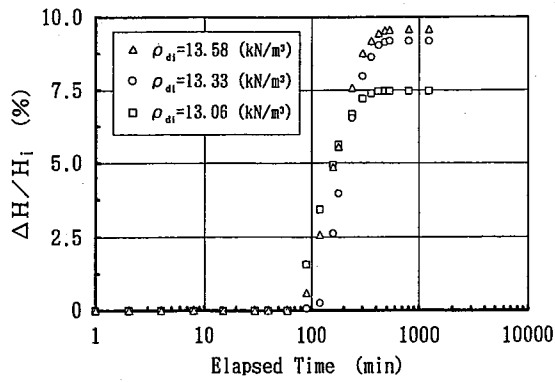
いま粘性土の膨潤特性に着目すると、膨潤は主に電気二重層の発達によって生じており、その特性が土の物理化学的性質にも大きな影響を受けることが明らかになっている。その主要因としては、粒子の表面電荷、比表面積、間隙水のイオン濃度、イオン交換容量、交換性イオンの種類などが挙げられている<sup>1)</sup>。Yong and Warkentin<sup>2)</sup>は、これらの主要因を理論的にモデル化することによって膨潤圧の推定式を提案し、このような挙動が粘土鉱物の種類や土粒子の配列配向によっても支配されることを明らかにしている。Gronko<sup>3)</sup>は、土の膨潤特性に関する現況報告を行っており、膨潤特性に影響を与える主要因として、上記のような土の物理化学的性質のほかに土の乾燥密度、含水比および載荷重を挙げており、土の膨潤特性がその地盤が有している内的条件とその地盤が受けている外的条件によっても大きな影響を受けることを指摘している。

斉藤・箭内<sup>4)</sup>は締固めた土を対象に、締固め含水比や乾燥密度と膨潤量比、膨潤圧の関係を明らかにし、土の膨潤特性が吸水による土の非排水せん断強さの減少に与える影響を検討している。また、最近ではDay<sup>5)</sup>が異なる初期飽和度を有する供試体に対して、任意の載荷重下における土要素の膨潤量比に及ぼす飽和度の影響を明らかにしており、Sikh<sup>6)</sup>は粘性土における膨潤量比と膨潤圧の関係を報告している。しかしながら、従来の研究では、水浸に伴う膨潤を経時的に捉えている報告例は少なく、吸水に伴う飽和度の変化と膨潤量比や膨潤圧の変化傾向との関係に関しては不明な点が多い。

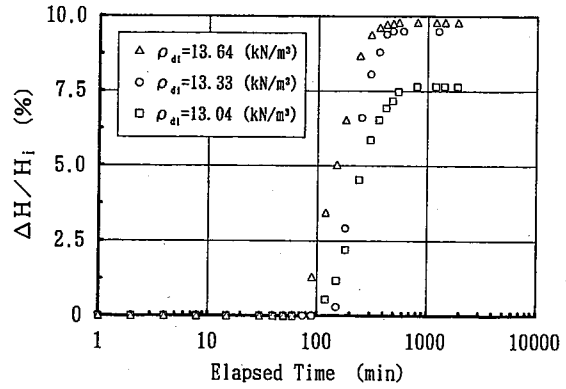
本研究では、土の膨潤挙動と収縮挙動(コラプス沈下)の両面から工学的問題となる材料であるシルト質土を対象に、不飽和土の水浸に伴う膨潤特性を把握することを試みた。具体的には異なる初期飽和度と初期乾燥密度を有する土要素の水浸に伴う膨潤量比および膨潤圧の経時変化を計測することにより、飽和度の変化に伴う膨潤量比と膨潤圧に関する挙動を明らかにし、吸水前の初期飽和度、初期乾燥密度がシルト質土の膨潤特性(膨潤量比・膨潤圧)に与える影響を検討している。

## 2. 試料および試験方法

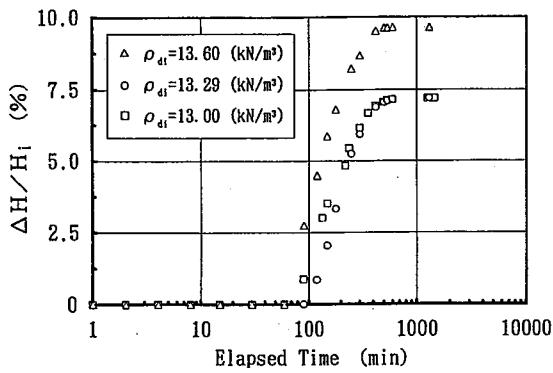
試料としては、主にシルト成分からなる市販のDLクレーを用いた。DLクレーの物理特性は、土粒子密度 $26.50\text{kN/m}^3$ 、液性限界NP、塑性限界NP、砂分0%、シルト分90%、粘土分10%である。また、供試体作成に際しては、より均一な供試体が得られることを考慮し、圧密リング内の試料を定みずみ( $\dot{\epsilon}=1\text{cm/min}$ )条件下で静的に締固めた。本実験では、供試体の内的条件として、初期飽和度 $S_{r,i}=10, 20, 30, 40, 50, 60, 70\%$ と初期乾燥密



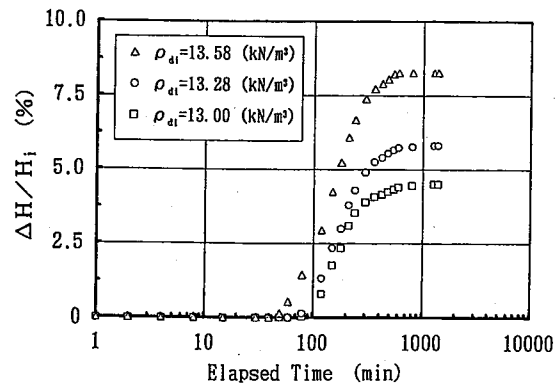
(a)  $S_{ri} = 10\%$



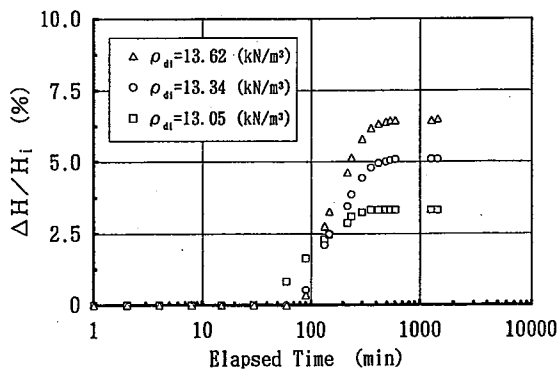
(b)  $S_{ri} = 20\%$



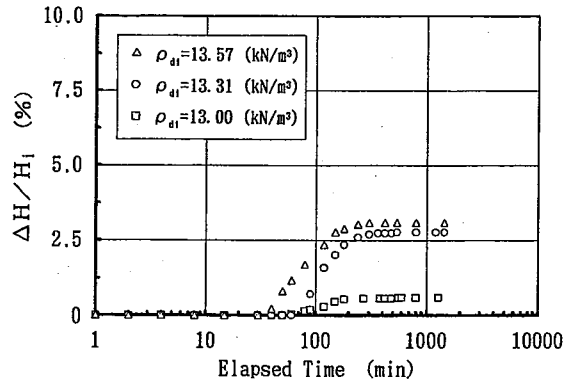
(c)  $S_{ri} = 30\%$



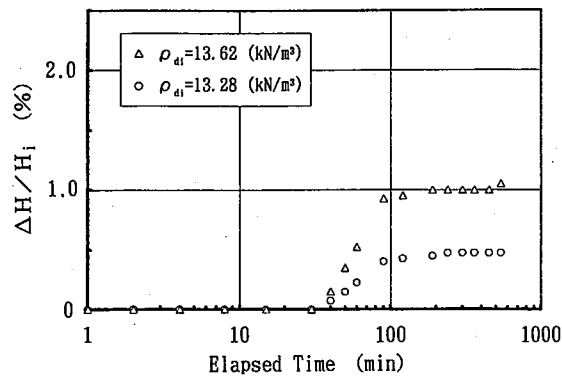
(d)  $S_{ri} = 40\%$



(e)  $S_{ri} = 50\%$

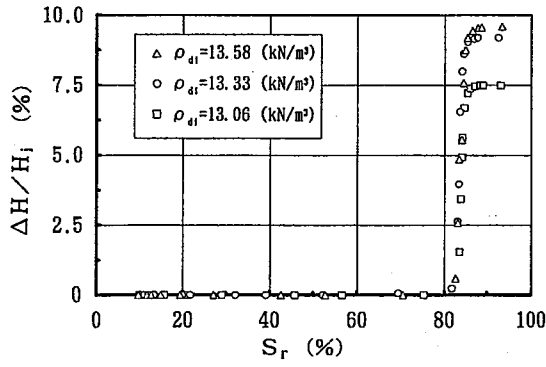


(f)  $S_{ri} = 60\%$

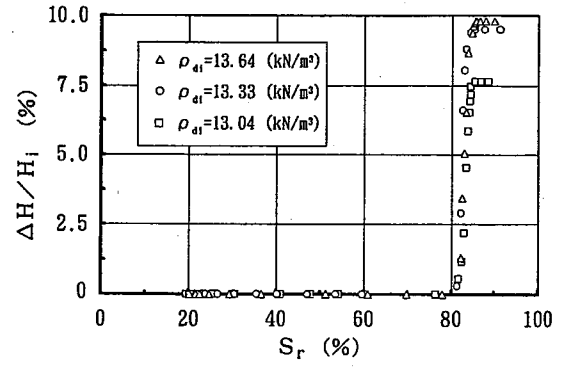


(g)  $S_{ri} = 70\%$

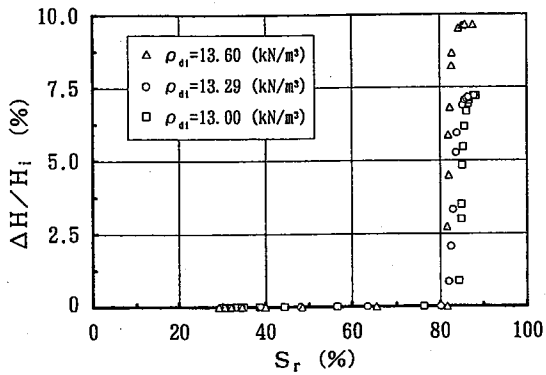
図-1 膨潤量比の経時変化に及ぼす初期飽和度の影響



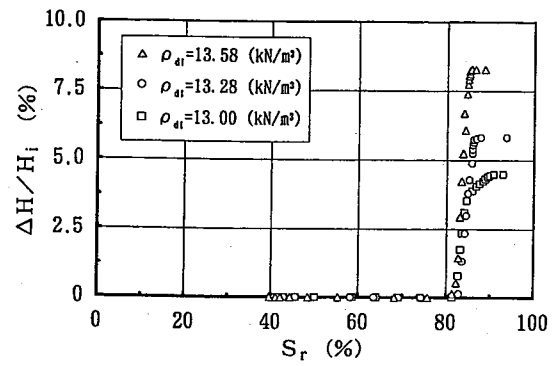
(a)  $S_{r1} = 10\%$



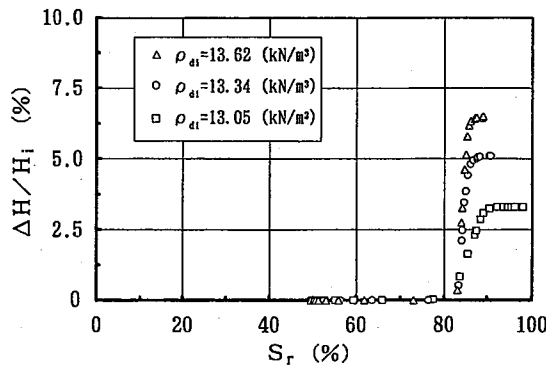
(b)  $S_{r1} = 20\%$



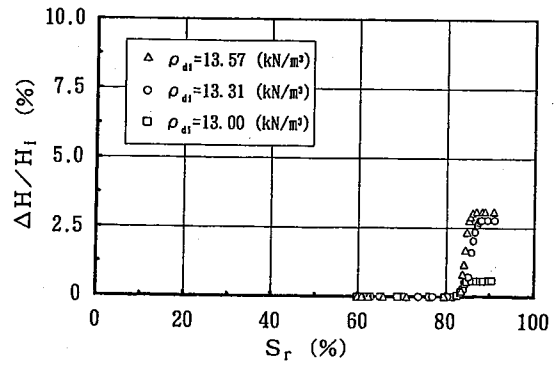
(c)  $S_{r1} = 30\%$



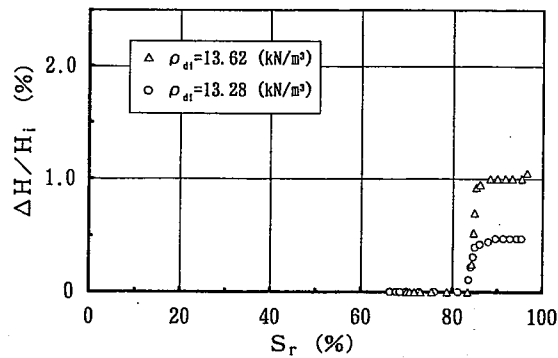
(d)  $S_{r1} = 40\%$



(e)  $S_{r1} = 50\%$



(f)  $S_{r1} = 60\%$



(g)  $S_{r1} = 70\%$

図-2 膨潤量比と飽和度の変化に及ぼす初期飽和度の影響

度  $\rho_{di}=13.0, 13.3, 13.6 \text{ kN/m}^3$  を変化させた。

なお、実験は、圧密リング内の供試体に下面からセラミックディスクを介して水を徐々に吸水させ、この時の供試体の膨潤量、膨潤圧および吸水量の経時変化を測定し、膨潤量比、膨潤圧および飽和度の経時変化特性を求めた。膨潤量比は供試体の鉛直方向の膨潤量をダイヤルゲージを用いて測定することにより求めた。また、膨潤圧は圧密リング内の供試体が鉛直方向に変形しないように拘束し、その変形を拘束したときに発生している軸荷重の値を荷重計により求めた。なお、本実験システムにおける膨潤量の測定精度は  $\pm 0.005 \text{ mm}$ 、膨潤圧の測定精度は  $0.1 \text{ kPa}$  である。また、試験終了の判定は、膨潤量、膨潤圧ともにほぼ一定値に達する24時間を基準とした。

### 3. 実験結果および考察

図-1(a)~(f)は、異なる初期飽和度  $S_{ri}=10, 20, 30, 40, 50, 60, 70\%$  と初期乾燥密度  $\rho_{di}=13.0, 13.3, 13.6 \text{ kN/m}^3$  の供試体における、吸水に伴う膨潤量比 ( $\Delta H/H_i$ ) の経時変化を示している。図より、膨潤は  $S_{ri}$  に依存しているが、全体的には40~90分程度で発生し始め、200~700分程度で  $\Delta H/H_i$  がほぼ一定値に達していることがわかる。また、膨潤特性に及ぼす  $\rho_{di}$  の違いに着目すると、 $S_{ri}$  によらず  $\rho_{di}$  の増加に伴い  $\Delta H/H_i$  は増大しており、このような傾向は、斉藤・箭内<sup>4)</sup> が示した結果と一致するものである。また、同じ  $\rho_{di}$  においては、 $S_{ri}$  の増加に伴い  $\Delta H/H_i$  は減少していることがわかる。

次に、異なる初期飽和度 ( $S_{ri}$ ) を有する供試体の吸水時における膨潤量比 ( $\Delta H/H_i$ ) と吸水に伴う飽和度の変化関係を図-2(a)~(f)に示す。図より、供試体の内的条件 ( $S_{ri}, \rho_{di}$ ) によらず、膨潤現象は吸水後飽和度が80%程度に達するまではほとんど認められず、その後供試体の飽和度が82~85%程度に達すると急激に発生し始めていることが認められる。

この現象を土構造の観点からみると、吸水による飽和度の上昇は、飽和度80%程度までは、土構造の間隙を水が満たしていくのみで、土構造には供試体の飽和度の上昇がほとんど影響を与えていないものと考えられる。しかしながら、その後飽和度が82~85%程度に上昇すると、吸水現象は急激に土構造に影響を与えることとなり、その結果として剛性が減少し<sup>4)</sup>、膨潤が発生しているものと推察される。また、先述したように膨潤量比 ( $\Delta H/H_i$ ) は、初期飽和度 ( $S_{ri}$ ) によらず初期乾燥密度 ( $\rho_{di}$ ) の増加に伴って大きくなる。また、同じ  $\rho_{di}$  における  $\Delta H/H_i$  は、 $S_{ri}$  の増加に伴い減少している。

図-3は、膨潤変形発生時刻 ( $t_{si}$ ) と初期飽和度 ( $S_{ri}$ ) および初期乾燥密度 ( $\rho_{di}$ ) の関係を示している。 $t_{si}$  は供試体によりある程度の幅を持つが、全体的に  $S_{ri}$  が高くなるのに伴い減少しており、 $S_{ri}=60\%$  以上では  $t_{si}$  は40~60分程度に収束している。このことは、図-2においても述べたように  $S_{ri}$  によらず、全供試体において飽和度82~85%程度で膨潤が発生し始めることから、低い  $S_{ri}$  を有する土は膨潤発生に時間を要するものと考えられる。また、同じ  $S_{ri}$  における  $t_{si}$  に関しては、 $\rho_{di}$  の違いによる有意な傾向は認められなかった。

一方、膨潤変形終了時刻 ( $t_{sf}$ ) と初期飽和度 ( $S_{ri}$ ) および初期乾燥密度 ( $\rho_{di}$ ) の関係を図-4に示す。図より、 $S_{ri}$  が40%以下では  $t_{sf}$  が500~700分程度の値を示しているが、その後、 $S_{ri}$  の増加に伴って  $t_{sf}$  は減少している。このことは、高い  $S_{ri}$  を有する土は、膨潤量が小さく、その体積変化に伴う供試体への吸水量が少ないため、 $t_{sf}$  も短くなっているものと考えら

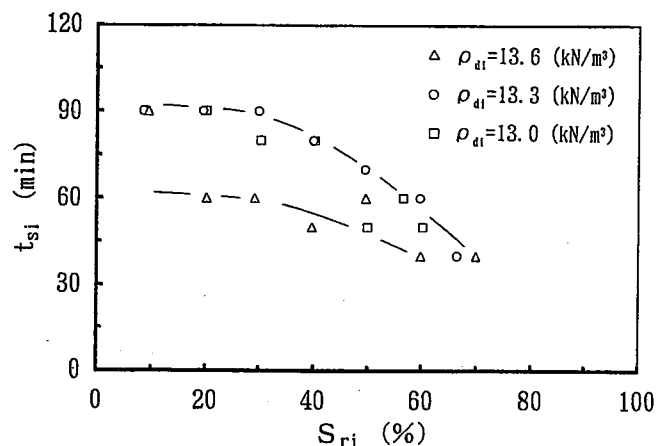


図-3 膨潤変形発生時刻と初期飽和度の関係

れる。なお、Day<sup>5)</sup>は、締固め時の乾燥密度が小さいほど膨潤の終了が早いとしているが、本実験では、 $\rho_{di}$ の膨潤変形終了時刻に及ぼす影響は明瞭には認められなかった。

図-5は試験終了時の膨潤量比( $\Delta H_r/H_i$ )と初期飽和度( $S_{ri}$ )および初期乾燥密度( $\rho_{di}$ )の関係を示している。図より、 $\Delta H_r/H_i$ は $S_{ri}$ が30%程度までは $\Delta H_r/H_i=8\sim 10\%$ 程度の値を示しているが、 $S_{ri}=30\%$ 以上では $S_{ri}$ の増加に伴いほぼ直線的に減少し、 $S_{ri}=70\%$ 程度に到ると膨潤変形はほとんど認められなくなる。このことより、不飽和土が有する負の間隙水圧(サクション)による有効応力は、締固められた時の飽和度が低いほど大きく、吸水に伴って有効応力が解放されると、その有効応力に対応する体積膨張量が生じるものと考えられる。しかしながら、初期飽和度が30%程度より低くなると負の間隙水圧による有効応力は初期飽和度に依存せず、ほぼ一定となっている。

供試体の初期乾燥密度( $\rho_{di}$ )、試験終了時の乾燥密度( $\rho_{df}$ )と初期飽和度( $S_{ri}$ )の関係を図-6に示す。図より、 $\rho_{df}$ は $\rho_{di}$ が13.0~13.6 kN/m<sup>3</sup>程度であるのに影響を受けず、ほぼ一定値に収束している。また、 $\rho_{df}$ は $S_{ri}=30\%$ 以下ではほぼ一定値を取り、 $S_{ri}=30\%$ 以上では $S_{ri}$ が高くなるのに伴い $\rho_{df}$ が増大する傾向を示しており、図-5で認められた傾向と類似した結果となっている。

図-7(a)~(e)は、異なる初期飽和度 $S_{ri}=10, 20, 40, 60, 70\%$ と初期乾燥密度 $\rho_{di}=13.0, 13.3, 13.6\text{ kN/m}^3$ の供試体における、吸水に伴う膨潤圧( $P_s$ )の経時変化を示している。図より、各供試体における吸水後の $P_s$ の発生時刻は異なるが、 $P_s$ は短時間間に急激に発生しており、その傾向は $S_{ri}$ が低い供試体ほど顕著に表れている。いま、 $P_s$ が大きい供試体に着目すると、 $P_s$ はピークを示した後減少し、一定値に漸近する傾向が認められる。また、最大膨潤圧( $P_{smax}$ )に及ぼす初期乾燥密度( $\rho_{di}$ )の違いに着目すると、 $S_{ri}$ によらず $\rho_{di}$ の増加に伴い $P_{smax}$ は増大している。また、同じ $\rho_{di}$ においては、 $S_{ri}$ の増加に伴い $P_{smax}$ は減少している。このような傾向は、前述したように $\rho_{di}$ と $S_{ri}$ が膨潤量比に与える影響と一致するものである。

吸水に伴う膨潤圧( $P_s$ )の経時変化と図-1に示した膨潤量比( $\Delta H/H_i$ )の経時変化を比較すると、

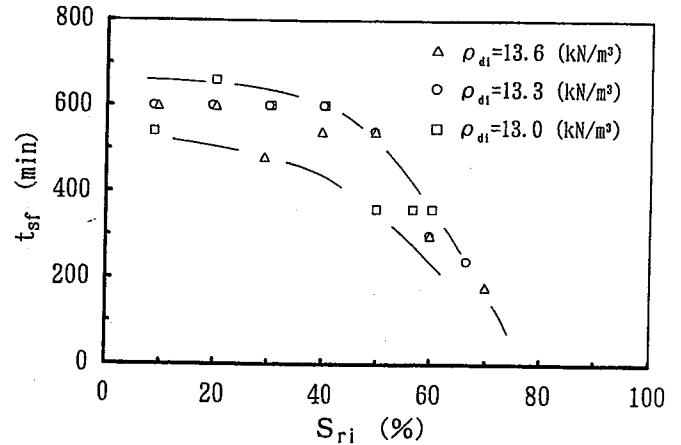


図-4 膨潤変形終了時刻と初期飽和度の関係

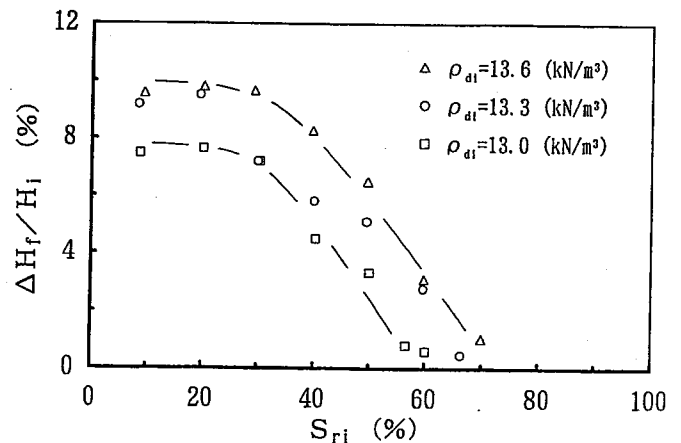


図-5 試験終了時の膨潤量比と初期飽和度の関係

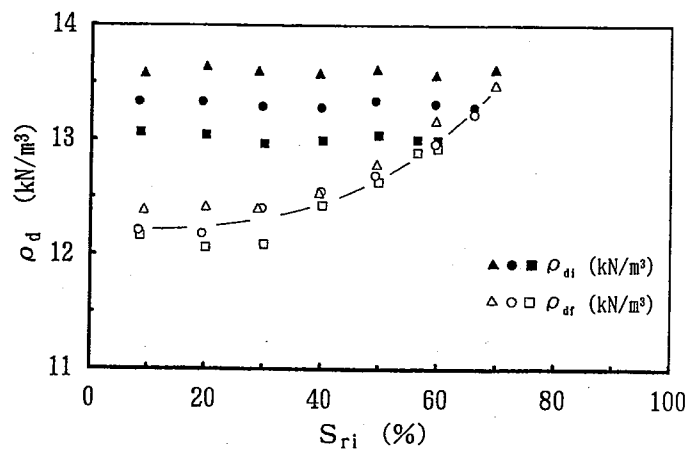


図-6 試験開始時の乾燥密度 $\rho_{di}$ 、試験終了時の乾燥密度 $\rho_{df}$ と初期飽和度の関係

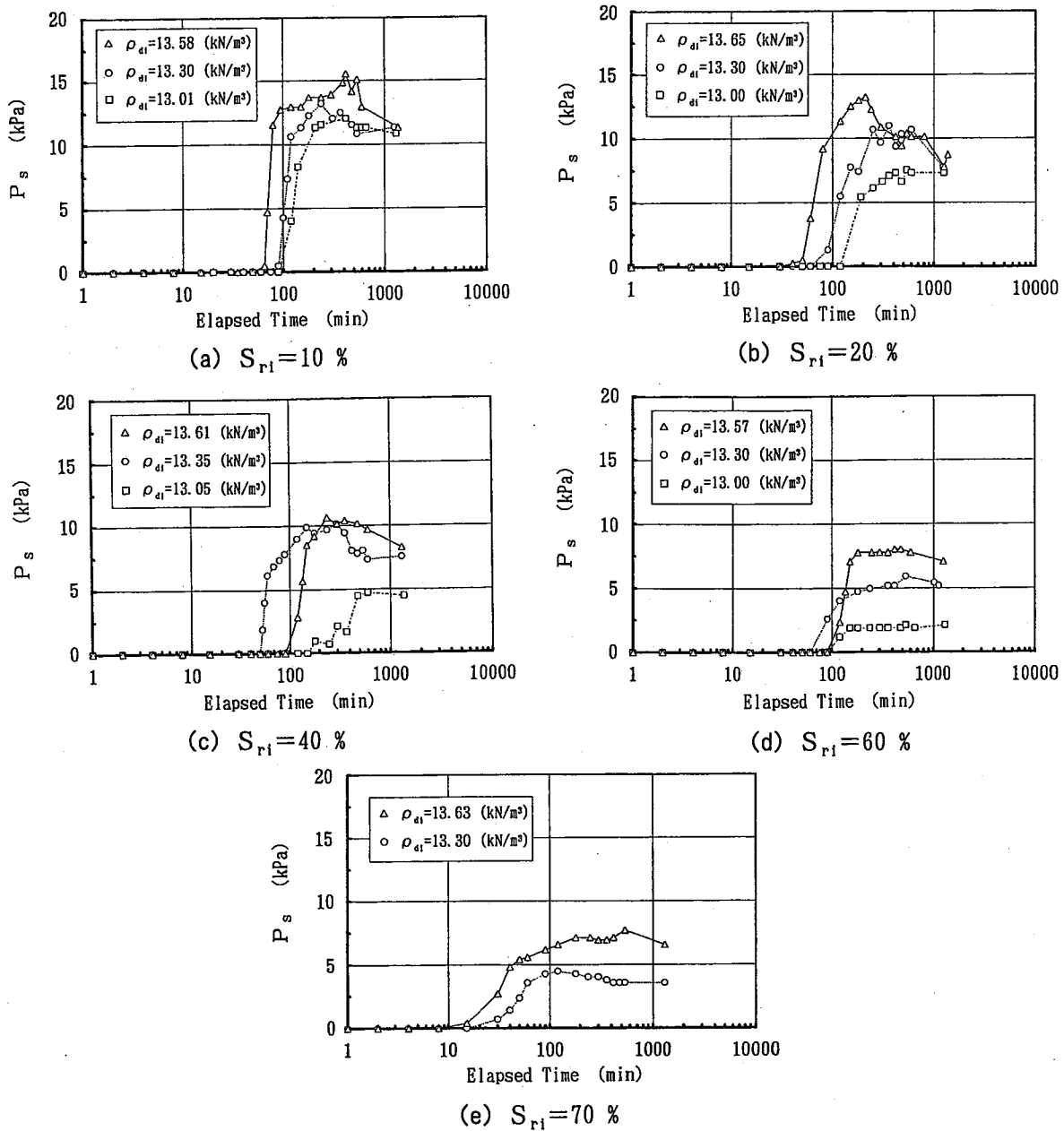


図-7 膨潤圧の経時変化に及ぼす初期飽和度の影響

$\Delta H/H_i$ の挙動は最大膨潤量比付近に達するとほぼ一定値を示すが、 $P_s$ は最大膨潤圧付近に達すると小さな変動を生じながら $P_s$ の最終的な残留膨潤圧の状態に到達している。このような挙動を土構造の観点から考察すると、土が膨潤を起こそうとしている状態を体積一定に拘束しているため、土構造が再構成され、それに伴って $P_s$ の微動が生じているものと考えられる。また、 $P_s$ が時間経過に伴いピークを示し、その後減少する傾向を示す供試体は、 $P_{s,max}$ が7.5kPa以上の供試体において発生しており、このような供試体における試験終了時の残留膨潤圧に着目すると、 $P_s$ がほぼ一定値に収束していることがわかる。

次に、異なる初期飽和度 ( $S_{ri}$ ) と初期乾燥密度 ( $\rho_{d1}$ ) を有する供試体の吸水時における膨潤圧 ( $P_s$ ) と飽和度の関係を図-8 (a)~(e)に示す。図より、供試体の内的条件 ( $S_{ri}$ ,  $\rho_{d1}$ ) によらず、 $P_s$ はその供試体の飽和度が75%程度に達するまではほとんど認められず、その後供試体の飽和度が80%程度に達すると急激に発生し始めていることがわかる。このような $P_s$ が発生し始める飽和度と、 $\Delta H/H_i$ が発生し始める飽和度の関係に着目すると、 $P_s$ が発生し始める飽和度は $\Delta H/H_i$ が発生し始める飽和度と比較してわずかに早くその発生が認められるが、全体的には両挙動とも飽和度が80%程度に到ると急激にその発生が認められる。

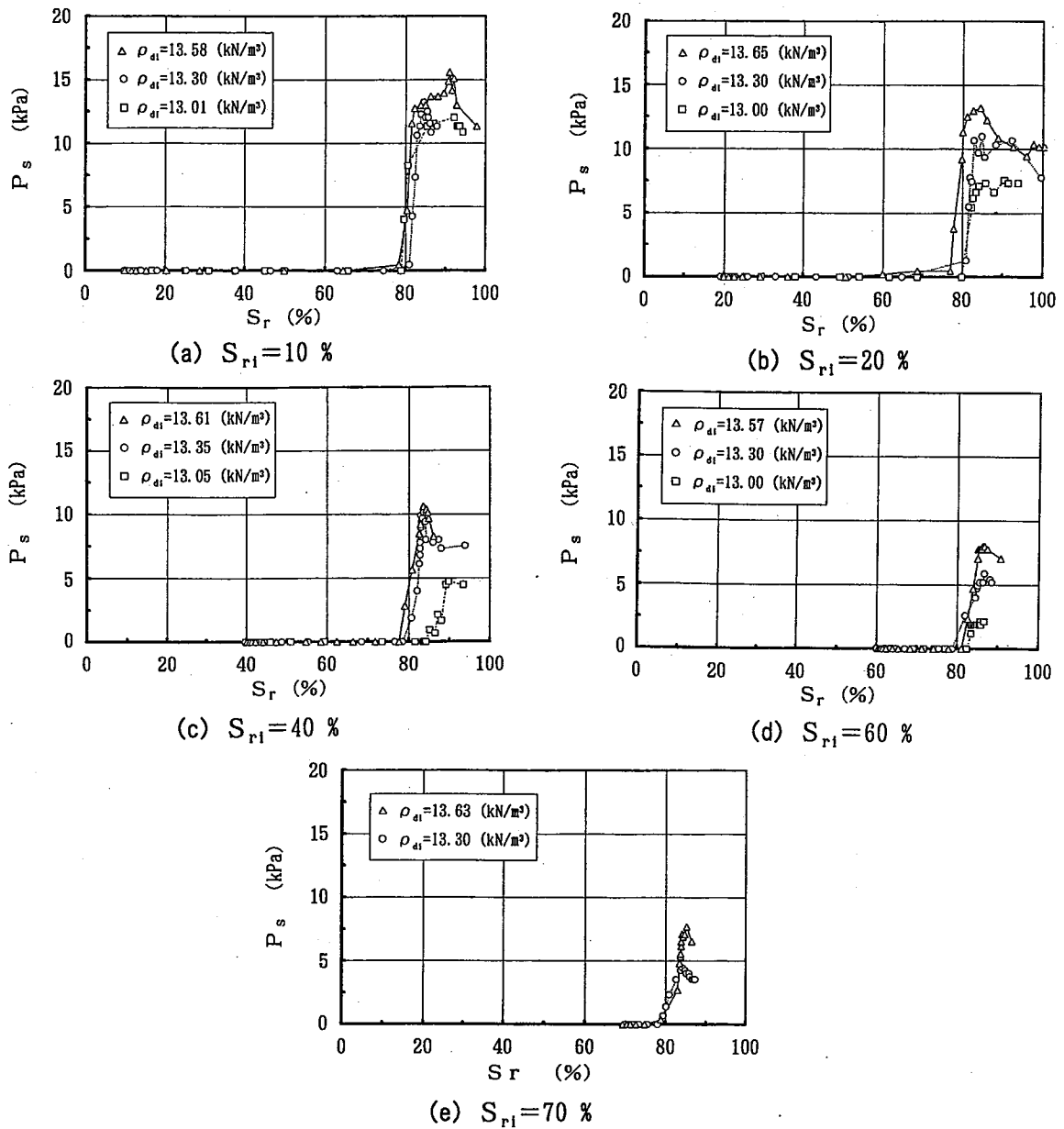


図-8 膨潤圧と飽和度の変化に及ぼす初期飽和度の影響

ここで、試験終了時の各供試体における飽和度に着目すると、初期飽和度 ( $S_{ri}$ ) の増加とともに試験終了時の飽和度が低下しており、初期飽和度が低い ( $S_{ri}=10, 20\%$ ) 供試体においては飽和度が95~100%に達しているが、初期飽和度が高い ( $S_{ri}=60, 70\%$ ) 供試体においては試験終了時の飽和度が85~90%になっている。このように、供試体の初期状態は、水浸による最終的な供試体の内的条件にも影響を与えている。

図-9に最大膨潤圧 ( $P_{smax}$ ) と初期飽和度 ( $S_{ri}$ ) の関係を示している。図より、水浸による土の  $P_{smax}$  は  $S_{ri}$  の増加に伴い緩やかに減少し

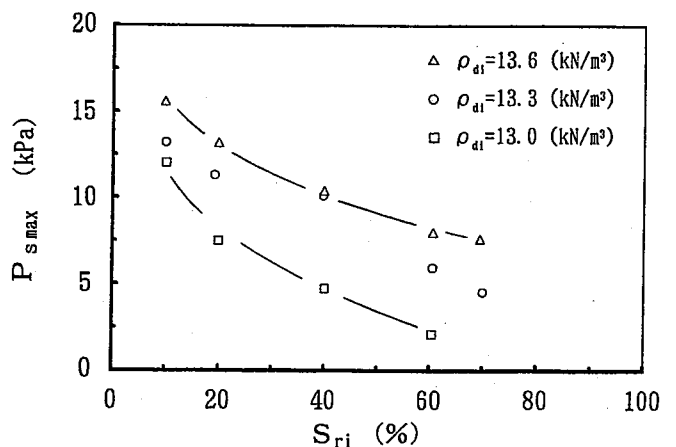


図-9 最大膨潤圧と初期飽和度の関係

ており、図-5に示した $S_{r,i}$ と膨潤量比 ( $\Delta H_f/H_i$ ) の関係と定性的には一致するが、 $S_{r,i}$ の増加に伴う $\Delta H_f/H_i$ の減少傾向とは異なっている。また、 $\Delta H_f/H_i$ は $S_{r,i}=70\%$ 程度ではほとんど発生しないが、 $P_{s,max}$ は $S_{r,i}=70\%$ 程度でもある程度の膨潤圧を示していることがわかる。このことより、供試体の体積変化特性は膨潤量より膨潤圧の場合に鋭敏に表れる傾向があるものと考えられる。また、 $S_{r,i}$ によらず同じ $S_{r,i}$ においては、 $P_{s,max}$ は $\rho_{d,i}$ の増加に伴い、増大する傾向が認められた。

膨潤試験から求めた膨潤量比 ( $\Delta H_f/H_i$ ) と膨潤圧試験より得られた最大膨潤圧 ( $P_{s,max}$ ) の関係を図-10に示す。図より、 $\Delta H_f/H_i$ の増加に伴い $P_{s,max}$ も増加する傾向を示しており、その増加率は $\Delta H_f/H_i$ が増加するほど大きくなること

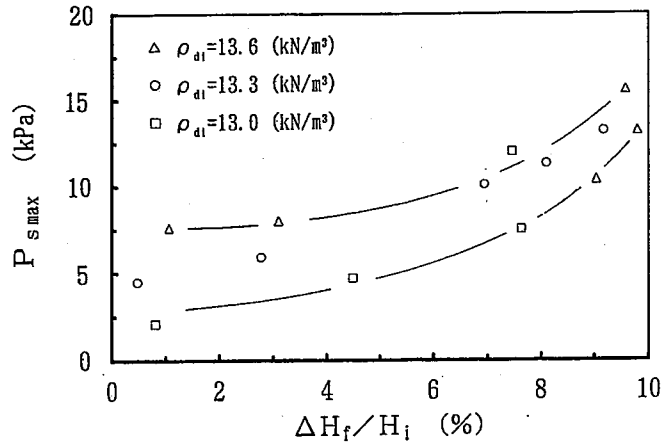


図-10 最大膨潤圧と膨潤量比の関係

この傾向は、Sikh<sup>5)</sup>が示した傾向とも一致している。また、 $\Delta H_f/H_i$ と $P_{s,max}$ の関係における初期乾燥密度 $\rho_{d,i}$ の影響は、 $\Delta H_f/H_i$ が5%よりも小さい供試体においては、 $\rho_{d,i}$ の増加に伴い $P_{s,max}$ も大きい値を示すが、 $\Delta H_f/H_i$ が5%よりも大きい供試体では $\rho_{d,i}$ が $P_{s,max}$ に及ぼす有意な影響は認められなかった。

#### 4. まとめ

本研究より不飽和シルトの水浸時の膨潤特性がある程度明らかとなった。以下に本研究より得られた主要な結果を列記する。

1) 供試体の初期飽和度、初期乾燥密度によらず、膨潤現象は吸水後飽和度が80%程度に達するまではほとんど認められず、その後飽和度が82~85%程度に達すると急激に発生する。

2) 不飽和土の膨潤量は、初期飽和度30%程度まではほぼ一定値を示しているが、初期飽和度が30%を越えると初期飽和度の増加に伴い膨潤量は直線的に減少し、70%程度に達すると供試体はほとんど膨潤が生じなかった。また、初期乾燥密度が大きいほど膨潤量も大きくなる。

3) 初期乾燥密度によらず、水浸に伴う膨潤終了時の乾燥密度はほぼ一定値に収束する。また、その収束した $\rho_d$ は初期飽和度の増加に伴い増大していくユニークな関係が得られた。

4) 土の膨潤圧は、供試体の初期飽和度、初期乾燥密度によらず、吸水後飽和度が80%程度に達すると急激に発生する。また、膨潤圧が大きい供試体においては、膨潤圧がピーク示した後飽和度の上昇に伴って膨潤圧は減少し、最終的には一定値に収束する。

5) 同じ初期乾燥密度の供試体では、水浸による土要素の最大膨潤圧は初期飽和度の増加に伴って徐々に減少する。また、初期飽和度によらず最大膨潤圧は初期乾燥密度の増加に伴って増大する。

6) シルト質土における、水浸に伴う最大膨潤圧と膨潤量比の関係は、膨潤量比が増加するのに伴い最大膨潤圧も増加する傾向が認められ、膨潤圧の増加率は、膨潤量比が増加するほど大きくなる。

【参考文献】 1) 土壌物理研究会編：土の物理学，森北出版，pp.97-120，1979。 2) Yong, R. N. and Warkentin, B. P. 著，山崎不二夫・山内豊聡監訳：土質工学の基礎，鹿島出版会，pp.150-164，1972。

3) Gromko, G. J.: Review of Expansive Soils, Proc. ASCE, Vol.100, No. GT6, pp.667-687, 1974。 4) 齊藤孝夫・箭内寛治：締固めた土の二、三の膨潤特性について，土木学会論文報告集，No.172，pp.11-18，1969。

5) Day, R. W.: Swelling versus Saturation for Compacted Clay, Proc. ASCE, Vol.118, No. GT8, pp.1272-1278, 1992。

6) Sikh, T. S.: Swelling Soils, Proc. ASCE, Vol.119, No. GT4, pp.791-792, 1993。