

pH が異なる粘土の強度・変形特性

松下 英次 (設計工学専攻)

鈴木 素之 (社会建設工学科)

山本 哲朗 (社会建設工学科)

Strength and deformation characteristics of clays with different pHs

Eiji MATSUSHITA (Division of design Engineering)

Motoyuki SUZUKI (Department of civil engineering)

Tetsuro YAMAMOTO (Department of civil engineering)

In order to clarify the influence of a physico-chemical index, pH on the strength and deformation characteristics of clay, standard consolidation and triaxial compression tests were performed on clay samples of which pH values were artificially changed by adding sulfuric acid or sodium hydroxide solution. It was shown that the consolidation indexes of clay were dependent on the pH value and the mineral composition. Furthermore, the undrained shear behaviors of clay notably changed by the pH value. Although the effective stress paths were affected by the pH value of clay specimen before undrained shearing, they reached a same critical state line.

Key Words : pH, Clay, Strength and deformation characteristics, Soil structure, Standard consolidation test, Triaxial compression test, Stress pass, Critical state line

1. はじめに

土粒子の堆積環境の化学的条件や含有する粘土鉱物の種類によって土粒子表面の界面化学的作用が異なり、土粒子間にはそれに応じて異なる大きさの引力と斥力が生じる。これらの引力および斥力の大小関係により、土はランダム構造、綿毛構造、分散構造および配向構造のいずれかの形態で存在している¹⁾。土粒子間に作用する引力には普遍的に働く比較的弱い力ではあるが、土粒子表面からかなり離れたところまで作用するファン・デル・ワールス力がある。その一方、斥力には土粒子表面に形成される拡散電気二重層に起因した電気力があり、これはイオンの種類や濃度によって影響範囲を変化させるものである^{1)~3)}。これに関連して土粒子表面に帯電する電荷には、その周辺部の水素イオン濃度(水素イオン濃度指数: pH)によって生じるものがあり、これを pH 依存荷電^{2), 3)}という。これは pH の値によって引力あるいは斥力となる。このことは吸着水を含めた土の間隙水の化学的性質によって土粒子間に働く力がその方向と大きさを変えうることを示唆している。特に上記の界面化学的作用が強くなる粘土の強度と変形を考える際には、このような物理・化学現象を無視することはできず、これらが土粒

子骨格の形成に及ぼす影響を明らかにすることは重要である。

本論文は、間隙水の化学的状態を表す pH に着目し、硫酸および水酸化ナトリウムにより土の pH を人工的に変化させた含有粘土鉱物が異なる二種類の粘性土を対象にして土の圧密および非排水せん断特性に及ぼす pH の影響について実験的に検討したものである。

2. 土の pH が強度に与える影響に関する既往の研究

本章では、土の pH と強度特性に関する研究のうちで、代表的な研究成果の概要を述べるとともに、この分野における現状と課題を記述する。

海外における土の化学的状態に着目した先駆的な研究がとして、Warkentin ら⁴⁾は土試料に含まれる陽イオンの種類と pH を変化させたモンモリロナイトおよびカオリナイトに対して一面せん断試験を行っている。その結果、土粒子構造は間隙水の化学的状態により綿毛状態もしくは分散状態に変化し、それに応じて稼動される一面せん断強度が変化すると考察している。また、Torrance ら⁵⁾は塩酸を用いて pH を調整したラダ粘土の降伏応力を測定し、pH の値の減少に伴って降

Table 1 Physical and chemical properties of soil samples

Sample	Kaolin clay	Annaka clay
s (g/cm^3)	2.618	2.400
D_{50} (mm)	0.007	0.004
D_{max} (mm)	0.200	0.032
w_L (%)	62.0	375.7
w_P (%)	40.2	34.5
I_P	21.8	341.2
F_{clay} (%)	35.3	59.7
F_c (%)	56.4	100.0
$(\text{pH})_i$	6.8	10.6

伏応力が減少することを示している。さらに、Olsonら⁶⁾も Warkentin らと同様な実験を三軸圧縮試験を用いて行ない、粘土の工学的性質は土粒子間の物理・化学的相互作用により変化すると考察している。一方、我が国においても、村上ら⁷⁾が pH を調整した地すべり粘土に対する一面せん断試験結果から pH の減少に伴って土の残留強度は減少することを示している。また、亀井ら^{8) - 10)}は土の酸性化が土の物理的性質や静的強度・変形特性に大きな影響を及ぼすことを報告している。最近では、佐野ら¹¹⁾が自然状態で徐々に酸性化する土の pH、経過時間および一軸圧縮強度の三者の間に密接な関係にあることを、また山本ら^{12) - 15)}は土の繰返しせん断強度が pH の変化に伴う土の骨格構造と密接な関係にあることを示している。

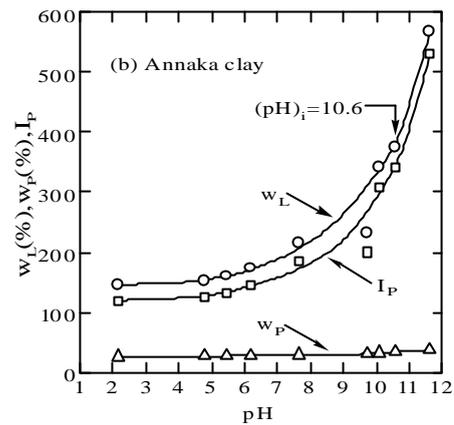
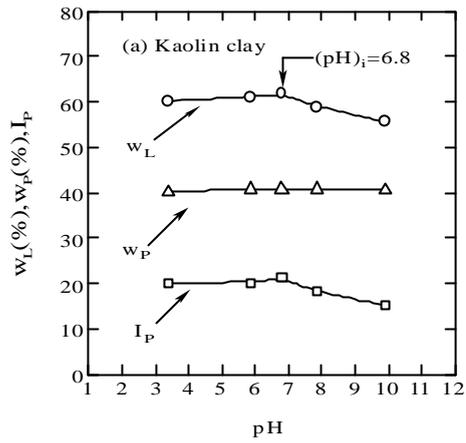
このように現状では、個々の土を対象にしたものや間隙水のイオンの種類と濃度を対象にして検討したものがほとんどであり、総括的な議論はされていない。今後の課題として土の化学的状態の変化と強度・変形特性の関係を定量的に評価することが重要である。

3. 試料および実験概要

(1) 試料の物理的および化学的性質

試料はカオリン粘土および安中粘土の2種類である。Table 1 にこれら試料の物理的性質および化学的性質を示す。今回用いた試料の粒度は土粒子の分散性が良好でないため、レーザー回折粒度分布測定装置を用いて求めている。カオリン粘土および安中粘土はともに CH に分類される。また、表中の記号のうち、 F_{clay} は粘土含有量であり、 $(\text{pH})_i$ は試料調整前の初期の pH である。カオリン粘土は $(\text{pH})_i=6.8$ であるのでほぼ中性、安中粘土は $(\text{pH})_i=10.6$ であるので強アルカリ性である。

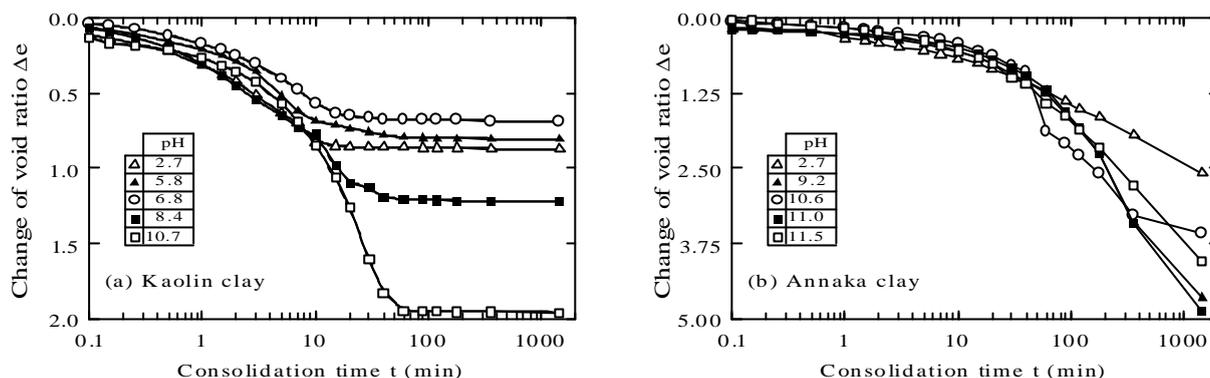
不定方位試料を用いた粉末 X 線回折試験結果によると、カオリン粘土の主要粘土鉱物がカオリナイトであることは無論のこと、安中粘土の主要粘土鉱物がスメクタイトであり、両者ともにその他の鉱物として石英を含んでいることを確認している。



Figs.1 Change of consistency with pH

(2) 試料の pH 調整方法

pH 調整薬品として $(\text{pH})_i$ より酸性側に変化させるときは硫酸、アルカリ性側に変化させるときは水酸化ナトリウムを用いる。以下に試料の pH 調整手順を示す。純水に pH 調整薬品を加え、所定の濃度に調整した水溶液を作製する。試料の含水比が $(\text{pH})_i$ における液性限界の約 1.5~2.0 倍となるように上記の水溶液を加え攪拌してスラリー状にする。スラリー試料を 1 日放置して、所定の pH になっていることを確認するため、pH メーターを用いて pH を測定する。このとき、pH の値が所定の pH に達していない場合には含水比を調整しながら pH 調整薬品を加えた水溶液をさらに加えて pH の値を調整する。ここで、注意すべきことは、pH を調整するとき、ある pH の値を超えると pH が急激に変化することである。このことは土の緩衝能が特異に変化する pH の識閾値の存在を示唆している。これにより、試料の pH が所定の pH の値を超えた場合は $(\text{pH})_i$ の試料を加えて pH を調整することにした。なお、 $(\text{pH})_i$ の試料を作製する場合は pH 調整薬品を加えた水溶液の代わりに純水を用いる。



Figs.2 Change of void ratio with elapsed time of samples with different pHs

(3) 土のコンシステンシー特性に及ぼす pH の影響

松下ら¹⁶⁾は pH の変化により土のコンシステンシー特性がその含有粘土鉱物の種類により特異に変化することを見出している。Figs.1(a)および(b)にそれぞれカオリン粘土および安中粘土の pH の変化に伴う液性限界、塑性限界および塑性指数の変化を示す。カオリン粘土では pH の増加に対して液性限界、塑性限界および塑性指数はいずれも $(pH)_i$ までいったん増加した後、減少する。安中粘土では pH の増加に対して液性限界、塑性限界および塑性指数はそれぞれ単調に増加する。なお、pH の変化により土粒子の密度や粒度分布に大きな変化はみられない。

(4) 標準圧密試験

上記(2)で作製した pH が異なるスラリー試料を圧密リングにつめ、標準圧密試験を行った。両試料の pH は $pH=2.7 \sim 11.5$ の範囲で 5 通りに変化させている。ここで最も注意すべきこととして実験中の pH の値を一定に保つことである。空気中に含まれる CO_2 ガスの溶解により、試料の pH が所定の値から変化することが懸念される。そこで、実験終了後の試料に対して pH を測定し、pH の値に有意な変化はほとんどないことを確かめている。

(5) 圧密非排水三軸圧縮試験

標準圧密試験と同様に pH を調整したスラリー試料を大型圧密装置につめて一次的に圧密した。試料の pH は $pH=3.9 \sim 10.6$ の範囲で 3 通りに変化させている。鉛直圧密応力 p は $p=9.8 \ 19.6 \ 49.0 \ 98.0kPa$ のように段階載荷し、第 1~3 段階では 1 日間、第 4 段階では最長 246 日、最短で 7 日間である。圧密の打ち切りの目安は $3t$ 法に基づいて決定した。このようにして作製した予圧密試料から三軸圧縮試験に用いる供試体を切り出した。供試体寸法は直径約 5cm、高さ約 10cm である。飽和度を上げるためにバックプレッシャーを負荷した供試体を等方応力によって正規圧密状態にし

た後、直ちに軸ひずみ速度 0.1%/min で非排水条件下で軸ひずみ 15%まで圧縮した。非排水せん断前の有効拘束圧は $\sigma'_{30}=49.0kPa, 98.0kPa$ および $196.0kPa$ の 3 通りに設定した。なお、この試料でも、試験の前後で pH の値がほとんど変化しないことを確かめている。

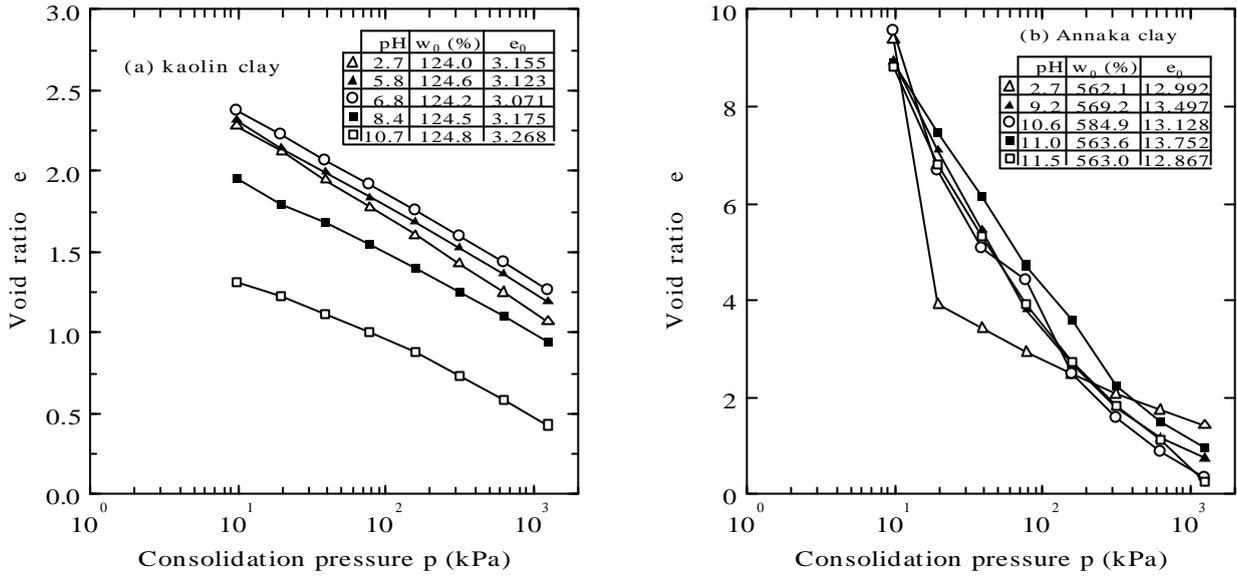
4. pH が異なる土の一次元圧密特性

(1) 間隙比の変化と pH の関係

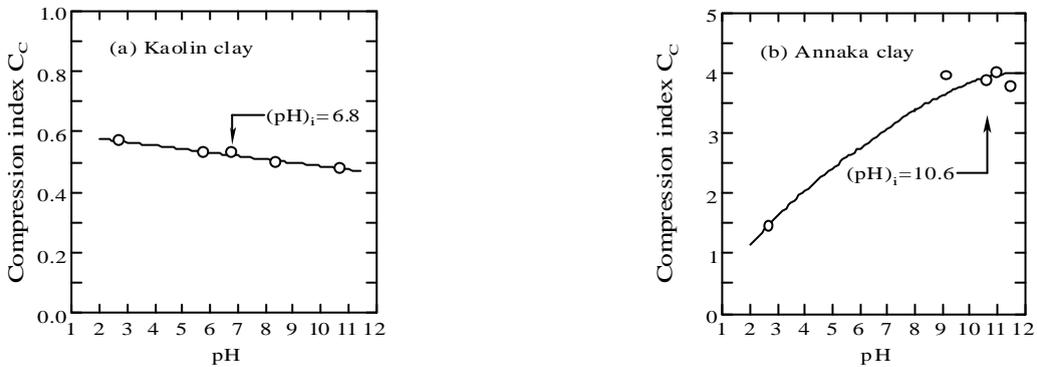
Figs.2 (a)および(b)にそれぞれ pH が異なるカオリン粘土および安中粘土の圧密応力 $p=9.8kPa$ における間隙比の変化量 e と経過時間 t の関係を示す。カオリン粘土の間隙比の変化は、 $t=10$ 分程度までは pH の値によらずほぼ同じ挙動を示すが、その後 pH の値によって大きく異なる。安中粘土の間隙比の変化は $t=100$ 分程度以降において pH の値によって大きく異なる。

Figs.3 (a)および(b)にそれぞれ pH が異なるカオリン粘土および安中粘土の間隙比 e と圧密応力 p の関係を示す。図中に 5 通りに変化させた pH の値、初期含水比 w_0 、初期間隙比 e_0 を示している。間隙比と対数表示の圧密応力の関係は正規圧密状態では直線関係となることが経験的に知られている¹⁷⁾。カオリン粘土の場合、いずれの $e \sim \log p$ 関係も直線関係となっているが、pH の値によってその傾きすなわち圧縮指数 C_c は異なっている。安中粘土の場合も、 $pH=2.7$ を除いてほぼ直線関係が得られているが、pH の値によって圧縮指数は異なっている。

Figs.4(a)および(b)にそれぞれカオリン粘土および安中粘土の圧縮指数 C_c と pH の関係を示す。カオリン粘土の場合、圧縮指数は $pH=2.7 \sim 10.7$ の範囲で pH の増加に対して直線的に減少している。一方、安中粘土の場合、圧縮指数は $pH=2.7 \sim 11.5$ の範囲で pH の増加に対して増加しているようである。このとき、圧縮指数の値は 1.5~4.0 程度と大きな値を示しており、膨張性粘土鉱物であるスメクタイトを含む土は pH が高い領



Figs.3 Relation between void ratio and consolidation pressure of samples with different pHs



Figs.4 Change of compression index with pH

域すなわち強アルカリ性領域ではかなり高い圧縮性を有していることがわかる。

(2) 圧密係数, 体積圧縮係数および透水係数

Figs.5(a)および(b)にそれぞれ pH の異なるカオリン粘土および安中粘土の圧密係数 c_v と平均圧密応力 \bar{p} の関係を示す。カオリン粘土の場合, 圧密係数は対数表示の \bar{p} の増加に対して増加しているが, pH の値によってその度合いは異なる。正規圧密粘土の圧密係数は対数表示の平均圧密応力に対してほぼ一定か若干増加していることが知られている¹⁷⁾。今回得られた $c_v \sim \bar{p}$ 関係はこの結果と一致している。一方, 安中粘土の場合, 圧密係数はカオリン粘土と逆の傾向を示しており, pH=2.7 では他の pH に比べて圧密係数はかなり大きな値を示している。

Figs.6(a)および(b)は Figs.5(a)および(b)のデータを平均圧密圧力ごとに圧密係数と pH の関係で再整理したものであり, それぞれカオリン粘土および安中粘土に分けて表示している。カオリン粘土の圧密係数は pH

の増加に対して減少傾向にある。一方, 安中粘土の圧密係数は pH の増加に対して $(pH)_i$ 付近まで減少しているが, その後増加に転じている。

Figs.7(a)および(b)にそれぞれ pH が異なるカオリン粘土および安中粘土の体積圧縮係数 m_v と平均圧密応力の関係を示す。カオリン粘土の体積圧縮係数は平均圧密応力の増加とともに減少しており, 通常の正規圧密粘土でみられる傾向と一致している¹⁷⁾。いずれの $m_v \sim \bar{p}$ 曲線も $\bar{p}=10\text{kPa}$ 程度以上の領域では pH の値によって大きな差異はみられない。安中粘土の体積圧縮係数も平均圧密応力の増加とともに減少しているが, pH の値による $m_v \sim \bar{p}$ 曲線はカオリン粘土の場合とは異なり, pH の値によって差異がみられる。

Figs.8(a)および(b)は Figs.7(a)および(b)のデータを平均圧密圧力ごとに体積圧縮係数と pH の関係で再整理したものである。カオリン粘土の体積圧縮係数は, $\bar{p}=4.9\text{kPa}$ の場合には pH の増加に対して直線的に増加しているが, $\bar{p}=55.5\text{kPa}$ および 887.0kPa の場合にはほぼ一定の値を示している。一方, 安中粘土の体積圧縮

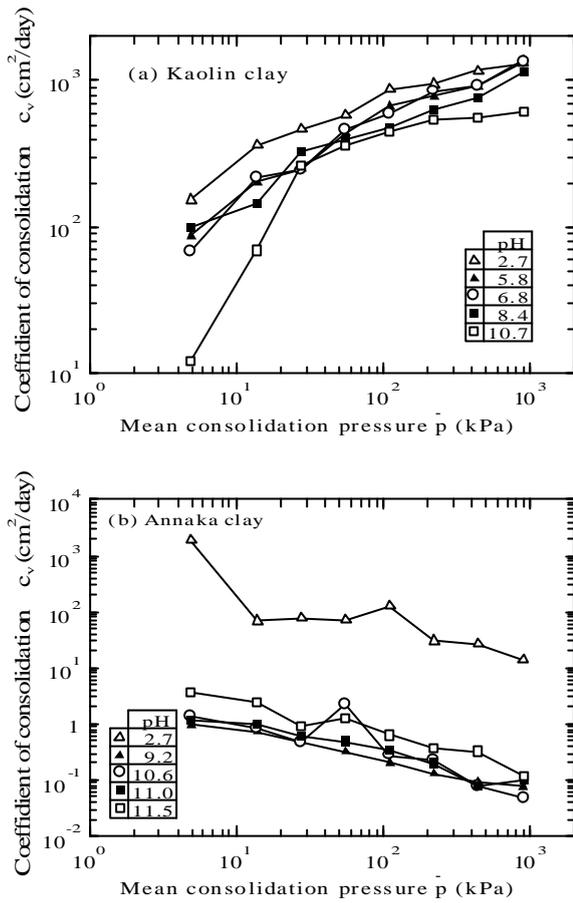


Fig.5 Relation between coefficient of consolidation and consolidation pressure of samples with different pHs

係数は、pH の増加に対して、 $p=4.9\text{kPa}$ の場合には減少し、 $p=55.5\text{kPa}$ および 887.0kPa の場合には増加する傾向にある。

次に、透水係数 k と pH の関係について考察する。透水係数は圧密係数 c_v 、体積圧縮係数 m_v および水の単位体積重量 γ_w から算出されるものである。以上の結果に基づけば、カオリン粘土の場合には $p=9.8\text{kPa}$ の場合を除いて体積圧縮係数は pH の変化に対してほぼ一定であるから、透水係数と pH の関係は圧密係数とほぼ同じ傾向を示す。一方、安中粘土の場合には pH の変化に対して圧密係数、体積圧縮係数はともに特異な変化をするため、透水係数と pH の関係は複雑なものになると考えられる。

5. pH が異なる土の非排水せん断特性

(1) 等方圧密過程における間隙比の変化と pH の関係

Figs.9(a) および **(b)** にそれぞれ pH が異なるカオリン粘土および安中粘土の等方圧密過程での間隙比の変化を示す。図中の e_i は等方圧密前の間隙比、 e_{49} 、 e_{98} および e_{196} は等方圧密後の間隙比を示しており、下付きの 49、98 および 196 は等方圧密応力 p_3 の大きさを示す。

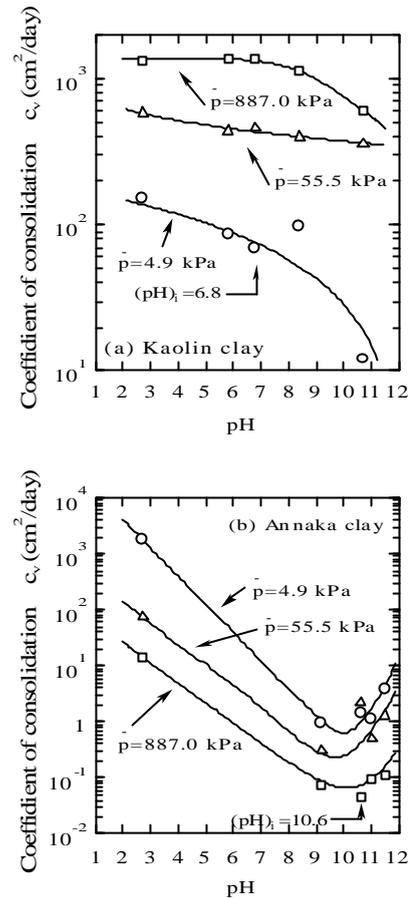
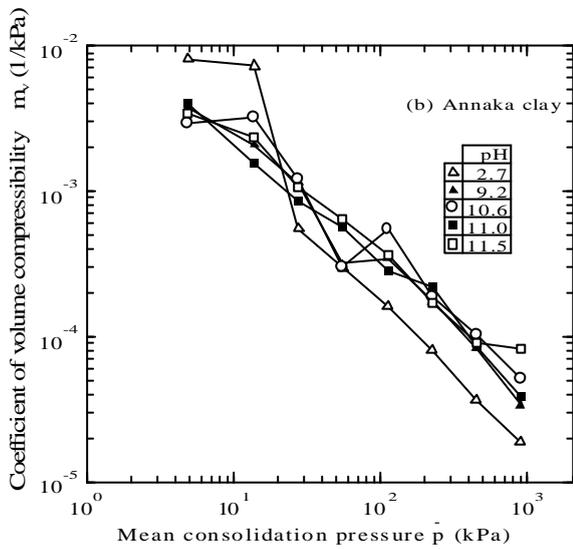
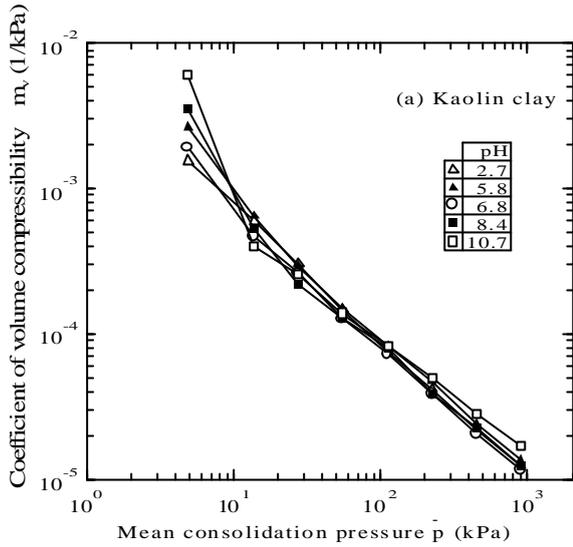


Fig.6 Relation between coefficient of consolidation and pH

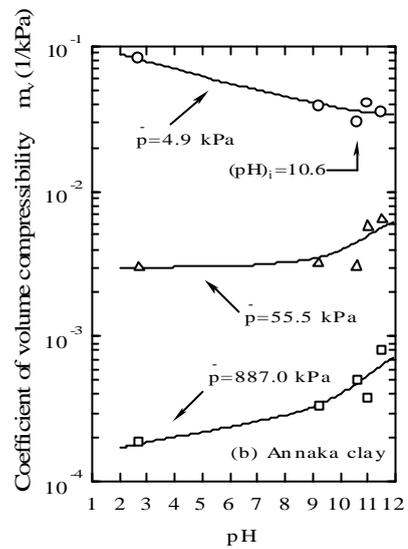
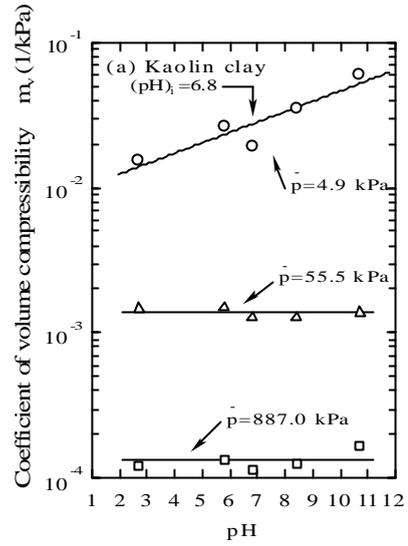
カオリン粘土の場合、間隙比は等方圧密前では $(pH)_i$ で最大となるが、等方圧密後では等方圧密応力の値によらず $(pH)_i$ 付近で最小となっている。一方、安中粘土の場合、間隙比は等方圧密の前後によらず pH の増加に対して増加している。このことは等方圧密後の土粒子の構造も試料調整時における pH の値換言すれば間隙水の化学的状態によって大きく異なることを示唆する。

(2) 軸差応力および過剰間隙水圧と軸ひずみの関係

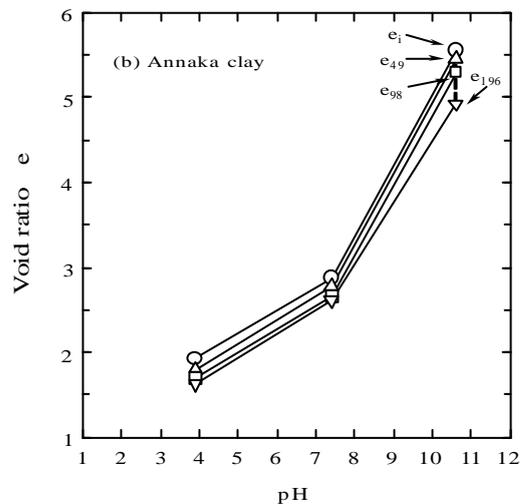
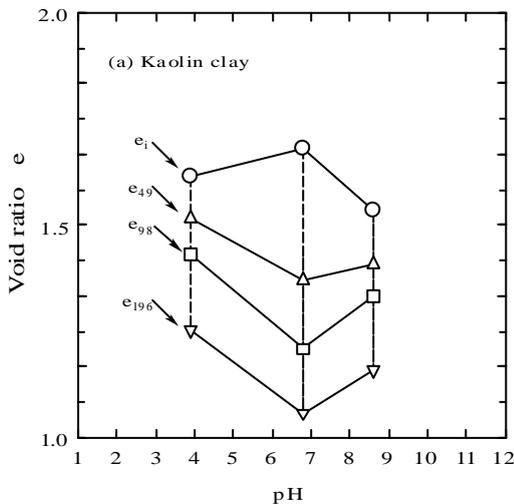
Figs.10 ~ 13 に等方圧密過程に引続く非排水せん断試験の結果を示す。**Figs.10(a) ~ (b)** および **Figs.11(a) ~ (b)** はそれぞれ pH が異なるカオリン粘土および安中粘土の軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ および過剰間隙水圧 u と軸ひずみの関係を初期有効拘束圧 p_{30} ごとに示している。カオリン粘土の場合、pH の値が大きいかほど最大軸差応力は大きくなっており、 $(\sigma_1 - \sigma_3) - u$ の関係は pH の大きさの順に並んでいる。このときの過剰間隙水圧と軸ひずみの関係をみると、 $p_{30}=196\text{kPa}$ の場合を除いて pH の値により大きな差異はみられない。一方、安中粘土の場合には、カオリン粘土とは全く逆の傾向を示し、pH の値が大きいかほど最大軸差応力は小さくなっている。このときの過剰間隙水圧と軸ひずみの関係



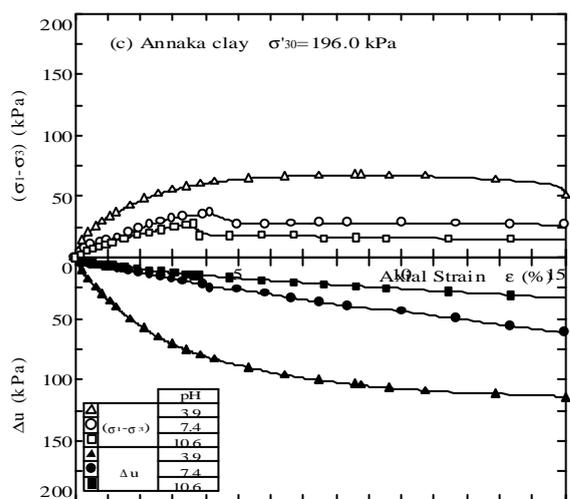
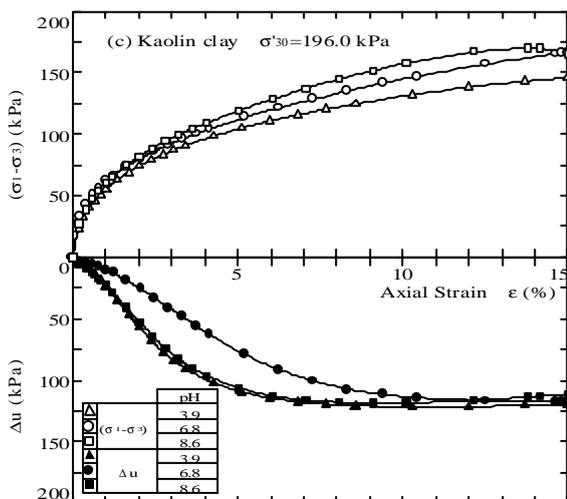
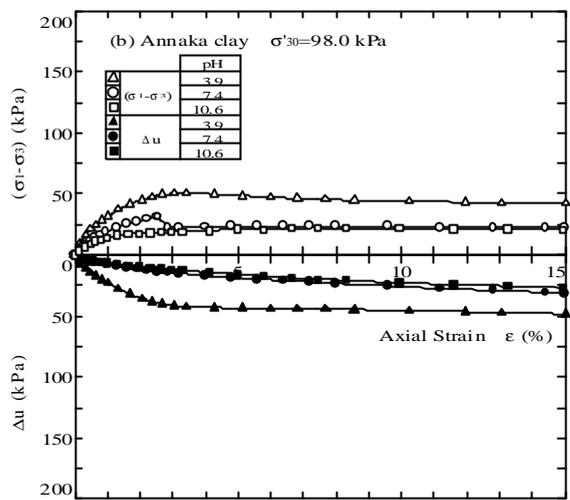
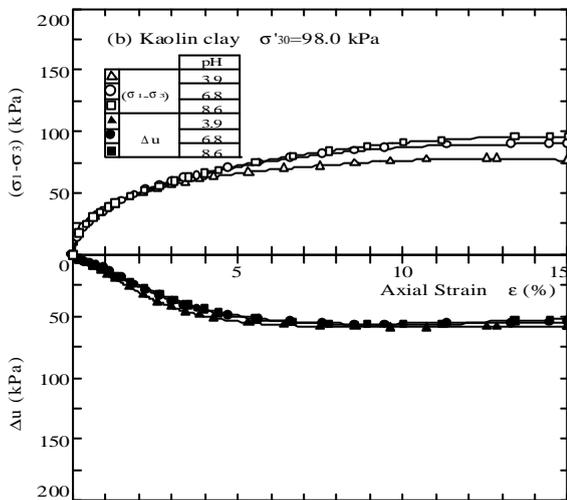
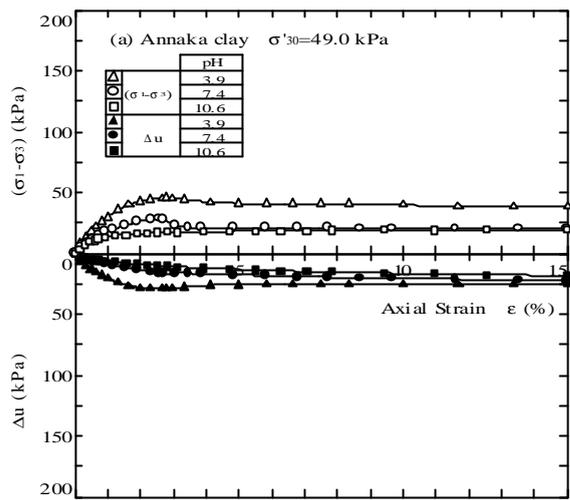
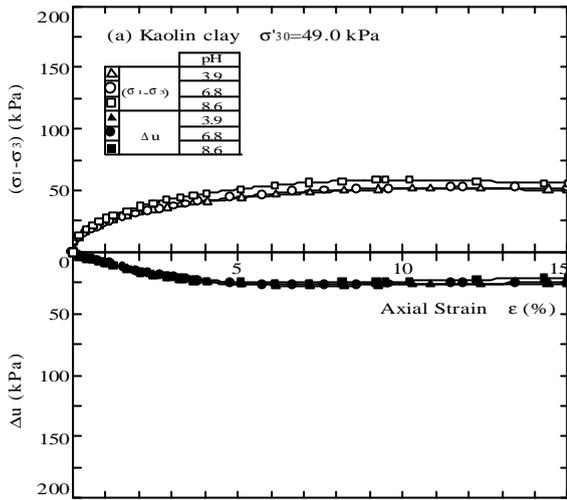
Figs.7 Relation between coefficient of volume compressibility and consolidation pressure of samples with different pHs



Figs.8 Relation between coefficient of volume compressibility and pH

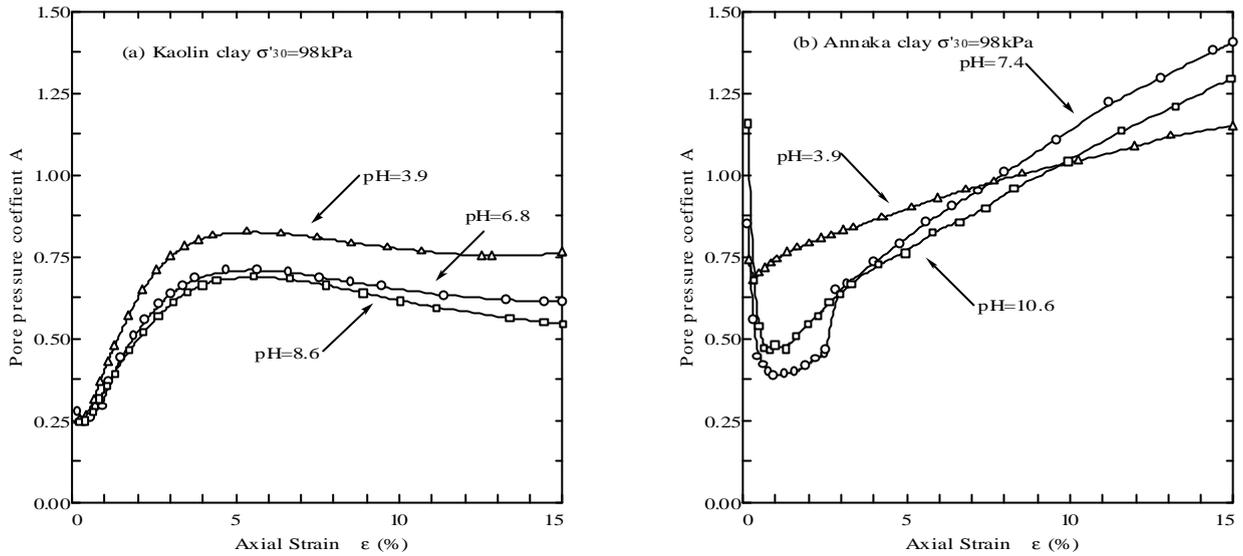


Figs.9 Change of void ratio with pH under isotropic consolidation

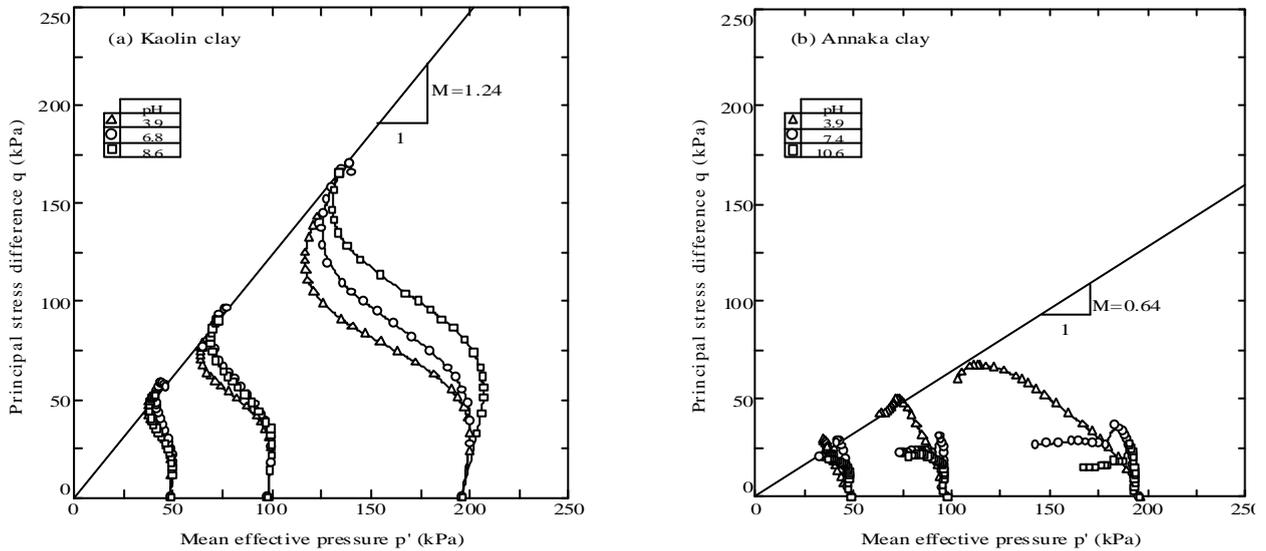


Figs.10 Relation between axial strain and deviator stress or pore water pressure for kaolin clay with different pHs

Figs.11 Relation between axial strain and deviator stress or pore water pressure for Annaka clay with different pHs



Figs.12 Relation between Axial strain and pore pressure coefficient for $\sigma'_{30}=98.0\text{kPa}$



Figs.13 Relation between principal stress difference and mean effective pressure of samples with different pHs

も pH の値により大きく異なる。

過剰間隙水圧の挙動に及ぼす pH の影響をさらに詳しく検討するために、Figs.12(a)および(b)にはそれぞれ pH が異なるカオリン粘土および安中粘土の間隙圧係数 A 値と軸ひずみの関係を示す。正規圧密粘土や軽い過圧密粘土の A 値は 1/3 より大きくなり、破壊に近づくにつれて 1 に近くなることが知られている。カオリン粘土および安中粘土の A 値の挙動もこれと同様である。カオリン粘土の場合、pH が小さいほど A 値の最大値は大きくなっている。一方、安中粘土の場合、pH=7.4 で最も大きく、pH=10.6, 3.9 の順で小さくなっている。 $\sigma'_{30}=49\text{kPa}$ および 196kPa の場合もほぼ同様の傾向を示している。以上より、過剰間隙水圧の挙動は等方圧密終了後の土粒子の骨格構造に多少なりとも影響を受けることが考えられる。

(3) 有効応力経路と限界状態線

Figs.13(a)および(b)にはそれぞれ pH が異なるカオリン粘土および安中粘土の p' - q 面の有効応力経路を示している。ここで用いる応力パラメータは次式 (1) および (2) である。

$$p' = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3} \tag{1}$$

$$q = \sigma'_1 - \sigma'_3 \tag{2}$$

カオリン粘土の場合、pH の値により有効応力経路は異なる。このことは非排水せん断挙動が間隙水の化学的性質に起因する土粒子の構造の影響を受けているものと考えられる。しかし、最終的に同一の限界状態線に達している。図中の限界状態線は次のような式 (3) および (4) を用いて表現できる。

$$q = M \cdot p' \quad (3)$$

$$M = \frac{6 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} \quad (4)$$

カオリン粘土の場合には、限界状態線の傾きは $\lambda = 1.24$ となり、式(4)より有効応力に関する内部摩擦角は $\phi' = 30.9^\circ$ である。一方、安中粘土の場合には pH の変化によって $p'-q$ 面の応力経路は異なる。さらに、限界状態線は pH によって異なり、再構成された正規圧密粘土にもかかわらず pH=3.9 の場合を除いて原点を通らないことがわかる。安中粘土の pH=3.9 における限界状態線の傾きは $\lambda = 0.64$ となり、 $\phi' = 16.8^\circ$ である。このことは、安中粘土の主要粘土鉱物であるスメクタイトが土粒子の層間に水分子を取り込む性質を有しており、Fig.1(b)および Fig.9(b)で示したように、pH の高い領域ではその性質が顕著に現れて高い間隙比を有したことによると考えられる。

以上の結果を総括すると、pH の値によって粘土の強度・変形特性は大きく変化し、その度合いは土の種類によって異なるものといえる。これらの原因の一つとして物理化学現象が圧密過程で形成される土粒子の骨格構造を著しく変化させたものと推測できる。

6. 結論

本研究から得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 圧縮指数は土の種類により pH の増加に対して減少するものと増加するものがある。
- 2) 圧密係数は土の種類により pH の増加に対して減少するものといったん減少した後、増加に転じるものがある。
- 3) 体積圧縮係数は土の種類と平均圧密応力の大きさにより pH の増加に対して増加、減少および不変のものがある。
- 4) 一次元圧密および等方圧密による間隙比の変化はともに pH の値によって大きく異なる。
- 5) 最大軸差応力は pH の増加に対して増加するものと減少するものがある。
- 6) 間隙圧係数 A 値は pH の増加に対して減少するものといったん減少した後、増加するものがある。
- 7) $p'-q$ 面の有効応力経路は pH の値によって異なるものの、最終的に同じ限界状態線に達する。

参考文献

- 1) 土壌物理研究会編：土の物理学 - 土質工学の基礎 - ，森北出版，1979.
- 2) 日本粘土学会編：粘土ハンドブック第二版，日本粘土学会，

技報堂出版，1987.

- 3) 岩田進午，喜田大三監修：土の環境圏，(株)フジ・テクノシステム，1997.
- 4) Warkentin B.P. and Yong R.N: Shear strength of Montmorillonite and Kaolinite Related to Interparticle Forces, Clay and Clay Minerals, Vol.9, pp.210~218, 1962.
- 5) Torrance, J.K. and Pirnat, M.: Effect of pH on the Rheology of Marine Clay from the Site of the South Nation River, Canada, Landslide of 1971, Clays and Clay Minerals, Vol.32, No.5, pp.384~390, 1984.
- 6) Olson, R.E.: Shearing Strengths of Kaolinite, Illite, and Montmorillonite, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.100, No.GT11, pp.1215~1229, 1974.
- 7) 村上幸利，土倉 泰，鈴木史浩：地すべり粘土の水素イオン濃度と残留強度の関係把握に関する基礎的研究，土木学会大 48 回年次学術講演会，pp.956~957, 1993.
- 8) 亀井健史，佐野博昭：ベントナイトの工学的特性に及ぼす水素イオン濃度指数の影響，地すべり，第 30 巻，第 2 号，pp.30~40, 1993.
- 9) 亀井健史，佐野博昭：水素イオン濃度指数の違いがベントナイトのせん断特性に及ぼす影響，地すべり，第 31 巻，第 3 号，pp.37~42, 1994.
- 10) 亀井健史，佐野博昭：粘性土の強度・変形特性に及ぼす酸性化の影響，土木学会論文集，No.517, -31, pp.189~196, 1995.
- 11) 佐野博昭，山田幹雄，太田 実，能澤真周：酸性移行を呈する土の強度，変形特性に関する研究，土木学会論文集，No.575, -40, pp.159~167, 1997.
- 12) 山本哲朗，大原資生，山内智也，畑岡直樹：間隙水の水素イオン濃度指数が砂質土の液状化に及ぼす影響，第 30 回土質工学研究発表会発表講演集，pp.1037-1038, 1995.
- 13) 山本哲朗，畑岡直樹，真鍋 浩：水素イオン濃度指数の宇部岬粘性土の繰返しせん断強度に及ぼす影響，第 31 回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.1323-1324, 1996.
- 14) 山本哲朗，畑岡直樹，松下英次：庄原粘土の繰返しせん断強度に及ぼす水素イオン濃度指数の影響，第 32 回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.827-828, 1997.
- 15) 松下英次，山本哲朗，岩井 勝：安中ベントナイトの繰返しせん断強度に及ぼす pH の影響，第 33 回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.791-792, 1998.
- 16) 松下英次，山本哲朗，鈴木素之：土のコンシステンシーに及ぼす pH の影響，土木学会論文集，No.617/ -46, pp.283-297, 1999.
- 17) 地盤工学会編：土質試験から学ぶ土と地盤の力学入門，地盤工学会，1995.

(平成 11 年 11 月 30 日受理)