

粘性土の一次元圧密特性に及ぼすpHの影響

松下英次¹・山本哲朗²・鈴木素之³・笹西孝行⁴

¹正会員 博(工) 長野工業高等専門学校助手 環境都市工学科 (〒381-8550 長野県長野市大字徳間716)

E-mail: matsushita@eu.nagano-nct.ac.jp

²正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

E-mail: tyamamot@yamaguchi-u.ac.jp

³正会員 博(工) 山口大学助手 工学部社会建設工学科 (同上)

E-mail: msuzuki@yamaguchi-u.ac.jp

⁴正会員 修(工) 大成建設株式会社 土木本部 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿1-25-1)

E-mail: ssntky00@pub.taisei.co.jp

pHを人工的に変化させた5種類の粘性土について段階载荷による圧密時間一日の一次元圧密試験を実施し、粘性土の圧密特性とpHの関係を検討した。試料のpHの調整には硫酸および水酸化ナトリウムを用いた。その結果、pHの変化によって間隙比の大きさが変化する粘性土と変化しない粘性土があることが分かった。圧密係数および透水係数はpHの値に伴って変化するが、その傾向は粘性土の種類によって異なっていた。一方、pHの値によって体積圧縮係数はほとんど変化しないが、圧縮指数は変化するものとしなものがあることが分かった。走査型電子顕微鏡観察によって土粒子の微視的構造はpHおよび粘土鉱物含有量の影響を受けることが示された。

Key Words: cohesive soil, one-dimensional consolidation, consolidation characteristics, pH, SEM

1. まえがき

土粒子の堆積環境下における化学的条件および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位置までに作用するファン・デル・ワールス力がある。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、イオンの種類や濃度によって、その影響範囲が変化するものである^{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の値に依存し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の相違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。特に上記した界面化学的作用が強く現れる粘土の強度と変形を考

える際には、このような物理・化学的作用を無視することはできず、土粒子の骨格の形成に及ぼすこれらの影響を明らかにしておくことは重要である。

このような観点から土の化学的性質の一つとしてよく用いられるpHと土の強度・変形特性の関係について検討された研究^{4)~19)}がいくつかある。これらのほとんどはpHと強度特性の関係を検討したものであり、変形特性の一つである圧密特性とpHの関係に関する研究数は非常に少ないのが現状である。

そこで本論文では、間隙水の化学的状態を表すpHに着目し、5種類の粘性土を対象にして酸性雨の主成分である硫酸および水溶性に富み容易に土をアルカリ性にできる水酸化ナトリウムにより土のpHをそれぞれ人工的に酸性・アルカリ性に变化させた正規圧密供試体の圧密試験を行い、土の一次元圧密特性に及ぼすpHの影響について検討した。さらに、pHの変化に伴う圧密した土の微視的構造を走査型電子顕微鏡によって観察した結果について検討する。なお、参考文献19)に示すようにpHの変化によって液性限界および塑性限界が変化する傾向はpH調整薬品によらず同じである。ただし、その変化の度合は試料やpH調整薬品によって異なる。以上のことを踏まえ、本研究は土の化学的性質を容

表 - 1 試料の物理的性質および化学的性質

試料名	カオリン粘土	大道粘土	宇部岬粘土	山陽粘性土	本由良粘土
採取地点	岡山県吉永町	山口県秋徳町	山口県宇部市	山口県山陽町	山口県宇部市
ρ_s (g/cm ³)	2.618	2.602	2.598	2.671	2.568
D ₅₀ (mm)	0.007	0.011	0.008	0.036	0.018
D _{max} (mm)	0.2	0.2	0.9	2.0	0.9
w _L (%)	62.0	57.2	59.5	49.7	35.0
w _P (%)	40.2	23.5	30.5	27.9	21.8
I _P	21.8	33.7	29.0	21.9	13.2
F _{clay} (%)	36.1	25.0	45.3	33.8	32.2
F _c (%)	97.7	94.0	96.6	56.3	74.6
(pH) _i	6.8	6.5	7.8	4.8	8.6
土質分類	MH	CH	CH	ML	CL

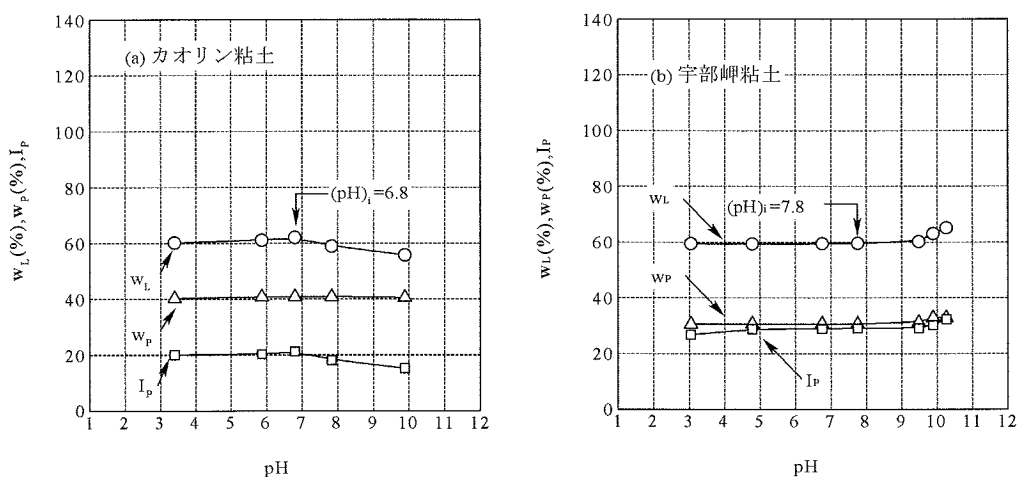


図 - 1 コンシステンシーと pH の関係¹⁹⁾

易に表すことができる pH を用いて pH の変化に伴う各パラメータの増加あるいは減少といった傾向のみを検討するものである。

2. 試料の諸性質

(1) 試料の物理的性質

実験に用いた試料はカオリン粘土、大道粘土、宇部岬粘土、山陽粘性土および本由良粘土の5種類である。これらの試料はいずれも2 mmふるいを通させたものである。

表 - 1にこれら試料の採取地点、物理的性質および初期のpH（以降、(pH)_iという）を示す。土質試験法による沈降分析²⁰⁾の結果から得られたカオリン粘土および大道粘土の粒径加積曲線では、計算上の

仮定で平均的な土粒子の密度を用いていることや粘土分が非常に多い場合には粒子のブラウン運動が卓越して沈降が理論通りに行われないことなどの原因により、75 μm以下の粒子の通過質量百分率が100%を超える結果をえた。そこで、これらの試料には微粒子の大きさを実測し、ブラウン運動などの誤差は見られないレーザー回折粒度分布測定装置を用いて表 - 1中のD₅₀等の粒度特性を求めた。試料の物理的性質をまとめると、w_L=35.0~62.0%、w_P=21.8~40.2%、I_P=13.2~33.7、D₅₀=0.007~0.036 mm、F_{clay}=25.0~45.3%、F_c=56.3~97.7%である。これらの試料は液性限界からみると比較的低塑性の試料であるが、土質分類上、低塑性から高塑性の粘土およびシルトに分類される。

また、試料の(pH)_iは4.8~8.6であり、その平均値は6.9である。

表 - 2 試料に含有する主要粘土鉱物とその他の鉱物

試料名	主要粘土鉱物	その他の鉱物
カオリン粘土	カオリナイト	石英
大道粘土	カオリナイト	石英
宇部岬粘土	イライト	石英
山陽粘性土	カオリナイト	石英
本由良粘土	スメクタイト	石英

表 - 3 粘土鉱物含有量(%)

回折角 2θ (°)	カオリン粘土	大道粘土	宇部岬粘土	山陽粘性土	本由良粘土
カオリナイト 12.3°	98	34	—	15	—
イライト 8.8°	—	—	18	—	—
スメクタイト 5.7°	—	—	—	—	5

図 - 1にそれぞれ代表としてカオリン粘土および宇部岬粘土の液性限界，塑性限界および塑性指数とpHの関係¹⁹⁾を示す．コンシステンシーとpHの関係には2種類ある．本研究に用いた試料では，カオリン粘土，大道粘土および山陽粘性土はpHの増加に対していったん増加した後，減少する．それに対して宇部岬粘土および本由良粘土はpHの増加に対して増加する傾向である．

(2) 試料の鉱物組成

表 - 2に各試料に含まれる主要粘土鉱物およびその他の鉱物を示す．ここで主要粘土鉱物はX線回折試験（粉末法）の回折強度を既存のデータ²⁾と照合することにより同定した．主要粘土鉱物はカオリナイト，イライトおよびスメクタイトの3種類である．その他の鉱物としてすべて石英が含まれる．

また，これらの試料は粒度分布上，粘土あるいはシルトに分類されるものであっても，その粘土分およびシルト分の中に含有される粘土鉱物の量が問題である．しかし，粘土鉱物の定量化は非常に難しく，特に定量化に用いる標準鉱物つまり純粋な鉱物入手することが非常に困難である．そこで，今回はX線回折試験により純粋であることを確認したカオリナイトを用いて以下の方法で各試料の粘土鉱物の含有量を調べた．まず，純粋なカオリナイトに純粋な石英を加え，図 - 2に示すカオリナイトと石英の回折強度比 I_q/I_k と質量比 m_q/m_k の関係を求める．図 - 2中の I_q および I_k はそれぞれ石英のX線回折角 $2\theta = 26.4^\circ$ およびカオリナイトのX線回折角 $2\theta = 12.3^\circ$ における回折強度， m_q および m_k はそれぞれ石英およびカオリナイトの質量を表している．ここで，回折強度比と質量比の関係は一般的に直線関係であることは知られている²⁾．本実験では簡易的に

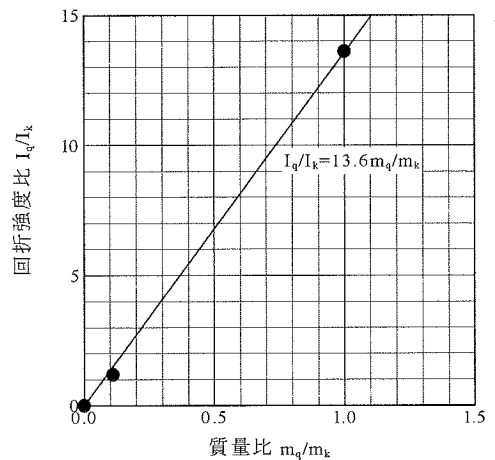


図 - 2 カオリナイトと石英の回折強度比と質量比の関係

行なっていることから，石英が含まれていないことを確認した原点と他の2点の計3点により直線関係を得た．比較的純粋であるカオリン粘土にはカオリナイトと石英のみが含まれると考え，図 - 2を用いてカオリナイトの含有量を求めたところ，その結果97.8%となった．この結果から，カオリン粘土はほぼ純粋なカオリナイトからなり，このカオリン粘土を標準試料として使い，それぞれの試料にカオリン粘土を質量比で1:1の割合で加え，X線回折試験を行って回折強度比を調べた．これにより大道粘土および山陽粘性土の主要粘土鉱物であるカオリナイトの含有量が概略求まる．宇部岬粘土および本由良粘土の場合は，主要粘土鉱物がイライトおよびスメクタイトであることから，これらの鉱物が等量存在するときの回折強度比は多くの研究者によって調べられている^{2), 21)}．その値はカオリナイト (2θ

表 - 4 試料の化学組成(%)

試料名	カオリン粘土	大道粘土	宇部岬粘土	山陽粘性土	本由良粘土
SiO ₂	47.51	61.10	56.32	70.92	62.89
TiO ₂	0.35	0.46	1.18	0.71	0.59
Al ₂ O ₃	36.91	25.14	16.20	16.40	21.71
Fe ₂ O ₃	1.10	2.03	6.48	5.56	2.57
MnO	0.01	0.04	0.13	0.03	0.03
MgO	0.08	0.25	2.30	0.26	0.43
CaO	0.02	0.75	4.09	0.05	0.84
Na ₂ O	0.18	0.83	2.06	0.11	2.54
K ₂ O	1.59	2.89	2.24	2.30	4.04
P ₂ O ₅	0.01	0.00	0.18	0.03	0.01
Ig.Loss	14.19	8.21	12.22	6.42	5.07

表 - 5 試料の Al₂O₃ および MgO の合計(%)

試料名	カオリン粘土	大道粘土	宇部岬粘土	山陽粘性土	本由良粘土
Al ₂ O ₃	36.91	25.14	16.20	16.40	21.71
MgO	0.08	0.25	2.30	0.26	0.43
Total	36.99	25.39	18.50	16.66	22.14

=12.3°) : イライト (2θ=8.8°) : スメクタイト (2θ=5.7°) は 1.0 : 1.0 : 3.6 である。この値を用いて含有量を概略算出した。

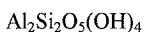
回折強度比より得られた粘土鉱物の含有量の概略値を表 - 3 に示す。表 - 3 よりカオリン粘土に含まれる主要粘土鉱物は他に比べ、98 % と極めて多いことが分かる。また、大道粘土は比較的他の試料より多く 34 % であった。宇部岬粘性土、山陽粘性土および本由良粘土ではそれぞれ 18 %、15 %、5 % で比較的少ないことが分かる。

(3) 試料の化学組成

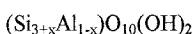
表 - 4 に各試料の化学組成を示す。ここで化学組成は蛍光 X 線分析試験によって分析し、酸化物としての分析項目は SiO₂、TiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、MnO、MgO、CaO、Na₂O、K₂O、P₂O₅ および 強熱減量 Ig.Loss である。いずれの試料においても SiO₂ の含有率が高く、MnO および P₂O₅ の含有率が低い。また、CaO、Na₂O および K₂O の含有率は試料によって大きく異なっている。

また、2. (2) で示したそれぞれの試料の主要粘土鉱物の構造式²⁾ を見てみると次のようになる。

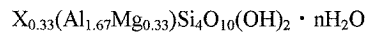
カオリナイト



イライト



スメクタイト



上式のようにカオリナイト、イライトおよびスメクタイトは Al、Mg などの含水層状ケイ酸塩²⁾ であり、長石などの Al、Mg などが含まれている鉱物がないと仮定した場合、Al、Mg の含有量を見ることによって各試料の粘土鉱物の量が概略判別できるものとする。そこで表 - 4 に示した各試料の Al₂O₃ および MgO の値とその合計を表 - 5 に示す。カオリン粘土および大道粘土の (Al₂O₃ + MgO) 含有率は宇部岬粘土、山陽粘性土および本由良粘土のそれらより比較的多いことが分かる。このことから先述した仮定が成立した場合、カオリン粘土および大道粘土では粘土鉱物が比較的多く、宇部岬粘土、山陽粘性土および本由良粘土では粘土鉱物が比較的少ないことが考えられる。

3. 実験概要

(1) pH 調整方法²²⁾

pH 調整薬品として (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。①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。②試料の含水比が

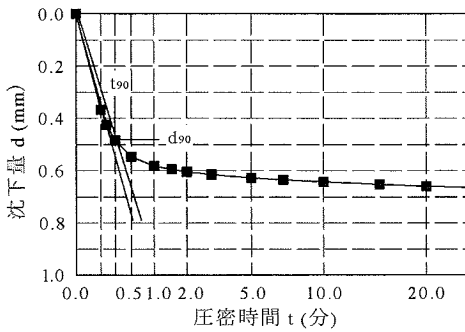


図 - 3 カオリン粘土 pH=10.7, $p=1254.4\text{kN/m}^2$ における沈下量と圧密時間の関係

(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①の水溶液を加え攪拌してスラリー状にする。③スラリー状試料を 1 日放置して、所定の pH になっていることを pH メーターを用いて確認する。このとき、所定の pH の値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所定の pH をもつ試料を作製する。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 の値が存在することを示唆している。これにより、試料の pH が所定の pH の値を超えた場合には、(pH)_iの試料を加えて pH を調整することにした。なお、(pH)_iの試料を作製する場合には、pH 調整薬品を加えた水溶液の代わりに純水を用いる。

(2) 一次元圧密試験

上記 (1) で作製した pH が異なるスラリー試料を直径 6 cm、高さ 2 cm の圧密リングに詰め、一次元圧密試験²⁰⁾を行った。圧密応力 p は $p=9.8 \rightarrow 19.6 \rightarrow 39.2 \rightarrow 78.4 \rightarrow 156.8 \rightarrow 313.6 \rightarrow 627.2 \rightarrow 1254.4 \rightarrow 9.8 \text{ kN/m}^2$ のように段階荷重した後、除荷した。各段階での圧密時間は 1 日とする。各試料の pH は $\text{pH}=2.7 \sim 11.6$ の範囲で 5 通りに変化させている。圧密試験中に、pH の値を一定に保つことに留意しなければならない。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生じていないことを確認している。

ここで、本研究に用いた試料の含水比は液性限界の 1.5 倍 ~ 2.0 倍を用いている。その結果、 1254.4 kN/m^2 荷重時の供試体高さが $0.6 \text{ cm} \sim 1.0 \text{ cm}$ となり、試験時の一次元圧密終了時間が早くするため、細心の注意をはかり、圧密時間および圧密沈下量の測定を

行った。一例として最も供試体高さが小さくなり、測定精度が懸念されるカオリン粘土の $\text{pH}=10.7$ の $p=1254.4 \text{ kN/m}^2$ の結果を図 - 3 に示す。図に示すように t_{90} の測定は十分できるものであった。その他の試料についても同様であり、測定精度は確保できるといえる。

(3) 走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察

pH が異なる試料の微視的構造を調べるため、走査型電子顕微鏡 (以下、SEM とする) で観察する。観察には上記 (1) で作製したスラリー試料を大型圧密装置 (直径 31 cm) に詰め、一次的に圧密した試料を用いた。ここで、試料の高さは $20 \text{ cm} \sim 25 \text{ cm}$ に設定し、同一試料において pH を変化させても同じ高さを採用した。鉛直圧密応力 p は $p=9.8 \rightarrow 19.6 \rightarrow 49.0 \rightarrow 98.0 \text{ kN/m}^2$ のように段階荷重し、圧密時間は第 1~3 段階では 1 日、第 4 段階では 7 日とした。圧密の打ち切りの目安は 3t 法に基づいて決定している。

このようにして作製した試料から SEM 用試料を切り出し、質量が一定となるまで自然乾燥状態で 3~7 日間乾燥した後、さらに質量が一定となるまで 110°C で炉乾燥させ、直径 1 cm の台座に載せ、土粒子構造の観察を行う。このとき撮影面は一次元圧密時の圧密応力の荷重方向と垂直な方向から撮影する。

ここで、一般的に 110°C で乾燥させると、収縮によって微視的構造が変化することが言われている。しかし、SEM は少量の水分でも残っていると試験機に甚大な影響が発生するため、本研究では炉乾燥を行った。このことによる微視的構造の変化はあるものと考えるが、その構造を概略観察できるものである。また、SEM による圧密応力の荷重方向の面については直径 1 cm の台座に約 $2 \text{ mm} \sim 5 \text{ mm}$ を乗せているため、荷重方向を規定するのは非常に困難であったため本研究においては観察をしていない。

4. pH が異なる粘性土の圧密特性について

(1) 間隙比と圧密時間の関係

図 - 4 および図 - 5 に代表例としてそれぞれ pH が異なるカオリン粘土および宇部岬粘土の圧密応力 $p=9.8, 78.4$ および 1254.4 kN/m^2 における間隙比の変化量 Δe と圧密時間 t の関係を示す。

カオリン粘土 (図 - 4) の場合、 $t=1440$ 分における pH の違いによる間隙比の変化量の最大の差は $p=9.8 \text{ kN/m}^2$ の場合に 1.265、 $p=78.4 \text{ kN/m}^2$ の場合に 0.058、 $p=1254.4 \text{ kN/m}^2$ の場合に 0.023 となり、圧密応力が

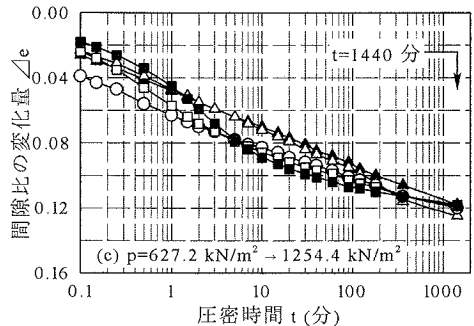
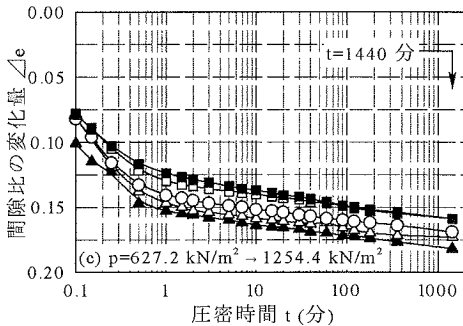
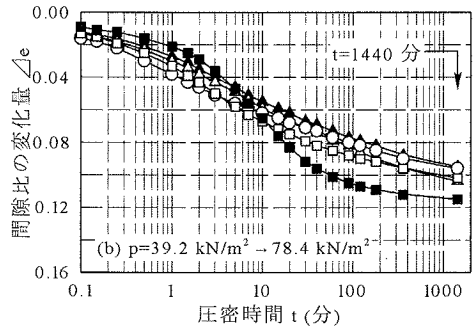
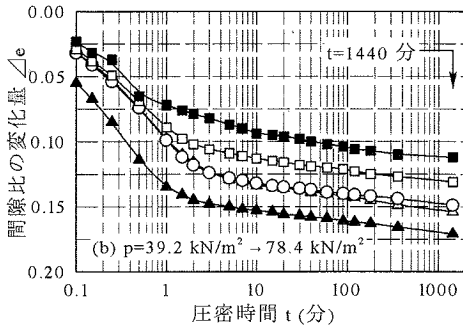
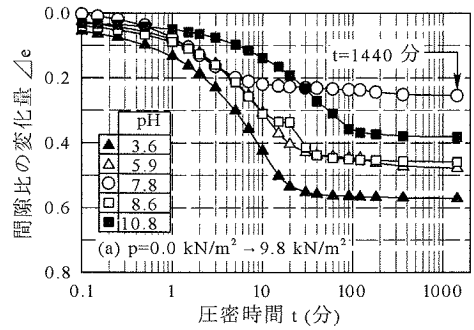
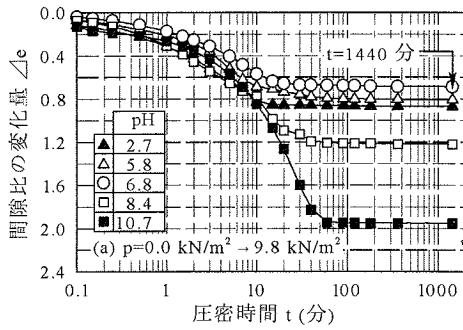


図 - 4 間隙比の変化量と圧密時間の関係
(カオリン粘土)

図 - 5 間隙比の変化量と圧密時間の関係
(宇部岬粘土)

大きくなるとその差はほとんどない。

宇部岬粘土(図 - 5)の場合、 $t=1440$ 分における pH の違いによる間隙比の変化量の最大の差は $p=9.8$ kN/m^2 の場合に 0.317、 $p=78.4$ kN/m^2 の場合に 0.019、 $p=1254.4$ kN/m^2 の場合に 0.007 であり、カオリン粘土と同様に $p=9.8$ kN/m^2 の場合にその差は最も大きく、圧密応力が大きくなるとその差はほとんどない。

また、両試料とも各圧密応力段階で pH の値によって一次圧密時間が異なっている。その他の試料についても同様な傾向が見られている。

以上のことから pH の値によって圧密挙動が異なり、圧密特性が pH の値によって変化することが示

唆される。以下に pH が異なる粘性土の一次元圧密特性について順次述べることにする。なお、本研究において二次圧密特性に及ぼす pH の影響について検討してみたが、一定の関係が見られなかった。その原因として、先述したように 1254.4 kN/m^2 載荷時の供試体高さが 0.6~1.0 cm 程度と小さいため、マイクロポアからの排水を主とする二次圧密の影響をとらえることができなかったものとする。よって、本研究では一次圧密特性のみを対象とした検討を行っている。

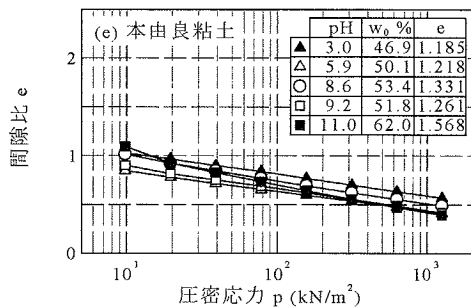
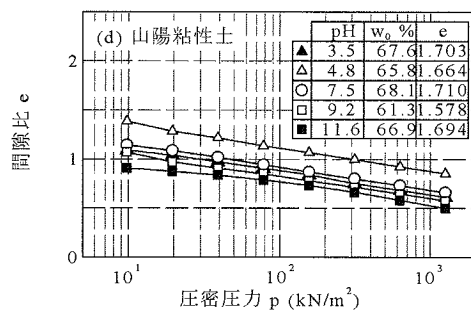
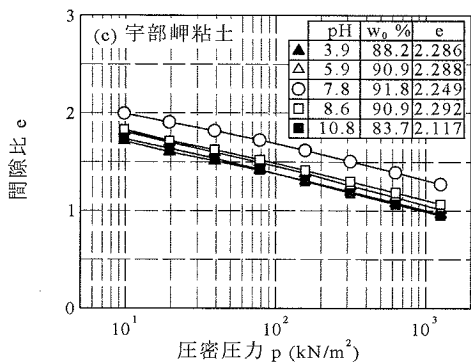
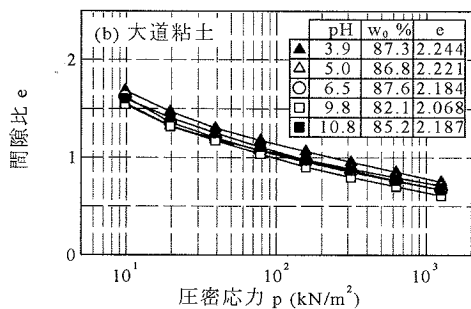
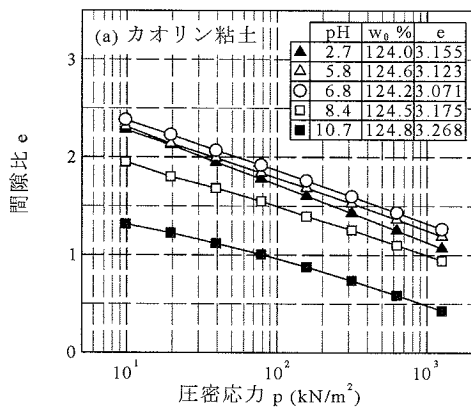


図 - 6 pH が異なる試料の間隙比と圧密応力 p の関係

(2) 間隙比と圧密応力 p の関係

図 - 6(a) ~ (e) にそれぞれ pH が異なるカオリン粘土、大道粘土、宇部岬粘土、山陽粘性土および本由良粘土の間隙比 e と圧密応力 p の関係を示す。また、代表として図 - 7(a), (b) にそれぞれカオリン粘土および宇部岬粘土の間隙比と pH の関係を示す。ここで、図中の数値は圧密応力 p を表し、下向きの矢印はその方向に圧密応力が順に増加していることを表している。

図 - 6(a) および図 - 7(a) のカオリン粘土の場合、各圧密応力段階で間隙比の大きさは (pH) = 6.8 で最も大きく、これより pH を増加あるいは減少させても

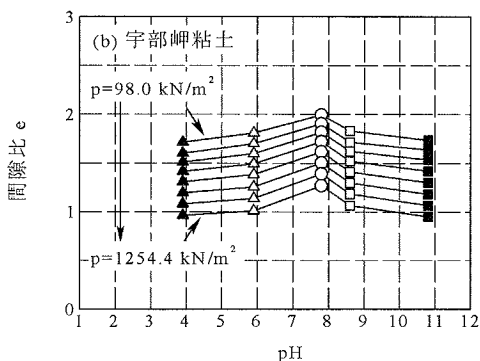
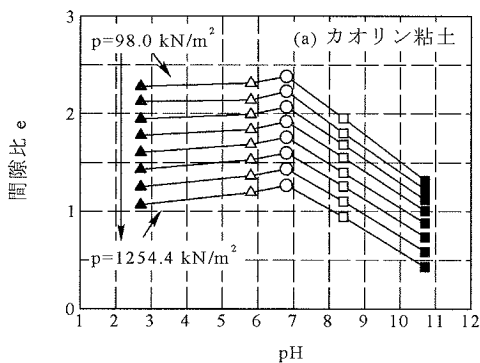


図 - 7 間隙比と pH の関係

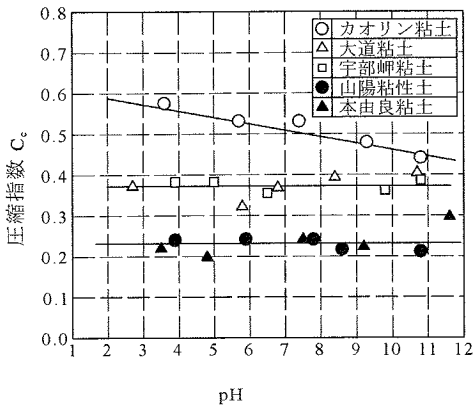


図 - 8 圧縮指数と pH の関係

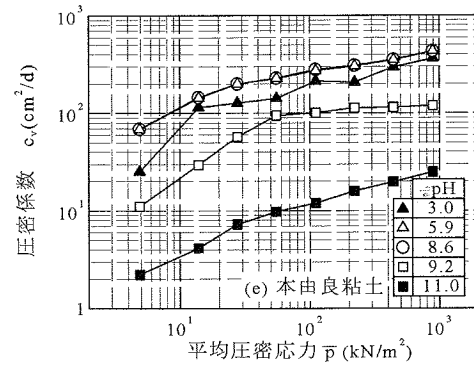
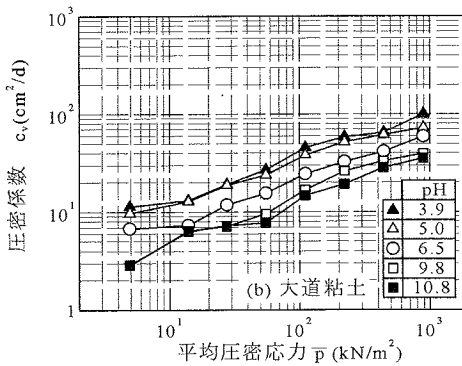
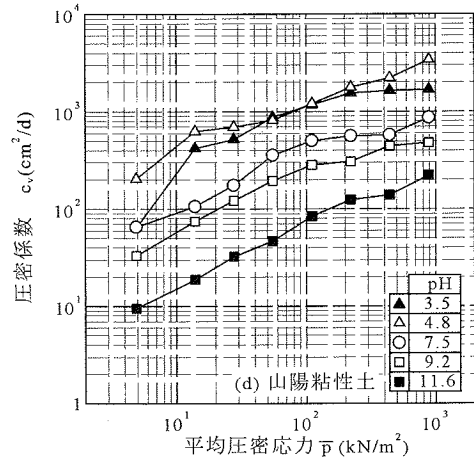
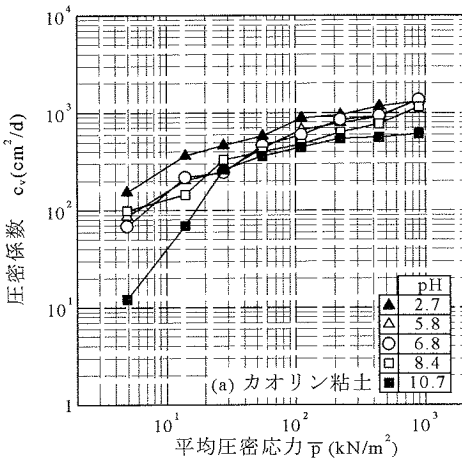
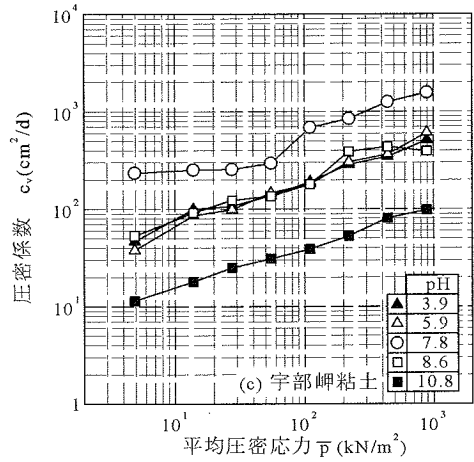


図 - 9 pH が異なる試料の圧密係数と平均圧密応力の関係

間隙比は減少している。

図 - 6(c) および図 - 7(b) の宇部岬粘土および図 - 6(d) の山陽粘性土の場合、各圧密応力段階で pH の値の違いによる間隙比の変化はカオリン粘土の場合と

同様の傾向をしているが、間隙比の差は小さく、間隙比と圧密応力の関係はほぼ同様の傾向を示しているとみなすことができる。

図 - 6(b) の大道粘土および図 - 6(e) の本由良粘

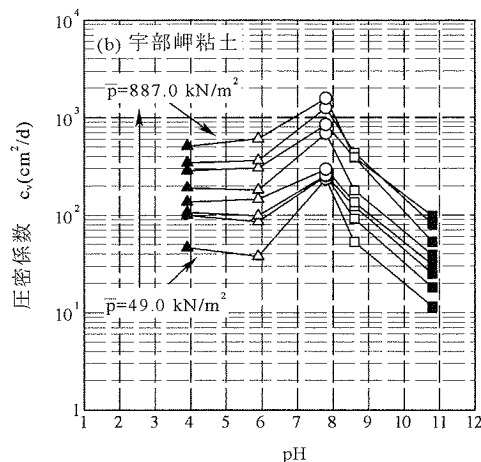
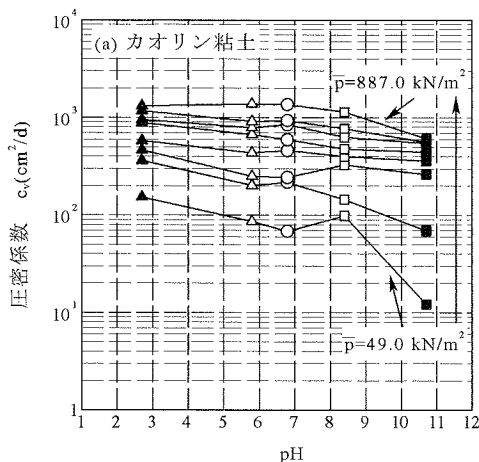


図 - 10 圧密係数と pH の関係

土の場合、各圧密応力段階で間隙比の大きさは pH の値によって若干のばらつきがあるものの、pH の値によらず間隙比と圧密応力の関係はほぼ同様の傾向を示していると思なすことができる。

図 - 6(a) ~ (e) に示した直線部分の傾きである圧縮指数 C_c と pH の関係を図 - 8 に示す。各試料の圧縮指数はカオリン粘土を除き pH の変化に対して若干の変化はあるものの、土質工学的に見て各試料について圧縮指数は図中に示すように pH に依存せずに一定であると判断して一本の水平線を記した。それに対してカオリン粘土は pH の増加に対して減少するという傾向を得た。

(3) 圧密係数と平均圧密応力の関係

図 - 9(a) ~ (e) にそれぞれ pH が異なるカオリン粘土、大道粘土、宇部岬粘土、山陽粘性土および本由良粘土の圧密係数 c_v と平均圧密応力 \bar{p} の関係を示す。また、代表として図 - 10(a) ~ (b) にそれぞれカオリン粘土および宇部岬粘土の間隙比と pH の関係を示す。ここで、図中の数値は平均圧密応力 \bar{p} を表し、上向きの矢印はその方向に平均圧密応力が順に増加していることを表している。

図 - 9(a) および図 - 10(a) のカオリン粘土の場合、各平均圧密応力において pH=2.7 で圧密係数は最も大きく、これより pH が増加すると圧密係数は減少している。カオリン粘土の場合と同様の傾向を示す試料には図 - 9(b) の大道粘土がある。

図 - 9(c) および図 - 10(b) の宇部岬粘土の場合、カオリン粘土とは異なり、各平均圧密応力で圧密係数は (pH)_i=7.8 で最も大きく、これより pH を増加あるいは減少させても圧密係数は減少している。宇部

岬粘土の場合と同様の傾向を示す試料には図 - 9(d) の山陽粘性土および図 - 9(e) の本由良粘土がある。

(4) 体積圧縮係数と平均圧密応力の関係

図 - 11(a) ~ (e) にそれぞれ pH が異なるカオリン粘土、大道粘土、宇部岬粘土、山陽粘性土および本由良粘土の体積圧縮係数 m_v と平均圧密応力 \bar{p} の関係を示す。

$\bar{p}=4.9 \text{ kN/m}^2$ から 13.9 kN/m^2 にかけて若干のばらつきがあるものの、すべての試料において体積圧縮係数と平均圧密応力との関係には pH の値による差異は見られない。

(5) 透水係数と平均圧密応力の関係

図 - 12(a) ~ (b) にそれぞれ代表として pH が異なるカオリン粘土および宇部岬粘土の透水係数 k と平均圧密応力 \bar{p} の関係を示す。透水係数は圧密係数、体積圧縮係数および水の単位体積重量の関数で表され、先述したように各試料の体積圧縮係数が pH の値によって変化しないことから、透水係数と平均圧密応力の関係は圧密係数と平均圧密応力の関係とほぼ同様の傾向を示している。

ここで、一般的に透水係数は間隙比に依存することが考えられている。しかし、本実験の結果から透水係数は間隙比の大きさがほぼ同じであっても pH の値によって 10 倍から 20 倍程度異なるものがあつた。この原因としては、例えば綿毛構造のような構造では、スポンジなどの多孔質なものと同じ構造であり、水を通した場合には水はかなり流れやすいことがわかる。それに対して、配向構造のような構造では板を積み上げたような構造であり、上から水

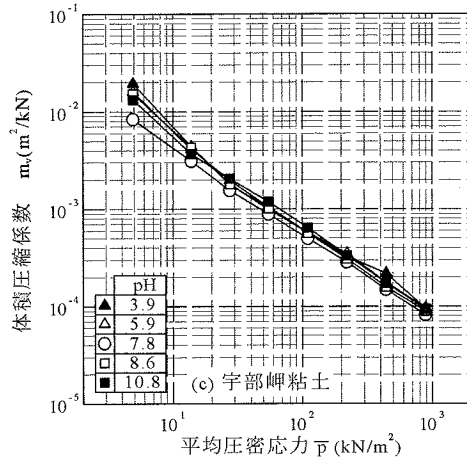
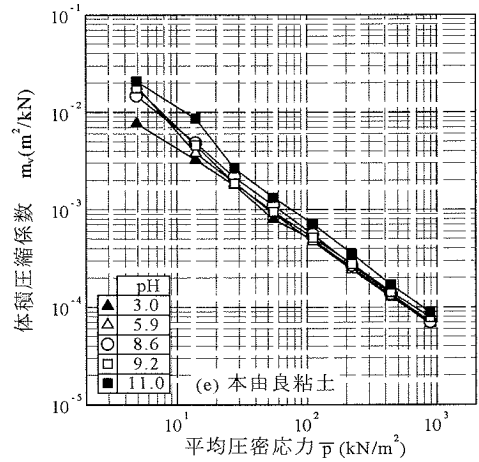
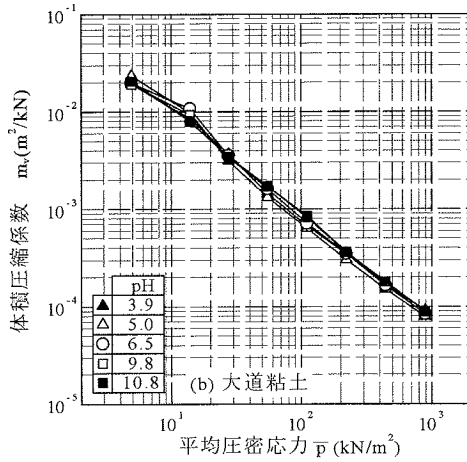
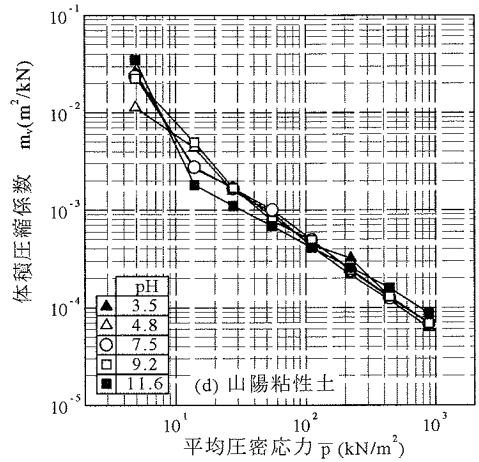
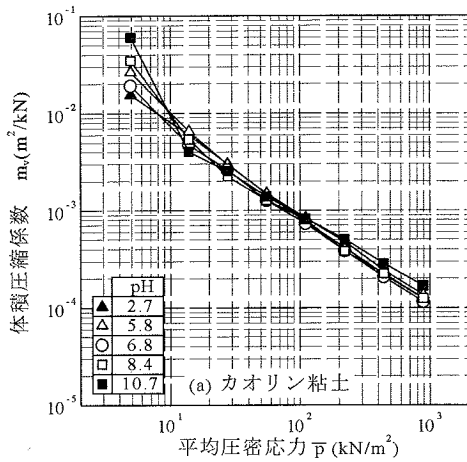


図 - 11 pH が異なる試料の体積圧縮係数と平均圧密応力の関係

ことが予想される。

(6) 粘土鉱物含有量と圧密特性

以上のように、pH が異なる粘性土の圧密係数および透水係数と平均圧密応力の関係には 2 つの傾向があることを示した。これら 2 つの傾向は 2. で述べた粘土鉱物含有量の多いものと少ないものに分類できる。粘土鉱物含有量が比較的多いカオリン粘土および大道粘土では粒子間の相互干渉つまり粒子間の引力および斥力が強く作用する粘土粒子が多く存在していることが考えられる。これに対して宇部岬粘土、山陽粘性土および本由良粘土では粘土粒子が少なく、粒子間の引力および斥力が弱いことが考えられる。そのため、圧密応力 $p=9.8$ kN/m² 載荷時に pH の違いに応じて形成される土粒子の骨格構造が

を流してもその水の流れは大きく阻害されることが予想される。本研究においても pH を変化させることにより、このように土粒子の骨格構造が変化した

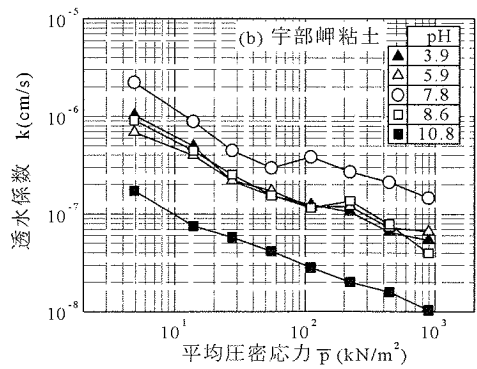
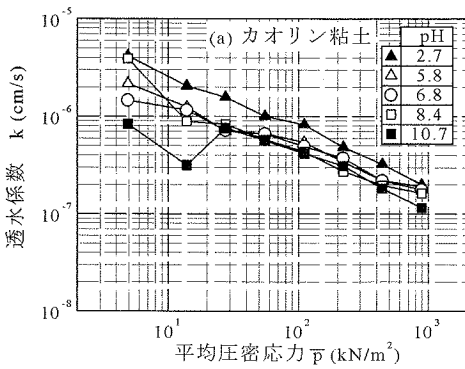
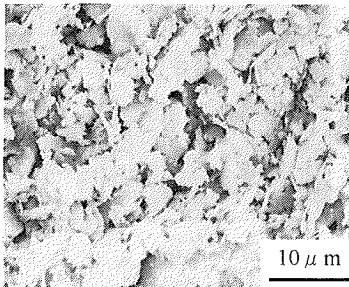
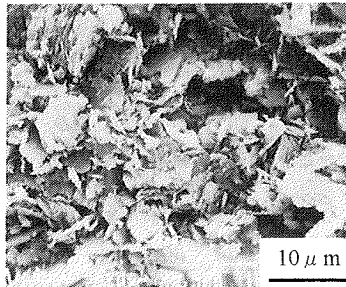


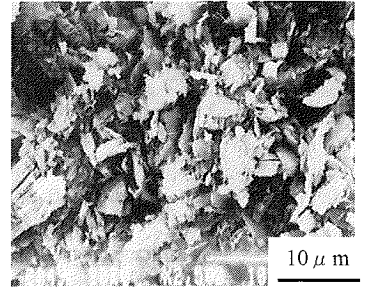
図 - 12 pH が異なる試料の透水係数と平均圧密応力の関係



(a) pH=3.9

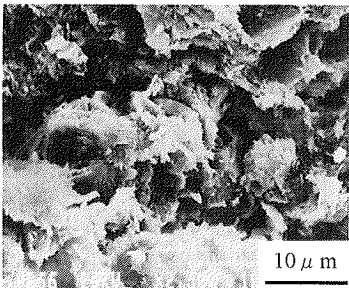


(b) (pH)_i=6.8

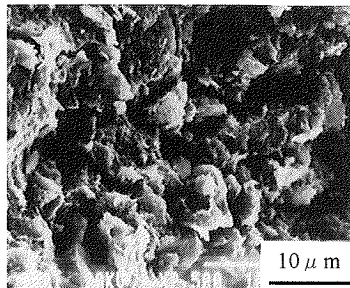


(c) pH=8.6

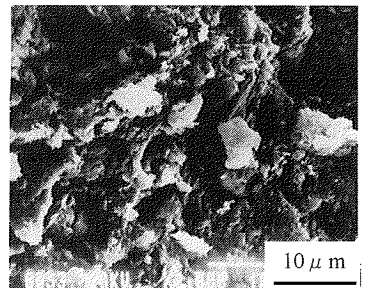
写真 - 1 カオリン粘土の SEM 写真



(a) pH=3.9



(b) (pH)_i=6.5



(c) pH=10.8

写真 - 2 大道粘土の SEM 写真

試料によって相違し、このことが圧密係数および透水係数に影響したものと考えられる。

また、pH の値による引力および斥力の関係は次章で述べる。

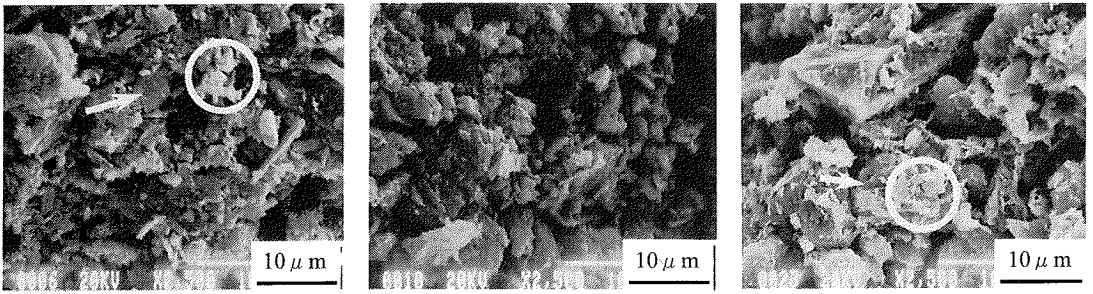
5. pH が異なる粘性土の微視的構造

前章では各試料の圧密係数、透水係数は pH の値によって著しく相違することを示した。この原因を明らかにするため、各試料についてそれぞれの pH

の下で圧密時に形成された土の骨格構造の変化を SEM 観察によって調べた。

写真 - 1~5 (a)~(c)にそれぞれ pH が異なるカオリン粘土、大道粘土、宇部岬粘土、山陽粘性土および本由良粘土の一次元圧密時の圧密応力載荷方向と垂直な方向から撮影した SEM 写真を示す。ここで写真中に白く見える部分は土粒子部分、影の部分は間隙部分である。また、写真 - 6, 7 (a)~(c)にはカオリン粘土および宇部岬粘土の土粒子の輪郭を黒く強調するため、画像処理を施した写真を示す。

写真 - 1 に示すカオリン粘土の土粒子の輪郭を強

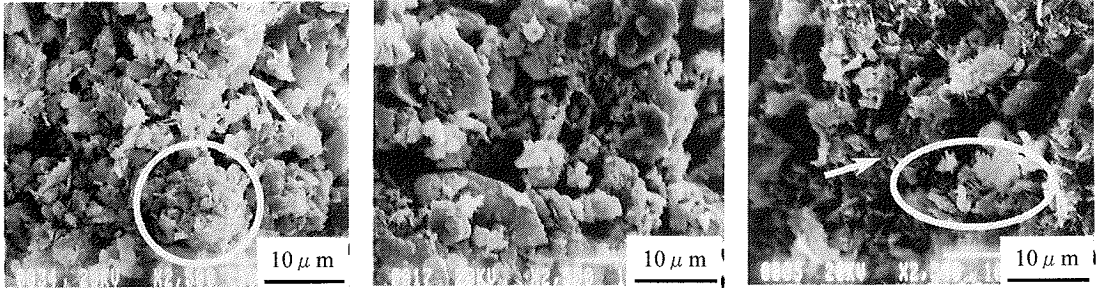


(a) pH=3.9

(b) $(\text{pH})_i=7.8$

(c) pH=10.8

写真 - 3 宇部岬粘土の SEM 写真

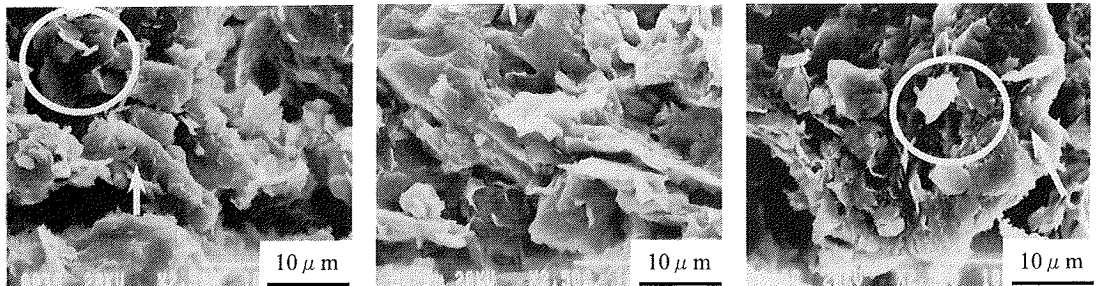


(a) pH=3.5

(b) $(\text{pH})_i=4.8$

(c) pH=9.2

写真 - 4 山陽粘性土の SEM 写真



(a) pH=5.9

(b) $(\text{pH})_i=8.6$

(c) pH=9.2

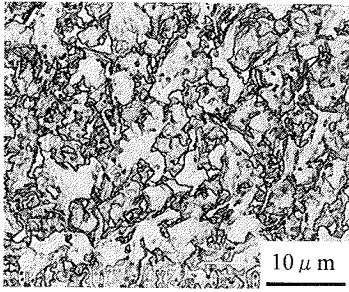
写真 - 5 本由良粘土の SEM 写真

調した写真 - 6 を見ると (a) から (c), つまり酸性からアルカリ性に移行するに従い, 面の部分が少なくなり, 土粒子の配列が蜂の巣のような状態から徐々に平行に堆積する土粒子構造に変化しているように見受けられる。これは図 - 13(a), (b) に示す Yong and Warkentin²³⁾ がまとめ発展させた土粒子表面の拡散イオン層が関与した土粒子相互の引力と斥力によって説明できる。酸性側では拡散電気二重層の形成が小さくなり, 粘土粒子同士が結合し易い形態となる。さらに粘土粒子の端面に存在する pH の値によってその電荷を変化させる pH 依存荷電が正に帯電し, 粘土粒子表面に存在する負の永久荷電とが結合する端-面構造を形成して図 - 13(a) に示す綿毛構造

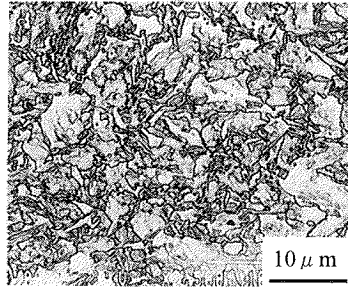
を呈したことが考えられる。それに対してアルカリ性側では拡散電気二重層の形成が大きくなり, 粘土粒子間に斥力が発生する。さらに負に帯電した pH 依存荷電と負の永久荷電との間に斥力が発生して図 - 13(b) に示す配向構造を呈したものと考えられる。また, $(\text{pH})_i=6.8$ では土粒子が不規則に並んでおり, 綿毛構造と配向構造の中間的状態であるランダム構造を呈していることが考えられる。

写真 - 2 に示す大道粘土ではカオリン粘土ほど土粒子の骨格構造ははっきりとしていないが, 酸性側では綿毛構造, アルカリ性側では配向構造を呈しているようである。

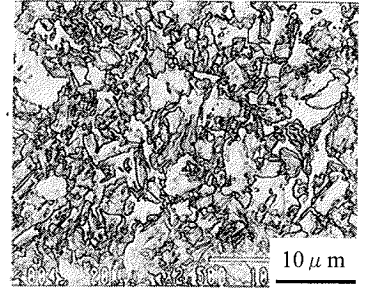
写真 - 3, 7 に示す宇部岬粘土においては粒径の



(a) pH=3.9



(b) (pH)_i=6.8

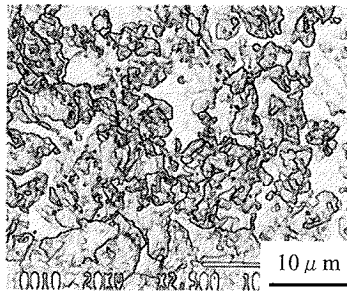


(c) pH=8.6

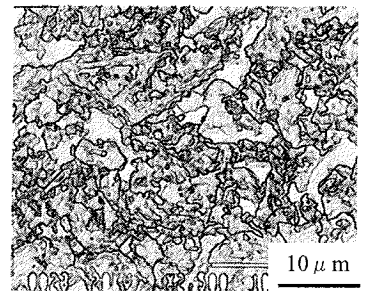
写真 - 6 カオリン粘土の SEM 写真



(a) pH=3.9

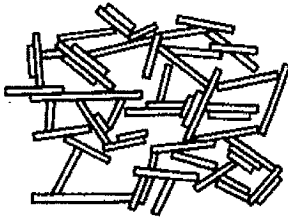


(b) (pH)_i=7.8



(c) pH=10.8

写真 - 7 宇部岬粘土の SEM 写真

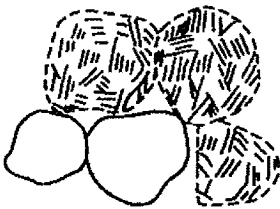


(a) 綿毛構造²³⁾

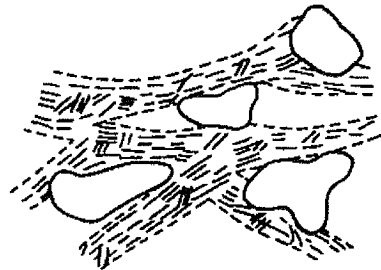


(b) 配向構造²³⁾

図 - 13 Yong and Warkentin²³⁾の土の構造モデル



(a) 規則ペット構造²⁴⁾



(b) 織込みペット構造²⁴⁾

図 - 14 Collins and McGown²⁴⁾の土の構造モデル

大きな土粒子が多く存在するため、その構造について言及することは難しく、綿毛構造や配向構造といった骨格構造は顕著に見受けられない。しかし、写真 - 3 の矢印で示す大きな土粒子の周りに白線で囲ったような粘土粒子が凝集体つまりペット^{24), 25)}を形成していることが分かる。その形状は図 - 14 (a), (b)に示す Colins and McGown²⁴⁾の規則ペット構造あるいは織込み状ペット構造である。酸性側で図 - 14 (a)に示す団子状の規則ペット構造、アルカリ性側では図 - 14 (b)に示す大きな土粒子表面を覆うような織込み状ペット構造である。これらの凝集体はカオリン粘土と同様に酸性側では拡散電気二重層の形成が小さくなり、粘土粒子同士が結合し易い形態となる。さらに粘土粒子の pH 依存荷電が正に帯電し、粘土粒子表面に存在する負の永久荷電が結合する端-面構造を形成して綿毛構造を呈した凝集体が形成されたことが予想される。粘土粒子が粒状の土粒子の周りにさまざまな大きさで凝集体を形成し、間隙を埋め

尽くすものと考えられる。これにより間隙部分の水の流れを阻害し、透水性が悪くなることが考えられる。それに対してアルカリ性側では拡散電気二重層の形成が大きくなり、粘土粒子間に斥力が発生する。さらに負に帯電した pH 依存荷電と負の永久荷電との間に斥力が発生して配向構造を呈したものが大きな土粒子表面を覆うように存在したことが考えられる。それに伴い、間隙部分には配向構造を呈した帯状のものが存在するため透水性が悪くなることが考えられる。(pH)_i=7.8 ではペットの形成が顕著ではない。このことから、宇部岬粘土においても pH を変化させることによって何らかの微視的構造の変化があるものと推測される。

写真 - 4 に示す山陽粘性土および写真 - 5 に示す本由良粘土においても、矢印で示す大きな土粒子の周りに丸で囲った粘土粒子が形成するペットが存在しており、宇部岬粘土と同様の傾向であることがわかる。

以上を総括すると、土粒子が形成する骨格構造は 2. で述べた粘土鉱物含有量によって分類することができる。粘土鉱物含有量が比較的多いカオリン粘土および大道粘土は酸性側で透水係数が大きくなる綿毛構造、アルカリ性側で透水係数が小さくなる配向構造が卓越したことが考えられる。

一方、粘土鉱物含有量が比較的小さい宇部岬粘土、山陽粘性土および本由良粘土では(pH)_iの場合で土粒子がランダムに存在して透水性が良く、この pH を増加あるいは減少させると大きな土粒子間に粘土粒子が透水性の悪い凝集体つまりペットを形成した

骨格をもって存在するため、透水係数が減少したことが考えられる。

さらに、粘土鉱物含有量の多少によってその構造が変化する原因として、1. で述べたように粘土鉱物は pH の値によってその電荷は変化することが知られている。そのような粘土鉱物が多い場合、粘土鉱物同士の電荷による影響が大きく、少ない場合にはその影響が小さいからである。

6. 結論

今回用いた pH を変化させた 5 種類の試料の一次元圧密試験および SEM 観察によって得られた結論は以下のとおりである。

- 1) pH が異なる試料の間隙比と圧密応力の関係は、粘土鉱物含有量が比較的小さい試料、例えば宇部岬粘土では pH の値によって若干の違いはあるもののその差は小さく pH の値によってほとんど変化しない。しかし、粘土鉱物含有量が極めて多い試料、例えばカオリン粘土では pH の値によって間隙比の大きさは大きく相違する。
- 2) カオリン粘土を除き圧縮指数は pH の値によって変化しない。カオリン粘土の場合、pH の増加に対して圧縮指数は減少する。
- 3) 圧密係数は pH の値によって 2 通りに変化する。一つは粘土鉱物含有量が比較的多い試料、例えばカオリン粘土のように圧密係数が pH の増加に伴い減少するものである。もう一つは、粘土鉱物含有量が比較的小さい試料、例えば宇部岬粘土のように初期の pH で圧密係数が最も大きく、その pH を増加あるいは減少させると圧密係数が減少するものである。
- 4) 各試料とも体積圧縮係数は pH の値によって変化しない。
- 5) 上記 3), 4) から、透水係数と pH の関係は圧密係数と pH の関係と同様の傾向を示す。
- 6) 圧密時に形成される pH の異なる土の骨格構造には粘土鉱物含有量が大きく影響する。すなわち、粘土鉱物含有量が比較的多い試料の場合、酸性側では綿毛構造、初期の pH でランダム構造、アルカリ性側では配向構造となる。粘土鉱物含有量が比較的小さい試料の場合、骨格構造の明確な分類は困難であるが、初期の pH では土粒子がランダムに存在し、その pH を増加あるいは減少させると大きな粒径の土粒子の周りに粘土粒子はペットを形成する。

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，土木学会第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，Vol.30, No.2, 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，Vol.31, No.3, 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/III-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/III-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) Kamon, M., Ying, C. and Katsumi, T. : Effect of acid rain on lime and cement stabilized soils, *Soils and Foundations*, Vol.36, No.4, pp.91-99, 1996.
- 16) Kamon, M., Ying, C. and Katsumi, T. : Effect of acid rain on physico-chemical and engineering properties of soils, *Soils and Foundations*, Vol.37, No.4, pp.23-32, 1997.
- 18) 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.
- 19) 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/III-46, pp.283-297, 1999.
- 20) 地盤工学会編：土質試験の方法と解説，地盤工学会，2000.
- 21) 白水晴雄：粘土鉱物学 - 粘土科学の基礎 - ，朝倉書店，pp.75~77, 1998.
- 22) 松下英次，山本哲朗，鈴木素之：粘土の物理試験における pH 調整法とその問題点，土と基礎，Vol.49, No.2, pp.25-28, 2001.
- 23) Yong, R.N. and Warkentin, B.P. : Introduction to Soil Behavior, The Macmillan Co., New York, 1966. (山崎不二夫，山内豊聡訳：土質工学の基礎，鹿島出版会，1972.)
- 24) Colins, K. and McGown, A. : The form and function of microfabric features in a variety of natural soil , *Geotechnique*, Vol.24, No.2, pp.223-254, 1974.
- 25) 松尾新一郎，嘉門雅史：粘土の構造に関する用語について，土と基礎，Vol.24, No.1, pp.59-64, 1976.

(2002. 4. 1 受付)

EFFECT OF pH ON ONE-DIMENSIONAL CONSOLIDATION CHARACTERISTICS OF COHESIVE SOILS

Eiji MATSUSHITA, Tetsuro YAMAMOTO, Motoyuki SUZUKI
and Takayuki SASANISHI

In order to clarify the influence of pH on consolidation characteristics of cohesive soils, one-dimensional consolidation test with stage loading was performed on five soil samples in which pH values were artificially changed by adding sulfuric acid and sodium hydroxide solutions. The tests showed that the change in void ratio was influenced and not influenced by pH-value depending on the kind of soil sample. The coefficient of consolidation and the coefficient of permeability were changed with pH-value. The coefficient of volume compressibility hardly changed with the pH value but that the compression index did or did not change with the pH-value. The soil structures formed by the consolidation changed with pH-value and the kind of soil sample.