

pH が異なる一次元圧密された粘性土の微視的構造

笹西孝行 (社会建設工学専攻)

松下英次 (設計工学専攻)

山本哲朗 (社会建設工学科)

鈴木素之 (社会建設工学科)

Microstructure of one-dimensionally consolidated cohesive soil with different pHs

Takayuki SASANISHI (Department of civil engineering)

Eiji MATSUSHITA (Division of design engineering)

Tetsuro YAMAMOTO (Department of civil engineering)

Motoyuki SUZUKI (Department of civil engineering)

In order to clarify the influence of pH on soil structures of one dimensionally consolidated cohesive soils, consolidation tests were performed on six soil samples in which pH values were artificially changed by adding sulfuric acid or sodium hydroxide solutions. A scanning electric microscope made observation of soil structures. It was shown that the soil structures formed by the consolidation changed with pH values and the kind of soil sample. Although acid soil samples formed flocculent structures, alkaline soil samples formed oriented structures. This may be due to the difference of electric charge of soil particles with different pHs.

Key Words: *pH, cohesive soil, soil-structure, one dimensionally consolidation, SEM photograph*

1. はじめに

土粒子の堆積環境の化学的条件および含有粘土鉱物の違いによって、土粒子によって形成される土の骨格構造は大きく異なる。この要因として土粒子間に作用する界面化学的作用が異なり、それに応じて異なる大きさの引力と斥力が作用するためである。土粒子間に作用する引力には比較的弱い力で普遍的に作用するファン・デル・ワールス力がある。それに対して斥力にはイオンの種類や濃度によって影響範囲が異なる電気拡散二重層に起因した電気力がある。

また周辺部の条件によって引力と斥力として作用する pH 依存電荷がある。周辺部の条件とは水素イオン濃度の変化であり、土粒子表面から水素イオンが解離あるいは結合することである。それによって電荷が変化するため pH の値の違いによって引力と斥力が生じるというものである^{1)~3)}。

以上のように土粒子は間隙水の化学的性質の影響を受けやすい。このような土粒子間の力は骨格構造の形成に影響を与えるため土の工学的性質に影響を与えることになる。そこで間隙水の化学的性質の違いによる

土粒子の骨格構造の変化を明らかにすることは重要であると考えられる。

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 pH を人工的に変化させた 6 種類の粘性土を対象にして、pH の変化による一次元圧密後の土粒子の微視的構造変化を走査型電子顕微鏡 (以下、SEM という) 写真を用いて検討したものである。

2. 既往の研究

土の pH 値の違いにより物理的性質や強度・変形特性が大きく異なることが報告されている。その中で土の骨格構造に影響要因とした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。

我が国において村上ら⁴⁾は pH を調整したベントナイトを用いて pH と残留強度との関係を報告している。試料作製時の予備圧密段階で pH が異なると圧密量および圧密の進行速度が異なり、その理由として粘土の構造が大いに関係していると述べている。また、亀井

ら^{5)~7)}はpHを人工的に変化させたベントナイトを用いて圧密定体積試験、一軸圧縮試験および標準圧密試験を行い、ベントナイトとpHの土の工学的性質を明らかにしている。これらの論文では土の構造は酸性側では綿毛構造、アルカリ性側では配向構造が形成されると推測している。さらに、山本ら^{8)~11)}は土の繰返しせん断強度とpHが密接に関係していることを示している。最近では松下ら^{12)~14)}が14種類の試料を用いてコンシステンシー限界とpHの関係を示し、また静的三軸試験および標準圧密試験を行いpHの変化と強度・変形特性との関係を定量的に表す試みがなされている。山本ら、松下らはpHの違いが土粒子に作用している表面電荷を変化させ圧密過程で形成される土の骨格構造を変化させると推測している。

このように現状では土のpHの違いが土の骨格構造を変化させ、その結果、物理的性質や強度・変形特性に影響を与えているのではないかという推測にとどまっており、pHと土の骨格構造の変化だけに着目した研究は見当たらない。今後の課題として土のpHの変化が骨格構造に及ぼす影響を定量的に示すことは重要なことと考えられる。

3. 試料および実験方法

(1) 試料の物理的性質および化学的性質

試料はカオリン粘土、山陽粘性土、大道粘土、本由良粘土、宇部岬粘土および宇部沖粘土の6種類である。

Table 1に試料の物理的性質および化学的性質を示す。ここで、カオリン粘土および大道粘土の粒度試験で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装置¹⁵⁾を用いて求めている。試料の物理的性質をまとめると、 $w_L=35.0\sim110.6\%$ 、 $w_p=21.8\sim42.8\%$ 、

$I_p=13.2\sim67.9$ 、 $D_{50}=0.003\sim0.036\text{ mm}$ 、 $F_{\text{clay}}=25.0\sim96.8\%$ 、 $F_c=56.3\sim97.7\%$ である。カオリン粘土、大道粘土、宇部岬粘土および宇部沖粘土はCH、本由良粘土はCL、山陽粘性土はMLに分類される。試料の化学的性質をみると初期のpH(以下、 $(\text{pH})_i$ とする)は、カオリン粘土は $(\text{pH})_i=6.8$ 、大道粘土は $(\text{pH})_i=6.5$ 、宇部岬粘土は $(\text{pH})_i=7.8$ および宇部沖粘土は $(\text{pH})_i=7.4$ でほぼ中性であり、山陽粘性土は $(\text{pH})_i=4.8$ で酸性であり、本由良粘土は $(\text{pH})_i=8.6$ でアルカリ性である。

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、山陽粘性土および大道粘土の主要粘土鉱物がカオリナイト、本由良粘土の主要粘土鉱物がスメクタイト、宇部岬粘土の主要粘土鉱物がイライトおよび宇部沖粘土の主要粘土鉱物が金雲母であり、6試料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。

(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。このpH調整薬品を純水に加え、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pH調整薬品の水溶液を加え攪拌してスラリー状¹⁶⁾にし、1日放置する。その後、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の値を再調整する。逆に試料の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を再調整する。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。

Table 1 Physical properties, chemical properties and mineral composition of soil samples

	Kaolin clay	Sanyo cohesive	Daido clay	Honyura clay	Ubemisaki clay	Ubeeki clay
ρ_s (g/cm ³)	2.618	2.671	2.602	2.568	2.598	2.58
D_{50} (mm)	0.007	0.036	0.011	0.018	0.008	0.003
D_{max} (mm)	0.2	2.0	0.2	0.9	0.9	1.0
w_L (%)	62.0	49.7	57.2	35.0	59.5	110.6
w_p (%)	40.2	27.9	23.5	21.8	30.5	42.8
I_p	21.8	21.9	33.7	13.2	29.0	67.9
F_{clay} (%)	96.8	33.8	25.0	32.2	45.3	59.8
F_c (%)	97.7	56.3	94.0	74.6	96.6	94.5
Soil classification	CH	ML	CH	CL	CH	CH
$(\text{pH})_i$	6.8	4.8	6.5	8.6	7.8	7.4
Main clay minerals	Kaolinite	Kaolinite	Kaolinite	Smectite	Illite	Phlogopite

(3) 試料の作製方法

pH を調整したスラリー試料をアクリル製大型圧密装置（内径：31 cm，高さ：45 cm）に詰めて一次的に圧密する。鉛直圧密応力 p は $p=9.8 \rightarrow 19.6 \rightarrow 49.0 \rightarrow 98.0$ kPa のように段階的载荷し，圧密日数は第 1～3 段階では 1 日，第 4 段階では 7 日とする。圧密の打ち切りの目安は 3t 法に基づいて決定する。このようにして作製した一次元圧密試料から 2×2 cm 程度の大きさに注意深く切り出し，それを空気乾燥させた後，質量が一定となるまで 110°C で炉乾燥させ，SEM 写真撮影用の試料とする。

(4) SEM 写真撮影方法

それぞれの試料を鉛直圧密応力方向に対して垂直側から撮影できるように 5×5 mm 程度の大きさに切り出し，直径 1 cm，高さ 5 cm の台座に載せ，金蒸着を電流 14 mA の下で 20 分間行った。その後 SEM 装置に設置し，電圧 20 kV の下で写真を撮影した。

4. SEM 写真および考察

Photos.1 (a)～(c)，Photos.2 (a)～(c)，Photos.3 (a)～(c)，Photos.4 (a)～(c)，Photos.5 (a)～(c) および Photos.6 (a)～(c) にそれぞれカオリン粘土，山陽粘性土，大道粘土，

本由良粘土，宇部岬粘土および宇部沖粘土の一次元圧密後の SEM 写真を示す。ここで写真中に白く見える部分を土粒子部分，影の部分を間隙部分とみなした。

Photos.1 のカオリン粘土では Photos.1 (a) から Photos.1 (c)，つまり酸性からアルカリ性に移行するに従い板状の土粒子の配列がランダムな状態から徐々に平行に堆積しているように見受けられた。これは pH 調整を行ったことによって綿毛構造から配向構造に移行したことを示していると推測された。

Photos.2～5 つまり山陽粘性土，大道粘土，本由良粘土および宇部岬粘土では，それぞれの試料で土粒子の大きさは違うものの酸性側からアルカリ性側に移行するにしたがい団粒化した粘土粒子間の間隙部分が増加していることが観察できた。この要因は電荷の影響であり，引力が大きく働く酸性側では密になりやすくアルカリ性側では斥力が働くため間隙部分が多くなると推測された。また，綿毛構造や配向構造といった骨格構造の分類は顕著に見受けられなかった。

Photos.6 の宇部沖粘土においては円筒状の珪藻が存在するため粘土粒子の構造の変化を観察することは困難な状態にあった。宇部沖粘土においては珪藻の影響も考慮した骨格構造の考察が必要とされた。

以上を総括すると，カオリン粘土のような人工粘土では，粘土粒子の形状にばらつきが少ないため pH の

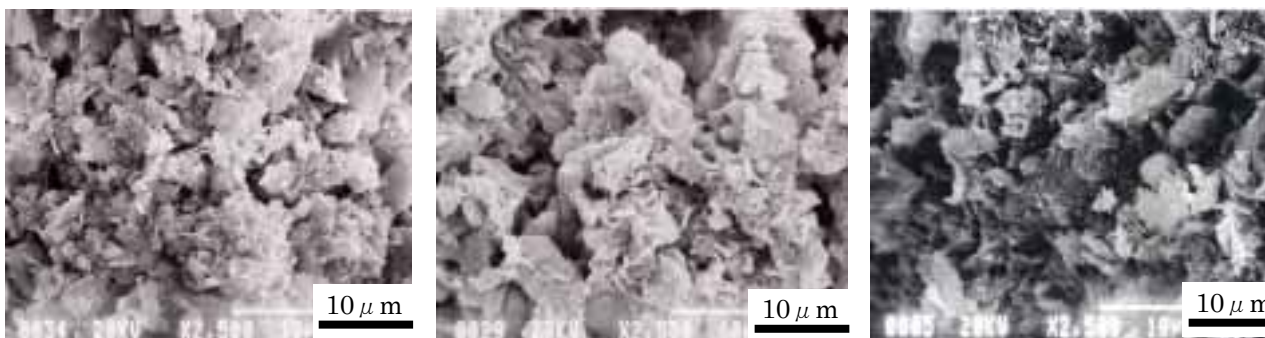


(a) pH=3.9

(b) (pH)_i=6.8

(c) pH=8.6

Photos. 1 SEM photograph of Kaolin clay

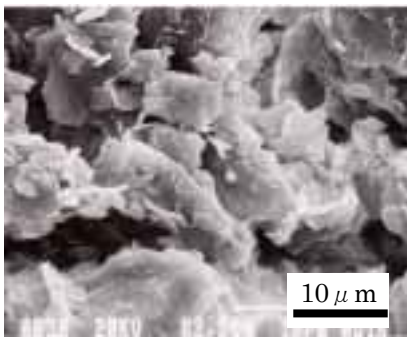


(a) pH=3.5

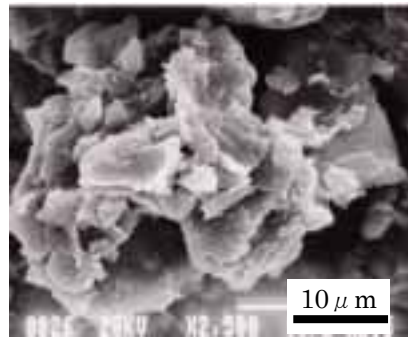
(b) pH=7.5

(c) pH=9.2

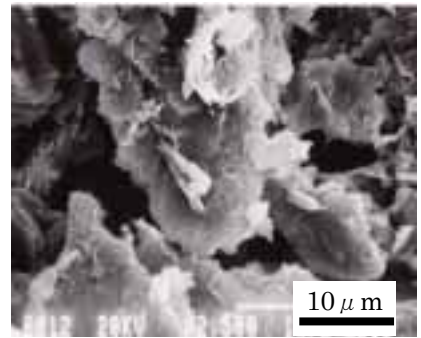
Photos. 2 SEM photograph of Sanyo cohesive



(a) pH=5.9

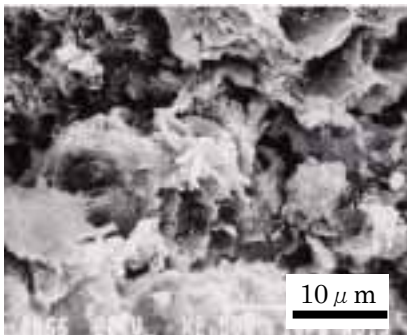


(b) (pH)_i=8.6

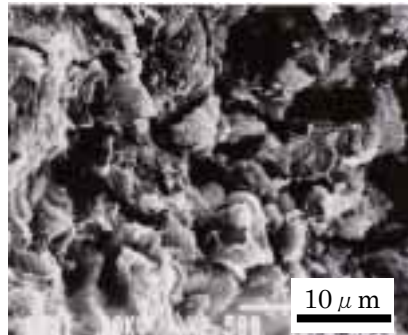


(c) pH=9.2

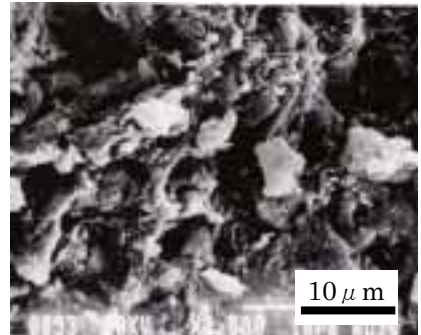
Photos. 3 SEM photograph of Honyura clay



(a) pH=3.9

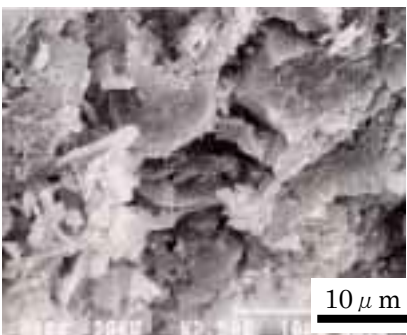


(b) (pH)_i=6.5

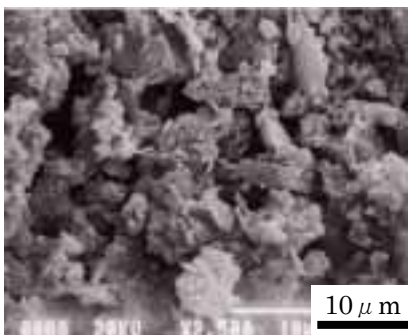


(c) pH=10.8

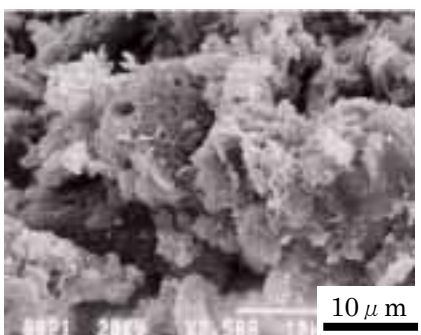
Photos. 4 SEM photograph of Daido clay



(a) pH=3.9

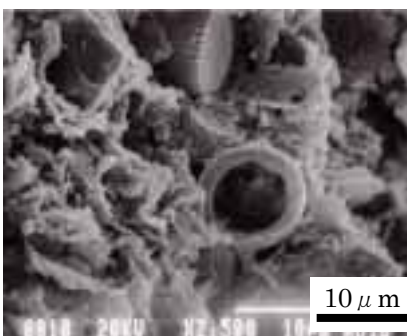


(b) (pH)_i=7.8

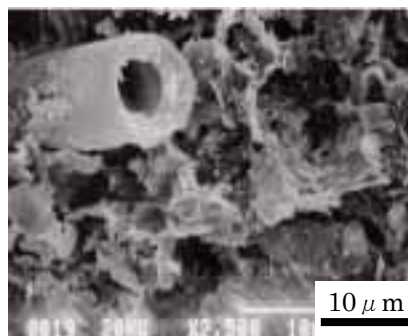


(c) pH=10.8

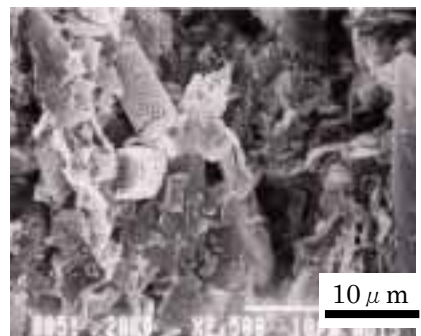
Photos. 5 SEM photograph of Ubemisaki clay



(a) pH=3.6



(b) (pH)_i=7.4



(c) pH=10.8

Photos. 6 SEM photograph of Ubeoki clay

値によって変化する電荷の影響をほぼ同一条件で受けるため骨格構造の変化が観察され易いと考えられた。その変化の状態は酸性側では綿毛構造、アルカリ性側では配向構造であった。山陽粘性土、大道粘土、本由良粘土および宇部岬粘土のような自然の粘土では pH の変化に伴う電荷の影響の受け方にばらつきがあるため骨格構造の明確な分類は困難であったが、酸性側からアルカリ性側に移行するに従い土粒子間の斥力によって間隙が増加していることが観察できた。宇部沖粘土のように土粒子以外に珪藻が存在する場合は骨格構造の変化を観察することは困難であった。

5. まとめ

本研究では 6 種類の試料に対して pH を変化させた一次元圧密後の SEM 写真の撮影を行った。撮影結果に基づく考察の結果、得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 粒子形状にばらつきが少ないカオリン粘土のような人工粘土では、酸性側では綿毛構造、アルカリ性側では配向構造であった。
- 2) 粒子形状にばらつきが多い自然粘土では、酸性側からアルカリ性側に移行するに従い間隙が増加していた。
- 3) 土粒子以外に珪藻が存在する場合は、骨格構造の変化は観察することが困難であった。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、山口大学理学部の村上良子先生および機器分析室の森福洋二氏には SEM 写真を撮影する際に有益なご助言をいただいた。ここに記して厚く感謝の意を表す次第である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 環境地盤工学入門編集委員会編: 環境地盤工学入門, 土質工学会, 1987.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.

- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 松下英次, 山本哲朗, 鈴木素之: pH が異なる粘性土の圧密特性, 第 36 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.231-232, 2001.
- 14) 松下英次, 山本哲朗, 鈴木素之: pH が異なる粘性土の非排水せん断特性 (その 2), 第 36 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.233-234, 2001.
- 15) 古河幸雄, 藤田龍之, 国広忠之, 深澤誠: レーザー回折/散乱式粒度分析装置の地盤土への適用, 第 36 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.333-334, 2001.
- 16) 松下英次, 山本哲朗, 鈴木素之: 粘土の物理試験における pH 調整方法とその問題点, 土と基礎, Vol.49, No.2, pp.25-28, 2001.

(平成 13 年 8 月 31 日受理)