

粘性土の繰返しせん断強度に及ぼす間隙水の 水素イオン濃度指数の影響

山本哲朗¹・畑岡直樹²・松下英次³

¹正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

²工修 三井不動産株式会社 九州支店 土木部 技術課 (〒 福岡県福岡市博多区上呉服町 10 番 1 号
博多三井ビル)

³山口大学大学院 理工学研究科 社会建設工学専攻 (〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

間隙水の水素イオン濃度指数 (pH) が、宇部岬粘性土および庄原粘土の繰返しせん断強度に及ぼす影響を調べることを目的として繰返し三軸試験を行った。宇部岬粘性土の場合、間隙水が酸性、中性、アルカリ性となるような3種類の pH をもつ供試体を、庄原粘土の場合、同様に4種類の pH をもつ供試体を圧密によって作製した。実験から得られた結果は次のとおりである。間隙水の pH の違いによって形成される土粒子構造には差異が見られ、そのことが繰返しせん断強度に大きく影響を与える。すなわち、庄原粘土の pH=9.3 供試体は、特異な凝集を起こして繰返しせん断強度は極めて大きい。この供試体以外の庄原粘土および宇部岬粘性土の3供試体は、試料採取時の pH の場合に繰返しせん断強度は最も大きくなった。

Key Words: Cyclic Shear Strength, Cohesive Soil, Soil Structure, Hydrogen Ion Concentration Exponents

1. まえがき

間隙水の水素イオン濃度指数 (以下 pH という) の大きさによって、粘性土の静的な強度・変形特性が異なるという結果が報告されている¹⁾。このことは、間隙水の pH は粘性土の土質工学的特性を評価する上で重要な要素の一つであることを示唆する。本文では、粘性土の繰返しせん断強度に及ぼす間隙水の pH 値の影響を繰返しせん断試験によって検討して得られた結果を述べる。

2. 土試料および pH 調整薬

今回の実験には、山口県宇部産の宇部岬粘性土および広島県庄原産の庄原粘土を用いた。その物理定数および主要鉱物をそれぞれ表-1、2 に示す。間隙水の pH 値を調整するために硫酸および水酸化ナトリウムを用いた。

表-1 各試料の物理定数

	Ubemisaki clayey soil	Syoubara clay
G_s	2.598	2.681
D_{50} (mm)	0.009	0.005
D_{max} (mm)	0.25	0.075
w_L (%)	46.6	50.8
w_p (%)	26.1	30.9
I_p	20.5	19.9
F_{clay} (%)	17.0	50.0
FC (%)	96.1	100.0
pH	7.4	4.3
土質分類	CH	CH

表-2 各試料の主要鉱物

主要鉱物				
Ubemisaki clayey soil	Kaolinite	Illite	Biotite	Quartz
Syoubara clay	Halloysite	Biotite	Talc	Quartz

表-3 試験時の各土試料の pH

	Ubemisaki Clayey soil	Syoubara clay
Acidity soil samples	4.0	3.1, 4.3
Neutrality soil samples	7.4	7.7
Alkalinity soil samples	10.0	9.3

3. 実験方法

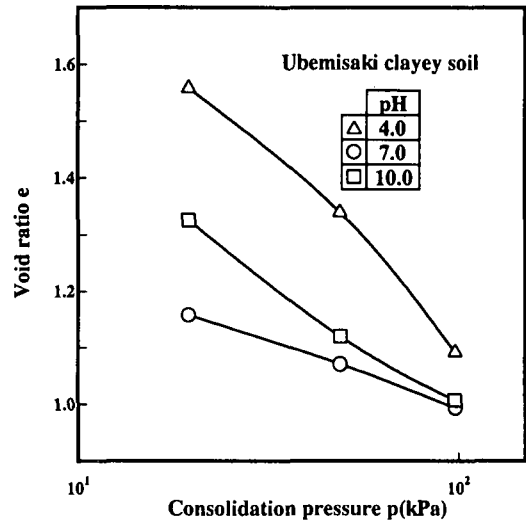
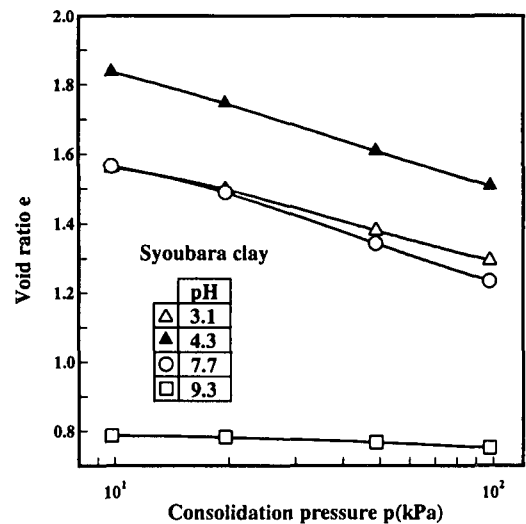
土試料に蒸留水を加え、宇部岬粘性土では液性限界の約 1.3 倍、庄原粘土では液性限界の 1.7 倍の含水比に調整してスラリー状で練返した後、直径 29cm、高さ 35cm の圧密タンク内で圧密を行うことによって再構成試料を作製した。宇部岬粘性土では圧密圧力 $p=19.6, 49.0, 98.0\text{kPa}$ の 3 段階、庄原粘土では $p=9.8, 19.6, 49.0, 98.0\text{kPa}$ の 4 段階にした。圧密日数は宇部岬粘性土の場合初めの 2 段階、庄原粘土の場合初めの 3 段階までを 1 日として、最終段階を 1 週間とした。各土試料の酸性、中性およびアルカリ性試料の pH 値を表-3 に示す。ただし、宇部岬粘性土の $\text{pH}=7.4$ および庄原粘土の $\text{pH}=4.3$ は試料採取時の pH 値である。

圧密終了後、タンクから土試料を抜き取った後、直径 5cm、高さ 10cm 程度の供試体に整形し、繰返し三軸試験を行った²⁾。試験では、拘束圧 $\sigma_{30}=147\text{kPa}$ 、背圧 $\sigma_b=49\text{kPa}$ 、すなわち有効拘束圧 $\sigma'_{30}=98\text{kPa}$ を供試体に加え、1 日圧密を行った。その後、周期 10 秒の振幅一定の繰返し軸差応力 σ_d を供試体に破壊が発生するまで作用させた。破壊は両振幅軸ひずみ $\text{DA}=10\%$ に達した時点とみなした。

4. 結果および考察

図-1, 2 にそれぞれ各 pH の宇部岬粘性土および庄原粘土のタンク圧密時における間隙比 e と圧密圧力 p の関係を示す。この図から、各試料ごとに $p=98.0\text{kPa}$ での間隙比に大きな差異があることがわかる。その間隙比は、宇部岬粘性土では pH が 4.0, 10.0, 7.0 の順で小さく、庄原粘土では pH が 4.3, 3.1, 7.7, 9.3 の順に小さい。このことから、間隙水の pH により圧密時に形成される土粒子の骨格構造に相違が生じたものと考えられる。

図-3, 4 にそれぞれ標準圧密試験により得られた

図-1 各 pH の宇部岬粘性土のタンク圧密時の $e-\log p$ の関係図-2 各 pH の庄原粘土のタンク圧密時の $e-\log p$ の関係

宇部岬粘性土および庄原粘土のコゼニー・カルマンの透水係数 ($k_0 S^2 = e^3 / (k(1+e))$)³⁾ と pH 値の関係を示す。この透水係数は、土粒子の骨格構造を判定する一つの指標として用いられ、 $k_0 S^2$ が大きくなると土粒子構造は配向性を示し、小さくなると綿毛性を示すと言われている。図-3, 4 から、両方の試料とも pH が増加するに従い $k_0 S^2$ 値は増加していることがわかる。このことから、宇部岬粘性土および庄原粘土の圧密時の土粒子の骨格構造は、酸性の場合には綿毛性構造、アルカリ性の場合には配向性構造となっていると考えられる。

図-5, 6 にそれぞれ各 pH の宇部岬粘性土および庄原粘土の繰返しせん断応力比 $\sigma_d/2\sigma'_{30}$ と破壊までの繰返し回数 n_f の関係を示す。両図からわかるように、繰返しせん断破壊を生じる応力比の大きさは、宇部岬粘性土では $\text{pH}=7.0, 4.0, 10.0$ の供試体の順で小さくなり、庄原粘土では $\text{pH}=9.3, 4.3, 3.1, 7.7$ の供試体の

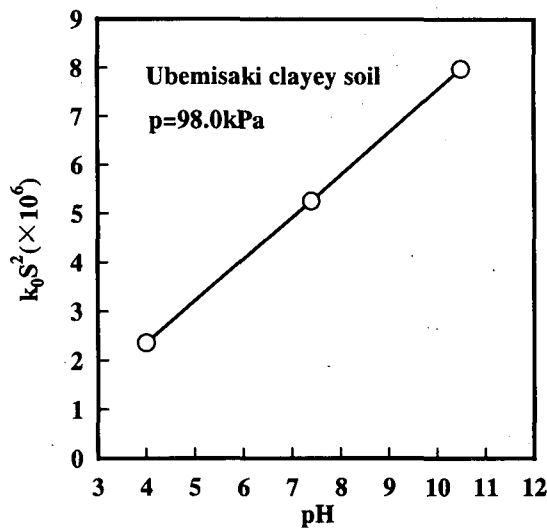


図-3 宇部岬粘性土の $k_0 S^2$ と pH の関係

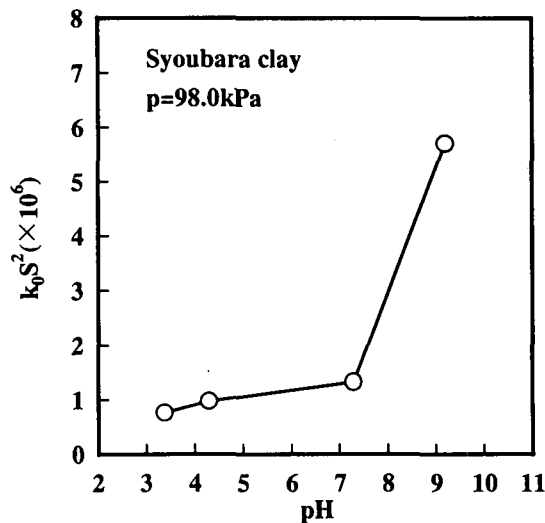


図-4 庄原粘土の $k_0 S^2$ と pH の関係

順に小さくなる。庄原粘土の pH=9.3 供試体の応力比が他の供試体に比べて約 3 倍程度大きいことが注目される。この原因は、圧密タンクに試料を詰める時点で生じた粘性の高い凝集物によって土粒子の配向性構造が圧密時に顕著に現れて間隙比が小さくなったためと考えられる。すなわち、水酸化ナトリウムを添加することによって、間隙水中に陽イオン (Na^+) が溶け出した結果、土粒子表面には拡散電気二重層が形成され、土粒子同士は分散状態でゆっくりと沈降して配向構造をとる。しかし、陽イオン濃度が大きくなるといったん土粒子は分散するが、陽イオンは土粒子間で濃度が高くなるため拡散電気二重層は薄くなり逆に分散が妨げられて凝集したものと推測される^{4), 5), 6)}。

次に、宇部岬粘性土における 3 供試体および庄原粘土における pH=9.3 供試体以外の 3 供試体について注目すると、繰返しせん断強度に明瞭な差異が生じていることがわかる。この原因は、土粒子間の結合力に起

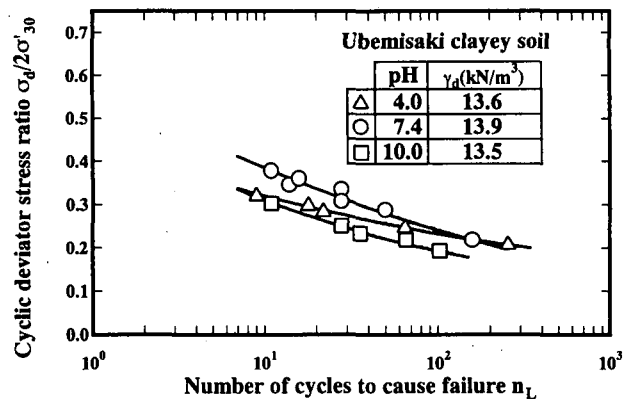


図-5 各 pH の宇部岬粘性土の $\sigma_d/2\sigma'_{30}$ と n_L の関係

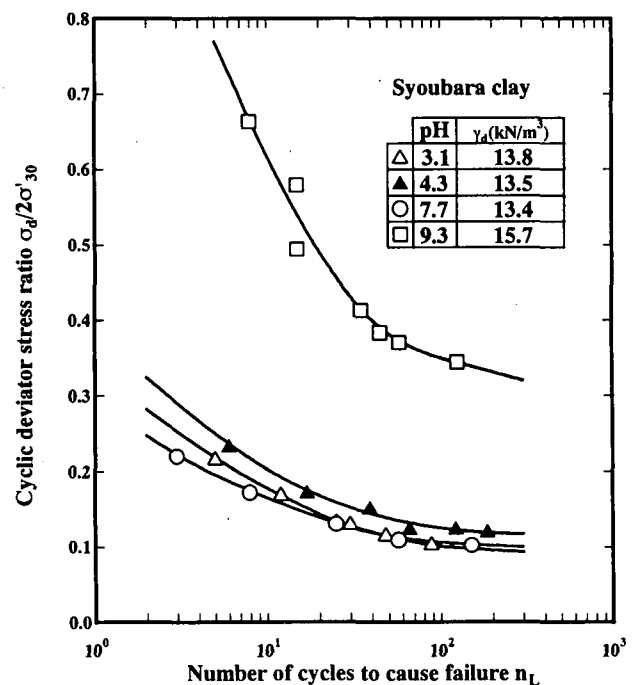


図-6 各 pH の庄原粘土の $\sigma_d/2\sigma'_{30}$ と n_L の関係

因して生じる異なった土粒子構造によるものと考えられる。まず、宇部岬粘性土における pH=7.0 および庄原粘土における pH=4.3 供試体は試料採取時の pH 値であり、間隙水による電氣的な影響を受けておらず、分散構造を形成しているものと考えられる。この試料に硫酸および水酸化ナトリウムを加えることにより、土粒子は界面化学的な影響を受けて酸性側では綿毛性構造に、アルカリ性側では配向性構造に移行する(図-3, 4)。上述した3つの構造の繰返しせん断強度は分散構造で最も大きく、綿毛性構造および配向性構造に移行するに従い減少するという同様の結果を示している。綿毛性構造および配向性構造において繰返しせん断強度が減少した原因として次のことが考えられる。配向性構造では、土粒子表面に本来有している負の永久荷電と負に帯電した pH 依存荷電が反発し合い土粒子間の結合力が弱くなるため、繰返しせん断強度は低

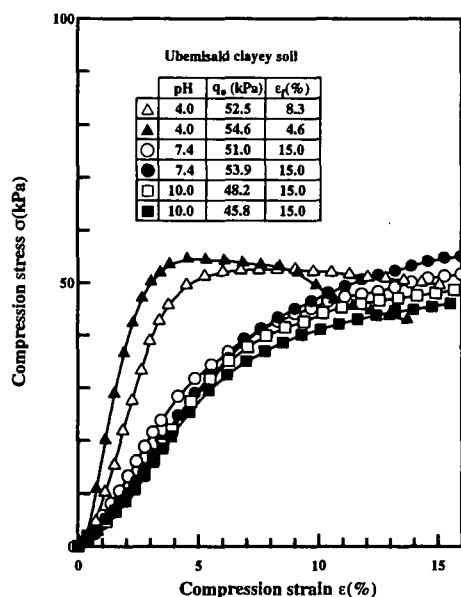


図-7 各 pH の宇部岬粘性土の圧縮応力と圧縮ひずみの関係

下したものと考えられる。綿毛性構造では、正に帯電した pH 依存荷電と負の永久荷電との結合力が増加して端・面結合を生じる。しかし、この端・面結合力は、繰返し応力に抵抗するほど強くはなくて土粒子構造は容易に破壊される。そのため繰返しせん断応力を受けた場合、有効応力を失って粒子の再配列によって大きなひずみを生じるため、繰返しせん断強度が減少したものと考えられる。

図-7, 8にそれぞれ宇部岬粘性土および庄原粘土の一軸圧縮試験から得られた圧縮応力 σ と圧縮ひずみ ϵ の関係を示す。庄原粘土の pH=9.3 供試体については先に述べたように、特異な凝集沈殿を示して圧密されたため q_u は他の庄原粘土供試体と比べて約 17 倍程度大きくなっている。また、宇部岬粘性土の pH=4.0, 7.0, 10.0 供試体および庄原粘土の pH=3.1, 4.3, 7.7 供試体については、pH が小さくなるに従い、 q_u は増加している。このような粘性土および粘土供試体の pH の違いによる一軸圧縮強度の差異はベントナイトの結果¹⁾と同様の傾向となっている。

上述のように、庄原粘土の pH=9.3 供試体を除くと、一方向の圧縮载荷による一軸圧縮試験から得られた静的強度は pH が減少するに従い増加するが、二方向の圧縮・伸張载荷による繰返しせん断試験から得られた繰返しせん断強度は pH が試料採取時の供試体において最も大きい値をとり、硫酸および水酸化ナトリウムを加えた供試体では小さい。すなわち宇部岬粘性土および庄原粘土の繰返しせん断強度、一軸圧縮強度に与える pH の影響には違いがあることが示された。

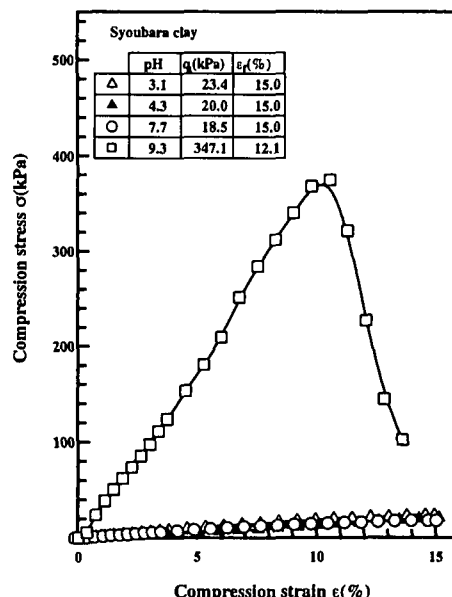


図-8 各 pH の庄原粘土の圧縮応力と圧縮ひずみの関係

5. まとめ

今回用いた宇部岬粘性土の繰返しせん断強度は試料採取時の pH=7.0 供試体でもっとも大きく、pH=4.0 供試体、pH=9.0 供試体の順序で小さくなる。庄原粘土の繰返しせん断強度は pH=9.3 供試体でもっとも大きく、pH=4.3 供試体、pH=3.1 供試体、pH=3.1 供試体の順序で小さくなる。また、庄原粘土の pH=9.3 供試体は特異な凝集沈殿のため繰返しせん断強度が他のもの比べて著しく大きくなった。さらに、宇部岬粘性土および庄原粘土の繰返しせん断強度・一軸圧縮強度の及ぼす pH の影響には差異が見られることが示された。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 山本哲朗・山内智也・堀淵孝司：砂〜シルト地盤に対する液状化対策としてのセメント安定処理の効果に及ぼす粒度の影響、土木学会論文集、No. 541/Ⅲ-35, pp. 133-146, 1996.
- 3) 土質工学会編：土質工学における化学の基礎と応用—土質基礎ライブラリーNo. 15, 1978.
- 4) 須藤俊男：粘土鉱物学、岩波書店、pp. 243~244, 1974.
- 5) 土質物理研究会：土の物理学—土質力学の基礎、森北出版、pp. 16~17, 1979.
- 6) 日本粘土学会編：粘土ハンドブック第二版、技報堂出版、1987.