

土のコンシステンシーに及ぼす pH の影響

松下英次¹・山本哲朗²・鈴木素之³

¹学生会員 山口大学大学院理工学研究科博士前期課程 社会建設工学専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2557)

²正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (同上)

³正会員 博(工) 山口大学助手 工学部社会建設工学科 (同上)

pH を変化させた 14 種類の土の液性限界試験および塑性限界試験の結果と既往の研究結果に基づいて、土の液性限界および塑性限界と pH の関係を検討した。pH の変化による液性限界および塑性限界の変化にはいくつかの傾向があり、総じて pH の影響は液性限界に対しては大きい、塑性限界に対しては小さい。著者らの試験結果を鉱物組成および化学組成の観点から考察したところ、土のコンシステンシーに及ぼす pH の影響は試料の種類すなわち主要粘土鉱物の構造や層間の陽イオンの有無によって異なることが明らかにされた。さらに、pH が異なる溶液中での土粒子の沈降状況および走査型電子顕微鏡を用いて観察した液・塑性限界時の土粒子の微視的構造は、ともに pH の影響を受けることが示された。このことは土の液・塑性限界と pH の関係を把握する上でいくつかの新しい知見を与えている。

Key Words: Acid rain, pH, Liquid limit, Plastic limit, Plasticity index, Clay, Clay mineral, Cation, Sedimentation, Microscopic structure

1. まえがき

人間活動によって生み出される化学物質が地盤の性質を急激に変化させている。例えば、酸性雨による地盤の酸性化が指摘されている¹⁾。

Fig. 1 に我が国の施工斜面における土の水素イオン濃度指数 pH の分布²⁾を示す。pH は酸性、アルカリ性の程度を水素イオン濃度 $[H^+]$ の逆数の常用対数で表すものであり、次式で表される。

$$pH = -\log [H^+] \quad (1)$$

データは 145 地点の 420 試料から得られたものである。その頻度分布は pH=2.0~12.0 の広範囲に分布しており、pH=5.5 付近で最大である。すなわち、我が国の施工斜面は弱酸性といえる。このことは、もちろん長年にわたる気候の変化や火山活動などの影響によるものと考えられるが、一部は前述した酸性雨の影響も考えられる。

このような酸性雨の問題などを対象として、地盤環境工学の立場から間隙水の化学的性質が土の物理的・工学的性質に及ぼす影響を検討した研究^{3)~22)}が増えつつある。そのなかでも土の力学的性質の推定や工学的分類などに用いられるコンシステンシーを取り上げた研究がいくつかある^{3)~5), 7), 9), 12)}。Warkentin³⁾は塩化ナトリウム等を加えたカオリナイトの液性限界と塩分濃

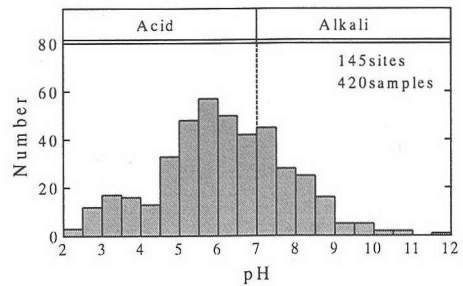


Fig. 1 Distribution of pH in slopes

度の関係を pH と関連付けて調べている。Torrance ら⁴⁾は塩酸を加えた海成粘土の液性限界とそのときの pH の関係を調べており、そのなかで塩分濃度の影響を取り上げている。大坪⁵⁾は Torrance ら⁴⁾とほぼ同様な実験をスメクタイト系の粘土に対して実施し、pH よりもむしろ塩分濃度に着目して液性限界との関係を検討している。また、村上⁷⁾は塩酸を加えた土の液性限界および塑性限界と pH の関係を検討している。嘉門⁹⁾および佐野¹²⁾はそれぞれ人工酸性雨をうけた土および自然に酸性化する土に対して pH と液性限界および塑性限界の関係を検討している。これらの研究は個々の土を対象として検討したものであるが、種々の土のコンシステンシーに及ぼす pH の影響については総合的に議論されておらず、現在まで統一的な見解は得られていない。

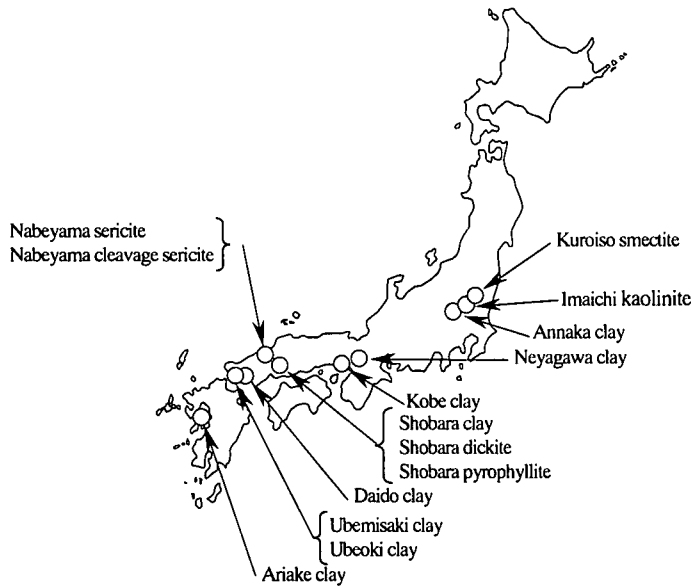


Fig.2 Sampling places of soil samples

Table 1 Physical and chemical properties of soil samples

Soil samples	Sites	ρ_s (g/cm^3)	w_L (%)	w_P (%)	I_P	D_{50} (mm)	D_{max} (mm)	F_{clay} (%)	F_C (%)	Soil clas- sification	(pH) _i
Annaka clay	Gunma	2.400	375.7	34.5	341.2	0.004	0.032	59.7	100.0	CH	10.6
Ariake clay	Fukuoka	2.611	60.9	40.0	20.9	0.033	0.425	19.0	82.5	CH	8.1
Daido clay	Yamaguchi	2.570	55.5	26.2	29.3	0.007	0.250	45.0	87.1	CH	6.8
Imaichi kaolinite	Tochigi	2.513	47.3	33.2	14.1	0.008	0.048	40.1	100.0	ML	7.9
Kobe clay	Hyogo	2.614	62.5	30.3	32.2	0.005	0.425	49.0	98.1	CH	7.4
Kuroiso smectite	Tochigi	2.792	1072.7	88.0	984.7	0.005	0.032	51.4	100.0	CH	9.7
Neyagawa clay	Osaka	2.650	65.5	31.7	33.8	0.013	0.250	9.0	99.7	CH	7.9
Nabeyama cleavage sericite	Shimane	2.773	117.1	42.8	74.3	0.009	0.032	20.3	100.0	CH	9.9
Nabeyama sericite	Shimane	2.750	58.8	27.9	30.9	0.014	0.128	16.1	97.2	CH	9.4
Shobara clay	Hiroshima	2.681	55.1	32.1	23.0	0.005	0.075	55.6	100.0	CH	4.3
Shobara dickite	Hiroshima	2.609	50.3	34.5	15.8	0.005	0.032	41.8	100.0	ML	8.3
Shobara pyrophyllite	Hiroshima	2.772	52.6	36.4	16.2	0.005	0.032	46.8	100.0	ML	7.8
Ubemisaki clay	Yamaguchi	2.598	59.5	30.5	29.0	0.051	0.250	10.5	89.1	CL	7.8
Ubeoki clay	Yamaguchi	2.580	110.6	42.8	67.9	0.012	0.425	16.3	98.5	CH	7.4

本論文は pH を変化させた種々の土の液性限界試験および塑性限界試験の結果に基づいて、液性限界、塑性限界および塑性指数と pH の関係を検討したものである。その結果には著者らが 14 種類の試料に対して実施したものと既往の研究^{3) ~5), 7), 9), 12)} から引用したものがあがるが、前者に対しては鉱物組成と化学組成に着目し

て考察している。また、土のコンシステンシーに及ぼす pH の影響のメカニズムを考察するために、pH を変化させた溶液中での土粒子の沈降状況と走査型電子顕微鏡を用いて pH を変化させた際の土の液・塑性限界時の微視的構造を観察した。ただし、本論文では、実用上簡便に地盤の酸性度を表す指標である pH に着目して議論して

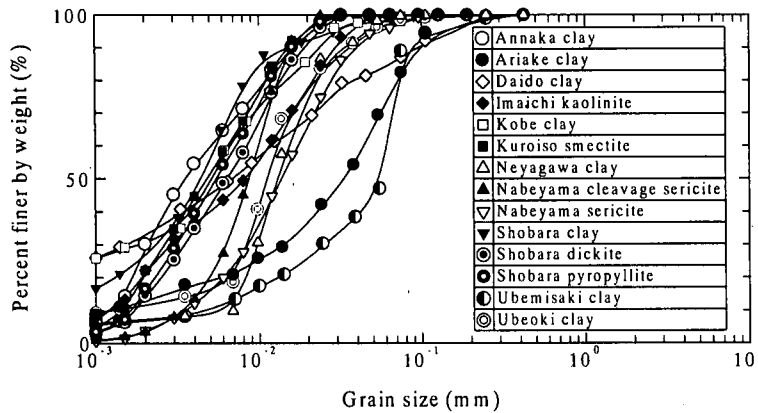


Fig.3 Grading curves of soil samples

Table 2 Mineral composition of soil samples

Soil samples	Main clay minerals	Others
Annaka clay	Smectite	Quartz, Clinoptilolite, Mordenite
Ariake clay	Muscovite	Quartz, Kaolinite, Biotite
Daido clay	Kaolinite	Quartz, Gypsum, Alkali feldspar,
Imaichi kaolinite	Kaolinite	Quartz
Kobe clay	Muscovite	Quartz, Kaolinite, Smectite, Pyrophyllite
Kuroiso smectite	Smectite	Quartz
Neyagawa clay	Illite	Quartz, Kaolinite, Smectite, Muscovite
Nabeyama cleavage sericite	Sericite	Quartz
Nabeyama sericite	Sericite	Quartz
Shobara clay	Halloysite	Quartz, Biotite, Talc
Shobara dickite	Dickite	Quartz
Shobara pyrophyllite	Pyrophyllite	Quartz
Ubemisaki clay	Illite	Quartz, Kaolinite, Gypsum, Biotit
Ubeoki clay	Phlogopite	Quartz, Kaolinite, Gypsum

おり、pH と密接に関連するであろう塩分濃度は直接取り上げていない。

2. 土試料および実験方法

(1) 土試料の物理的性質、鉱物組成および化学組成

土試料は安中粘土、有明粘土、大道粘土、今市カオリナイト、神戸粘土、黒磯スメクタイト、鍋山劈開セリサイト、鍋山セリサイト、寝屋川粘土、庄原粘土、庄原ディッカイト、庄原パイロフィライト、宇部岬粘土および宇部沖粘土の 14 種類である。これらの土試料は、Fig. 2 に示す地点より採取したものであり、425 μ m ふるいを通過させたものである（本文ではこの状態の土試料

を原土試料という）。

Table 1 にこれら原土試料の物理的性質および化学的性質を示す。ここでの 50% 粒径 D_{50} 、最大粒径 D_{max} 、粘土含有量 F_{clay} および細粒分含有率 F_c は Fig. 3 に示す原土試料の粒径加積曲線より求めたものである。土粒子の分散性が良好でない原土試料の粒径加積曲線はレーザー一回折粒度分布測定装置を用いて求めている。原土試料の物理的性質をまとめると、 $w_L=47.3\sim 1072.7\%$ 、 $w_p=26.2\sim 88.0\%$ 、 $I_p=14.1\sim 984.7$ 、 $D_{50}=0.005\sim 0.051\text{ mm}$ 、 $F_{clay}=9.0\sim 59.7\%$ 、 $F_c=82.5\sim 100.0\%$ である。これらの大部分は低塑性から高塑性の粘性土であり、一部はシルトである。また、原土試料の化学的性質をみると、初期の pH（以後 (pH)_i とする）が 4.3~10.6 であり、その平

Table 3 Chemical composition of soil samples

Soil samples	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	CaO (%)	MnO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	Ig.loss (%)	Total (%)
Annaka clay	66.36	8.06	2.44	2.06	5.28	0.05	2.15	0.95	6.25	93.60
Ariake clay	53.00	14.81	5.45	2.27	3.37	0.17	3.01	1.84	9.28	93.20
Daido clay	62.00	23.19	1.66	0.28	0.20	0.02	0.38	3.34	6.69	97.76
Imaichi kaolinite	45.10	37.10	0.02	0.07	0.05	0.00	0.22	0.23	14.74	97.53
Kobe clay	57.70	18.93	3.02	1.01	0.96	0.06	0.85	2.25	2.64	87.42
Kuroiso smectite	59.70	21.26	2.05	3.33	0.49	0.01	3.33	0.24	6.09	96.50
Neyagawa clay	57.60	14.77	5.40	1.85	1.08	0.09	2.03	2.02	9.57	94.41
Nabeyama cleavage sericite	46.30	27.87	4.01	1.03	2.04	0.05	0.31	8.56	6.28	96.45
Nabeyama sericite	46.10	28.58	3.67	0.97	1.78	0.04	0.36	9.95	6.00	97.45
Shobara clay	79.58	13.80	0.16	0.09	0.07	0.00	0.27	1.70	2.37	98.04
Shobara dickite	46.00	37.76	0.01	0.04	0.00	0.00	0.16	0.13	13.60	97.70
Shobara pyrophyllite	70.60	23.48	0.17	0.02	0.00	0.00	0.20	0.19	4.54	99.20
Ubemisaki clay	50.86	16.14	5.29	2.28	1.31	0.07	5.63	2.52	12.19	96.29
Ubeoki clay	60.30	16.47	5.95	1.31	1.31	0.09	2.31	1.81	6.58	96.13

均値は 8.0 である。

Table 2 に原土試料の主要粘土鉱物およびその他の鉱物を示す。ここでの主要粘土鉱物は X 線回折試験（粉末法）の回折強度を既存のデータ²³⁾と照合することにより判別したものである。主要粘土鉱物はスメクタイト、白雲母、カオリナイト、イライト、金雲母、ディッカイト、パイロフィライト、セリサイト、ハロイサイトの 9 種類である。その他の鉱物は石英、沸石、長石、滑石等である。

Table 3 に原土試料の化学分析結果を示す。ここでの分析項目は SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO、CaO、MnO、Na₂O、K₂O および強熱減量 Ig.loss である。いずれの原土試料においても SiO₂ の含有率が高く、MnO の含有率が低い。また、CaO、Na₂O および K₂O の含有率は土試料によって大きく異なっている。

(2) pH が異なる土の物理試験

a) 液性限界試験および塑性限界試験

pH を変化した液性限界試験および塑性限界試験の試料には、ある pH の原土試料に対して所定の濃度に調整した pH 調整薬品の水溶液を徐々に加えて十分練り返したものをを用いる。液性限界試験および塑性限界試験を実施するにあたり、最も重要な点は試験中の土試料の pH を一定にすることである。Fig. 4 および Fig. 5 に pH を変化した土の液性限界試験の典型的な結果を示す。

Fig. 4(a) は安中粘土の含水比と落下回数との関係（流動曲線）を各 pH 調整薬品ごとに示したものである。pH 調整薬品には硫酸、塩酸および水酸化ナトリウムを用いた。各流動曲線の pH は、pH 調整薬品を加えない場合は pH=10.6 (=pH_i) であるが、水酸化ナトリウムを加えた場合は pH=11.6、硫酸を加えた場合は pH=2.2、塩酸を加えた場合は pH=1.7 である。Fig. 4(b) は Fig. 4(a) に対応する pH と落下回数との関係を示したものである。pH は pH 調整薬品の種類によらず落下回数に対してほぼ一定である。すなわち、Fig. 4(a) の安中粘土の場合、pH が各流動曲線上で一定であることが確認された。もう一例として Fig. 5(a) および (b) に示した庄原粘土の場合においても、安中粘土と同様に pH が各流動曲線上で一定であることが確認された。一方、pH を変化した土の塑性限界試験においても、試験中の pH はほぼ一定であることを確認している。この他の土試料に対する液性限界試験および塑性限界試験においても試験中の土試料の pH が一定であることに十分留意して実施しており、土試料の pH はそれぞれの試験終了時に測定したものをを用いている。なお、pH の測定方法は文献 24) に準じて実施している。

b) 沈降試験

pH が異なる溶液中の土粒子の沈降状況を観察することを目的として、経過時間が 5、10、15、30、60、120、180、240、1440 分ごとの沈降状況を写真撮影した。そ

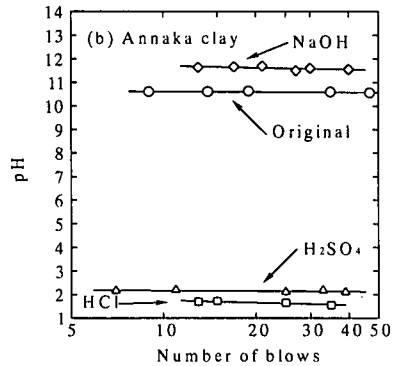
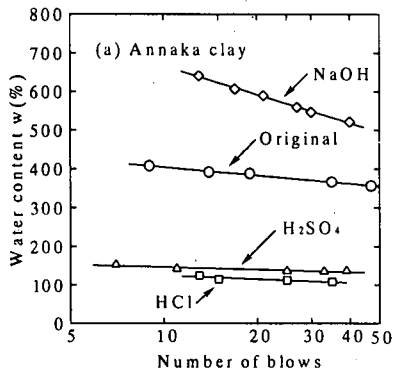


Fig. 4 The change of water content and pH with number of blows in liquid limit test (Annaka clay)

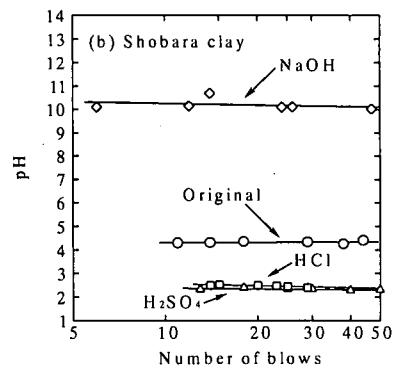
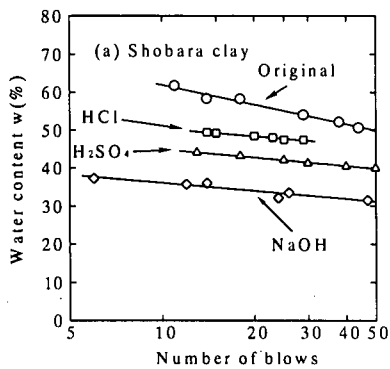


Fig. 5 The change of water content and pH with number of blows in liquid limit test (Shobara clay)

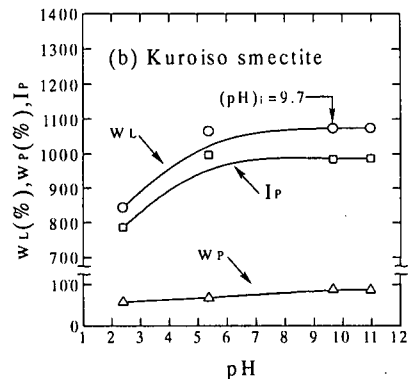
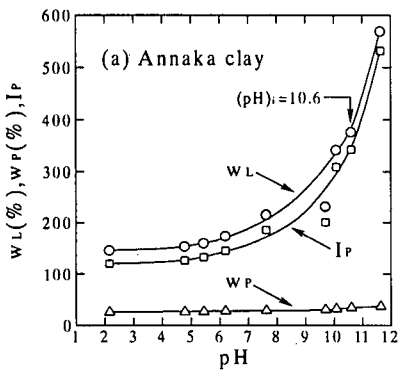


Fig. 6(1) The change of consistency with pH

の一部は後述の Photo. 1 に示している。観察には原土試料 5g を蒸留水あるいは pH を調整した溶液を加えて全量を 100ml にし、これを十分攪拌したものを用いた。

c) 走査型電子顕微鏡(SEM)

液性限界時および塑性限界時の土試料の微視的構造を走査型電子顕微鏡を用いて観察した。観察には液性限界および塑性限界の状態の土試料を質量が一定となるまで炉乾燥させたものを用いた。なお、スメクタイトを含む

土試料については、空気乾燥させた後、質量が一定となるまで炉乾燥させたものを用いた。

3. 実験結果および考察

(1) pH を変化した土のコンシステンシー特性

a) 液性限界、塑性限界および塑性指数と pH の関係

Figs. 6(1)~(3)(a)~(n)は 14 種類の土試料の液性限界、

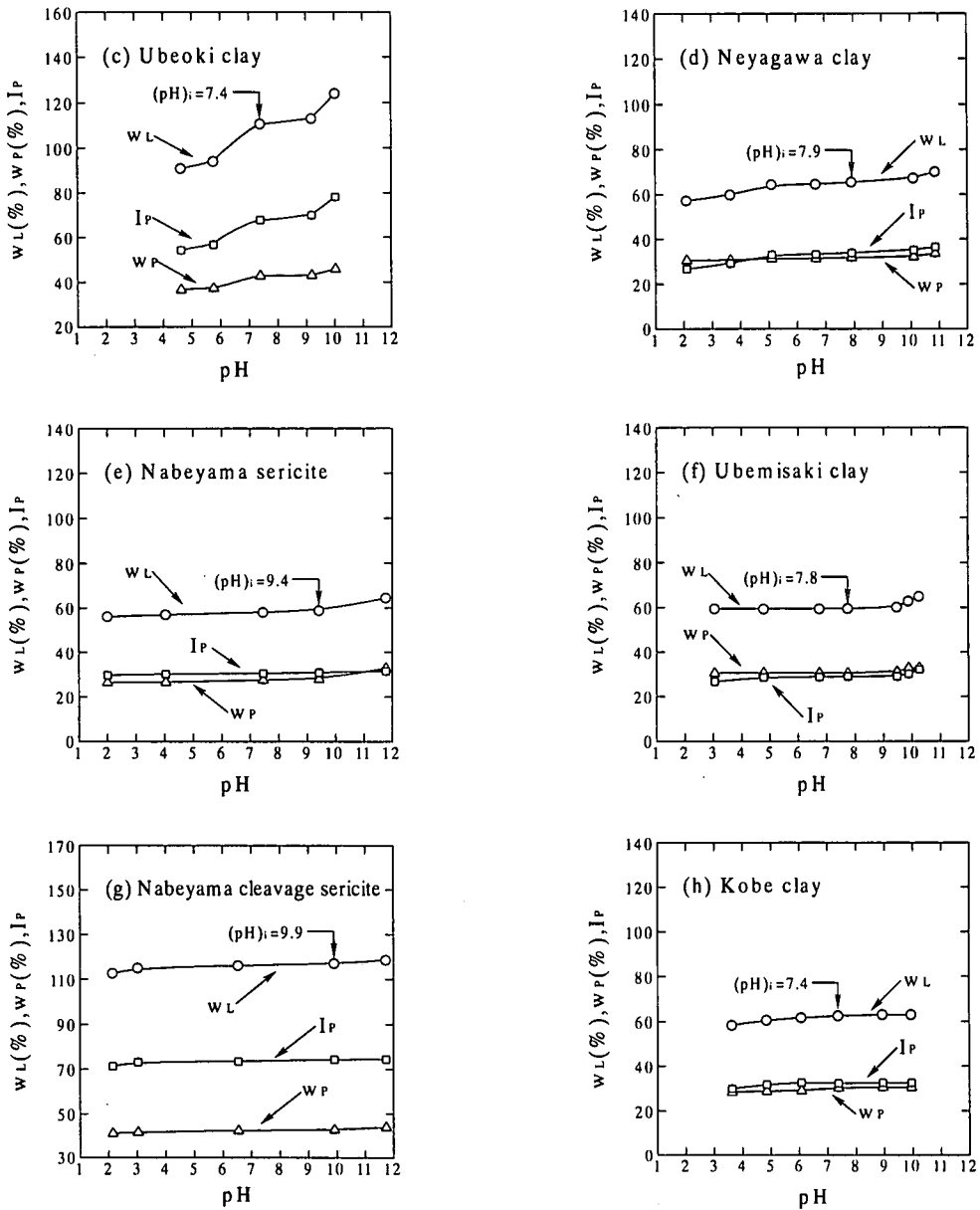


Fig.6(2) The change of consistency with pH

塑性限界および塑性指数と pH の関係を示したものである。

Fig. 6(1)(a)に安中粘土の結果を示す。pH=2.2~11.6 の範囲で pH の増加に対して液性限界は増加している。pH の増加に伴う液性限界の増加の割合は、pH=2.2~8.0 の範囲で単調であり、pH=8.0~11.6 の範囲で著しい傾向にある。pH=2.2~11.6 の範囲での液性限界の変化量は 422.7 %である。このときの pH の変化は、水素イオン濃度で 10^{10} 倍程度の変化に相当するものであり、Fig. 1

の自然状態にみられる土の pH の分布に対応するものである。一方、塑性限界も pH の増加に対して増加している。pH=2.2~11.6 の範囲で塑性限界の変化量は 10.8 %であり、液性限界の場合の変化量と比べて小さい。また、塑性指数は pH の増加に対して増加している。液性限界と塑性限界の差で定義される塑性指数と pH の関係は液性限界と pH の関係と類似している。

安中粘土と同様の傾向を示した 8 種類の土試料の結果を Figs. 6(1)~(3)(b)~(i)に示す。いずれも液性限界お

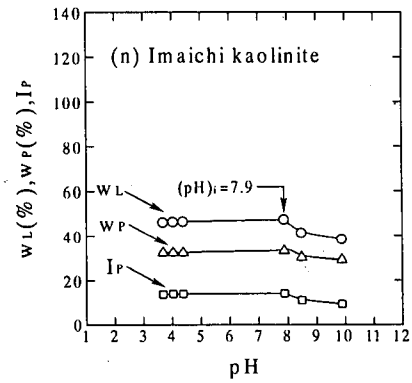
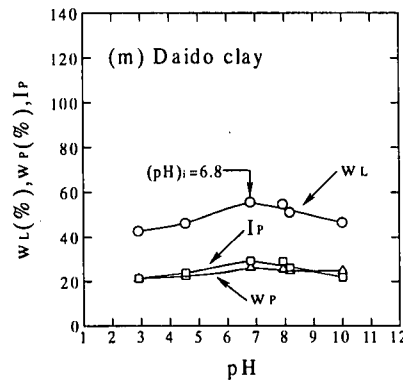
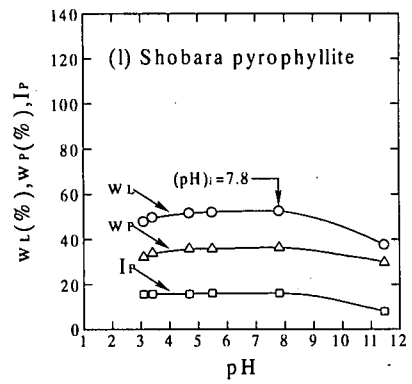
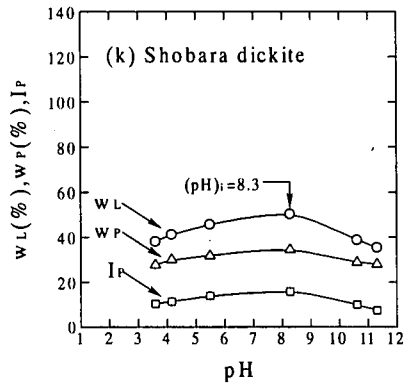
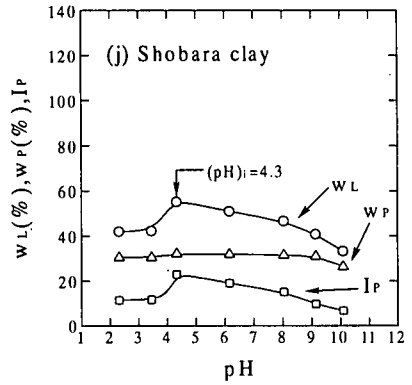
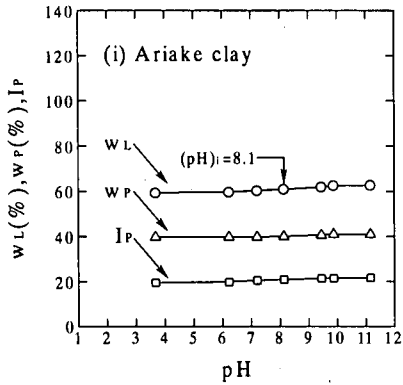


Fig.6(3) The change of consistency with pH

よび塑性限界は pH の増加に対して増加しているものの、その変化の割合は試料によって異なる。液性限界の変化量が大きいものは、Fig. 6(1)(b)の黒磯スメクタイトであり、 $pH=2.4\sim 10.9$ の範囲で 229.8 % である。また、液性限界の変化量が小さいものは、Fig. 6(3)(i)の有明粘土であり、 $pH=3.7\sim 11.2$ の範囲で 3.3 % である。一方、塑性限界の変化量が大きいものは、Fig. 6(1)(b)の黒磯スメクタイトであり、 $pH=2.4\sim 10.9$ の範囲で 30.8 % である。また、塑性限界の変化量が小さいものは、Fig. 6(2)(f)の宇部岬粘土であり、 $pH=3.1\sim 10.3$ の範囲で 2.1 % である。

一方、安中粘土と異なる傾向を示した庄原粘土の結果を Fig. 6(3)(j)に示す。液性限界は pH の増加に対して $pH=2.3\sim 4.3$ の範囲でいったん増加しているものの、 $pH=4.3\sim 10.1$ の範囲で減少している。液性限界は $pH=4.3$ 、すなわち原土試料の $pH (=pH)_i$ のときに最大であり、液性限界と pH の関係は上に凸の形状を示している。液性限界の変化量は、 $pH=2.3\sim 4.3$ の範囲で 13.1% であり、 $pH=4.3\sim 10.1$ の範囲で 21.9 % である。一方、塑性限界は pH の増加に対して $pH=2.3\sim 4.3$ の範囲でいったん増加しているものの、 $pH=4.3\sim 10.1$ の範囲

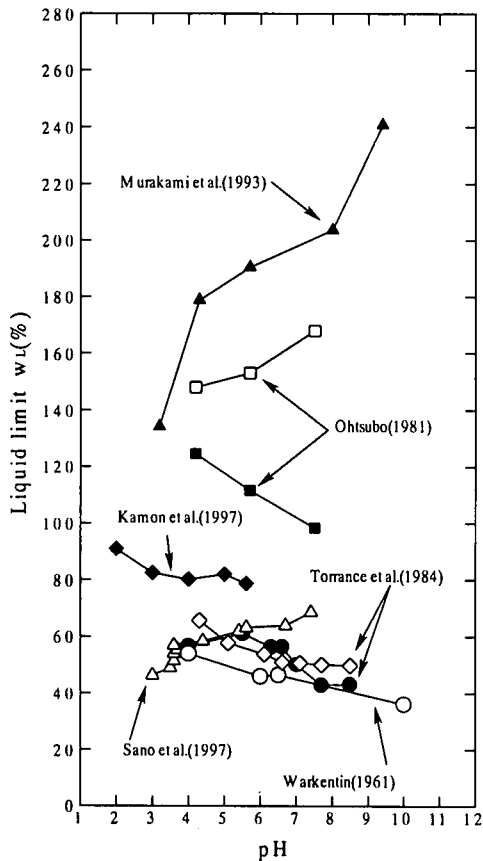


Fig. 7 The change of liquid limit with pH obtained by other researches

で減少している。塑性限界の変化量は、 $pH=2.3\sim 4.3$ の範囲で 1.6 %、 $pH=4.3\sim 10.1$ の範囲で 5.7 %であり、液性限界の場合の変化量と比べて小さい。また、塑性指数と pH の関係は前述した理由により液性限界と pH の関係と類似している。

庄原粘土と同様な傾向を示した 4 種類の土試料の結果を Fig. 6(3)(k)~(n)に示す。いずれの場合も液性限界および塑性限界は $(pH)_i$ のときに最大であり、液性限界および塑性限界と pH の関係は上に凸の形状を示している。しかし、その変化の度合は試料によって異なる。液性限界の変化量が大きいものは、Fig. 6(3)(k)の庄原ディッカイトであり、 $pH=3.6\sim 8.3$ の範囲で 12.2 %、 $pH=8.3\sim 11.3$ の範囲で 14.9 %である。また、液性限界の変化量が小さいものは、Fig. 6(3)(n)の今市カオリナイトであり、 $pH=3.7\sim 7.9$ の範囲で 1.3 %、 $pH=7.9\sim 9.9$ の範囲で 8.9 %である。一方、塑性限界の変化量が大きいものは、Fig. 6(3)(k)の庄原ディッカイトであり、 $pH=3.6\sim 8.3$ の範囲で 6.8 %、 $pH=8.3\sim 11.3$ の範囲で 6.5 %である。また、塑性限界の変化量が小さいものは、Fig. 6(3)(n)の今

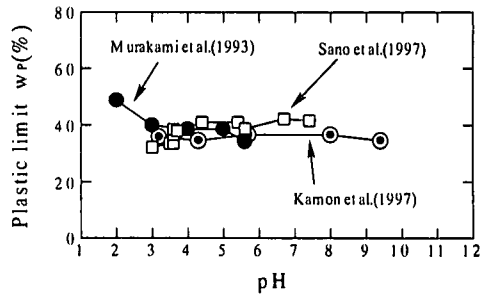


Fig. 8 The change of plastic limit with pH obtained by other researches

市カオリナイトであり、 $pH=3.7\sim 7.9$ の範囲で 0.9 %、 $pH=7.9\sim 9.9$ の範囲で 4.0 %である。

以上より、今回用いた 14 種類の土試料に対して液性限界および塑性限界と pH の関係には二種類の傾向があることを見出した。本文では、これらの土試料を以下のタイプ A およびタイプ B に分類する。

タイプ A：液性限界および塑性限界が pH の増加に対して増加する（例えば、安中粘土）。

タイプ B：液性限界および塑性限界が pH の増加に対していったん増加した後、減少する（例えば、庄原粘土）。

b) 既往の研究結果の整理

Fig. 7 および Fig. 8 にそれぞれ既往の研究結果から引用したデータに基づいて種々の土の液性限界および塑性限界と pH の関係を示す。Fig. 7 では液性限界が pH の増加に対して増加、減少およびいったん増加した後、減少するものがみられる。pH の増加に対して、液性限界が増加するものは大坪⁵⁾、村上⁷⁾ および佐野¹²⁾ のデータ、液性限界が減少するものは Warkentin³⁾、大坪⁵⁾、Torrance ら⁴⁾ および嘉門⁹⁾ のデータ、液性限界がいったん増加した後、減少するものは Torrance ら⁴⁾ のデータである。Fig. 8 では塑性限界が pH の増加に対して増加および減少するものがみられる。pH の増加に対して、塑性限界が増加するものは佐野¹²⁾ のデータ、塑性限界が減少するものは村上⁵⁾ および嘉門⁹⁾ のデータである。このように既往の研究においても液性限界および塑性限界と pH の関係には様々な傾向がみられる。この理由には土の種類や pH 調整法の差異などが考えられる。

以上の a) および b) の考察から、液性限界は pH の影響を受け、その変化の度合は試料によって異なる。塑性限界も pH の影響を受けるものの、塑性限界は本来含水比が低いものであり、このような状態では間隙水の化学的性質の影響を受けにくいものと考えられる。

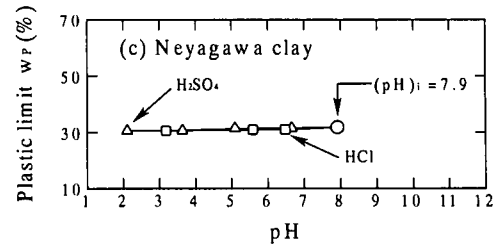
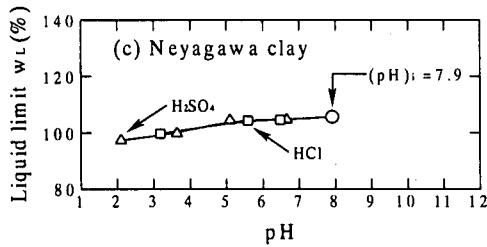
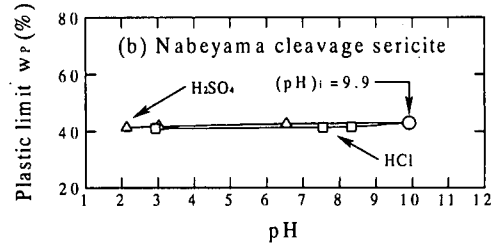
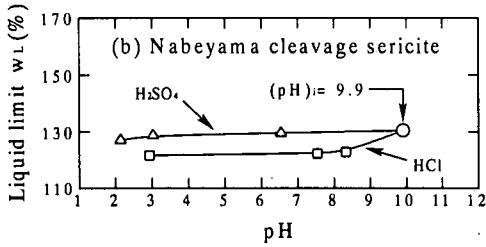
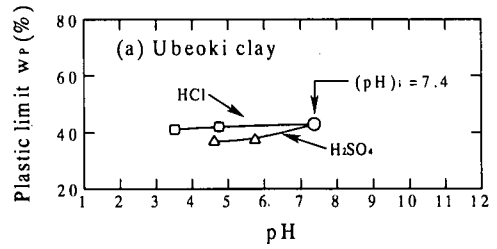
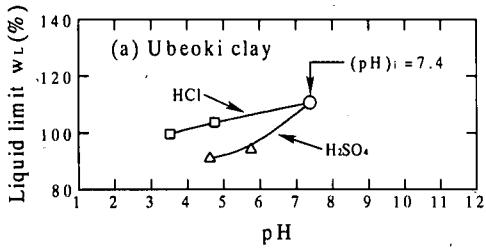


Fig. 9 The change of liquid limit versus pH due to chemicals

Fig. 10 The change of plastic limit versus pH due to chemicals

c) 土のコンシステンシー特性に及ぼす pH 調整薬品の影響

Fig. 9(a)~(c)および Figs. 10(a)~(c)にそれぞれ pH 調整薬品として硫酸および塩酸を用いた場合の液性限界および塑性限界と pH の関係を示す。Figs. 9(a)~(c)ではいずれも液性限界は pH の増加に対して増加しているが、その傾向は硫酸と塩酸によって異なる。Fig. 9(a)の宇部沖粘土では硫酸の方が塩酸より液性限界に及ぼす影響は大きい。Fig. 9(b)の鍋山劈開セリサイトでは塩酸の方が硫酸より液性限界に及ぼす影響は大きい。Fig. 9(c)の寝屋川粘土では硫酸および塩酸の液性限界に及ぼす影響にほとんど差異はみられない。Figs. 10(a)~(c)ではいずれも塑性限界は pH の増加に対して増加しているが、その傾向は液性限界と同様に硫酸と塩酸によって異なる。これらより、pH 調整薬品の効果のあらわれ方は試料によって異なる。つまり、対象となる土に及ぼす塩酸や硫酸の作用は複雑なものと同予想される。したがって、土の pH を調整する場合、地盤環境の化学的条件に上記の点も考慮して、pH 調整薬品の種類を選定することが重要である。

d) 鉱物組成および化学組成による試験結果の整理

Table 4 には今回用いた 14 種類の土試料を鉱物組成の観点で整理した結果を示す。Table 4 には 3. (1) a) で述べたタイプ A およびタイプ B ごとに試料名、その試料の主要粘土鉱物および粘土鉱物の構造 (模式図)²³⁾ を示している。タイプ A の土試料は安中粘土をはじめとする 9 種類であり、主要粘土鉱物は 2:1 型鉱物²³⁾ のスメクタイト、白雲母、イライト、金雲母およびセリサイトである。タイプ B の土試料は庄原粘土をはじめとする 5 種類であり、主要粘土鉱物のほとんどは 1:1 型鉱物²³⁾ のカオリナイト、ハロイサイトおよびディッカイトであるが、一部は 2:1 型鉱物のパイロフィライトである。以上のように、タイプ A およびタイプ B の土試料は主要粘土鉱物の種類すなわち 2:1 型鉱物と 1:1 型鉱物によって概略分類できるようである。次に、粘土鉱物の構造の層間にある陽イオン^{23), 25)}に着目すると、Table 4 に示すようにタイプ A の土試料では陽イオンが存在するが、タイプ B では存在しない。このことを裏付けるように、Table 3 の化学分析結果からタイプ A の土試料では CaO=0.97~5.28 %, Na₂O=0.85~5.63 %, K₂O=0.24~9.95 % であり、タイプ B の土試料では CaO=0.00~

Table 4 Soil samples classified into soil types A and B, and its main clay minerals

Soil type A		Soil type B	
Soil samples	Main clay minerals	Soil samples	Main clay minerals
Annaka clay	Smectite	Daido clay	kaolinite
Ariake clay	Muscovite	Shobara clay	Halloysite
Kobe clay	Muscovite	Imaichi kaolinite	Kaolinite
Neyagawa clay	Illite	Shobara dickite	Dickite
Ubemisaki clay	Illite	Shobara pyrophyllite	Pyrophyllite
Ubeoki clay	Phlogopite		
Kuroiso smectite	Smectite		
Nabeyama sericite	Sericite		
Nabeyama cleavage sericite	Sericite		

Smectite

Muscovite
Illite
Phlogopite
Sericite

Pyrophyllite

Halloysite

Kaolinite
Dickite

※1)After Clay handbook, 2nd ed.

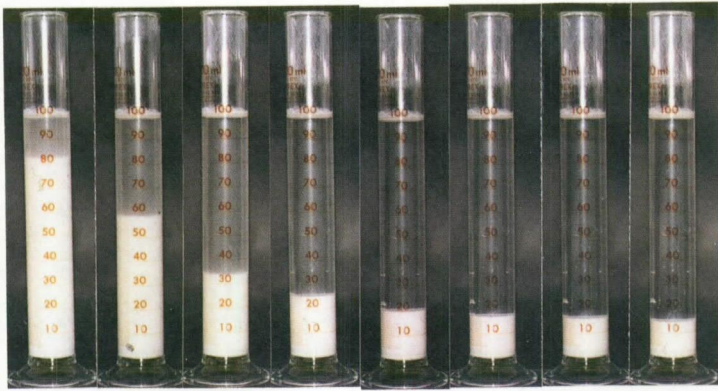
△:Tetrahedral sheet □:Octahedral sheet —:OH plane
 ○:H₂O ⊕:K⁺, Na⁺, Ca²⁺ ⊕:Exchangeable cation

0.20 %, Na₂O=0.16~0.38 %, K₂O=0.13~3.34 %であることから、タイプ A の土試料の方がタイプ B の土試料より CaO, Na₂O および K₂O の含有率が比較的高い。これらを総合すると、タイプ A およびタイプ B の土試料は粘土鉱物の構造の層間に存在する陽イオンの有無によっても概略分類できるようである。

(2) pH が異なる溶液中での土粒子の沈降状況

土のコンシステンシーに及ぼす pH の影響は、粘土粒子間に作用する引力および斥力の変化によるものと考えられる。この引力および斥力は粘土粒子の表面電荷や粒子間の距離に起因する。表面電荷は pH によって変化することが示されている^{25)~27)}。今回用いた 14 種類の土試料においてタイプ A およびタイプ B の二つの異なる傾向があらわれたのは、pH の変化による粘土粒子の表面電荷の変化が主要粘土鉱物の種類により異なるためと推測される。ここでは、このことを検証するための一つのアプローチとして、pH の異なる溶液中での土粒子の沈降状況を観察し、その結果について考察する。

Photo. 1 に代表的な結果として庄原粘土の沈降状況の経時変化を示す。ここでは溶液中の pH は変化させず、pH=4.3 (=pH)_i である。時間の経過に伴って土粒子が沈降し堆積していく様子がわかる。経過時間 1440 分で土粒子の沈降はほぼ収束している。**Photo. 2** に安中粘土および寝屋川粘土、**Photo. 3** に庄原粘土および大道粘土の経過時間が 1440 分のときの土粒子の沈降状況を示す。**Photo. 2** の安中粘土および寝屋川粘土は **3. (1) a)** で述べたタイプ A の土試料である。安中粘土の **Photo. 2(a)** では、pH=1.6 のとき上澄み部分と懸濁部分が明瞭に見分けられるが、pH=10.6 (=pH)_i と pH=12.2 のときは全体的に懸濁したままである。すなわち、土粒子の沈降状況は pH の値によって大きく異なる。**Photo. 2(b)** の寝屋川粘土でも安中粘土とほぼ同様な傾向を示している。一方、**Photo. 3** の庄原粘土および大道粘土は **3. (1) a)** で述べたタイプ B の土試料である。庄原粘土の **Photo. 3(a)** では pH=1.4 と pH=4.3 (=pH)_i のとき上澄み部分と懸濁部分が明瞭に見分けられるが、pH=12.4 のとき若干の上澄み部分が確認できるものの、

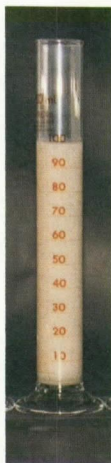


5 15 30 60 120 180 240 1440 (min)

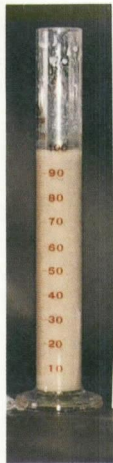
Photo. 1 The change of sedimentation with time (Shobara clay)



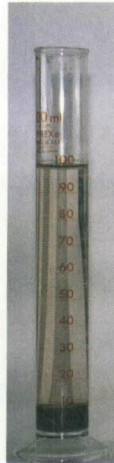
pH=1.6



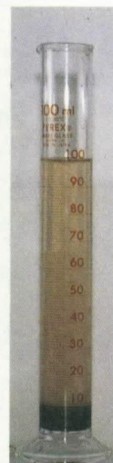
pH=10.6(=(pH)_i)
(a) Annaka clay



pH=12.2



pH=1.8



pH=7.9(=(pH)_i)
(b) Neyagawa clay

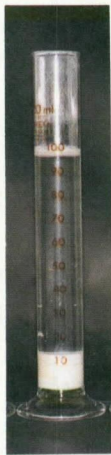


pH=12.4

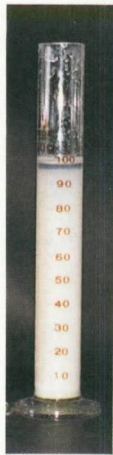
Photo. 2 The change of sedimentation with pH (Soil type A)



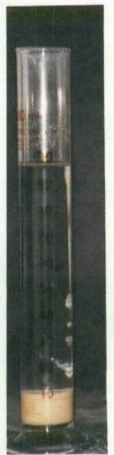
pH=1.4



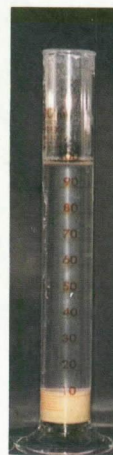
pH=4.3(=(pH)_i)
(a) Shobara clay



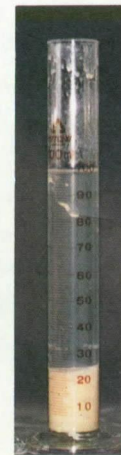
pH=12.4



pH=1.8

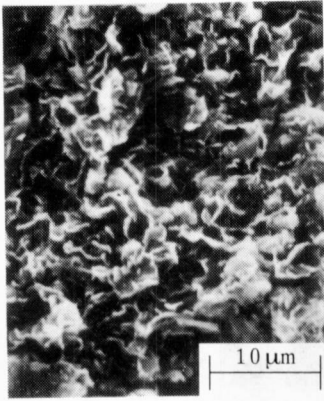


pH=6.8(=(pH)_i)
(b) Daido clay

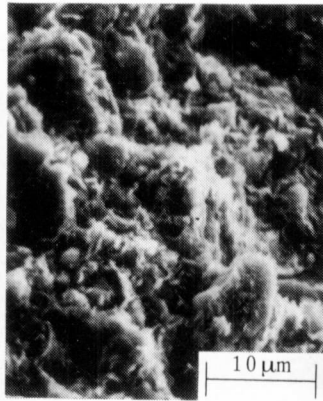


pH=12.5

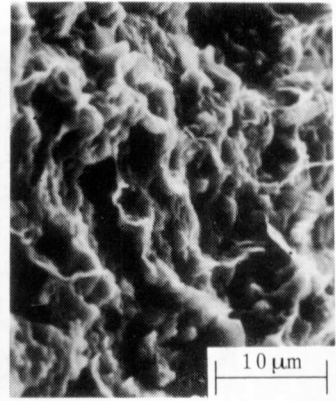
Photo. 3 The change of sedimentation with pH (Soil type B)



(a)pH=2.5

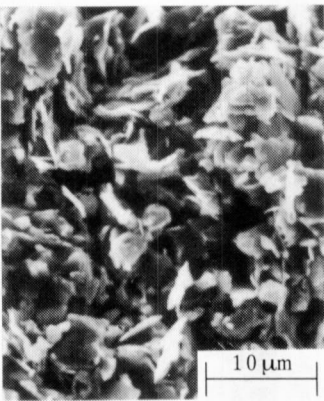


(b)pH=10.6(=(pH)_i)

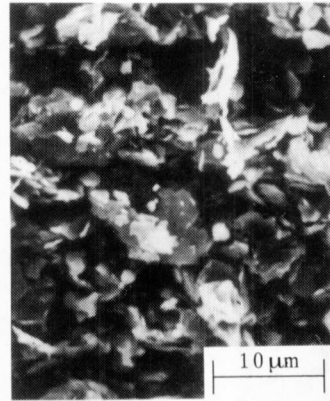


(c)pH=11.6

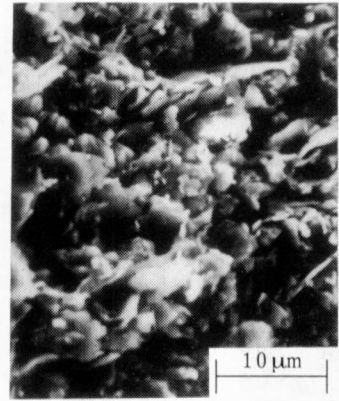
Photo.4 SEM photograph at liquid limit for Annaka clay



(a)pH=2.5

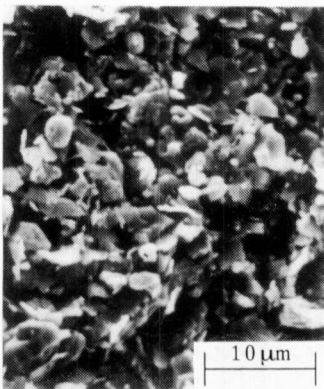


(b)pH=4.3(=(pH)_i)

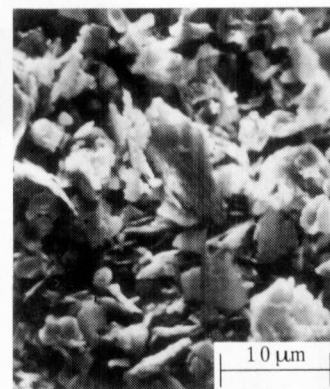


(c)pH=8.0

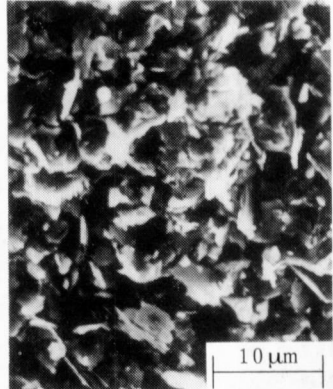
Photo. 5 SEM photograph at liquid limit for Shobara clay



(a)pH=2.5



(b)pH=4.3(=(pH)_i)



(c)pH=8.0

Photo. 6 SEM photograph at plastic limit for Shobara clay

全体的に懸濁したままである。Photo. 3(b)の大道粘土でも上澄み部分の大きさは異なっているが、庄原粘土とほぼ同様な傾向を示している。このように各土試料の沈降状況は pH の影響を受ける。タイプ A およびタイプ B の土粒子の沈降状況の差異は原土試料よりアルカリ性側で最も顕著に表れている。沈降状況も表面電荷による土粒子間の引力と斥力の関係を間接的に表していると考えられる。現状では、このことをコンシステンシー特性と定量的に直接結びつけることはできないものの、この観察結果は、pH の変化によるコンシステンシーの変化には土粒子の表面電荷が影響しており、その度合は主要粘土鉱物の種類によって異なることを示唆している。

(3) pH が異なる土の液・塑性限界時の微視的構造

3.(2)で述べたように、pH の変化による土粒子間の電氣的相互作用の変化が前述した土粒子の沈降状況のみならず土粒子が形成する微視的構造にも影響を与えるものと考えられる。そこで、pH が異なる土の液性限界時および塑性限界時の土粒子の微視的構造を観察し、その結果について考察する。

Photos. 4(a)~(c)および Photos. 5(a)~(c)にそれぞれ安中粘土および庄原粘土の液性限界時の SEM 写真を示す。ここで、写真で白くみえる部分は土粒子が集合した部分、影の部分は間隙部分とみなしている。Photo. 4 の安中粘土はタイプ A の土試料である。間隙部分は、Photo. 4(a)の pH=2.5、Photo. 4(b)の pH=10.6 (=pH)_l、Photo. 4(c)の pH=11.6 の順序で大きくなっている。すなわち、間隙部分の大きさは pH の増加に対して増加しているようである。この間隙部分が間隙水で飽和されていると仮定すれば、この観察結果は 3.(1) a) で述べた液性限界が pH の増加に対して増加したことと対応している。この他のタイプ A のいずれの試料も同様な傾向を示している。

Photo. 5 の庄原粘土はタイプ B の土試料である。間隙部分は、Photo. 5(a)の pH=2.5 と Photo. 5(c)の pH=8.0 で小さく、Photo. 5(b)の pH=4.3 (=pH)_l で大きい。すなわち、間隙部分の大きさは pH の増加に対していったん増加した後、減少しているようである。この観察結果は 3.(1) a) で述べた液性限界が pH の増加に対していったん増加した後、減少したことと対応している。この他のタイプ B のいずれの試料も同様な傾向を示している。このことから液性限界時の土粒子の微視的構造は pH の影響を受けるといえる。

一方、Photos. 6(a)~(c)に庄原粘土の塑性限界時の SEM 写真を示す。間隙部分の大きさは pH を変化させても顕著な差異はみられない。この他の土試料についても、タイプ A およびタイプ B によらず、ほぼ同様な傾向を示している。この観察結果は、3.(1) b) で述べたように塑性限界は液性限界に比べて含水比が低いため間

隙水の pH の影響を受けにくいことを裏付けている。

4. 結論

本研究では、今回用いた 14 種類の土試料に対して pH を変化させた液性限界試験および塑性限界試験を実施した。その試験結果と既往の研究から引用した結果の両者に基づいて、土のコンシステンシーと pH の関係を検討した。新たに得られた知見は以下のようである。

- (1) 液性限界は pH の増加に対して増加、減少およびいったん増加した後、減少するものがある。今回用いた土試料では pH の変化による液性限界の変化量は最大で 422.7%、最小で 3.3% である。
- (2) 塑性限界は pH の増加に対して増加、減少およびいったん増加した後、減少するものがある。今回用いた土試料では pH の変化による塑性限界の変化量は液性限界の変化量に比べて小さい。
- (3) 上記(1)および(2)のことから、塑性指数と pH の関係は液性限界と pH の関係にほぼ類似した傾向にある。
- (4) 上記(1)~(3)で示した pH の増加に対して土のコンシステンシーが増加およびいったん増加した後、減少する土試料は、今回用いた土試料に限れば、粘土鉱物の種類、すなわち粘土鉱物の構造とその層間の陽イオンの有無により概略分類できるようである。
- (5) 土粒子の最終的な沈降状況は pH の影響を受ける。このことは、今回の土試料に限れば、pH の増加に対して土のコンシステンシーが増加およびいったん増加した後、減少する土試料によって異なる。
- (6) 走査型電子顕微鏡を用いて土粒子の微視的構造を観察したところ、液性限界時の間隙部分は pH の値によって大きく異なる。このことは上記(1)で示したように、液性限界が pH の影響を大きく受けることを裏付けている。一方、塑性限界時の微視的構造は pH の値によらず明瞭な差異はない。このことは上記(2)で示したように塑性限界は pH の影響を受けにくいことを裏付けている。

謝辞：本論文をまとめるにあたり、ライト工業(株)技術研究所 半田 斌所長には貴重な社内資料をご提供頂き、チタン工業(株)宇部工場 原田秀文氏には実験結果の考察に対して貴重なご意見を頂いた。また、本研究を実施するにあたり、常盤地下工業(株)瀬原洋一氏、宇部セントラルコンサルタント(株)永田洋文氏、(財)大阪土質試験所 岩崎好規所長ならびに三井不動産建設(株)安部 聖氏には貴重な試料をご提供頂いた。また、実験の実施および結果の整理には、元山口大学学生 畑岡直樹氏(現在、三井不動産建設(株))ならびに岩井 勝氏(現在、(株)ニコス)にご助力を頂い

た。ここに記した方々に深甚なる謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 土質工学会編：環境地盤工学入門 土質工学会，1994。
- 2) ライト工業(株)：ライト工業(株)社内資料，1997。
- 3) Warkentin, B.P. : Interpretation of the upper plastic limit of clays, *Nature*, Vol.190, No.4772, pp.287-289, 1961.
- 4) Torrance, J.K., and Pimat, 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.
- 5) 大坪政美：海成粘土の液性限界・沈定容積に及ぼす塩濃度の影響，農業土木学会論文集 第96号，pp.1-5, 1981。
- 6) 大坪政美 高山昌照 江頭和彦：低膨潤性スメクタイト質海成粘土の繰返し強さに及ぼす塩濃度 陽イオン種の影響，土質工学会論文報告集 Vol.27, No.2, pp.85-92, 1987。
- 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回年次学術講演会講演概要集 第3部 pp.956-957, 1993。
- 8) 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.
- 9) 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.
- 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) 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コンシステンシー限界について，土木学会第52回年次学術講演会講演概要集 第3部 pp.10-11, 1997。
- 13) 赤江剛夫：粘土・水系に存在する粒子間結合様式の推定法—ベントナイト・水系の分散・凝集と流動特性（I）—，農業土木学会論文集 第133号，pp.37-42, 1988。
- 14) 赤江剛夫：添加塩濃度がベントナイト・水系の分散・凝集および流動特性に及ぼす影響—ベントナイト・水系の分散・凝集と流動特性（II）—，農業土木学会論文集 第133号，pp.43-49, 1988。
- 15) 中石克也 岸上定男：非膨潤土の液性・塑性限界について—吸着カチオンが非膨潤土のコンシステンシーに及ぼす影響（II）—，農業土木学会論文集 第108号，pp.65-71, 1983。
- 16) 金 亨柱 吉国 洋 鶴ヶ崎和博：拡散二重層理論による超軟弱粘土の圧縮性および透水性の評価，土質工学会論文報告集 Vol.31, No.3, pp.175-184, 1991。
- 17) 吉國 洋 森脇武夫 池上慎司 有本享作 源 明夫：粘土の物理的性質に及ぼす塩分濃度の影響，土木学会第48回年次学術講演会講演概要集 第3部 pp.356-357, 1993。
- 18) Olson, R.E. : Shearing strengths of kaolinite, illite, and montmorillonite, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.100, GT11, pp.1215-1229, 1993.
- 19) 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回土質工学会研究発表会発表講演集 pp.1037-1038, 1995。
- 20) 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回地盤工学会研究発表会発表講演集 pp.1323-1324, 1996。
- 21) 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回地盤工学会研究発表会発表講演集 pp.827-828, 1997。
- 22) 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回地盤工学会研究発表会発表講演集 pp.791-792, 1998。
- 23) 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。
- 24) 土質工学会編：土質試験の方法と解説，土質工学会，pp.125-131, 1990。
- 25) 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。
- 26) 岡島秀夫：土の構造と機能—複雑系をどうとらえるか—，農産漁村文化協会，1989。
- 27) 土質工学会編：土のコンシステンシーに関するシンポジウム発表論文集 土質工学会，pp.25-29, 1995。

(1998. 8. 13 受付)

EFFECT OF pH ON CONSISTENCY OF SOILS

Eiji MATSUSHITA, Tetsuro YAMAMOTO and Motoyuki SUZUKI

The effect of pH on liquid and plastic limits of soils was examined based on present and previous results of liquid and plastic limits tests with changing pH, and on the mineral and chemical compositions of the soils. It was clarified that although pH has a very pronounced effect on liquid limits, its effect on plastic limits is slight. These results indicate that the pH-induced changes of the liquid and plastic limits are dependent on the structure of the clay minerals and the existence of cations between the sheets of clay minerals. Finally, it was shown that the pH-induced changes of the sedimentation and the micro-structure of soil particles effectively clarify the changes of liquid and plastic limits with changing pH.