

ベントナイトの非排水せん断挙動に及ぼす 水素イオン濃度指数の影響

亀井健史*・常田 亮**

本研究では、ベントナイトの非排水せん断挙動に及ぼす水素イオン濃度指数 (pH) の影響を調べるために、人工的に調整した5種類の異なる水素イオン濃度指数を有するベントナイト試料に対して、等方圧密非排水三軸圧縮試験を実施した。その結果、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を定量的に明らかにしている。

Key Words : consolidated undrained shear, physico-chemical properties, stress path, stress-strain curve, shear strength

1. はじめに

実地盤の強度・変形特性を評価する場合、一般的には各種の原位置試験や原位置より採取したいわゆる乱さない試料に対して一連の室内試験が実施されている。しかしながら、原位置より採取した試料の化学成分に着目すると、採取地によってその化学成分組成や水素イオン濃度指数 (pH) 等が異なっており、特に水素イオン濃度指数は、試料を空気乾燥することによっても変化することが知られている¹⁾。また、干拓直後の土や造成直後の新第三系頁岩および泥岩の一部には、徐々に水素イオン濃度指数が低下し、最終的にはpH値が2~3の極めて強い酸性を示す酸性硫酸塩土と呼ばれる試料の存在が認められている²⁾。このような化学成分の変化に伴う土の工学的特性の変化は、強度・変形特性を評価する場合には考慮されていないのが現状であると考えられる。さらに、土の化学成分組成や水素イオン濃度指数は、コンクリートの劣化や鋼材の腐食等を招く要因のひとつであり、構造物の耐久性と密接な関係を有していることが指摘されている³⁾。

一方、土粒子構造は、水素イオン濃度指数や電気拡散二重層の厚さおよびイオンの種類等によって変化し、その結果、土の強度・変形特性は、異なった傾向を示すことが知られている^{4)~6)}。また、地すべり粘土の降伏応力は、水素イオン濃度指数の低下に伴って増大するとの報告例⁷⁾もあり、地すべり粘土のせん断強さは、水素イオン濃度指数に依存しているものと考えられる。さらに、水素イオン濃度指数は、軟弱地盤や高有機質土に対して石灰安定処理工法を適用した場合には、有害因子のひとつ

つとなることが指摘されている⁸⁾。したがって、水素イオン濃度指数が土の工学的特性に及ぼす影響を解明することは、粘性土地盤の強度・変形特性等を評価する上で重要な要素のひとつであることが容易に想定される。

上記のような点に着目して、Olson⁹⁾は、土の物理化学的性質が粘性土の工学的特性に及ぼす影響を解明するために、水素イオン濃度指数、イオンの種類および電解液の濃度を変化させたカオリナイト、イライトおよびモンモリロナイトに対して圧密排水および圧密非排水三軸圧縮試験を実施した。その結果、粘性土の工学的特性は、土粒子間に作用する物理化学的相互作用の影響を受けていることを明らかにしている。また、亀井・佐野¹⁰⁾は、人工的に調整した5種類の異なる水素イオン濃度指数を有するベントナイトに対して、一軸圧縮試験および標準圧密試験を行い、ベントナイトの圧密特性および強度・変形特性に及ぼす水素イオン濃度指数と試料の予備圧密期間の影響をある程度定量的に示している。さらに、菊沢ら¹¹⁾は、外液条件 (イオンの種類および濃度) を変化させたベントナイトに対して、沈降堆積試験および一面せん断試験を実施し、イオンの種類および濃度によって粘土粒子の結合状態を分類し、強度・変形特性と粘土粒子の結合状態の関連性について明らかにしている。

Thompson¹²⁾は、水素イオン濃度指数が石灰安定処理土の強度発現に及ぼす影響を検討した結果、水素イオン濃度指数が7以上の試料の場合には、顕著な安定処理効果が認められるのに対して、水素イオン濃度指数の低い酸性試料に関しては、著しい安定処理効果が認められないと報告している。また、Kumapley and Ishola¹³⁾は、土のせん断特性に及ぼす水素イオン濃度指数の影響を解明するために、苛性ソーダを用いて水素イオン濃度指数を5.5~12.5の範囲で3種類に変化させた粘性土試料に対して、コーン貫入試験を実施した。その結果、せん断強さは、水素イオン濃度指数の増加に伴って減少する傾

* 正会員 工博 基礎地盤コンサルタンツ (株) 地盤物性研究室室長 (〒145 大田区石川町 2-14-1)

** 正会員 工修 長野工業高等専門学校 環境都市工学科助教

Table 1 Index properties of soil sample

Soil Sample	ρ_s (g/cm ³)	w_L (%)	w_P (%)	I_P	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
Bentonite	2.64	327.1	38.4	288.7	0.0	15.0	85.0

Table 2 Chemical compositions of soil sample

Soil Sample	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	Li (%)
Bentonite	63.2	13.8	2.6	3.1	2.1	1.1	2.3	7.5

向を示すことを明らかにしている。さらに、イオン交換作用が地すべりの主要因のひとつであることに着目して、地すべり対策工法におけるイオン交換法の有効性を検討した報告例もある^{14),15)}。

一方、地すべりは、新第三紀中新世の地層において多発しており、この地層において地すべりが多発する原因としては、岩質が軟弱で水を含みやすく、表層のみならず相当深部まで風化が進み岩石が粘土化していることが指摘されている。特に、白色の凝灰岩は粘土化してベントナイトに変化し、吸水膨張して強度が著しく低下する性質を有していることが知られている。また、ベントナイトはモンモリロナイトが主成分であり、交換性イオンがナトリウムである場合には吸水膨張が最も顕著となり、地すべり粘土と呼ばれるものには、このモンモリロナイトを含有している場合の多いことが報告されている¹⁶⁾。さらに、地すべり地における調査によると^{17),18)}、地すべり発生の主要因としては、すべり面に作用する間隙水圧とすべり面における土の力学的性質の解明が必要であることが報告されている。特に、間隙水圧は融雪期や豪雨期における地下水の増加によって上昇し、その結果、土のせん断抵抗力を低下させ斜面を不安定化させるために、その定量的評価は極めて重要であることが指摘されている。したがって、斜面安定化の主要因として、すべり面における過剰間隙水圧の低減は、工学的に非常に重要な問題であるものと考えられる。

近年では、拡散二重層理論を用いた軟弱粘性土地盤の圧縮性および透水性の評価の可能性についても報告されている¹⁹⁾。しかしながら、水素イオン濃度指数が土の強度・変形特性に及ぼす影響に関しては、まだ未解明な点が多いのが現状であると考えられる。また、地すべり地の地質および地すべり運動の要因を考慮すると、ベントナイトの間隙水圧挙動を解明することは、斜面の安定性を解明する上で重要な問題であることが容易に想定される。

本研究では、上記の点に着目し、人工的に調整した5種類の異なる水素イオン濃度指数を有するベントナイトの間隙水圧挙動と強度・変形特性の把握を目的として、等方圧密非排水三軸圧縮試験(CIUC TEST)を実施し、

Table 3 Typical soil properties of each specimen after pre-consolidation

pH	p'_c (kPa)	w_o (%)	S_{r_o} (%)	e_o	ρ_{d_o} (g/cm ³)
3	49	159.2	98.9	4.250	0.503
5	49	162.4	98.8	4.339	0.489
6	49	166.8	99.1	4.443	0.485
7	49	177.6	99.5	4.987	0.449
9.5	49	251.3	99.4	6.674	0.344

p'_c : pre-consolidation pressure
 w_o : water content of soil sample after pre-consolidation
 S_{r_o} : degree of saturation of soil sample after pre-consolidation
 e_o : void ratio of soil sample after pre-consolidation
 ρ_{d_o} : dry density of soil sample after pre-consolidation

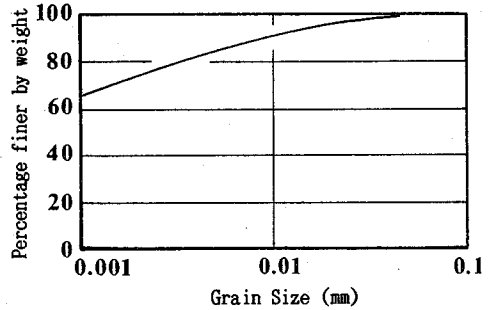


Fig.1 Grain size distribution curve of sample

その諸特性を取りまとめている。

2. 試料および実験方法

(1) 試料

実験に使用した試料は、市販のベントナイト (Na型) を練返して予備圧密したものである。試料の物理的特性および化学成分組成を Table 1 と Table 2 に示す。また、Fig.1 は試料の粒径加積曲線を示している。

練返し試料の予備圧密は、ベントナイトに塑性指数の 1.5 倍程度の含水比となるように蒸留水を加え、ミキサーで約 1 時間攪拌してスラリー状にした後、所定量の 1 規定硫酸を加えて試料の pH 値が 3, 5, 6 (酸性), 7 (中性), 9.5 (アルカリ性) の 5 種類となるように調整し、直径 15 cm, 高さ 30 cm の予備圧密モールドに入れ一次元的に行った。この際、予備圧密圧力は 49 kPa, 予備圧密期間は 28 日間とした。供試体は直径 5 cm, 高さ 10 cm の円柱形¹⁾とし、上述した試料からワイヤーソーとストレートエッジおよびトリマーを用いて切り出して成形した。Table 3 は、代表的な供試体の初期性状を取りまとめている。

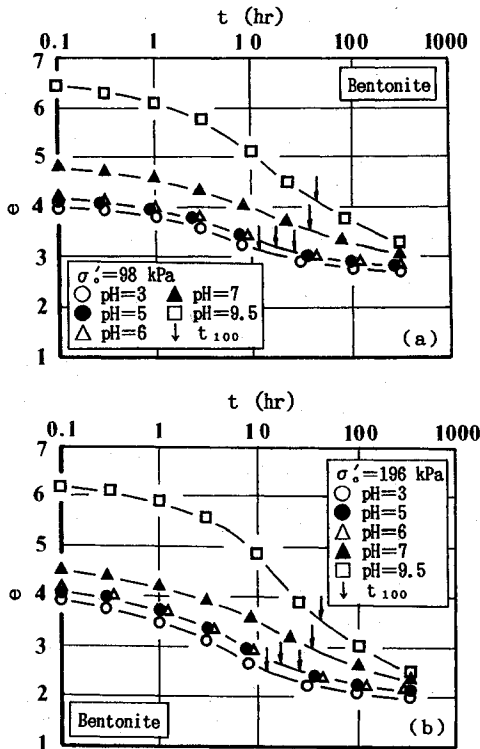


Fig.2 Typical change in void ratio with elapsed time

(2) 実験方法

実験は、ひずみ制御方式の等方圧密非排水三軸圧縮試験 (CIUC TEST) である。せん断時のひずみ速度は、供試体内の間隙水圧の均等化等を考慮して 0.05% /min^{1),20)} とし、排水に伴う pH 値の変化を極力小さくするために、全実験過程を通して所定の pH 値に調整した蒸留水を使用した。また、せん断時の有効拘束圧 σ'_v は、試料の予備圧密圧力を考慮して 98 kPa および 196 kPa とした。さらに、圧密およびせん断過程を通して、98 kPa のバックプレッシャーを供試体に作用させており、せん断試験前の B 係数は、全試料において 0.98 以上であった。なお、圧密時間は、最も圧密時間の長いアルカリ性試料 (pH=9.5) に対して 3 t 法^{1),21)} に基づいて決定し、その圧密時間 (336 時間) を全試料に対して適用した。

3. 実験結果および考察

(1) 圧密特性

Fig.2 (a), (b) は、5 種類の異なる pH 値を有するベントナイトの代表的な間隙比-時間曲線を示している。ここで、図中の ↓印は、曲線定規法¹⁾ により決定した一次圧密終了時間 t_{100} を示している。酸性試料 (pH ≤ 6) の場合、間隙比が圧密時間の増加に伴って減少し、一次圧密が終了するとその減少傾向は徐々に低下してお

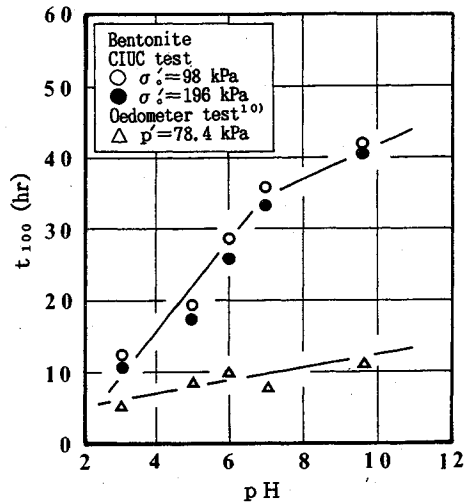


Fig.3 Relationship between time of 100% consolidation and pH

り、間隙比-時間曲線は、pH 値によらず圧密過程すべてにおいてほぼ一致した挙動を示している。また、中性試料 (pH=7) の間隙比-時間曲線は、一次圧密終了後の二次圧密量がわずかに増加するものの、酸性試料の場合と類似した挙動を示している。これに対して、アルカリ性試料 (pH=9.5) の場合には、一次圧密終了後の二次圧密量が酸性試料および中性試料と比較してかなり大きくなっており、間隙比-時間曲線上における一次圧密終了後の圧密曲線の勾配は、pH 値の増加に伴って増大する傾向が認められる。このことは、アルカリ性試料の圧密前の状態量や土粒子構造が中性試料および酸性試料とは大きく異なっていることが、その主要因であるものと考えられる。さらに、圧密に伴う間隙比の減少割合は、pH 値の増加に伴って増大しており、酸性試料 (pH=3) とアルカリ性試料 (pH=9.5) の間隙比の差は、圧密前に 60% 程度であったものが圧密終了時には約 10% ~ 15% に減少している。これは、アルカリ性試料 (pH=9.5) の体積変化量が酸性試料 (pH=3) よりも大きくなっていることを示唆しており、pH 値の増加に伴って試料の圧縮性が増大しているものと考えられる。

一方、各試料の一次圧密終了時間は、同有効拘束圧条件下の場合、pH 値の増加に伴って増大しており、pH 値が低い試料ほど一次圧密が早く終了している。このことを明瞭に表わすために、一次圧密終了時間と pH 値との関係を Fig.3 に示す。ここで、図中の一点は、同一条件の供試体より得られた一次圧密終了時間の平均値である。三軸圧密試験における一次圧密終了時間は、pH=7 (中性) の点を屈曲点としたバイリニアアの挙動を示しており、pH 値が 7 以下になると、pH 値の低下に伴う一次圧密終了時間の減少割合が大きくなっている。これに対して、標準圧密試験¹⁰⁾ の場合、一次圧密終了時間は、

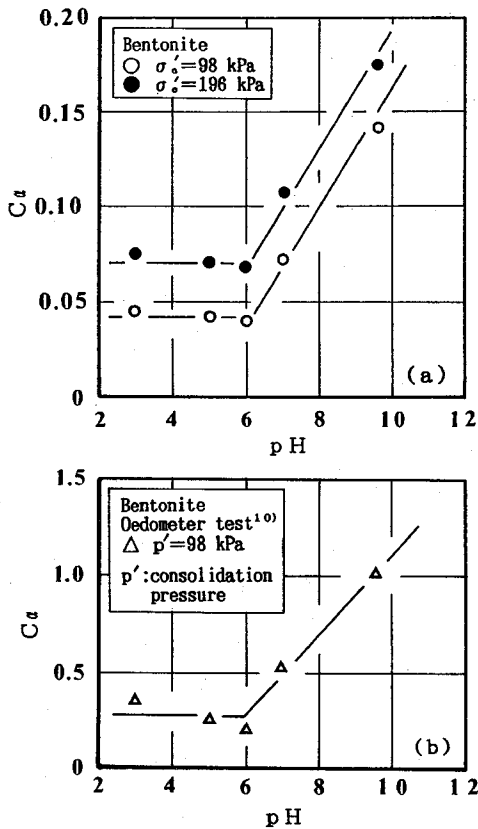


Fig.4 Relationship between secondary compression index and pH

pH 値の増加に伴ってほぼ直線的に増大する傾向を示している。これは、両圧密試験における圧密方法および供試体の排水長等が異なっていることに起因しているものと考えられる。

Fig.4 は、二次圧密係数 C_{α} と pH 値との関係を示している。なお、 C_{α} は一次圧密終了後の間隙比-時間曲線の直線部分の傾きとして定義した ($\Delta e / \Delta \log t$)²²⁾。pH 値が 6 以下 (酸性) の場合、 C_{α} は有効拘束圧によらずほぼ一定値 ($\sigma'_c = 98 \text{ kPa}$: $C_{\alpha} \approx 0.043$; $\sigma'_c = 196 \text{ kPa}$: $C_{\alpha} \approx 0.070$) を示しており、pH 値が 6 以上になると pH 値の増加に伴ってほぼ直線的に増大する傾向が認められ、同様の傾向は、既往の研究例¹⁰⁾においても報告されている。また、三軸圧密試験より得られた C_{α} と Fig.4 (b) に示した標準圧密試験¹⁰⁾より得られた C_{α} と比較すると 1/10 程度の値を示しており、これは、三軸圧密試験の圧密時間 (336 時間) が、標準圧密試験の圧密時間 (24 時間) よりもかなり長時間であることに起因しているものと考えられる。さらに、アルカリ性試料 (pH=9.5) と酸性試料 (pH \leq 6) の C_{α} を比較すると、アルカリ性試料の C_{α} は、酸性試料の 2.5~3.3 倍程度大きな値を示している。これは、アルカリ性試料の二次

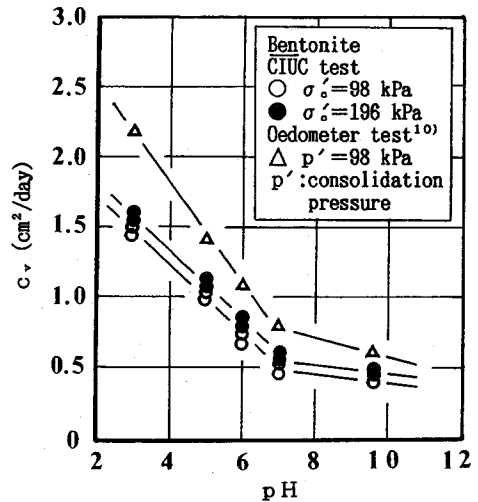


Fig.5 Relationship between coefficient of consolidation and pH

圧密量が酸性試料よりも大きいことを示唆しており、このことが、アルカリ性試料の圧密終了時における体積変化量が酸性試料よりも増大している主要因であるものと考えられる。

圧密係数 c_v と pH 値との関係を Fig.5 に示す。ここで、 c_v は三軸圧密試験の際に適用される提案式より算出した²³⁾。同有効拘束圧条件下の場合、 c_v は pH 値の低下に伴って増大し、pH 値が 7 以下になるとその増加割合が急増するバイリニア的挙動を示しており、酸性試料 (pH=3) の c_v は、アルカリ性試料 (pH=9.5) の約 3 倍の値となっている。同様の傾向は、亀井・佐野¹⁰⁾ が 5 種類の異なる pH 値を有するベントナイトに対して実施した標準圧密試験においても認められており、これは、先述したように、pH 値の増加に伴って試料の体積変化量が増大することが、その主要因のひとつであるものと考えられる。両試験より得られた圧密係数 c_v を比較すると、三軸圧密試験から得られた c_v は、標準圧密試験より得られた値よりも小さな値を示しており、この結果は既往の研究例²⁴⁾とも一致している。また、同 pH 値下における両者の差は、pH 値の増加に伴って小さくなっている。さらに、 c_v は pH 値によらず有効拘束圧が 196 kPa の場合が 98 kPa の場合よりもわずかに大きな値を示している。

Fig.6 は、透水係数 k と pH 値との関係を示している。なお、透水係数は上述した圧密係数を用いて算出し、図中の一点は、同一条件の供試体より得られた透水係数の平均値を示している。透水係数は、pH 値の低下に伴って増大し、pH=7 の点を屈曲点としてその増加割合が急増するバイリニア的挙動を示している。また、酸性試料 (pH=3) の透水係数は、両有効拘束圧条件下においてアルカリ性試料 (pH=9.5) の約 2.3 倍の値となっ

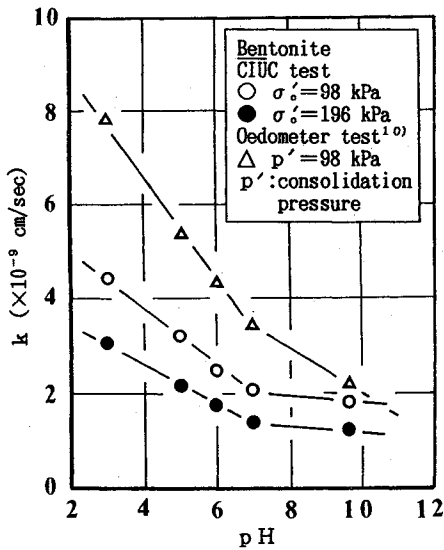


Fig.6 Relationship between coefficient of permeability and pH

ており、酸性試料の透水性がアルカリ性試料よりかなり大きくなっていることがわかる。さらに、三軸圧密試験から得られた透水係数は、標準圧密試験¹⁰⁾より得られた値よりも小さな値を示しており、同様の傾向は既往の研究例²⁴⁾においても認められている。

ここで、土粒子構造に着目すると、ベントナイトの主要な粘土鉱物であるモンモリロナイトは、その表面に多量の負の永久荷電と端面に pH 依存荷電を有しているために、Fig.7 に示すように、間隙水中の pH 値の違いによって異なった土粒子構造を形成することが指摘されている。図より、試料の pH 値が中性および酸性の場合には、土粒子の pH 依存荷電が正に帯電するために、負の永久荷電との間に吸引力が作用し、端・面配列による綿毛構造が発達しているものと考えられる。これに対して、試料の pH 値がアルカリ性の場合、土粒子の pH 依存荷電は負に帯電し、負の永久荷電との間に反発力が作用するために、配向構造が発達していることが知られている¹⁰⁾。また、土粒子構造が配向構造の場合には、土粒子が水平方向に配列しているために、水平方向の排水性が鉛直方向よりも増大しており、その結果、綿毛構造と比較して透水異方向性が大きくなるのが容易に想定される。さらに、綿毛構造では、構造単位としてのフロックが存在しているために、間隙水は土粒子の構造単位を流れて比較的容易に排水されるのに対して、配向構造の場合には、間隙水が配向した土粒子の周囲に拘束されているために、容易に排水されないことが報告されている²⁵⁾。このことから、土粒子構造が綿毛構造の場合には、配向構造よりも排水性が大きくなるために、短期間で圧密現象が進行することが容易に想定される。したがって、pH 値の低下に伴う圧密係数および透水係数の増加現象

Table 4 Summary of consolidation properties of each specimen

pH	σ'_c (kPa)	t_{100} (min)	C_v (cm ² /day)	k (cm/sec)	C_a
3	98	780	1.45	4.4×10^{-9}	0.044
	196	720	1.57	2.9×10^{-9}	0.077
5	98	1150	0.98	3.2×10^{-9}	0.043
	196	1050	1.08	2.1×10^{-9}	0.070
6	98	1750	0.65	2.5×10^{-9}	0.041
	196	1550	0.73	1.7×10^{-9}	0.067
7	98	2200	0.51	2.1×10^{-9}	0.075
	196	2000	0.56	1.4×10^{-9}	0.108
9.5	98	2500	0.45	1.9×10^{-9}	0.141
	196	2400	0.47	1.3×10^{-9}	0.175

t_{100} :time of 100% consolidation
 C_v :coefficient of consolidation²³⁾
 k:coefficient of permeability
 C_a :secondary compression index²²⁾

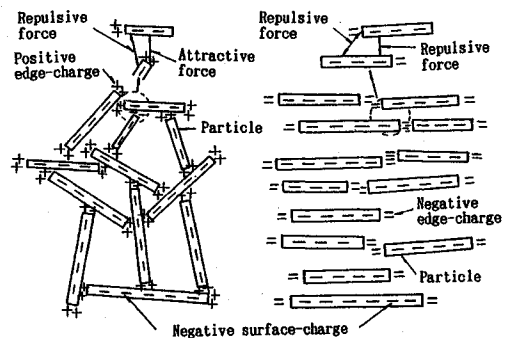


Fig.7 Comparison of soil structures for samples with different pH¹⁰⁾

は、上述した pH 値の違いによる土粒子構造の相違がその主要因であるものと考えられる。

Table 4 は、試料の圧密特性を取りまとめている。

以上のことより、圧密係数 c_v および透水係数 k は、pH 値の低下に伴って増大し、pH=7 (中性) の点を屈曲点としてその増加割合が試料の酸性化の進行に伴って急増するバイリニア-的挙動を示すことが明らかとなった。

(2) 応力-軸ひずみの関係

pH 値が異なるベントナイトの代表的な応力と軸ひずみの関係を、Fig.8 (a), (b) に示す。同有効拘束圧条件下の場合、応力-ひずみ曲線は、pH 値によらずほぼ類似した形状を示しており、軸ひずみが約 6%~7% で破壊に至り、その後軸ひずみの増加に伴って主応力差がわずかに低下している。また、同じひずみ条件下における主応力差は、有効拘束圧によらず pH 値の低下に伴っ

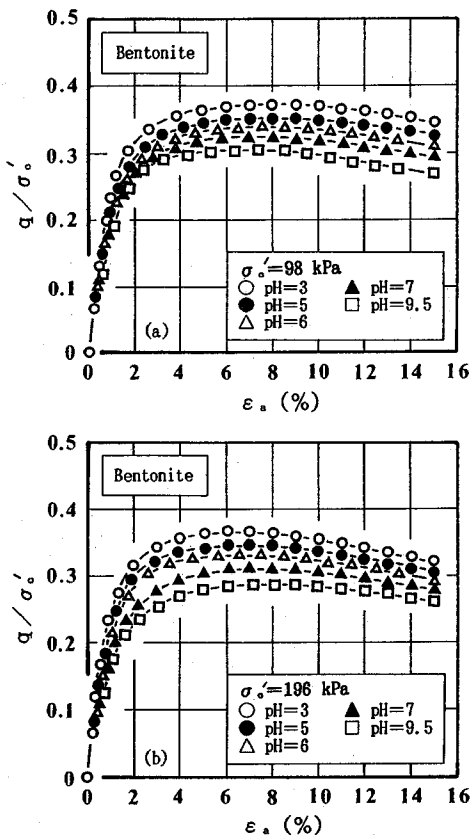


Fig.8 Typical stress-axial strain curves in CIUC TEST

て増大しており、酸性試料 (pH=3) の最大主応力差は、アルカリ性試料 (pH=9.5) よりも 20% 程度大きな値を示している。さらに、応力-ひずみ曲線の初期勾配は、pH 値の低下に伴って増大する傾向が認められる。

(3) 過剰間隙水圧-軸ひずみの関係

Fig.9 (a), (b) は、代表的な過剰間隙水圧と軸ひずみの関係を示している。過剰間隙水圧は、軸ひずみの増加に伴って増大し、軸ひずみが 8% 程度に達するとほぼ一定値となっており、過剰間隙水圧-軸ひずみ曲線は、pH 値によらずほぼ類似した形状を示している。また、過剰間隙水圧の発生量は、非排水せん断過程すべてにおいて pH 値の低下に伴って減少している。このことを明瞭に表わすために、最大過剰間隙水圧比 $\Delta u_{max}/\sigma'_c$ と pH 値との関係を Fig.10 に示す。ここで、最大過剰間隙水圧は、せん断時の有効拘束圧で正規化している。最大過剰間隙水圧比は、有効拘束圧によらず pH 値の低下に伴ってほぼ直線的に減少している。これは、先述した pH 値の低下に伴う主応力差の増加現象を裏付けており、過剰間隙水圧の発生量は、pH 値を低下させることによって低減することが可能であることを示唆している。

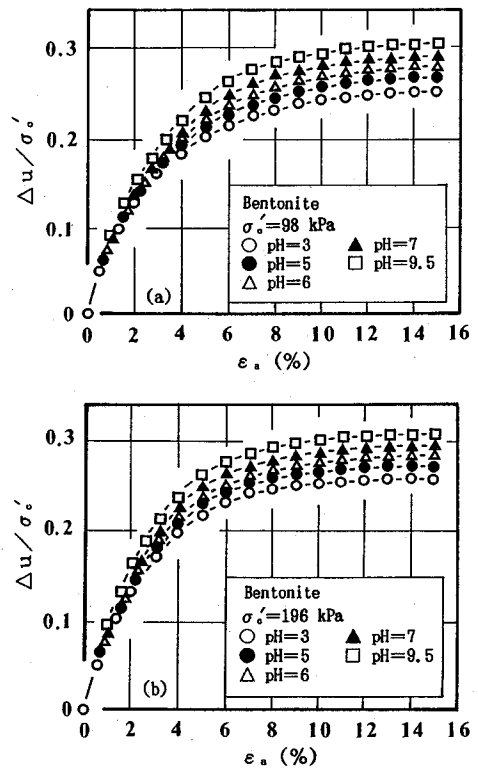


Fig.9 Typical excess pore water pressure-axial strain curves in CIUC TEST

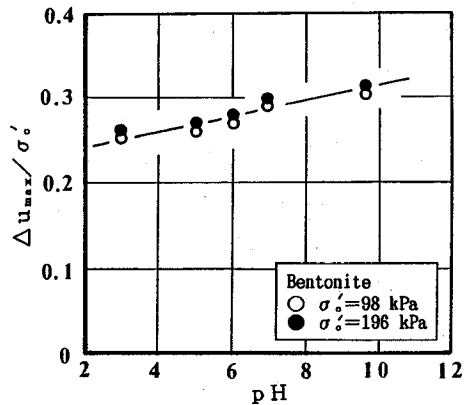


Fig.10 Relationship between the maximum excess pore water pressure and pH

(4) 有効応力径路

Fig.11 (a), (b) は、酸性試料 (pH=3)、中性試料 (pH=7) およびアルカリ性試料 (pH=9.5) の代表的な有効応力径路を示している。主応力差の増加に伴って過剰間隙水圧が上昇することにより平均有効主応力が減少するために、各試料の有効応力径路は、Critical State Line (C.S.L.) に漸近していき、最終的には破壊に至っている。また、有効応力径路の形状は、各試料とも弓形の状態界面²⁶⁾を示している。上記の傾向は、

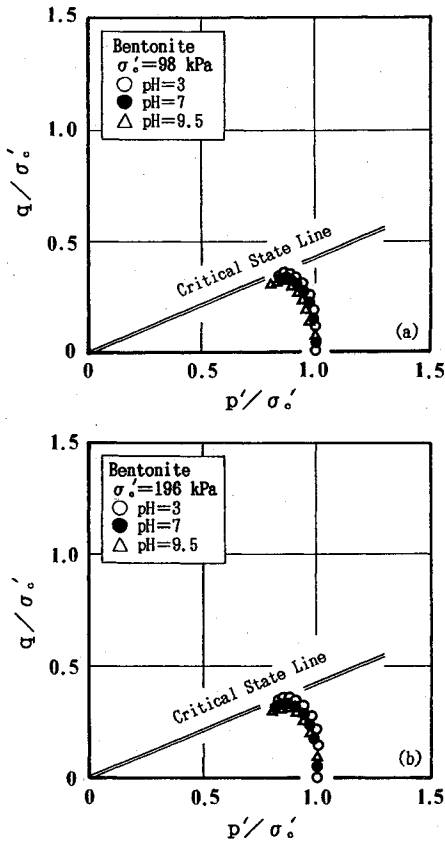


Fig.11 Typical effective stress paths in CIUC TEST

pH 値が 5 と 6 の試料においても認められており、有効応力径路は pH 値によらずほぼ類似した挙動を示すものと考えられる。さらに、同平均有効主応力下における主応力差は、pH 値の低下に伴ってわずかに大きくなっている。これは、pH 値の低下に伴って過剰間隙水圧の発生量が減少し、その結果、主応力差が増大していることに起因しているものと考えられる。

(5) 強度特性

Fig.12 は、非排水せん断強さ c_u と pH 値との関係を示している。図より、同有効拘束圧条件下の場合、非排水せん断強さは、圧密係数および透水係数が pH 値の低下に伴ってバイリニア的挙動を示したのとは異なり、pH 値の低下に伴ってほぼ直線的に増大していることがわかる。また、酸性試料 (pH=3) の非排水せん断強さは、有効拘束圧によらずアルカリ性試料 (pH=9.5) よりも約 20% 大きな値を示している。非排水せん断強さとせん断時の有効拘束圧の比を強度増加率 c_u/σ'_c と定義し、その値と pH 値との関係を Fig.13 に示す。ここで、図中の一点は、各 pH 値下における強度増加率の平均値である。強度増加率は、pH 値の低下に伴ってほぼ直線的に増加する傾向を示しており、同様の傾向は、佐野・

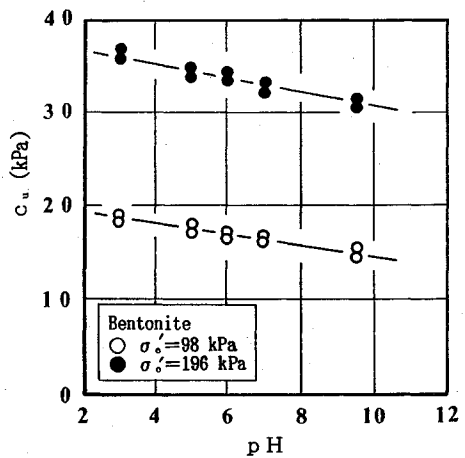


Fig.12 Relationship between the undrained shear strength and pH

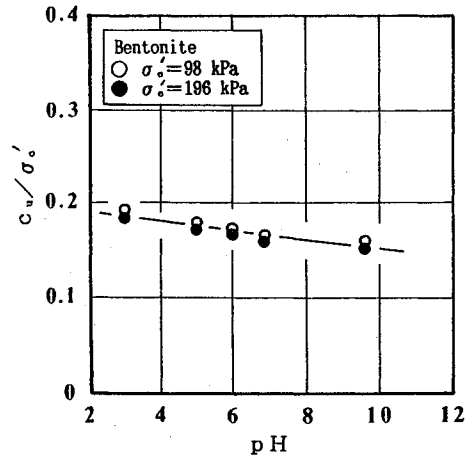


Fig.13 Relationship between the ratio of the undrained shear strength to the initial effective consolidation pressure and pH

亀井²⁷⁾が 5 種類の異なる pH 値を有するベントナイトに対して実施した一面せん断試験においても認められている。この主要因としては、先述したように、pH 値の低い試料の場合には綿毛構造が発達しており短期間で圧密現象が進行するために、pH 値の低下に伴ってせん断時の過剰間隙水圧の発生量が減少し、その結果、非排水せん断強さが増大しているものと考えられる。

以上のことから、試料の酸性化は、土の力学的挙動に対して強度増加等の好結果をもたらすことがある程度明らかとなった。しかしながら、先述したように地盤環境的観点から見ると、土の酸性化は近接構造物の耐久性や軟弱地盤の安定処理効果等に悪影響を及ぼすことが知られている。したがって、土の酸性化に関しては、地盤力学的観点と地盤環境的観点の両面からとらえた研究が今後必要となろう。

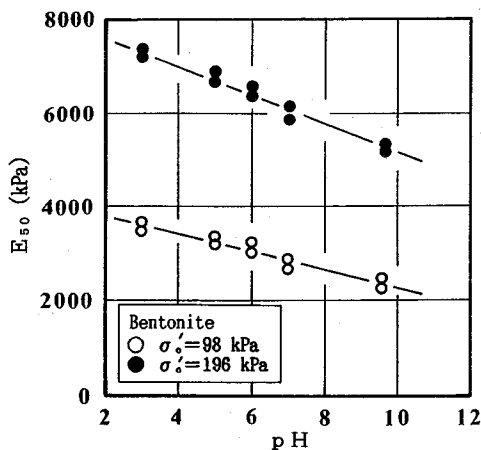


Fig.14 Relationship between the modulus of deformation and pH

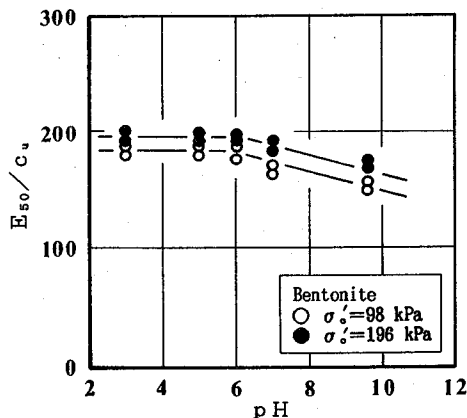


Fig.15 Relationship between E_{50}/c_u and pH

(6) 変形特性

Fig.14は、変形係数 E_{50} と pH 値との関係を示している。ここで、変形係数は、応力-ひずみ曲線上において主応力差が最大主応力差の1/2となる点と原点を結ぶ割線係数で定義した。変形係数は、非排水せん断強さと同様に有効拘束圧によらず pH 値の低下に伴ってほぼ直線的に増大している。また、酸性試料 (pH=3) の変形係数は、両有効拘束圧条件下においてアルカリ性試料 (pH=9.5) よりも30%程度大きな値を示している。これは、pH 値の低下に伴って非排水せん断強さが増大していることが、その主要因であるものと考えられる。ここで、試料の乱れの程度を表す指標²⁸⁾としてよく用いられている E_{50}/c_u 値と pH 値との関係を Fig.15 に示す。同有効拘束圧条件下の場合、 E_{50}/c_u 値は pH 値が6 (酸性) の点まではほぼ一定値 ($\sigma'_c=98$ kPa : $E_{50}/c_u \approx 184$, $\sigma'_c=196$ kPa : $E_{50}/c_u \approx 196$) を示しており、pH 値が6以上になると E_{50}/c_u 値は、pH 値の増加に伴ってほぼ直線的に低下している。また、アルカリ性試料 (pH=9.5)

Table 5 Summary of triaxial compression test results

pH	σ'_c (kPa)	c_u (kPa)	c_u/σ'_c	ε_f (%)	E_{50} (kPa)	A_f
3	98	18.6	0.190	6.8	3500	0.663
	196	36.4	0.185	6.2	7200	0.685
5	98	17.3	0.177	6.9	3300	0.722
	196	34.0	0.173	6.2	6800	0.737
6	98	17.0	0.173	6.8	3100	0.768
	196	33.7	0.172	6.2	6400	0.784
7	98	16.1	0.164	6.8	2700	0.833
	196	31.1	0.159	6.3	5800	0.841
9.5	98	15.3	0.156	7.2	2300	0.888
	196	30.5	0.156	6.4	5000	0.902

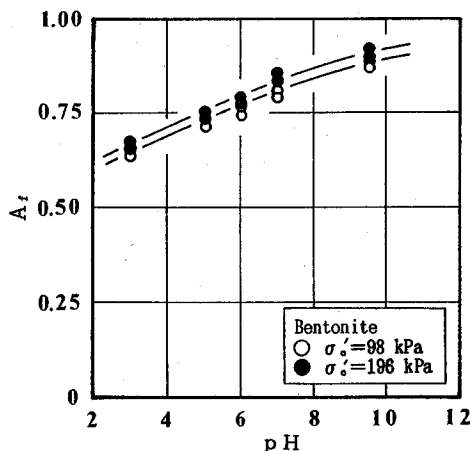


Fig.16 Variation in A_f values with pH

の E_{50}/c_u 値は、酸性試料 (pH=3) よりも約18%小さな値を示している。これは、pH 値が6以上になると pH 値の増加に伴って破壊ひずみが増大する可能性のあることを示唆している。さらに、同 pH 値下の E_{50}/c_u 値は、有効拘束圧が196 kPa の場合が98 kPa の場合よりも5~10%程度大きな値を示している。

Fig.16は、破壊時の間隙圧係数 A_f と pH 値との関係を示している。破壊時の間隙圧係数 A_f は、有効拘束圧によらず pH 値の増加に伴って増大する傾向を示している。これは、pH 値の増加に伴って破壊時の過剰間隙水圧の発生量が増大していることに起因しているものと考えられる。また、同 pH 値下における破壊時の間隙圧係数 A_f は、有効拘束圧が196 kPa の場合が98 kPa の場合よりもわずかに大きな値を示している。

Table 5は、今回実施した等方圧密非排水三軸圧縮試験結果を取りまとめている。

4. 結 論

本研究では、ベントナイトの非排水せん断挙動に及ぼす水素イオン濃度指数の影響を解明するために、人工的に調整した5種類の異なる水素イオン濃度指数を有するベントナイト試料に対して、等方圧密非排水三軸圧縮試験を実施した。

以下に、本研究より得られた主要な結論を列記する。

(1) 圧密係数 c_v および透水係数 k は、pH 値の低下に伴って増大し、pH=7 (中性) の点を屈曲点としてその増加割合が試料の酸性化の進行に伴って急増するバイリニアアの挙動を示している。これに対して、一次圧密終了時間 t_{100} は pH 値の低下に伴って減少し、pH=7 の点を屈曲点としたバイリニアアの挙動を示す。また、pH 値が7以下になると pH 値の低下に伴う一次圧密終了時間の減少割合が大きくなる。

(2) 非排水せん断強さ c_u および変形係数 E_{50} は、pH 値の低下に伴ってほぼ直線的に増大し、酸性試料 (pH=3) の非排水せん断強さは20%程度、変形係数は約30%アルカリ性試料 (pH=9.5) よりも大きな値を示した。

(3) 最大過剰間隙水圧は、pH 値の低下に伴ってほぼ直線的に減少する傾向を示した。このことは、pH 値を低下させることによって、せん断に伴う過剰間隙水圧の発生量を低減することができる可能性を示唆しており、すべり面における過剰間隙水圧の発生量を低減することによってせん断強さが増加するために、斜面の安定性は pH 値の低下に伴って増大するものと考えられる。

以上のことから、土の工学的特性を評価する場合には、その土の物理化学的性質を考慮することが、地盤の安定性に重要な影響を及ぼす主要因のひとつであることを示唆した。

参 考 文 献

- 1) 土質工学会編：土質試験法 [第2回改訂版]，1979.
- 2) 土質工学会編：土質試験の方法と解説，1990.
- 3) 土質工学会編：土質工学における化学の基礎と応用，土質基礎工学ライブラリー，No.15, pp.279~290, 1984.
- 4) Warkentin, B.P. and Yong, R.N. : Shear strength of Montmorillonite and Kaolinite related to interparticle forces, *Clays and Clay Minerals*, Vol.9, pp.210~218, 1962.
- 5) Yong, R.N. and Warkentin, B.P.: Introduction to soil behaviour, Macmillan Co., 1966. (山崎不二夫・山内豊聡監訳:土質工学の基礎<土の力学的挙動>, 鹿島出版会, 1972).
- 6) Yong, R.N. and Warkentin, B.P. : Soil properties and behaviour, Elsevier Scientific Pub. Co., 1975 (山内豊聡・竹中肇・東山勇・前田隆監訳:新編土質工学の基礎<土の性質と挙動>, 鹿島出版会, 1978).
- 7) 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.
- 8) 大場正男・喜田大三・森麟:土の物理化学と土質工学への応用<10. 添加混合工法>, 土と基礎, Vol.34, No.2, pp.73~80, 1986.
- 9) Olson, R.E. : Shearing strengths of Kaolinite, Illite, and Montmorillonite, *JGED, ASCE*, Vol.100, No.GT 11, pp.1215~1229, 1973 .
- 10) 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.
- 11) 菊沢正裕・長谷川高士・芦原康裕:塩を添加したベントナイトのせん断特性, 土木学会論文集, No.436/III-16, pp.135~138, 1991.
- 12) Thompson, M.R. : Lime reactivity of Illinois soils, *JSMFD, ASCE*, Vol.92, No.SM 5, pp.67~92, 1966.
- 13) Kumapley, N.K. and Ishola, A. :The effect of chemical contamination on soil strength, *Proc. 11th, ICSMFE*, Vol.13, pp.1199~1201, 1985.
- 14) 松尾新一郎・富田武満:斜面安定に及ぼすイオン交換の影響, 材料, Vol.19, No.205, pp.53~58, 1970.
- 15) 松尾新一郎・富田武満:モンモリロナイト系粘土の物理化学的および工学的特性に及ぼすカリウム固定の影響, 材料, Vol.26, No.290, pp.17~22, 1977.
- 16) 山田剛二・渡 正亮・小橋澄治:地すべり・斜面崩壊の実態と対策, 山海堂, 580 p., 1977.
- 17) Ikeda, T., Ogawa, S., Konagai, K. and Kamei, T. : Field investigations in landslide areas and shearing strength of soil for use in stability analysis, *Natural Disaster Science*, Vol.8, No.1, pp.29~44, 1986.
- 18) Ogawa, S., Ikeda, T., Kamei, T. and Wada, T.: Field investigations on seasonal variations of the groundwater level and pore water pressure in landslide areas, *Soils and Foundations*, Vol.27, No.1, pp.50~60, 1987.
- 19) 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.
- 20) Nakase, A. and Kamei, T. : Influence of strain rate on undrained shear characteristics on K_0 -consolidated cohesive soils, *Soils and Foundations*, Vol.26, No.1, pp.85~95, 1986.
- 21) Kamei, T., Ogawa, S. and Tanaka, N.: The variation in undrained shear characteristics during consolidation process, *Soils and Foundations*, Vol.27, No.3, pp.91~98, 1987.
- 22) Mesri, G. and Godlewski, P.M. : Time- and stress-compressibility interrelationship, *JGED, ASCE*, Vol.103, No.GT 5 , pp.417~430, 1977.
- 23) Bishop, A.W. and Henkel, D.J. : The measurement of soil properties in the triaxial test, Edward Arnold Ltd., London, 1962.
- 24) 岸野亨:排水条件が中間土の強度特性に及ぼす影響, 東京工業大学卒業論文, 106p., 1981.
- 25) 矢沢正士:粘性土の理工学的挙動に及ぼす吸着カチオンの影響, 土と基礎, Vol.28, No.2, pp.9~14, 1980.

- 26) Atkinson, J.H. and Bransby, P.L. : The mechanics of soils, McGraw-Hill Book, London, 1978.
- 27) 佐野博昭・亀井健史：粘土のせん断特性と水素イオン濃度指数の関係，第31回地すべり学会研究発表講演集，pp. 285～286，1992.
- 28) 中瀬明男・小林正樹・兼近明男：粘土の非排水せん断強度と変形係数，運輸省港湾技術研究所報告，Vol. 11, No. 2, pp. 243～259，1972.

(1994. 3. 22 受付)

INFLUENCE OF HYDROGEN-ION CONCENTRATION EXPONENT ON UNDRAINED SHEAR BEHAVIOUR OF BENTONITES

Takeshi KAMEI and Makoto TOKIDA

To investigate the effects of hydrogen-ion concentration exponent (pH) on undrained shear behaviour of bentonites, consolidated undrained triaxial compression tests were performed on bentonites with different pH.

As a result, undrained shear strength increases with the decrease in pH and the maximum excess pore water pressure decreases with the decrease in pH. In addition, the diffusion characteristics (c_v -values and k -values) increase with the decrease in pH and it shows the bilinear relationship and the intersection point of two straight lines extrapolated from the initial and final portions of the curve is situated at the point of pH=7. The reason for this may be considered that different soil structures are developed with different pH.
