

# 秋田県産天然ゼオライトの地盤工学的性質に関する考察

伊藤 駿・虻川 悠也<sup>\*1</sup>・工藤 正喜<sup>\*2</sup>  
和田 奈津子<sup>\*3</sup>・花田 智秋・佐藤 猛<sup>\*4</sup>

## Geotechnical Properties of Natural Zeolite

ITO Takeshi, ABUKAWA Yuya<sup>\*1</sup>, KUDO Masaki<sup>\*2</sup>,  
WADA Natsuko<sup>\*3</sup>, HANADA Tomoaki and SATO Takeshi<sup>\*4</sup>

(2001年11月30日受理)

Natural zeolite as a clay mineral produced in Akita prefecture, Japan has been used in the constructive, agricultural and chemical engineering fields. However, geotechnical properties of natural zeolite have not been analyzed up to date. This paper treats the details of mechanical characteristics of natural zeolite through geotechnical laboratory tests. From the test results, we conducted and proposed several new equations regarding the uniaxial strengths, consolidation properties and triaxial shear strengths. Obtained results herein are all new geotechnical information of natural zeolite, and these are useful for more effective use and advanced development as a local manufacturing industry material.

### 1. まえがき

秋田県産天然ゼオライトは米代川流域における主要な地場産業の一つとして二ツ井町を中心に生産されてきた。この粘土鉱物は、吸着性並びにイオン交換性が高く、イオン交換剤、土壌改良材などに用いられてきた<sup>1)</sup>。また、壁材、タイル材、路床材や家屋建築基礎の散布材等の建設分野並びに植物・園芸等の分野でも需要が高いが、将来的には水の浄化剤即ち環境汚染回復剤としての開発が注目されている。一方、人工ゼオライトも急増しているが、新たに建設材料や浄水効果剤としては天然ゼオライトの需要は依然として根強く、未だその有効性は多面的である。従って、この材料の特質をさらに十分研究する必要があるように思われる。

そこで地場産業振興を考慮し、一段と付加価値を高めるためには、特に建設材料としての強度に着目する必要があり、各種力学的性質を詳細に調べておくことが重要であろう。しかし、この材料の地盤工

学的強度特性に関する調査研究の事例はほとんどなく、強度論的にその用途を探るためには各種の材料学的実験を行わなければならない。

そこで、この材料の力学的・物理学的性質を詳細に調べるため、本研究では米代川流域二ツ井町産の天然ゼオライトを対象に地盤工学的性質に関する各種の室内地盤実験を行った。

その結果、一軸圧縮強度、三軸圧縮強度、圧密変形挙動等の地盤工学的性質に関し幾つかの知見が得られた。特に、これら強度間に関する予測構成方程式が導かれ、実験結果と照合して妥当なものであることを確認した。この研究によって得られた知見は、今後天然ゼオライトの新たな需要に対応する材料開発上の有用な情報となり得るため、ここでは主要内容について論述する。

### 2. 天然ゼオライトの物理的性質

ゼオライトは火山岩の空隙や低変成岩の変成岩、熱水脈、熱水変質帯、堆積岩、土壌などに産する粘土鉱物の一つである。通常沸石と呼ばれ吸着性、高いイオン交換性に優れ有害物質の除去媒質等浄化剤などの分野に応用されてきた<sup>2)</sup>。その物理的特性を調べるため、X線回折、コンシステンシー試験を行っ

<sup>\*1</sup> 秋田高専卒業生（現：前橋工科大学生）

<sup>\*2</sup> 同上（現：専攻科学生）

<sup>\*3</sup> 同上（現：秋田県庁）

<sup>\*4</sup> 同上（現：長岡技科大学生）

たことを以下に述べる。

なお、粉末による比重試験では、比重(Gs)が2.18 gf/cm<sup>3</sup> (21.39 kN/m<sup>3</sup>)と粘土鉱物としてはかなり小さい値が得られた。

### 2. 1 X線回折

秋田県二ツ井町産天然ゼオライトについて粉末X線回折を行ったスペクトルチャートを図1に示す。粘土に伴って産出するゼオライトには幾つかの種類があるが<sup>3)</sup>この図を見てわかるように、ほとんどが斜プチロル沸石 (clinoptilolite : Z) のシャープな立ち上がり測定され、わずかながらα-クリストバライト (α-cristobalite : C) がみられる程度でこの試料は極めて純度の高いゼオライトであることが確認された。

### 2. 2 コンシステンシー特性

天然ゼオライトのコンシステンシー試験から物理特性を示す塑性図を描いたのが図2である。塑性指数 (Ip) は Ip = 40.8と求められ、実験結果は塑性図のA-lineの上側にありかつまたB-lineの右側にある。この結果、秋田県産ゼオライトは乾燥強さ、タフネス指数が大きく、体積変化率や圧縮性が高いことが判明した。また、土質分類上、高液性限界粘土に属し、CHという記号に分類される。図2にはこのゼオライト (Z<sub>100</sub>) 以外に、典型的な粘土鉱物のカオリナイト (Kaolinite : K<sub>100</sub>) やセリサイト (Serpicite : S<sub>100</sub>) の試験結果も記入した。さらにモンモリロナイト (Montmorillonite) についても実験しているが<sup>4)</sup>、これは液性限界 (W<sub>l</sub>) が W<sub>l</sub> > 450と極めて大きく、図の欄外にくるので比較できない。なお、このゼオライト (Z<sub>100</sub>) は塑性指数もカオリナイトと同様であることから、膨潤性はほとんど示さないと行ってよい。

## 3. 天然ゼオライトの地盤工学的性質

### 3. 1 締固め試験

土の突き固めによる標準締固め試験 (JIS A 1210) によると図3のようになり、最大乾燥密度 (γ<sub>d</sub>・max) は17.48 kN/m<sup>3</sup>で、最適含水比 (W<sub>opt</sub>) は38.8%と得られた。γ<sub>d</sub> = 16~18 kN/m<sup>3</sup> および含水比 W = 20~50% では γ<sub>d</sub>・maxの90%範囲なので、γ<sub>d</sub>~Wカーブは概ね2次曲線で近似できる。そこでこの関係を本試料に適用してみると様々なWを考慮し、γ<sub>d</sub>~Wカーブは次式のように求められた。

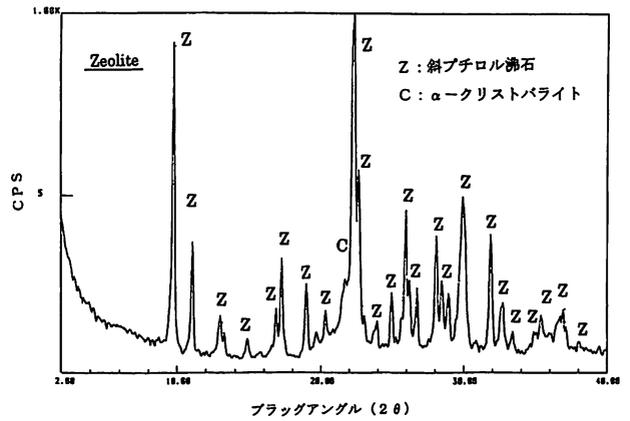


図1. 秋田県二ツ井町産ゼオライトのX線回折チャート

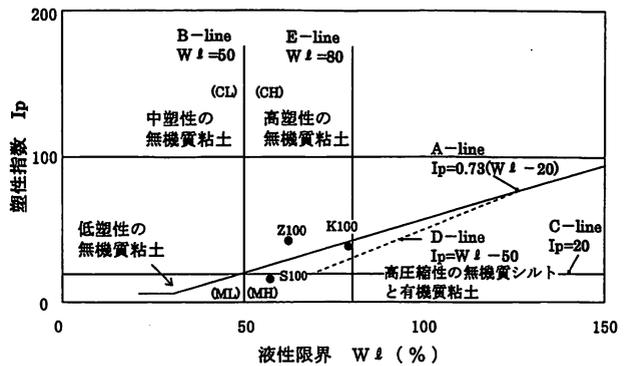


図2. ゼオライト (Z<sub>100</sub>) 及びセリサイト (S<sub>100</sub>), カオリナイト (K<sub>100</sub>) の塑性図

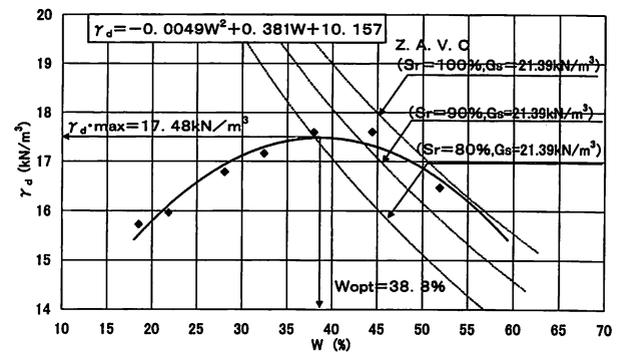


図3. ゼオライトのγ<sub>d</sub>~Wカーブ

$$\gamma_d = -0.0049 W^2 + 0.3805 W + 10.157 \quad (1)$$

図中に飽和度 (Sr) を変えたゼロ空気間隙曲線 (Z. A. V. C.) も記入した。

### 3. 2 一軸圧縮強度と含水比の関係

天然ゼオライトの粉末に蒸留水を適度に混入して様々な含水比 (w) をもつ供試体を作成する。次にこの試料の直径を φ = 5.0 cm, 高さ h = 10.0 cm と

して供試体を作成する。こうした試料について先ず一軸圧縮試験を実施した。その応力( $\sigma$ )～ひずみ( $\epsilon$ )関係を示したのが図4である。試料のWが異なると $\sigma$ ～ $\epsilon$ 関係に変化が現れ異なるカーブとなる。この特徴は $W = 48 \sim 52\%$ というわずか4%の変化の中で生じているが、その破壊強度( $q_u$ : kPa)をトレースすると図中に示すA型のpeak path<sup>5)</sup>となる。供試体作成上、この試料は含水比が多くても少なくとも崩れやすいため上記のようにかなり限定された含水比でしか実験できなかった。この時、破壊強度 $q_u$ 、その時のひずみ $\epsilon_f$ 及び試料のW関係を図示すると図5(a), (b)となる。この2つの図から次の(2), (3)のような関係式が近似的に求められる。

$$q_u = 3.05 \times 10^3 \exp(-0.0786 W) \quad (2)$$

$$\epsilon_f = 1.78 \times 10^{-4} \exp(0.214 W) \quad (3)$$

(2)および(3)式を整理すると結局下式が導かれる。

$$q_u = \epsilon_f \{2.0 \times 10^7 \exp(-0.293 W)\} \quad (4)$$

これを使って実験できなかった範囲の含水比までを拡張してその予測曲線を描くと図6のようになる。図中の○印は実測の結果を示しておりこれは特定範囲内の含水比であるが、これを予測曲線で検証してみるとうまく適中している。従って、ここで提示されたW,  $q_u$ ,  $\epsilon_f$ 関係を示す予測式(4)は十分妥当なものであると判断される。

### 3.3 過圧密比と圧密特性

一面せん断試験を行うに当たり、試料には先行圧密荷重を $\sigma_0 = 40 \text{ kN/m}^2$ を加え、この荷重を120時間載荷した後せん断箱にセットする。その後所定の垂直荷重( $\sigma_n$ )をかける。この時、各 $\sigma_n$ 毎に60分間圧密し試料を安定させる。このような圧密試験によって得られた圧密沈下量( $\epsilon$ :%)と時間( $t$ :sec)の関係を描いた事例が図7である。しかし、この試

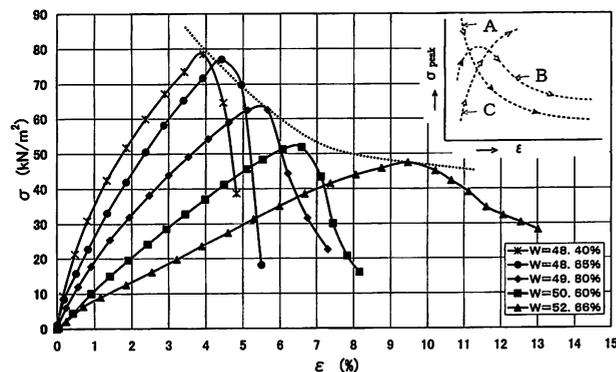


図4. 一軸圧縮試験のWの変化による $\sigma$ ～ $\epsilon$ カーブと $\sigma_{peak}$ の傾向曲線

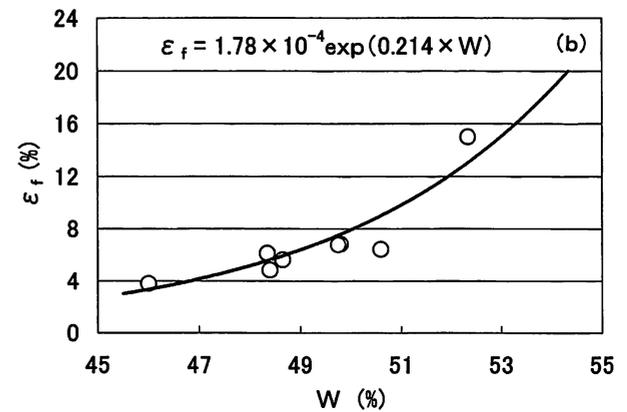
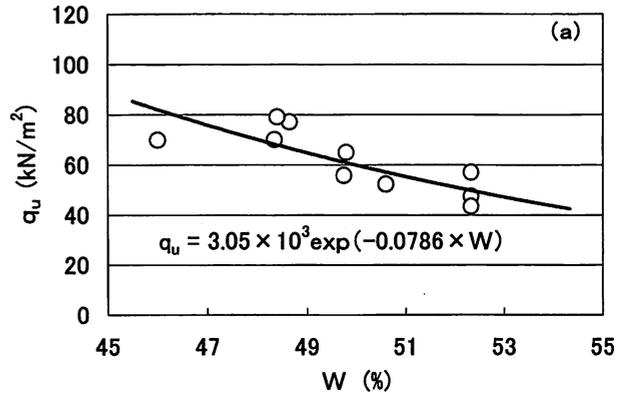


図5. (a)一軸圧縮試験による強度( $q_u$ )とWの関係  
(b)一軸圧縮試験によるピーク時ひずみ $\epsilon_f$ とWの関係

料は図を見てわかるように、圧密は60分間では完全に終了せず二次圧密現象がみられる。そこでこの曲線の初期の部分と60分付近の直線部の接線を取り、その交点を図示のように $\epsilon_0$ とする。そうするとこの $\epsilon_0$ は一次圧密と二次圧密の境界を示す値と等価であると考えられる。そしてこの $\epsilon_0$ は過圧密比(OCR)によって交点位置が変化する。また、その変化は試料の含水比によっても異なる。そこでこの変化を特徴的に図に示したのが図8である。含水比の高いものは $\epsilon_0$ が大きく、下側にくることがわかる。一方、この特徴を圧密時間( $t$ :sec)との関係で示したのが図9である。含水比による差違がみられ含水比の高いものは明らかにひずみ速度が大きいが、分布の傾向は全く類似している。それを式示るとこの2つは次式のようなになる。

$$W = 47.5\% : t = 376.62 - 798.32 \ln(\epsilon_0) \quad (5)$$

$$W = 45.0\% : t = 189.01 - 604.39 \ln(\epsilon_0) \quad (6)$$

これより天然ゼオライトで含水比が高いものは時間依存性の変形挙動を示し、その特性は対数的に変化する性質をもっている材料であると判断される。

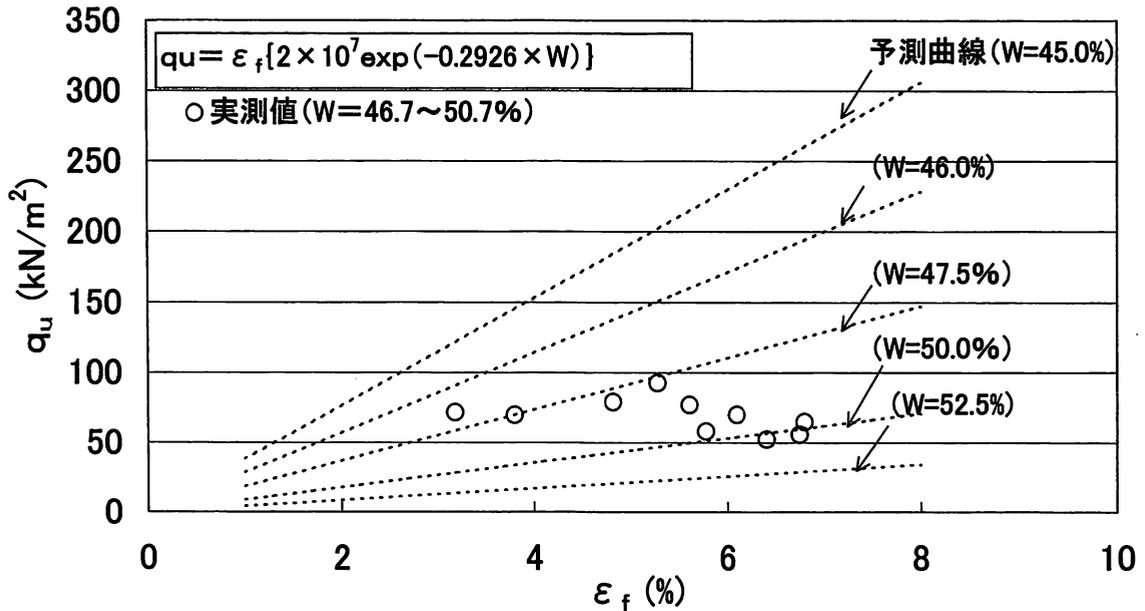


図6. 一軸圧縮試験による  $W$ ,  $q_u$ ,  $\epsilon_f$  の予測曲線

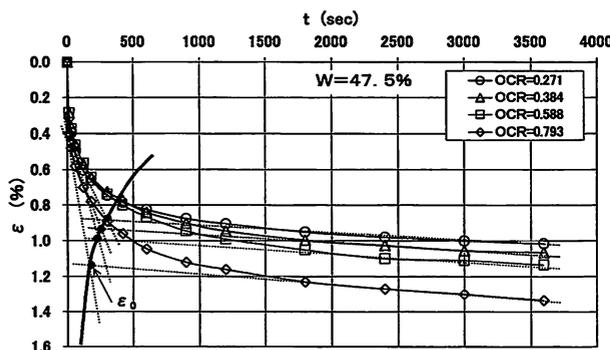


図7. 一次圧密と二次圧密の境界値  $\epsilon_0$  の求め方

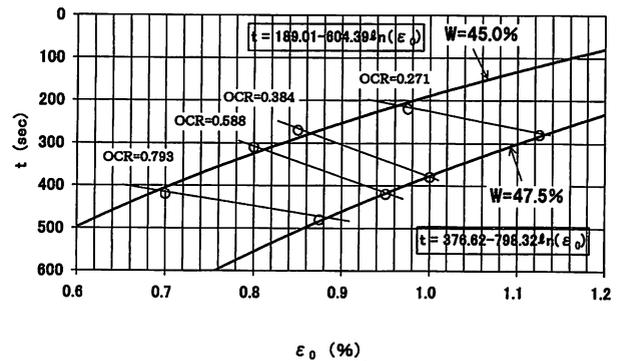


図9. OCR による  $\epsilon_0 \sim t$  関係

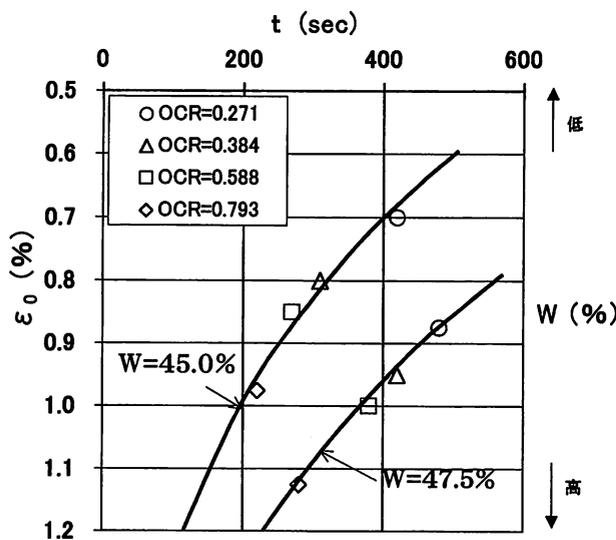


図8.  $W$  による  $\epsilon_0 \sim t$  関係

### 3. 4 圧密沈下量の予測

天然ゼオライトの圧密沈下特性を論じたものはこれまで全く知見しない。本研究ではせん断試験前の試料安定域に達するまでの60分間の圧密挙動から、圧密沈下予測量を以下の方法で推定したことを報告する。

- (1)双曲線法
- (2)浅岡法
- (3)星埜法

ここでは(1), (2)のみについて簡単に説明する。

#### 3. 4. 1 双曲線法

時間  $t$  における圧密沈下量を  $St$  とする。載荷終了時の圧密沈下量を  $S_0$  とすると、これらの関係は次式となる。

$$St = S_0 + t/(\alpha + \beta t) \quad (7)$$

ここで、 $\alpha$ 、 $\beta$ は係数である。上式を変形し、次式のように表すと直線近似できグラフから $\alpha$ 、 $\beta$ を求める。

$$t/(St-S_0) = \alpha + \beta t \quad (8)$$

これによる最終沈下量  $S_f$ は

$$S_f = S_0 + 1/\beta \quad (9)$$

天然ゼオライトの  $W = 47.5\%$ でOCRによる圧密沈下予測曲線を求めると、図10のようになる。

### 3.4.2 浅岡法

現在の圧密沈下量  $St(i)$ とその一つ手前の値  $St(i-1)$ の関係をグラフに描き、切片  $\beta_0$ と勾配  $\beta_1$ を図11(a)から求め、予測最終沈下量  $S_f'$ を次式で決定する。  
 $S_f' = \beta_0 / (1 - \beta_1)$  (10)  
 こうして求めた浅岡法の予測結果 ( $S_f'$ )と実測結果 ( $S_f$ )を比較して示すと図11(b)となり、両者の間に次の関係が成立することが判った。

$$S_f' = 0.032 + 0.857 \cdot S_f \quad (11)$$

この関係は圧密強度増加率が一定に変化しても両者の関係は単純増加傾向を示す特質があると解釈できる。

なお、村上セリサイトについて行った圧密試験では、試料作成上の目標含水比は  $W = 35\%$ であり、高含水比の試料は作成困難であった。しかし、 $W$ と垂直応力  $\sigma_n$  (kN/m<sup>2</sup>)及び飽和度 ( $S_r$ )の間には次式が成立しこの場合も実験困難な  $W$ について予測可能な構成方程式が導かれた<sup>6)</sup>。

$$W/\sigma_n = -0.174 \ln(S_r) + 0.369 \quad (12)$$

### 3.5 三軸圧縮試験による特性

天然ゼオライトの三軸圧縮試験についてもこれを行った事例は知見しない。そこでこれを行うにあたり、試料の含水比はこれまでの試料作成要領と同様45%前後を目標にした。また、先行圧密荷重を一面せん断試験時と同様にし試料作成条件を一定にし、先行圧密時間は48, 72, 96, 120時間の4種類とする

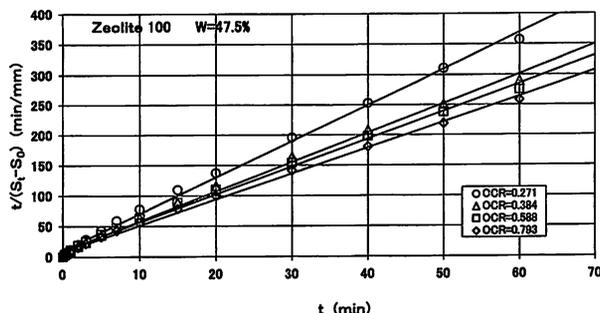


図10. 双曲線法によって求めた圧密沈下予測曲線

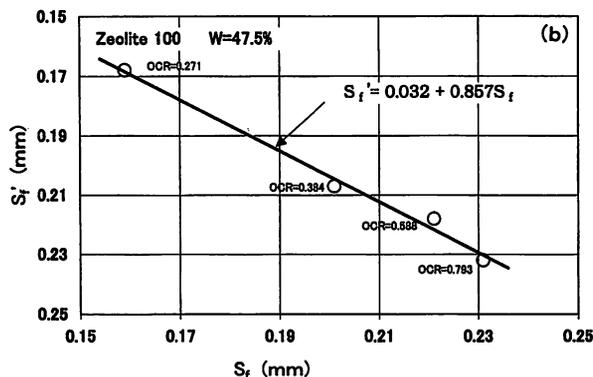
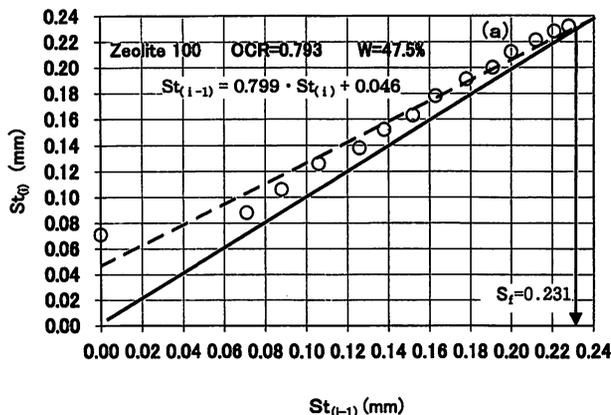


図11(a). 浅岡法による  $S_f'$ の求め方  
 (b). 浅岡法による  $S_f$ と  $S_f'$ の関係

試料を作成した。

図12は120時間先行圧密後のCU三軸圧縮試験における間隙水圧  $u$ とひずみ  $\epsilon$  関係を描いた事例である。側圧 ( $\sigma_3$ )の大きさやOCRの如何に関わらず  $u$ の最大値は  $\epsilon$ がほぼ共通して  $\epsilon = 3 \sim 4\%$ という一定範囲内で集中的に発生していた点が注目される。これはせん断速度が0.01%とゆっくりしていたことがその要因と考えられ、この点に関しては正確な強度が得られていると判断される。

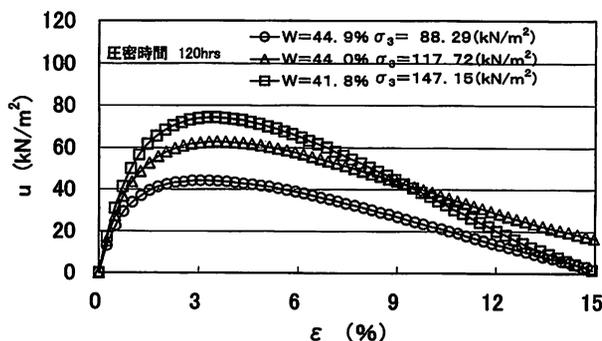


図12. 三軸圧縮試験による間隙水圧  $u$ と軸ひずみ  $\epsilon$ の関係

また、図13は同じく120時間先行圧密を行った試料の $\sigma_3$ を変えた場合のstress pathsを示している。図中にピーク強度時の内部摩擦角 $\phi'_r$ 及び残留強度時の $\phi'_r$ を示したが、いずれも互いに近似し、しかも大きな値を示した点が特徴的である。図から分かるように粘着力はほとんど発生していない。これは次の先行圧密時間を変えた試料による図14をみても同様であり、正規圧密状態の強度増加率が一定に変化していること<sup>7)</sup>でこの試料の特徴が出ている。即ち日本の海成粘土の大半が高塑性領域でも $\phi'_r$ は低下せず既述の $I_p$ とも無関係<sup>8)</sup>にその強度増加率が一定の値を取ることに一致する。

#### 4. まとめ

以上から、秋田県産天然ゼオライトの地盤工学的実験結果を整理すると概略次のようにまとめられる。

(1)秋田県産天然ゼオライトはclinoptiliteを主成分とする純度の高いゼオライトで土質分類上CHに属し、殆ど膨潤性を示さない性質をもつ。

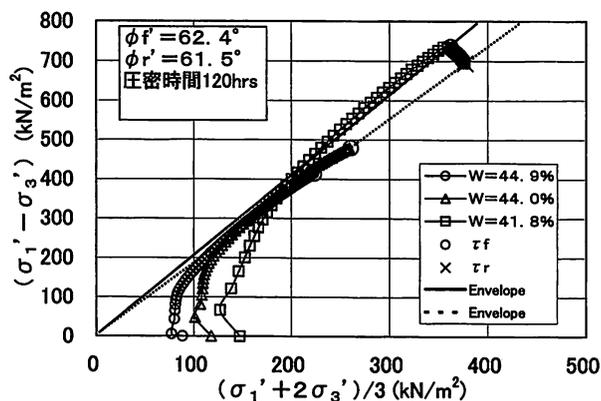


図13. 三軸圧縮試験による Stress paths

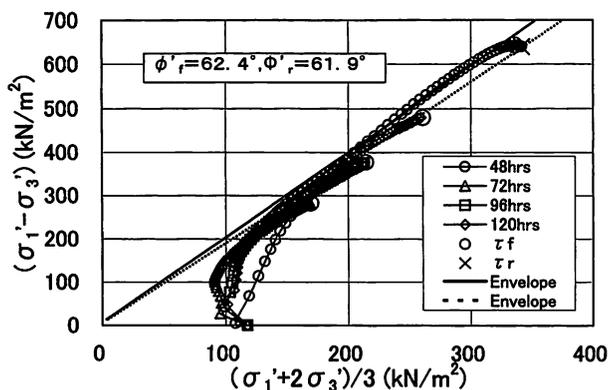


図14. 先行圧密時間を変えた Stress paths

(2)天然ゼオライトの最適含水比は $W_{opt} = 38.8\%$ と求められたが、力学試験用の試料作成の際、含水比 $W < 40\%$ では作成困難であり、 $W \approx 45\%$ を目標に作成する必要があった。

(3)一軸圧縮強度( $qu$ )と $W$ 、 $qu$ 発生時のひずみを $\epsilon_f$ とすると、これらに次式が見出され、これより実験困難な $W$ についても $qu$ が予測され、妥当な予測式であることを検証した。

$$qu = \epsilon_f \{2.0 \times 10^7 \exp(-0.293 W)\}$$

(4)一次圧密と二次圧密の境界値を $\epsilon_0$ とすると、 $\epsilon_0$ は $W$ と過圧密比(OCR)に依存して変化し、例えば $W = 45.0\%$ の試料の変形挙動は対数的であり次式のような関係が成立することを見出した。

$$t = 189.01 - 604.39 \ln(\epsilon_0)$$

(5)圧密沈下量を予測すると例えば浅岡法では実測( $S_f$ )と予測( $S'_f$ )の間に次式が成立することを見出した。

$$S'_f = 0.032 + 0.857 \cdot S_f$$

(6)CU三軸圧縮試験ではOCRの如何に関わらず、 $u$ の最大値は $\epsilon = 3 \sim 4\%$ のところで発生し、ピーク強度時の内部摩擦角 $\phi'_r$ 及び残留強度時の $\phi'_r$ は互いに近接して大きな値を示し、粘着力のない試料と判断された。

以上の知見は、今後天然ゼオライトの建設現場等への応用に有用な情報になると考えられる。

#### 謝 辞

本試料の地盤工学的実験を行うに当たり秋田県二ツ井町のサン・ゼオライト工業(株)成田耕造社長には、試料を提供して頂いた。また、X線回折の同定に当たり、秋田大学本多朔郎名誉教授にお世話になった。ここに記して深く感謝申し上げる次第である。

#### 参考文献

- 1) 須藤談話会編：土をみつめる，三共出版，1986，pp. 103-150.
- 2) 須藤談話会編：粘土科学への招待，三共出版，2000，pp. 276-283.
- 3) 白水晴雄：粘土鉱物学，朝倉書店，1988，p. 172.
- 4) 伊藤 駿，荃澤絵理架：膨潤性粘土鉱物を含む地盤材料のコンシステンシー特性に関する研究，秋田高専研究紀要，第36号，pp. 61-66，2001.
- 5) Ito, T.: Strain softening of unsaturated swelling clays, Clay Science for Engineering,