

試料の保存条件が粘性土の一軸圧縮強さ ・変形特性に及ぼす影響

常田 亮*・亀井 健史**

INFLUENCES OF PRESERVING CONDITIONS ON UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH AND DEFORMATION CHARACTERISTICS OF COHESIVE SOIL

Makoto TOKIDA and Takeshi KAMEI

To investigate the influences of preserving conditions on the unconfined compressive strength and the deformation characteristics of cohesive soil, unconfined compression tests are performed on reconsolidated remoulded cohesive soil with different preserving temperatures and preserving terms.

As a result, the water content and unit weight of the specimen are approximately constant within the range of the present preserving conditions. However, the unconfined compressive strength and the deformation modulus tend to increase with the increase in preserving temperature and preserving term. On the other hand, axial strain at failure decreases with the increase in preserving temperature.

1. はじめに

近年、粘性土地盤の原位置における強度・変形特性が実験室で調整した練返し再圧密試料の強度・変形特性と異なることが指摘されている¹⁾。不攪乱及び練返し再圧密試料の強度・変形特性の相違は、自然地盤が長時間にわたってゆっくりと形成されているために、二次圧密やセメンテーションなどの時間効果によって粒子構造が発達していることに起因しているといわれている²⁾。

時間効果を受けた粘性土地盤のせん断強さを決定する方法としては、Berre-Bjerrum法³⁾、Bjerrum-半沢法⁴⁾及びSHANSEP法⁵⁾が提案されている。Berre-Bjerrum法³⁾及びBjerrum-半沢法⁴⁾は、再圧縮法と呼ばれる強度決定法で、試料を有効土かぶり圧下で K_0 圧密することによって原位置での応力状態を再現するとともに、サンプリング時に吸収された余分な水分を追い出すことができる点に効果があるとされている。また、半沢⁴⁾は、数多くの具体的事例について上述の強度決定法を用いて検討を行った結果、得られたせん断強さが妥当な安全率を与えたと報告している。

これに対して、SHANSEP法⁵⁾は、粘性土地盤の強度・変形特性に影響を与える主な要因

* 土木工学科講師

** 基礎地盤コンサルタンツ(株)

原稿受付 平成3年9月28日

として地盤が過去に受けた応力履歴、強度異方性、時間効果及び試料採取時の乱れに着目し、これらの要因を総合的に考慮してせん断強さを決定する方法である。

しかしながら、不攪乱試料を用いる場合、試料の総量が不足していたり不均質であったりするために、十分に再現性のある実験を行うことが困難であることがある。このような場合、自然地盤が過去に受けた時間効果の影響を練返し再圧密試料を用いて室内で再現することが可能ならば、粘性土地盤の原位置における強度・変形特性の評価を容易に行うことができるようになるものと考えられる^{6),7)}。

従来、不攪乱試料が受けた時間効果を室内で再現する場合、化学的添加物を混合する方法が用いられてきた。嘉門・長尾⁸⁾及び嘉門ら⁹⁾は、カオリン粘土にセメント系固化材及びケイ酸ナトリウム溶液を添加することによって人工的にセメンテーション効果を与え、土粒子の構造観察と物理的特性及び二次圧縮特性との関連性について検討を行っている。

また、粘性土地盤が受けた時間効果を直接的に再現する方法として、試料を長期間圧密する実験が実施されてきた。Mitachi and Fujiwara¹⁰⁾は、三軸試験装置を用いて最長120日間までK₀圧密し、粘性土の非排水せん断特性に及ぼす圧密時間の影響の検討を行い、圧密時間が長くなるにしたがって練返し再圧密試料の非排水せん断強さと変形係数が増加し、時間効果を有する粘性土地盤と類似した力学特性を示すようになると報告している。

さらに、近年では時間効果を再現する方法として、スラリー状の試料を高温で再圧密する方法が頻繁に用いられている。土田ら¹¹⁾及び土田¹²⁾の研究によれば、75°Cの高温でスラリーから再圧密した試料の力学特性は、時間効果を有する粘性土地盤の力学特性に近いことが一軸圧縮試験、三軸圧縮試験及び標準圧密試験から確認されている。

しかし、化学的添加物を混合して時間効果を再現する方法は、添加物の種類や添加量が明確に規定されておらず、人工的に与えられるセメンテーションの効果と粘性土の力学特性における時間効果との定量的な関連性が明らかにされていない。また、長期間圧密する方法は、時間効果を直接的に再現する方法ではあるが、実験に非常に長い時間を要するなどの問題点を持っている。さらに、高温再圧密法は再圧密時の温度が明確に規定されておらず、再圧密には特殊な圧密装置が必要となる。

したがって、練返し再圧密試料を用いて粘性土地盤が受けた時間効果をより簡便に再現する方法の検討が工学的には重要な問題であると考えられる。

一方、試料がサンプリングされてから室内試験を実施するまでには、通常保存期間が異なることが容易に想定される。また、上記の研究例^{11),12)}から、保存温度が粘性土の諸特性に影響することも考えられる。さらに、実際の試験結果は、保存期間が異なるにもかかわらず同様に扱われているのが現状である。

本研究では、上記の点に着目して、試料の保存条件が粘性土の強度・変形特性に及ぼす影響を明らかにするために、練返し再圧密試料を保存温度及び保存期間を変化させて養生し、各保存条件で養生した試料に対して一軸圧縮試験を行い、その諸特性を取りまとめた。

2. 試料及び実験方法

2-1 試料

実験に使用した試料は、長野県下水内郡豊田村替佐で採取した陸成粘性土（替佐土）を練

Table 1 Index properties of soil sample

Soil Sample	G _s	w _L (%)	w _p (%)	I _p	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
Kaesa Soil	2.707	54.8	18.7	36.1	44.8	31.3	23.9

返して再圧密したものである。試料の物理的特性を表-1に示す。試料の再圧密は、420 μm以下の粘性土に水を加えてスラリー状にしたものを内径15cm、高さ23cmのモールドに入れて行った。ここで、再圧密圧力は85 kPaで圧密時間は10日間とした。脱型した試料から6×6×13cmの直方体を切り出してラップで包み、パラフィンでシールしたものを、表-2に示した保存条件で養生して実験に使用した。

供試体は、土質試験法¹³⁾を参考にして直径3.5cm、高さ8cmの円柱形とし、所定の保存条件で養生した試料からワイヤーソーとトリマーで切り出して成形した。

2-2 実験方法

実施した実験は、ひずみ制御方式の一軸圧縮試験で、データのばらつきを考慮して同一の保存条件の供試体に対して2本以上行った。

また、せん断時のひずみ速度は1.0%/minとした¹³⁾。さらに、強度・変形特性に及ぼす端面摩擦の影響を軽減するために、一軸圧縮試験装置の上下拘束板にシリコンオイルとシリコングリースを混合したものを塗布した。

Table 2 Preserving conditions of soil sample in the present study

	Preserving Term			
	1 week	2 weeks	4 weeks	8 weeks
Preserving Temp.	20°C	20°C	20°C	20°C
	40°C	40°C	40°C	40°C
	50°C	50°C	50°C	50°C

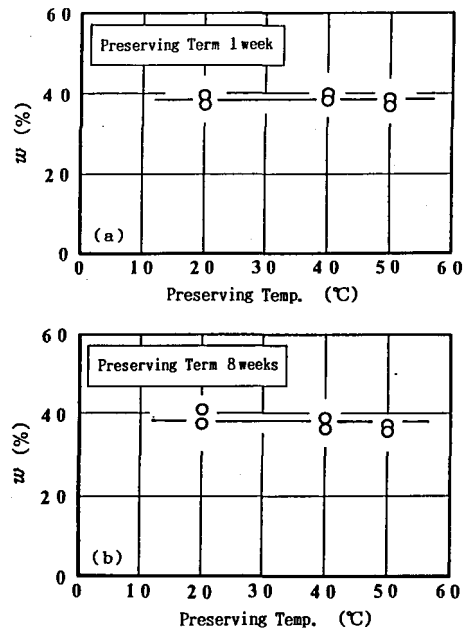


Fig. 1 Relationship between water content and preserving temperatures

3. 実験結果及び考察

3-1 含水比 (w) と保存温度及び保存期間の関係

図-1(a), (b)は、保存期間が1週間及び8週間の場合の含水比wと保存温度の関係を示したものである。

図より、保存期間が1週間の場合、含水比は保存温度によらずほぼ一定値 (w≒39%) を示しており、初期含水比からほとんど変化していないことがわかる。一方、保存期間が8週間の場合、保存温度が20°C~40°Cであれば、含水比はほぼ一定値 (w≒39%) を示しているが、保存温度が50°Cになると36%~37%程度となり僅かに低下している。

次に、保存温度が20°C及び50°Cの場合の含水比と保存期間の関係を図-2(a), (b)に示す。保存温度が20°Cの場合、保存期間が8週間以内であれば含水比はほぼ一定値 (w≒39%)

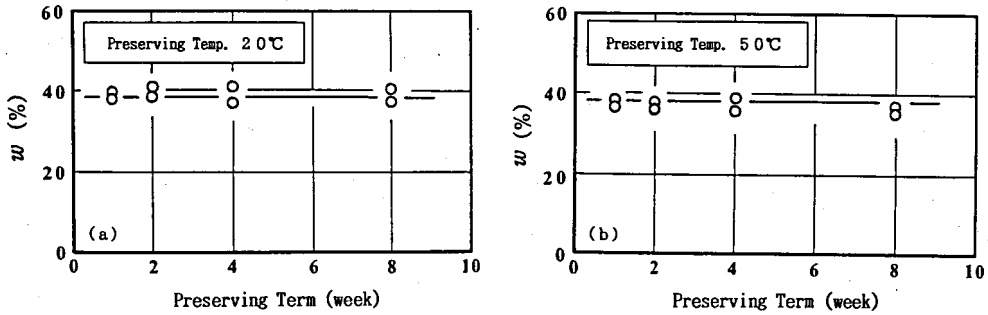
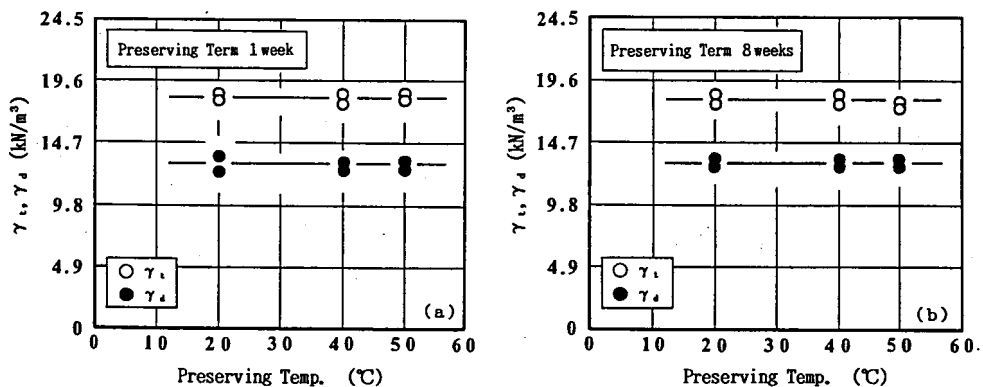


Fig. 2 Relationship between water content and preserving terms

Fig. 3 Relationship between unit weight (γ_t , γ_d) and preserving temperatures

を示している。一方、保存温度が50°Cの場合、保存期間が4週間以内であれば含水比はほぼ一定値 ($w \approx 39\%$) となっているが、保存期間が8週間になると僅かに低下する傾向が認められ、36%~37%程度となっている。

以上のことより、試料をパラフィンでシールして20°C~50°Cの保存温度で養生した場合、保存期間が4週間以内ならば含水比はほぼ一定の状態に保たれている。また、試料を50°Cの保存温度で8週間養生すると含水比が初期含水比よりも低下する可能性はあるが、その程度は僅かである。よって、工学的には保存期間が2ヶ月程度であれば保存温度は含水比に大きな影響を及ぼさないものと考えられる。

3-2 単位体積重量 (γ_t , γ_d) と保存温度及び保存期間の関係

試料を1週間及び8週間養生した場合の湿潤単位体積重量 γ_t 及び乾燥単位体積重量 γ_d と保存温度の関係を、図-3(a), (b)に示す。

乾燥単位体積重量は、保存期間によらず保存温度が20°C~50°Cの範囲であればほぼ一定値 ($\gamma_d \approx 13.0 \text{ kN/m}^3$) を示している。また、乾燥単位体積重量は保存期間が1週間及び8週間の場合ともほぼ同程度の値であり、実験に使用した練返し再圧密試料の乾燥単位体積重量がほぼ同じであることがわかる。一方、湿潤単位体積重量は、保存期間が1週間の場合、保存温度の範囲が20°C~50°Cであればほぼ一定値 ($\gamma_t \approx 18.6 \text{ kN/m}^3$) を示している。しかし、保存期間が8週間の場合、湿潤単位体積重量は保存温度が20°C~40°Cならばほぼ一定

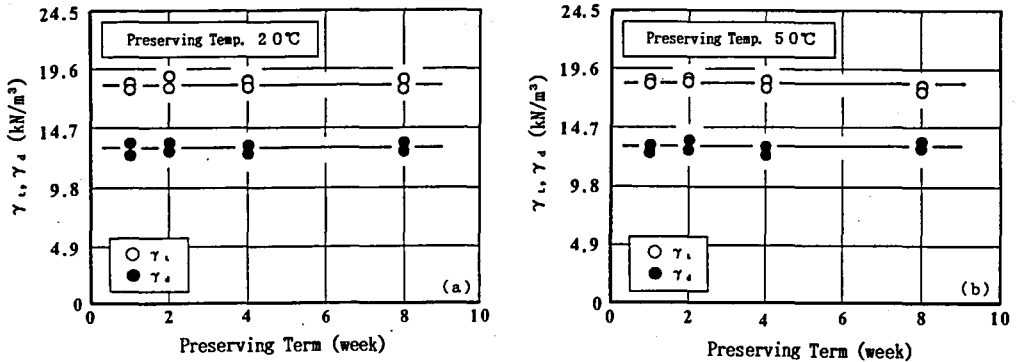


Fig. 4 Relationship between unit weight (γ_w, γ_d) and preserving terms

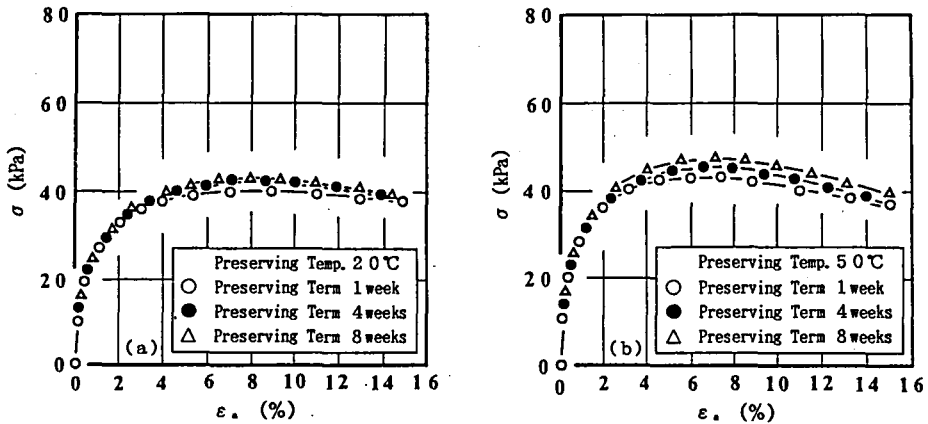


Fig. 5 Typical stress-axial strain behaviour

値 ($\gamma_w \approx 18.6 \text{ kN/m}^3$) を示すが、保存温度が 50°C になると $\gamma_w \approx 17.7 \text{ kN/m}^3$ となり僅かに低下している。

図-4(a), (b)は、保存温度が 20°C 及び 50°C の場合の単位体積重量 (γ_w, γ_d) と保存期間の関係を示したものである。

保存温度が 20°C 及び 50°C の場合、乾燥単位体積重量は、保存期間が8週間以内ならばほぼ一定値 ($\gamma_d \approx 13.0 \text{ kN/m}^3$) を示している。一方、湿潤単位体積重量は、保存温度が 20°C の場合、保存期間が8週間以内ならばほぼ一定値 ($\gamma_w \approx 18.6 \text{ kN/m}^3$) となっている。しかし、保存温度が 50°C の場合、保存期間が4週間以内ならば湿潤単位体積重量はほぼ一定値 ($\gamma_w \approx 18.6 \text{ kN/m}^3$) を示すが、保存期間が8週間になると $\gamma_w \approx 17.7 \text{ kN/m}^3$ となり僅かに低下する傾向が認められる。

3-3 応力 (σ)—軸ひずみ (ϵ_a) の関係

図-5(a), (b)は、保存温度を 20°C 及び 50°C として保存期間を変化させた場合の圧縮応力 σ と軸ひずみ ϵ_a の関係を示したものである。

保存温度が 20°C の場合、圧縮応力は軸ひずみの増加に伴って増加し、保存期間によらず軸ひずみが9%~10%になるとほぼ一定値となり、応力—ひずみ曲線にはピークが認められ

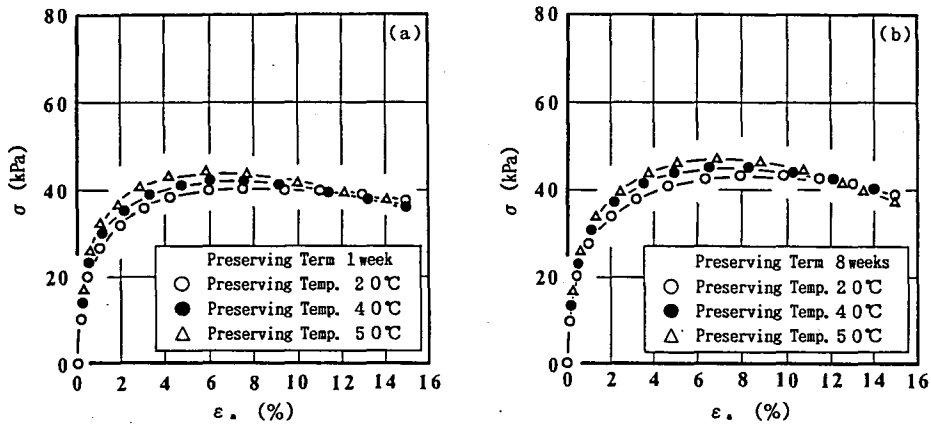


Fig. 6 Typical stress-axial strain behaviour

ない。また、保存期間が4週間以上になると、一軸圧縮強さ q_u は保存期間が1週間の場合よりも5%程度大きくなっている。

一方、保存温度が50°Cの場合、応力-ひずみ曲線には保存期間によらずピークを示す傾向が認められ、軸ひずみが6%~7%に達すると破壊に至り、その後軸ひずみの増加に伴って圧縮応力が僅かに低下している。さらに、一軸圧縮強さは保存期間が長くなるにしたがって僅かに大きくなっている。

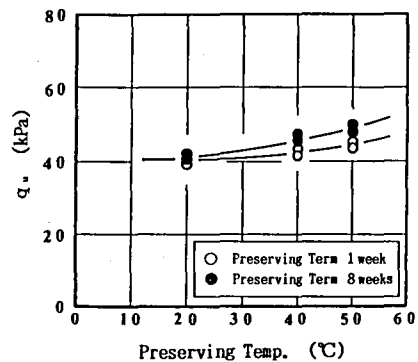
次に、保存温度を変化させて試料を1週間及び8週間養生した場合の圧縮応力と軸ひずみの関係を、図-6(a), (b)に示す。

保存期間が1週間の場合、保存温度が20°Cであれば応力-ひずみ曲線にはピークが認められず、圧縮応力は軸ひずみが9%~10%になるとほぼ一定値となっている。これに対して、保存温度が40°C及び50°Cの場合の応力-ひずみ曲線にはピークを示す傾向が認められ、圧縮応力は軸ひずみが6%~7%になると軸ひずみの増加に伴って僅かに低下している。また、一軸圧縮強さは保存温度が高くなるにつれて大きくなり、保存温度が50°Cの場合の一軸圧縮強さは、20°Cの場合よりも10%程度大きくなっている。

一方、保存期間が8週間の場合、保存温度が20°Cであれば圧縮応力は軸ひずみの増加に伴って増加し、軸ひずみが9%~10%になるとほぼ一定値となっている。しかし、保存温度が40°C及び50°Cの場合、応力-ひずみ曲線にはピークを示す傾向が認められ、軸ひずみが6%~7%に達すると破壊に至り、その後軸ひずみの増加に伴って圧縮応力が僅かに低下している。また、一軸圧縮強さは保存温度が高くなるにしたがって大きくなり、50°Cで試料を養生した場合、一軸圧縮強さは20°Cの場合と比較して15%程度大きくなっている。

3-4 一軸圧縮強さ (q_u) と保存条件の関係

保存期間が1週間及び8週間の場合の一軸圧縮強さ q_u と保存温度の関係を、図-7に示

Fig. 7 Relationship between q_u and preserving temperatures

す。

一軸圧縮強さは、保存温度が高くなるにしたがって大きくなる傾向を示している。また、その増加傾向は保存期間が長いほど顕著であり、保存温度が20°Cと50°Cの場合を比較すると、保存期間が1週間の場合、一軸圧縮強さの増加割合は4 kPa程度であるのに対して、保存期間が8週間になると8 kPa程度となっている。

図-8は、保存温度を変化させて試料を養生した場合の一軸圧縮強さと保存期間の関係を示したものである。

図より、一軸圧縮強さは保存期間が長くなるにつれて僅かに大きくなる傾向が認められる。また、その増加傾向は保存温度が高くなるにしたがって大きくなっており、保存温度が20°Cであれば保存期間が8週間の場合の一軸圧縮強さは、1週間の場合よりも2 kPa程度大きくなり、保存温度が50°Cの場合には4 kPa程度大きくなっている。

以上のように、試料を高温で長期間養生した場合、一軸圧縮強さが増加する傾向を示すのは、保存温度が高くなるにしたがって水の粘性係数(20°C: $\eta = 1.002 \times 10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s}$, 50°C: $\eta = 0.548 \times 10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s}$)¹⁴⁾が低下するので、間隙水の移動が容易になり土粒子の結合力が強くなるためであると考えられる。また、この点に関しては、高温で試料を再圧密した場合、粘土鉱物の化学的作用が促進され、その結果、土粒子の結合力が増加することも指摘されている^{11),12)}。

3-5 変形係数 (E_{50}) と保存条件の関係

保存期間が1週間及び8週間の場合の変形係数 E_{50} と保存温度の関係を、図-9に示す。ここで、変形係数 E_{50} は、応力-ひずみ曲線上において圧縮応力が一軸圧縮強さの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、保存温度が高くなるにしたがって大きくなる傾向を示している。また、その増加傾向は保存期間が長いほど顕著であり、保存温度が20°Cと50°Cの場合を比較すると、

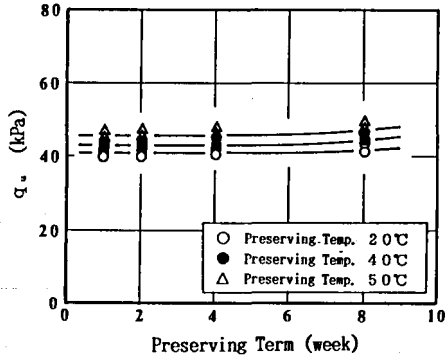


Fig. 8 Relationship between q_u and preserving terms

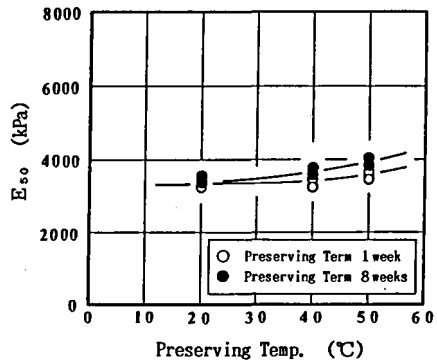


Fig. 9 Relationship between E_{50} and preserving temperatures

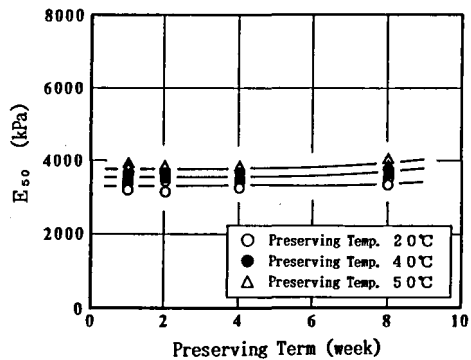


Fig. 10 Relationship between E_{50} and preserving terms

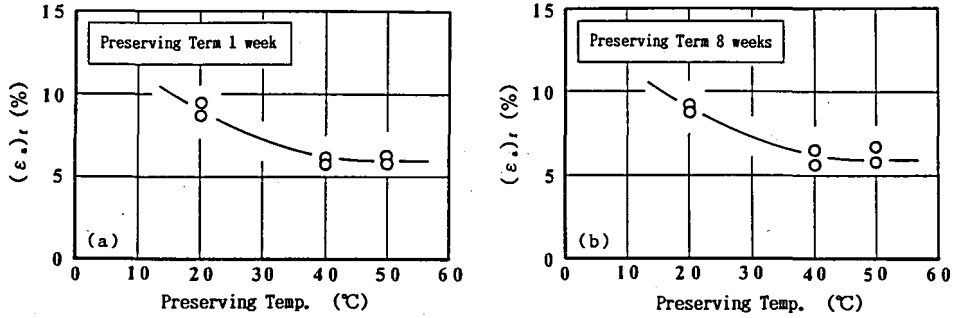


Fig. 11 Relationship between $(\epsilon_a)_t$ and preserving temperatures

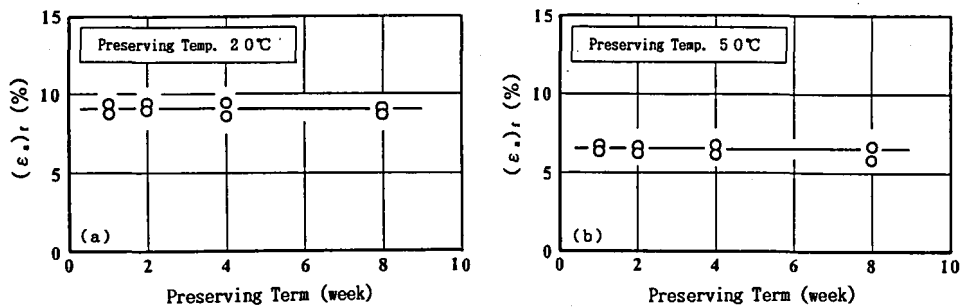


Fig. 12 Relationship between $(\epsilon_a)_t$ and preserving terms

変形係数の増加割合は、保存期間が1週間であれば300kPa程度であるのに対して、保存期間が8週間になると500kPa程度となっている。

図-10は、保存温度を変化させた場合の変形係数と保存期間の関係を示したものである。

変形係数は、保存期間が長くなるにしたがって僅かに増加する傾向を示しており、保存期間が8週間の場合の変形係数は、保存温度が20°Cならば保存期間が1週間の場合よりも100kPa程度大きくなり、保存温度が50°Cの場合には300kPa程度大きくなっている。

3-6 破壊時の軸ひずみ $(\epsilon_a)_t$ と保存条件の関係

図-11は、保存期間が1週間及び8週間の場合における破壊時の軸ひずみ $(\epsilon_a)_t$ と保存温度の関係を示したものである。ここで、破壊時の軸ひずみ $(\epsilon_a)_t$ は、応力-ひずみ曲線において一軸圧縮強さに対応する軸ひずみで定義した。

破壊時の軸ひずみは、保存温度が高くなるにしたがって小さくなる傾向を示しており、この傾向は保存期間によらない。このことは、保存温度が40°C及び50°Cになると応力-ひずみ曲線にピークを示す傾向が表われることを裏付けている。また、保存温度が40°C及び50°Cの場合、破壊時の軸ひずみはほぼ同程度の値を示しており、保存温度の違いによる顕著な相違が認められない。

次に、試料を20°C及び50°Cの保存温度で養生したときの破壊時の軸ひずみと保存期間の関係を図-12に示す。

図より、保存温度が20°C及び50°Cの場合とも破壊時の軸ひずみは、保存期間が1週間～8週間の範囲ならばほぼ一定値 (20°C: $(\epsilon_a)_t = 9.3\%$, 50°C: $(\epsilon_a)_t = 6.2\%$) を示すこと

がわかる。また、保存温度が50°Cの場合の破壊時の軸ひずみは、20°Cの場合よりも小さくなっている。

4. 結 論

本研究では、保存温度及び保存期間が粘性土の一軸圧縮強さ・変形特性に及ぼす影響を解明するために、保存温度及び保存期間を変化させて養生した練返し再圧密粘性土に対して一軸圧縮試験を行った。

今回の実験から得られた主な結果を列記すると、以下のようになる。

1) 試料をパラフィンでシールして保存した場合、保存温度が20°C~40°Cであれば、含水比 w 及び湿潤単位体積重量 γ_h は、保存期間が8週間以内ならばほぼ一定値を示した。一方、試料を50°Cで保存した場合、保存期間が4週間以内であれば含水比及び湿潤単位体積重量はほとんど変化しなかったが、保存期間が8週間になると僅かに低下した。しかしながら、工学的には保存期間が2ヶ月程度であれば、保存温度は含水比及び湿潤単位体積重量に大きな影響を及ぼさないものと考えられる。

2) 試料の保存温度が20°Cである場合、応力-ひずみ曲線には保存期間によらずピークが認められなかった。しかし、40°C及び50°Cの保存温度で養生した試料の応力-ひずみ曲線には、20°Cの場合と異なりピークを示す傾向が認められ、その効果が破壊時の軸ひずみ $(\epsilon_a)_t$ の減少として表われている。このことは、40°C及び50°Cの保存温度における応力-ひずみ曲線が不攪乱試料に見られるような傾向を示すことを示唆している。

3) 一軸圧縮強さ q_u 及び変形係数 E_{50} には、保存温度が20°Cの場合、保存条件による明瞭な相違が認められない。しかしながら、一軸圧縮強さ及び変形係数は、保存温度が高くなるにつれて大きくなる傾向が認められ、その増加傾向は保存期間が長いほど顕著である。

4) 保存温度及び保存期間が一軸圧縮強さ、変形係数及び破壊時の軸ひずみに及ぼす影響を検討した結果、粘性土の強度・変形特性は、保存期間よりも保存温度の影響を大きく受けていることがある程度明らかとなった。また、試料の保存温度を高くしたり保存期間を長くすることによって、サンプリング時に試料が受けた乱れの影響をある程度軽減できる可能性があることを示した。

参 考 文 献

- 1) Graham, J. and Li, E. C. C.: Comparison of natural and remolded plastic clay, Jour. of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 7, pp. 865-881, 1985.
- 2) 中瀬明男・亀井健史: 日本近海における海底沖積粘土地盤の工学的特性, 土木学会論文報告集, No. 338, pp. 217-224, 1983.
- 3) Berre, T. and Bjerrum, L.: Shear strength of normally consolidated clays, Proceedings, 8th I. C. S. M. F. E., Vol. 1, Moscow, U. S. S. R., pp. 39-49, 1973.
- 4) Hanzawa, H.: Undrained strength characteristics of an alluvial marine clay in the Tokyo Bay, Soils and Foundations, Vol. 19, No. 4, pp. 69-84, 1979.
- 5) Ladd, C. C. and Foott, R.: New design procedure for stability of soft clay, Proc. ASCE, GT7., pp. 763-786, 1974.
- 6) 佐野博昭・亀井健史: 試料の準備方法の違いが一面せん断試験結果に及ぼす影響, 平成2年度

- 土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp. 304-305, 1991.
- 7) 亀井健史・中村嘉博・常田亮: 不攪乱試料と練返し試料における供試体の寸法効果, 土木学会第18回関東支部技術研究発表会講演概要集, pp. 160-161, 1991.
 - 8) 嘉門雅史・長尾毅: 人工的にセメンテーション効果を与えた粘性土の土質工学的特性について, 第21回土質工学研究発表会発表講演集, pp. 389-390, 1986.
 - 9) 嘉門雅史・佐野郁雄・陶秀珍: 人工的に粒子間にセメンテーションを与えたカオリン粘土の物理化学的特性, 土木学会第42回年次学術講演会講演概要集第3部, pp. 302-303, 1987.
 - 10) Mitachi, T. and Fujiwara, Y.: Undrained shear behavior of clays undergoing longterm anisotropic consolidation, *Soils and Foundations*, Vol. 27, No. 4, pp. 45-64, 1986.
 - 11) 土田孝・小林正樹・水上純一・田中政典: 高温再圧密による海成粘土の年代効果の再現, 運輸省港湾技術研究所報告, Vol. 28, No. 1, pp. 121-147, 1989.
 - 12) 土田孝: 三軸試験による自然粘性土地盤の強度決定法に関する研究, 港湾技研資料, No. 688, 1990年12月, 199p.
 - 13) 土質工学会編: 土質試験法 [第2回改訂版], 1979.
 - 14) 国立天文台編: 理科年表, pp. 447, 1991.