

練り返し再構成粘土の圧縮特性に関する研究

西原 晃* 柴田 徹*

Compression Property of Reconstituted Remolded Clays

Akira NISHIHARA* Toru SHIBATA*

ABSTRACT

The correlation of liquid limit with some mechanical behaviors of reconstituted remolded clays are examined. It is shown that some mechanical properties such as cone penetrating, shear strength and compressibility could be characterized by specific values of liquid limit and water content and/or void ratio. Based on these findings normalized water content and normalized void ratio are introduced to evaluating the mechanical behaviors of remolded reconstituted clays.

キーワード：練り返し再構成粘土、フォールコーン試験、ベーンせん断強度、圧縮特性

Keywords: Reconstituted remolded clay, Fall cone test, Vane strength, Compressibility

1. まえがき

自然堆積粘土の力学特性においては堆積後の時間経過にともなう続成作用の影響、いわゆる年代効果が大きいことが知られており、近年その定量的評価に関する研究が多くなされている。年代効果の定量的評価においては、評価の基準として粘土が本来有している力学特性を明らかにする必要がある。Burland[1]は一定の条件で自然堆積粘土を練り返し再構成した試料の力学特性を固有特性 (intrinsic properties) と呼び、これを年代効果の評価の基準とすることを提唱している。

土の力学特性は含水量あるいは間隙比によって大きく変化する。含水量による土の状態変化の程度を表す指標として液性限界や塑性限界などのコンシステンシー限界が定義されており、粘土の力学的性質はこれらのコンシステンシー限界と密接な関係がある。その中でも液性限界は粘土粒子に作用する粒子間力を反映していると考えられており、粘土の圧縮性をはじめ多くの力学特性に影響する。たとえば、圧縮指数 C_c と液性限界の間に強い相関があることはよく知られており、

これまで数多くの相関関係が報告されている。また、液性限界を用いて練り返し再構成粘土の圧縮曲線を統一的に表そうとする試みもなされている [1, 2]。一方、自然堆積粘土における続成作用も、粘土の粒子間力に関係するとみられ、液性限界と強い相関があると考えられている。このように、液性限界は練り返し再構成粘土の力学特性のみならず年代効果を評価するうえでも重要な指標であり、液性限界の測定法に関する研究も多い。

本研究は、以上のような観点から、粘土の液性限界と種々の力学特性との関係について実験を行い、練り返し再構成粘土の基本的な圧縮特性を明かにしようとしたものである。

2. 粘土の液性限界と力学特性の関係

2. 1 実験の概要

本研究では、粘土の力学特性における液性限界の影響を調べるために、液性限界試験と並行してベーンせん断試験を行った。

* 建設環境工学科

液性限界の測定法としてはこれまでカサグランデによって提案された方法が最も広く用いられているが、カサグランデ法にはいくつかの問題点があることから、フォールコーンを用いた測定法も提案されている。また、柴田・西原・藤井・大西[3]は、先端角と質量を変えた数種類のフォールコーンを用いて実験を行い、カサグランデ法とフォールコーン法による液性限界の関係について考察している。

本研究ではカサグランデ法とフォールコーン法の両法によって液性限界を測定した。フォールコーン試験では日本規格である先端角 60° 、質量 60 g のコーンが 10 mm 貫入するときの含水比を液性限界としている。

ペーン試験は、2枚の矩形板を十字に組み合わせた羽根を粘土に差込み、回転させたときのトルクから粘土のせん断強度を求めようとするものである。この試験は軟弱な粘土地盤の強度を測定する簡便な方法として広く用いられている。本研究では、 $H=15\text{ mm}$ 、 $B=10\text{ mm}$ の小型のペーンをデジタルトルクメータに取り付け、 $0.1^\circ/\text{sec}$ で回転させたときの最大トルクからせん断強度を求めた。

実験に用いた試料は、主に近畿地方周辺で採取された 28 種類の粘土で、液性限界試験では、これらの試料を高含水比で練り返し、 $425\ \mu\text{m}$ ふるいを通させたものを使用している。試料の物理特性は、カサグランデ法による液性限界 $41\sim 117\%$ 、塑性限界 $17.1\sim 45.7\%$ 、塑性指数は $5.9\sim 85.2\%$ の広範囲にわたっている。

2. 2 コーン貫入量と液性限界の関係

柴田・西原・藤井・大西[3]は、フォールコーン試験においてコーン貫入量と含水比が直線関係にあり、

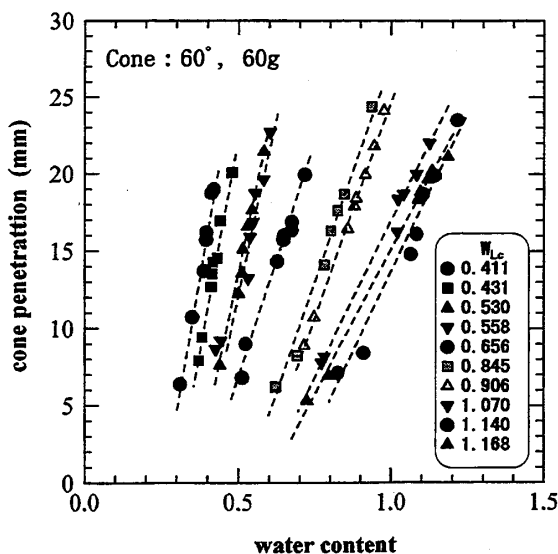


Fig. 2.1 Relation between cone penetration and water content

またその関係は液性限界の影響を考慮した基準化含水比を用いて一意的に表されることを報告している。図-2.1 は、今回のフォールコーン試験における土の含水比とコーン貫入量の関係の一例を示したものである。なお、本研究では、液性限界を含めて、含水比はすべて%表示でなく比で表す。図より、液性限界の高い土ほど、同じ貫入量に対する含水比が大きいこと、また液性限界が低い土ほど含水比に対する貫入量の変化が大きいことがわかる。

次に、コーン貫入量と含水比の関係における液性限界の影響を調べるために、同じ貫入量に対する含水比の値と液性限界の関係を求めたのが図-2.2 である。

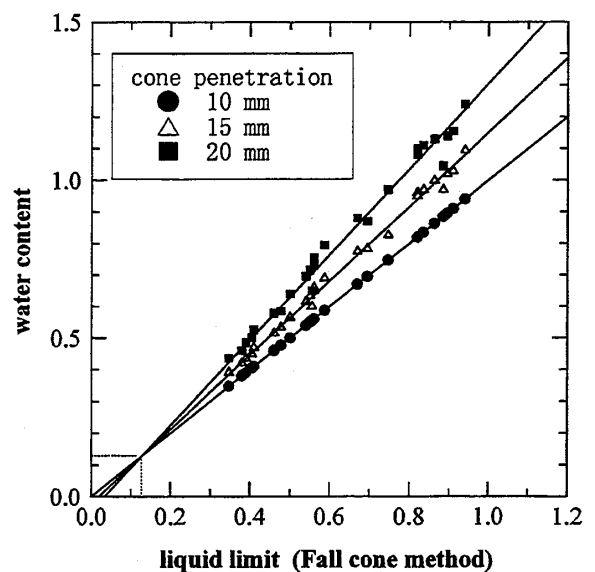


Fig. 2.2 Relation between liquid limit and and water content under constant cone penetration

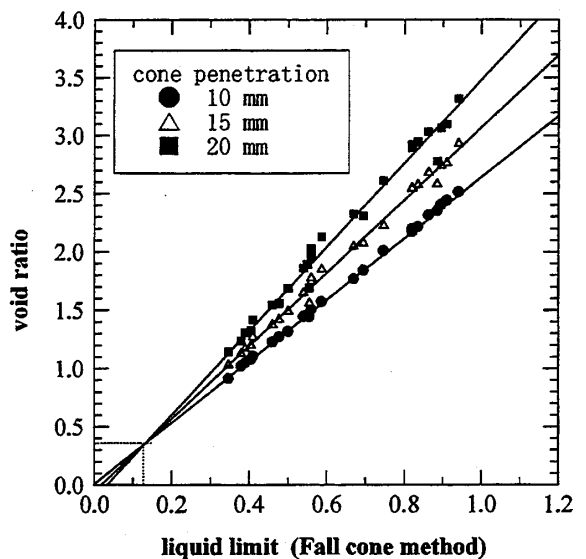


Fig. 2.3 Relation between liquid limit and and void ratio under constant cone penetration

また、粘土の状態量として含水比のかわりに間隙比を用いて、同じ貫入量に対する間隙比の値と液性限界の関係を求めたものが図-2.3である。なお、飽和粘土では含水比 w と間隙比 e は次のように関係づけられる。

$$e = wG_s \quad (1)$$

ここに、 G_s は土粒子の比重であり、実験に用いた試料では $G_s=2.60\sim 2.704$ である。図2.2および2.3は液性限界としてフォールコーン法による測定値を用いているが、カサグランデ法による液性限界を用いた場合でも同様の結果が得られる。

これらの図より同一貫入量に対する含水比あるいは間隙比と液性限界の関係は一点で交わる直線群で表されることがわかる。したがって、同一貫入量に対する含水比あるいは間隙比と液性限界の関係は以下のように表される。

$$w - w_\beta = \chi_w (LL - LL_\alpha) \quad (2)$$

$$e - e_\beta = \chi_e (LL - LL_\alpha) \quad (3)$$

ここで、 LL_α は直線群の交点における液性限界の値、 w_β 、 e_β は直線群の交点における含水比と間隙比の値、 χ_w 、 χ_e はそれぞれの直線の傾きである。式(2)、(3)における LL_α および w_β 、 e_β の値はそれぞれの場合で表-2.1、2.2に示すようになる。

Table 2.1 Value of LL_α and w_β in relationship between water content and liquid limit

TEST	Fall cone	Vane	Consolidation
Casagrande's method			
LL_α	0.06-0.09	0.06-0.10	0.11
w_β	0.12-0.15	0.13-0.16	0.13
Fall cone method			
LL_α	0.05-0.12	0.09-0.12	0.14
w_β	0.05-0.12	0.10-0.13	0.13

Table 2.2 Value of LL_α and e_β in relationship between void ratio and liquid limit

TEST	Fall cone	Vane	Consolidation
Casagrande's method			
LL_α	0.04-0.07	0.03-0.08	0.10
e_β	0.28-0.34	0.27-0.38	0.35
Fall cone method			
LL_α	0.05-0.12	0.09-0.13	0.15
e_β	0.22-0.34	0.28-0.38	0.34

2.3 ベーンせん断強度と液性限界の関係

図-2.4はベーン強度と含水比の関係を示したもので、ベーン強度の対数と含水比の間に直線関係が見られる。また、ベーン強度と含水比の関係における液性限界の影響はコーン貫入量の場合と同様で、液性限界の高い土ほど同じベーン強度に対する含水比が大きく、また液性限界の低い土ほど含水比の変化に対するベーン強度の変化が大きい。

図-2.5はベーン試験において一定のせん断強度に対する含水比と液性限界の関係を示したもので、状態量として含水比のかわりに間隙比を用いた場合においても同様の関係が得られる。コーン試験の場合と同様

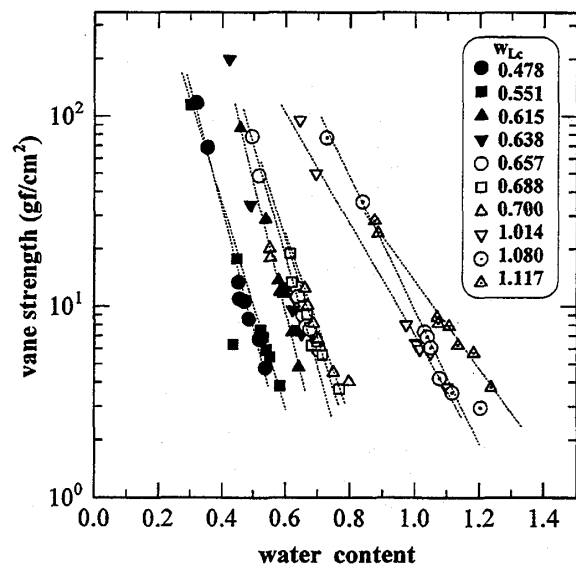


Fig. 2.4 Relation between vane shear strength and water content

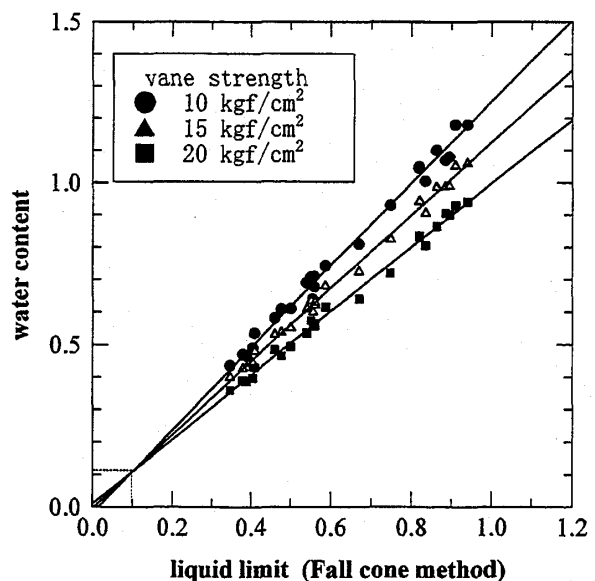


Fig. 2.5 Relation between liquid limit and water content under constant vane strength.

に、同一のせん断強度に対する含水比あるいは間隙比と液性限界の関係は一点で交わる直線関係となり、式(2)、(3)のように表される。なお、ペーン試験における LL_{α} , w_{β} , e_{β} の値は表-2.1、2.2 に示す通りである。

2. 4 圧縮特性と液性限界の関係

松井[4]は練返し再構成粘土を用いて数多くの標準圧密試験を行っている。ここではその実験結果を引用して、粘土の圧縮特性における液性限界の影響について検討する。この試験で用いられた粘土は大阪湾岸で採取された洪積粘土を液性限界の 1.3~1.5 倍の含水比で練返し再圧密した試料である。また圧密試験で用いられた粘土の一部についてはフォールコーン試験も行われている。図-2.6 は圧密試験から得られた間隙比 e と圧密圧力 p の対数の関係を示したものである。これらの図より、液性限界の高い土ほど同じ圧力に対する間隙比が大きく、また圧縮性も大きいことがわかる。

図-2.7 は標準圧密試験の結果を、一定の圧密圧力における間隙比と液性限界の関係に注目して整理したもので、間隙比のかわりに含水比を用いても同様の結果が得られる。コーン試験あるいはペーン試験と同様に、同一の圧密圧力に対する含水比あるいは間隙比と液性限界の関係は一点で交わる直線関係で表される。したがって、圧密試験における含水比あるいは間隙比と液性限界の関係も式(2)、(3)のように表される。標準圧密試験における LL_{α} , w_{β} , e_{β} の値は表-2.1 に示している。

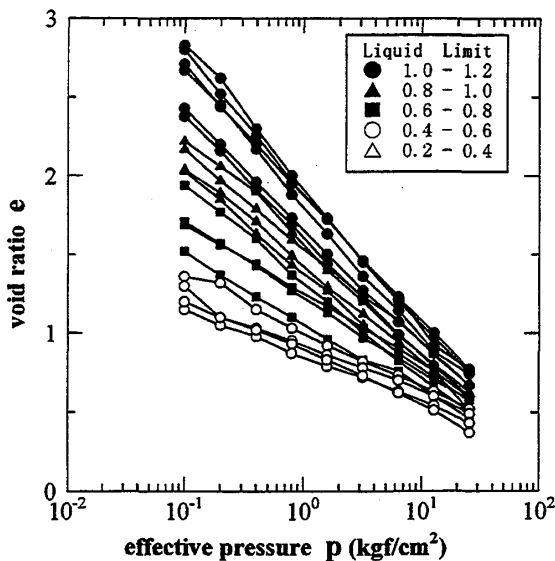


Fig. 2.6 Relation between consolidation pressure and void ratio

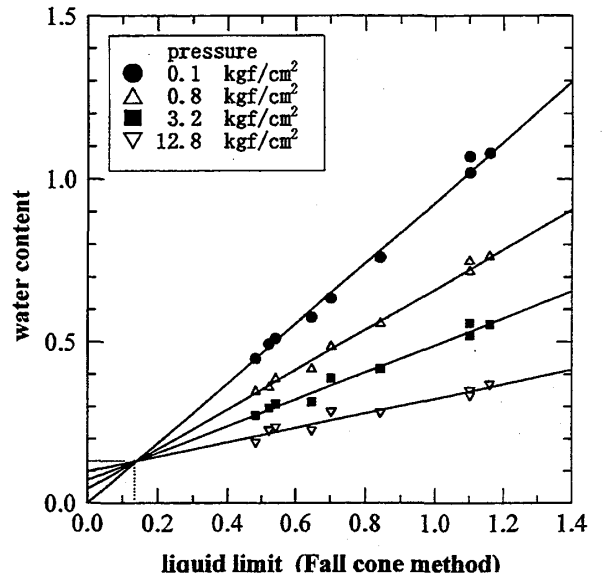


Fig. 2.7 Relation between liquid limit and void ratio under constant constant pressure

3. 練返し再構成粘土の力学特性の基準化

3. 1 基準化含水比と基準化間隙比

これまで示してきたように、コーン貫入特性、ペーンせん断特性そして圧縮特性は液性限界に依存し、これらの特性を一定としたときの含水比あるいは間隙比と液性限界の関係は一点で交わる直線関係で表される。直線関係の交点における液性限界ならびに含水比あるいは間隙比の値は表-2.1 に示すとおりである。力学試験の種類、液性限界の測定法によって若干値は異なるが、交点の液性限界の値はカサグランデ法で $LL_{\alpha}=0.03\sim 0.11$ 、フォールコーン法では $LL_{\alpha}=0.05\sim 0.15$ 程度の値をとる。一方、交点の含水比あるいは間隙比の値はそれぞれ $w_{\beta}=0.05\sim 0.15$ 、 $e_{\beta}=0.22\sim 0.38$ 程度である。

圧密試験の場合を考えると、直線群の交点においてはすべての圧密圧力に対して間隙比は一定値となる。このことは間隙比が e_{β} であるとき、粘土は全く圧縮しないことを意味している。したがって、 e_{β} は粘土がそれ以上圧縮しない最小間隙比を表していると考えることができる。同様に、 w_{β} は最小間隙比に対応する含水比と考えられる。他方、液性限界は粘土が塑性材料としての特性を示す限界の含水比であることから、液性限界が LL_{α} に等しい粘土は最小間隙比においてしか粘土としての特性を持たないことになる。したがって、 LL_{α} は粘土がとりうる液性限界の最小値を示していると考えられることもできる。

このように、 w_{β} , e_{β} および LL_{α} が粘土の力学特性を支配する本質的な値であるならば、それらの値は種々の力学試験において共通の値となるべきである。また、図-2.2 に示す結果において、フォールコーン

法による液性限界はコーン貫入量 10mm のときの含水比に等しいから、フォールコーン法における LL_{α} は w_{β} に等しくなければならない。さらに、 w_{β} と e_{β} は式(1)の関係を満足しなければならない。これらの要件を考慮すると、 w_{β} 、 e_{β} および LL_{α} の値としては表-3.1 に示すような値が妥当と考えられる。

図-3.1 は、フォールコーン試験でそれぞれの貫入量に対する液性限界と含水比の関係を表す直線の傾き χ_w の値を求めたものである。なお、直線群の交点の値は表-3.1 に示す値を用いている。この図より χ_w とコーン貫入量との間には次の関係が成り立つことがわかる。

$$\chi_w = \lambda_w + \mu_w D_f \quad (4)$$

ここで、 D_f はコーン貫入量(mm)である。貫入量一定時の液性限界と間隙比の関係を表す直線の傾き χ_e と貫入量の間にも同様の結果が得られ、

$$\chi_e = \lambda_e + \mu_e D_f \quad (5)$$

の関係が成り立つ。係数 λ_w 、 μ_w あるいは λ_e 、 μ_e の値は液性限界の測定法によって異なり、それぞれの場合について表-3.2 に示すようになる。

Table 3.1 Values of LL_{α} , w_{β} and e_{β}

LL_{α}		w_{β}	e_{β}
Casagrande	Fall cone		
0.08	0.13	0.13	0.35

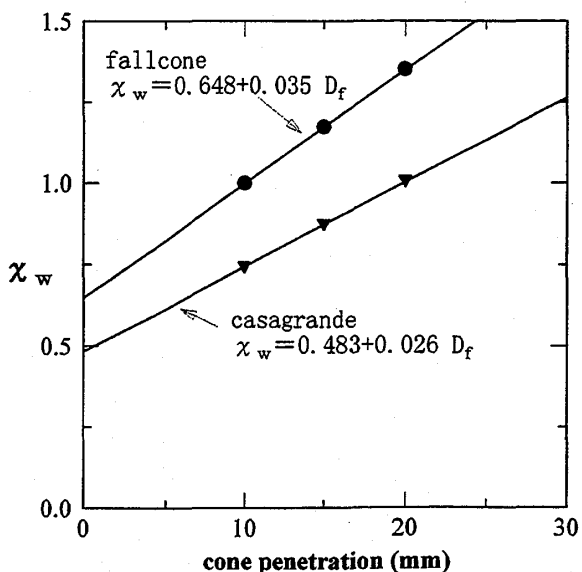


Fig. 3.1 Relation between χ_w and cone penetration

式(4)、(5)をそれぞれ式(2)、(3)に代入すると次の関係が得られる。

$$w^* = \lambda_w + \mu_w D_f \quad (6)$$

$$e^* = \lambda_e + \mu_e D_f \quad (7)$$

ここで、 w^* は含水比を LL_{α} と w_{β} を用いて基準化した含水比、

$$w^* = \frac{w - w_{\beta}}{LL - LL_{\alpha}} \quad (8)$$

であり、基準化含水比(normalized water content)と呼ぶことにする[3]。同様に、 e^* は間隙比を LL_{α} と e_{β} を用いて次式のように基準化したもので基準化間隙比(normalized void ratio)と呼ぶことにする。

$$e^* = \frac{e - e_{\beta}}{LL - LL_{\alpha}} \quad (9)$$

図-3.2 はフォールコーン法による液性限界を用いた場合の基準化含水比とコーン貫入量の関係を示した

Table 3.2 Value of λ and μ in Fall cone test

LL test	λ_w	μ_w	λ_e	μ_e
Casagrande	0.483	0.026	1.723	0.094
Fall cone	0.648	0.035	1.285	0.007

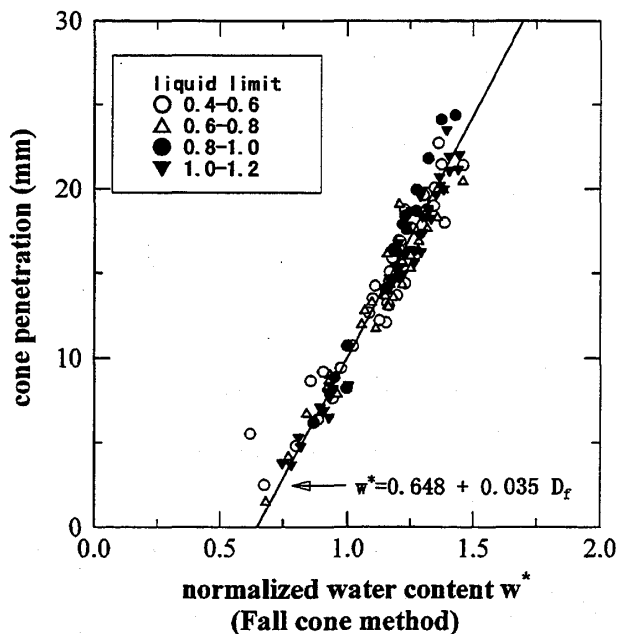


Fig. 3.2 Relation between normalized water content and cone penetration

もので、図中の直線は式(6)の関係を示している。図に示すように基準化含水比を用いると種々の液性限界を有する粘土の含水比と貫入量の関係が一意的に表される。同様に基準化間隙比を用いれば粘土の間隙比と貫入量の関係を一意的に表すことができる。

3. 2 ベーン強度と基準化含水比、基準化間隙比の関係

図-3.3 は、ベーン強度を一定とした場合の液性限界と含水比の関係を示す直線の傾き χ_w の値を求めたもので、 χ_w とベーン強度の対数との間には直線関係が成り立つ。なお、液性限界と間隙比の関係からも同様の結果が得られる。この結果からベーン強度と基準化含水比あるいは基準化間隙比の間で以下のような関係が得られる。

$$w^* = \lambda_w - \mu_w \log \tau \quad (10)$$

$$e^* = \lambda_e - \mu_e \log \tau \quad (11)$$

式(10)、(11)における係数 λ_w , μ_w あるいは λ_e , μ_e の値は表-3.3 に示すとおりである。

図-3.4 はベーン試験の結果を基準化含水比を用いて整理したもので、図中の直線は式(10)の関係を示し

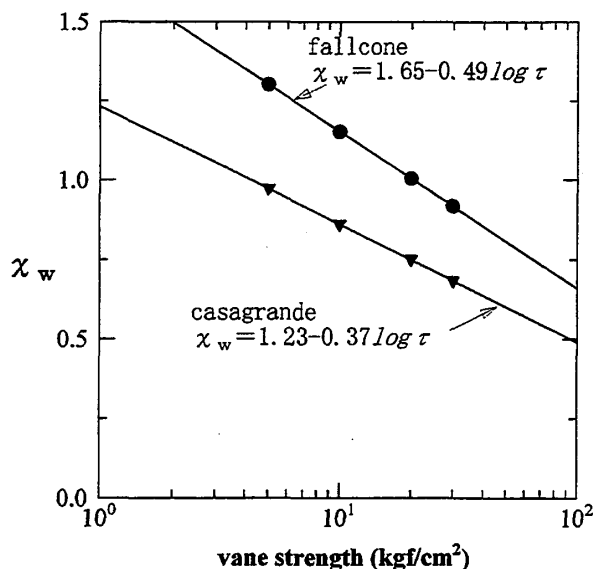


Fig. 3.3 Relation between χ_w and vane strength

Table 3.3 Value of λ and μ in vane test

LL test	λ_w	μ_w	λ_e	μ_e
Casagrande	1.23	0.37	3.29	0.99
Fall cone	1.65	0.49	4.39	1.32

ている。コーン貫入特性と同様に基準化含水比あるいは基準化間隙比を用いると、含水比とベーン強度の関係も液性限界に関係なく一意的に決まる。

4. 繰り返し再構成粘土の圧縮特性の基準化

4. 1 圧密基準曲線

図-4.1 は、圧密圧力を一定としたときの液性限界と間隙比の関係を示す直線の傾き χ_e の値を圧密圧力に対して求めたものである。 χ_e と圧密圧力の対数と

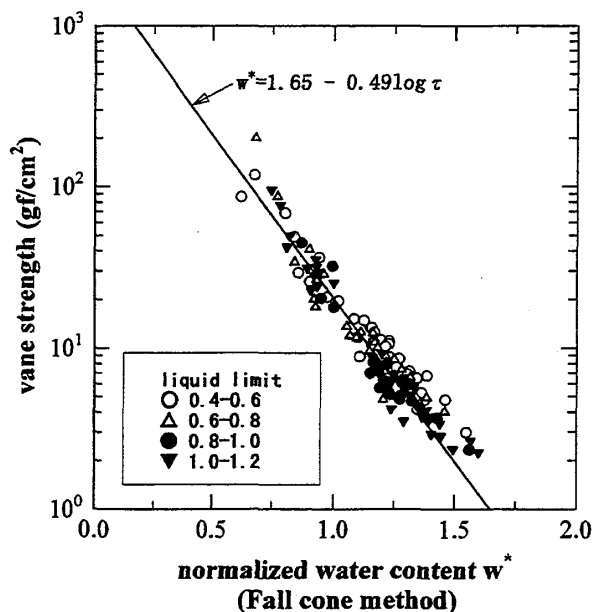


Fig. 3.4 Relation between normalized water content and vane strength

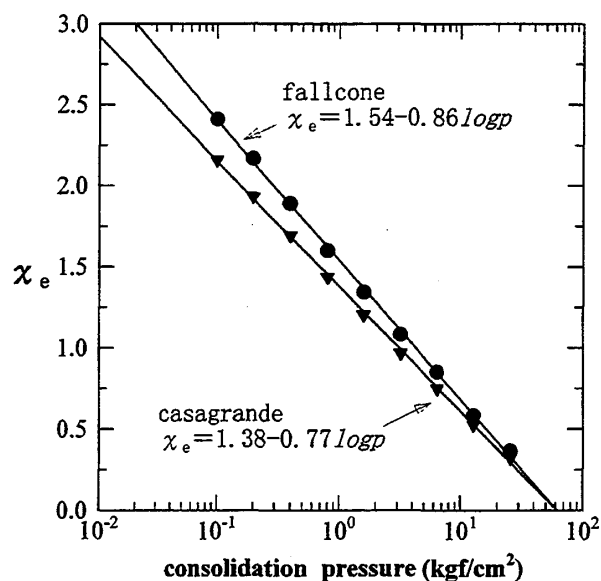


Fig. 4.1 Relation between χ_e and consolidation pressure

の間には直線関係が成り立ち、この結果から圧密圧力と基準化間隙比の関係は以下のように表される。

$$e^* = \lambda e - \mu e \log p \quad (12)$$

粘土の状態量として含水比を用いた場合も同様の結果が得られ、圧密圧力と基準化間隙比の関係として、

$$w^* = \lambda w - \mu w \log p \quad (13)$$

が得られる。式(12)、(13)における係数 λw 、 μw あるいは λe 、 μe の値は表-3.4に示すとおりである。

図-4.2は圧密圧力と間隙比の関係を基準化間隙比を用いて整理したもので、図中の直線は式(12)の関係を示している。この図より基準化含水比あるいは基準化間隙比を用いると液性限界の広い範囲にわたる土の圧縮曲線が上記の式に沿う狭い範囲にまとまることわかる。式(12)あるいは(13)の関係式は年代効果を持たない練り返し再構成粘土の基本的な圧密特性を表すものであり、本研究ではこれらの式で表される関係を圧密基準曲線(normalized compression line)と呼ぶ。

自然堆積粘土における年代効果を定量的に評価する基準として、練り返し再構成粘土の基本的な圧縮特性を求めようとする試みはこれまでもいくつかなされている。たとえば、Nagarajら[2]は液性限界における間隙比 e_L を用いて、

$$e/e_L = 1.122 - 0.2343 \log p \quad (14)$$

の関係式を提案している。また、Burland[1]は液性限界の1.0~1.5倍の含水比で練り返し再構成した粘土の圧縮特性について次の関係を提案している。

$$I_v = 2.45 - 1.285 \log p + 0.015 (\log p)^2 \quad (15)$$

なお、式(14)、(15)における圧力 p の単位は[Kpa]である。 I_v はvoid indexと名付けられた間隙比の関数で次式で計算される。

$$I_v = \frac{e - e_{100}^*}{e_{1000}^* - e_{100}^*} = \frac{e - e_{100}^*}{C_c^*} \quad (16)$$

e_{100}^* 、 e_{1000}^* 、 C_c^* は練り返し粘土の圧密曲線の圧密圧力100Kpa、1000Kpaにおける間隙比と圧縮指数であり、 e_L との間に次の関係があると報告している。

$$e_{100}^* = 0.109 + 0.679 e_L - 0.089 e_L^2 + 0.016 e_L^3 \quad (17)$$

$$C_c = 0.256 e_L - 0.04 \quad (18)$$

Burland[1]は式(15)の関係式を固有圧縮曲線(Intrinsic compression line; ICL)と名付けている。

図-4.3はNagarajらとBurlandによって提案されている関係式と本研究で提案する圧密基準曲線の比較を行ったものである。圧密圧力の広範囲にわたって、圧密基準曲線はBurlandの提案する固有圧縮曲線(ICL)によく一致しているが、圧密圧力が1000kpa程度から両者はずれる結果となっている。これは、図-4.1に示すように λe と圧密圧力の対数が直線関係にあるとしているためであり、実際には圧密圧力が無限大に近づくにつれて間隙比が最小間隙比 $e_\beta = 0.35$ に漸

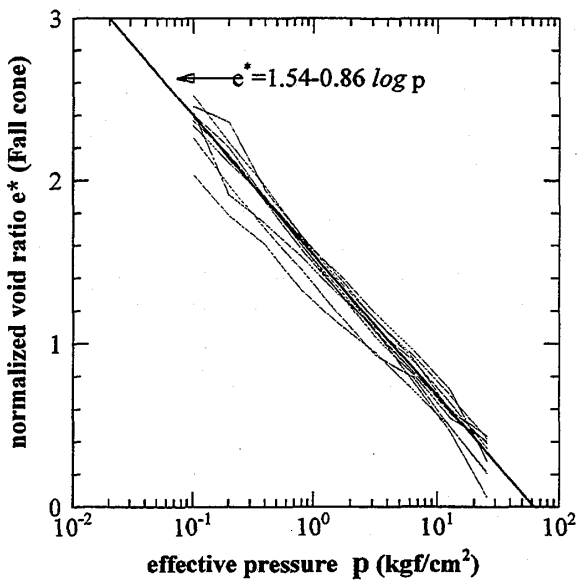


Fig. 4.2 Relation between normalized void ratio and consolidation pressure

Table 3.4 Value of λ and μ in Consolidation

LL test	λw	μw	λe	μe
Casagrande	0.53	0.29	1.38	0.77
Fall cone	0.59	0.33	1.54	0.86

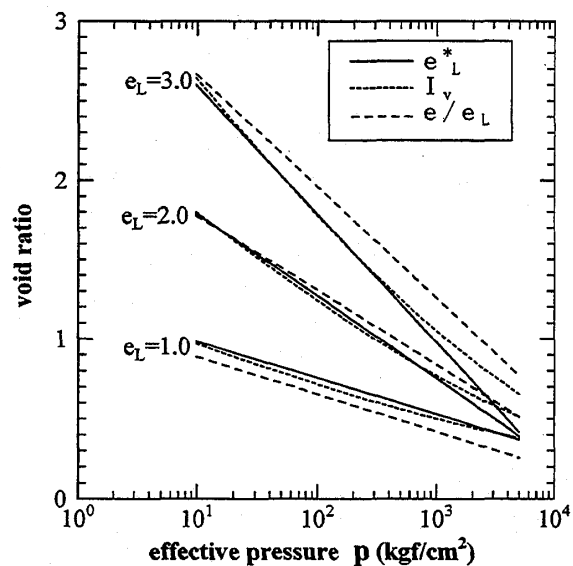


Fig. 4.3 Comparison of proposed e-log p curves

近するような曲線となるべきである。図-4.1 においても x_e の実験結果は圧密圧力が 10kgf/cm² (980kPa) を越えるあたりから直線関係からずれる傾向にある。したがって、1000kPa を越える高圧密圧力領域での圧密基準曲線に関してはさらに検討が必要である。一方、Nagaraj らによる圧縮曲線は他の圧縮曲線とかなりずれる結果となり、 e/e_L による基準化には無理があるように思われる。

4. 2 練り返し再構成粘土の圧縮指数と液性限界の関係

粘土の圧縮指数と液性限界が関係していることはよく知られており、一般に次の関係が成り立つ。

$$C_c = C_1 (LL - C_2) \quad (19)$$

C_1 、 C_2 は材料定数で、たとえば、練り返し再構成粘土に対しては次のような関係が報告されている。

$$C_c = 0.7(LL - 0.1) \quad \text{Skempton}$$

$$C_c = 0.715(LL - 0.0946) \quad \text{Nagaraj ら [5]}$$

これまで多くの粘土について式(19)の関係が成り立つことが報告されているが、係数 C_1 、 C_2 の物理的意味についてはほとんど議論されていない。式(9)、(12)より、間隙比と圧密圧力の関係は次のように表される。

$$e - e_\beta = (LL - LL_\alpha)(\lambda e - \mu e \log p) \quad (20)$$

この式より圧縮指数 C_c は次のように表される。

$$\begin{aligned} C_c &= de / d(\log p) \\ &= \mu e (LL - LL_\alpha) \end{aligned} \quad (21)$$

すなわち、係数 C_1 は μe 、 C_2 は LL_α を表していることになり、カサグランデ法による液性限界を用いた場合には、

$$C_c = 0.77(LL - 0.08) \quad (22)$$

の関係が得られる。図-4.4 は過去に報告されている練り返し再構成粘土の圧縮指数と液性限界の結果を示したもので、図中に示す式(22)の関係は実験結果とよく一致している。すでに述べたように LL_α は粘土がそれ以上圧縮しない最小間隙比に対応する液性限界と考えることができ、図-4.7 の結果からもその値は 0.08 程度であることがわかる。

5. まとめ

本研究では自然堆積粘土における年代効果の評価基準となる練り返し再構成粘土の圧縮特性に関して種々の実験結果をもとに考察した。コーン貫入特性、ペーン強度特性そして圧縮特性のいずれの力学特性も粘土

の液性限界の影響を強く受ける。しかしながら、基準化間隙比あるいは基準化含水比を用いると、これらの状態量と力学特性の関係は液性限界に関係なく一意的に表される。したがって練り返し再構成粘土の種々の力学特性は、基準化含水比あるいは基準化間隙比を用いて統一的に評価できる可能性がある。また、本研究で示した圧密基準曲線は練り返し再構成粘土の基本的な圧縮特性を表すものであり、自然堆積粘土における年代効果を定量的に評価する上で有用な基準となるものである。

なお、本研究は平成 10~11 年度の文部省科学研究費補助金(基盤研究(C)(2)、課題番号 10650494)を受けて行った研究の一部である。

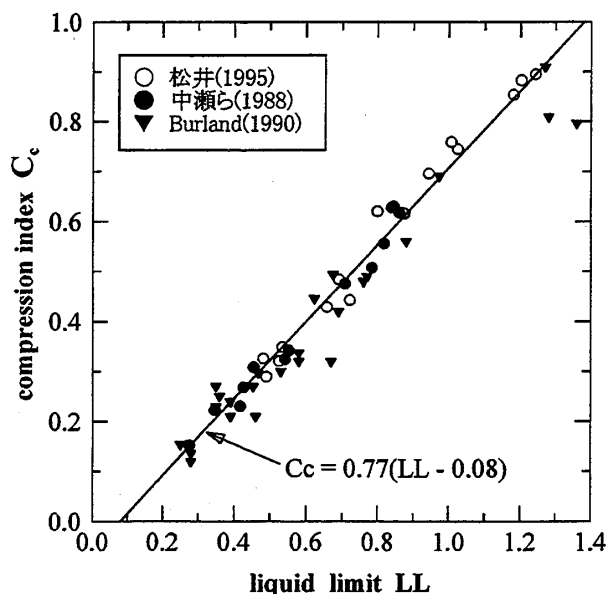


Fig. 4.4 Relation between compression index and liquid limit of reconstituted remolded clays

参考文献

- [1] Burland, J.B.: On the compressibility and shear strength of natural clays, *Geotechnique*, 40, 329-378, (1990)
- [2] Nagaraj, T.S. and Srinivasa Murthey, R.(1986) : A critical reappraisal of compression index equation, *Geotechnique*, 40, No.3, 329-379
- [3] 柴田徹・西原晃・藤井敏美・大西正城: 粘土の液性限界の測定法に関する研究, 福山大学工学部紀要, 第22巻, 第1号, pp.31-38 (1998)
- [4] 松井恒治: "大阪湾粘土の圧密特性に及ぼす続成効果に関する研究" 平成6年度京都大学修士論文
- [5] Nagaraj, T.S. and Srinivasa Murthey, R. : Rationalization of Skempton's compressibility equation, *Geotechnique*, 35, No.3, 433-443, (1983)