

# 高含水比における粘土のせん断特性

西原晃\* 柴田徹\*

## Shear Property of Clays at High Water Content

Akira NISHIHARA\* Toru SHIBATA\*

### ABSTRACT

In recent years, the intrinsic properties of clays have been examined as a basic frame of reference for evaluating the effect of soil structure of natural sedimentary clays. The object of this paper is to clarify the intrinsic shear properties of clays. Shear resistance of soils are constituted of frictional component and cohesion component. In this paper, the cohesion of clay in high water content is examined in relation to the liquid limit.

A number of tests measuring viscosity of clays and Vane shear tests are performed. It is shown that the shear property of clays changes at liquid limit. In lower water content than liquid limit, shear resistance obtained from viscosity test and Vane tests are in agreement with effective cohesion of clays proposed Hvorslev. It is also shown that shear property of clays in high water content is well characterized with normalized water content.

キーワード：粘土、せん断抵抗、液性限界、有効粘着力

Keywords: Clay, Shear resistance, Liquid Limit, Effective cohesion

#### 1. まえがき

筆者らは、自然堆積粘土の力学特性における堆積後の続成作用の影響いわゆる年代効果を定量的に評価するために、その評価基準として粘土が本来有している固有特性 (intrinsic properties) を明らかにする研究を続けている [1,2]。粘土は土粒子と水の混合体であり、その力学特性は含水比あるいは間隙比に強く依存する。また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、粘土の圧縮特性やせん断特性などの力学特性に影響する。西原・柴田 [2] は、粘土の液性限界とコーン貫入抵抗、圧縮特性およびペーンせん断抵抗の関係を調べ、これらの力学特性と含水比あるいは間隙比の関係が液性限界に依存していることを示した。またその結果をもとに、粘土が本来有している圧縮特性として圧密基準曲線を求めている。この圧密基準曲線は再構成粘土の力学特性のみならず年代効果を評価する上でも基本となる重要な指標である。

粘土のせん断抵抗における年代効果を評価するには、圧縮特性における圧密基準曲線のように、粘土が本来有

しているせん断特性を明確にする必要がある。土のせん断抵抗は粘着力と摩擦抵抗の二つの成分に分けて考えられるが、一般に用いられている強度定数は含水比あるいは間隙比との関係が明確ではない上、排水条件や圧密履歴などの影響も受けるため、その本来の特性を求めるのは容易ではない。これに対して、Hvorslev[3]は粘土のせん断抵抗と間隙比の関係を調べることにより、せん断抵抗を純粋な粘着力成分と摩擦成分に分離し、その物理的意味を明確にしている。このうち特に粘着力成分は間隙比あるいは含水比の関数であり、粘土の粒子間力に大きく関係すると考えられる。

本研究は以上のような観点から、粘土の粘着力成分に関して種々の実験をもとに考察したものである。まず、圧密基準曲線概念を用いて、粘着力と含水比の関係を導き、さらにペーンせん断試験および粘性抵抗の測定試験を行って、せん断抵抗と含水比の関係を調べた。そしてこれらの結果をもとに、粘土の粘着力成分に関する考察を行う。

\* 建設環境工学科

## 2. 粘土の有効粘着力

### 2.1 Hvorslev の破壊基準

土のせん断強度を表す式として最も一般的に使われているのは次式のクーロンの破壊基準である。

$$\tau_f = c + \sigma' \tan \phi \quad (2.1)$$

ここに、 $\tau_f$ : 土のせん断強度、 $c$ ; 粘着力、 $\sigma'$ ; 垂直有効応力、 $\phi$ ; 内部摩擦角である。式(2.1)で示されるように、土のせん断抵抗は粘着力と摩擦抵抗の二つの成分に分けて考えられる。式(1)における $\tan \phi$ は摩擦係数に相当するが、垂直有効応力 $\sigma'$ の変化とともに間隙比も変化するため、係数 $\tan \phi$ には間隙比の変化の影響も含まれる。また、粘着力は本来土粒子間に作用する粒子間力に起因するものであり、土粒子の詰まり方すなわち間隙比に強く依存する。このように、土のせん断抵抗においては、粘着力と摩擦抵抗の両成分とも間隙比に強く依存する。土のせん断抵抗に関して、これらのせん断抵抗成分と間隙比の関係を明確にしたのがHvorslev[3]である。

Hvorslevは破壊時の間隙比を調整しながら実験を行った結果に基づいて、間隙比一定での土のせん断抵抗が次式で表されることを示した。

$$\tau_f = c_e + \sigma' \tan \phi_e \quad (2.2)$$

ここで、 $c_e$ 、 $\phi_e$ は、それぞれ有効粘着力、有効内部摩擦角と呼ばれる。Hvorslevの破壊基準は間隙比一定のもとでのせん断抵抗を表しているため、式(2.2)の右辺第2項は純粋に摩擦成分、第1項はそれ以外のせん断抵抗を表している。強度定数 $c_e$ 、 $\phi_e$ は破壊時の間隙比の関数となるが、有効摩擦角 $\phi_e$ は間隙比に関係なく実用上一定値とみなして差し支えないとされている。一方、有効粘着力 $c_e$ は間隙比または含水比の関数であり、この間隙比は正規圧密試験結果よりわかるように、圧密圧力と固有の関係を持っている。これを圧力の関数として扱うために、等価圧密圧力 $\sigma'_e$ と粘着力係数 $\kappa_e$ を用いて次のように表される。

$$c_e = \kappa_e \sigma'_e \quad (2.3)$$

粘着力係数は砂の場合には $\kappa_e = 0$ となるが、粘土ではこれまでに0.11~0.13程度の値が求められている。等価圧密圧力 $\sigma'_e$ は、正規圧密状態においてその間隙比に対応する圧密圧力である。

Hvorslevの式は土のせん断抵抗を最も合理的に表したものと考えられている。また、Hvorslevの研究は土のせん断特性において、はじめて間隙比を土の状態量としてその影響を明確にしたものであり、土の構成式に関する後の研究の基礎となるものである。

### 2.2 有効粘着力と含水比の関係

Hvorslevの破壊基準における有効粘着力 $c_e$ は垂直有効応力 $\sigma' = 0$ の時のせん断抵抗であり、粒子間力に関する抵抗成分と考えられる。通常、有効粘着力 $c_e$ は等価圧密圧力 $\sigma'_e$ と関係付けられるが、等価圧密圧力は正規圧密状態での圧密圧力であり間隙比や含水比と固有の関係を持っている。つまり、有効粘着力 $c_e$ は粒子間力に関係するものであることから、本来、間隙比や含水比に関係づけられるべきものである。そこで本研究では、圧密基準曲線概念を用いて、有効粘着力と含水比の関係を求める。

図-2.1は繰り返し再構成粘土の圧密試験の結果[4]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。このように、粘土の圧密特性は液性限界に強く依存する。柴田・西原[2]はこのような液性限界の影響を考慮するために、次式で定義される基準化含水比を用いることを提案している。

$$w^* = \frac{w - w_\beta}{FN - FN_\alpha} \quad (2.4)$$

ここに、 $w$ は含水比、 $FN$ はフォールコン法で測定した液性限界である。 $w_\beta$ 、 $FN_\alpha$ はそれぞれ含水比と液性限界の特性値であり、 $w_\beta = FN_\alpha = 0.13$ という値が提案されている。式(2.4)からわかるように、含水比が液性限界に等しいとき、基準化含水比は1となる。このように、基準化含水比は液性限界に対する含水比の相対的な大きさを示す指標である。さらに柴田・西原[2]は基準化含水比を用いると、粘土の圧密曲線が次式で表されることを導いている。

$$w^* = 0.59 - 0.33 \log p \quad (2.5)$$

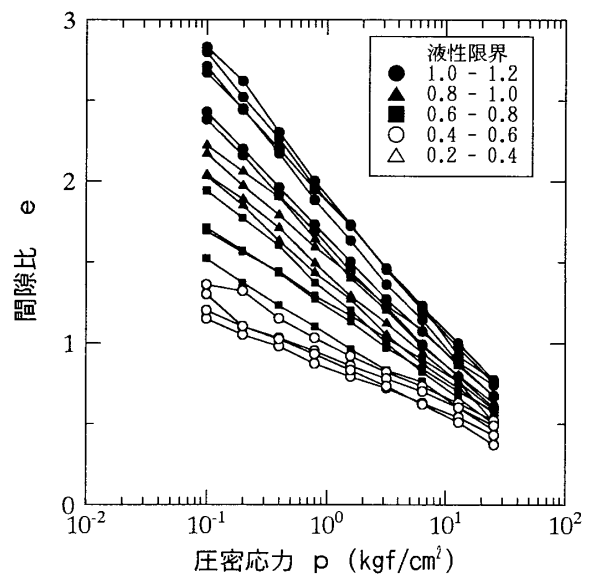


図-2.1 粘土の間隙比と圧密応力の関係

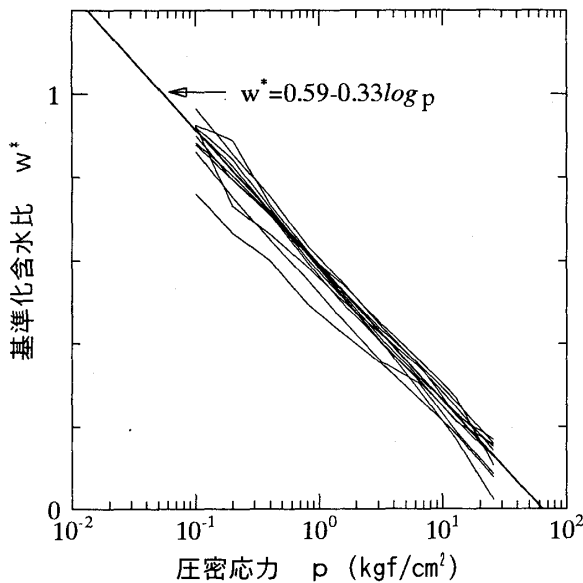


図-2.2 基準化含水比と圧密応力の関係

ここに、 $p$ は圧密応力である。

図-2.2は圧密試験の結果を、基準化含水比を用いて整理したもので、図中の直線は式(2.5)の関係を示している。この図から、基準化含水比を用いれば圧密圧力と含水比の関係が一義的に表されることがわかる。

等価圧密圧力は正規圧密曲線上にあるので、式(2.5)における $p$ と置き換えることができる。そこで、式(2.3)より $\sigma'_c$ を求めて、式(2.5)の $p$ に代入して整理すると、次の関係が導かれる。

$$w^* = K - 0.33 \log c_c \quad (2.6)$$

ここに、

$$K = 0.59 + 0.33 \log \kappa_c \quad (2.7)$$

であり、過去の研究において報告されている $\kappa_c = 0.11 \sim 0.13$ の値を用いると、 $K = 0.27 \sim 0.3$ 程度の値となる。

### 3. 実験概要

第2章で示したように、有効粘着力は含水比の関数である。そこでせん断抵抗と含水比の関係を求めるためにベーンせん断試験を行った。また、有効粘着力は粘土の粒子間力に関係すると考えられるため、粒子間力をより直接的に反映した特性として、粘土の粘性抵抗を測定した。

#### 3.1 実験試料

実験に用いた試料は、ニュージーランド産の陶器用粘土であるニュージーランド粘土とイ草染色用の尾道シルトの2種類の粉末粘性土である。さらに液性限界の値を変えるために、これらの粘土を配合した試料を3種類、合計5種類の試料を実験に供した。本実験で使用した試

料の物性を表-3.1に示す。なお、本研究では含水比を%表示ではなく、比で表している。

表-3.1 実験試料の物性

	土粒子密度 (g/cm <sup>3</sup> )	液性限界	塑性限界
ニュージーランド粘土	2.498	0.775	0.379
尾道シルト	2.584	0.36	0.177
混合試料1	2.523	0.595	
混合試料2	2.54	0.485	
混合試料3	2.558	0.43	

### 3.2 実験方法

ベーンせん断試験は、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、回転させたときの測定トルクからせん断強度をもとめるものである。本研究では広範囲の含水比にわたってせん断抵抗を求めるため、表-3.2に示すように大きさの異なる2種類のベーンを使用した。実験ではこれらのベーンをデジタルトルクメーターに取り付け、0.1°/sec (0.017 rpm)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。

粘土の粘性抵抗の測定にはスピンドルタイプの回転粘度計(トキメック社製、TVB-30HT)を用いた。この試験装置は直径3mmのロッドに取り付けた円盤(厚さ2.7mm)を回転させた時のトルクから粘性抵抗を求めるものである。本研究では、表-3.3に示す3種類のローターを用いて、5~100rpmの範囲で回転数を変えて実験を行なった。

表-3.2 ベーンの羽根の寸法

タイプ	高さ(mm)	幅(mm)
A	15	10
B	40	20

表-3.3 回転粘土計のローター

呼び名	円盤の直径(mm)
No.28	26
No.29	14.6
No.30	なし

### 4. 実験結果と考察

#### 4.1 ベーンせん断強度

図-4.1はタイプAのベーンを用いて求めたせん断強度と含水比の関係で、せん断強度の対数と含水比の間に直線関係が見られる。また、液性限界の高い粘土ほど含水比の変化に対するせん断強度の変化が大きいこと、液性限界の低い粘土ほど同じ含水比に対するせん断強度が低いことがわかる。タイプBのベーンの場合についても同様の結果である。

図-4.2は基準化含水比とせん断強度の関係を示したもので、基準化含水比を用いると液性限界の値に関係なく含水比とベーン強度の関係が一義的に表されることがわかる。また、含水比が液性限界付近 ( $w^*=1$ ) まではせん断強度の対数と含水比は直線関係にあるが、含水比が高くなるにつれてせん断強度の変化は小さくなり、含水比とせん断強度の関係は全体としてゆるやかな曲線となる。

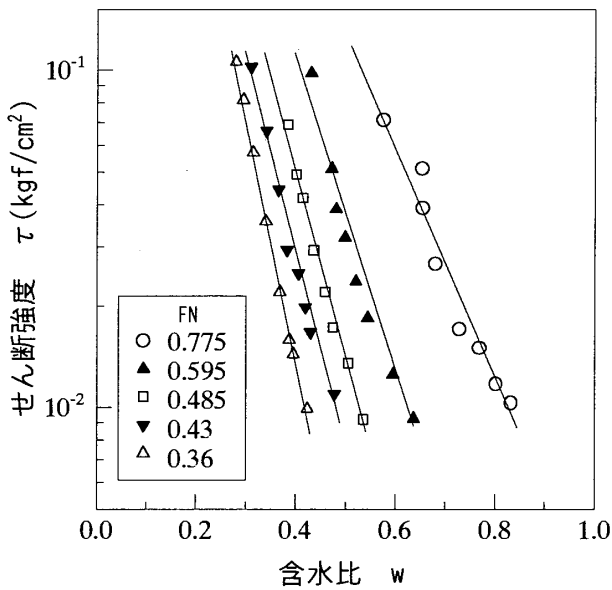


図-4.1 ベーン強度と含水比の関係  
(ベーンtypeA(B=1cm、H=1.5cm))

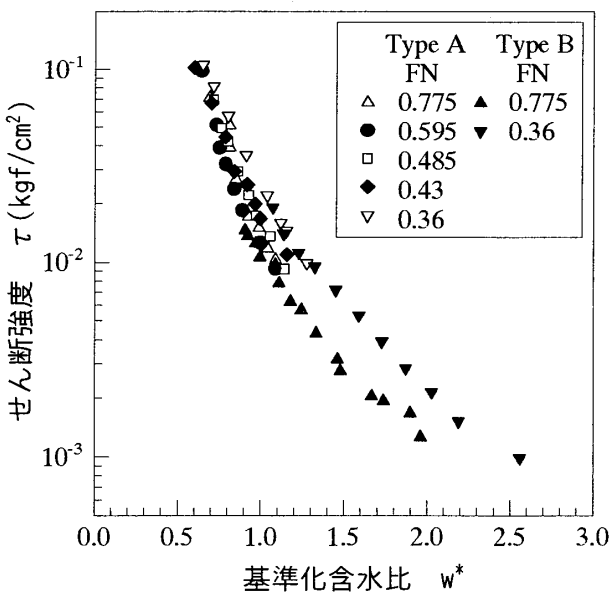


図-4.2 ベーン強度と基準化含水比の関係

#### 4.2 粘土の粘性とせん断強度

図-4.3は粘性試験におけるずり速度と粘性係数の関係を示したものである。ずり速度とは円盤の回転によって生じる流体の相対速度から求められるもので、せん断速度に対応する。ずり速度は円盤の直径と回転数によって表-4.1に示すように、それぞれ値が決まっており、今回の実験におけるずり速度の範囲は1.05~26.1(sec<sup>-1</sup>)である。図-4.3より、粘土の粘性抵抗はずり速度の増加とともに大きく減少し、しだいに一定値になる傾向が見られる。

表-4.1 回転粘度計のずり速度

回転数	ずり速度 (sec <sup>-1</sup> )		
	No.28	No.29	No.30
5 rpm	1.05	1.215	1.305
50 rpm	10.5	12.15	13.05
100 rpm	21	24.3	26.1

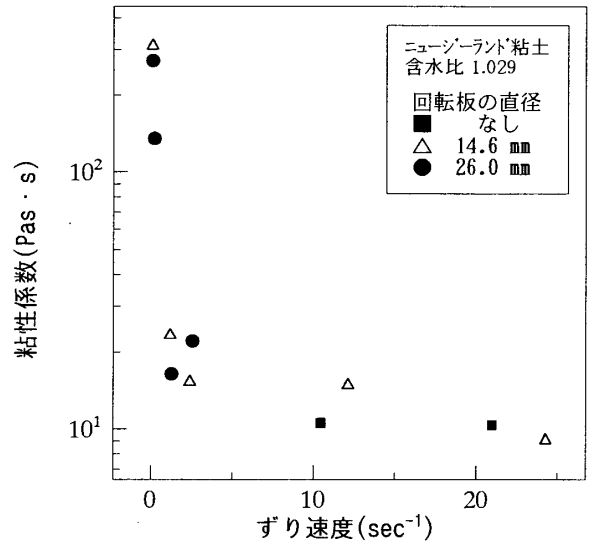


図-4.3 粘性係数とずり速度の関係

一方、図-4.4は粘性試験におけるずり速度とせん断抵抗の関係を示したものである。ただし、ここでのせん断抵抗は粘性の定義に基づいて、次式によって求めたものである。

$$\tau = \eta D \quad (4.1)$$

ここに、 $\eta$ は粘性係数 (Pa·sec)、 $D$ はずり速度である。図-4.4より、ずり速度が小さいうちはせん断抵抗が一定であり、粘土は粘性を持たないことがわかる。また、ある程度ずり速度が大きくなれば、ずり速度とともにせん断抵抗は増加し、粘性を示すようになる。これらの結果より粘土には非粘性から粘性へ移行するずり速度の境

界値が存在することがうかがわれる。通常のせん断試験におけるせん断速度は $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-6}$  ( $\text{sec}^{-1}$ )のオーダーであり、今回の粘性試験におけるずり速度よりもはるかに小さい。したがって、通常のせん断試験におけるせん断速度の範囲では土は粘性を示さないと考えられる。

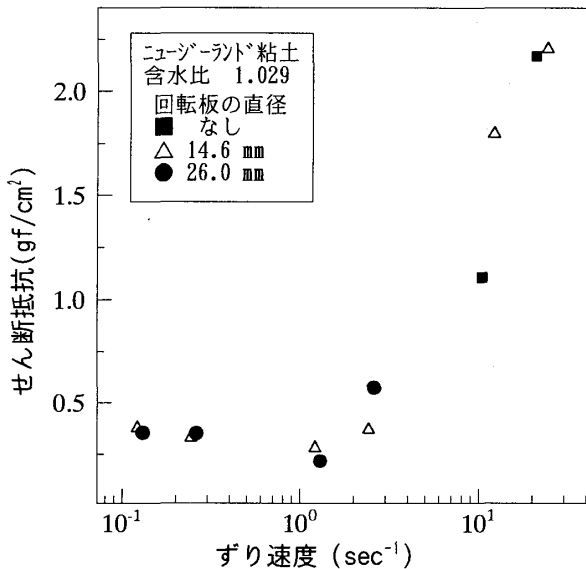


図-4.4 ずり速度とせん断抵抗の関係

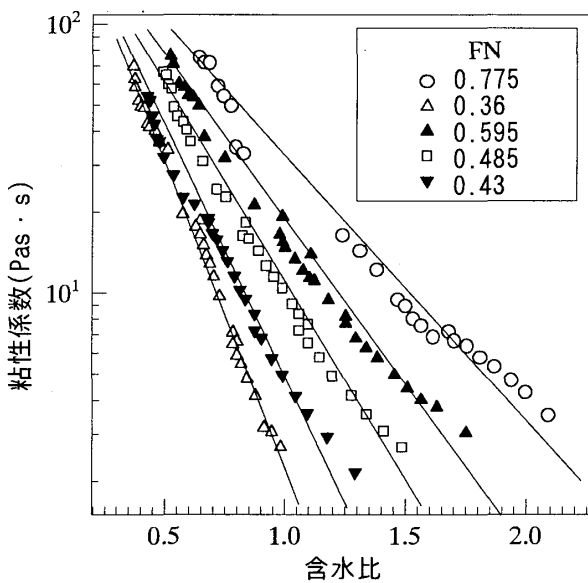


図-4.5 粘性係数と含水比の関係 (回転数 50 rpm)

表-4.2 液性限界における粘性係数

液性限界	0.775	0.596	0.485	0.43	0.36
粘性係数 50 rpm	53	59	63	57	62
(Pas·sec) 100 rpm	32	34	38	36	44

図4.5は回転数50rpm (ずり速度 $10.5 \sim 13.05 \text{ sec}^{-1}$ ) の場合の粘性係数と含水比の関係を示したもので、粘性係数の対数と含水比はほぼ直線関係にあることがわかる。ただし、それらの直線関係は液性限界に関係し、液性限界の低い粘土ほど、含水比の変化に対する粘性係数の変化が大きい。粘性係数は粘土粒子の粒子間力をより直接的に反映した特性である。ちなみに今回使用した粘土の液性限界における粘性係数は表-4.2に示すように、ほぼ一定値となる。この結果からも粘土の液性限界が粒子間力を反映した指標であることがわかる。

図-4.6は図-4.5の結果を基準化含水比を用いて整理したもので、液性限界に関係なく一本の直線関係となる。このことは、基準化含水比が粘土の粒子間力の影響を的確に評価した物性値であることを意味しているといえる。

粘性試験で求められるせん断抵抗は粘性係数と式(4.1)で関係づけられるが、回転数が一定であればずり速度はほぼ一定であるため、せん断抵抗は粘性係数を定数倍した値になる。したがって、粘性試験によって求めたせん断抵抗と含水比あるいは基準化含水比の関係は、図-4.5あるいは図-4.6と全く同様の結果となり、せん断抵抗と含水比の関係も粘性係数の場合と同様に基準化含水比によって一義的に表される。

図-4.7は、今回実験を行った3種類の回転数におけるせん断抵抗をまとめて示したものである。なお、図の煩雑さを避けるために、ニュージーランド粘土と尾道シルトの結果のみを示している。この図より、回転数が50、100rpmの場合と5rpmの場合の特性がかなり異なることがわかる。50、100rpmの場合にはせん断抵抗の対数と含水比の関係はほぼ直線関係にある。しかし、5rpmの場合の

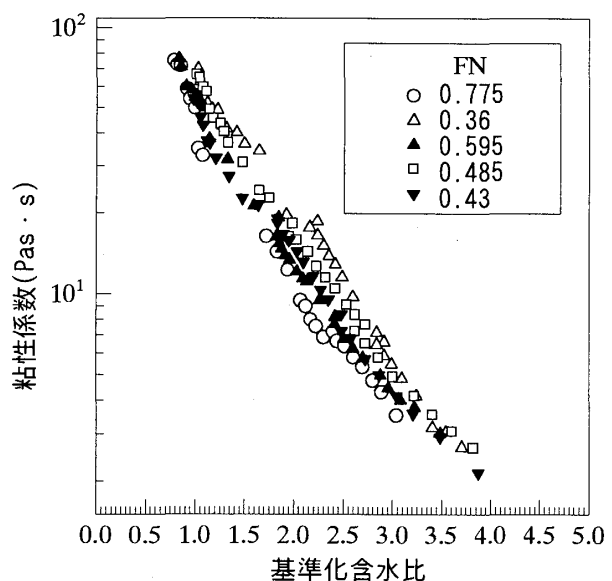


図-4.6 粘性係数と基準化含水比の関係 (回転数 50 rpm)

結果は、基準化含水比で1.5程度までの含水比に対してはせん断抵抗の対数が直線的に変化するが、さらに含水比が高くなるとせん断抵抗の減少割合が次第に小さくなる傾向が見られる。先に示したように、5rpmの場合の結果は粘土が粘性を示さない領域であるのに対して、50、100rpmの場合の結果は粘土が粘性を示す領域での結果である。したがって、粘土のせん断抵抗と含水比の関係には粘性が大きく影響することがわかる。

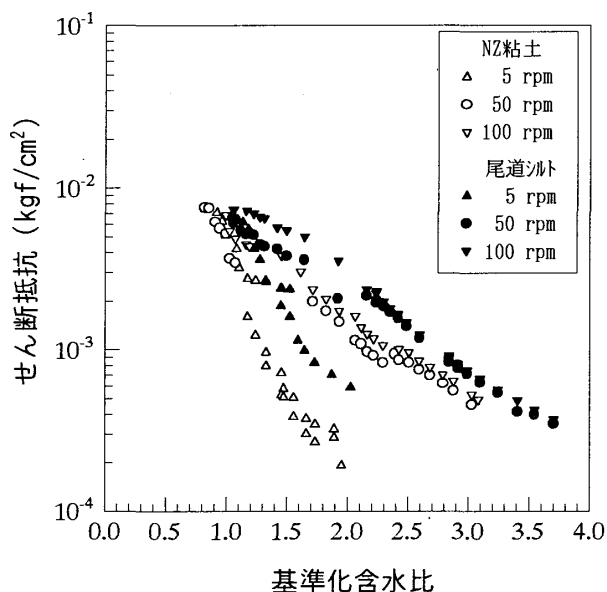


図-4.7 せん断抵抗と基準化含水比の関係

#### 4.3 粘土の有効粘着力

図-4.8は、ベーン試験ならびに粘性試験から求めたせん断強度と第2章で求めた有効粘着力を比較したものである。なお、図の煩雑さを避けるために、ニュージーランド粘土と尾道シルトの結果のみを示している。また、有効粘着力ならびにベーン強度は粘土が粘性を示さない領域での値であることから、粘性試験の結果については回転数5rpmの場合の結果を示している。

図-4.8は興味深い結果を示している。すなわち、液性限界 ( $w^*=1$ ) 付近までの含水比ではベーン試験ならびに粘性試験から求めたせん断強度は有効粘着力にほぼ一致し、これらせん断強度の対数と含水比は直線関係にある。しかし、含水比が液性限界を越えると、含水比に対するせん断強度の減少割合が小さくなり、せん断強度の対数と含水比の間の直線関係も失われる。従来、液性限界は土が塑性体から液体へ移行する境界の含水比と見なされてきた。図-4.8の結果からもせん断強度と含水比の関係が液性限界を境に変化しており、液性限界が粘土の物性の一つの境界を示すものであることがわかる。

また、土が塑性体としての特性を示す液性限界以下の含水比では、ベーン試験ならびに粘性試験から求めたせん断強度は式(2.6)で示される有効粘着力と含水比の関係に漸近していく。したがって液性限界以下の範囲において、摩擦成分以外の土のせん断強度と含水比の関係は式(2.6)で表されると考えてよい。ただし、液性限界以上の含水比では有効粘着力とベーン強度、そして粘性試験から求めたせん断強度は異なっており、この相違はせん断機構の違いによる粒子間力の複雑な作用によるものと推察される。

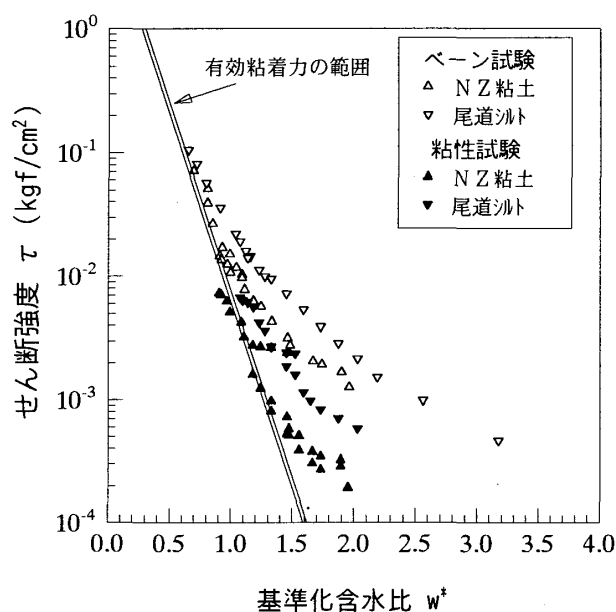


図-4.8 せん断強度と基準化含水比の関係

#### 5. まとめ

本研究では、圧密基準曲線を用いて有効粘着力と含水比の関係を導き、さらにベーン試験ならびに粘性試験から求められるせん断強度と比較を行った。その結果、せん断特性が液性限界を境界として変化すること、そして液性限界以下の含水比では本研究で導いた有効粘着力と実験で求めたせん断強度が一致することを示した。したがって、本研究で導いた有効粘着力と含水比の関係は粘土の固有特性の1つと考えることができよう。

#### 参考文献

- [1] 柴田徹・西原晃・藤井敏美・大西正城(1998): 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, pp.31-38
- [2] 柴田徹・西原晃(2000): “繰り返し再構成粘土の圧縮特性に関する研究” 福山大学工学部紀要, 第24巻, pp.41-48
- [3] Hvorslev, M. J. (1960): Physical Components of the Shear Strength of Saturated Clays, Res. Conf. Shear Strength of Cohesive Soils, Colorado, pp.169-273
- [4] 松井恒治(1994): 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