

室内ベーン試験に関する実験的研究

An experimental study of the laboratory vane shear test

よね ず さとし
米 津 聖*

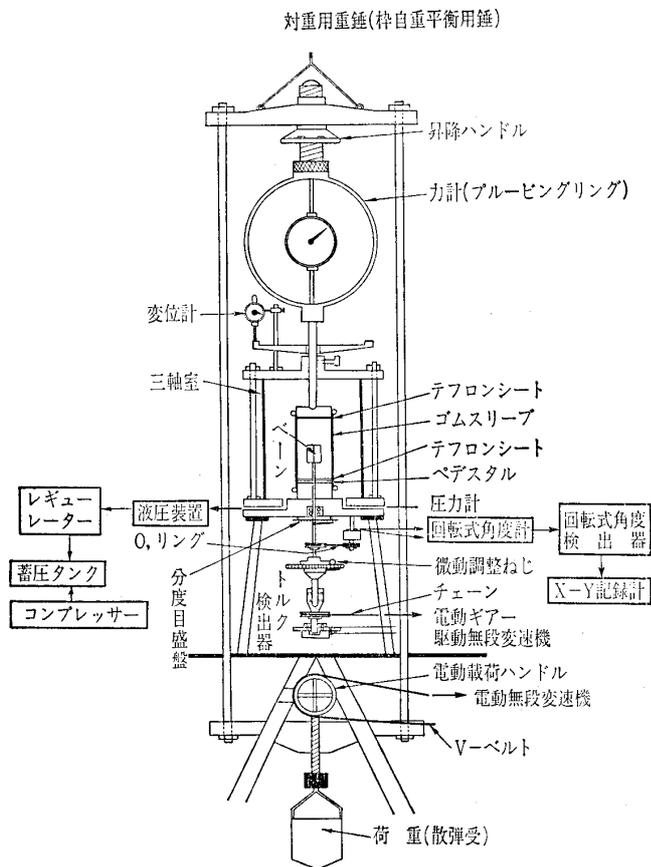
1. まえがき

最近の室内ベーンせん断試験による研究は試作あるいは開発した試験装置を用いた研究報告がほとんどである。なぜなら、従来の室内ベーン試験装置では研究用として不十分であり、測定誤差の生ずる危険も高いと考えられるからである。そこで、研究用室内ベーン装置として、あるいは原位置地盤内の粘性土のせん断強度を間接的に推定する試験装置として三軸ベーン試験装置が開発されている。筆者は本研究のため試作した三軸ベーン試験装置と普及型の2種類(上部回転機構、下部回転機構)の室内ベーン試験装置¹⁾の合計3種類のベーン試験装置を用いて粘性土のせん断強度に関する実験的研究を実施した。三軸ベーン試験の研究成果については柴田²⁾らによって報告されているので決して目新しいものではなく、彼らの成果に付加的な説明や資料を追加している。

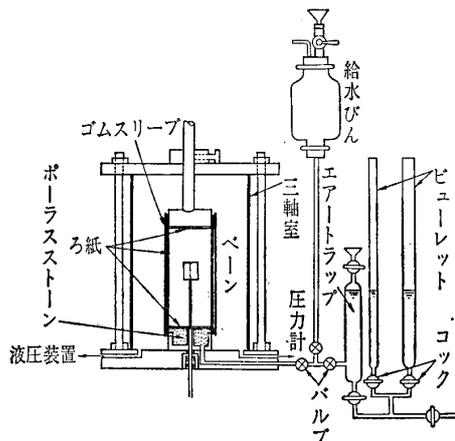
2. 実験装置と試験法

2.1 三軸ベーン試験装置の機構

図一は三軸ベーン試験装置を示している。ここでは原理の概略について説明し、詳細な点については2.2節の実験方法で述べる。円筒形圧密箱より作成した土試料をシンウォールチューブ(内径75mm, 肉厚1.2mm, 長さ100cm)を使って採取し押し出し、この試料を直径5cm, 高さ10cmに成形して、供試体をペDESTAL上の一部突き出されたベーンに貫入し、セットする。セットが完了すると供試体に荷重(σ_{1c} , σ_{3c})を加える。このときの側液は蒸留水であり、軸荷重には散弾を用いている。荷重を加えたのち、ベーンを試料底部から中央部(貫入深さ5cm)まで貫入して実験を開始する。このときのベーンの軸はギア・ボックスとの組み合わせにより無段変速機で回転され、トルクが与えられる。試料に作用する軸荷重と側圧は任意に変えることができ、このときに作用する軸荷重は力計によって測定され、圧縮量は軸圧縮量測定装置(変位計)により求めることができる。測定トルクはレバーで目盛盤に示した値として読み取る直接法と回転ロッドから電氣的に取り出し自記装置に記録する間接法の二方法を併用することができる。今回使用した測定器は最大トルク1kgf·cm, 最小目盛20gf·cmのレバー式である。本装置は応力制御方式



図一 三軸ベーン試験装置の機構



図二 三軸ベーン試験装置のセル内機構

とひずみ制御方式の両方式による圧密非排水試験が可能である。図二は三軸ベーン試験装置のセル内機構を示したものである。図二に示す装置は、ベーンを試料の底部から中央部(ベーン貫入深さ5cm)まで貫入してただちにせん断試験を始める方法と、ベーンを貫入したため生ず

*阿南工業高等専門学校 助教授

表-1 土試料の物理的性質

試料名	比重	粒 度			コンシステンシー			日本統一 分類法 分 類	産 地
		粘 土 分	シルト分	砂 分	液性限界	塑性限界	塑性指数		
		<0.005mm	0.005~0.074mm	0.074~20mm	w_L	w_p	I_p		
川島粘土	2.84	9.9%	48.8%	33.3%	74.1%	30.0%	44.1%	CH	川島町瓦焼用粘土
大谷粘土(I)	2.69	19.9	65.5	6.6	47.5	25.9	21.6	CL	堀江町大谷の瓦焼用粘土
大谷粘土(II)	2.72	19.0	52.5	28.5	40.1	24.9	15.2	CL	堀江町大谷の田地より採取
新野粘土	2.68	23.0	32.2	22.8	43.1	22.5	20.6	CL	新野町工事現場より採取

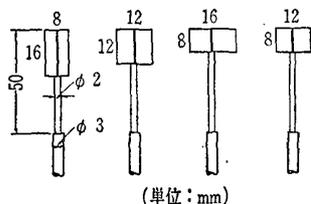


図-3 実験に用いた羽根のタイプ

る過剰間隙水圧の消散（ベーン貫入における試料の圧密）をまってから行う方法の2種類の実験に用いることができる。更に、三軸ベーン試験時における残留強度と供試体中の排水量の経時変化を調べるために用いられる。図-3はベーンの形状と寸法を示している。すべて4枚羽根であり、直径 $D \times H$, (D/H)が 8×16 mm(0.5), 12×12 mm(1.0), 12×8 mm(1.5), 16×8 mm(2.0)の4種類を選んで使用している。ベーンシャフトが土試料と接触する部分ではシャフト表面の摩擦抵抗をできるだけ少なくするために直径を細く加工している。

2.2 実験方法と使用した土試料

徳島県下の四地区から採取した4種類の粘土を $2000 \mu\text{m}$ ふるいでふるい、水を加えてスラリー状態にして直径40 cm, 高さ70 cmの円筒形圧密箱に入れ、載荷装置で荷重を加えて圧密圧力 0.37 kgf/cm^2 の4種類（川島粘土、大谷粘土(I), (II), 新野粘土）の圧密試料と圧密圧力 0.58 kgf/cm^2 の3種類（川島粘土、大谷粘土(II), 新野粘土）の人工圧密試料をそれぞれ作成した。このときの土試料の物理的性質を表-1に示す。なお、上、下部回転機構の室内ベーン装置、および試験方法についての説明は文献1)に報告されているのでここでは省略する。三軸ベーン試験は通常の三軸試験と同様の操作で行う。つまり、三軸セル内のペダスタル上に一部突き出ているベーンを、直径5 cm, 高さ10 cmに成形した供試体内に貫入させセットする。セットが完了すると荷重 (σ_{1c} , σ_{3c})を加え、そのちベーンを貫入深さ5 cmまで貫入して実験を開始する。このときの鉛直圧 σ_{1c} は土中で受けている土かぶり圧に等しい最大圧密主応力と考え、側圧 σ_{3c} は土中の水平方向の圧力である最小圧密主応力として考え、圧密圧力比を $K = \sigma_{3c}/\sigma_{1c}$ で表している。ベーン回転速度は主に $1.75 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ を中心として用いているが、3.3節に後述している三軸ベーン試験から求める残留強度の実験では、回転速度を 1.75×10^{-3} , 6×10^{-3} , $32.46 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ の三段階の速度を用い

ている。今回の実験ではベーン貫入時に生ずる過剰間隙水圧、あるいは負荷 (σ_{1c} , σ_{3c}) したため供試体内部に発生する過剰間隙水圧の消散に対する研究は含まれていないが、次回に報告するつもりである。

3. 試験結果と考察

3.1 ベーン上、下端面のせん断応力と側面のせん断応力について

等方圧密された土試料を用いてベーン上、下両端面でのせん断応力 τ_H と回転角度 θ およびベーン側面でのせん断応力 τ_V と回転角度との関係について調べてみる。

Cadling の基本式

$$M = \pi/2 \cdot H \cdot D^2 \tau_V + \pi/2 \cdot D^3 \cdot \alpha \cdot \tau_H \dots \dots \dots (1)$$

を変形して

$$\frac{2M}{\pi \cdot D^2 \cdot H} = \tau_V + \alpha \cdot \tau_H \cdot \frac{D}{H} \dots \dots \dots (2)$$

式(2)が求められる。

圧密圧力 0.58 kgf/cm^2 によって作成した新野粘土と大谷粘土(II)の2試料について下部回転機構のベーン試験機によりトルク値 M を求めて式(2)を適用してみる。図-4は Aas³⁾, 柴田^{2),4)} の研究による方法でグラフ上に $\frac{2M}{\pi D^2 H}$ と D/H との関係プロットした解析例である。この場合の係数 α については $\alpha = 0.33$ (長方形分布)を用いている。その結果、新野粘土では $\tau_V = 0.08 \text{ kgf/cm}^2$, $\tau_V/\tau_H = 0.45$, $\tau_H = 0.18 \text{ kgf/cm}^2$ が求まり、大谷粘土(II)では $\tau_V = 0.05 \text{ kgf/cm}^2$, $\tau_V/\tau_H = 0.30$, $\tau_H = 0.17 \text{ kgf/cm}^2$ が求まる。含水比は破壊時の含水比を平均したものを示している。この方法を用いて、各回転角度において発揮される τ_V , τ_H を

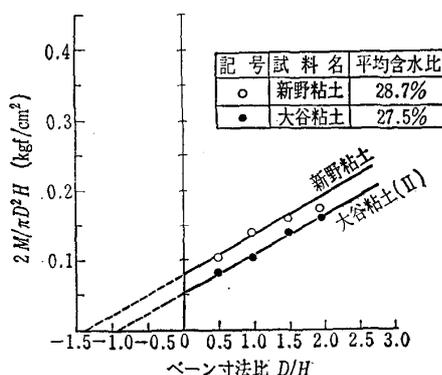


図-4 ベーン寸法を変えた試験結果の解析例 (下部回転機構から求めた試験結果)

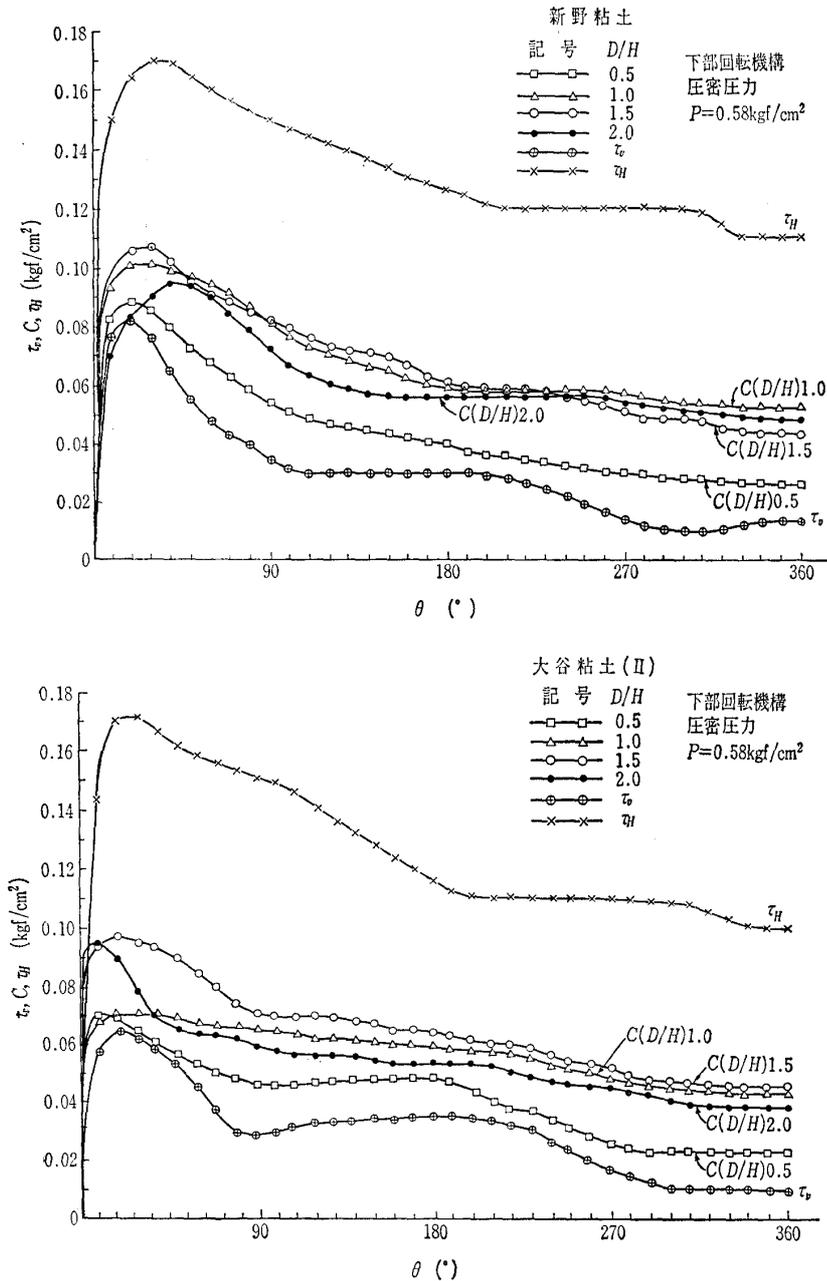


図-5 ベーンせん断応力 τ と回転角度 θ の関係

計算すると、図-5が得られる。図中の $C \sim \theta$ 曲線は式(1)で $\tau_v = \tau_h = C$, $\alpha = 1/3$ とおいて得られた慣用計算式から求めた曲線である。この図によればベーン上、下両端面のせん断応力 τ_h がベーン側面のせん断応力 τ_v よりかなり大きいことが分かる。このように、 τ_h が大きな値を示すことは柴田⁴⁾、太田⁵⁾らの報告によっても認められている。また、図-5から、慣用計算式による C が最大値となるのは $\theta = 10 \sim 30^\circ$ の角度付近となっている。

3.2 三軸ベーン試験から求めたせん断強度と圧密圧力比の関係について

実験室において原位置地盤内の応力状態のせん断強度を推定するため、三軸ベーン試験によってせん断強度を求めている。実験用供試体としては4種類の粘土のうち川島粘土と大谷粘土(II)の2種類について、2種類の圧密圧力(0.37, 0.58 kgf/cm²)をそれぞれ载荷し、作成した人工圧

密土試料を用いている。図-6、図-7は供試体に作用する最小圧密主応力 σ_{3c} を変化させた場合についてのせん断強度最大値 c_f と鉛直面上のせん断強度最大値 τ_{vf} の関係をプロットしたものである。図-6は $P = 0.37$ kgf/cm²の圧密土試料から求めた測定結果であり、このときの圧密圧力比 K は0.25~1.0の範囲内で変化させている。図からも分かるように K の値が小さくなるにつれて c_f , τ_{vf} は減少する傾向を示す。川島粘土に比べて大谷粘土(II)ではせん断強度最大値 c_f および鉛直面上のせん断強度最大値 τ_{vf} が全体的に小さくでている。図-7は $P = 0.58$ kgf/cm²の圧密土試料から求めた測定結果である。 K 値が小さくなるにつれ、すなわち σ_{3c} が小さくなれば c_f , τ_{vf} も減少し、 K 値が大きくなるに従って、すなわち σ_{3c} が大きくなれば c_f , τ_{vf} も増加する傾向を示している。図-6、図-7に示すグラフの直線関係について調べてみると慣用計算式より求めた c_f と τ_{vf} との直線関係はほぼ同じ傾向を示すが、 $P = 0.37$ kgf/cm²の圧密土試料から求めた c_f と τ_{vf} との関係について整理してみると川島粘土では $c_f = 1.0 \tau_{vf}$ 、大谷粘土(II)では $c_f = 0.9 \tau_{vf}$ となり近似的に $c_f = \tau_{vf}$ の関係が確かめられる。 $P = 0.58$ kgf/cm²の圧密土試料から求めた c_f と τ_{vf} の関係について、川島粘土では $c_f = 1.3 \tau_{vf}$ 、大谷粘土(II)では $c_f = 1.5 \tau_{vf}$ となり、明らかにせん断強度の違いが現れている。

次に、Cadlingの式を検証するために柴田²⁾は次式を求めている。式(1)において、

$\tau_v = \tau_h = \tau_f$ とおき、両辺を圧密圧力 σ_{1c} (三軸ベーン試験時の供試体にかかる鉛直圧)で割れば、

$$\tau_f / \sigma_{1c} = \frac{2M}{\pi D^2 H} \cdot \frac{1}{\sigma_{1c}} / (1 + \alpha \cdot D/H) \dots \dots \dots (3)$$

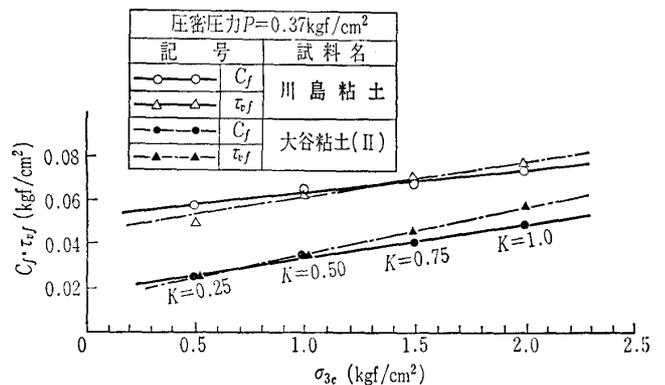


図-6 最小圧密主応力 σ_{3c} の変化とベーンせん断強度 c_f および鉛直面上のせん断強度 τ_{vf} との関係

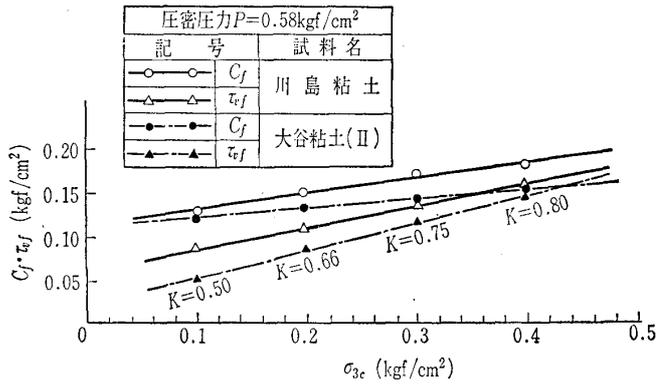


図-7 最小圧密主応力 σ_{3c} の変化とベーンせん断強度 c_f および鉛直面上のせん断強度 τ_{vf} との関係

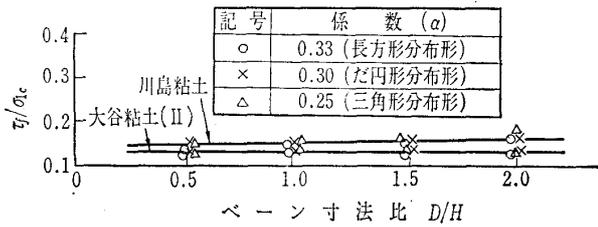


図-8 係数 α の分布形に対する τ_f/σ_{1c} と D/H との関係

式(3)が得られる。

式(3)において係数 α が一定でベーン寸法比 D/H と圧密圧力 σ_{1c} を変化させても求められる τ_f/σ_{1c} 値が同一ならば、式(1)を適用するための必要条件が満足されると述べている。

図-8 は4種類の土試料のうち川島粘土と大谷粘土(II)について、ベーン寸法比 D/H を変化させたときの τ_f/σ_{1c} と D/H の関係についてグラフ上にプロットしたものである。端面のせん断応力の分布を長方形、だ円形、三角形にしてみても、 τ_f/σ_{1c} 値は D/H の値には無関係であり、式(1)を適用してもよいという必要条件が満たされている。表-2はベーン試験方法の違いである上、下部回転ベーン試験と三軸ベーン試験から、式(3)を用いてそれぞれの τ_f/σ_{1c} 値を求め比較したものであり、係数 α は $\alpha=0.33$ の長方形分布形より求めた数値である。試験方法の違いによる τ_f/σ_{1c} のくい違いの比率を調べてみると川島粘土では上、下部回転ベーン試験値と三軸ベーン試験値では1.9%、大谷粘土では上部回転ベーン試験値と三軸ベーン試験値では7.4%、下部回転ベーン試験値と三軸ベーン試験値では0%となることから、三種類の試験装置による試験結果を比較するとデータの平均値は小数点2けた目までは著しく差はないが、小数点3けた目に多少のくい違いが現れている。しかし、試験方法にかかわらず、ほぼ一定の τ_f/σ_{1c} 値がえられていることが判明した。

3.3 三軸ベーン試験による残留強度について

粘性土の残留強度は現在移動を続けている地すべり斜面の安定解析あるいは地すべり防止対策に用いる強度定数を求めるためにときどき論じられる⁹⁾。また、柴田⁴⁾は次のように述べている。残留強度はせん断応力 τ のピークが過

表-2 上、下部回転ベーン試験と三軸ベーン試験から求めた τ_f/σ_{1c} 値の比較表

		圧密圧力 0.37 kgf/cm ²		川島粘土	大谷粘土(I)
回転機構	D/H	D×H(mm)	τ_f/σ_{1c}	τ_f/σ_{1c}	τ_f/σ_{1c}
上 部	0.5	15×30	0.15	0.07	
	1.0	20×20	0.15	0.06	
	1.5	25×17	0.17	0.06	
	2.0	30×15	0.14	0.06	
下 部	0.5	15×30	0.14	0.08	
	1.0	20×20	0.16	0.06	
	1.5	25×17	0.14	0.06	
	2.0	30×15	0.17	0.07	
三軸ベーン K=1.0	0.5	8×16	0.14	0.06	
	1.0	12×12	0.15	0.07	
	1.5	12×8	0.16	0.07	
	2.0	16×8	0.17	0.07	

ぎたのち、 τ が一定値に落ちつくまで大きい変形を与えて求まるものであるから、大変形の与えられない通常のせん断試験機ではこれを求めることは困難である。しかし、ベーン試験は回転角度に制限がないので大変形を与えることができ、容易に残留強度を求めることができる。本報告では残留強度について4種類の土試料についてすべて実験をしたが、ここでは代表土試料として川島粘土の測定結果を示す。ベーンを90°回転したならばそれ以後はせん断円筒面が生じるにもかかわらず、図-9(a), (b)のグラフでは τ が更に大きくなっている場合もあり、回転角度300°付近からせん断抵抗 τ_r が現れる傾向もあるがこの原因については明確にするところまで至っていない。ベーン回転速度を増加させる段階において τ が大きくなると、小さくなる時の変化が現れているが、この原因としては変速機を切り変えるときに生じる回転チェーンのずれがベーン回転に影響を与えたため、せん断強度に変化が生じたと思われる。図-9(a)はベーン寸法比 D/H を一定にして、圧密圧力比 K を変化させ、せん断応力 τ と回転角度 θ の関係をプロットしたものである。 $D/H=2.0$ のグラフ(上図)では τ は $K=0.75, 0.80$ の方が $K=0.50, 0.66$ に比べて大きくでている。ところが $D/H=0.5$ のグラフ(下図)では $\theta=0\sim 660^\circ$ の範囲内において τ にはこの傾向が見られない。 $D/H=0.5, D/H=2.0$ の両グラフとも $\theta=760\sim 2260^\circ$ では、回転速度が増加してもやはり τ は K 値の大きい方が明らかに大きな値を示していることが分かる。図-9(b)は圧密圧力比を一定にして、ベーン寸法比を変化させて、せん断応力と回転角度の関係を示した図である。 D/H の違いから求めた τ には著しい傾向は見られず、 $K=0.66$ から求めた τ よりも $K=0.80$ から求めた τ の方が全体的に大きな値を示していることが分かる。図中の含水比は土試料の破壊時の値であり、約29~34%の範囲であった。試験終了後におけるせん断面付近の平均含水比は試験前の供試体全体の平均含水比に比して0.6~1.0%程度減少していた。図-9によると、初期の小回転角(0~600°)の

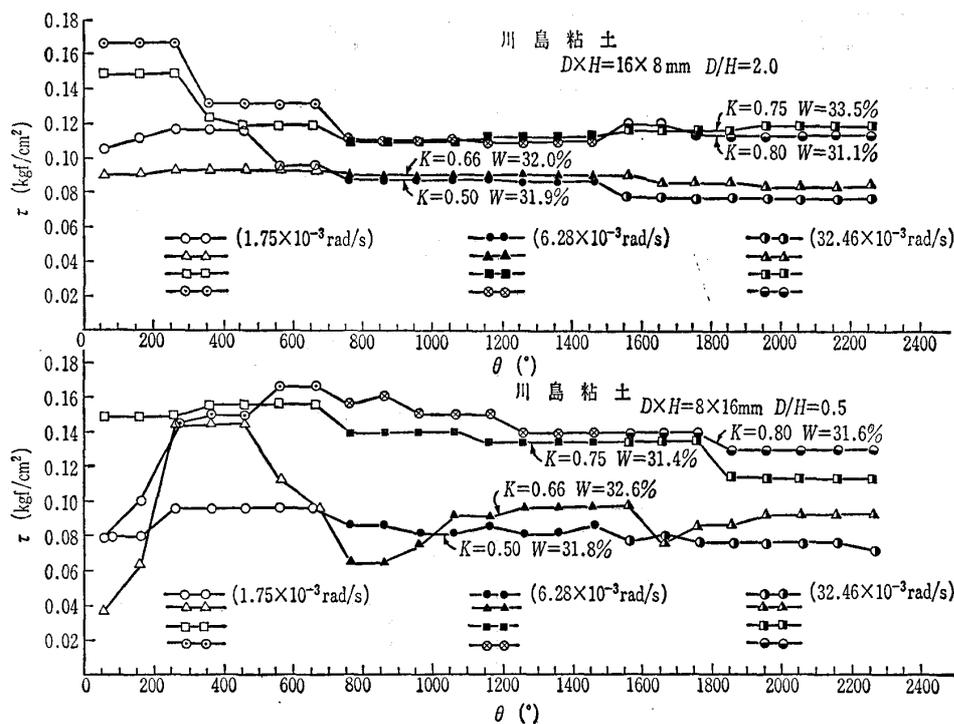


図-9(a) ベーンせん断強度 τ とベーン回転角度 θ との関係

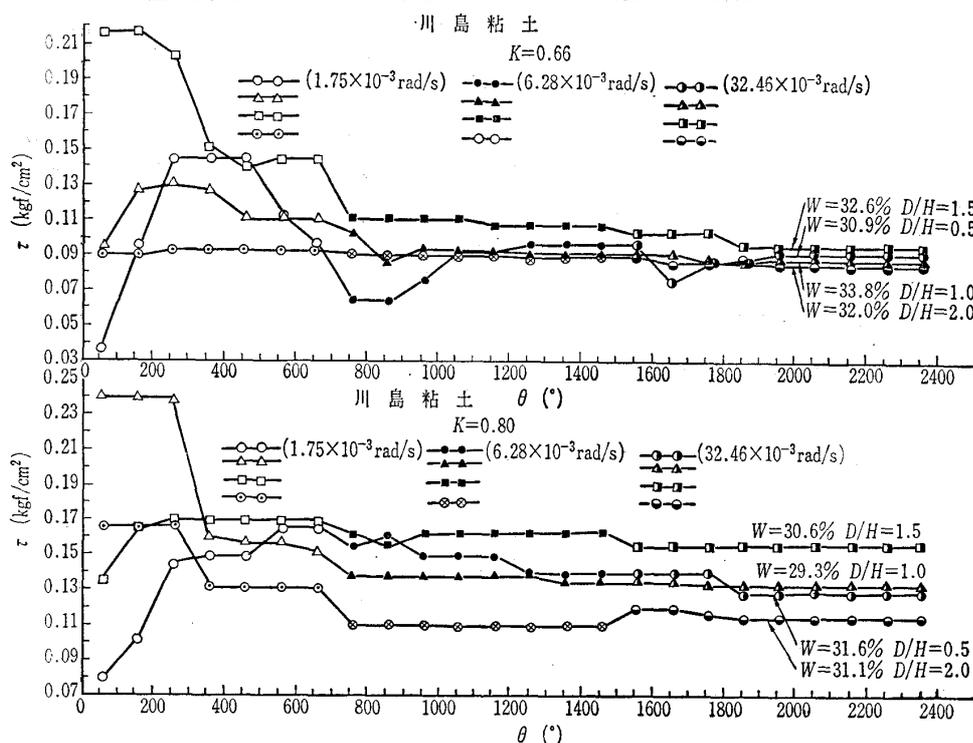


図-9(b) ベーンせん断強度 τ とベーン回転角度 θ との関係

うちは、ベーン寸法比の違いや、圧密圧力比の違いがせん断抵抗 τ へ与える影響が大きい。ところが 200° くらいまで τ が増大するもの、 300° あたりから τ が低下するものなどいろいろである。つまり、三軸ベーン試験から残留強度を調べる場合には、同一回転速度でベーンの累積回転量を多くして τ が一定値に落ちつくまで実施すべきと思われる。

4. 結論

以上の実験結果から得られる結論は次のとおりである。

- (1) $\tau_H \sim \theta, \tau_V \sim \theta$ 曲線および $\tau_V = \tau_H = C$ の慣用計算式から求められる $C \sim \theta$ 曲線ではせん断応力のピーク値は $\tau_H > \tau_V$ となることが分かる。ベーン上下両端面と側面ではせん断応力の大きさの違いが認められる。
- (2) 圧密圧力を変えて作成した土試料について、圧密圧力比 K を $0.25 \sim 1.0$ の範囲内で変化させて $c_f, \tau_{vf} \sim \sigma_{3c}$ の関係を求めてみると、 K 値が小さくなるにつれ、すなわち σ_{3c} が小さくなれば c_f, τ_{vf} も減少し、 K 値が大きくなるにつれ、すなわち σ_{3c} が大きくなれば c_f, τ_{vf} も増加している。
- (3) 本文中に用いられている上、下部回転ベーン試験と三軸ベーン試験からそれぞれ求めた τ_f / σ_{1c} 値は試験方法にかかわらず、ほぼ一定の τ_f / σ_{1c} 値が得られることが判明した。
- (4) 三軸ベーン試験機は同一速度でベーン累積回転量を多くし、 τ が一定値を示すまで回転させることにより残留強度を求めることができる。

参考文献

- 1) 米津 聖：室内ベーン試験に関する実験的考察，土と基礎，Vol.28, No.4, pp.39-46, 1980.
- 2) 柴田 徹：粘土のベーンせん断強度に関する研究，土木学会論文集，第138号，pp. 39-48, 1967.
- 3) Aas, G.: A study of the effect of vane shape and rate of measured values of in-situ shear strength of clays, Proc. ICSMFE, Vol. 1, pp. 141-145, 1965.
- 4) 柴田 徹・田河勝一：粘土のベーンせん断強度に関する2, 3の考察，京都大学防災研究所，年報第11号，pp. 1-12, 1968.
- 5) 太田秀樹・大竹 勉・森田悠紀雄：ベーン試験特性と他試験との比較，ベーン試験に関するシンポジウム，土質工学会，pp. 71-76, 1980.
- 6) 河上房義：土質力学，森北出版，pp. 146-147, 1983.

(原稿受理 1983.1.20)