

防衛大学校 (E) 平松 道生

" (O) 木暮 敬二

" (A) 山口 晴幸

1 まえがき

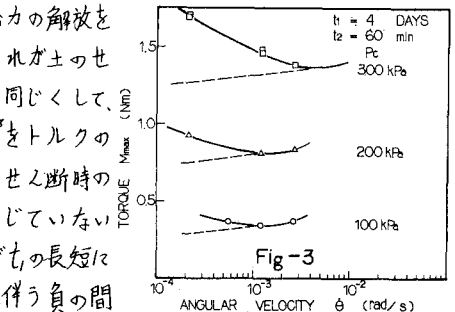
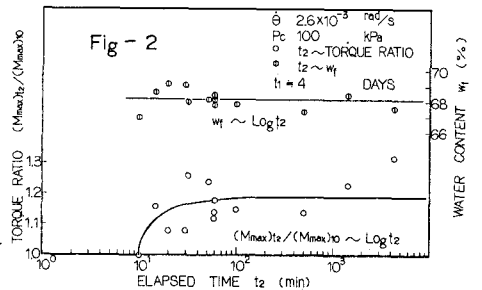
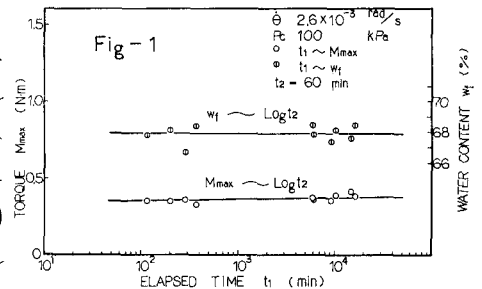
一般にベーンせん断試験は不攪乱試料の採取が難しく、採取運搬等の過程で生じる試料の乱れの影響等により、室内試験結果から原位置強度を推定できないような軟弱な粘性土地盤中の土要素の強度特性を把握する場合に非常に有効な手段とされている。しかし、現場ベーン試験による原位置強度の推定のみならず、室内ベーン試験から粘性土のせん断挙動を究明しようとする試みは非常に少ないようである。これはベーンせん断時のせん断機構の不明確さだけでなく、試験条件の設定や他の強度試験結果との関連性等において、説明されなければならない点が多に残されているためと思われる。そこで本報告は試験条件に着目し、繰返し再圧密粘性土のベーンせん断特性におよぼす圧密時の応力の解放期間、ベーン貫入後せん断開始までの期間、回転速度等の影響について検討したものである。

2 実験方法

本実験に用いた試料は自然地盤から乱した状態で採取したものであり、その物理的性質は $L.L. = 101\%$ 、 $P.I. = 64\%$ 、 $G_s = 2.65$ である。これに蒸留水を加え泥水(含水比約180%)とし、420 μm ふるいを通過したものを3ヶ月以上養生した。供試体作成に先立ち、まず泥水を十分にソイルミキサーで攪拌した後、真空状態にある圧密容器(径16.5cm、高35.0cm)に引き込み脱気する。供試体は泥水に鉛直応力(P_v)を載荷し、2週間一次元圧密してできた粘性土ケーキに、シンワールチューブを貫入し所定の寸法(径7.5cm、高5cm)に成形したものをを用いた。なお P_v の値は100, 200, 300 kPa の三種類とした。ベーン寸法は直径2.0cm、高3.0cm、断面積比16.13%である。せん断試験は圧密圧力および圧密時の応力の解放期間、ベーン貫入後せん断開始までの放置期間、ベーン回転速度を種々に変えて行っている。なお、放置期間中に供試体からの水分蒸発を防止するために、湿潤箱等を用いて工夫をこらした。

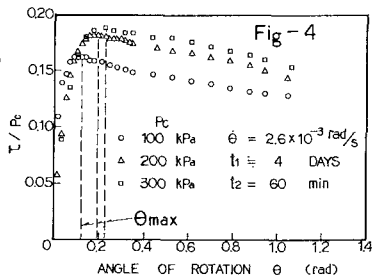
3 実験結果と考察

(1) 圧密時の応力解放後の放置期間とベーン貫入後の放置期間の影響 原位置強度を室内試験から推定する場合、試料のサンプリングが必要となり、それに伴って土要素は地盤内で受けていた応力の解放を余儀なくされる。そのため、土要素内に負の間隙水圧が生じ、それが土のせん断特性に影響を与えるとされている。そこで図-1は他の条件を同じくして、圧密時の応力の解放期間(t_1)が粘性土の非排水強度におよぼす影響をトルクの最大値(M_{max})との関係で示したものである。なお、図中にはベーンせん断時の含水比(w_f)のプロットも併記しており、解放期間中水分の蒸発が生じていないとみなすことができる。図より、 t_1 が100分以降ではベーン強度が t_1 の長短によらないことがわかる。このことから、本供試体では応力解放に伴う負の間



隙水圧が100%程度でほぼ消散し、土構造が安定な状態に達するものと推測できる。次に土をほぼ4日に固定し、供試体に定速度($1\text{cm}/\text{min}$)でベーン翼を貫入した後、せん断開始までの放置期間(t_2)を種々に変えて行、たときのトルク最大値($M_{\max}$) t_2 を示したのが図2である。なお、($M_{\max}$) t_2 は $t_2=10$ 分におけるトルク最大値($M_{\max}$) $_{t_2=10}$ で正規化している。ベーン貫入に伴いその周辺の土は非排水に近い状態でせん断されるために、間隙水圧の発生が予想される。なおこの発生間隙水圧の消散割合は t_2 の長短に依存すると考えられる^{1),2)}。そこで、発生間隙水圧がせん断開始時に残留していればベーン翼周辺の有効応力は低下しており、ベーン強度も低下することになる。図-2はこのことを示しており、多少ばらついているが $t_2 < 60$ 分の範囲ではベーン強度におよぼす t_2 の影響が見られ、 $t_2 > 60$ 分の範囲ではベーン貫入による発生間隙水圧がほとんど消散しているとみなすことができる。

(2)回転速度と圧密圧力の影響 ベーン試験は非排水試験であることから、せん断中ベーン翼周辺の含水比の低下に伴う強度増加を防ぐ意味でも、一般に $1.7 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ 前後の回転速度が採用されている。ここではベーンせん断強度におよぼす回転速度($\dot{\theta}$)の影響と $\dot{\theta} = 1.7 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ の妥当性について検証するものである。図-3は最大トルク $M_{\max}$ と $\dot{\theta}$ との関係を $P_c = 100, 200, 300 \text{ kPa}$ の各供試体について示している。これより $P_c = 100, 200 \text{ kPa}$ の供試体では $\dot{\theta} = 1.7 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ 付近で $M_{\max}$ が極小値となる傾向を示し、一般にその付近の $\dot{\theta}$ の値を試験に用いる妥当性がうかがわれる。しかし、 $P_c = 300 \text{ kPa}$ の $M_{\max} \sim \dot{\theta}$ 関係から、大きな土かぶり圧を受けている土要素については、室内ベーン試験での回転速度を速める必要があると思われる。



なお、このことはベーン試験に用いる供試体の形状にも関連すると考えられる。次にCaddlingの式($\alpha = 1/3$)を用い $\dot{\theta} = 2.6 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ の場合について、トルクをせん断応力(τ)に換算し、圧密圧力 P_c で正規化して回転角(θ)との関係で示したのが図-4である。これによると、圧密時の圧力 P_c が小さい供試体ほど $\tau_{\max} \sim \theta$ 曲線が急激な立ち上がりを示すとともに、せん断応力の最大値に到達するまでの回転角度($\theta_{\max}$)が低下する傾向を示している。さらに、図-5はこの $\theta_{\max}$ と回転角速度($\dot{\theta}$)との関係を見たものである。これより、 $\theta_{\max}$ は P_c のみならず $\dot{\theta}$ にも依存しているが、 $\dot{\theta} = 2.6 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ 付近では $\theta_{\max}$ におよぼす P_c の影響がかなり軽減されていることがわかる。一方、図-6はベーンせん断強度 C_u を $\log P_c$ および $\log \tau$ との関係で示したものであり、これより一般に正規圧密粘性土について言われている関係が、圧密時の応力の解放を受けた供試体についてもあてはまることがわかる。また、図-7は一軸圧縮強度 σ_c から求めた非排水強度 σ_{cu} と C_u との比較を示したもので、柴田⁴⁾が指摘しているように、 $C_u > \sigma_{cu}/2$ の関係が見られる。しかし、本実験ではベーン試験でトルクが最大値に達するまでの時間(1~2分)は、一軸試験での破壊までの時間の $1/5 \sim 1/10$ であることから、せん断時間を考慮すると両者の差はほとんどなくなるものと推測される。

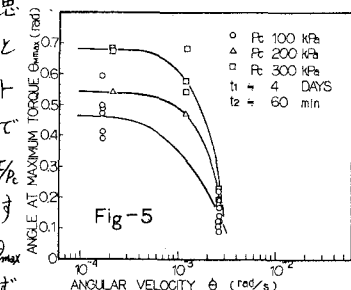


図-5は、この $\theta_{\max}$ と回転角速度($\dot{\theta}$)との関係を見たものである。これより、 $\theta_{\max}$ は P_c のみならず $\dot{\theta}$ にも依存しているが、 $\dot{\theta} = 2.6 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ 付近では $\theta_{\max}$ におよぼす P_c の影響がかなり軽減されていることがわかる。一方、図-6はベーンせん断強度 C_u を $\log P_c$ および $\log \tau$ との関係で示したものであり、これより一般に正規圧密粘性土について言われている関係が、圧密時の応力の解放を受けた供試体についてもあてはまることがわかる。また、図-7は一軸圧縮強度 σ_c から求めた非排水強度 σ_{cu} と C_u との比較を示したもので、柴田⁴⁾が指摘しているように、 $C_u > \sigma_{cu}/2$ の関係が見られる。しかし、本実験ではベーン試験でトルクが最大値に達するまでの時間(1~2分)は、一軸試験での破壊までの時間の $1/5 \sim 1/10$ であることから、せん断時間を考慮すると両者の差はほとんどなくなるものと推測される。

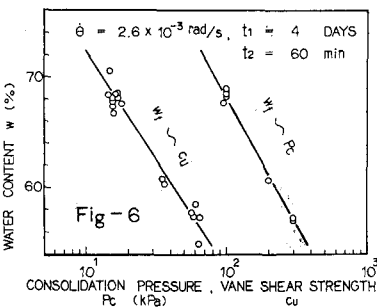


図-6は、この $\theta_{\max}$ と回転角速度($\dot{\theta}$)との関係を見たものである。これより、 $\theta_{\max}$ は P_c のみならず $\dot{\theta}$ にも依存しているが、 $\dot{\theta} = 2.6 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ 付近では $\theta_{\max}$ におよぼす P_c の影響がかなり軽減されていることがわかる。一方、図-6はベーンせん断強度 C_u を $\log P_c$ および $\log \tau$ との関係で示したものであり、これより一般に正規圧密粘性土について言われている関係が、圧密時の応力の解放を受けた供試体についてもあてはまることがわかる。また、図-7は一軸圧縮強度 σ_c から求めた非排水強度 σ_{cu} と C_u との比較を示したもので、柴田⁴⁾が指摘しているように、 $C_u > \sigma_{cu}/2$ の関係が見られる。しかし、本実験ではベーン試験でトルクが最大値に達するまでの時間(1~2分)は、一軸試験での破壊までの時間の $1/5 \sim 1/10$ であることから、せん断時間を考慮すると両者の差はほとんどなくなるものと推測される。

図-6は、この $\theta_{\max}$ と回転角速度($\dot{\theta}$)との関係を見たものである。これより、 $\theta_{\max}$ は P_c のみならず $\dot{\theta}$ にも依存しているが、 $\dot{\theta} = 2.6 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ 付近では $\theta_{\max}$ におよぼす P_c の影響がかなり軽減されていることがわかる。一方、図-6はベーンせん断強度 C_u を $\log P_c$ および $\log \tau$ との関係で示したものであり、これより一般に正規圧密粘性土について言われている関係が、圧密時の応力の解放を受けた供試体についてもあてはまることがわかる。また、図-7は一軸圧縮強度 σ_c から求めた非排水強度 σ_{cu} と C_u との比較を示したもので、柴田⁴⁾が指摘しているように、 $C_u > \sigma_{cu}/2$ の関係が見られる。しかし、本実験ではベーン試験でトルクが最大値に達するまでの時間(1~2分)は、一軸試験での破壊までの時間の $1/5 \sim 1/10$ であることから、せん断時間を考慮すると両者の差はほとんどなくなるものと推測される。

図-6は、この $\theta_{\max}$ と回転角速度($\dot{\theta}$)との関係を見たものである。これより、 $\theta_{\max}$ は P_c のみならず $\dot{\theta}$ にも依存しているが、 $\dot{\theta} = 2.6 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ 付近では $\theta_{\max}$ におよぼす P_c の影響がかなり軽減されていることがわかる。一方、図-6はベーンせん断強度 C_u を $\log P_c$ および $\log \tau$ との関係で示したものであり、これより一般に正規圧密粘性土について言われている関係が、圧密時の応力の解放を受けた供試体についてもあてはまることがわかる。また、図-7は一軸圧縮強度 σ_c から求めた非排水強度 σ_{cu} と C_u との比較を示したもので、柴田⁴⁾が指摘しているように、 $C_u > \sigma_{cu}/2$ の関係が見られる。しかし、本実験ではベーン試験でトルクが最大値に達するまでの時間(1~2分)は、一軸試験での破壊までの時間の $1/5 \sim 1/10$ であることから、せん断時間を考慮すると両者の差はほとんどなくなるものと推測される。

図-6は、この $\theta_{\max}$ と回転角速度($\dot{\theta}$)との関係を見たものである。これより、 $\theta_{\max}$ は P_c のみならず $\dot{\theta}$ にも依存しているが、 $\dot{\theta} = 2.6 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ 付近では $\theta_{\max}$ におよぼす P_c の影響がかなり軽減されていることがわかる。一方、図-6はベーンせん断強度 C_u を $\log P_c$ および $\log \tau$ との関係で示したものであり、これより一般に正規圧密粘性土について言われている関係が、圧密時の応力の解放を受けた供試体についてもあてはまることがわかる。また、図-7は一軸圧縮強度 σ_c から求めた非排水強度 σ_{cu} と C_u との比較を示したもので、柴田⁴⁾が指摘しているように、 $C_u > \sigma_{cu}/2$ の関係が見られる。しかし、本実験ではベーン試験でトルクが最大値に達するまでの時間(1~2分)は、一軸試験での破壊までの時間の $1/5 \sim 1/10$ であることから、せん断時間を考慮すると両者の差はほとんどなくなるものと推測される。

図-6は、この $\theta_{\max}$ と回転角速度($\dot{\theta}$)との関係を見たものである。これより、 $\theta_{\max}$ は P_c のみならず $\dot{\theta}$ にも依存しているが、 $\dot{\theta} = 2.6 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ 付近では $\theta_{\max}$ におよぼす P_c の影響がかなり軽減されていることがわかる。一方、図-6はベーンせん断強度 C_u を $\log P_c$ および $\log \tau$ との関係で示したものであり、これより一般に正規圧密粘性土について言われている関係が、圧密時の応力の解放を受けた供試体についてもあてはまることがわかる。また、図-7は一軸圧縮強度 σ_c から求めた非排水強度 σ_{cu} と C_u との比較を示したもので、柴田⁴⁾が指摘しているように、 $C_u > \sigma_{cu}/2$ の関係が見られる。しかし、本実験ではベーン試験でトルクが最大値に達するまでの時間(1~2分)は、一軸試験での破壊までの時間の $1/5 \sim 1/10$ であることから、せん断時間を考慮すると両者の差はほとんどなくなるものと推測される。

図-6は、この $\theta_{\max}$ と回転角速度($\dot{\theta}$)との関係を見たものである。これより、 $\theta_{\max}$ は P_c のみならず $\dot{\theta}$ にも依存しているが、 $\dot{\theta} = 2.6 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ 付近では $\theta_{\max}$ におよぼす P_c の影響がかなり軽減されていることがわかる。一方、図-6はベーンせん断強度 C_u を $\log P_c$ および $\log \tau$ との関係で示したものであり、これより一般に正規圧密粘性土について言われている関係が、圧密時の応力の解放を受けた供試体についてもあてはまることがわかる。また、図-7は一軸圧縮強度 σ_c から求めた非排水強度 σ_{cu} と C_u との比較を示したもので、柴田⁴⁾が指摘しているように、 $C_u > \sigma_{cu}/2$ の関係が見られる。しかし、本実験ではベーン試験でトルクが最大値に達するまでの時間(1~2分)は、一軸試験での破壊までの時間の $1/5 \sim 1/10$ であることから、せん断時間を考慮すると両者の差はほとんどなくなるものと推測される。

図-6は、この $\theta_{\max}$ と回転角速度($\dot{\theta}$)との関係を見たものである。これより、 $\theta_{\max}$ は P_c のみならず $\dot{\theta}$ にも依存しているが、 $\dot{\theta} = 2.6 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ 付近では $\theta_{\max}$ におよぼす P_c の影響がかなり軽減されていることがわかる。一方、図-6はベーンせん断強度 C_u を $\log P_c$ および $\log \tau$ との関係で示したものであり、これより一般に正規圧密粘性土について言われている関係が、圧密時の応力の解放を受けた供試体についてもあてはまることがわかる。また、図-7は一軸圧縮強度 σ_c から求めた非排水強度 σ_{cu} と C_u との比較を示したもので、柴田⁴⁾が指摘しているように、 $C_u > \sigma_{cu}/2$ の関係が見られる。しかし、本実験ではベーン試験でトルクが最大値に達するまでの時間(1~2分)は、一軸試験での破壊までの時間の $1/5 \sim 1/10$ であることから、せん断時間を考慮すると両者の差はほとんどなくなるものと推測される。

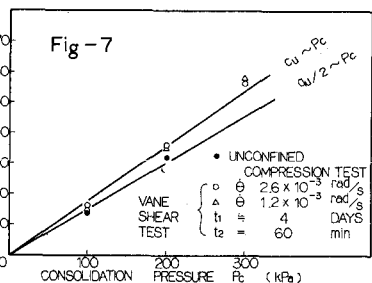
図-6は、この $\theta_{\max}$ と回転角速度($\dot{\theta}$)との関係を見たものである。これより、 $\theta_{\max}$ は P_c のみならず $\dot{\theta}$ にも依存しているが、 $\dot{\theta} = 2.6 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ 付近では $\theta_{\max}$ におよぼす P_c の影響がかなり軽減されていることがわかる。一方、図-6はベーンせん断強度 C_u を $\log P_c$ および $\log \tau$ との関係で示したものであり、これより一般に正規圧密粘性土について言われている関係が、圧密時の応力の解放を受けた供試体についてもあてはまることがわかる。また、図-7は一軸圧縮強度 σ_c から求めた非排水強度 σ_{cu} と C_u との比較を示したもので、柴田⁴⁾が指摘しているように、 $C_u > \sigma_{cu}/2$ の関係が見られる。しかし、本実験ではベーン試験でトルクが最大値に達するまでの時間(1~2分)は、一軸試験での破壊までの時間の $1/5 \sim 1/10$ であることから、せん断時間を考慮すると両者の差はほとんどなくなるものと推測される。

図-6は、この $\theta_{\max}$ と回転角速度($\dot{\theta}$)との関係を見たものである。これより、 $\theta_{\max}$ は P_c のみならず $\dot{\theta}$ にも依存しているが、 $\dot{\theta} = 2.6 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ 付近では $\theta_{\max}$ におよぼす P_c の影響がかなり軽減されていることがわかる。一方、図-6はベーンせん断強度 C_u を $\log P_c$ および $\log \tau$ との関係で示したものであり、これより一般に正規圧密粘性土について言われている関係が、圧密時の応力の解放を受けた供試体についてもあてはまることがわかる。また、図-7は一軸圧縮強度 σ_c から求めた非排水強度 σ_{cu} と C_u との比較を示したもので、柴田⁴⁾が指摘しているように、 $C_u > \sigma_{cu}/2$ の関係が見られる。しかし、本実験ではベーン試験でトルクが最大値に達するまでの時間(1~2分)は、一軸試験での破壊までの時間の $1/5 \sim 1/10$ であることから、せん断時間を考慮すると両者の差はほとんどなくなるものと推測される。

図-6は、この $\theta_{\max}$ と回転角速度($\dot{\theta}$)との関係を見たものである。これより、 $\theta_{\max}$ は P_c のみならず $\dot{\theta}$ にも依存しているが、 $\dot{\theta} = 2.6 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ 付近では $\theta_{\max}$ におよぼす P_c の影響がかなり軽減されていることがわかる。一方、図-6はベーンせん断強度 C_u を $\log P_c$ および $\log \tau$ との関係で示したものであり、これより一般に正規圧密粘性土について言われている関係が、圧密時の応力の解放を受けた供試体についてもあてはまることがわかる。また、図-7は一軸圧縮強度 σ_c から求めた非排水強度 σ_{cu} と C_u との比較を示したもので、柴田⁴⁾が指摘しているように、 $C_u > \sigma_{cu}/2$ の関係が見られる。しかし、本実験ではベーン試験でトルクが最大値に達するまでの時間(1~2分)は、一軸試験での破壊までの時間の $1/5 \sim 1/10$ であることから、せん断時間を考慮すると両者の差はほとんどなくなるものと推測される。

図-6は、この $\theta_{\max}$ と回転角速度($\dot{\theta}$)との関係を見たものである。これより、 $\theta_{\max}$ は P_c のみならず $\dot{\theta}$ にも依存しているが、 $\dot{\theta} = 2.6 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ 付近では $\theta_{\max}$ におよぼす P_c の影響がかなり軽減されていることがわかる。一方、図-6はベーンせん断強度 C_u を $\log P_c$ および $\log \tau$ との関係で示したものであり、これより一般に正規圧密粘性土について言われている関係が、圧密時の応力の解放を受けた供試体についてもあてはまることがわかる。また、図-7は一軸圧縮強度 σ_c から求めた非排水強度 σ_{cu} と C_u との比較を示したもので、柴田⁴⁾が指摘しているように、 $C_u > \sigma_{cu}/2$ の関係が見られる。しかし、本実験ではベーン試験でトルクが最大値に達するまでの時間(1~2分)は、一軸試験での破壊までの時間の $1/5 \sim 1/10$ であることから、せん断時間を考慮すると両者の差はほとんどなくなるものと推測される。

図-6は、この $\theta_{\max}$ と回転角速度($\dot{\theta}$)との関係を見たものである。これより、 $\theta_{\max}$ は P_c のみならず $\dot{\theta}$ にも依存しているが、 $\dot{\theta} = 2.6 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ 付近では $\theta_{\max}$ におよぼす P_c の影響がかなり軽減されていることがわかる。一方、図-6はベーンせん断強度 C_u を $\log P_c$ および $\log \tau$ との関係で示したものであり、これより一般に正規圧密粘性土について言われている関係が、圧密時の応力の解放を受けた供試体についてもあてはまることがわかる。また、図-7は一軸圧縮強度 σ_c から求めた非排水強度 σ_{cu} と C_u との比較を示したもので、柴田⁴⁾が指摘しているように、 $C_u > \sigma_{cu}/2$ の関係が見られる。しかし、本実験ではベーン試験でトルクが最大値に達するまでの時間(1~2分)は、一軸試験での破壊までの時間の $1/5 \sim 1/10$ であることから、せん断時間を考慮すると両者の差はほとんどなくなるものと推測される。



謝辞 本報告の実験およびデータ整理にあたり、本学卒業生関井、指宿両君に多大な協力を受けた。ここに記して深甚な謝意を表す。

参考文献 1) 柴田(1967): "粘土のベーンせん断強度に関する研究" 土木学会論文集138号, pp. 39~48. 2) 青木, 山口, 中津領, 木村(1980): "室内ベーン試験における強度特性について" 第15回土質工学会発表会講演集, pp. 425~428. 3), 4) 柴田他(1980): ベーン試験に関するシンポジウム発表論文集, pp. 1~30.