

粘土の応力緩和特性について

京都大学防災研究所 正員 村山朔郎
京都大学大学院 学生員 関口秀雄
竹中工務店 正員 上田貴夫

1. はじめに

地盤構成材料としての粘土は、高分子などとは異なり、圧密履歴を有していること、および、その粒状性に起因して、ダイラタンシーを発揮する摩擦材料であることが、大きな特徴であろう。従来までの粘土のレオロジー特性の解析は、線型粘弾性理論に立脚して行なわれることが多かったのであるが、しかし、一般に観測されるのは非線型挙動であるために、必ずしも満足すべき結果は得られていないようである。また、粘土の構成関係をよりよく理解するためにも、レオロジーとダイラタンシー・摩擦特性との相関性についての議論が必要になるように思われる。

そこで、筆者らは、粘土のレオロジー挙動の基本的様相を明瞭にするべく、従来まで、あまり行なわれていない応力緩和試験を各種の圧密履歴を有する粘土について行ない、その結果を有効応力の観点から解析することを試みたので以下に報告する。

2. 試料および試験方法

使用した試料は、約56%の含水比のもとで練返した後、 0.5 kg/cm^2 の圧力によって一次元圧密した藤森粘土であり、その物性はL.L.=43.6%、P.L.=26.1%、 2μ 以下=32%である。なお、Test No. 29 では、大阪沖積層から採取した練返し粘土を使用しており、その物性は、L.L.=75.6%、P.L.=31.9%、 2μ 以下=11.5%である。

試験装置は、N.G.I. 型三軸試験装置であり、変位測定にはダイヤルゲージ、間げき水圧測定には Dynisco 製の圧力変換器、軸力の検出にはロードセルをそれぞれ使用した。

応力緩和試験において、即時ひずみはレオメーターを使用し、手動式で所定のひずみを与えた。また、試料を飽和させるために、すべての試験について 1 kg/cm^2 のバックプレシャーズを3時間作用させた。試験中恒温室は 19°C に保たれていた。表-1に試験条件を示す。

	応力緩和 (非排水状態)		定速変形+応力緩和 (非排水状態)
試料	藤森粘土(C,D)		藤森粘土(E)
圧密履歴	N.C.	$\sigma_c = 2 \text{ kg/cm}^2$ (2days) $\sigma_c = 4 \text{ kg/cm}^2$ (2days)	$\sigma_c = 2 \text{ kg/cm}^2$ (2days)
	O.C.	$\sigma_c = 2 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow 1 \text{ kg/cm}^2$ $\sigma_c = 4 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow 1 \text{ kg/cm}^2$ $\sigma_c = 4 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow 0.5 \text{ kg/cm}^2$	

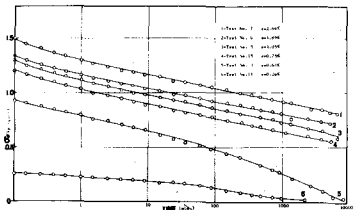


図-1 応力緩和曲線 ($\sigma_c = 2 \text{ kg/cm}^2$)

表-1 試験条件

3. 試験結果

3-1 応力緩和速度

図-1に正規圧密粘土の応力緩和曲線を示す。図中において、5 ($\varepsilon=0.61\%$)、6 ($\varepsilon=0.26\%$) のような定ひずみレベルが小さい場合を除いて、応力緩和曲線が平行直線群をなすという傾向が明らかに認められる。

図-2に正規圧密粘土 ($\sigma_c=4\text{kg/cm}^2$) の応力緩和曲線を示す。この場合、定ひずみは同一試料について段階的に与えたものであるが、有限変形領域においてやはり同様の傾向が観測される。

図-3は定速変形停止後の応力緩和曲線である。定速変形時の圧縮速度は、 $4 \times 10^{-3} \text{ cm/min}$ である。

$t > 1$ 以降では、やはり同様のことが成立している。

主応力差 (σ_d) $\sim \log t$ 関係が、有限変形のもとでは平行直線群を形成するというに着目して、筆者が行なった応力緩和試験のすべてについて整理したものが、図-4の関係である。図-5に森沢(1969)¹⁾の試験結果を再整理したものを示す。図-6は、梅原(1963)²⁾の試験結果を引用したものである。

これらの図より、練返し粘土を飽和状態で応力緩和させた場合、応力緩和速度にみられる非線型性が明瞭である。

また、有限変形のもとでの $\sigma_d \sim \log t$ の直線性より、応力緩和実験式は次式で表現される。

$$\sigma_d(t) = \sigma_d(t_1) - \beta \log(t/t_1) \quad (1)$$

ここに $\sigma_d(t)$ は時間 t における主応力差、 t_1 は基準時間、 β は応力緩和速度でひずみに依存しない一定値である。 ε_{zz} は軸方向偏差ひずみである。

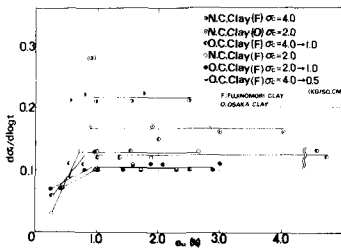


図-4 $\beta \sim \varepsilon_{zz}$ 関係
(藤森粘土)

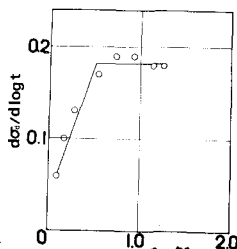


図-5 $\beta \sim \varepsilon_{zz}$ 関係
{大阪粘土, $\sigma_c=2\text{kg/cm}^2$
After Morisawa, 1969¹⁾}

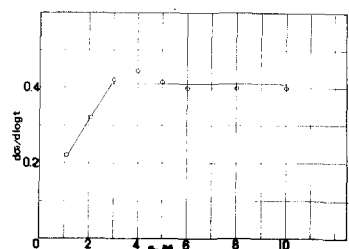


図-6 $\beta \sim \varepsilon_{zz}$ 関係
{尾崎粘土, $\sigma_c=5\text{kg/cm}^2$
After Ume-hara, 1963²⁾}

3-2 応力緩和における有効応力径路

図-7に正規圧密粘土 ($\sigma_c = 2 \text{ kg/cm}^2$) の応力緩和過程における $\sigma_d \sim \sigma_m'$ 関係を示す。

図中の破線は、次式³⁾によって計算した応力径路である。

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_m'} = \frac{C(1-n)}{D} \ln \frac{\sigma_{m0}}{\sigma_m'} \quad (2)$$

ここに、 $\frac{C(1-n)}{D} = 0.91$, $\sigma_{m0} = 2.00 \text{ kg/cm}^2$ の値を採用している。

図-8は、 2 kg/cm^2 で等方圧密した大阪粘土について得られた応力緩和過程における有効応力径路である。

図-9は、過圧密比8の過圧密粘土について得られた有効応力径路である。

図中の2本の破線は、上方のものが $t = 1 \text{ min.}$ 、下方のものが $t = 720 \text{ min.}$ における等時曲線であり、定速せん断によって得られる有効応力径路に対応するものと考えられよう。

図-10、図-11は、定速変形試験によって所定のひずみまでせん断した後に応力緩和試験に移行し、再び定速せん断によって破壊に至らしめた場合の有効応力径路である。

図-10における Test No. S-7は通常の定速せん断試験の結果であるが、Test No. S-6, S-9, S-10の結果より、応力緩和後の定速せん断過程における有効応力径路は、シャープな立ち上がり後、本来の有効応力径路に漸近し、破壊に至る傾向がうかがえる。

また、せん断に先立つ緩和期間(静止時間)が十分に長くなれば、図-12の2のようなパターンが観測される可能性があるように思われる。

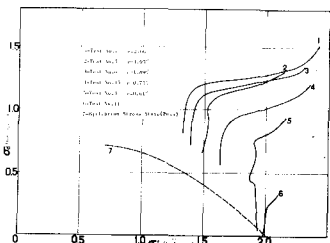


図-7 有効応力径路
(藤森粘土, $\sigma_c = 2 \text{ kg/cm}^2$)
N.B. 6: $\varepsilon = 0.26\%$

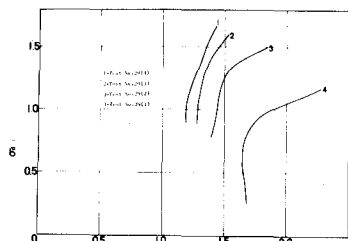


図-8 有効応力径路
(大阪粘土, $\sigma_c = 2 \text{ kg/cm}^2$)
1: $\varepsilon = 4.05\%$, 2: $\varepsilon = 3.01\%$
3: $\varepsilon = 1.92\%$, 4: $\varepsilon = 0.91\%$

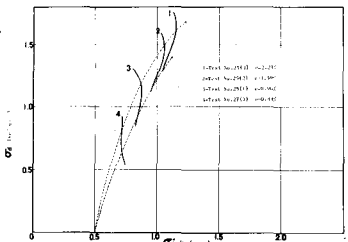


図-9 有効応力径路
($\sigma_c = 4 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow 0.5 \text{ kg/cm}^2$)

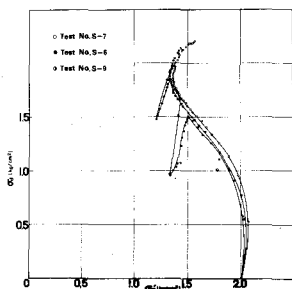


図-10 有効応力径路

S-6: $\varepsilon_I = 3.86\%$ (1079°)

S-9: $\varepsilon_I = 1.03\%$ (9188°)

$\sigma_c = 2 \text{ kg/cm}^2$

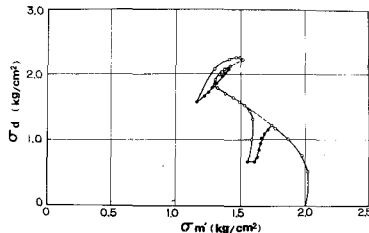


図-11 有効応力径路 (Test No. S-10)

$\varepsilon_I = 0.43\%$ (9935°)

$\varepsilon_{II} = 10.24\%$

$\sigma_c = 2 \text{ kg/cm}^2$

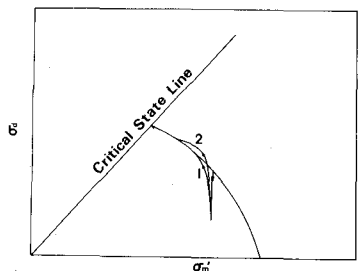


図-12 有効応力径路に及ぼす
静止履歴の影響(概念図)

4. 考察

4-1 応力緩和速度 β の一定性

図-4より、応力緩和速度 β は、与えられたせん断ひずみがある限界値よりも大きくなると、ふつうの応力緩和においても定速変形停止後の応力緩和においても一定になる傾向が認められる。そして、その値は同一組成の試料については圧密応力の増加とともに大きくなり、過圧密状態では過圧密比にも依存していると判断される。このことは、粘土が粘弾性的挙動を示すと同時に、有効拘束応力にも強く依存する摩擦材料であり、このような有限変形領域では図-13に示すように非線型性が著しくなることの反映であろう。

粘土鉱物学的組成の相違は、間接的には活性度によって表示できるが、図-4に示されている藤森粘土(活性度=0.55)と大阪粘土(活性度=3.80)の β の相違は活性の相違に帰せられるという解釈と妥当であろう。また、藤本⁵⁾は飽和度の増加とともに、緩和速度にみられる非線型性が著しくなる傾向を示す結果を示しているのは興味深い。

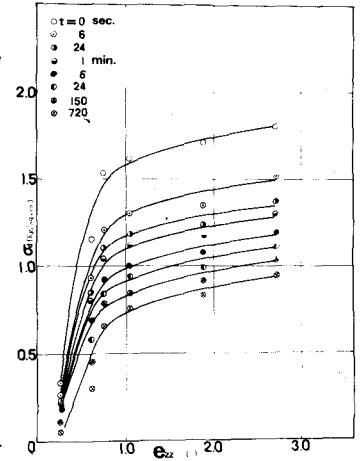


図-13 等時応力-ひずみ関係 ($\sigma_c = 2 \text{ kg/cm}^2$)

4-2 平衡応力状態の存在

一般に、粘土を等含水比に保って、時間依存性が生じないように非常にゆっくりせん断すれば、有効応力面上で平衡状態に対応する限界線が得られるであろう。SANGREY et al.⁶⁾は、各種の圧密履歴を有する飽和粘土についての繰返しせん断試験より、このような限界線の存在を確認しているが、図-7,8の応力緩和過程中的有効応力経路の傾向、あるいは図-9における等時曲線のパターンより、応力緩和現象は、ある平衡状態線に向かって進行し、最終的にはそこでとまるといふ仮説を得ることができる。すなわち、次式のような表現が可能であろう。

$$\sigma(t) = \sigma^{eq} + \sigma^{relax}(t), \quad (3)$$

ここに、 σ^{eq} は時間には陽に依存しない平衡応力関数であり、 σ^{relax} はレオロジ-的考察によって決定されるべき緩和応力であり、変形履歴の汎関数と考えられる。

参考文献

- 1) 森沢雅臣(1969): 粘土の「応力-変形」挙動に関する研究, 京都大学大学院修士論文 第411号.
- 2) 梅原靖文(1963): 粘土の圧縮性に関する研究, 京都大学大学院修士論文 第163号.
- 3) 島 昭治郎・太田秀樹(1968): 粘土の非排水せん断に伴うスルパスの変化特性に関する考察, 土学会第23回年次学術講演会概要集Ⅱ, pp.87-90.
- 4) 三笠正・村哲生(1970): 粘性土の圧密時間とせん断強さについて, 土学会第25回年次学術講演会概要集 第3部, pp.159-162.
- 5) 藤本 広(1965): 締め固めた不飽和粘土の一軸圧縮条件下の応力緩和に関する実験的考察, 土学会論文集, 第119号, pp.19-27.
- 6) D.A. SANGREY, D.J. HENNEL and M.I. ESRIG (1969): The Effective Stress Response of a Saturated Clay Soil to Repeated Loading, Canadian Geotech. Journal, 6, pp.241-252.