

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

1. はじめに

軟弱粘土の深い堆積地に盛土が構築される場合、盛土荷重によって地盤内に塑性流動現象が発生しているかどうかを現位置観測データから判断する必要にせまられるケースがあるが、現在までのところ、この問題に対する明快な指針は確立されていないようである。

この報告では飽和粘土についての従来までのフリープ試験結果を有効応力の観点から再検討することによって流動包絡線という概念を新たに提案し、これによって上述の問題へのアプローチを試みる。

2. 流動包絡線の存在

粘土の構造骨格は砂と同じく鉱物粒子の不規則な三次元的集合体であるから、粘土のレオロジー的特性にも何らかの形で摩擦則が関与するように思われる。

Šulje (1967) は図-1 に示すような有効応力によって粘土のフリープ挙動の分類を考えているが、この説明は定性的ではあるが粘土の本質をついているように思われる。このとき、粘土のフリープ挙動を特性づける支配的因子はモビライズされる内部摩擦角 ϕ (有効応力比) である。

また、Saito and Uejawa (1961) による土の定常フリープ速度に着目した斜面崩壊時期の予知に関する研究およびその後の発展を参照すれば、対数ひずみ速度 $d\epsilon_a/d\log t$ もまた粘土のフリープ挙動を特性づける重要な因子であることが理解されよう。

かくして、粘土のフリープ挙動のよりよい理解のためには有効応力比と対数ひずみ速度に着目するのがよいとの考えが得られる。

図-2 に示さない大阪梅田粘土についての非排水三軸圧縮フリープ試験から求められた流動径路を示す。ここに、 $\sigma_a/\sigma_m' - d\epsilon_a/d\log t$ 座標系における1つの試験に随伴する1つの軌跡を流動径路 (flow path) と名づけるものとする。流動という術語は粘土の変形の非可逆性を強調するため使用されている。図中の破線は、村山・栗原・関口 (1970) によって二次圧縮に相当する線としてその存在を仮定されたものであるが、これは次式によって表示される (Seiiguchi, 1972)。

$$\log_{10}(d\epsilon_a/d\log_{10} t) = 1.46 \sigma_a/\sigma_m' - 3.28 \quad (1)$$

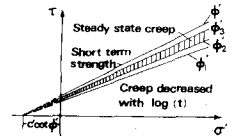


図-1 粘土のフリープ挙動の特性化
After Šulje (1967)

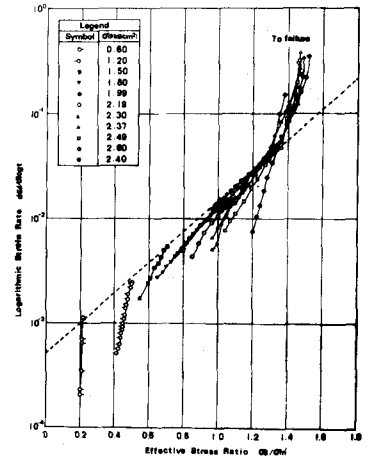


図-2 示さない大阪梅田粘土における流動径路 ($\sigma_c = 3.18 \text{ kg/cm}^2$)
After Seiiguchi (1972)

ここに、 $\epsilon_d (= \epsilon_1 - \frac{1}{3}\epsilon_v)$ は偏差ひずみ、 $\sigma_d (= \sigma_1 - \sigma_3')$ は主応力差、 $\sigma_m (= \frac{2}{3}\sigma_1 + \frac{1}{3}\sigma_3')$ は平均有効主応力である。

図-3に5種類の正規圧密粘土について行なわれたフリー・ブ試験結果を再整理し、求められた流動径路を示す。図中の破線は(1)式で与えられるものである。これらの粘土の物性、試験条件を表-1、表-2に示す。図-3から、粘土の種類・圧密応力・繰返しあるいは乱さな試験料であるかによらず大99数のプロットがせまい帯状領域に集中していることが認められる。Fujinomori Clayでは、破壊に至らないような負荷のもとで流動径路がこの帯へ下方から到達しようとする傾向がみられる。

したがって、正規圧密粘土の流動径路の包絡線、すなわち流動包絡線 (flow envelope) として次式の表現が可能となる。

$$\log_{10}(d\epsilon_d/d\log_{10}t) = 1.46 \sigma_d/\sigma_m - 3.04 \pm 0.24 \tag{2}$$

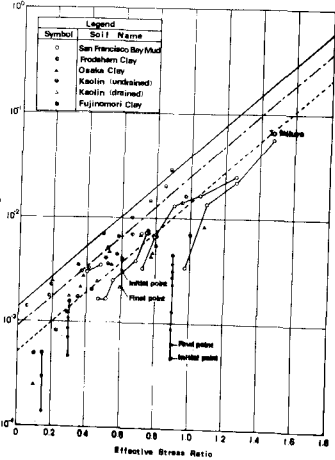


図-3 正規圧密粘土の流動特性
After Sekiguchi (1972)

図-3中の一点鎖線は流動包絡線の平均値を、実線の直線はその上限を表わしている。(1)式は、ちょうど流動包絡線の下限を表わすことになる。なお、Frodsham Clay では体積ひずみ ϵ_v に関するデータが欠如していたので、 $d\epsilon_1/d\log_{10}t$ の値をそのまま採用していることを付記する。

図-4に、San Francisco Bay Mud の図-3に採用されている以外のデータから求められた流動径路と流動包絡線を示す。流動包絡線としての役割がよく図にでている。

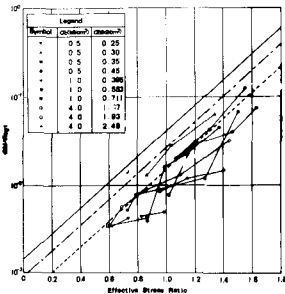


図-4 San Francisco Bay Mud の
流動特性

Table 1 Index Properties of a Wide Range of Clays.

Soil Name	Stress History	L.L.(%)	P.L.(%)	Clay Content(%)
Fujinomori Clay	remolded	43.6	26.1	32
San Francisco Bay Mud	undisturbed	93	45	75
Frodsham Clay	remolded	45	21	-
Osaka Clay	remolded	63.5	27.4	30
Kaolin	remolded	80	-	-
Osaka Umeda Clay	undisturbed	69.2	32.5	30
Osaka Alluvial Clay	remolded	54.1	31.1	68

Table 2 Test Conditions of a Wide Range of Clays.

Soil Name	Test Type	$\sigma_d(\text{kg/cm}^2)$	T(°C)	Source of Data
Fujinomori Clay	drained	1, 2	19.5 ± 0.5	Sekiguchi, 1972
San Francisco Bay Mud	undrained	2	22.8 ± 0.3	Arulanandan, Shen and Young, 1971
Frodsham Clay	drained	0.7, 2.8, 5.6	21.1 ± 1.1	Barden, 1969
Osaka Clay	drained	2	20	Karube, 1968
Kaolin	undrained	4.2, 7	25 ± 0.5	Walker, 1969
Osaka Umeda Clay	undrained	3	20	Murayama, Kurihara and Sekiguchi, 1970
Osaka Alluvial Clay	undrained	3	20, 35, 50	Kurihara, 1971

つぎに、流動包絡線の温度依存性を簡潔に考察する。

栗原(1971)は粘土のフリー・ブ破壊の温度依存性を速度理論にもとづいて解析しているが、図-5に繰返し大阪沖積粘土について栗原によって行われた非排水三軸試験結果を再整理したものを示す。T=20℃およびT=35℃におけるフリー・ブ試験の流動径路の折点(定常フリー・ブ開始点に対応する)が、(2)式によって表示される流動包絡線上に存在していることが認められる。一方、T=50℃ではいくらか流動径路の折点が流動包絡線より上方へはずれている。

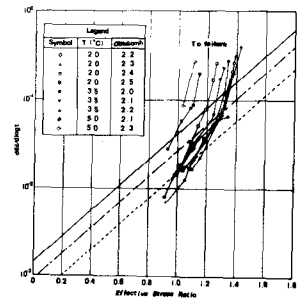


図-5 流動包絡線の温度依存性 After Sekiguchi (1973)

このように高温ではあいまいさがみられるが、通常の温度範囲20～35℃では流動包絡線は温度に依存しないと考えてもよいようである。

定常フリー・ブ開始点と流動包絡線との間には密接な関係があるが、以下では定速変形試験における流動径路とフリー・ブ試験より得られる流動径路を比較、考察する。図-6に正規圧密された藤森粘土についての結果を示す。Test No. S-6, S-7におけるせん断速度は、 $d\epsilon_a/dt = 5.13 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$ である。定速変形試験における対数ひずみ速度は次式で計算される。

$$d\epsilon_a/d\log_{10} t \approx 2.3 \epsilon \cdot d\epsilon_a/dt = 2.3 \epsilon d \quad (3)$$

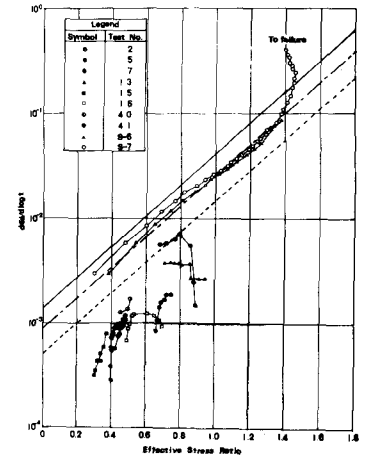


図-6 藤森粘土の流動特性($\sigma'_1/\sigma'_3 = 2.2$) After Sekiguchi (1972)

図-6で興味あるのは、S-6、S-7における流動径路が流動包絡線に沿って移行し、有効応力比が限界値 $(\sigma_a/\sigma'_m)_c = 1.35$ 以上になると急速に対数ひずみ速度が増加し破壊に至っていることである(S-7)。

図-7にO.C.R.=2の藤森粘土の非排水試験結果を示す。Test No. 23では $d\epsilon_a/dt = 2.9 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ 、No. 24では $d\epsilon_a/dt = 4.4 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$ である。この2試験において、やはり $\sigma_a/\sigma'_m = 1.35$ 付近から急速に流動径路が上方へ折れ曲がっている。この場合、せん断速度の差はほとんど影響がないようである。また、この $\sigma_a/\sigma'_m = 1.35$ の直線は破壊に至らないフリー・ブと破壊に至るフリー・ブとのちょうど境界線となっており、流動径路の折点がいわゆる上限降伏値に相当していることがわかる。

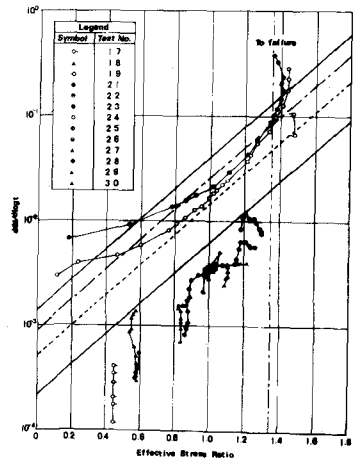


図-7 過圧密された藤森粘土の流動特性 (O.C.R. = 2)

After Sekiguchi (1972)

また、フリー・ブ試験から得られた流動径路に随伴する包絡線は正規圧密粘土に対するものより下方に存在し、次式によって表示される。

$$\log_{10} (d\epsilon_a/d\log_{10} t) = 1.46 \sigma_a/\sigma'_m - 3.66 \quad (4)$$

これより、控えめな過圧密によってそれぞれ引続く流動過程に

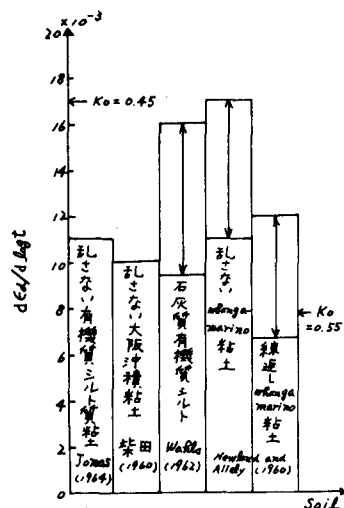
おける流動の発達を抑えるのバ効果があることがわかる。

3. 流動包絡線と K_0 状態との相関

流動包絡線と K_0 状態との対応を調べるために、各種の粘土における二次圧縮速度を図-8に示す。ここに K_0 は静止土圧係数である。

$K_0=0.45$ と $K_0=0.55$ に対応する $d\epsilon_0/d\log t$ を流動包絡線の平均値によって求めるとそれぞれ 1.70×10^2 、 7.76×10^3 となり既往の実測データとよく対応しているようである。しかし、土の種類が少ないので、今後さらバデータを集積し検討する必要があるう。

図-8に示した土の物性を表すに示す。



4. 要約

前節までの議論を要約すれば、図-9に示すような模式的表現が図-8 種々の土の二次圧縮速度可能であらう。

直線(1)は正規圧密粘土に対する流動包絡線であり、粘土の種類、圧密応力、温度によらず(2)式で表現される。直線(2)は流動限界線 $\sigma_0/\sigma'_m = (\sigma_0/\sigma'_m)_c$ を表わし、直線(3)と同じく流動限界線 $d\epsilon_0/d\log t = (d\epsilon_0/d\log t)_c$ を表わすが、この2直線の交点が定常フリープ開始点に対応する。直線(4)は、その粘土が発揮しうる最大有効応力比であり、これより右方へ流動径路は移行しない。点(6)は K_0 状態に対応するものである。破線(7)は過圧密比2の藤森粘土に対する流動包絡線である。径路(8)は、最終的にはフリープ破壊に至る正規圧密粘土の流動径路である。径路(9)は、破壊に至らないフリープにおける流動径路であり流動包絡線の下から流動包絡線に到達しようとする傾向を有している。

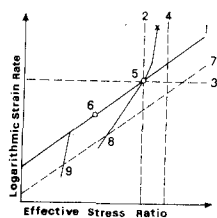


図-9 粘土の流動特性の模式的表現

Table 3 Index Properties of Four Kinds of Soils

Soil Name	Stress History	L.L.(%)	P.L.(%)	e_0	Source of Data
Organic Silty Clay	undisturbed	113	80	3.00	Jonas, 1964
Osaka Alluvial Clay	undisturbed	100	31	1.78	Shibata, 1960
Chicago Calcareous Organic Silt	undisturbed	132-138	75	1.2-3.2	Wahls, 1962
Whangamarino Clay	remolded	—	—	(e_{100})	
	undisturbed	—	—	5.63	Newland and Allely, 1960
	remolded	—	—	4	

最後に、流動包絡線の存在について貴重な指唆を頂いた京都大学防災研究所教授柴田徹博士、ならびに図面作成に御協力頂いた鳥井原誠氏にたいし心より感謝の意を表する次第である。

参考文献

- Arulanandam, K., Shen, C.K. and Young, R.B. (1971), *Geotech.* Vol. 21, No. 4 pp. 159
 Barden, L. (1969), *Proc. ASCE*, Vol. 95, No. SM1 pp. 1
 Jonas, E. (1964), *Proc. ASCE*, Vol. 90, No. SM5 pp. 363
 軽部大蔵 (1968), 京都大学防災研究所年報 第11号 B pp. 523
 栗原則夫 (1971), 京都大学防災研究所年報 第14号 B pp. 565
 Newland, P.L. and Allely, B.H. (1960), *Geotech.* Vol. 10, No. 2 pp. 62
 村山綱郎・栗原則夫・関口秀雄 (1970), 京都大学防災研究所年報 第13号 B, pp. 525
 Saito, M. and Uesawa, H. (1961), *Proc. 5th Int. Conf. SMFE*, Vol. 1 pp. 315
 Sekiguchi, H. (1972), 土質工学会論文報告集投稿中
 柴田 徹 (1960), 土学会論文集 第69号, pp. 29
 Su. Rlje, L. (1967), *Proc. Geotechnical Conf.*, Oslo, Vol. 1, pp. 153
 Wahls, H.E. (1962), *Proc. ASCE*, Vol. 88, No. SM6, pp. 207
 Walrer, L.K. (1969), *Proc. ASCE*, Vol. 95, No. SM1, pp. 167