

III-24 不飽和土の有効応力について(3)

(株) ソイルコンサルタンツ○正員 岩崎哲雄
 復建調査設計株式会社 正員 小田秀樹
 神戸大学工学部 正員 輕部大蔵

1. まえがき 不飽和土の有効応力式がBishopにより提案されて以来、その係数 λ の決定法が不明確なことで、粒子間力として働くサクションが問題となつて、現在、不飽和土の力学的性質の研究は全体的にゆきまりの状態にあるように思われる。そのため、本研究はもう一度原点に立ちもどつて考える意味から、Colemanの不飽和土に対する応力へひすみ式に注目して実験を行ない、その結果からBishopの有効応力式における係数 λ を再評価し、不飽和土に対する有効応力を考えて行くものである。

2. Bishopの λ の再評価 Bishop(1960)は不飽和土の有効応力式として式(1)を提案した。

$$\sigma' = \sigma - U_a + \lambda(U_a - U_w) \quad \text{----- (1)} \quad \text{ここで、}\sigma': \text{有効応力、}\sigma: \text{全応力、}U_a: \text{間けき空気圧}$$

$U_w: \text{間けき水圧、}\lambda: \text{飽和度、土のタイプ、応力経路などに関する係数}$

Coleman(1962)は、軸対称応力状態の式として、 $(d\sigma_m - dU_a)$ 、 $(dU_a - dU_w)$ 、 $(d\sigma_1 - d\sigma_3)$ を独立変数とし、式(2)を提案した。

$$\begin{aligned} -dV_w/V &= C_{11}(dU_a - dU_w) + C_{12}(d\sigma_m - dU_a) + C_{13}(d\sigma_1 - d\sigma_3) \\ -dV/V &= C_{21}(dU_a - dU_w) + C_{22}(d\sigma_m - dU_a) + C_{23}(d\sigma_1 - d\sigma_3) \quad \text{----- (2)} \\ -dE_1 - dE_3 &= C_{31}(dU_a - dU_w) + C_{32}(d\sigma_m - dU_a) + C_{33}(d\sigma_1 - d\sigma_3) \end{aligned}$$

ここで、 V :土要素のその時点での体積、 V_w :土に含まれる水の体積、 E_1 :軸方向自然ひすみ、 E_3 :横方向自然ひすみ、 σ_m :平均主応力、 σ_1 :最大主応力、 σ_3 :最小主応力、 U_w :間けき水圧、 U_a :間けき空気圧、 $C_{ij}(i=1, 2, 3, j=1, 2, 3)$:土の応力履歴とその時点での応力に関する係数

これを変形すると、次式を得る。

$$\begin{aligned} -dV_w/V &= C_{12}\{d\sigma_m - dU_a\} + (C_{11}/C_{12})(dU_a - dU_w) + C_{13}(d\sigma_1 - d\sigma_3) \\ -dV/V &= C_{22}\{d\sigma_m - dU_a\} + (C_{21}/C_{22})(dU_a - dU_w) + C_{23}(d\sigma_1 - d\sigma_3) \quad \text{----- (3)} \\ -dE_1 - dE_3 &= C_{32}\{d\sigma_m - dU_a\} - (C_{31}/C_{32})(dU_a - dU_w) - C_{33}(d\sigma_1 - d\sigma_3) \end{aligned}$$

式(3)の{}内は、式(1)の右辺と同じ形をしていることから、もし各係数の間に次式が成立すれば、これを λ と置くことができる。

$$(C_{11}/C_{12}) = (C_{21}/C_{22}) = (C_{31}/C_{32}) \quad \text{----- (4)}$$

すなわち、実験に基づいて式(2)の係数式が求められ、その結果として式(4)が成立していることがわかれば、Bishopの式(1)へと発展していく。以下に、実験結果からのBishopの有効応力式の成立を判断していく。

3. 実験方法 試料は、表-1に示す物性の信楽陶土を用いた。自然乾燥状態の粉末陶土を最適含水比の乾燥側で、一定含水比($w = 21.5 \pm 0.5\%$)に調整したものを、四つ割リモールドと突き棒で、一定圧力(約 3 kg/cm^2)で締め固めて、高さ8cm、直径3.5cmの円柱供試体に成形して用いた。締め固め曲線を図-1に示す。

実験装置は図-2に略図で示される不飽和土用に改良された二重セル型の三軸試験機である。(既報)

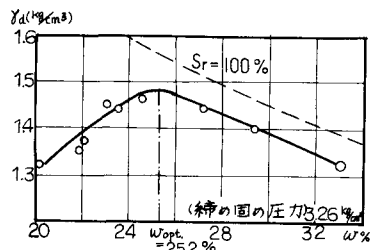


図-1 締め固め曲線

表-1 試料の物性

Gs	コンシステンシー(%)				W _{opt}	粒度組成(%)		
	WL	WP	Ip			0.75mm以下	75μm以下	20μm以下
2.56	46.75	23.24	23.51	25.20	10.0	46.0	44.0	

各供試体の試験条件は、表-2の 表-2 実験の種類

とおりであり、Colemanの式(2)の係数式が求められるように3つの応力増分($d\sigma_m - dU_a$), ($dU_a - dU_w$), ($d\sigma_1 - d\sigma_3$)のうちの1つの応力増分のみを変化させ、他の2つの応力を一定に保って実験を行なった。すなわち、 $(\sigma_m - U_a)$ と $(\sigma_1 - \sigma_3)$ を一定に保ち($U_a - U_w$)を変化させることにより、式-2より

	SUCTION	$(\sigma_m - U_a)$ と $(\sigma_1 - \sigma_3)$ の条件
A	0.6	$(\sigma_m - U_a) = 3.0 \text{ kg/cm}^2$ で破壊まで
B	1.2	$(\sigma_m - U_a) = 3.0 \text{ kg/cm}^2$ で破壊まで
C	1.8	$(\sigma_m - U_a) = 3.0 \text{ kg/cm}^2$ で破壊まで
D	0.6	$(\sigma_1 - \sigma_3) = 1.8 \text{ kg/cm}^2$ で $(\sigma_m - U_a)$ を減少
E	1.2	$(\sigma_1 - \sigma_3) = 1.8 \text{ kg/cm}^2$ で $(\sigma_m - U_a)$ を減少
F	0.6	$(\sigma_1 - \sigma_3) = 0 \text{ kg/cm}^2$ で $(\sigma_m - U_a)$ を減少
G	1.2	$(\sigma_1 - \sigma_3) = 0 \text{ kg/cm}^2$ で $(\sigma_m - U_a)$ を減少
H	1.8	$(\sigma_1 - \sigma_3) = 0 \text{ kg/cm}^2$ で $(\sigma_m - U_a)$ を減少
I	変化	$(\sigma_m - U_a) = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ で $(U_a - U_w)$ を変化
J	0.6	$(\sigma_1 - \sigma_3) = 2.7 \text{ kg/cm}^2$ で $(\sigma_m - U_a)$ を減少
K	1.2	$(\sigma_1 - \sigma_3) = 2.7 \text{ kg/cm}^2$ で $(\sigma_m - U_a)$ を減少
L	変化	$(\sigma_m - U_a) = 1.5 \text{ kg/cm}^2$ で $(U_a - U_w)$ を変化
M	1.8	$(\sigma_1 - \sigma_3) = 2.7 \text{ kg/cm}^2$ で $(\sigma_m - U_a)$ を減少

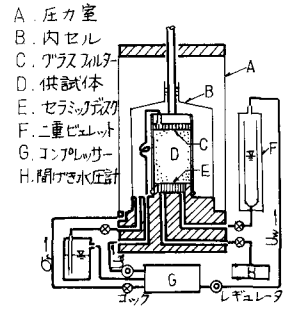


図-2. 実験装置

$C_{11} = -(dV_w/V)/d(U_a - U_w)$, $C_{21} = -(dV/V)/d(U_a - U_w)$, $C_{31} = -(d\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/d(U_a - U_w)$ を得る。同様にして、他の C_{ij} ($i=1,2,3 \quad j=1,2,3$) を求めることができる。

4. 重ね合わせの検証。Colemanの式は、3つの応力増分に対するひずみに、重ね合わせが可能なることを前提としている。そこで、等方応力状態での重ね合わせの検証を行なう。応力増分 $d(\sigma_m - U_a)$ と $d(U_a - U_w)$ に対する開き水の変化を図-3に、同じく体積変化を図-4に示す。図中の黒く塗りつぶしたものが、 $(\sigma_m - U_a) = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ でサクションを変化させたものである。

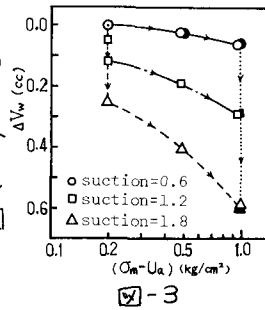


図-3

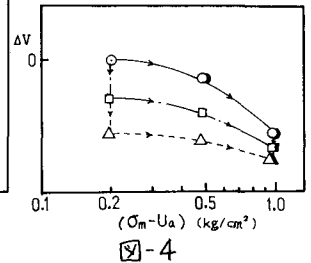


図-4

明らかに応力経路によらず、ひずみの変化量が等しいことがわかる。すなわち、等方応力状態においては、重ね合わせができることがわかる。せん断応力を含んだ場合の実験結果がないため、式(2)の全体の判断は下せないが、式の性格上、重ね合わせを認めることにする。

5. λの適用性。応力係数 C_{ij} もまた応力の関数であることから、他の土質係数のように絶対的な値は持たない。そこで、ある応力(ここではサクション)に対してそれぞれの値を求め、式(4)の成立を判断していく。図-5、図-6に等方応力状態の結果を、図-7にせん断状態の結果を示す。図より、体積変化とせん断ひずみの係数比がほぼ等しく、前回(第11回土質工学会)で述べたように、不飽和土を取り扱う上で、マクロな構造とミクロな構造を別々に考えることの必要性を示している。また、3つの係数比がほぼ等しい範囲が存在する。この範囲は、破壊に近い状態を、これまで、破壊に注目してせん断強度を求め、λの成立を主張した従来の研究が、この範囲で論じられていたとすれば、紙得のいくもので、Bishopの有効応力式が、この範囲においてのみ成立すると判断できるであろう。

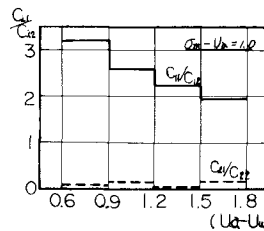


図-5

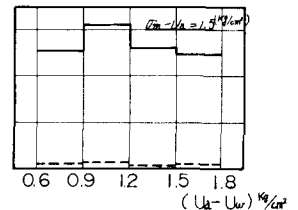


図-6

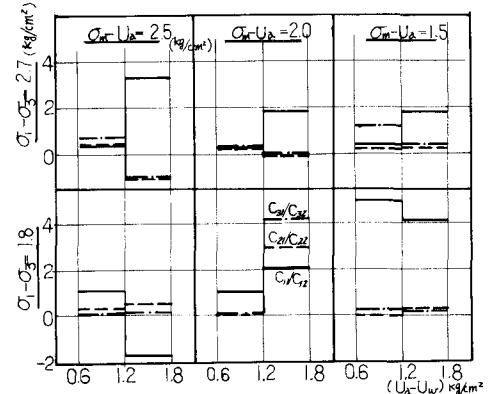


図-7

(参考文献) Coleman, J. D. (1962) "Stress/Strain Relations for Partly Saturated Soil" Correspondence to Géotechnique, Vol.12,

輕部ら(1978) "不飽和土の力学的性質に関する基礎的研究" 土木学会論文報告集第269号