

不飽和砂質土のサクションに等価な有効拘束圧の簡便評価法(第一報)

徳島大学 工学部 正 山上 拓男
 徳島大学 工学部 正 植田 康宏
 都島第二工業高校 正 田内 裕人
 徳島大学 大学院 学 ○土田 章仁

1. まえがき : 河川堤防やフルタイプダムに典型例のみられる浸透水と土の相互作用場に対して 流水と応力・変形を同時に考慮した連成ないし非連成解析で対処せんとする研究が試みられている。その場合、自由水面より上方の不飽和域のサクションが土の力学特性に及ぼす影響はほとんど考慮されていないのが現状であろう。サクションの影響を無視する根拠としてたとえば“サクション(負圧)がいかなるメカニズムで土のせん断強さに関与しているのか現時点で十分明らかにされていないこと”あるいは“サクションが土のせん断強さを増大させることはあっても決して低下せしめることはないので、これを無視することは安全側の設計につながること”などが指摘されている。たしかにこの記述には一面真理をついている部分も無しとはしないが大変消極的な態度であることは否めない。本研究の終局目標は近似的にせよサクションの及ぼす効果を積極的に取り込んだ浸透下の応力-変形解析法を構築せんとするところにある。その第一歩として、ここでは砂質土よりなる浸透下の斜面の非線形弾性解析への導入を前提とした、サクションに等価な有効拘束圧の近似的評価法を提案している。

2. 基本概念 : はじめに筆者らが提案する通常の三軸圧縮試験に基づいたサクションに等価な有効拘束圧評価法の基本概念を述べておきたい : いま、初期間隙比を同一にした供試体を(a)飽和度 $S_r=100\%$, (b)比較的大きな飽和度 $S_{r,\alpha}$, (c)(b)に比べ飽和度の小さな状態 $S_{r,\beta}$ に調整し、これら三種の供試体と同じ側圧 σ'_3 のもとで、いずれも長時間かけて排水排気試験を行えばその結果の主応力差-軸ひずみ曲線の模式図は、たとえば図-1となる。これとは別に、種々の拘束圧を用いて完全飽和完全排水試験を行った結果の主応力差-軸ひずみ曲線を図-2のように求めておく。ここで、かなり大胆ではあるが、次のような三つの仮説を設ける。(i)飽和・不飽和状態にかかわらず、土粒子骨格の強度・変形特性は、有効応力の立場、つまり完全飽和時の排水試験で一義的に定まる ; (ii)不飽和状態のサクションの強さは、それと等価な有効拘束圧で表すことができる ; (iii)サクションに等価な有効拘束圧はせん断のすべての過程で変化しない。

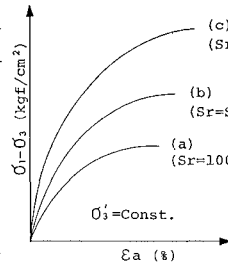


図-1 $\sigma'_3 = \text{一定}$ の排水排気試験

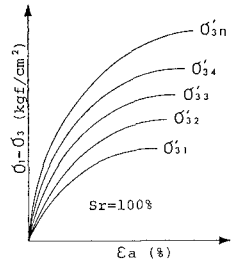


図-2 完全飽和完全排水試験

ば図-1となる。これとは別に、種々の拘束圧を用いて完全飽和完全排水試験を行った結果の主応力差-軸ひずみ曲線を図-2のように求めておく。ここで、かなり大胆ではあるが、次のような三つの仮説を設ける。(i)飽和・不飽和状態にかかわらず、土粒子骨格の強度・変形特性は、有効応力の立場、つまり完全飽和時の排水試験で一義的に定まる ; (ii)不飽和状態のサクションの強さは、それと等価な有効拘束圧で表すことができる ; (iii)サクションに等価な有効拘束圧はせん断のすべての過程で変化しない。

以上の仮説にしたがえば、図-1, 図-2に基づいて、ある与えられた飽和度を有する不飽和土のサクションに等価な有効拘束圧が評価可能となる。いま図-1で、たとえば飽和度 $S_{r,\beta}$ の曲線(b)に注目し、この曲線に最もよく fit する曲線を図-2の曲線群の中から選み出す。そして、この選み出された曲線に対応する拘束圧を $\sigma'_{3,i}$ とすれば、これら兩曲線を与える拘束圧の差、すなわち $\Delta\sigma'_{3,\beta} = \sigma'_{3,i} - \sigma'_3 \dots (1)$ が、このときの飽和度 $S_{r,\beta}$ における上述した意味でのサクションに等価な有効拘束圧となる。

3. サクションに等価な有効拘束圧の評価 : 図-1中の任意の飽和度に応じた主応力差-軸ひずみ曲線に最もよく fit する曲線を図-2から選み出す過程において、任意の拘束圧に応じた主応力差-軸ひずみ曲線の形状が一般表示されていなければならない。幸いなことに、三軸圧縮試験で得られる主応力差-軸ひずみ曲線は比較的高い精度で双曲線表示が可能¹⁾なことが知られている。この知見を応用すれば、数種の拘束圧で得られた曲線から、任意の拘束圧に応じた主応力差-軸ひずみ曲線を推定することができ、結局サクションの定量的評価が可能

となる。いま主応力差-軸ひずみ曲線が次式で与えられるような双曲線と近似できるものとする。

$$\sigma_1 - \sigma_3 = E_a / (a + b \cdot E_a) \quad (2) \quad \text{ここに、} a, b \text{ は双曲線を決定すべき定数である。式(2)を変形して次式を得る。}$$

$$E_a / (\sigma_1 - \sigma_3) = a + b \cdot E_a \quad (3) \quad \text{式(3)は変換座標面上で直線関係にある。すなわち}$$

縦軸切片が a を、直線の勾配が b を与える。また定数 a は、初期接線弾性係数 E_i と逆数の関係にあることより

$$a = 1/E_i = 1/[K \cdot P_a (\sigma_3/P_a)^n] \quad (4) \quad \text{と表され、定数} b \text{ は次式で表される。}$$

$$b = [(1 - \sin \phi) R_f] / (2C \cdot \cos \phi + 2\sigma_3 \cdot \sin \phi) \quad (5) \quad \text{ここに} K, n \text{ は実験定数、} P_a \text{ は応力と同じ}$$

単位系で表された大気圧 (1.033 kgf/cm^2)、 C, ϕ はモール・クーロンの強度パラメータ、 R_f は破壊比である。こ

こで、サクシオンに等価な有効拘束圧の決定原理を目下の双曲線表示に関してい換へれば、飽和供試体から定まる定数 a, b と不飽和供試体から定まる a, b が、それぞれ最も近い値となるときの拘束圧の差を求めればよ

いということになる。そこで、ある側圧 $\sigma_3 = \sigma_{3, \text{unsat}}$ の不飽和供試体に注目してサクシオンに等価な有効拘束圧を求めことにする。まず、不飽和供試体の C, ϕ と K, n を用いて式(4)と式(5)に、 $\sigma_3 = \sigma_{3, \text{unsat}}$ を代入して定数 a, b を計算する。二からの値を $a_{\text{unsat}}, b_{\text{unsat}}$ とする。このとき、不飽和供試体の主応力差-軸ひずみ曲線は、

変換座標面上で次式で表現される直線となる。 $E_a / (\sigma_1 - \sigma_3) = a_{\text{unsat}} + b_{\text{unsat}} \cdot E_a \quad (6)$

一方、飽和供試体の主応力差-軸ひずみ曲線は、変換座標面上で次式で表されるような側圧 σ_3 をパラメータとする直線群となる。

$$E_a / (\sigma_1 - \sigma_3) = a_{\text{sat}}(\sigma_3) + b_{\text{sat}}(\sigma_3) \cdot E_a \quad (7)$$

ここに、 $a_{\text{sat}}(\sigma_3) = 1/[K_{\text{sat}} P_a (\sigma_3/P_a)^{n_{\text{sat}}}]$, $b_{\text{sat}}(\sigma_3) = [(1 - \sin \phi_{\text{sat}}) R_f] / (2C_{\text{sat}} \cos \phi_{\text{sat}} + 2\sigma_3 \sin \phi_{\text{sat}})$

図-3に式(6)を破線で、式(7)で与えられる直線群の中の任意の直線を実線で示す。ところで、図-3の2直線が最もよく一致するときの飽和状態の側圧 σ_3 は、式(6)と式(7)の差の2乗を $[0, E_a]$ の範囲で積分したものを最小にする値をとると考えられる。ここに、 E_a はある適当な積分範囲を意味する。したが

って、求める σ_3 は次式を満足する。

$$\frac{\partial}{\partial \sigma_3} \left\{ \int_0^{E_a} [(a_{\text{unsat}} - a_{\text{sat}}(\sigma_3)) + (b_{\text{unsat}} - b_{\text{sat}}(\sigma_3)) E_a]^2 dE_a \right\} = 0 \quad (8)$$

上式は、 σ_3 の関数となるのでNewton法を用いて簡単に解ける。そして、求まった σ_3 から不飽和供試体の側圧 $\sigma_{3, \text{unsat}}$ を減じれば、サクシオンに等価な有効拘束圧が求まる。

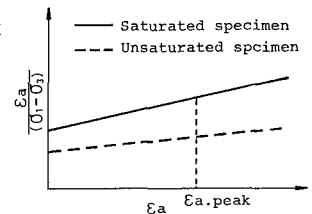


図-3 サクシオンの評価方法

4. 適用例：豊浦標準砂で飽和度100, 73.6, 50.9% の供

試体を作製し、側圧0.31, 0.51, 0.71 kgf/cm^2 の下で三軸圧縮排水排気試験を行った。その結果より定まる諸定数を表-1に示す。次に表-1に示す諸定数を用いて、試験時の側圧に注目してサクシオンに等価な有効拘束圧($\Delta \sigma_3$)の評価を行った。

表-1 三軸試験の結果より定まる諸定数

Sr (%)	σ_3 (kgf/cm^2)	E_1 (kgf/cm^2)	b	C (kgf/cm^2)	ϕ (°)	K	n	R_f
100	0.31	315.5	0.52870	0.06	43.7	711	0.702	0.881
	0.51	447.5	0.34409					
	0.71	564.5	0.25504					
73.6	0.31	312.5	0.50578	0.08	43.5	802	0.810	0.881
	0.51	467.7	0.33557					
	0.71	611.5	0.25108					
50.9	0.31	353.8	0.50357	0.07	44.1	907	0.809	0.881
	0.51	529.3	0.33059					
	0.71	691.8	0.24607					

このとき式(8)で積分範囲 E_a は9つの試験データから得られた主

応力差-軸ひずみ曲線のピーク時の軸ひずみを平均した値5.8%を採用している。もっとも E_a の値は結果に依り影響しない。表

-2に $S_r = 73.6\%$ の供試体に注目した結果を、表-3に $S_r = 50.9\%$ の結果を示す。評価された $\Delta \sigma_3$ の値が妥当であるか否かは

今後の検討に待たねばならないが、それ程かけ離れた数値でもないと考えている。

5. あとがき：本研究では一定飽和度における任意の σ_3 に対する $\Delta \sigma_3$ を推定する手法を提案した。今後は任意の飽和度における任意の σ_3 に対する $\Delta \sigma_3$ を推定する手法を確立しなければならない。

[参考文献] 1) Duncan, J. M. and C. Y. Chang: Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils, Proc. ASCE, SM5, pp. 1629-1653, 1970.