

孔隙压力系数与饱和度的关系

娄 炎

(南京水利科学研究院)

一、前 言

在利用动三轴仪或动单剪仪做砂土振动液化或模量试验时,都得先将试样经过各种处理(如浸泡、煮沸、抽气、加反压力,充二氧化碳等措施)使之饱和。尽管如此,试样也不一定能完全达到饱和,因而在试验前都得进行试样饱和度的测定,一般都是通过测定孔隙压力系数 B 来实现的。当 $B \approx 1.0$ 时,认为试样已饱和;当 $B < 1.0$,认为试样不饱和,但饱和度 S_r 数值一般也不知道。此外,孔隙压力系数 B 因测定程序不同(即固结前测定还是固结后测定)其值亦不相同,一般固结前测定得到的 B 值较大,固结后测定的 B 值较小。当对土样进行逐级加荷测定时,即施加一级侧压力 $\Delta\sigma_3$,测定一次 B 值,而每次测定之后就排水固结,其后再加下一级 $\Delta\sigma_3$ 进行下一次 B 值的测定,由此得到的各级 $\Delta\sigma_3$ 下测得的 B 值会越来越小,这些不同的 B 值是否反映不同的饱和度呢?如果不是,那末究竟以何时测得的 B 值来度量饱和度 S_r 为好呢?由于饱和度对液化试验的结果影响颇大^[1],所以弄清 S_r 与 B 的关系就显得十分重要了。

二、饱和度与孔隙压力系数

(一)饱和度 S_r

它是一个单一的物理状态指标,表征土中孔隙被水充满的程度,定义为,

$$S_r = \frac{\text{土中水的体积}}{\text{土中孔隙体积}} = \frac{V_w}{V_v} = \frac{V_w}{n \cdot V} \quad (1)$$

式中 n —— 孔隙率,

V —— 试样的初始体积。

对于一个用湿装法制备的土样来说, S_r 是一个基本不变的物理量。除了饱和度太低,孔隙率会随加荷而变,造成加荷对饱和度有明显影响之外,对初始饱和度较大的土样来说,饱和度一般不因分级加载有较大的影响。由于 S_r 不能直接测定,所以在振动试验中也是通过测定孔隙压力系数 B 来衡量试样是否饱和的。

(二)孔隙压力系数 B

它不是一个纯物理状态的指标,而是一个表征土样受到各向相等的压力 $\Delta\sigma_3$ 作用时,引

起孔隙水压力增长程度的参数。斯肯普顿(Skempton)给出下式^[2]:

$$\Delta u = B \cdot \Delta \sigma_3 \quad (2)$$

而

$$B = \frac{1}{1 + n \frac{K_s}{K_w}} \quad (3)$$

式中, K_s ——土骨架的体积压缩模量,

K_w ——孔隙中气水混和物的体积压缩模量;

当孔隙中全部为无气水充满时, K_w 约为 $2 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$, 而 K_s 一般在几十到几百之间, 所以在土样饱和时 $B \approx 1.0$ 。此时施加的各向均等的侧压力 $\Delta \sigma_3$ 就全部转化为孔隙水压力 Δu 的增长; 当土样不饱和、孔隙中含有一些气体时, K_w 大大降低(当 $S_r = 0.99$ 时, K_w 即降到与 K_s 同一数量级^[8]), B 也就小于 1.0, 则施加的 $\Delta \sigma_3$ 就不能完全转变成孔隙水压力 Δu 的增长。试验中就是根据这个原理由测得的 B 值来反映土样的饱和与否的。从式(3)可以看出 B 值与土样的孔隙率、土骨架的软硬及孔隙中气、水成分的比例都有关系。因而它不是一个单一的状态指标, 而是一个随以上这些量变化而变化的综合参数。

(三) S_r 与 B 的关系

式(3)是在将土体视为各向同性的线弹性体前提下得到的, 实际上土的体积变化特性并非线性的, 迭加原理只在某些条件下才是正确的。因此在试验前判断土样的饱和与否不用式(3), 而是用式(2)求得 B 来判定。然而对同一土样, 固结前测定与固结后测定的 B 值差异甚大; 分级测定则更呈逐次递减(指每测一次即排水固结一次), 如图 1 示。对于 B 与 S_r 的关系, 半泽秀郎等^[4] 利用玻意耳-马略特定律推得饱和度 S_r 与 $\Delta \sigma_3$ 、 Δu 、 n 及 K_s ^① 的关系如下:

$$S_r = 1 - \frac{(\Delta \sigma_3 - \Delta u)(1 + \Delta u)}{\Delta u \cdot n \cdot K_s} \quad (4)$$

将此式稍作变化, 可得 S_r 与 B 等的关系

$$S_r = 1 - \frac{(1 - B)(1 + \Delta u)}{B \cdot n \cdot K_s} \quad (5)$$

利用该式可以得到 S_r 与 B 间的定量关系。

三、试验结果与分析

本文试验材料为标准砂。首先由等向压缩排水试验求得体积应变 $\epsilon_v = \Sigma \Delta V / V$ 与有效应力 σ'_3 的关系, 它们满足下面的关系式(见图 2)。

$$\epsilon_v = a(\sigma'_3)^b \quad (\%) \quad (6)$$

因此骨架的体积压缩模量为

①原文定义的是骨架压缩率, 本文为使用前后一致将其定义为体积压缩模量, 特此说明——作者。

$$K_s = \frac{d\sigma'_3}{de_v} = \frac{1}{ab} (\sigma'_3)^{1-b} \times 10^2 \quad (7)$$

由回归分析求得该标准砂的 $a = 0.71$; $b = 0.54$ 。

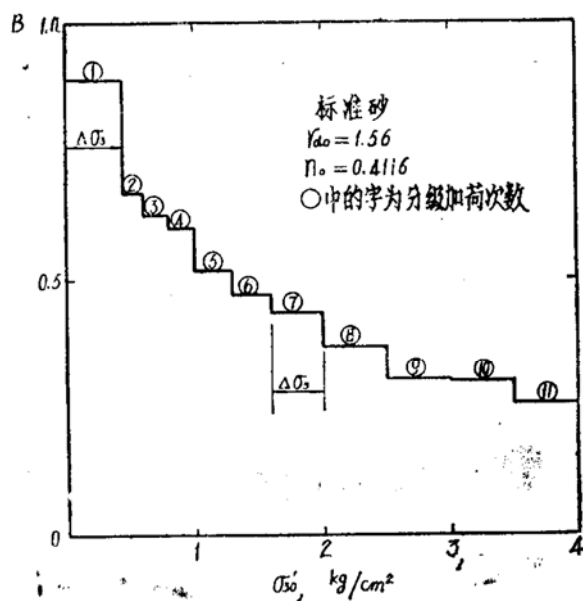


图1 分级加荷时的B值变化

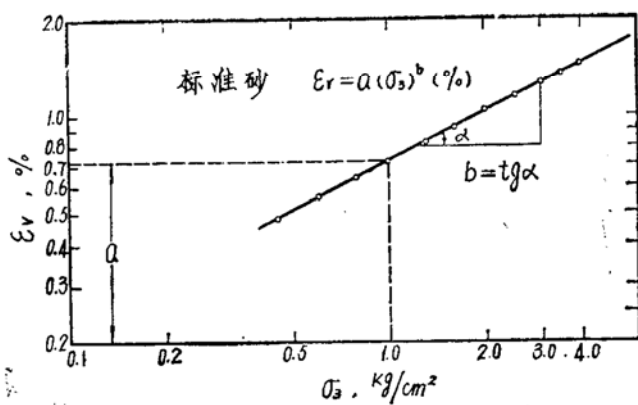


图2 标准砂的体积压缩特性

再由不排水加荷(测孔压)排水固结——不排水再加荷(测孔压)的分级加载试验,测得各级 $\Delta\sigma_3$ 下的 Δu 及其后的体积变化 ΔV , 以此按式(2)、(5),可求得各级荷载下的 B 值、孔隙率 n 和饱和度 S_r 。表1列出其中一个砂样的试验结果。表中第一列 σ'_{30} 是试样在施加 $\Delta\sigma_3$ 前具有的有效应力状态。第十列给出了按饱和度定义依式(1)计算的、土样在各级荷载下的饱和度 S'_r , 可以看出其值不随加荷次数而变。这说明初始饱和度较大的土样,其饱和度基本不受分级加荷的影响。表中第三、四列是试样在某初始固结压力 σ'_{30} 下,由 $\Delta\sigma_3$ 引起的孔压增量 Δu 和相应的孔隙压力系数 B 值,所列数据表明,随分级加荷次数的增加,即初始固结压力 σ'_{30} 的提高,得到的 B 值越来越小。表中第六列给出的是相应于某 $\sigma'_3 (= \sigma'_{30} + \Delta\sigma_3 - \Delta u)$ 的体积压缩模量,其随 σ'_3 的增加而提高。表中第七列就是由三、四、五、六列中的值按式(5)

求得的饱和度 S_r , 可以看到它们并不是一个常数, 而是随 σ'_{30} 的增大逐渐减小。通过上述试验我们认为:

1. 在孔压及体变的测量是准确的前提下, 随每次加荷之后的排水固结, 使试样的有效应力越来越大, 土的压缩模量 K_s 也越来越大, 由式(3)可知, 即使是饱和土样, 其 B 值也会逐渐减小, 但不会减小很多。例如 K_s/K_w 由 0.003 增加到 0.03 (即相当 K_s 提高 10 倍) 时, 一个中密的饱和砂样其 B 值也只从 0.999 降到 0.988 左右。然而当试样不饱和时, 由于 K_w 会降到与 K_s 同一量级, B 值受 K_s 增大的影响就很明显。所以随着分级加荷次数的增加, K_s 越来越大, 而 B 值就越来越小。如表 1 中, K_s 增大 7 倍, B 值减小到 0.30 以下, 为初始值的 29%。尽管如此, 表 1 中第十列显示的试样饱和度并没有发生多大变化, 这说明在讨论试样的饱和度时, 只考虑 B 值大小而不考虑 B 值取得情况是不妥当的。

表 1

	σ'_{30}	$\Delta\sigma_3$	Δu	$B = \frac{\Delta u}{\Delta\sigma_3}$	n	K_s	S_r	$\Sigma\Delta V$	$V'_w = V_w - \Sigma\Delta V$	S'_r
	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²			kg/cm ²		cm ³	cm ³	
	一	二	三	四	五	六	七	八	九	十
1	0	0.45	0.40	0.889	0.4116	65.8	0.9935	0.80	89.21	0.9934
2	0.45	0.15	0.10	0.667	0.4095	189.8	0.9929	1.00	89.01	0.9935
3	0.60	0.20	0.125	0.625	0.4089	217.9	0.9924	1.20	88.81	0.9934
4	0.80	0.20	0.12	0.60	0.4084	246.3	0.9926	1.40	88.61	0.9936
5	1.00	0.30	0.155	0.517	0.4078	277.9	0.9905	1.60	88.41	0.9934
6	1.30	0.30	0.142	0.473	0.4073	310.6	0.9902	1.75	88.26	0.9934
7	1.60	0.40	0.175	0.438	0.4069	344.4	0.9892	2.10	87.91	0.9934
8	2.00	0.50	0.184	0.368	0.4059	384.3	0.9870	2.35	87.66	0.9933
9	2.50	0.50	0.153	0.306	0.4053	422.6	0.9847	2.50	87.51	0.9933
10	3.00	0.50	0.150	0.300	0.4049	455.5	0.9854	2.70	87.31	0.9933
11	3.50	0.50	0.127	0.254	0.4043	486.9	0.9837	2.90	87.11	0.9933

注: 试样初始体积 220.11cm³, $\Sigma\Delta V$ 为累积排水量, V'_w 为土样中含水体积, V_w 为土样初始含水体积。

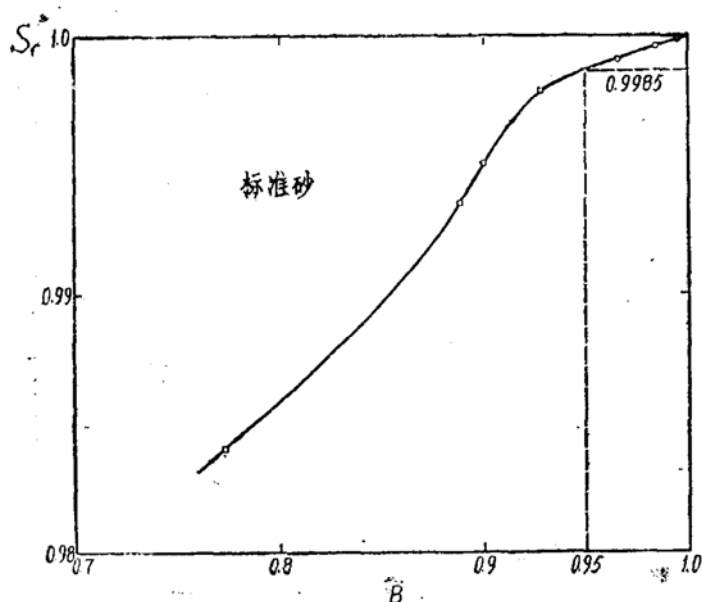
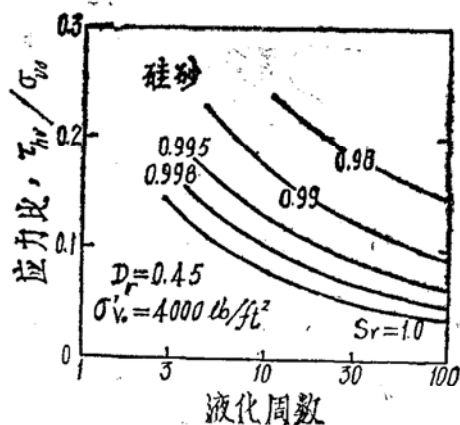
2. 从表 1 中第七列由式(5)计算的饱和度来看, 其第一级加荷时, 由 B 、 Δu 、 n 等值计算出的饱和度与第十列的基本相同, 其后的加荷当中随着固结应力 σ'_{30} 的增大, K_s 越来越大, 得到的 B 值越来越小, 由它们计算得到的饱和度 S_r 与第十列的数据差别渐渐增大, 故此时的 B 值并不反映土样的饱和度的真实情况。因此建议以第一级(或第二级)加荷测得的 B 值来判断土样的饱和程度, 它比用固结后测定的 B 值能更准确的反映土样真实情况。

基于这种理解, 我们又做了一些试验, B 值都是在固结前测定或于试样上加了 0.1kg/cm² 的侧压力固结后测定, 用得到的 B 值及孔隙率 n 等按式(5)算出相应的饱和度 S_r , 一并列入表 2。并在图 3 中绘出 B 与 S_r 的关系, 从该图可以看出, 当 $B > 0.95$ 时, 土样的饱和度达 0.9985 以上, 对照马丁(Martin)等^[1]的试验结果(见图 4)可以发现, 用这种饱和程度的土样进行抗液化强度试验时, 与 $S_r = 1.0$ 的结果已相差很小了。所以在试验中规定以固结前

测定的 $B > 0.95$ 作为土样饱和的标准是合理而明确的。

表 2

试 样 编 号	σ_{30}'	$\Delta\sigma_3$	Δu	B	n	S_r
标-01	0	0.45	0.348	0.773	0.4023	0.984
标-05	0	0.45	0.400	0.889	0.4116	0.9935
标-04	0.10	0.10	0.09	0.90	0.4007	0.995
标-06	0	0.45	0.418	0.928	0.4160	0.998
标-03	0.20	0.10	0.097	0.970	0.4020	0.999
标-02	0	0.45	0.443	0.984	0.4083	0.9996
标-07	0.10	0.20	0.199	0.995	0.4199	≈ 1.0

图 3 一组土样的 B - S_r 关系图 4 单剪试验中 S_r 对液化应力比的影响

3. 在目前的孔压及体变量测中, 由于受到仪器和橡皮膜顺变性的影响, 使得测到的孔压和体变都不够准确, 特别对颗粒较大的土样比较明显。橡皮膜的顺变性会使量测到的孔压变大, 量测到的体变增加^[6], 这使我们按式(2)求得的 B 值就会偏大, 由体变-压力曲线得到的体积压缩模量 K_v 也将减小许多。橡皮膜的顺变性在式(2), (5)中都没有考虑, 所以对颗粒较粗的土来说, 这种影响应加以考虑。莱德(Lade)^[6]已提出对式(2)进行修正, 在式中添加反映仪器和橡皮膜顺变性影响的项, 但具体实施还是有些困难, 尚需进一步研究。

四、结 语

1. 用湿装法制备的土样的饱和度基本上是一个定数。它不因固结前、后测定和分级加压测

定而发生明显地变化。此时虽然 B 值有较大的差异,但其饱和度则是基本不变的。因而单从 B 值的大小来说明土样的饱和度是含糊的,必须同时说明在什么情况下测得的 B 值才是明确的。

2. 试验与分析表明,试样在较大压力下固结后,其 B 值因骨架模量提高而迅速减小,所测得的 B 值一般不能正确反映出试样饱和程度,为此建议用固结前测得的 B 值或固结压力为 0.1kg/cm^2 左右时测得的 B 值来反映土样的饱和度为好。

3. 试验与计算还表明,以固结前测得的 B 值大于0.95作为土样饱和标准是适宜的,它不会给抗液化试验结果带来显著的误差。

4. 对于颗粒较粗的砂来说,最好能考虑膜顺变性对孔压测定的影响。

本文得到窦宜高级工程师的指导,特此致谢。

参 考 文 献

- [1] Martin, G. R., Finn, W. D. and Seed, H. B., The Influence of System Compliance on Soil Liquefaction Tests, ASCE, Vol. 104, No. GT4, 1978.
- [2] 毕肖普等,土壤性质的三轴试验测定方法,中国工业出版社,1965.
- [3] 马丁等,周期荷载下的液化原理,地基与基础译文集,(1)砂土液化,中国建筑工业出版社.
- [4] 半泽秀郎等,砂土液化强度的实验研究,地基与基础译文集,(1)砂土液化,中国建筑工业出版社.
- [5] Lade, P. V. and Hernandez, S. B., Membrane Penetration Effects in Undrained Tests, ASCE, Vol. 103, No. GT2, 1977.