

击实粘土固结前后孔隙压力系数的变化 及对强度特性的影响

王志玲

(郑州工学院化工部基础工程检测中心, 450002)

方涤华

吕洪予

(河海大学岩土及地质工程系, 南京, 210098) (黄河水利出版社, 郑州, 450003)

文 摘 本文主要探讨了击实粘土固结前后孔隙压力系数 B 值的变化及其对强度特性的影响。试验结果表明, 固结前 B 值接近 1 的试样, 固结后在不排水状态下承受周围压力增量时 B 值小于 1, 这将引起土体抗剪强度增加, 使抗剪强度不能表示为剪前试样承受的有效应力的线性函数; B 值与饱和度 S_r 的关系因测试条件不同而不同。本文还对三轴仪底座及试样帽漏水对试验结果的影响, 以及影响固结排水量量测和孔隙压力系数 B 的因素进行了分析。

关键词 三轴试验, 饱和度, 孔隙压力系数, 抗剪强度, 固结排水量。

1 前 言

利用三轴仪测定土的有效强度指标时, 要求试样有高饱和度。因饱和试样固结以后也是饱和的, 故对某些具有剪胀性的土进行固结不排水剪切试验时, 为了方便地量测负孔隙水压力, 固结后在不排水状态下对试样施加一个周围压力增量 $\Delta\sigma_3$ 以提高孔隙水压力零位。但以往的试验却发现, 固结前 $B \approx 1$ 的试样, 固结后在不排水状态下承受一个周围压力增量时, B 值比 1 小得多。这种加压方式将会对土体的强度产生何种影响, 有效应力原理是否适用, 以及固结前后 B 值与 S_r 值各存在什么关系等问题, 对此进行了探讨。发现, 目前使用的三轴仪底座和试样帽为平直侧面, 存在漏水问题; 按常规试验步骤以 20~40cm 水头的负压不能将装样时滞留在试样与橡皮膜之间的积水全部吸出, 残余的这部分积水既影响试样体变量测, 又使测得的 B_0 值偏大。

为使三轴试验整理的资料更加可靠, 本文提出了相应的处理方法, 供今后三轴仪的设计制造及《土工试验规程》的修订时参考。

2 击实粘土固结前后 B 值的变化及对强度特性的影响

2.1 试验概况

试验土料取自小浪底工程前苇园料场, 土粒比重 2.71, 液限 35%, 塑限 19%, 颗粒组成

为:砂粒 35%,粉粒 51%,粘粒 14%。试样为人工制备,分 5 层击实成型,直径 39.1mm,高 80mm,制备含水量 15%,控制干密度分 1.55,1.60,1.65g/cm³ 三种。抽气饱和,饱和度在 98.5% 以上。

按常规方法装样,为避免试验过程中压力室内的压力水渗入橡皮膜内,在三轴仪底座及试样帽上各开两道弧形浅槽,并涂上硅脂。固结前对试样施加 40cm 水头的负压或 20kPa 的周围压力,以排除装样时滞留在试样与橡皮膜之间的积水。分以下三种加压方式进行固结不排水剪切试验(剪切速率取 0.08mm/min):

A 法 对试样施加 40cm 水头的负压倒吸装样时滞留在试样与橡皮膜之间的积水,按常规方法进行固结不排水剪切试验。

B 法 先对试样施加 20kPa 的周围压力排水,再施加周围压力至固结压力,固结完成后在不排水状态下逐级施加三级周围压力增量 $\Delta\sigma_3 (=50\text{kPa})$,并测定由此引起的孔隙水压力的稳定增长值,然后进行固结不排水剪切试验。这种加压方法,剪前试样承受的周围压力比 A 法大 150kPa。按理饱和试样在不排水状态下承受周围压力增量仅引起孔隙水压力的增加,不改变有效固结压力。

C 法 先对试样施加 20kPa 的周围压力排水,施加反压力使 $B_0 = 1$,对试样施加固结压力固结后,在不排水状态下再施加一级周围压力增量 $\Delta\sigma_3 (=50\text{kPa})$,并测定由此引起的孔隙水压力稳定增长值,然后进行固结不排水剪切试验。

2.2 试验结果

试样固结前只以 40cm 水头负压排水测得的孔隙压力系数 B_0 为 0.98~1.0,以 20kPa 的周围压力排水测得的 B_0 则为 0.95~0.96,而试样的饱和度是相同的。在上述何种情况下测定 B_0 ,对固结后的 B 值及强度并无影响。

表 1 固结前后 B 值比较

ρ_d (g/cm ³)	σ_3 (kPa)	固结前以 20kPa 周围压力排水,不加反压 (B 法)				固结前以 20kPa 周围压力排水,加反压 (C 法)	
		B_0	B_1	B_2	B_3	B_0	B_1
1.55	100	0.96	0.76	0.94	0.96	1.0	0.99
	200	0.96	0.54	0.84	0.91	1.0	0.99
	300	0.96	0.51	0.78	0.86	1.0	0.98
1.60	100	0.96	0.86	0.84	0.87	1.0	0.99
	200	0.95	0.50	0.76	0.80	1.0	0.98
	300	0.95	0.48	0.72	0.78	1.0	0.98
1.65	100	0.95	0.60	0.79	0.82	1.0	0.98
	200	0.95	0.49	0.73	0.80	1.0	0.98
	300	0.95	0.34	0.56	0.74	1.0	0.98

注: B_0 为固结前的孔隙压力系数; B_1, B_2, B_3 分别为固结后各级 $\Delta\sigma_3$ (不排水)的孔隙压力系数。

从表 1 可以看出,固结前施加反压力使 $B_0 = 1$ 的试样,固结后 $B_0 \approx 1$ 。对于固结前未加反压力使其完全饱和的试样,固结后 B 值明显减小,具有以下规律:①随加荷级数的增加, B 值逐渐增大,从发展趋势看最终能接近于 1;②初始干密度相同时,固结压力越大,在同级周围压力增量

$\Delta\sigma$ 下, B 值越小; ③固结压力相同时, 在同级周围压力增量下, 初始干密度越小, B 值越大。

A, B, C 三种方法所得的应力-应变-孔隙压力关系曲线见图 1(图中孔隙压力均为在剪切过程中产生的)。强度指标见表 2。

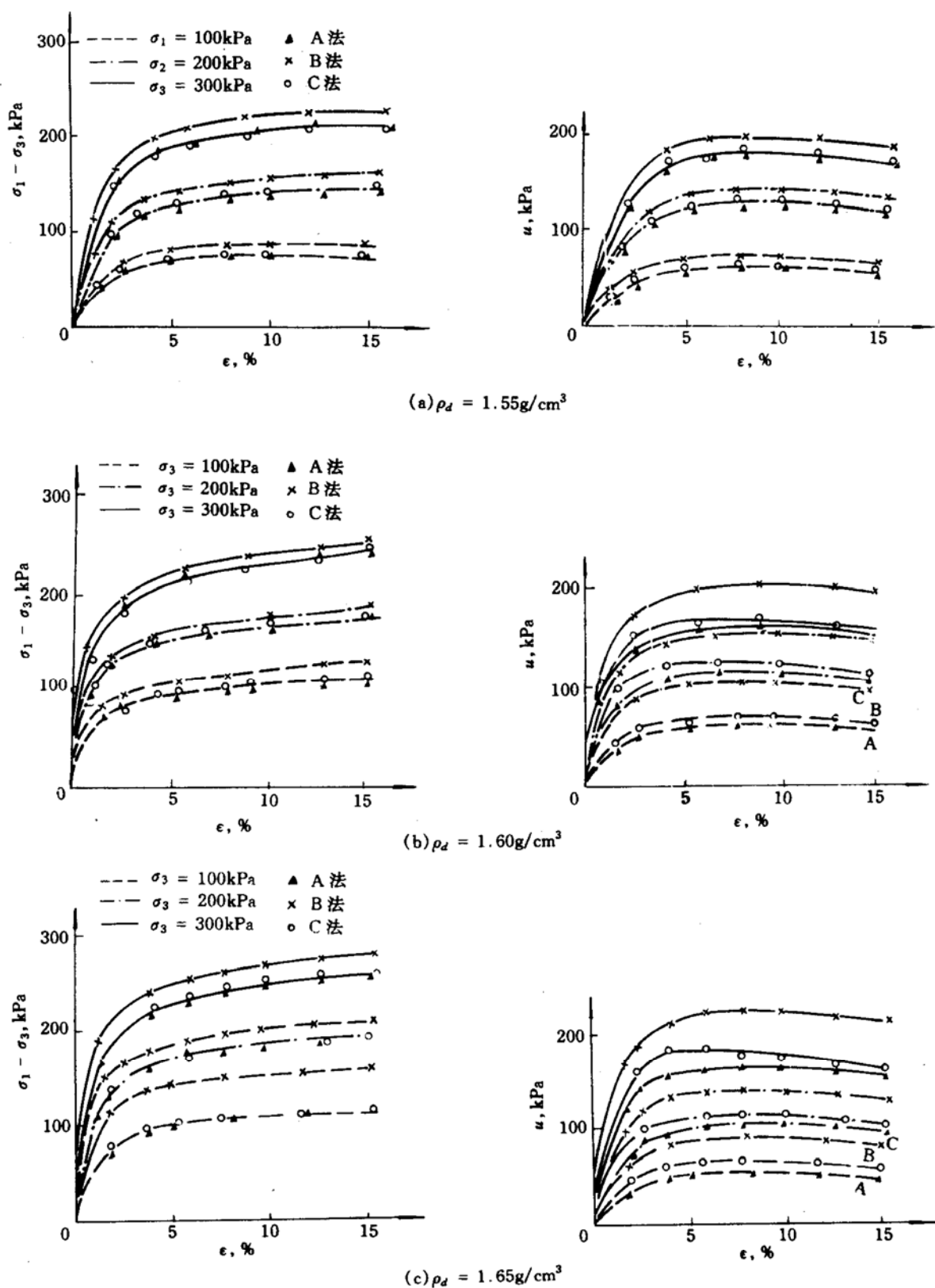


图1 应力-应变-孔隙压力关系曲线

表 2

击实试样的抗剪强度指标

加压 方法	$\rho_d = 1.55\text{g/cm}^3$				$\rho_d = 1.60\text{g/cm}^3$				$\rho_d = 1.65\text{g/cm}^3$			
	c (kPa)	φ (°)	c' (kPa)	φ' (°)	c (kPa)	φ (°)	c' (kPa)	φ' (°)	c (kPa)	φ (°)	c' (kPa)	φ' (°)
A 法 C 法	8	14.5	4	27	14	14.5	10	27	20	14.5	12	27
B 法	12	14.5	6	27	24	14.5	14	27	32	14.5	16	27

由图 1 可知, A 法与 C 法的应力-应变关系是相同的。对于孔隙压力-应变关系, A 法与 C 法相比, 影响视 ρ_d 而定。 $\rho_d = 1.55\text{g/cm}^3$ 时, 基本没有影响; 当 $\rho_d = 1.60, 1.65\text{g/cm}^3$ 时, 未加反压力饱和的试样, 孔隙水压力较低且 ρ_d 越大孔隙水压力相差也越大, 但这种趋势随轴向应变的增加而减小, 当 $\epsilon = 15\%$ 时, 孔隙水压力基本无区别。

这与试样的初始干密度有关, ρ_d 越小, 抽气时越易达到饱和; 另一方面, 还与试样受剪过程中平均压力的增加有关, 试样的干密度越大, 饱和度随平均压力的增加也越大。因此, 对这种随应变而硬化的击实土, 当破坏标准取 15% 轴向应变时, 不加反压力使其达到完全饱和 ($B > 0.95$) 并不影响土的强度指标。对试样固结后在不排水状态下承受三级周围压力增量的试样, 因 $B < 1$, 有效应力增加, 故而应力-应变关系曲线高于常规方法 (A 法)。

在受剪过程中, B 法试样孔隙水压力的增加高于 A 法和 C 法。试验所得的强度指标见表 2。A, C 法的结果是一致的, B 法的有效强度指标稍高于 A, C 法, 且 ρ_d 越大差值也越大。原因是 ρ_d 越大, 固结后 B 值越小, 从而引起土骨架的应力增加也越多。

2.3 固结前后 B 与 S_r 的关系及 B 值对强度特性的影响

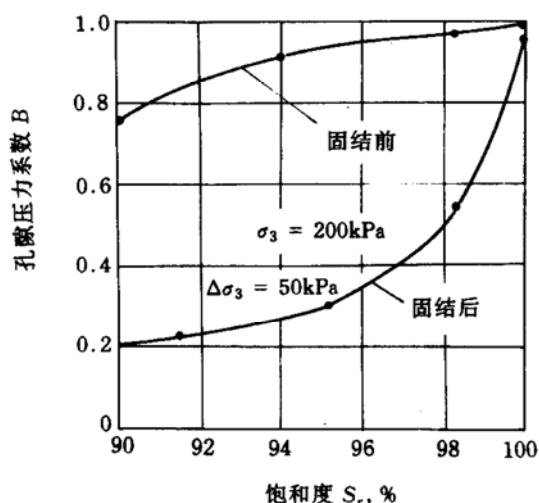
饱和度 S_r 是表征土中孔隙被水充满程度的单一的物理状态指标。而对于孔隙压力系数 B 定义如下:

$$B = 1 / (1 + nK_w / K_s) \quad (1)$$

式中 n 为试样的初始孔隙率; K_w 为孔隙流体的压缩系数; K_s 为土骨架的压缩系数。

从式 (1) 可知, B 是试样的初始孔隙率、孔隙流体和土骨架压缩系数的函数。 K_w 和 K_s 并非常量, 所以 B 不是一个单一的状态指标。但当试样孔隙全部被脱气水充满时, 因水的压缩系数为 $5 \times 10^{-7} \text{kPa}^{-1}$ 左右, K_s 一般为 $10^{-3} \sim 10^{-5} \text{kPa}^{-1}$, 所以土样饱和时, 无论 K_s 如何变化, $K_w / K_s \approx 1$ 。当孔隙含一些气体时, K_w 大为降低 ($S_r = 0.99$ 时, K_w 与 K_s 即为一个量级^[1]), 固结后随 K_s 的迅速减小, K_w / K_s 明显小于 1。从我们的试验可以看出, 试样固结后随加荷级数的增加 (不排水) B 又逐渐增加, 这是由于一些气体被溶解, K_w 减小的缘故。

图 2 为用两组不同饱和度的试样 ($\rho_d = 1.55\text{g/cm}^3$) 测出的固结前后 B 与 S_r 的关系曲线 (固结压力为 200kPa, 施加固结压力前, 先以 20kPa 的周围压力排水)。

图 2 S_r - B 关系曲线

($\rho_d = 1.55\text{g/cm}^3$)

从图2可以看出,除非 $S_r = 100\%$, 否则 B 受 K_s 影响极大。固结前, $S_r - B$ 曲线变化平缓, 饱和度在 $0.9 \sim 1$ 之间时, B 为 $0.78 \sim 1$; 而固结后, $S_r - B$ 曲线陡峭, S_r 在 $0.9 \sim 1.0$ 之间时, B 为 $0.2 \sim 0.99$ 。

对 B 与 S_r 的关系, 可用下式表示^[2]:

$$S_r = 1 - \frac{B}{n} \frac{(1 - B)(1 + B \cdot \Delta\sigma_3)}{B} \quad (2)$$

式中 S_r 为试样的初始饱和度。

综上所述, B 只能定性地反映 S_r , 两者不存在单一的定量关系, 在讨论试样的饱和度时, 不考虑 B 值的取值条件是不合适的。

A, B, C 三种试验方法的有效应力路径见图3, 图中 K_f 为强度破坏线。对于 B 法, 因固结后在不排水状态下试样又承受了三级周围压力增量, 使有效应力增加了 $\Delta\sigma_3' (= \sum_{i=1}^3 (1 - B_i) \times \Delta\sigma_3)$ 。绘制三种方法剪前试样承受的有效应力 σ_{3c}' 与抗剪强度 τ_f 的关系曲线, 见图4(A, C 法, $\sigma_{3c}' = \sigma_{30}$; B 法, $\sigma_{3c}' = \sigma_{30} + \sum_{i=1}^3 (1 - B_i) \Delta\sigma_3$)。

有效应力原理认为土的抗剪强度可表示为剪破面上法向有效应力的函数。从图4可知, A, C 法土的抗剪强度还可表示为剪前试样承受的有效应力的线性函数, 而 B 法的抗剪强度不能表示为剪前试样承受的有效应力的线性函数。

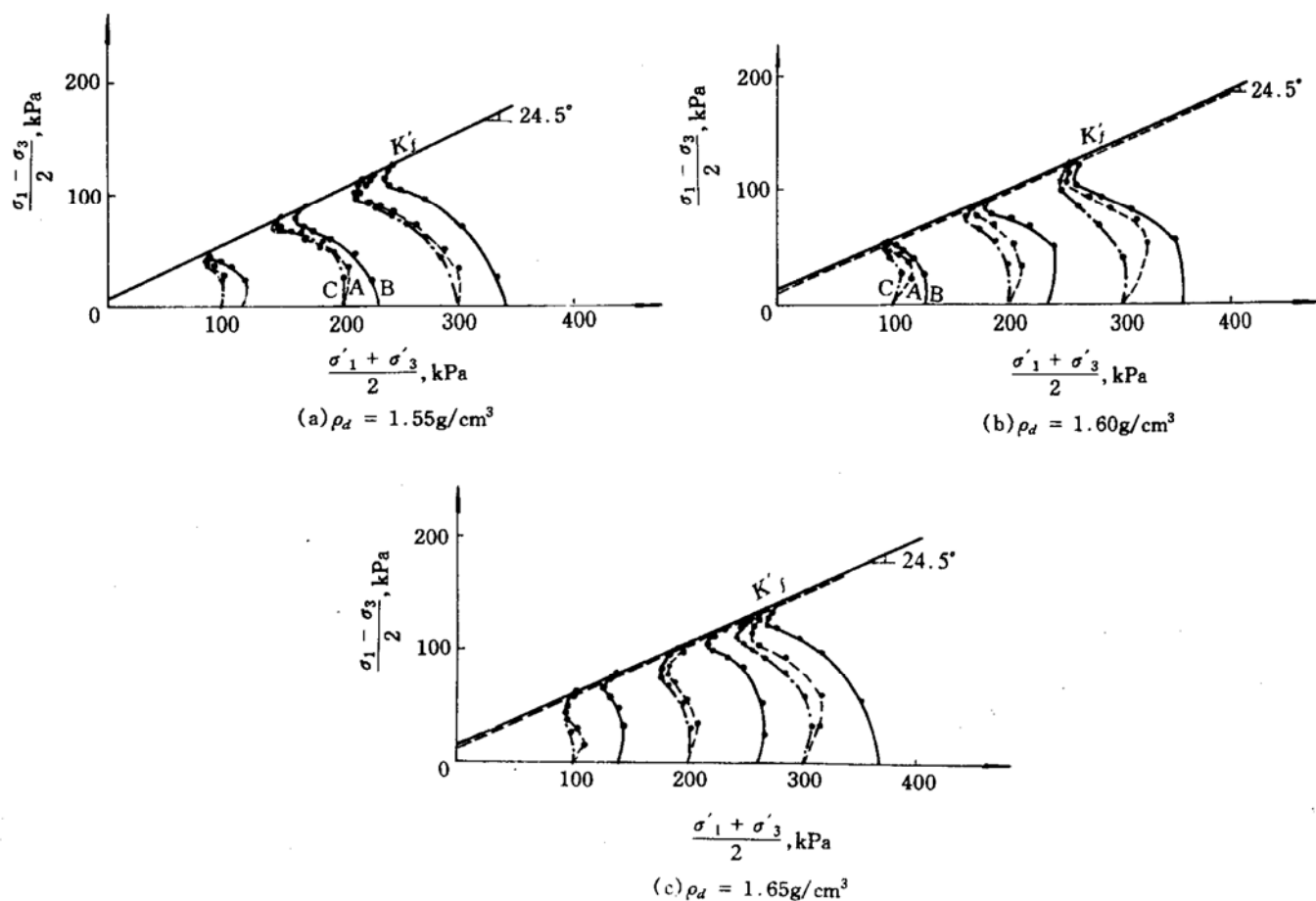


图3 不同试验方法的有效应力路径

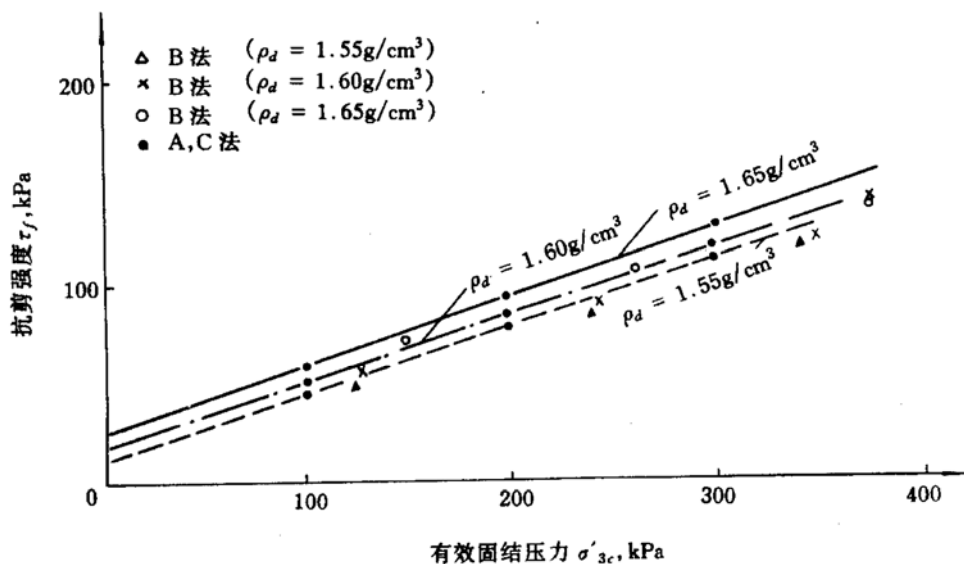


图4 剪前试样承受的有效应力 σ'_{3c} 与抗剪强度 τ_f 关系

3 试验中发现的几个问题

3.1 漏水问题

在做定海原状土样固结不排水剪切试验时发现:固结后对试样施加一个 $\Delta\sigma_3$ (不排水),随时间延长,孔隙水压力增值会超过 $\Delta\sigma_3$ 。这说明有压力水渗入橡皮膜内。经多方查找原因,发现试样帽及试样底座为平直侧面,不利于止水。为此,在试样帽及试样底座上各开两道弧形浅槽,并涂上硅脂,各用两道橡皮箍扎紧。这样处理后,在 400kPa 的周围压力下,保证 4 小时内孔隙水压力为零,对短期试验漏水可不考虑。

对于漏水问题,在排水剪试验中影响体变量测的精度;在不排水剪试验中影响孔隙压力量测的精度,并使测得的总强度偏低。这个问题过去一直未被发现,这是因为漏水的速率远远小于试样排水的速率,在固结过程中孔隙水压力照样能降为零。对某些渗透性较小的试样,固结过程中孔隙水压力总不能降为零,往往以为是仪表问题,其实是由于漏水造成的。

3.2 影响固结排水量量测结果的因素

在以往的试验中经常遇到这样的问题:橡皮膜并未破损,试样的初始含水量相同,高固结压力下的排水量反而比低固结压力下的小。为了澄清原因,以有机玻璃棒(高 80mm,直径 39.1mm)替代试样,四周贴 6 条条宽 0.8cm 左右的滤纸条,上下端亦放滤纸,按常规方法装样。模拟样装好后,以 40cm 水头负压吸出多余水,然后逐级施加周围压力排水并测定在各级周围压力下的排水量。表 3 为三次测定结果。三次试验为重复试验。

表 3

滤纸在各级周围压力下的排水量

σ_3 (kPa)		0	20	50	100	150	200	250	300
ΔV (cm ³)	I	0	0.4	0.15	0.15	0.15	0.15	0.10	0.05
	II	0	1.2	0.30	0.20	0.10	0.10	0.10	0.05
	III	0	1.6	0.35	0.20	0.10	0.10	0.10	0.05

从表 3 可以看出,第一级周围压力下的排水量相差较大,在以后各级周围压力下,排水量基本相同。试验采用的滤纸规格、种类都是相同的,在同样的周围压力下,仅滤纸的排水量按

理不应有大的差别。可以判断, $\sigma_3 = 20\text{kPa}$ 时的排水量大部分是装样时滞留在橡皮膜与试样之间的, 40cm 水头的负压不能将其全部吸出, 残余的这部分参与试样体变量测, 造成固结排水量结果混乱。事实上, 在 20kPa 时, 测得的排水量大部分是未吸出的多余积水。

根据排水量计算的固结下沉量与实测值不符(一般而言总是计算值偏大), 这固然与固结下沉量不易测准有关, 但试样与橡皮膜之间积水和滤纸的排水量参与了体变量测造成固结排水量结果偏大是一个重要原因。表 4 为小浪底击实样的固结下沉量计算值与实测值比较。

表 4 击实试样固结下沉量的计算值与实测值比较

$\rho_d(\text{g/cm}^3)$	1.55			1.60			1.65		
$\sigma_3(\text{kPa})$	100	200	300	100	200	300	100	200	300
$\Delta h_1(\text{cm})$	0.21	0.24	0.31	0.17	0.21	0.28	0.15	0.17	0.22
$\Delta h_2(\text{cm})$	0.14	0.22	0.25	0.11	0.16	0.23	0.10	0.14	0.19
$\Delta h_3(\text{cm})$	0.12	0.20	0.17	0.10	0.15	0.18	0.10	0.13	0.19

表中 Δh_1 为以 40cm 水头负压吸水后测得的固结排水量计算出的固结下沉量, Δh_2 为以 20kPa 的周围压力排水后测得的固结排水量计算而得出的固结下沉量, Δh_3 为实测固结下沉量。

从表 4 可以看出, Δh_2 与实测值接近, Δh_1 偏大。就滤纸的排水量而言, 对固结排水量影响并不大, 影响固结排水量量测精度的主要原因是装样时的滞留积水。土样排气较模拟样困难, 用底部冲水法排气时, 滞留的积水将比模拟样更多。当然, 对某些软粘土, 20kPa 的周围压力可能使试样中的孔隙水被挤出, 作为折中, 可采用 10kPa 的周围压力。

3.3 试样与橡皮膜间的积水对 B_0 的影响

前已述及, 对小浪底击实试样, 饱和度相同时, 只用 40cm 水头负压吸水后施加固结压力测出的 B_0 比用 20kPa 的周围压力排水后施加固结压力测出的 B_0 值大。对击实样来说, 20kPa 的周围压力不会使 K_s 发生太大变化。是什么原因造成两者的差异呢? 为了弄清其原因, 我们仍用有机玻璃棒替代试样进行试验。装样方法与测定滤纸排水量的方法相同。模拟样装好后, 仍用 40cm 水头负压吸水, 在不排水条件下施加固结压力, 测出 B_0 。然后排水固结, 固结结束后, 逐级施加周围压力增量 $\Delta\sigma_3 = 50\text{kPa}$ (不排水), 并测出 $\Delta\sigma_3$ 引起的孔隙水压力增量, 从而得出固结后在各级 $\Delta\sigma_3$ 下由滤纸产生的孔隙水压力系数 B_1, B_2, B_3 。为比较试样与橡皮膜之间的积水对 B_0 的影响, 装样时, 对 $\sigma_3 = 100\text{kPa}$ 的试样不采用底部排水法排气。测定结果见表 5。

表 5 模拟样固结前后的孔隙压力系数

$\sigma_3(\text{kPa})$	B_0	B_1	B_2	B_3
100	0.66	0.10	0.12	0.12
200	0.99	0.04	0.08	0.08
300	0.99	0.02	0.02	0.02

从表 5 可以看出, 固结压力为 100kPa 的试样, B_0 值较小, 显然这与装样时的滞留积水多少有关。模拟样本身不产生孔隙压力, 滤纸是可压缩的, 在不排水条件下承受周围压力增量要产生孔隙水压力, 但是仅由滤纸产生的孔隙水压力不会有这么大。试样与橡皮膜之间的积水影响孔隙压力系数 B , 积水越多 B 值越大。模拟样固结后, 积水已排出, 再施加周围压力, 仅由滤纸产生的孔隙压力系数已很小。由此可知, 试样与橡皮膜之间的积水会使测定的 B_0 值偏大。

前面的试验已发现,对抽气饱和的击实试样,以 40cm 水头负压吸水后施加固结压力, $B_0 = 1$,但此时 S_r 并未达到 100%,事实上也是由残余积水的影响造成的。

无论从体变量测的角度考虑,还是从 B_0 能真实反映试样的饱和度考虑,施加周围压力前,先以 10~20kPa 的周围压力排水为宜。

4 结 语

(1)对一般而言的饱和土($S_r = 100\%$ 除外),固结前后 B 值相差很大,对固结前 $B \approx 1$ 的试样,固结后在不排水状态下承受周围压力增量时, $B < 1$ 将引起土体强度增加,使抗剪强度不能表示为剪前试样承受的有效应力的线性函数。

(2) B 与 S_r 不存在单一的定量关系,讨论 B 时,要考虑它是在何种条件下测得的。

(3)目前使用的三轴仪底座和试样帽为平直侧面,不利于止水,建议在上面各开两道弧形浅槽,试验时涂上硅脂。

(4)按常规试验步骤,以 20~40cm 水头的负压倒吸试样与橡皮膜之间的积水,不能排除全部积水。残留积水不但影响体变量测的精度,而且还使测定的 B_0 值不能真实反映试样的饱和情况。建议用 10~20kPa 的周围压力排水,然后再施加固结压力,以这时测出的 B_0 值反映试样的饱和情况比较合适。

参 考 文 献

- 1 姜炎.孔隙压力系数与饱和度的关系.岩土工程学报,1985,7(3):62~67.
- 2 半泽秀郎.砂土液化强度的实验研究.见:地基与基础译文集.北京:中国建筑出版社,1976,118~124.

Pore Pressure Parameter of Compacted Clay Consolidation and its Effect on Strength Properties

Wang Zhi-ling

(The Checkout Centre of Foundation Engineering of Chemistry Industry Ministry, Zhengzhou Institute of Technology)

Fang Di-hua

(Dept. of Geology and Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing)

Lü Hong-yu

(Yellow River Coaservancy Press, Zhengzhou)

Abstract Changes of pore pressure parameter B of the compacted clay sample before and after consolidation and its effect on strength properties are dealt with in this paper. Test results show that the test sample with $B = 1$ before consolidation will give $B < 1$ after consolidation, so its shear strength increases nonlinearly with the consolidation stress. And the relationship between B and S_r varies with the testing condition. Besides, the dripping effect of triaxial apparatus base and sample cap on test results and the factors which affect consolidation drainage measurement and B -parameter are also analysed in this paper.

Key words triaxial test, degree of saturation, pore pressure parameter, shear strength, consolidation drainage.