

不同固结度下软基土的力学特性

胡德金,高正中,陈治伙

(四川大学 水电工程学院 成都 610065)

摘要:采用三轴试验装置进行了不同固结度下的软基土的固结变形、渗透及强度特性的试验研究,得出软基土固结过程中渗透系数、强度特性的变化规律。

关键词:软基土;固结度;渗透系数;剪切强度

中图分类号:TU411

软基土的变形及稳定性与加荷速率有密切关系。加荷过程中,一方面地基强度因固结而提高,另一方面剪应力也相应增大。为了确保地基的稳定性,减小塑性变形和由此引起的附加沉降,必须严格控制施工加荷速率,使因固结强度的提高与剪应力的增长相适应。

传统的固结方程中,一般假定固结系数是不随固结过程而变化的。固结系数的一般定义为 $c_v = K(1 + e_0) / (a_v w)$, 其中 e_0 为初始孔隙比, w 为水的重度, a_v 为土的压缩系数, K 为渗透系数,以上得到的分析结果往往与实际存在差距。近年来许多学者对固结系数深入进行了研究,如弗洛林^[1] 提出固结系数以 $K(1 + e_{cp}) / (w v)$ 来表达, e_{cp} 为固结中的一个平均值,但是具体 e_{cp} 还应根据固结度来确定。吴崇礼等^[2] 用 $C_v = C_v(1 + e)^2$ 作为软土的固结系数, e 为土层的平均孔隙比。谢新宇等^[3] 提出一维大应变的固结系数表达式为 $C_v = KE_S [(1 + e_0) / (1 + e)]^3 / w$, 其中 K 随 e 而变, E_s 为压缩模量。

固结过程中,渗透系数 K 逐渐发生变化,掌握 K 在固结过程中的变化规律,从而确定固结系数,代入固结方程中来进行迭代求解。同时,在固结过程中,软土的强度也在逐渐提高,通过三轴剪切试验装置来测定固结过程中软土的强度变化特性。

1 试验概况

1.1 软基土的物理性指标

现结合某工程软基土进行研究,软基土为冲洪积物软土层,厚达 6 - 8 米。现场原状土的天然重度为 $\gamma = 19.9 \text{ kN/m}^3$, 含水量 $w = 26.2\%$, 干重度 $\gamma_d = 15.8 \text{ kN/m}^3$, 相应颗

粒组成及物理性指标如表 1、2 所示。

表 1 软基土的颗粒组成

Tab. 1 Soft clay grading

粒组 (mm)	2 ~ 0.25	0.25 ~ 0.1	0.10 ~ 0.05	0.05 ~ 0.005	< 0.005	不均匀 系数 C_u	曲率系数 C_c
含量 (%)	4.4	9.6	14.6	33.9	37.5	23.0	0.39

表 2 软基土的物理性指标

Tab. 2 Physical properties

指标	含水量 (%)	湿重度 (KN/m^3)	干重度 (KN/m^3)	饱和度 (%)	孔隙比 e	比重 G	液限 L (%)	塑限 p (%)
数值	26.2	19.9	15.8	98	0.334	2.74	39.0	19.0

根据表 2 的资料,按塑性图分类该工程软基土属中塑性粘土(CI), $I_L = 36\%$,呈可塑态。

1.2 软基土的力学特性

1) 压缩特性

采用单向压缩固结仪测定原状土样的压缩特性(试样 $61.8 \times 20 \text{ mm} \times \text{mm}$)测得 $a_v = 0.142 \text{ MPa}^{-1}$,固结系数为 $1.44 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。

2) Duncan($E \sim \mu$)模型参数

对软基土进行三轴剪切试验(饱和固结排水剪),按 $E \sim \mu$ 模型得模型参数如表 3。

表 3 Duncan($E - \mu$)模型参数

Tab. 3 Duncan ($E - \mu$) model parameters

参数	$C(\text{kPa})$	($^\circ$)	K	R_f	n	G	F	D
数值	47.2	16.6	115	0.83	0.23	0.36	0.08	2.50

1.3 不同固结度下的力学特性试验

为测定不同固结度下软基土的力学特性,在三轴剪切试验仪上进行变水头渗透试验和剪切试验。

原状土取样后抽真空饱和,试样 39.1 mm ,高 80 mm 。在三轴剪切试验仪上,对试样施加不同围压,固结到不同固结度($0, 25\%, 50\%, 75\%, 100\%$)。通过上下两面固结排水,测定孔隙水压力来计算固结度,卸除围压,施加很小围压(由于试样渗透性较小,水头较大,故施加约 15 kPa 围压,以防止水流从土样与橡皮膜间发生渗透),进行变水头渗透试验(从试样底部进水,上部出水),以测定不同固结度下软基土的渗透系数, $K = (aL/A - t) \ln(h_1/h_2)$ 。式中, A 为试样截面积, L 为试样高度, a 为刻度管截面积, h_1 、 h_2 为初、终水位高度。

同样在不同围压下固结到不同固结度再进行不排水剪切试验,剪切速率为 $0.1\%/ \text{ 分钟}$,分别测定某一固结度下的 C 、 ϕ 值。同时在不同围压下固结时,测定不同固结度下的

固结变形(用百分表测定固结时的轴向变形),并测定试样固结排水量 V ,按应变简化法 $S_c = S_0(1 - V/3V_0)$ 计算固结变形量,两种方法确定的试样固结变形量基本一致。

2 试验成果分析

2.1 固结变形

分别按 $\sigma_3 = 100, 200, 300, 400$ kPa 对原状饱和土样,测定不同固结度时试样的固结变形。相同围压下,固结变形量与固结度近似呈线性关系。围压越大,达到相同固结度时的固结变形量越大, $S \sim \sigma_3 \sim U_t$ 关系曲线见图 1。

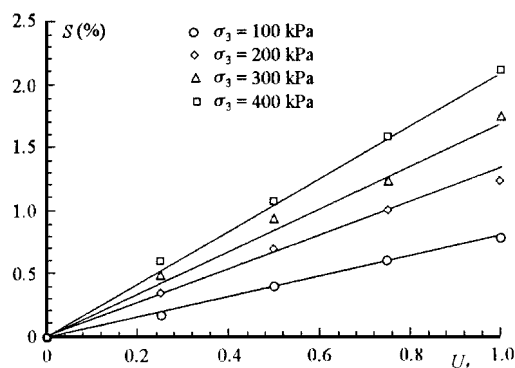


图 1 $S \sim \sigma_3 \sim U_t$ 关系曲线

Fig.1 Relationship of consolidation deformation to stress and consolidation degree

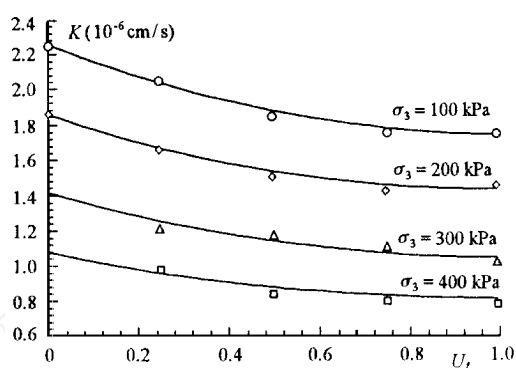


图 2 $K \sim \sigma_3 \sim U_t$ 关系曲线

Fig.2 Relationship of seepage coefficient to stress and consolidation degree

2.2 渗透系数

软基土的渗透系数 K 在固结过程中逐渐减小,并非常数,且随固结围压的增大而降低。图 2 为不同围压下,渗透系数 K 与固结度 U_t 的关系曲线。

假定渗透系数 K 与固结围压 σ_3 呈半对数线性关系:

$$K = K_i / [(1 + \sigma_3/2 Pa) \times \log(\sigma_3/Pa)]$$

其中 K_i 为 $\sigma_3 = 100$ KPa 时的渗透系数,可用二次抛物曲线关系描述 K_i 与固结度 U_t 的关系表达式,即

$$K_i = aU_t^2 + bU_t + c$$

当固结度达到 100 % 时, K_i 达到极值点,即 $U_t = -b/2a = 1$,

故 $b = -2a$, $K_i = aU_t^2 - 2aU_t + c$

采用归一法综合整理不同围压下的渗透系数 K 与围压 σ_3 相关的相对渗透系数 $K/[1 +$

表 4 不同固结度下的软基土抗剪强度指标

Tab.4 Shear strength properties under different consolidation degree

固结度 %	强度指标	
	φ	C (kPa)
0	20	8.2
25	18	10.2
50	25	11.3
75	30	13.5
100	28	15.1

$(\sigma_3/2 Pa) \log(\sigma_3/Pa)]$ 与固结度的关系曲线,各点均落在 $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$ 时, $K_i \sim U_t$ 曲线附近(见图 3),这样只要测定某一固结围压下 K 随 U_t 的变化关系,而不必进行许多 σ_3 的试验。

2.3 强度特性

根据三轴固结不排水剪切试验成果,绘制不同固结度下的摩尔 - 库伦强度包线,确定不同固结度下的抗剪强度指标 c 、 ϕ 值,代入 $\tau = c + \sigma \tan \phi$ 中,可以得到抗剪强度随法向应力 σ 的关系曲线(如图 4)。

从图 4 可看出,软基土的抗剪强度在不同的固结围压下皆随固结度 U_t 的增大而提高,固结围压越大,抗剪强度随固结度提高的幅值越大。而在固结度 25 % ~ 50 % 范围内相对增长幅度最高。

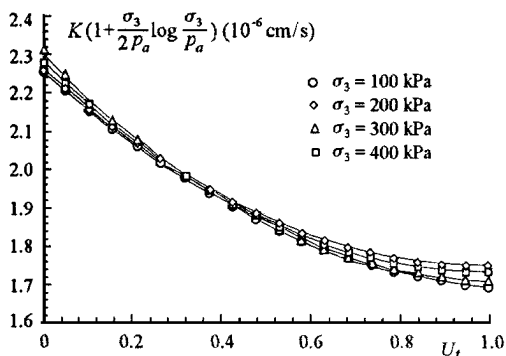


图 3 相对渗系数与固结度关系曲线

Fig.3 Relationship of relative seepage coefficient to consolidation degree

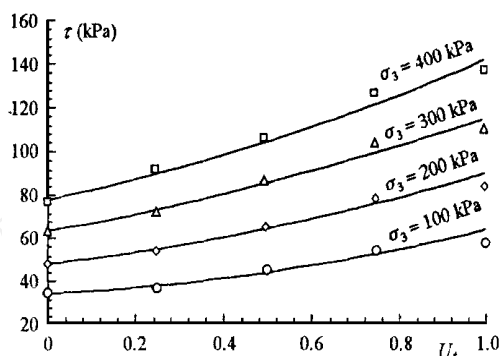


图 4 抗剪强度与固结度关系曲线

Fig.4 Relationship of shear strength to consolidation degree

通过三轴试验装置进行不同固结度下软基土的力学特性试验研究表明,对试验的软基土其固结变形随固结度呈线性变化。渗透系数在固结过程中逐渐减小,与固结度变化关系可用二次抛物线关系近似表达,同时渗透系数随固结围压增大而减小,并呈半数线性关系。软基土的抗剪强度随固结度增大而增大。

参考文献:

- [1] 弗洛林 B A. 土体压密理论. 中国科学院水利部北京水利科学研究院译[M]. 北京:中国工业出版社,1964.
- [2] 吴崇礼,郭述军. 软土固结系数确定方法的分析与改进. 见:卢肇韵. 第五届土力学及基础工程学术会议论文选集[C]. 北京:中国建筑工业出版社,1990,140 ~ 146
- [3] 谢新宇,夏建中等. 饱和土体一维大变形固结系数研究[J]. 浙江大学学报,1998,(5):319 ~ 323

(编辑 胡菊华)

The Strength Properties of Soft Clay Under Different Consolidation Degree

Hu De - jin , GAO Zheng - zhong , CHEN Zhi - huo

(College of Hydro - electricity ,Sichuan Univ. ,Chengdu 610065 ,China)

Abstract : This paper discusses the properties of soft clay under different consolidate degree by triax tests. The expressions of coefficient of permeability relative to stress and consolidation degree are given out. It is shown that the development regularity of strength is related to the consolidation degree. **Key words :** soft clay ; consolidation degree ; coefficient of permeability ; stress.

www.cnki.net