

大尺寸软粘土固结变形试验研究*

周翠英¹, 曾 强², 李亚生¹

(1. 中山大学应用力学与工程系//地下工程与信息技术研究中心, 广东 广州 510275;
2. 广东省电力设计研究院, 广东 广州 510280)

摘 要: 针对常规室内试验的局限性, 设计了软粘土天然土样和重塑土样的大尺寸固结变形试验。试验中荷载的大小与实际土体的受力条件按同比缩小; 土样侧限条件设计为具有弹塑性特点的有机玻璃板, 板内贴有渗透系数与淤泥质土渗透系数相近的滤纸, 板上模拟土体边界渗流条件开一定密度的细小排水孔, 土样的尺寸为 20 cm × 20 cm × 20 cm, 30 cm × 30 cm × 30 cm 和 40 cm × 40 cm × 40 cm 三种规格; 整个实验过程尽可能地反映土体实际的受力环境; 在试验基础上, 探讨了一定压力下, 大尺寸软粘土的固结变形规律及其数学模型, 讨论了其尺寸效应。同时, 将所建立的沉降计算模型推广为广义的实际土体变形模型, 并在深圳国际机场软基沉降预测中进行了初步应用, 取得了较好的效果。

关键词: 软粘土; 大尺寸; 固结变形; 模拟试验; 尺寸效应

中图分类号: TU471 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2005) 05-0025-05

软粘土在我国沿海地区分布较广, 由于其压缩性高, 渗透性低, 固结变形时间长, 在软粘土地区修建建筑物, 能否准确地计算软粘土的固结变形量, 成为直接关系工程设计和安全运营的核心问题。因此, 十分有必要开展软粘土的固结变形试验。常规的室内固结实验均为高 2 cm, 直径 $\phi = 5$ cm 的标准试样, 难以反映土体的尺寸影响和实际受力状态。研究表明: 土体固结变形实验中尺寸效应是一个不容忽视的问题^[1-3], 为此, 本文设计了大尺寸软粘土固结变形试验; 试样分天然与重塑态, 尺寸分别为 20 cm × 20 cm × 20 cm, 30 cm × 30 cm × 30 cm 和 40 cm × 40 cm × 40 cm 三种; 试验中尽可能模拟实际土体的受力和排水边界条件: 荷载的大小与实际土体的受力大小按同比缩小。在此基础上, 探讨不同压力条件下大尺寸软粘土固结变形规律及其尺寸效应, 为软粘土的固结变形计算提供试验研究基础。

1 大尺寸软粘土固结变形试验设计

1.1 试验设计思想

试验设计基本思想: 土样的受力和排水边界条件尽可能模拟实际情况; 土样尺寸尽可能大, 使得尺寸效应能够在变形规律中很好地反映; 荷载的大小按一定比例与实际土体的受力大小相近。在此条

件下, 按照土体的固结变形过程数据特点, 探讨大尺寸土样的固结变形规律。

(1) 试验边界条件模拟: 为了反映实际土体的受力环境和变形规律, 土样周边侧限条件设计为具有弹塑性特点的有机玻璃板, 板内贴有渗透系数与淤泥质土渗透系数相近的滤纸, 板上按一定密度开许多细小的排水孔, 以模拟土体渗流的边界条件;

(2) 土样尺寸: 首先土样的尺寸应尽可能反映实际土体的受力环境和在一定压力作用下的变形规律, 综合考虑到压缩过程中应力的影响范围和土体尺寸效应, 在基坑开挖过程中, 尽量避免扰动, 人工采取土样, 将其制备成 20 cm × 20 cm × 20 cm, 30 cm × 30 cm × 30 cm 和 40 cm × 40 cm × 40 cm 三种规格的土样。

(3) 荷载大小: 与实际工程的建筑物荷载和土体自重应力的大小相对应, 试验中施加的荷载从 10 ~ 60 kPa。

1.2 试验装置设计及样品制备

1.2.1 试验装置设计 根据以上试验目的, 笔者设计了大尺寸软土固结变形试验装置, 主要包括取土器, 加荷装置和变形观测仪 (如图 1 所示)。

取土器: 用有机玻璃板制成, 用于取土和加荷时侧向边界条件的模拟。规格有: 20 cm × 20 cm × 20 cm, 30 cm × 30 cm × 30 cm 和 40 cm × 40 cm × 40 cm

* 收稿日期: 2005-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59809008); 广东省自然科学基金重点资助项目 (013188); 广东省科技攻关十五专项 (2001B30903); 广东粤东高速公路实业发展有限公司资助项目 (2004-3000-7101043)

作者简介: 周翠英 (1963 年生), 女, 教授, 博士生导师; E-mail: eeszy@zsu.edu.cn

cm。在取土器六个面都钻有直径为 5 mm 的排水孔,密度为 1 个/cm²。同时,在取土器内侧衬有滤纸。

预压水泥板:用于试验前对土样进行预压,压力约为 1 kPa。中间开有直径为 11 cm 的空洞,用于放置加荷底座。

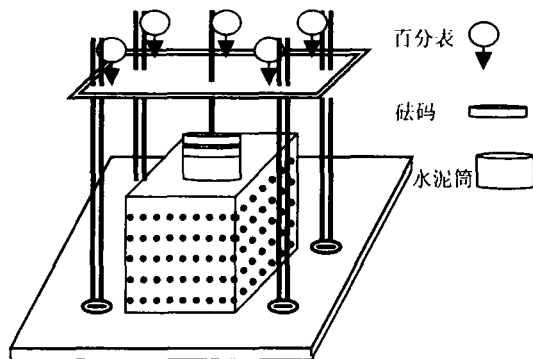


图1 土样加荷装置示意图

Fig.1 Sketch map of loading device for soil samples

加荷底座:为水泥柱体,中间固定有铁条,相当于 6.5 kPa 的压力。直径 $d = 10.5$ cm,高度 $h = 30$ cm,面积 86.6 cm²。此面积就是土体的实际受荷面积。用于对土样加压,同时也可在其上加砝码。

加荷装置与变形观测:首先施加预压水泥板,然后将加荷底座加在预压水泥板所预留的空洞中,之后,施加砝码于加荷底座上。通过量程为 500 mm,精度为 0.01 mm 的百分表观察在固结过程中土样的变形量。

1.2.2 试验样品制备 在广州天雄布市附近某工程场地的淤泥质土中,用该取土器取得 20 cm × 20 cm 天然土样 2 个,30 cm × 30 cm × 30 cm 的天然土样和 40 cm × 40 cm × 40 cm 的重塑土样各一个。样品采集并制备好后立即进行保护,避免水份流失或扰动。

1.3 试验设计方案

为无侧限试验,进行初始结构相似及初始结构不同时土样变形规律的试验研究。

(1) 取初始结构相似、规格为 20 cm × 20 cm × 20 cm 两个,30 cm × 30 cm × 30 cm 的天然土样一个,分别施加 12.5、25、50 kPa 的压力,观察在每级荷载作用下土样的变形量,观测时间为 0.25、1、2.25、4、6.25、9、16、25、36、49、64、81、100、144、196、256、324、400、1 380、1 440 min。加最后一级荷载时,还要读取沉降稳定时的变形量,读数时间为:2 880、4 320 min,此变形量作为本级荷载作用下的最终沉降量。

(2) 取初始结构相似、规格为 20 cm × 20 cm ×

20 cm,30 cm × 30 cm × 30 cm 和 40 cm × 40 cm × 40 cm 的重塑土样各一个,分别施加 10、20、30、40、50 和 60 kPa 的压力,观察土样的变形量,观测时间、间隔和最终沉降量的获取方法与天然土样的方法相同。

(3) 比较 (1) 和 (2),分析不同初始结构状态时,土体变形规律的差异。

2 试验数据分析

通过对广州市天雄布市 20 cm × 20 cm × 20 cm 天然土样 (2 个) 和 30 cm × 30 cm × 30 cm 天然土样在无侧限条件下的固结变形数据整理,得到其 $S-P$ 曲线如图 2 和 3。

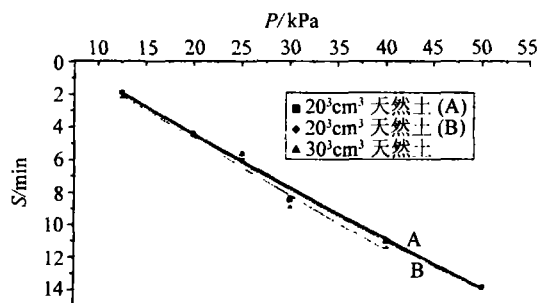


图2 代表性大尺寸天然土样 $S-P$ 曲线

Fig.2 $S-P$ curve of representative large-sized natural soft clay samples

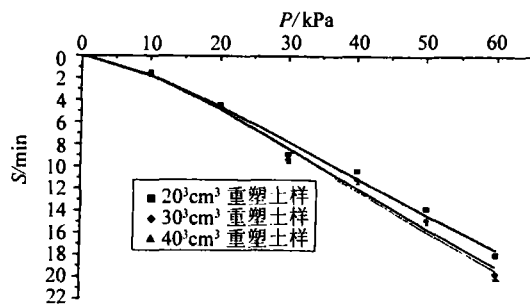


图3 代表性大尺寸重塑土样 $S-P$ 曲线

Fig.3 $S-P$ curve of representative large-sized remolded soft clay

通过数学拟合,得到的各曲线方程见表 1。

由表 1 可见,无论是天然土样还是重塑土样,在一定的压力下,其变形具有类似的规律性,可用同一个数学方程来表示;并且,在相同的压力下,重塑土的变形沉降量比天然土要稍大,这是土的天然结构被破坏,强度下降造成的。由于最终沉降量 S 与压力 P 和土体的初始结构状态之间存在相应的数学关系: $S(t) = (F(P) + f(Ks))$, 因而,任意时刻的沉降量就可以表示为与压力、结构初始状态和时间的关系,从而,获得同时考虑土体结构初始状态和压力作用时任意时刻沉降量的计算模型:

$$S(t) = (F(p) + f(Ks)) \cdot g(t)$$

表 1 广州天雄布市大尺寸天然土样和重塑土样试验结果分析

Tab.1 Testing results of large-size soft clay samples in natural and remolded state

土样规格	结构状态	初始结构状态		S-P 曲线方程
		孔隙比 e_0	内聚力 C_0/kPa	
20 cm × 20 cm × 20 cm (A)	天然土	1.424	6.86	$S = -2.65 + 76.6 (1 - e^{-p/203.5})$
20 cm × 20 cm × 20 cm (B)	天然土	1.424	6.86	$S = -2.46 + 99.6 (1 - e^{-p/278.2})$
30 cm × 30 cm × 30 cm	天然土	1.434	6.86	$S = -2.4 + 187.2 (1 - e^{-p/515})$
20 cm × 20 cm × 20 cm	重塑土	1.612	4.1	$S = -0.08 + 101 (1 - e^{-p/250}) - 4 (1 - e^{-p/13})$
30 cm × 30 cm × 30 cm	重塑土	1.612	4.1	$S = -0.02 + 111.5 (1 - e^{-p/250}) - 4.8 (1 - e^{-p/13})$
40 cm × 40 cm × 40 cm	重塑土	1.612	4.1	$S = -0.01 + 113.2 (1 - e^{-p/250}) - 4.8 (1 - e^{-p/13})$

因此，为探讨土体受力和变形的尺寸效应影响，还必须对不同规格而又具有相似的初始结构状态的样品施以不同的压力，以观察在不同压力作用下土体变形的尺寸效应。

3 软粘土尺寸效应分析

3.1 软粘土变形尺寸效应的试验分析

本次研究取初始结构相同的三个土样，尺寸分别为：20 cm × 20 cm × 20 cm，30 cm × 30 cm × 30 cm 和 40 cm × 40 cm × 40 cm，在同样的受荷面积下，施加同步规律变化的一组压力（压力范围 10 ~ 60 kPa），样品的尺寸越大，则其某一时刻的变形量和稳定变形量就越大，变形的增加量也越大（图 2、图 3）。显然，这就是土样侧向变形导致的结果，也就是土样尺寸效应对变形的影响结果。

3.2 土体沉降量计算的尺寸效应修正与推广

为了探讨尺寸效应对于变形量的影响，首先定义土样尺寸为土样体积 V 和土样受荷面积 S 的乘积，用 Y 表示。

若以 S_i/S_j 表示相同压力下，不同尺寸土样的沉降稳定值之比，作纵坐标，以 Y_i/Y_j 表示土样的尺寸之比，作横坐标，则可以得到压力从 10 ~ 60 kPa 的一组 S_i/S_j 与 Y_i/Y_j 的关系曲线（图 4），通过曲线拟合，得 S_i/S_j 与 Y_i/Y_j 的关系式为：

$$S_i/S_j = (Y_i/Y_j)^A \tag{1}$$

其中 A 是尺寸效应影响指数。

根据压力为 10, 20, 30, 40, 50, 60 kPa 时的 A 值变化曲线（图 5），得到：

$$A = P/(C_1 * P + C_2) \tag{2}$$

其中： P 为压力， C_1 和 C_2 为系数

由式（1）、（2），得

$$S_i = S_j (Y_i/Y_j)^{P/(C_1 * P + C_2)} \tag{3}$$

其中， S_j 为大尺寸土样在一定压力 P 下，室内模拟试验的稳定沉降量（与最终沉降量相对应）； S_i 为任意尺寸土体的最终沉降量。若将 S_i 取为一般

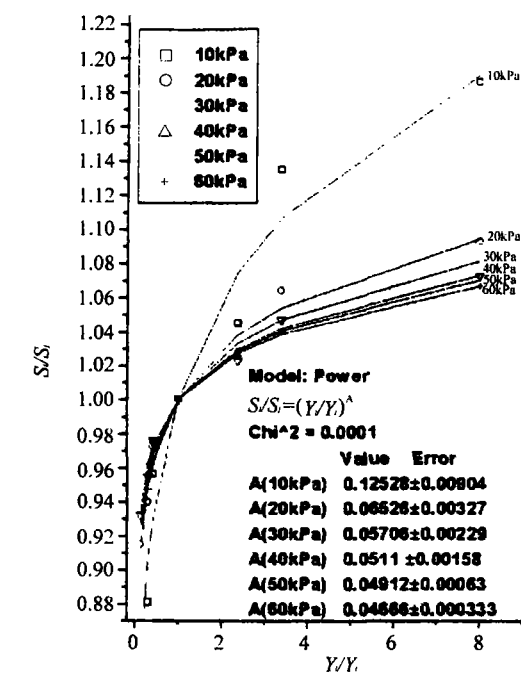


图 4 重塑土样 $(S_i/S_j) - (Y_i/Y_j)$ 曲线
Fig.4 $(S_i/S_j) - (Y_i/Y_j)$ curves of remolded soil samples

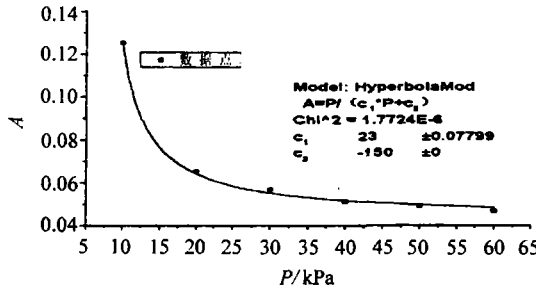


图 5 大尺寸重塑土样品室内固结试验尺寸影响系数
Fig.5 Size-affecting coefficient of large-size remolded soil samples of chamber consolidation test

工程场地变形空间范围，则该公式可对应于一般工程现场土体沉降量计算式。

4 工程应用

将以上所建立的模型应用于深圳国际机场淤泥加固计算中，根据室内模拟试验得稳定沉降量与一

般场地变形空间范围的沉降量之间的试验数值关系,计算出不同级别应力下的沉降量,加上试验前淤泥在填土作用下的沉降量,并与实际沉降量做对比,吻合良好,所得结果如表 2。利用室内模拟试验得到的 $S=f(K_s)$ 关系式,结合变形随时间变

化的关系式 $F(t)$ 和土样的尺寸效应表达式 D 就可以得到现场土体的 $S=G(K_s,t,D)$ 关系式,从而预测土体在任意时刻的沉降量。对深圳机场载荷试验在 40 kPa 时的沉降量进行检验,计算值和测量值比较接近(见表 3)。

表 2 承载试验和沉降量计算值¹⁾

Tab.2 Comparison of settlements between bearing testing data and calculation data in Shenzhen International Airport /mm

压力/kPa	20 cm×20 cm×20 cm		30 cm×30 cm×30 cm		40 cm×40 cm×40 cm		荷载试验 读数
	总沉降量	实验沉降量	总沉降量	实验沉降量	总沉降量	实验沉降量	
40	20.863	4.511	20.96	4.527	22.749	4.599	4.15
60	26.219	10.768	27.766	11.333	29.529	11.379	9.05
80	31.821	15.370	32.139	15.706	33.885	15.735	13.6
100	39.946	23.495	40.424	23.991	42.136	23.986	20.5
120	47.469	31.018	48.093	31.660	49.775	31.625	27.2
140	54.419	37.868	55.178	38.745	56.835	38.685	35.2
160	60.838	44.387	61.720	45.287	63.355	45.205	43.5
180	66.764	50.313	67.760	51.327	69.375	51.225	56.5

1)试验前淤泥在填土作用下的沉降量:20 cm³ 为 16.352mm,30 cm³ 为 17.492mm,40 cm³ 为 18.150mm

表 3 深圳国际机场软基沉降预测结果

Tab.3 Settlements prediction of soft ground in Shenzhen International Airport

t/min	0	0.25	30	60	120	240
观测沉降量/mm	1	2.7	3.5	3.7	3.9	4.0
计算沉降量/mm	0	1.57	2.554	2.773	3.023	3.311

5 结 论

(1) 设计了不同规格的大尺寸土样的固结模拟试验,这种试验方法能较好地模拟工程土体的实际受力环境和渗流条件,可较好的分析土体的变形过程和规律性。开展大尺寸土样的室内模拟试验,对于探讨软土地基变形和沉降问题是一种值得重视的方法;

(2) 建立了软土样品尺寸的影响效应模型,讨论了土样的尺寸效应与沉降影响的定量关系,从而,进一步推广为广义的适于实际土体变形的沉降计算模型;该模型在深圳国际机场的软基沉降预测中进行了初步应用,取得了较好的效果;表明了模型的可靠性。

参考文献:

[1] 周江平,彭雄志.土体抗剪强度的尺寸效应[J].西南交

通大学学报(自然科学版),2005,40(1):77-81.
[2] 李伟诚.振动台大型剪力盒试验砂土孔隙水压之激发[D].台北:台湾大学土木工程学研究所,2002.
[3] 周江平,彭雄志,赵善锐.纤维束强度理论与土体抗剪强度的尺寸效应研究[J].铁道学报,2005,27(1):98-101.
[4] 周镜.第八届亚洲土力学及基础工程会议技术汇报-大会概况及特邀报告简介[J].岩土工程学报,1988(3):41-44.
[5] 丁多文.土的本构关系的发展与新进展[J].岩土力学,1995(4):311-313.
[6] SAIICHI, S. Simplified deformation analysis for embankment foundation using elastic-plastic model [J]. Soils and Foundations, 1996(2):1-11.
[7] 沈珠江.软粘土工程特性和软土地基设计[J].岩土工程学报,1998(1):100-111.
[8] BRAND E W. 软粘土工程学[M].北京:中国铁道出版社,1991.

Research on Consolidation Deformation Test of Large-Size Soft Clay Samples

ZHAO Cui-ying¹, ZENG Qiang², LI Ya-sheng¹

(1. Department of Applied Mechanics and Engineering//Research Centre of Underground Engineering and Information Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Guangdong Provincial Institute of Electrical Power Design, Guangzhou 510280, China)

Abstract: Due to the limits of routine chamber consolidation test, a new large-size consolidation test for the natural soil samples and remolded ones of soft clay are designed in which the loads are reduced according to a certain scale to actual ones. The four sides around soil samples are designed as elastic and plastic boundary with organic glass material on which distributed many small drainage holes according to a certain density so as to simulate the seepage condition of the boundary of sample. The sizes of soil samples are much bigger than that of the routine ones, such as 20 cm × 20 cm × 20 cm, 30 cm × 30 cm × 30 cm and 40 cm × 40 cm × 40 cm. The process of experiment should be well reflecting the stress environment and deformation regularity as much as possible, then the consolidation deformation regularities are studied. The settlement model of large sized soft clay samples under some certain pressures is built, and the size effect of the deformation of soft clays is discussed. The mathematical model for the calculation of settlement of soft clay is extended to a general one for the calculation of soils in natural cases by considering the size effect. By applying this model to the prediction of soft ground in Shenzhen International Airport, the reliability of the model is testified.

Key words: soft clay; large-sized soil samples; consolidation deformation; simulating test; size effect