

文章编号: 1007-2861(2009)01-0099-06

重塑上海软土的压缩特性试验

周 科, 孙德安

(上海大学 土木工程系, 上海 200072)

摘要: 对上海第4层淤泥质软土重塑试样, 进行等向压缩试验、 K_0 试验及单向压缩试验. 分析不同试验条件下压缩指数和膨胀指数的关系, 给出不同试验条件下压缩指数 C_c 的大小. 对8次等向压缩-回弹试验结果进行了分析, 比较了膨胀指数 C_s 的大小. 通过对2次 K_0 试验结果的分析, 给出重塑上海软土在加载—卸载—再加载过程中, K_0 随 σ_v 的变化规律及 K_0 与 OCR(超固结比)的关系. 讨论在3种不同试验条件下, 卸载过程中膨胀指数 C_s 与 OCR 的关系. 通过室内试验对压缩性参数的确定, 为进一步建立重塑上海软土的本构模型提供了基础.

关键词: 重塑上海软土; 等向压缩试验; K_0 试验; 压缩指数; 膨胀指数; 超固结比

中图分类号: TU 411.5

文献标志码: A

Experiments on Compression Characteristics of Remoulded Soft Clay in Shanghai

ZHOU Ke, SUN De-an

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Differences in compression index (C_c) and swelling index (C_s) of remoulded soft clay in Shanghai measured by different test methods are studied. The tests include isotropic compression test, K_0 test and one-dimensional compression test. Differences in compression index are compared based on the results of three isotropic compression tests, two K_0 tests, and three one-dimensional compression tests. And differences in swelling index are also compared based on the results of one-dimensional compression tests and isotropic compression-unloading-and-reloading tests. Variation in K_0 due to the change of σ_v is identified from K_0 tests, and the relationship between K_0 and over consolidation ratio (OCR) is also given. The relationship between C_s and OCR is studied using the results of the three different kinds of tests. Results of these tests are a basis of construction of constitutive models of remoulded soft clay in Shanghai.

Key words: remoulded soft clay in Shanghai; isotropic compression tests; K_0 test; compression index; swelling index; over consolidation ratio

通常所说的上海软土是指暗绿色硬土层以上的 土层^[1], 其中第3层淤泥质粉质粘土和第4层淤泥

收稿日期: 2007-10-08

基金项目: 上海市教委基金资助项目(06AZ106)

通信作者: 孙德安(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为非饱和土力学和土的本构模型. E-mail: sundean06@163.com

质粘土对工程影响较大. 它们具有空隙较大、压缩变形大、渗透性小等特性. 由于这些特性, 考虑到其上建筑物的安全及正常使用, 深入了解和掌握上海软土的变形特性和强度特性非常必要. 在探明上海软土变形和强度特性的基础上, 建立能描述各种复杂应力条件下上海软土力学性质的本构模型, 用于准确预测各种建筑物的力学行为, 这是岩土工程专家们的研究目标之一.

在上海软土的本构模型研究方面, 同济大学的师生们几十年来分别从试验、理论及工程实践方面做了不懈的努力, 取得了许多关键性的成果. 从20世纪70年代后期到80年代, 同济大学俞调梅、郑大同及张问清教授就高层建筑与地基基础共同作用课题, 先后引进和改进了4种主要模型: 弹性模型(有限层元数值解)、Duncan-Chang模型、Lade-Duncan模型和理想弹塑性模型^[2]. 1980年, 魏道堦、胡中雄通过上海软土重塑土膏固结试验, 研究了上海浅层地基土的压缩性参数^[3]. 这个研究成果至今还在工程界中使用. 20世纪80年代后期到90年代, 赵锡宏、袁聚云、姜洪伟等根据真三轴试验结果, 结合Lade-Duncan模型, 发展了三维弹塑性模型^[4], 并在关口-太田(Sekiguchi-Ohta)模型的基础上, 提出了软土的三维各向异性弹塑性模型^[2].

纵观国内及国际上土体的单硬化参数本构模型^[5], 英国剑桥大学Roscoe等人于1958~1963年间提出的剑桥模型是建立较早也较为完善的一个塑性模型. 该模型以试验为基础, 基本概念明确, 模型参数简单易测(试验参数只有3个). 因此, 它受到国内外岩土力学学者和岩土工程界的普遍重视, 并在工程实践中得到广泛的推广和应用. 剑桥模型适用于正常固结粘土和弱超固结粘土. 在上海软土地基中作为建筑物主要持力层的第3和第4层土为弱超固结土(OCR为1.1左右)^[3], 故我们认为用剑桥模型来描述上海软土的变形特性是可行的.

剑桥模型的3个参数可在常规三轴仪上进行试验确定, 其中压缩指数与膨胀指数是用等向压缩与膨胀试验确定. 现在工程实践中大多数只做单向压缩与膨胀试验. 比较两种不同试验所得的模型参数值, 并得出两者的关系, 这有着重要的工程实践意义. 本研究通过室内等向压缩试验、 K_0 试验和单向压缩试验, 确定并比较了由这3种试验所做成的 C_c 、 C_e 的大小. 另外, 研究了 K_0 变化规律及 K_0 与OCR之间的关系, 以及 C_c 与OCR之间的关系, 为以后更好地建立上海软土的弹塑性本构模型建立试验基础.

1 试验概况

1.1 试验所用材料

试验用土为上海典型的第4层淤泥质粘土. 把从施工现场取来的土样经过长时间的浸泡, 充分搅拌, 制成饱和泥浆, 然后倒入直径20 cm, 高25 cm的制样桶中, 分级加载, 固结成样. 最后一级垂直荷载为80 kPa, 固结3 d. 然后把土样从固结桶中取出, 用多层保鲜膜裹紧, 放入密闭容器中储存. 在试验时, 根据试样尺寸切取固结土样的一部分, 切削土样制成试样. 土样的物理指标如表1所示.

表1 重塑上海软土的物理指标

Table 1 Physical index of remoulded Shanghai clay

类型	数值
颗粒密度 $G_s / (g \cdot cm^{-3})$	2.70
液限 $w_l / \%$	35.5
塑限 $w_p / \%$	22.0
初始含水量 $w_0 / \%$	36.0 ~ 40.2
初始空隙比 e_0	0.973 ~ 1.085

1.2 试验仪器

使用试验仪器有常规应变控制式三轴仪、 K_0 试验仪和单向固结仪.

1.3 试验方法简介

1.3.1 等向压缩试验

先把土样切成三轴试验小型试样, 即 $h = 80.0$ mm, $d = 39.1$ mm. 然后装入三轴压力室中进行分级加载与卸载. 为减小试样两端的摩擦作用, 没有使用通常用的透水石, 而用涂有硅脂、中间剪有小孔的橡皮膜代替^[6]. 这样可使试样的变形比较均匀. 为了加快试验时排水速度, 在试样四周贴有滤纸条, 并在试样两端与橡皮膜之间放有滤纸.

在加载时, 对主要研究 C_c 值的试验, 一般是按照10, 20, 40, 60, 90, 135, 200, 320, 640 kPa的加载顺序依次加载, 每级荷载固结2 d, 试验做了3组. 对主要研究 C_e 值的试验, 一般先在10 kPa固结2 d, 然后直接加到一个较高荷载(如640 kPa), 再进行回弹—再加载试验, 每级荷载依然固结2 d, 这种试验做了8组.

1.3.2 K_0 固结试验

用环刀切土样, $h = 40.0$ mm, $d = 61.8$ mm. 土样装入压力室中, 再分级加载—回弹—再加载. 每级荷载固结1.5 d, 该试验做了2组.

1.3.3 单向压缩试验

用环刀切土样, $h = 20.0$ mm, $d = 61.8$ mm. 土样装

入压力室中,再分级加载—回弹—再加载.具体步骤参照文献[7].每级荷载固结 1 d,该试验共做了 3 组.

2 试验结果与分析

2.1 压缩指数 C_c 比较

由 3 次等向压缩试验的 $e-\log p$ 曲线,通过计算其直线部分的斜率可以求出压缩指数 C_c 的值.1,2,3 组试验求得 C_c 值分别为 0.255,0.264,0.261,平均值为 0.260(见图 1).2 次 K_0 试验求得的 C_c 值分别是 0.268,0.282,平均值为 0.275(见图 2).

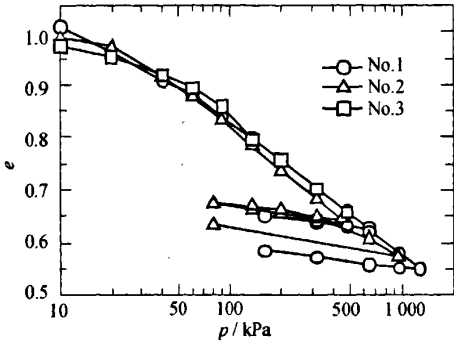


图 1 等向压缩试验 $e-\log p$ 曲线
Fig.1 $e-\log p$ curves from isotropic compression tests

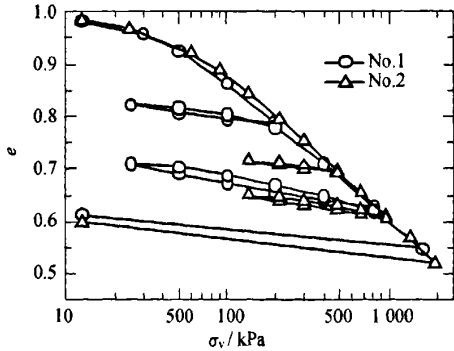


图 2 K_0 试验 $e-\log \sigma_v$ 曲线
Fig.2 $e-\log \sigma_v$ curves from K_0 tests

由 3 次单向压缩试验求得的 C_c 值分别为 0.290,0.291,0.294,平均值为 0.292(见图 3).从试验原理上说, K_0 试验和单向压缩试验测得的数据应该一致,因为它们都是有侧限的单向压缩固结试验.而实测数据 K_0 试验所测得的值偏小,可能是 K_0 试验中试样周围的橡皮膜影响所致.

等向压缩试验测得的 C_c 值比单向压缩试验测得的值小大约 5% ~ 10% 左右.因此,如果用单向压

缩试验来测定 C_c 值作剑桥模型的压缩指数用时,则应该对所测得的值折减 5% ~ 10%.

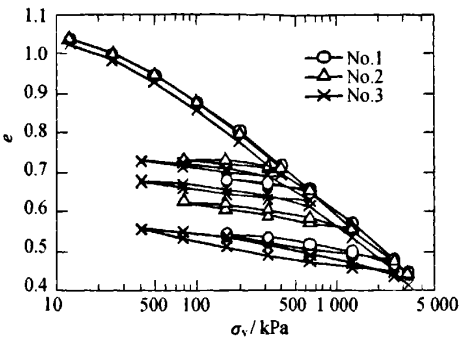


图 3 单向压缩试验 $e-\log \sigma_v$ 曲线
Fig.3 $e-\log \sigma_v$ curves from one-dimensional compression tests

2.2 膨胀指数 C_s 值比较

根据等向压缩试验的回弹—再加载部分拟合直线斜率,可求出重塑上海软土的膨胀指数 C_s .图 4 为 8 次等向压缩试验的回弹—再加载部分曲线.8 次试验的 C_s 平均值为 0.049 06,标准偏差 s 为 0.007 39.数据较为集中.据图 2 和图 3,可分别求出 K_0 试验和单向压缩试验的膨胀指数 C_s 的值.它们的平均值为 0.047 35,标准偏差 s 为 0.008 25. K_0 和单向压缩试验卸载回弹时 K_0 会增加, p/σ_v 增加,所测得的 C_s 应是等向试验测得的近似值^[8].但由上面数据可知,用等向压缩试验测得的 C_s 值与单向压缩试验测得的值大致相等.故剑桥模型的膨胀指数可直接用单向压缩试验测定 C_s 值.

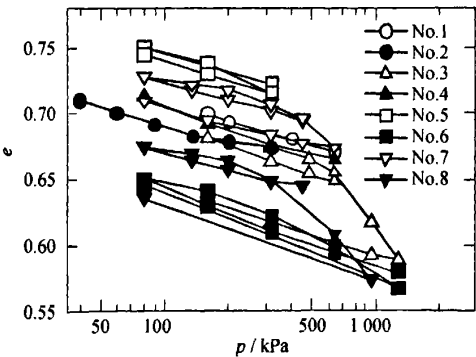


图 4 等向压缩试验回弹—再加载部分 $e-\log p$ 曲线
Fig.4 Unloading-reloading curves from isotropic stress tests

2.3 K_0 试验中 K_0 值的变化规律及其与 OCR 的关系

K_0 为水平方向有效应力与竖直方向有效应力之比值,即

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \quad (1)$$

对于 K_0 试验,即有侧限的一维正常压缩试验,如果只进行加载,中间没有回弹和再加载, K_0 值对某一特定土应该为定值^[9],即 $K_0 = K_{0nc}$ (K_{0nc} 为正常压缩时的 K_0 值). Jaky (1944 年) 提出^[10]:

$$K_{0nc} = \left(1 + \frac{2}{3} \sin \phi'\right) \left(\frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'}\right), \quad (2)$$

式中, ϕ' 为有效内摩擦角,其简化近似公式为

$$K_{0nc} \approx 1 - \sin \phi'. \quad (3)$$

对重塑上海软土,根据我们做的常规三轴排水剪切试验,确定 ϕ' 为 32° . 据式(3)求出 $K_{0nc} = 0.47$, 由图 5 的 σ_v - σ_h 关系和图 6 的 K_0 - σ_v 关系也可算出 K_{0nc} 大约为 0.47.

由图 5 和图 6 可知,在回弹一再加载过程中, K_0 值是变化的,其最大值可以达到 1.6 左右. 在卸载时, K_0 值迅速增大;在再加载时, K_0 值迅速减小,其减小速率比卸载时的增大速率要大.

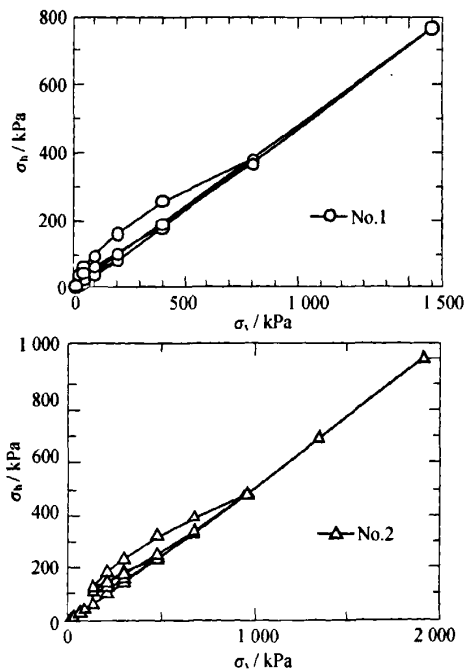


图 5 σ_v 和 σ_h 关系图

Fig. 5 Relationship between σ_v and σ_h

在很多岩土工程问题中,获取土层的有效

侧压力值是十分必要的. 这个信息可直接用于一些非线性力学分析;或者在通过剪切试验来获取土样的变形特征之前,必须使土样再固结以达到原位应力状态. 因此,了解侧向静止土压力系数随超固结比 OCR 的变化规律是相当重要的,其中

$$OCR = \frac{\sigma'_{vmax}}{\sigma'_v}, \quad (4)$$

式中, σ'_{vmax} 是土样曾经受过的最大有效竖向应力, σ'_v 取现在的荷载与前一级荷载的中间值.

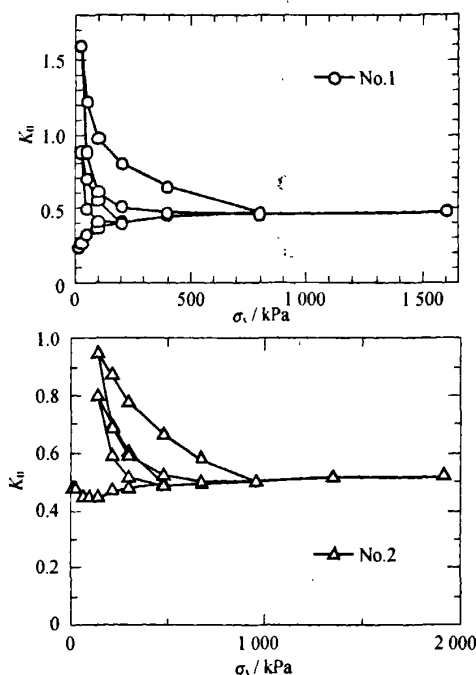


图 6 K_0 与 σ_v 关系图

Fig. 6 Relationship between K_0 and σ_v

关于 K_0 和 OCR 在卸载阶段的关系, Schmidt (1966 年) 提出下面的公式^[10]:

$$\frac{K_0}{K_{0nc}} = OCR^n, \quad (5)$$

式中, n 对于特定的土是一个常量. 上面已确定重塑上海软土 $K_{0nc} = 0.47$, 把它代入式(5). 试验数据用 $K_0/0.47$ 和 OCR 来处理, 把它们画在双对数坐标上, 其拟合直线的斜率就是 n . 由图 7 中拟合直线的斜率可知重塑上海软土的 $n = 0.356$. Ladd 等人指出 n 值的变化范围从低塑性粘土的 0.42 到高塑性粘土的 0.32^[10]. 重塑上海软土的 n 值正好在这个范围内, 即对重塑上海软土有

$$\frac{K_0}{K_{0nc}} = OCR^{0.356} \quad (6)$$

关于再加载阶段 K_0 与 OCR 的关系还没有人提出过,我们认为可以借鉴式(5). 由图 8 中拟合直线的斜率可求得再加载阶段 $n=0.223$, 即有

$$\frac{K_0}{K_{0nc}} = OCR^{0.223}, \quad (7)$$

由图 8 知其拟合离散性较大.

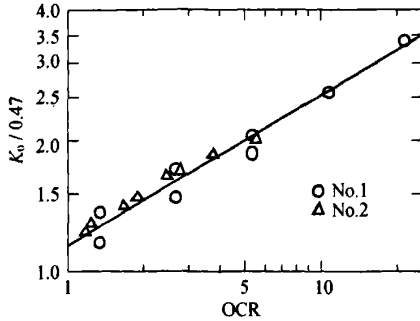


图 7 卸载时 $K_0/0.47$ 与 OCR 关系

Fig. 7 Relationship between $K_0/0.47$ and OCR under unloading

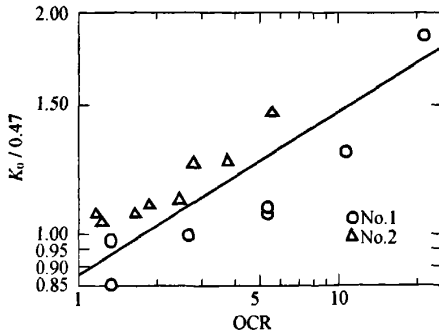


图 8 再加载时 $K_0/0.47$ 与 OCR 的关系

Fig. 8 Relationship between $K_0/0.47$ and OCR under reloading

2.4 在卸载过程中膨胀指数 C_s 与 OCR 的关系

分别把 8 次等向压缩试验, 2 次 K_0 试验和 3 次单向压缩试验卸载过程中 C_s 和 OCR 的试验点画在半对数坐标图 9、图 10 和图 11 上, 其中 OCR 依然用式(4)所示方法计算. 由图 9、图 10 和图 11 可知, 直线拟合较好. 分别写出其表达式为

$$\text{等向: } C_s = 0.0490 \log(OCR) + 0.0288, \quad (8)$$

$$K_0: C_s = 0.0343 \log(OCR) + 0.0285, \quad (9)$$

$$\text{单向: } C_s = 0.0353 \log(OCR) + 0.0272. \quad (10)$$

由式(8)~(10)知, K_0 试验与单向压缩试验的原理是一致的, 故也表现为 C_s 与 OCR 的关系中, 斜率和截距相差不多. 与等向试验相比, 它们的截距也相差不多, 但等向的斜率要比 K_0 和单向的大.

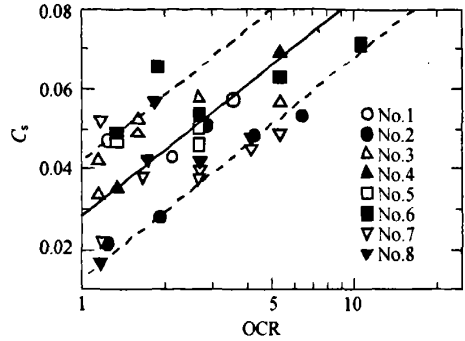


图 9 等向压缩试验 C_s 与 OCR 的关系图(卸载)

Fig. 9 Relationship between C_s and OCR under isotropic unloading

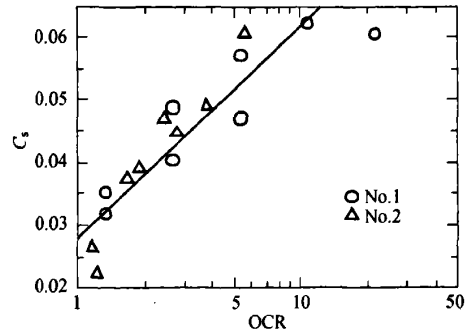


图 10 K_0 试验 C_s 与 OCR 关系图(卸载)

Fig. 10 Relationship between C_s and OCR under K_0 unloading

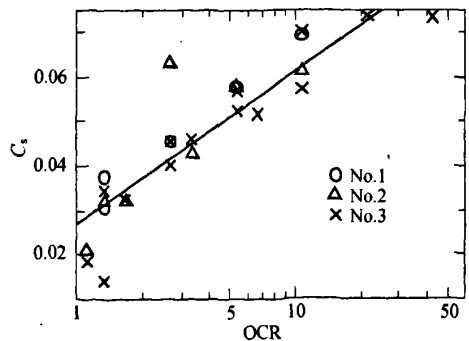


图 11 单向压缩试验 C_s 与 OCR 关系图(卸载)

Fig. 11 Relationship between C_s and OCR under one-dimensional unloading

3 结 论

我们用3种试验仪器对重塑上海软土进行了压缩试验和膨胀试验,比较了等向压缩试验和单向压缩试验所得到的压缩指数和膨胀指数的异同,得到了重塑上海软土的 K_0 值,及其随超固结比变化的规律,最后研究了膨胀指数与超固结比的关系.具体结论如下:

(1) 等向压缩试验测得的 C_c 值比单向压缩试验测得的值小5%~10%左右.等向压缩试验测得的重塑上海软土的 C_c 值为0.26左右;

(2) 等向压缩试验所测得的 C_c 值与单向压缩试验测得的近似相等,剑桥模型的膨胀指数可直接用单向压缩试验测定 C_c 值;

(3) 重塑正常固结上海软土的 K_0 值 $K_{0nc} = 0.47$,卸载阶段 K_0 与OCR的关系为 $K_0/K_{0nc} = OCR^{0.356}$,再加载阶段 K_0 与OCR的关系为 $K_0/K_{0nc} = OCR^{0.223}$;

(4) 在卸载阶段, C_c 与OCR的关系在半对数坐标系中大致为线性关系,其拟合较好,直线表达式如式(8)~(10)所示.

本文对重塑上海软土的压缩特性参数进行了初步研究,为今后更好地建立上海软土弹塑性本构模型提供了试验基础.

参考文献:

- [1] 黄绍铭,高大钊.软土地基与地下工程[M].北京:中国工业出版社,2005:18-32.
- [2] 赵锡宏,姜洪伟,袁聚云,等.上海软土各向异性弹塑性模型[J].岩土力学,2003,24(3):322-330.
- [3] 魏道焱,胡中雄.上海浅层地基土的前期固结压力及有关压缩性参数的试验研究[J].岩土工程学报,1980,2(4):13-22.
- [4] 姜洪伟,赵锡宏.软土三维各向异性弹粘塑性本构关系[J].同济大学学报,1998,26(2):153-156.
- [5] 殷宗泽.土体本构模型剖析[J].岩土工程学报,1996,18(4):95-97.
- [6] 张诚厚.上海粘土的准超压密特性[J].岩土工程学报,1982,4(3):62-69.
- [7] 中华人民共和国水利部.GB/T50123—1999,中华人民共和国国家标准——土工试验方法标准[S].北京:中国计划出版社,1999:83-89.
- [8] PAPADIMITRIOU A G, MANZARI M T, DAFALIAS Y F. On the calibration of a simple anisotropic plasticity model for soft clays [C]// The 11th International Conference of IACMAG. Prediction, Analysis and Design in Geomechanical Applications. Italy: Patron Editore, 2005:457-464.
- [9] WOOD D M. Soil behaviour and critical state soil mechanics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990:314-321.
- [10] WROTH C P, HOULSBY G T. Soil mechanics-property characterization and analysis procedures [C]// Proc 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1985:1-55.

(编辑:刘志强)