

文章编号: 1000-7598 (2011) 07-2128-05

# 考虑软土结构性的折线型强度公式及应用

高彦斌<sup>1,2</sup>, 郭永发<sup>1,2</sup>, 叶观宝<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘 要:** 结合上海某植物园堆山工程, 通过直剪试验及三轴剪切试验, 得到考虑软土结构性的折线型强度公式和不考虑软土结构性的直线型强度公式的参数, 采用这两种方法对山体荷载作用下不同位置处的软土地基的强度增长进行了预测, 并与现场十字板剪切试验结果进行了对比。结果表明: 由于该工程的软土地基具有明显的结构性, 采用直线型强度公式得到的地基强度增长量要大于采用折线型的增长量; 另外, 在应用考虑土的结构性的折线型强度公式时, 应该尽量采用三轴试验参数而不是直剪试验的参数, 这样得到的结果更接近十字板试验结果。

**关 键 词:** 软土; 强度增长; 折线型强度公式; 直剪试验; 三轴试验; 十字板剪切试验

**中图分类号:** TU 447

**文献标识码:** A

## Polygonal line strength equation of soft soil and its application considering soil structure

GAO Yan-bin<sup>1,2</sup>, GUO Yong-fa<sup>1,2</sup>, YE Guan-bao<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Education Ministry, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Strength increment of soft soil of a real project in Shanghai is studied. Strength parameters of polygonal line equation which considering the effect of soil structure and linear equation which didn't consider soil structure are obtained by direct shear test and triaxial test. Shear strength increment is calculated with these parameters by the two methods, and compared with the field results obtained by vane shear test. Because of soil structure, strength increment calculated by linear equation is greater than that by the polygonal line equation. When using polygonal line equation to predict soil strength, the result is more close to result of vane shear test. And it is suggested that the strength parameters should be obtained by triaxial test.

**Key words:** soft soil; strength increment; polygonal line strength equation; direct shear test; triaxial test; vane shear test

## 1 引 言

在软土地区的路基工程、堆载预压地基处理工程及园林山体填筑工程中, 软土的强度增长预测是保证地基稳定性的重要研究内容之一。魏汝龙<sup>[1]</sup>认为, 土的强度理论主要有总应力法、有效应力法和有效固结应力法 3 种, 而有效固结应力法尤其适用于该类工程的强度增长预测。孔德金<sup>[2]</sup>、林孔镔<sup>[3]</sup>、赵维炳<sup>[4]</sup>也对强度增长公式进行了分析和讨论。这些理论及方法均是基于正常固结土和重塑土的抗剪强度理论, 可采用图 1 中的直线表示。

天然软土由于结合水的连接作用、土颗粒之间胶结及相互咬合作用而具有一定的结构强度<sup>[5]</sup>。

Henkel<sup>[6]</sup>、Burland<sup>[7]</sup>、Hoeg<sup>[8]</sup>和 Schmertmann<sup>[9]</sup>等国外学者研究了结构性软黏土的压缩和剪切特性, 我国学者洪振舜<sup>[10]</sup>、刘恩龙<sup>[11]</sup>、刘又云<sup>[12]</sup>、沈珠江<sup>[13]</sup>等也开展了相应的工作。大量的试验表明, 由于土体结构性的影响, 软土的强度包线不是直线型, 而是呈如图 1 所示的折线型<sup>[13]</sup>。沈珠江曾根据有效固结应力法提出了考虑软土结构性的折线型强度增长公式, 王军等<sup>[14]</sup>也曾给出了类似的公式。

总体上讲, 考虑软土结构性的强度增长理论的工程应用研究较少, 计算结果与现场实测值的对比研究鲜见报道。本文正是在有效固结应力法的基础上, 利用室内直剪固结快剪试验和三轴固结不排水剪试验结果, 采用考虑软土的结构性的折线型强度

收稿日期: 2009-11-20

基金项目: 上海市重点学科建设项目资助 (No. B308); 国家自然科学基金项目资助 (No. 40702051); 教育部留学回国人员科研启动基金资助。

第一作者简介: 高彦斌, 男, 1973 年生, 博士, 副教授, 主要从事软土力学特性及岩土工程数值模拟方面的研究工作。E-mail: yanbin\_gao@tongji.edu.cn

增长公式计算堆载作用下软土地基的强度及强度增长, 并与直线型强度公式及现场试验十字板剪切试验结果对比, 进一步研究折线型强度公式的应用。

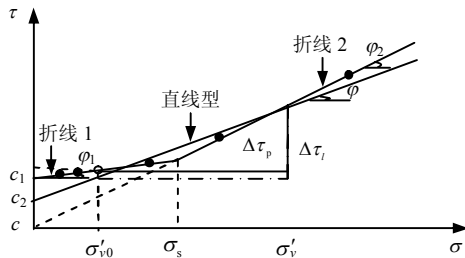


图1 软土抗剪强度模型

Fig.1 Shear strength models of soft soil

## 2 折线型强度公式

工程中广泛采用的直线型软土强度增长计算公式为<sup>[15]</sup>

$$\tau = \tau_0 + \Delta\sigma'_v \tan \varphi \quad (1)$$

$$\Delta\tau = \Delta\sigma'_v \tan \varphi \quad (2)$$

式中:  $\tau$  和  $\Delta\tau$  分别为土的抗剪强度和强度增量;  $\tau_0$  为地基土的天然抗剪强度;  $\Delta\sigma'_v$  为竖向有效应力增量;  $\varphi$  为土的内摩擦角。这个公式也就是图1中直线所示的直线型强度公式, 并未考虑土的结构性。

图1中折线为考虑软土结构性的强度模型。地基中某一点土体的原位有效应力为  $\sigma'_{v0}$ , 堆载后竖向有效应力为  $\sigma'_v$ , 在  $\sigma'_v$  达到土体结构强度  $\sigma_s$  之前, 土体的内摩擦角  $\varphi$  较小, 而黏聚力  $c$  较大; 当  $\sigma'_v$  超过土体的结构强度  $\sigma_s$  后, 土体的内摩擦角  $\varphi$  增大, 而黏聚力  $c$  减小。

当  $\sigma'_{v0} < \sigma'_v < \sigma_s$  时, 软土的抗剪强度  $\tau$  为

$$\tau = c_1 + \sigma'_v \tan \varphi_1 \quad (3)$$

式中:  $c_1$  和  $\varphi_1$  分别为土体屈服前折线1的黏聚力和内摩擦角。这种情况下软土强度增量  $\Delta\tau$  为

$$\Delta\tau = (\sigma'_v - \sigma'_{v0}) \tan \varphi_1 \quad (4)$$

当  $\sigma'_v > \sigma_s$  时, 软土的抗剪强度  $\tau$  为

$$\tau = c_2 + \sigma'_v \tan \varphi_2 \quad (5)$$

式中:  $c_2$  和  $\varphi_2$  为土体屈服后折线2的黏聚力和内摩擦角。 $c_2$  一般很小, 接近于0。这种情况下强度增量  $\Delta\tau$  为

$$\Delta\tau = (c_2 - c_1) + \sigma'_v \tan \varphi_2 - \sigma'_{v0} \tan \varphi_1 \quad (6)$$

图1所示的强度线可以通过直剪固结快剪试验和三轴固结不排水剪切试验获得。在有效固结应力法中, 图1的横坐标  $\sigma'_v$  对应的是这两种试验的固结应力  $\sigma'_c$ , 纵坐标  $\tau$  为试样破坏时的剪应力。图中的抗剪强度参数为  $c$  和  $\varphi$ , 对于直剪固结快剪试验, 分别表示为  $c_q$ 、 $\varphi_q$ ; 对于三轴固结不排水剪试验, 则分别表示为  $c_{cq}$ 、 $\varphi_{cq}$ , 这2个强度参数不同于  $c_{cu}$ 、 $\varphi_{cu}$ , 其具体含义见文献[1, 13]。

由图1和式(1)~(5)可见, 折线型强度公式计算的强度增量  $\Delta\tau_p$  和直线型强度公式计算的强度增量  $\Delta\tau_l$  的大小关系与堆载后地基土的有效应力  $\sigma'_v$  的大小有关, 在  $\sigma'_v$  较小的情况下, 也就是地基土中的有效应力增长不大的情况下, 由直线型强度公式计算得到的强度增量  $\Delta\tau_l$  往往要大于折线型强度公式计算得到增量  $\Delta\tau_p$ , 而在  $\sigma'_v$  较大的情况下则相反。

## 3 工程应用

### 3.1 工程概况

上海某植物园堆山工程场地地基土层分布见图2, 其中③<sub>1</sub>、③<sub>2</sub>层为饱和软土, 孔隙比大, 压缩性高, 承载力低。堆载山体设计堆高为7.5 m, 顶宽为16 m, 坡比为1:1.5。为保证山体分层填筑施工中软土地基稳定性, 采用塑料排水板进行地基处理, 板长为15 m, 并在山体两侧各设置厚度分别为1.5 m和2.5 m的反压层。

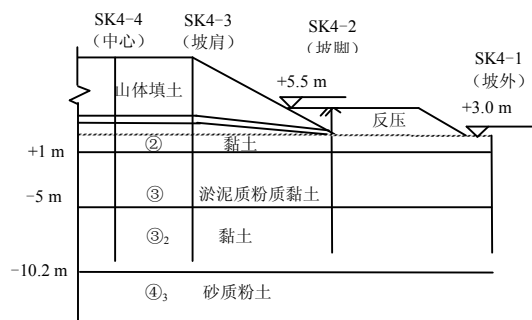


图2 上海某植物园堆山工程剖面图

Fig.2 Section of a land fill project in Shanghai

为研究山体堆载作用下地基土的强度增长规律, 在山体填筑施工结束后322 d进行了现场十字板剪切试验, 并钻孔取原状土样进行了室内剪切试验。此时堆载体中心最大沉降达到1.0 m, 超孔隙水压力在埋深3.5 m处为1 kPa, 6.5 m处为3 kPa, 8.5 m处为5 kPa, 10.5 m处为8 kPa。这些监测数

据表明, 试验时地基土的固结已基本完成。

### 3.2 抗剪强度试验

#### (1) 现场十字板剪切试验

十字板剪切试验孔共 4 个, 孔底标高为-9.5 m。4 个试验孔 SK4-1、SK4-2、SK4-3 和 SK4-4 分别位于堆载坡脚外 22 m、坡脚、坡肩及堆载顶中心处 (见图 2), 以得到山体堆载作用下地基土中不同位置处的强度增长规律。孔 SK4-1 距离堆载区域较远, 而认为能够代表天然软土的原始强度。试验过程中, 为减小对软土扰动, 当十字板板头接近测试深度 0.5 m 时, 采用人工压入的方法, 将十字板板头压到指定的测试位置, 然后静止 2 min。试验过程中, 采用较小的扭转剪切速率, 约为 0.15 %/s, 记录峰值强度作为地基土不排水抗剪强度。

图 3 给出了十字板剪切试验得到的 4 个位置不同深度处土的不排水抗剪强度值  $S_u$ 。从图 3 中可以看出, 在堆载中心和坡肩位置, 地基土的强度增长量较大, 而坡脚位置处地基土的强度增长则较小。另外, 随着深度的增加, 地基土的强度增长量逐渐减小。

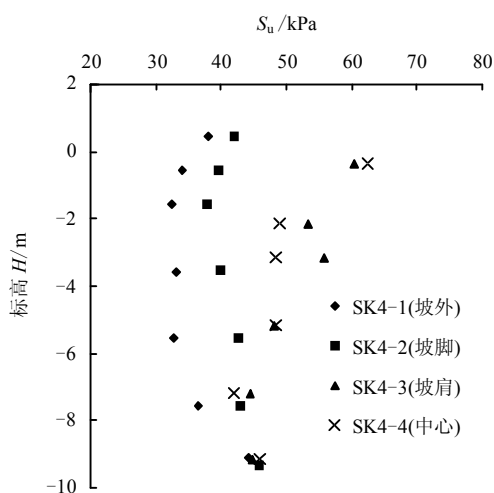


图 3 现场十字板剪切试验结果  
Fig.3 Results of vane shear test in site

#### (2) 室内剪切试验

在 SK4-1 孔中采用直径 100 mm 薄壁取土器采取③<sub>1</sub>层淤泥质粉质黏土土样, 取土深度为 3.1 m (标高为-0.1 m)、3.7 m (标高为-0.7 m) 和 4.7 m (标高为-1.7 m)。由于该取土孔远离堆载区域, 保证了土样处于天然状态。土样取出后, 及时运回试验室进行直剪固结快剪试验和三轴固结不排水试验。

直剪固结快剪试验采用竖向固结压力  $\sigma_{vc}$  分别为 25、50、75、100、200 kPa 和 400 kPa。三轴固

结不排水试验试验采用的固结压力  $\sigma_{3c}$  分别为 25、25、50、100、200 kPa 和 400 kPa, 破坏时对应的竖向压力  $\sigma_1$  分别为 56、67、137、198、383 kPa 和 766 kPa。图 4 为直剪固结快剪试验结果。图 5 为三轴固结不排水试验结果, 图中横坐标  $\tau = (\sigma_1 - \sigma_{3c})/2$ 。由试验结果拟合得到的折线型和直线型强度参数也分别列在图中。

从这些试验结果可以看出, ③<sub>1</sub>层淤泥质粉质黏土具有明显的结构性, 结构强度  $\sigma_s$  约为 100 kPa。因此, 采用折线型强度模型要比直线型强度模型更合理一些。另外, 从试验得到的强度参数来看, 由三轴试验得到的强度参数要明显大于直剪试验得到的参数。

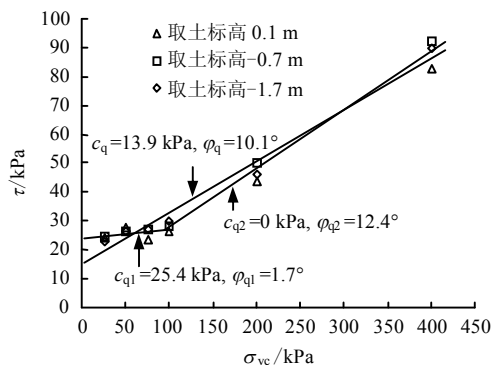


图 4 直剪固结快剪试验结果  
Fig.4 Results of consolidated quick shear test

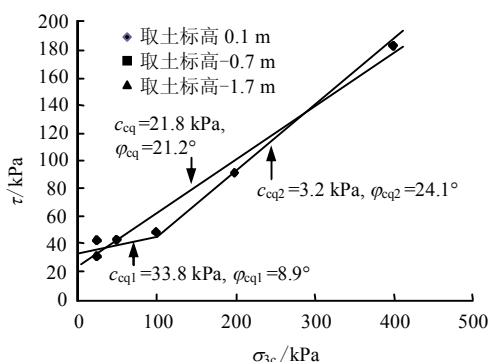


图 5 三轴固结不排水剪试验结果  
Fig.5 Results of consolidated undrained triaxial test

### 3.3 竖向附加应力状态分析

在应用强度增长公式时, 需要得到堆载作用下地基中每一点的附加应力。目前地基中某点附加应力计算的方法是应用基于半无限空间弹性体的 Boussinesq 基本解<sup>[15]</sup>积分得到。作者将反压层作为条形荷载, 将堆载分解为三角形和条形荷载, 分区计算附加应力, 之后进行叠加 (见图 6), 便可得到反压和山体荷载共同作用下地基土中的附加应力

$\Delta\sigma_z$ 、 $\Delta\sigma_x$  以及  $\Delta\tau_{xz}$ 。再根据弹性力学公式计算大主应力  $\sigma_1$  及小主应力  $\sigma_3$ 。这些计算结果均为总应力，需减去超孔隙水压力，即得到有效应力  $\sigma'$ 。

表 1 列出了该植物园工程深度为 3.5 m 处的③<sub>1</sub> 层淤泥质粉质黏土在山体荷载作用下的应力计算结果。

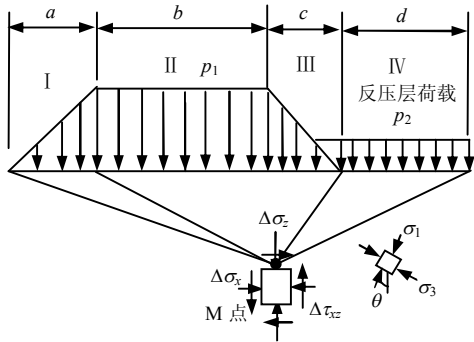


图 6 荷载作用下地基中附加应力  
Fig.6 Additional stress under fill load

该位置处天然地基竖向初始有效应力  $\sigma'_{10}$  为 40 kPa，静止土压力系数  $K_0$  取该工程勘察报告给出值 0.48，故水平向初始有效应力  $\sigma'_{30}=19.2$  kPa。填土重度取 19 kN/m<sup>3</sup>。根据现场监测结果，深度 3.5 m 处超孔隙水压力  $u$  约为 1 kPa。

从表 1 可以看出，堆载中心与坡肩处的有效应力相差不大，而坡脚处的有效应力较小。

表 1 3.5 m 深度处应力计算结果

| Table 1 Stress calculated by elastic theory at 3.5 m depth |                          |                          |                           |                     |                     |                                      |
|------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------------------|
| 位置                                                         | $\Delta\sigma_z$<br>/kPa | $\Delta\sigma_x$<br>/kPa | $\Delta\tau_{xz}$<br>/kPa | $\sigma'_1$<br>/kPa | $\sigma'_3$<br>/kPa | $(\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$<br>/kPa |
| 坡脚                                                         | 54                       | 63                       | 20                        | 76                  | 70                  | 72                                   |
| 坡肩                                                         | 193                      | 110                      | 16                        | 194                 | 108                 | 136                                  |
| 中心                                                         | 205                      | 103                      | 0                         | 205                 | 102                 | 137                                  |

需要特别说明的是，室内剪切试验土样的固结状态与现场土的固结状态并不完全一致。在进行直剪固结快剪试验时，土样预先进行一维固结；而在

三轴固结不排水剪切试验中，土样预先进行各向等压固结。在堆载作用下，不同位置处（如中心、坡肩和坡脚）的固结状态要更为复杂。在采用试验得到的强度理论对现场地基土的强度进行预测时，有效应力的取值要尽量和试验状态一致。在本文采用有效固结应力法进行强度预测时，要求得有效固结应力  $\sigma'_c$  来替代公式 (1)~(6) 中的应力  $\sigma'_v$ 。有效固结应力  $\sigma'_c$  按照以下方法求得：当采用直剪试验参数时， $\sigma'_c = \sigma'_1$ ；当采用三轴试验参数时， $\sigma'_c = (\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$ 。

3.4 计算结果与分析

表 2、3 分别给出了采用直剪固结快剪和三轴固结不排水剪强度参数计算得到深度为 3.5 m 不同水平位置处③<sub>1</sub> 层淤泥质粉质黏土的天然强度、堆载作用下强度及相应的强度增量，并与现场十字板剪切试验结果进行了对比。

从表 2 可见，无论是折线型强度公式还是直线型强度公式，采用直剪试验参数预测得到的天然强度、堆载作用下强度以及相应的强度增量均要小于现场十字板试验给出的结果。对于天然强度的预测，折线型的预测结果要比直线型大一些，而更接近十字板实测结果。而对于堆载作用下强度以及相应的强度增量的预测，直线型强度公式要比折线强度公式大一些，更接近十字板实测结果。

从表 3 给出的采用三轴试验参数的计算结果可看出，对于天然强度的预测，折线型强度公式比十字板结果略大一些，而采用直线型强度公式要略低一些。对于堆载作用下强度以及相应的强度增量的预测，直线型和折线型给出的结果大都大于实测结果，而由于折线型给出的结果要比直线型小一些，因此，更接近十字板实测结果。

另外，从表 2、3 给出的结果可以看出，两种方法预测得到的在堆载中心和坡肩处地基土的强度增长幅度相差不大，且远大于坡脚处地基土的强度增长量，这一点与实测结果是一致的。

表 2 基于直剪固结快剪试验参数的强度预测及对比

| Table 2 Strength prediction results based on parameters from consolidated quick shear test |      |      |      |       |      |      |      |      |      |       |      |       |      |      |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|------|------|------|
| 位置                                                                                         | 天然强度 |      |      | 堆载后强度 |      |      | 强度增量 |      |      | 预测/实测 |      |       |      |      |      |
|                                                                                            | /kPa |      |      | /kPa  |      |      | /kPa |      |      | 天然强度  |      | 堆载后强度 |      | 强度增量 |      |
|                                                                                            | 折线   | 直线   | 十字板  | 折线    | 直线   | 十字板  | 折线   | 直线   | 十字板  | 折线    | 直线   | 折线    | 直线   | 折线   | 直线   |
| 中心                                                                                         |      |      |      | 45.1  | 50.2 | 62.6 | 18.4 | 29.3 | 28.5 |       |      | 0.72  | 0.80 | 0.65 | 1.03 |
| 坡肩                                                                                         | 26.7 | 20.9 | 34.1 | 42.6  | 48.3 | 60.3 | 15.9 | 27.4 | 26.2 | 0.78  | 0.61 | 0.71  | 0.80 | 0.61 | 1.05 |
| 坡脚                                                                                         |      |      |      | 27.8  | 27.4 | 42.1 | 1.1  | 6.5  | 8.0  |       |      | 0.66  | 0.65 | 0.14 | 0.81 |

表 3 基于三轴固结不排水剪试验参数的强度预测及对比

Table 3 Strength prediction results based on parameters from consolidated undrained triaxial test

| 位置 | 天然强度/kPa |      |      | 堆载后强度/kPa |      |      | 强度增量/kPa |      |      | 预测/实测 |      |      |      |      |      |
|----|----------|------|------|-----------|------|------|----------|------|------|-------|------|------|------|------|------|
|    | 折线       | 直线   | 十字板  | 折线        | 直线   | 十字板  | 折线       | 直线   | 十字板  | 折线    | 直线   | 折线   | 直线   | 折线   | 直线   |
| 中心 |          |      |      | 64.5      | 74.9 | 62.6 | 26.6     | 44.0 | 28.5 |       |      | 1.03 | 1.20 | 0.93 | 1.51 |
| 坡肩 | 37.9     | 31.9 | 34.1 | 64.0      | 74.6 | 60.3 | 26.1     | 42.7 | 26.2 | 1.11  | 0.94 | 1.06 | 1.24 | 1.00 | 1.63 |
| 坡脚 |          |      |      | 45.1      | 39.3 | 42.1 | 7.2      | 7.4  | 8.0  |       |      | 1.07 | 0.93 | 0.90 | 0.93 |

## 4 结 论

(1) 从室内试验结果看出, ③<sub>1</sub> 层淤泥质粉质黏土具有明显的结构性, 因此, 采用折线型强度模型要比直线型强度模型更合理一些, 试验得到该层土的结构强度  $\sigma_s$  约为 100 kPa。

(2) 对③<sub>1</sub> 层淤泥质粉质黏土, 强度增长预测结果表明, 采用直线型强度公式得到的地基强度增长量要大于采用折线型的增长量。

(3) 采用三轴固结不排水剪强度参数  $c_{cq}$  和  $\varphi_{cq}$  预测得到的强度略大于十字板试验结果, 约为十字板强度的 1.0~1.1 倍。而采用直剪固结不排水剪强度参数  $c_q$  和  $\varphi_q$  给出的结果明显小于十字板剪切试验结果, 为十字板强度的 0.6~0.8 倍。这与三轴试验、直剪试验和十字板试验的剪切破坏面的方向不一致及土的强度各向异性有关。

(4) 在采用考虑土的结构性的折线型强度公式时, 应该尽量采用三轴试验参数; 而在采用不考虑土的结构性的直线型强度公式时, 则应尽量采用直剪试验参数, 这样得到的预测结果与十字板结果较为接近。

(5) 现场实测和理论预测结果均表明, 山体荷载作用下不同位置处的地基土的强度增长量并不一样: 强度增长量在堆载中心处最大, 其次为坡肩位置, 在坡脚附近强度增长量已经很小。在进行地基整体稳定性分析时, 应该注意这种地基土强度增长的不均匀性。

文中未考虑堆载作用下强度增长与软土蠕变造成强度减小的共同作用, 这方面还有待进一步研究和探讨。

## 参 考 文 献

- [1] 魏汝龙. 软黏土的强度与变形[M]. 北京: 人民交通出版社, 1987.
- [2] 孔德金, 苗中海. 软黏土抗剪强度增长规律[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 757—759.  
KONG De-jin, MIAO Zhong-hai. The regularity of shear strength increment for soft soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(6): 757—759.
- [3] 林孔锚. 关于“软黏土抗剪强度增长规律”的讨论[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 384—385.  
LIN Kong-zi. Discussion of ‘the regularity of shear strength increment for soft soil’[J]. *Chinese Journal of*

- Geotechnical Engineering*, 2000, 22(3): 384—385.
- [4] 齐永正, 赵维炳. 排水固结加固软基强度增长理论研究[J]. 水利水运工程学报, 2008, (2): 78—83.  
QI Yong-zheng, ZHAO Wei-bing. Study on theory of shear strength increment of soil body by draining consolidation for improving soft clay[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2008, (2): 78—83.
- [5] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996: 174—175.
- [6] HENKEL D J. The shear strength of saturated remolded clay[C]//黏性土抗剪强度译文集. 北京: 科学出版社, 1965.
- [7] BURLAND J B. On the compressibility and shear strength of natural clays[J]. *Geotechnique*, 1990, 40(3): 329—378.
- [8] HOEG K, DYVIK R, SANDABEKKEN G. Strength of undisturbed versus reconstituted silt and silty sand specimens[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, 126(7): 606—617.
- [9] SCHMERTMANN J H. Mechanical aging of soils[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1991, 117(9): 1288—1330.
- [10] 洪振舜, 立石义孝, 邓永峰. 强结构性天然沉积土的强度变形特性[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1201—1204.  
HONG Zhen-shun, TATEISHI Y, DENG Yong-feng. Mechanical behavior of a strongly-structured natural sedimentary soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(8): 1201—1204.
- [11] 刘恩龙, 沈珠江. 不同应力路径下结构性土的力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 2058—2063.  
LIU En-long, SHEN Zhu-jiang. Mechanical behavior of structured soil under different stress paths[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(10): 2058—2063.
- [12] 刘又云, 刘保健, 谢永利. 软土结构性对渗透及固结沉降的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 2): 3587—3592.  
LIU You-yun, LIU Bao-jian, XIE Yong-li. Influences of permeability and consolidation settlement on structure of soft clay[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(Supp.2): 3587—3592.
- [13] 沈珠江. 软土工程特性和软土地基设计[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 100—111.  
SHEN Zhu-jiang. Engineering properties of soft soils and design of soft ground[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1998, 20(1): 100—111.
- [14] 王军, 陈云敏. 土结构性对预压软基稳定性影响分析[J]. 工业建筑, 2006, 32(6): 48—50.  
WANG Jun, CHEN Yun-min. Influence of soil structure characteristics on the stability of the soft clay ground[J]. *Industrial Construction*, 2006, 32(6): 48—50.
- [15] 中国建筑科学研究院. JGJ 79—2002 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.