

# 深圳机场填海区欠固结软基超大深基坑的设计

马 驰, 刘国楠

(中国铁道科学研究院深圳研究设计院, 深圳 518034)

**摘要:** 在欠固结的软基中开挖深基坑的技术难度和风险很大。以深圳机场扩建工程轨道交通枢纽基坑工程为背景, 分析了有深厚淤泥层的填海地区大型基坑的难点及相对对策, 介绍了该基坑咬合桩+锚碇、锚索的支护方案; 在设计中采用淤泥层排水固结强度增长规律取用强度指标, 结合锚碇、锚索的受力特征对围护结构做了有限元计算分析; 基坑监测结果表明计算结果与实际相符, 验证了支护设计安全、合理。

**关键词:** 欠固结软土; 基坑; 固结强度增长; 锚碇; 咬合桩

中图分类号: TU413 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0536-06

作者简介: 马 驰(1980-), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事基坑支护、地基处理等方面的工程设计、技术咨询工作。Email: machi1963@126.com。

## Design of large and deep excavation in underconsolidated soils in reclaimed area of Shenzhen Airport

MA Chi, LIU Guo-nan

(Shengzhen Research and Design Institute of China Academy of Railway Sciences, Shenzhen 100081, China)

**Abstract:** The excavation of deep foundation pits in underconsolidated soils has been a problem in the field of geotechnical engineering. Based on the excavation of rail transport hub of Shenzhen Airport, the excavation difficulties and countermeasures in soft soils are analyzed. The supporting scheme of interlocking anchors, and cables is introduced. The increase law of consolidation of silt is adopted to estimate its strength. Combine with the stresses of anchors and cables the finite element analysis is performed. The monitoring results show that the calculated results agree with the measured ones. The safety and rationality of the supporting design are validated.

**Key words:** underconsolidated soft soil; excavation; consolidation strength increase; anchorage; interlocking pile

## 0 引言

基坑工程既涉及到土的强度、地下水, 以及变形与稳定性, 又涉及到土与支护结构的共同作用问题, 是一项综合性强, 风险性大的岩土工程<sup>[1]</sup>。新近填海区, 有较深厚的欠固结淤泥层和人工填砂(土)层, 且地下水位埋深浅, 增加了深基坑工程的设计与施工的技术难度。在新近的填海区开挖基坑, 面临选择合理的支护方案和计算分析方法, 根据淤泥的固结水平, 评估淤泥的工程性质等关键技术问题。本文以深圳机场扩建项目预留轨道交通基坑工程为背景, 介绍设计方案选取、淤泥强度指标的选取和分析计算等关键技术。

## 1 工程概况

深圳机场扩建工程轨道交通枢纽基坑(总平面图

见图1)位于拟建的深圳机场T3航站楼之下, 全长1720 m, 区间宽40 m, 车站宽120 m, 基坑面积11万m<sup>2</sup>, 基坑开挖深度13~18 m。

基坑场地原始地貌为海域和鱼塘, 由吹填砂形成陆域; 原设计采用插板排水堆载预压法进行软基处理, 满载预压200 d后卸载。由于建设工期紧张, 基坑工程进场施工时, 基坑范围场地刚完成预压土的填筑, 未能达到设计要求的预压工期; 基坑周边正在进行堆载施工。场地周边尚无重要的建筑物和构筑物, 基本上不考虑对周边环境的影响问题, 但要考虑欠固结淤泥层基坑施工可行性、估算淤泥层的强度, 以及周边堆载对基坑稳定的影响问题。

本基坑开挖深度内所涉及土层的物理力学性质指标见表1, 2。



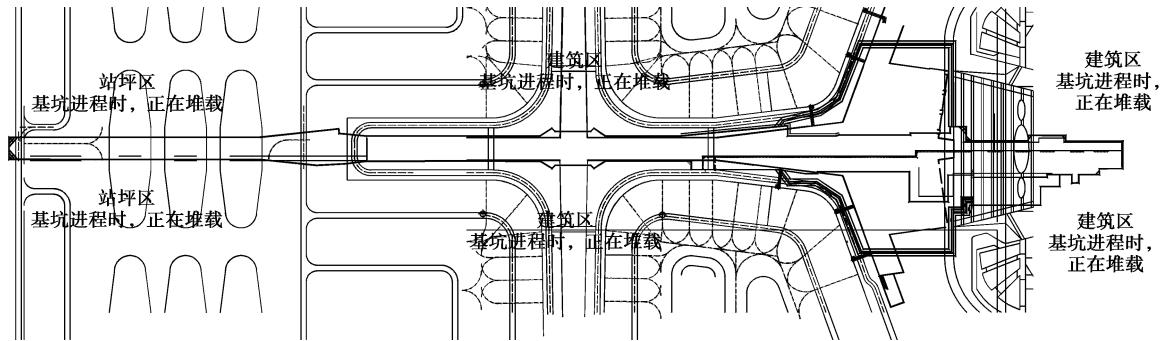


图 1 深圳机场轨道交通枢纽基坑平面图

Fig. 1 Plan of excavation of rail transport hub of Shenzhen Airport

表 1 土层的物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical properties of soils

土层名称	层厚 /m	重度 /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$w_0/\%$	$I_P$	$I_L$	$\varphi/(\text{°})$	$c/\text{kPa}$	状态
填砂层	6	17.0	—			30.0	0	稍密
淤泥层	6	15.0	85	21.6	2.47	—	—	流塑
粉质黏土	2	18.5	27	15.7	0.730	17.3	26.80	可塑
黏土	4	19.0	31	19.0	0.61	19.25	22.35	可塑—硬塑
中砂	3	18.5	19.3			32.0	0	

表 2 淤泥处理前强度指标

Table 2 Strength parameters of silt layer before treatment

地层	三轴不固结不排水剪/(UU)		三轴固结不排水剪/(CU)			十字板剪切		
	$C_{uu}/\text{kPa}$	$\varphi_{uu}/(\text{°})$	$C_{cu}/\text{kPa}$	$\varphi_{cu}/(\text{°})$	$c'/\text{kPa}$	$\varphi'/(\text{°})$	$c_u/\text{kPa}$	$c'_u/\text{kPa}$
淤泥层	6.0	0.9	8.5	12.5	13.0	22.0	3.05	1.10

## 2 基坑支护难点及对策

场地存在较深厚的人工填砂层和尚未完成固结的淤泥层, 本基坑工程面临的难题和解决方案如下:

### (1) 欠固结淤泥层围护结构的施工问题

在基坑围护结构进场施工时, 场地刚完成堆载, 预计淤泥层的平均固结度约为 60%, 属于严重欠固结土, 而且淤泥强度低, 流塑状态, 钻孔桩、地下连续墙等泥浆护壁的成孔(或成槽)方法易造成缩孔。SMW 工法能克服淤泥层施工问题, 但基坑局部风化岩层埋藏浅, 搅拌桩难以形成有效嵌固, 且深圳地区无类似工程经验; 为此设计选用套管钻进咬合桩围护方案。套管钻进施工围护桩可以解决淤泥层缩孔问题, 但在填砂层和淤泥层钻进时要保证适当的套管超前, 避免套管内涌砂和涌土。

### (2) 合理选取淤泥层的强度指标

本工程填海场地采用插板排水处理软基, 基坑围护结构施工进场时, 刚完成预压土的填筑, 未能达到预期的处理目标。但是经过插板和堆载, 场地已发生沉降约 1.3 m, 到基坑开挖阶段预计沉降可以达到 1.5 m, 淤泥层平均固结度可达到 80%。结合场地的工程

实际, 合理选取淤泥层的强度指标对于保证基坑, 节省工程投资有重要意义。为此, 采用排水固结地基强度增长规律, 预估淤泥层的强度指标, 并在开挖之前进行十字板原位测试予以验证。

### (3) 选择合适的支(锚)体系

本基坑标准段宽度 40 m, 车站段宽度 120 m, 如采用支撑方案, 需设 3 排, 标准段 2 根立柱, 车站段 6 根立柱。不仅支撑工程量大, 工期长, 造价高, 而且会影响土方开挖和 T3 楼基础桩施工。场区内存在深厚淤泥层和人工填砂层, 一定程度上限制了锚固技术的运用。在设计方案中, 采用 3 排拉锚, 第 1 排采用锚碇, 设在地面场地周边堆载区之下; 第 2 排、第 3 排支(锚)采用预应力锚索, 以较大的角度入土, 锚固段设置在淤泥的下卧黏土层。

### (4) 基坑土方开挖

基坑内的淤泥层和人工填砂层, 开挖施工困难。为了保证开挖顺利, 本工程采取以下两个措施: ①基坑内部按 20 m×20 m 的间距布置降水井, 基坑开挖前 20 天, 开始降水, 保证坑内地下水位在开挖面 0.5 m 以下; ②经计算, 基坑开挖时, 淤泥层的平均固结度约为 80%, 含水率小于 65%, 坑内铺设临时路后, 采

用挖土机开挖淤泥层。

### (5) 锚碇的设计

锚碇设置在堆载预压处理区内，在预压过程中锚碇设置面下沉，造成锚碇拉杆伸长，导致产生附加应力。通过计算，预压区下沉约 0.5 m，造成的锚碇附加拉力约为 100 kN，设计考虑该因素，降低锚碇的锁定荷载，避免地面下沉的影响。

## 3 基坑支护方案

结合工程条件，经过对地下连续墙内支撑方案、桩锚方案、SMW 工法、中心岛半逆作法等多种方案的综合比较分析，本基坑选用咬合桩+锚碇（锚索）的支护方案：咬合桩直径 1.0 m，一排一素布置，间距 1.6 m，咬合尺寸 0.2 m；第 1 排拉锚为锚碇，拉杆长度 25 m，水平布置间距 1.6 m，锚碇上覆土厚 4 m，极限拉拔力 600 kN，设计拉拔力 350 kN，张拉锁定荷载 250 kN；第 2 排和第 3 排为锚索，水平设置间距 1.6 m，倾角 30°，极限拉拔力 760 kN，设计拉拔力 475 kN，锁定荷载 350 kN。基坑支护断面图见图 2<sup>[2]</sup>。

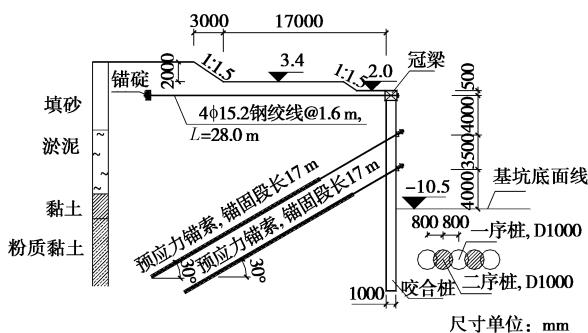


图 2 基坑支护断面图

Fig. 2 Sectional drawing of excavation

## 4 基坑支护设计计算

### 4.1 考虑固结强度增长的淤泥层强度

#### (1) 强度计算

根据排水固结软基处理的原理，在加载过程和预压期间，淤泥层由于排水，强度得到提高，目前计算淤泥强度增长的方法有：有效应力法、有效固结应力法和孔隙水压力系数法<sup>[3-8]</sup>。本设计采用有效固结应力法<sup>[9]</sup>，计算加载和预压过程中的强度增长：

$$s = s_0 + \Delta s, \quad (1)$$

$$s_0 = c_{uu} + \sigma \cdot \tan \varphi_{uu}, \quad (2)$$

$$\Delta s = \Delta \sigma \cdot U \cdot \tan \varphi_{cu}. \quad (3)$$

式中  $s$  为处理后淤泥的不固结不排水强度； $s_0$  为处理前淤泥的不固结不排水强度； $\Delta s$  为强度增长值 (kPa)； $\Delta \sigma$  为填土荷载和预压荷载引起的竖向附加应力，取 121 kPa； $U$  为淤泥层的平均固结度； $\varphi_{cu}$  为

淤泥层固结不排水强度指标中的内摩擦角； $\sigma$  为处理前淤泥的竖向应力； $\varphi_{uu}$  为淤泥层的不固结不排水指标中的内摩擦角。

通过计算得到当固结度为 70%，75%，80%，85% 时对应的淤泥层强度等效摩擦角分别为 8.8°，9.4°，10.0° 和 107°。

#### (2) 原位十字板剪切试验验证

本工程围护结构于进场施工时，场地刚刚完成堆载，预计咬合桩施工时间为 60 d，基坑开挖时淤泥固结度为 80%，计算淤泥层中部十字板平均强度为 20 kPa，换算不排水抗剪强度指标： $c = 6.0$  kPa， $\varphi = 10^\circ$ 。

基坑开挖前，沿基坑外侧每 60 m 布置一个钻孔，共布置 36 个钻孔，其中原位测试孔和室内试验孔各占一半。试验结果显示：①原位测试结果，淤泥层十字板剪切平均强度为 22.8 kPa，换算不排水抗剪强度指标  $c = 6.0$  kPa， $\varphi = 11.3^\circ$ 。②室内试验结果，淤泥处理后含水率 62%，不排水抗剪强度指标  $c = 5.5$  kPa， $\varphi = 12.6^\circ$ 。原位测试和室内试验的结果与设计计算的抗剪强度指标基本一致。基坑开挖时，淤泥固结情况如图 3 所示。



图 3 基坑开挖过程中，固结后的淤泥

Fig. 3 Consolidated silt during excavation

### 4.2 围护结构计算分析

本文采用杆系有限元法对图 2 所示的桩锚支护体系进行了受力计算。土的本构模型采用 Mohr-Coulomb 模型，强度指标采用固结不排水抗剪强度指标，土层的强度指标如表 1 所示，淤泥的不排水抗剪强度指标： $c = 6.0$  kPa， $\varphi = 10^\circ$ 。

采用 Plaxis 8.0 岩土有限元分析软件对基坑支护结构进行了变形计算。基坑开挖期间，各种工况内力和位移的计算结果如图 4~9 所示。

统计计算结果如下：①基坑开挖完成后围护桩最大水平位移达到 6.5 cm。②由第 1 道锚碇张拉引起的地层最大水平位移增量为 1.3 cm，锚碇前方土体未发生滑裂破坏。③基坑开挖完成后，锚碇的拉拔力为 315 kN，第 1 道锚索的拉拔力为 370 kN，第 2 道锚索的拉

力为 470 kN, 围护桩弯矩为 1290 kN·m。

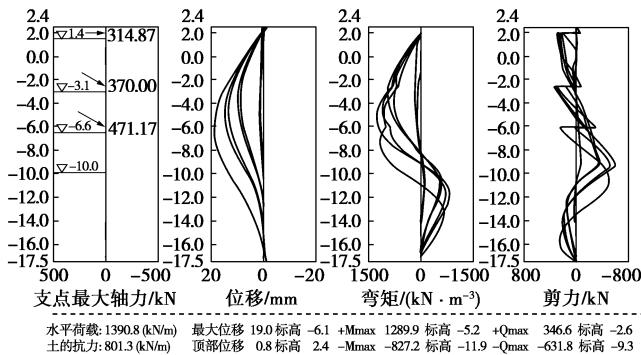


图 4 基坑支护体系变形分析计算结果

Fig. 4 Calculated results of deformation of supporting system of excavation

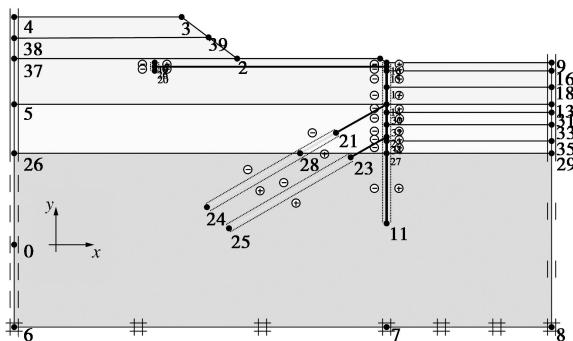


图 5 基坑支护体系变形分析计算模型

Fig. 5 Computational model for displacement of supporting system

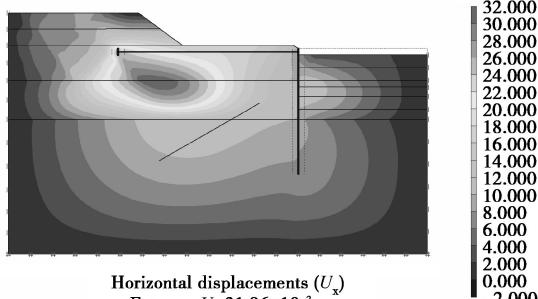


图 6 锚碇张拉完成后, 地层水平位移云图

Fig. 6 Horizontal displacement of soils after tension of anchors

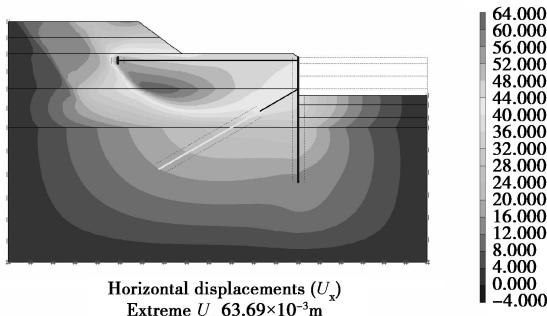


图 7 第 1 道锚索张拉完成后, 地层水平位移云图

Fig. 7 Horizontal displacement of soils after tensions of first row of anchor cables

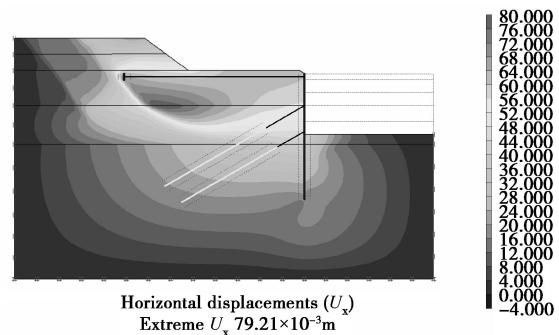


图 8 第 2 道锚索张拉完成后, 地层水平位移云图

Fig. 8 Horizontal displacement of soils after tension of second row of anchor cables

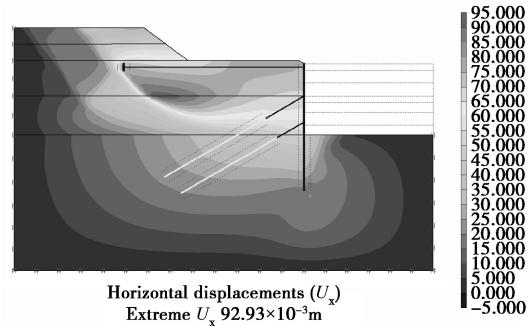


图 9 开挖到坑底, 地层水平位移云图

Fig. 9 Horizontal displacement of soils after excavation of pit bottom

## 5 基坑监测

基坑开挖过程中, 对围护结构桩身位移和桩顶位移进行了观测, 基坑实测变形情况如图 10, 11 所示。

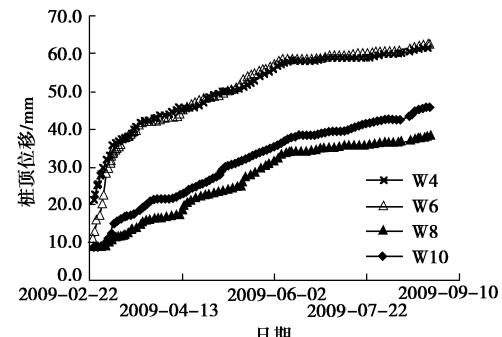


图 10 桩顶位移实测结果

Fig. 10 Measured results of displacement on pile top

由图 10~14 可知, W4、W6 监测点, 2009 年 2 月底~4 月初, 开挖第一层土方期间, 位移发展较快, 约为 4.0 cm, 主要是由于局部地段锚碇前方土体填筑不够密实, 导致锚碇预应力损失较大造成的, 4 月底, 锚碇二次张拉后, 位移逐渐稳定, 基坑开挖到底时, 第 2 排锚索拉力发生突变, 稳定后锚索拉力值为 410 kN, 桩顶位移约为 6.0 cm。W8、W10 点桩顶位移最

小, 约为 3.5 cm。桩身最大位移为 9.0 cm, 发生在 6.0 m 处, 实测变形与有限元计算结果基本一致。实测的锚碇拉力、锚索拉力均接近设计值, 没有超过设计值。监测数据表明基坑支护设计取用的土工参数指标, 以及计算分析方法合理。

基坑开挖到底照片见图 15。

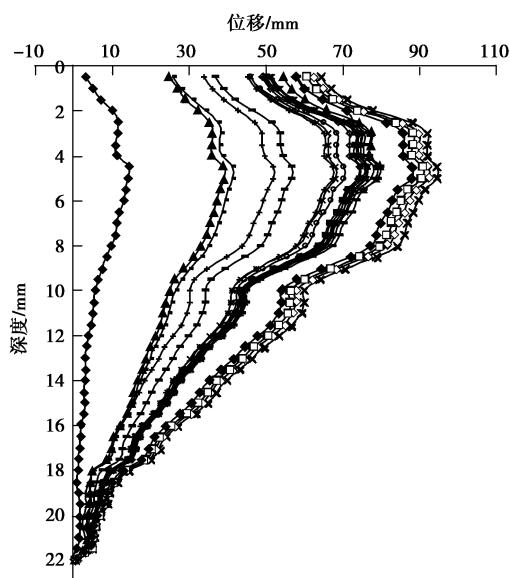


图 11 测斜实测结果

Fig. 11 Measured results of displacement

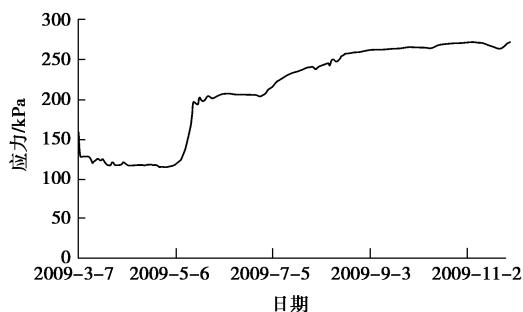


图 12 锚碇拉力实测结果

Fig. 12 Measured results of anchorage tension

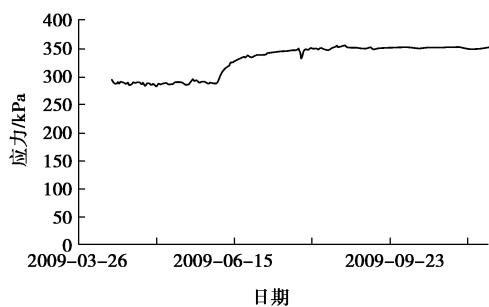


图 13 第一排锚索拉力实测结果

Fig. 13 Measured results of tension of first row of anchor cables

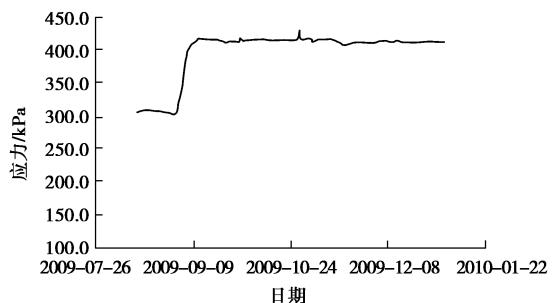


图 14 第二排锚索应力实测结果

Fig. 14 Measured results of tension secend row of anchor cables



图 15 基坑开挖到底的照片

Fig. 15 Photo of excavation

## 6 结 论

(1) 含有欠固结淤泥地层的填海场地, 超大深基坑支护采用咬合桩+锚索(锚碇)的支护方案可行。

(2) 利用空间条件采用锚碇作为第一道拉锚, 施工方便, 质量可靠。

(3) 考虑场地淤泥层的固结因素, 合理选用淤泥层的强度指标, 可节省基坑支护工程造价。

(4) 本文采用杆系有限元对基坑的受力和变形进行了计算, 计算结果与实测结果基本相符, 验证了参数取值和采用计算方法是合理的。

(5) 围护桩的水平位移随着开挖深度增大而增大。围护桩的水平位移呈“大肚型”, 桩中间位置最大, 桩顶略小, 坑底最小。基坑开挖到底时, 最大位移发生在中部。

(6) 锚碇前方土体碾压不密实, 会造成预张力损失, 施工时应根据基坑观测情况, 及时进行二次张拉。

## 参考文献:

- [1] 王卫东, 吴江斌, 黄绍铭. 上海地区建筑基坑工程的新进展与特点[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(4): 547 - 553. (WANG Wei-dong, WU Jiang-bin, HUANG Shao-ming. Recent progress and characteristic of pit foundation in Shanghai[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(4): 547 - 553. (in Chinese))

- [2] 中国铁道科学研究院深圳研究设计院. 深圳机场新航站区轨道交通枢纽围护结构设计文件[R]. 深圳: 中国铁道科学研究院深圳研究设计院, 2008. (Shenzhen Research and Design Institute of China Academy of Railway Sciences. Shenzhen project design of the excavation supporting of Xiangjiang Time Plaza near the metro[R]. Shenzhen: Shenzhen Research and Design institute of China Academy of Railway Sciences, 2004. (in Chinese))
- [3] 林孔錩. 地基单向和三向排水固结与强度增长的计算及其实际观测[J]. 岩土工程学报, 1987, 9(1): 87 - 98. (LIN Kong-zi. Computation and measurement of settement and strength increase of subsoils due to one and three dimensional consolidation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 9(1): 87 - 98. (in Chinese))
- [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. Drainage consolidation of soft foundation reinforcement strength increasing theory research[J]. Hydro-Science and Engineering, 2008(2): 78 - 83. (in Chinese))
- [5] 胡亚元, 陈云敏. 本构模型与软黏土强度增长的关系研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(6): 731 - 735. (HU Ya-yuan, CHEN Yun-min. Research on correlation between soil model and shear strength gain in staged construction[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2004, 38(6): 731 - 735. (in Chinese))
- [6] 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. (KON G De-jin, MIAO Zhong-hai. The regularity of shear strength increment for soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 20(6): 757 - 59. (in Chinese))
- [7] 魏汝龙. 软黏土的强度与变形[M]. 人民交通出版社, 1987. (WEI Ru-long. The strength and deformation of soft clay[M]. Beijing: China Communications Press, 1987. (in Chinese))
- [8] 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. (in Chinese))
- [9] JTJ250—98 港口工程地基规范[S]. 1998 (JTJ250—98 Code for soil foundations of port engineering[S]. 1998. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)