

# 合肥地区黏土膨胀特性研究

周 罡<sup>1</sup> 李 淮<sup>2</sup> 杨新安<sup>3</sup> 陈 翔<sup>3</sup>

(1. 广州市重点公共建设项目管理中心, 510030, 广州; 2. 中交第三航务工程局集团有限公司, 200030, 上海;

3. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海//第一作者, 高级工程师)

**摘 要** 在合肥地区地铁隧道施工现场取典型黏土地层原状土样,进行了一系列室内试验和电镜试验,对合肥地区典型黏土土样的膨胀特性进行了研究。研究结果表明:合肥地区黏土土样具有弱膨胀性;得到了合肥地区典型黏土的膨胀力数据;合肥地区黏土的抗剪强度参数与含水率之间存在负指数函数关系;两种黏土存在裂隙结构面和致密结构面,微孔隙、微裂隙和黏土的颗粒排列等的差别是其具有不同膨胀特性的原因。

**关键词** 黏土; 膨胀特性; 原状土样; 室内试验; 电镜试验

**中图分类号** TU411

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2022.12.036

## Study on Expansive Characteristics of Cohesive Soil in Hefei Area

ZHOU Gang, LI Huai, YANG Xin'an, CHEN Xiang

**Abstract** A series of laboratory and electron microscope tests are carried out on undisturbed soil samples of typical clay stratum taken from Hefei Metro tunnel construction site, and the expansive characteristics of typical clay soil samples in Hefei area are studied. Results show that: the clay samples in Hefei area have weak expansibility; the expansive force data of typical clays in Hefei area are obtained; there is a negative exponential function relationship between the shear strength parameters and water content of the clays in Hefei area; there are fracture structural planes and compact structural planes in the two types of clay, and the differences of micro pores, micro cracks and clay particle arrangement are the reasons for their different expansion characteristics.

**Key words** cohesive soil; expansive characteristics; undisturbed soil sample; laboratory test; electron microscope test

**First-author's address** Guangzhou Key Public Construction Project Management Center, 510030, Guangzhou, China

合肥地区是典型的膨胀土覆盖区域。膨胀土是具有显著的吸水膨胀和失水收缩特性的黏土,其土中黏粒成分主要由亲水性矿物组成<sup>[1]</sup>。膨胀土

在膨胀和收缩的过程中会产生膨胀力,会对地铁隧道的施工安全造成不良影响。因此,对合肥地区黏土的膨胀特性进行研究,具有重要的工程意义。

国内外很多学者对膨胀性黏土的膨胀特性进行了研究,文献[2]利用膨胀仪、固结仪等设备对经过干湿循环后的膨胀土开展自由膨胀率试验、无荷载膨胀试验和膨胀力试验研究;文献[3]通过三轴强度试验和膨胀土特性试验(膨胀率测试和膨胀力测试)研究了含水率、干密度对膨胀土三轴强度的影响;膨胀土中含水率增大会导致土体抗剪强度降低<sup>[4-8]</sup>,文献[9-12]通过试验发现膨胀土的黏聚力和内摩擦角值的对数与含水率呈负线性相关;文献[13]通过室内土工试验对合肥新桥机场膨胀土进行了研究,并对膨胀土进行分类,还通过X射线衍射分析手段对膨胀土的矿物成分进行定性和定量的分析和计算,来研究膨胀土的矿物成分对该区膨胀土工程性质的影响;文献[14]开展膨胀土室内试验,获取膨胀土的基本物理力学参数和膨胀潜势,根据直剪试验结果,建立膨胀土强度参数随含水率变化的经验公式;文献[15]对南方膨胀土的微结构特性进行了实验研究,表明膨胀土具有其特殊的微结构特性,其决定着膨胀土的膨胀势。随着X射线衍射、透射电镜、扫描电镜等测试技术以及数字化图像处理技术的发展和应<sup>[16-18]</sup>,人们对土微观结构的认识将会更加深入。综上所述,研究膨胀土微观结构的科学手段较为成熟,可以根据现有的资料对膨胀性黏土的微观结构进行直观的分析;大量研究采用现场原位试验的方式进行,但在进行原位试验时,存在边界条件难以控制、变量众多的困难,因此在取得原状土的条件下,可采用室内试验的手段进行研究。

本文在合肥轨道交通4号线和5号线地铁隧道施工现场取典型黏土地层的原状土样,通过一系列室内试验对其膨胀特性进行了研究。研究结果可

为合肥地区穿越膨胀性黏土地层的地铁隧道施工提供一定的参考依据。

### 1 现场取土及土样准备

通过试验可以获得黏土的天然结构、组织成分、自然湿度及抗剪强度等一系列物理力学指标,从而明确黏土的基本性质及其工程特性。为了确保试验数据接近土样天然状态下的数据,需要采用原状土进行试验。这就要求在取土时采取一定的措施来减少对土样的扰动。

一般来说,取土样过程中会产生附加应力及应力释放,使土样产生扰动,从而使土样的有效应力产生变化。这一过程是不可避免的。但土样的扰动是被控制在一定的范围之内。如图 1 所示,局部扰动用扰动带的宽度  $S$  表示。 $S$  值越小,则原状土结构范围越大,土样质量越接近原状土<sup>[19]</sup>。

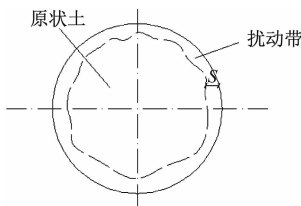


图 1 土样扰动带示意图

Fig. 1 Diagram of soil sample in disturbance zone

本研究采用外径为 110.0 mm、壁厚为 3.2 mm、长度为 200.0 mm 的 PVC(聚氯乙烯)管材作为取土器;采用压入法进行土样的采取;取土后用塑料膜和胶带封住管的两端,并在恒温恒湿的条件下保存。

据合肥轨道交通地质勘探资料,合肥地区主要的黏土层为第四系全新统地层和上更新统地层。本文按形成年代的早晚,将全新统地层黏土称为“新黏土”,将上更新统地层黏土称为“老黏土”。本试验采用的原状土样为合肥地区②3 层黏土(属于新黏土)和⑥2 层黏土(属于老黏土),是两种地层中广泛分布的代表性黏土。

## 2 膨胀特性研究

### 2.1 自由膨胀率试验

自由膨胀率试验可用于判定黏土在无结构力影响下的膨胀潜势。

自由膨胀率<sup>[20]</sup>为:

$$\delta_{ef} = \frac{V - V_0}{V_0} \times 100\% \tag{1}$$

式中:

$\delta_{ef}$ ——膨胀土的自由膨胀率;

$V$ ——土样在水中膨胀稳定后的体积;

$V_0$ ——土样初始体积。

根据 GBJ 112—1987《膨胀土地区建筑技术规范》中的规定,膨胀土的膨胀潜势应按表 1 中的标准进行划分。

表 1 膨胀土膨胀潜势划分

Tab. 1 Expansion potential division of expanded soil

$\delta_{ef}/\%$	膨胀潜势
40 ~ <65	弱
65 ~ <90	中
$\geq 90$	强

试验采用风干碾碎的土样 10 ml。土样在水中膨胀不同时间后的自由膨胀率如表 2 所示。

表 2 土样在水中膨胀不同时间后的自由膨胀率

Tab. 2 Free expansion rate of soil samples after different expasion time in water

土层	土样 编号	$V_0/\text{cm}^3$	$V/\text{cm}^3$			$\delta_{ef}/\%$
			2 h 后	4 h 后	6 h 后	
⑥2 层	1	10	14.2	14.4	14.4	44.0
	2	10	14.5	14.7	14.8	48.0
	3	10	15.4	15.6	15.7	57.0
②3 层	4	10	15.5	15.8	15.9	59.0

由表 1 试验结果可知,⑥2 层和②3 层土样的  $\delta_{ef}$  平均值分别为 46.0% 和 58.0%,由此可以判定两种典型黏土土样均具有弱膨胀潜势。

### 2.2 膨胀力试验

采用平衡加压法对合肥地区黏土试样进行膨胀力试验,试验仪器为单杠杆固结仪,膨胀力的计算按照公式(2)进行<sup>[20]</sup>,试样面积即环刀面积,为 30 cm<sup>2</sup>,固结仪杠杆比为 1:12,最终得到黏土膨胀力变化如图 2 所示。试验结果为:⑥2 层黏土的膨胀力为 25.0 kPa,②3 层黏土的膨胀力为 31.5 kPa。

$$p_e = k \frac{W}{A} \tag{2}$$

式中:

$p_e$ ——膨胀力;

$W$ ——总平衡荷载;

$A$ ——试样面积;

$k$ ——固结仪杠杆比。

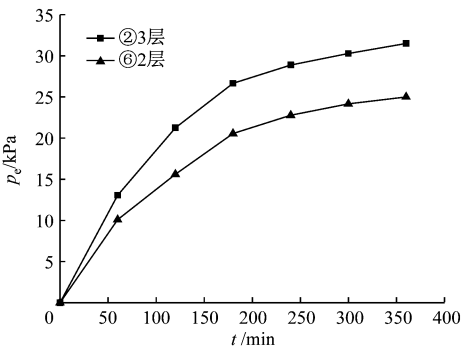


图 2 膨胀力  $p_e$  随时间  $t$  变化曲线  
Fig. 2 Curve of expansion force  $p_e$  with time  $t$

2.3 含水率对黏土强度参数的影响

将⑥2 层黏土按含水率梯度 22.5% ~ 27.5% 共分 6 组,②3 层黏土按含水率梯度 23.4% ~ 34.4% 共分 7 组,对每组土样进行直剪试验,得到抗剪强度指标(包含黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$ )。

将黏土直剪试验得到的数据绘制成散点图,并通过 Origin 软件拟合,结果如图 3 及图 4 所示。根据拟合结果,合肥地区②3 层黏土和⑥2 层黏土的  $c$ 、 $\varphi$  随含水率  $\omega$  的变化规律符合负指数函数关系。拟合曲线满足:

$$c = a_1 e^{b_1 \omega} + c_1 \tag{3}$$

$$\varphi = a_2 e^{b_2 \omega} + c_2 \tag{4}$$

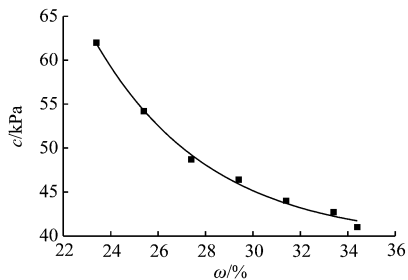
其中,  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_1$ 、 $b_2$  为拟合系数,  $e$  为自然底数,  $c_1$ 、 $c_2$  为常数。拟合结果见表 3。

土层	拟合结果					
	$a_1$	$b_1$	$c_1$	$a_2$	$b_2$	$c_2$
②3 层黏土	2 834.6	-0.21	39.4	2 195.1	-0.26	13.9
⑥2 层黏土	$1.64 \times 10^7$	-0.55	48.8	$4.26 \times 10^5$	-0.55	16.7

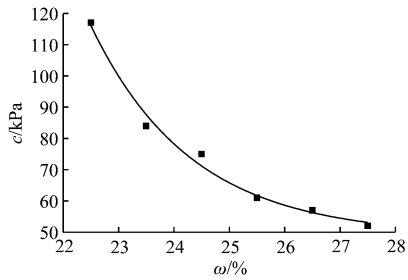
由图 3、图 4 及拟合结果可以发现,  $\omega$  越高,则土体的抗剪强度越小。这一规律具体表现为膨胀土遇水软化。

2.4 微观电镜试验

微观试验采用 FEI Quanta 200II 型场发射扫描电子显微镜,选取合肥地区的新黏土和老黏土样品。首先,将样品风干;然后,将样品切割成长度为 10 mm、厚度为 3 mm 的方形薄片,并对试样表面进行喷金镀膜;最后,将样品放入显微镜观察。观察样品时,显微镜放大倍数为 50 000 倍,并以电镜照



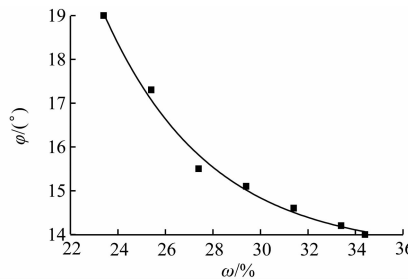
a) ②3 层黏土



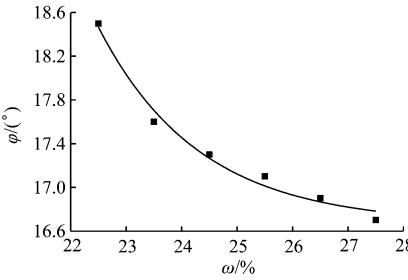
b) ⑥2 层黏土

图 3  $c$  与  $\omega$  关系

Fig. 3 Relationship between cohesion  $c$  and water content  $\omega$



a) ②3 层黏土



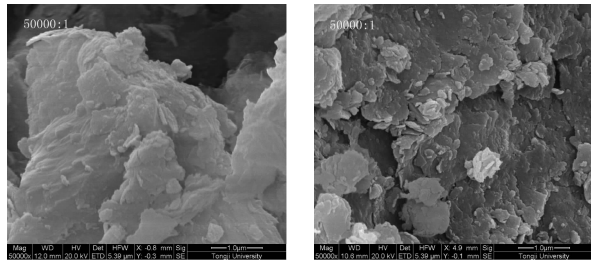
b) ⑥2 层黏土

图 4  $\varphi$  与  $\omega$  关系

Fig. 4 Relationship between internal friction angle  $\varphi$  and water content  $\omega$

片的形式记录(如图 5 所示)。

根据电镜试验的结果:老黏土形成年代较为久远,形成过程中经历压密作用较多,导致黏土颗粒更为紧凑,具有致密结构面;新黏土形成年代较晚,形成过程中,胀缩效应所形成的不均匀水平应力所产生的水平应力差居主导地位,导致了复杂交错的裂隙结构,即裂隙结构面。



a) 新黏土

b) 老黏土

图5 合肥地区典型黏土的微观结构电镜照片

Fig.5 Electron microscope picture of typical clay in Hefei area

### 3 结论

1) 通过自由膨胀率试验得到,⑥2层黏土土样自由含水率为46.0%,②3层黏土土样自由含水率为58.0%。两种土样均具有弱膨胀性。采用平衡加压法进行膨胀力试验,测得⑥2层土样的膨胀力为25.0 kPa。

2) 由土样直剪试验发现,土样的抗剪强度随着 $\omega$ 的增大而减小,当 $\omega$ 接近饱和含水率时,土样的抗剪强度达到最低。基于直剪试验,对两种黏土抗剪强度指标与含水率进行拟合。根据拟合结果,合肥地区黏土的 $c$ 、 $\varphi$ 同 $\omega$ 之间存在负指数函数关系,具体表现为黏土遇水软化,土体抗剪强度降低。

3) 通过微观电镜试验发现,新黏土和老黏土分别具有裂隙结构面和致密结构面。

室内试验结果显示:新黏土自由膨胀率和膨胀力均大于老黏土,具有更强的膨胀特性;从微观方面分析,微孔隙、微裂隙是2种黏土具有膨胀性的原因。

### 参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 膨胀土地区建筑技术规范: GB 50112—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for buildings in expansive soil regions: GB 50112—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [2] 舒志乐, 陈昱东, 宋钊宏. 干湿循环作用下膨胀土膨胀特性试验研究[J]. 人民长江, 2020(6): 200.  
SHU Zhile, CHEN Yudong, SONG Yihong. Experimental research on expansion characteristics of expansive soil under dry-wet cycle[J]. Yangtze River, 2020(6): 200.
- [3] 张毅, 折学森, 高学伸. 李家坪隧道膨胀性围岩力学特性试

验及塌方原因分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018(1): 203.

ZHANG Yi, SHE Xuesen, GAO Xueshen. Experimental study on mechanical characteristics of Lijiaping tunnel expansive surrounding soils and analysis of tunnel collapse[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018(1): 203.

- [4] 汤罗圣, 王云安, 邓长青, 等. 典型膨胀土抗剪强度参数试验统计规律研究[J]. 灾害学, 2019(增刊1): 138.

TANG Luosheng, WANG Yun'an, DENG Changqing, et al. Study on statistical law of shear strength parameter test of typical expansive soil[J]. Journal of Catastrophology, 2019(S1): 138.

- [5] 花伟, 曹广勇, 刘少凯, 等. 含水率对合肥地区膨胀土抗剪强度的影响[J]. 新余学院学报, 2019(4): 45.

HUA Wei, CAO Guangyong, LIU Shaokai, et al. Influence of moisture content on shear strength of expansive soil in Hefei area[J]. Journal of Xinyu University, 2019(4): 45.

- [6] 沈宇鹏, 张哲, 张雪东, 等. 蒙巴萨膨胀土抗剪强度衰减特性研究[J]. 铁道工程学报, 2019(3): 1.

SHEN Yupeng, ZHANG Zhe, ZHANG Xuedong, et al. Research on the characteristic of shear strength of expansive soil of Mombasa[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019(3): 1.

- [7] 杨果林, 滕珂, 秦朝辉. 膨胀土侧向膨胀力原位试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014(7): 2326.

YANG Guolin, TENG Ke, QIN Zhaozhui. An in situ experimental research of lateral swelling pressure on expansive soils[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014(7): 2326.

- [8] 赵闯, 李术才, 武科. 膨胀土膨胀特性与土工室内试验研究[C]//中国土木工程学会隧道及地下工程分会, 中国岩石力学与工程学会地下工程分会, 台湾隧道协会. 第十二届海峡两岸隧道与地下工程学术与技术研讨会论文集. 峨眉山: 中国土木工程学会, 2013: 5.

ZHAO Chuang, LI Shucai, WU Ke. Experimental study of expansive characteristics and soil test for expansive soil[C]//Tunnel and Underground Engineering Branch of Chinese Society of Civil Engineering. Underground Engineering Branch of Chinese Society of Rock Mechanics and Engineering, Taiwan Tunnel Association. Proceedings of the 12th cross strait tunnel and underground engineering academic and technical seminar. Emeishan: China Society of Civil Engineering, 2013: 5.

- [9] 缪林昌, 仲晓晨, 殷宗泽. 膨胀土的强度与含水量的关系[J]. 岩土力学, 1999(2): 71.

MIAO Linchang, ZHONG Xiaochen, YIN Zongze. The relationship between strength and water content of expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999(2): 71.

- [10] VANAPALLI S K, PUFAHL D E, FREDLUND D D. Interpretation of the shear strength of unsaturated soils in undrained loading conditions[C]//51st Canadian Geotechnical Conference. Regina: CGS, 2002.

- [11] FREDLUND M D, WILSON G W, FREDLUND D G. Use of the grain-size distribution for estimation of the soil-water characteristic

- curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002(5): 1103.
- [12] BISHOP A W T, ALPAN I, BLIGHT G, et al. Factors controlling the strength of partly saturated cohesive soils[C]//Proceedings of the Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils. Boulder: ASCE, 1960:503.
- [13] 管政亨. 合肥新桥国际机场膨胀土工程性质与矿物成分的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2008.
- GUAN Zhengting. Research on engineering property and mineral composition of expansive soil in Hefei Xinqiao international airport [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2008.
- [14] 郭震山. 降雨入渗对浅埋膨胀土隧道稳定性影响分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- GUO Zhenshan. Stability analysis of shallow tunnel in expansive soil under rainfall infiltration[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [15] 张梅英, 谭罗荣, 邵悟敏, 等. 南方膨胀土的微结构特性与工程性质研究[J]. 岩土力学, 1993(1): 67.
- ZHANG Meiyong, TAN Luorong, SHAO Wumin, et al. Micro-structure and engineering properties of expansion soil from South China[J]. Rock and Soil Mechanics, 1993(1): 67.
- [16] 陈宝, 潘燕敏, 路晓军, 等. 弱膨胀土在浸水膨胀过程中的微观结构变化特征[J]. 长江科学院院报, 2019(4): 140.
- CHEN Bao, PAN Yanmin, LU Xiaojun, et al. Microstructural variation characteristics of weak expansive soils during hydration [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019(4): 140.
- [17] 操子明. 改良膨胀土静动态力学特性及微观结构的试验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
- CAO Ziming. Experimental study on static-dynamic mechanical properties and microstructure of stabilized expansive soil[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2019.
- [18] 马晓宁, 王选仓, 孙进玲, 等. 陇南地区膨胀土微观结构与膨胀性[J]. 南水北调与水利科技, 2016(3): 111.
- MA Xiaoning, WANG Xuancang, SUN Jinling, et al. Micro-structure and expansion properties of expansive soil in Longnan District[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016(3): 111.
- [19] 褚元勋. 原状土样的采取[J]. 云南地质, 1985(4): 409.
- CHU Yuanxun. Sampling of undisturbed soil samples[J]. Yunnan Geology, 1985(4): 409.
- [20] 中华人民共和国水利部. 土工试验规程: GBSL 237—1999 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Geotechnical Test Specification: GBSL 237—1999 [S]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 1999.

(收稿日期: 2020-08-13)

#### (上接第 192 页)

关统计报表等, 能为列车的日常检查工作提供数据基础, 可减少人员上车操作检查的时间和次数, 有效节省人力资源, 提升检修效率。

## 4 结语

本文以列车远程可视化运维为核心, 阐述了武汉地铁列车远程运维系统的系统结构。根据现场实际情况及用户的业务需求, 研究了海量数据采集、车地数据传输、实时数据处理的具体流程和关键技术。通过在武汉地铁 21 号线的实际应用情况, 详细阐述了武汉运维系统的远程实时显示、故障远程诊断及日常维护管理功能。

## 参考文献

- [1] 周巧莲, 陈建校. 地铁列车运行状态监视系统[J]. 机车电传动, 2011(2): 47.
- ZHOU Qiaolian, CHEN Jianxiao. Status monitoring system for subway train operation[J]. Electric Drive for Locomotives, 2011(2): 47.
- [2] 许丽. 列车状态远程监视系统设计与实现[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- XU Li. Design and actualization of the remote train-monitoring system[D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [3] 冷晔. 列车远程监视系统设计与实现[J]. 信息与电脑(理论版), 2017(15): 89.
- LENG Ye. Design and implementation of train remote monitoring system[J]. China Computer & Communication, 2017(15): 89.
- [4] 梅继雄, 孙宇, 丁兴岗, 等. 列车远程监测、诊断与维护系统的研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2004(4): 62.
- MEI Jixiong, SUN Yu, DING Xinggang, et al. Research on remote monitoring, diagnosis and maintenance system of train[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2004(4): 62.
- [5] 袁文辉, 许义景, 陈建校. 基于 GPRS 与 WLAN 的中低速磁悬浮列车信息无线传输系统[J]. 机车电传动, 2011(3): 34.
- YUAN Wenye, XU Yijing, CHEN Jianxiao. Wireless transmission system of medium/low speed maglev train message based on GPRS and WLAN[J]. Electric Drive for Locomotives, 2011(3): 34.

(收稿日期: 2020-07-30)