

福州地铁 1 号线典型软土的工程性质

刘纪峰¹, 李雄润², 陈福星¹

(1. 三明学院 建筑工程学院, 福建 三明 365004;
2. 福建省顺安建筑工程有限公司, 福建 莆田 351200)

摘要: 为研究福州地铁 1 号线典型软土的工程性质及其影响,用电子显微镜进行了典型软土试样的扫描、X 射线衍射分析及室内物理力学试验.基于工程地质条件和施工经验,就软土对地层环境影响进行了 ABAQUS 数值模拟分析.研究表明:该软土是由含有较大孔隙的微团聚颗粒组成,不同放大倍数图像具有一定的自相似特征,试样含石英成分,工程性质较差;盾构隧道开挖 20 m 后,沉降历时 800 d 的地层沉降和管片应力符合工程实际,地表最大沉降达 18.5 mm,且没有完全收敛.

关键词: 福州地铁 1 号线; 典型软土; 盾构隧道; 地层沉降; 管片应力; 固结效应; 数值模拟

中图分类号: TU 94.39 **文献标志码:** A

我国东南沿海地区广泛分布的海相沉积淤泥和淤泥质软土对工程建设提出了很大挑战^[1-6].软土受施工扰动后的长期固结特性对城市地铁重大工程建设的安全性、稳定性构成严重影响和潜在威胁^[7-8].针对这一课题,国内外采用的方法大致可分为两大类:一是不考虑施工过程的预测方法,包括经验法和理论解析法^[9-10];二是部分考虑施工过程的预测方法,包括各种数值模拟和物理实验^[11-13].考虑施工围岩扰动等因素,复杂软土层暗挖隧道引起的地层变形往往比实际预测的更为严重^[14-15],而目前对该难题尚缺乏深入系统研究.福州地铁 1 号线纵贯福州市中心城区,线路全长约 29.24 km,全部埋深 20~30 m,隧道埋深范围内有 10.2~15.0 m 层厚的流塑状态的淤泥、多层饱和状态的黏土或淤泥质黏土,地下水位埋深 2.10~3.60 m.上部土层存在的厚度较大的高压缩性饱和软土,将对盾构隧道施工环境控制构成较大挑战.控制不好,极易导致城市生命线工程损害事故,造成严重的经济损失与社会影响.本文为探索解决该问题,对福州地铁 1 号线典型软土的工程特性进行试验研究,并在此基础上,采用 ABAQUS 有限元数值模拟,分析典型软土长期固结效应对环境影响.

1 典型软土的物理力学性质

1.1 扫描电子显微镜微细观试验

考虑到主要影响地铁沉降的土层为淤泥③₁,故电子显微镜(SEM)试验及 X 射线衍射试验仅针对该层.在福州地铁 1 号线始发井基坑,采用薄壁取土器深取淤泥③₁的典型软土试样,将其风干到一定程度,并加工成 5~8 mm 见方的小块.将小块放入干燥箱完全干燥后,送试验室检测.20 件土样品均在低真空模式原始状态通过放大 500~5 000 倍观察表面微观形貌.测试仪器为 EVO 18 型高分辨率场发射扫描电镜(德国卡尔蔡司公司),其主要技术参数为:3.0 nm@30 kV,2.0 nm@30 kV,4.5 nm@30 kV 的分辨率;0.2~30 kV 的加速电压;5~100 万倍的放大倍数;10~400 Pa 的压力范围;X 射线;8.5 mm AWD;35°出射角.受篇幅限制,取成像较好具有代表性的#6 样品,放大不同倍数,SEM 测试结果,如图 1 所示.

收稿日期: 2014-06-24

通信作者: 刘纪峰(1979-),男,副教授,博士,主要从事城市地下工程的研究. E-mail:ph_dliujifeng@126.com.

基金项目: 福建省科技计划重点项目(2012Y0062);福建省高等学校学科带头人培养计划项目(FETU);国家级大学生创新创业训练计划项目(2013111311007)

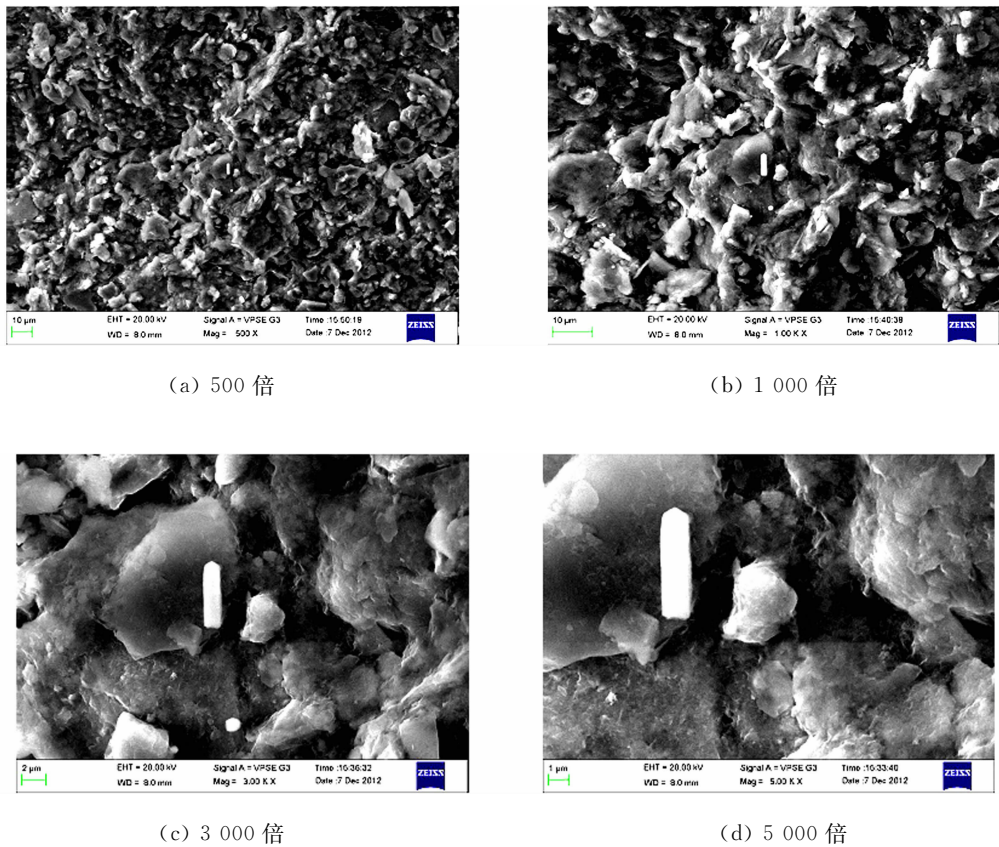


图 1 典型软土 SEM 图像

Fig.1 SEM image of typical soft soil

由图 1 可以看出:福州地铁 1 号线典型软土主要是由团聚状颗粒组成,颗粒间有较大孔隙,在饱和状态下受盾构隧道施工扰动,孔隙中水不能短时间内排出,产生较大的超孔隙水压力;伴随着超孔隙水压力的消散,软土将产生较大的次固结变形,应在隧道施工和地铁运营时充分考虑这一问题.另外,从不同放大倍数的 6 号样品 SEM 检测结果来看,该类软土结构具有一定的自相似特征,可借助分形理论研究其孔隙分形分维数和力学性质之间的联系^[15-17].

1.2 X 射线衍射分析试验

福州地铁 1 号线典型软土的部分 X 射线衍射分析结果,如图 2 所示.由图 2 可知:试样 1,2 的衍射峰基本一致,衍射强度也基本相同,说明试样 1,2 所表现的物质的机构基本相同,或者可以认代表同一组物质.对比 SY/T 6210—1996《沉积岩中粘土矿物总量和常见非粘土矿物 X 射线衍射定量分析方法》^[18]附录 A2 常见矿物的 X 射线衍射图谱,可知试样 1,2 包含石英成分,这和 SEM 试验结果是一致的,从试样的 SEM 图像上也可以看到石英晶体.

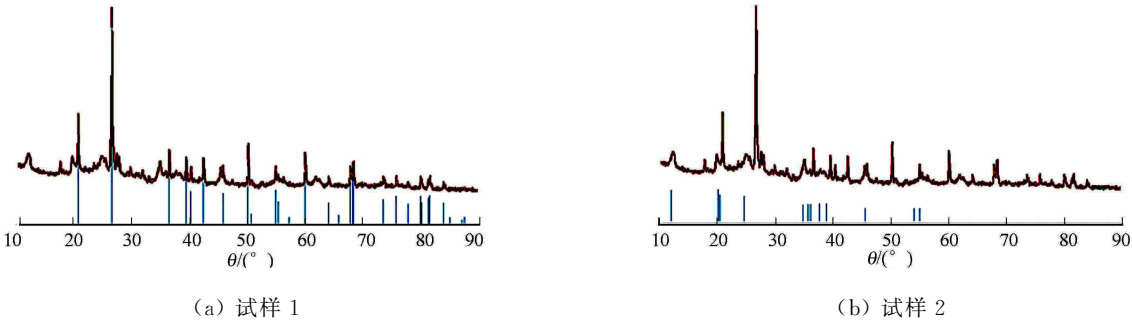


图 2 典型软土 XRD 分析

Fig.2 XRD analysis of typical soft soil

1.3 工程性质试验

根据 GB 50307—1999《地下铁道、轻轨交通岩土工程勘察规范》、GB 50021—2001《岩土工程勘察规

范》(2009 年版)、JGJ 83—1991《软土地区工程地质勘察规范》、JGJ 89—1992《原状土取样技术标准》和 GB/T 50123—1999《土工试验方法标准》,针对福州地铁 1 号线某始发井不同土层特性,分别采用静压法和锤击法取用质量等级为 I~II 级的原状土样. 通过室内常规试验项目和一定数量的三轴固结不排水(CU)试验、三轴不固结不排水(UU)试验和固结回弹试验,得出典型软土的工程性质,如表 1 所示. 表 1 中: γ 表示重度; C 表示固结快剪黏聚力; φ 固结快剪内摩擦角; C_U 表示三轴 UU 黏聚力; φ_U /表示三轴 UU 内摩擦角; C_{CU} 表示 CU 黏聚力; φ_{CU} 三轴 CU 表示内摩擦角; C' 表示 CU 黏聚力; φ'_U 表示三轴 CU 内摩擦角.

表 2 中: ω 为水的质量分数; γ 为重度; e 为孔隙比; W_L 为液限; W_P 为塑限; K_V 为渗透系数; K_H 为渗透系数; $\alpha_{0.1\sim0.2}$ 为压缩系数; $E_{S_{0.1\sim0.2}}$ 为压缩模量; q_u 为无侧限抗压强度; S_i 为灵敏度;①为固结快剪指标;②为未标明渗透系数;③为未测定指标. 由表 2 可知:对比其他地区的软土工程性质,福州地铁 1 号线③₁ 淤泥具有较高的水的质量分数、较低的重度、较大的孔隙比和液限、较小的渗透系数,黏聚力和内摩擦角(在对比的 5 个地区中,上述指标仅好于深圳软土的),同时具有较大的压缩系数、较小的压缩模量和较高的灵敏度. 相对而言,整体上工程性质较差.

表 1 试验实测典型软土的工程性质表
Tab. 1 Experimental engineering properties of typical soft soils

编号	名称	$\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	C/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	C_U/kPa	$\varphi_U/(^{\circ})$	C_{CU}/kPa	$\varphi_{CU}/(^{\circ})$	C'/kPa	$\varphi'/(^{\circ})$
③ ₁	淤泥	15.7	8.7	12.3	11	2.2	24	14.3	15	23.1
④	粉质黏土	18.8	20.3	17.8	34	13.1	48	20.6	38	25.7
⑤ ₁	淤泥质黏土	16.8	13.0	12.0	21	7.6	35	17.8	22	24.6

福州地铁 1 号线典型软土和其他地区软土的工程性质对比,如表 2 所示^[3-6].

表 2 不同地区软土工程性质对比
Tab. 2 Comparison of engineering properties among soft soils in different areas

地区	土层名称	$\omega/\%$	$\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	e	$W_L/\%$	$W_P/\%$	$K_V/\text{nm}\cdot\text{s}^{-1}$	$K_H/\text{nm}\cdot\text{s}^{-1}$
福州	淤泥	50.3~74.5	14.8~16.6	1.44~2.10	45.0~65.6	26.3~42.2	0.236~0.452	0.313~0.404
	淤泥质黏土	43.5~54.2	16.4~17.2	1.25~1.54	41.6~50.0	24.5~29.2	— ^③	0.394
上海	淤泥质粉质黏土	36.0~49.7	17.1~18.6	1.00~1.36	29.6~40.1	16.3~23.1	20.000~50.000 ^②	
	淤泥质黏土	40.0~59.6	16.4~17.9	1.12~1.67	34.4~50.2	17.4~25.1	2.000~4.000 ^②	
宁波	淤泥质粉质黏土	34.4~51.4	17.0~18.6	1.00~1.42	29.3~46.6	20.2~29.6	0.300~0.900 ^②	
	淤泥质黏土	37.5~58.1	16.5~18.1	1.06~1.50	32.8~50.2	13.2~26.2	0.200~2.200 ^②	
东营	东营软土	33.3~56.6	16.3~18.2	0.99~1.59	26.9~37.3	11.4~20.0	—	
深圳	深圳软土	83.7~92.4	14.7~15.0	2.33~2.51	46.9~55.5	—	1.800~6.000 ^②	
地区	土层名称	C/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	$\alpha_{0.1\sim0.2}/\text{MPa}^{-1}$	$E_{S_{0.1\sim0.2}}/\text{MPa}^{-1}$	q_u/kPa	S_i	
福州	淤泥	4.0~16.0	8.5~16.5	1.01~1.98	1.52~2.46	230.0~460.0	42.0~70.0	
	淤泥质黏土	7.0~13.0	11.0~18.0	0.39~0.90	2.74~5.50	—	—	
上海	淤泥质粉质黏土	8.5~14.2	12.1~28.0	0.30~1.03	2.20~5.97	—	25.0~35.0	
	淤泥质黏土	11.5~15.7	8.5~16.9	0.55~1.65	1.32~3.58	—	30.0~40.0	
宁波	淤泥质粉质黏土	8.0~33.9	7.0~28.0	0.2~1.17	2.08~8.48	—	30.0~50.0	
	淤泥质黏土	7.8~32.6	6.2~13.6	0.49~1.58	1.69~4.97	—		
东营	东营软土	9.0~32.0	2.26~14.6	0.16~0.96	2.49~12.55	—	—	
深圳	深圳软土	5.3~7.1	1.6~4.2	—	1.60~1.70	—	—	

2 长期固结效应

2.1 数值模型概述

数值模拟软件采用大型商业有限元软件 ABAQUS 6.11-2 版本^[19]. 双线隧道线间距为 12.5 m;隧道内径为 6.2 m;隧道埋深 20 m;盾构面支护压力为 125 kPa;盾尾注浆压力为 0.2 MPa;土与管片的摩擦系数 0.2;地下水埋深 3.3 m^[7-12,20]. 建模原则:取一半对称双线隧道建模,以节省计算时间;三维模型

考虑隧道开挖的施工过程引起地表移动的时空效应问题;基于福州地铁 1 号线某区间隧道岩土工程勘察报告结果,土层厚度、力学参数和地下水位的选取,如表 3 所示;考虑地下水的影响,按照地下水位和水压影响的水土合算计算初始地应力;考虑盾构施工过程的同步注浆和壁后注浆对围岩的加固作用,管片及注浆体和围岩共同承载,管片厚 350 mm,弹性模量 30 GPa.

模型尺寸长×宽×厚为 80 m×40 m×60 m,满足边界条件,建模完成后共有 85 034 个 C3D8R 单元,91 078 节点.对③₁~⑤₁ 盾构施工扰动比较明显的软土层,用 Cap Creep 模型模拟蠕变效应导致的次固结沉降.综合考虑施工和运营前期的软土沉降和数值模拟运算时间问题,模拟时间选择 2 年 2 个月,即 800 d.

表 3 土体的物理力学性质
Tab. 3 Physical and mechanical properties of soft soil

层序	名称	$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	P_V/MPa	P_I/MPa	C/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	h/m
①	杂填土	1 700	4.63	2.16	9.2	11.7	3.3
②	黏土	1 650	4.68	0.93	25.4	6.5	1.2
③ ₁	淤泥	1 602	1.26	0.82	11.0	2.2	12.8
④	粉质黏土	1 918	9.76	4.52	34.0	13.1	5.9
⑤ ₁	淤泥质黏土	1 714	3.73	2.24	21.0	7.6	2.5
⑥	碎卵石	2 200	16.56	8.53	0	30.0	5.8
⑦	粉质黏土	1 980	10.32	5.17	36.0	17.6	4.5
⑧	碎卵石	2 200	18.75	9.12	0	30.0	4.4

表 3 中: ρ 为密度,土体密度按该层土试样测试结果较大值选取,以充分考虑自身质量影响; P_V 为体积模量; P_I 为剪切模量; m 为层厚.

ABAQUS 中的地应力平衡通过特殊方法进行处理.首先,进行重力载荷作用下的变形分析,得到土体的沉降和应力分布;其次,再将上述计算的结果作为初始状态施加到模型上,进行地应力平衡分析.施加重力计算,即可得到在重力作用的下的应力分布和沉降.通过此种方法,可以很精确地得到任何土质的初始地应力平衡状态.初始地应力平衡结果,如图 3 所示.

基于初始地应力平衡的状态,模拟后续的开挖过程,开挖为 20 m,每掘进 1 m 作为一个分析步.利用变化模型功能控制管片的添加以及土体的开挖过程.在初始地应力平衡中,将所有管片都杀死,然后在开挖过程中激活;在开挖过程中,将土体杀死.土体与管片考虑为有限滑移,摩擦系数为 0.2.利用 ABAQUS 中独有的压力穿透功能,将 0.2 MPa 的注浆压力施加于管片和土体上,将 125 kPa 的支护压力施加在支护面上.

2.2 分析结果

图 4 为沉降历时 800 d 的土体沉降云图,由图 4 可以得到以下 3 点结论.

- 1) 典型软土地层中盾构隧道开挖地层沉降具有明显的时空效应,距盾构隧道开挖面的距离越长、盾构上方土体固结时间越久,地层沉降越大.
- 2) 受土体开挖卸荷和施工扰动多因素影响,管片安装完成后,隧道底部围岩隆起,最大隆起值达 24.5 mm,隧道上方围岩沉降,800 d 的最大沉降值达-18.6 mm.
- 3) 较近距离的双线盾构隧道,受沉降槽叠加影响,地表最大沉降发生在双线隧道之间的部位,ABAQUS 有限元数值模拟分析结果与类似工程实测结果一致^[9-10].

隧道开挖 20 m 后,沉降历时 800 d 的管片应力,如图 5 所示,由图 5 可知:隧道开挖完成后,上下左右 4 个方位的管片受力较大,上下左右 45°方位的管片受力较小,这与类似工程实测结果吻合^[21].

盾构隧道开挖 20 m 后,沉降历时 800 d 的隧道顶部和双线隧道中间地表两个测点的沉降曲线,如图 6 所示.图 6 中:1 为隧道顶部地表沉降曲线;2 为双线隧道中间地表沉降曲线.由图 6 可知:隧道顶部地表沉降达-15.3 mm,双线隧道中间地表沉降达-18.6 mm,历时 800 d,但两测点的沉降并没有完全

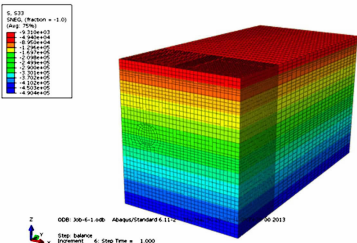


图 3 数值模型初始应力平衡结果
Fig. 3 Initial stress balance result of numerical model

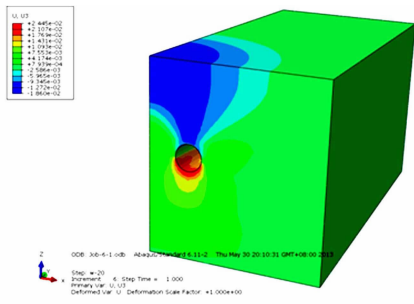


图 4 隧道开挖 800 d 后地层沉降云图
Fig. 4 Ground settlement counter of
800 d after tunnel excavation

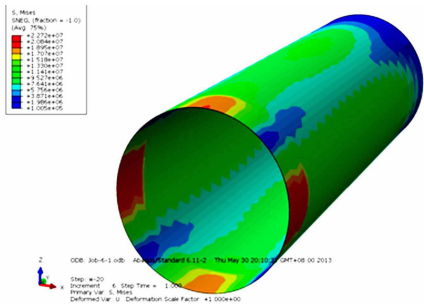


图 5 隧道开挖 800 d 后隧道管片应力图
Fig. 5 Tunnel segments stress counter of
800 d after tunnel excavation

收敛,说明该类软土受施工扰动后,将存在较长时期的次固结沉降,次固结沉降值较大且不均匀,容易在地铁隧道投入运行之后,造成周边建(构)筑物沉降开裂、隧道自身开裂渗水.与福州地铁 1 号线工程地质条件类似的上海地铁,已经遇到了类似问题.因此,在隧道施工和投入运营之后,要充分考虑该类软土的工程特性及其可能造成的破坏,采取针对性的措施加以预防.

3 结论

分别采用扫描电子显微镜(SEM)、X 射线衍射分析、室内物理力学试验和 ABAQUS 有限元数值模拟分析方法,从不同方面研究了福州地铁 1 号线埋深范围内存在的较厚层典型软土的工程性质及其施工扰动后对地层环境的影响.通过研究,可以得出如下 3 点结论.

1) 福州地铁 1 号线埋深范围内存在的较厚的③₁ 淤泥,由含有较大孔隙的微团聚颗粒组成,试样包含石英成分,试样的不同放大倍数图像具有一定的自相似特征.对比其他地区软土,③₁ 淤泥水的质量分数、孔隙比、液限、压缩系数和灵敏度较高,重度、渗透系数、压缩模量、黏聚力和内摩擦角较小,工程性质较差,如不采取加固措施,施工和运营阶段对该层的扰动将造成其长期次固结沉降,危及工程安全.

2) 盾构隧道开挖具有明显的时空效应,管片安装完成后,隧道底部围岩最大隆起值达 24.5 mm,隧道上方围岩最大沉降值达-18.6 mm,地表最大沉降发生在双线隧道中间部位;上下左右 4 个方位的管片受力较大,上下左右 45°方位的管片受力较小,数值模拟结果符合工程实际.

3) 沉降历时超过 26 个月,但相关地表监测点的沉降并没有完全收敛,说明该类软土受施工扰动后,将存在较长时间数值较大且不均匀的次固结沉降,容易引起周边建(构)筑物损害和隧道管片自身开裂渗水之类的工程问题.因此,应在盾构隧道设计、施工和运营各环节采取针对性的措施加以预防,确保工程安全.

参考文献:

[1] 翁升,马时冬. 福建高速公路软土特征及处理方法[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2002,23(1):61-64.
[2] 俞缙,王艳芳,宋博学. 复合土钉支护的软土基坑开挖有限元模拟分析[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2011,32(2):212-217.
[3] 简文彬,李润. 福州轨道交通建设中的岩土工程问题[J]. 工程地质学报,2010,18(5):748-753.
[4] 易坤津. 上海地区与宁波地区软土工程特性分析[J]. 浙江建筑,2012,29(5):30-32.
[5] 颜庆智,付长波,饶江,等. 东营软土工程特性及参数相关方程[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2010,34(3):130-133,139.

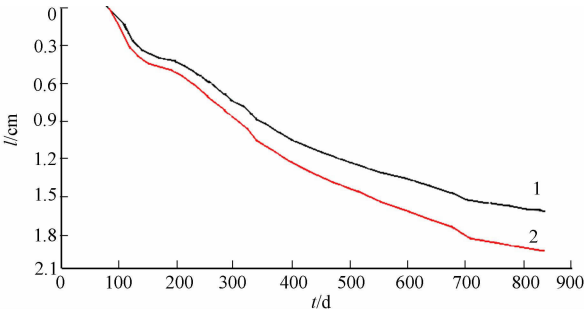


图 6 不同测点在隧道开挖 800 d 后的沉降曲线
Fig. 6 Surveying points settlement curves
after 800 d tunnel excavation

[6] 丘建金,文建鹏. 深圳地区滨海软土工程特性及加固技术[J]. 工程地质学报,2008,16(4):567-571.

[7] 朱启银,叶冠林,王建华,等. 软土地层盾构隧道长期沉降与施工因素初探[J]. 岩土工程学报, 2010,32(增刊 2): 509-512.

[8] 葛世平,廖少明,陈立生,等. 地铁隧道建设与运营对地面房屋的沉降影响与对策[J]. 岩石力学与工程学报,2008, 27(3):550-556.

[9] 林存刚,张忠苗,吴世明,等. 软土地层盾构隧道施工引起的地面隆陷研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(12): 2583-2592.

[10] 孙玉永,周顺华,宫全美. 软土地区盾构掘进引起的深层位移场分布规律[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(3): 500-506.

[11] 徐前卫,朱合华,廖少明,等. 软土地层土压平衡盾构法施工的模型实验研究[J]. 岩土工程学报,2007,29(12): 1849-1857.

[12] 林志斌,李元海,赵耀强,等. 地下水对软土盾构隧道施工的影响规律分析[J]. 地下空间与工程学报,2012,8(2): 375-381.

[13] 竺维彬,鞠世健. 地铁盾构施工风险源及典型事故的研究[M]. 广州:暨南大学出版社,2009:8.

[14] LIAO Shao-ming,LIU Jian-hang,WANG Ru-lu,et al. Shield tunneling and environment protection in Shanghai soft ground[J]. Tunnel Underground Space Technology,2009(24):454-465.

[15] 王宝军,施斌,唐朝生. 基于 GIS 实现黏性土颗粒形态的三维分形研究[J]. 岩土工程学报,2007,29(2):309-312.

[16] 唐益群,张 曦,赵书凯,等. 地铁振动荷载作用下隧道周围饱和软黏土分形研究[J]. 土木工程学报,2007,40(11): 86-91.

[17] 严继华. 广州地铁复杂岩土性状分析与研究[D]. 北京:中国矿业大学,2005:6.

[18] 中国石油天然气总公司. 沉积岩中粘土矿物总量和常见非粘土矿物 X 射线衍射定量分析方法[S]. 北京:石油工业出版社,1995:12.

[19] 马晓峰. ABAQUS 6.11 中文版有限元分析从入门到精通[M]. 北京:清华大学出版社,2013:2.

[20] 张凤祥,朱合华,付德明. 盾构隧道[M]. 北京:人民交通出版社,2004:9.

[21] 叶飞,何川,王世民. 盾构隧道施工期衬砌管片受力特性及其影响分析[J]. 岩土力学,2011,6(6):1801-1806,1812.

Engineering Properties Study of Typical Soft Soil
in Fuzhou Metro Line 1

LIU Ji-feng¹, LI Xiong-run², CHEN Fu-xing¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Sanming University, Sanming 365004, China;
2. Fujian Province Shunan Engineering Construction Company Limited, Putian 351200, China)

Abstract: To investigate the engineering properties of typical soft soil at Fuzhou Metro Line 1 and its influence to environment, some tests were conducted, such as the scanning electron microscope, X-ray diffraction analysis, physical and mechanical experiments, respectively. Based on the engineering geology and construction parameters, the ABAQUS numerical simulation analysis about soft soil influence to environment was presented. The results show that: the soft soil consists of voids and micro soil aggregates, and there exist the self-similar characteristic among the samples with different magnifications. The soft soil contains quartz crystal, with poor engineering properties. The calculation ground settlement and tunnel segments stress after 20 m excavation and 800 d consolidation agree with the similar engineering surveyed results. The max settlement of ground surface is 18.5 mm, which is not completely converged.

Keywords: Fuzhou Metro Line 1; typical soft soil; shield tunnel; ground settlement; segment stress; consolidation effect; numerical simulation

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)