

成都地铁17号线东延伸段膨胀土胀缩变形力学特性^{*}吉力此且^{1,2} 李江峰³ 李红学³ 程敏杰³ 陈 龙²

(1. 四川开放大学工程技术学院, 610073, 成都; 2. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 610059, 成都;

3. 中铁十二局集团第四工程有限公司, 710024, 西安//第一作者, 副教授)

摘 要 为了研究成都地区典型膨胀土深基坑的支护参数, 采用现场调研、室内试验、数据分析和现场监控量测等方法, 以成都地铁17号线二期东延伸段威灵站深基坑工程为例, 开展膨胀土的自由膨胀率、无荷载膨胀率及膨胀力等胀缩变形力学特性研究。结合现场施工监控量测分析, 研究了各施工步骤下基坑的支护桩水平位移、断面支撑轴力和地面竖向位移的情况。研究结果表明: ①该地区膨胀土主要分布在地下5~10 m深度处, 主要为弱膨胀土, 自由膨胀率在50%以内; ②试验土样的无荷载含水率与含水率有较大的关系, 遇水后的无荷载膨胀率随着土样含水率的增加而降低; ③随着土体含水率的增加, 试验土样的膨胀力呈线性降低趋势; ④随着基坑的开挖, 支护桩的水平位移逐渐增大, 其主要发生在第1道支撑和第3道支撑之间, 桩体主要向基坑内侧偏移, 少部分向基坑外侧偏移; ⑤支撑轴力出现过大的现象, 当开挖至轴力监测点ZL32-3支撑位置时, ZL32-1测点处的支撑轴力超过设计值约50 kN; ⑥从地面竖向位移监测结果来看, 该工程深基坑开挖支护设计总体可控。

关键词 地铁; 膨胀土; 胀缩变形

中图分类号 P642.11⁺6; TU433

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.05.009

Swell-Shrink Deformation Mechanical Property of Expansive Soil in Chengdu Metro Line 17 East Extension Section

JILI Ciqie, LI Jiangfeng, LI Hongxue, CHENG Minjie, CHEN Long

Abstract To study the support parameters of typical expansive soil deep foundation pit in Chengdu area, taking the Weiling Station deep foundation pit engineering of Chengdu Metro Line 17 phase II east extension section as an example, the methods of field investigation, indoor test, data analysis, field monitoring and measurement are adopted to conduct mechanical property research on expansive soil swell-shrink deformation, such as the free expansion rate, no-load expansion rate and expansive force. Combined with the field construction monitoring

and measurement analysis, the retaining pile horizontal displacement, the section supporting axial force and the ground vertical displacement at each construction step are studied. Research results show that: (1) the expansive soil in this area is mainly distributed at the depth of 5–10 m underground, mainly composed of weak expansive soil with the free expansion rate within 50%; (2) the no-load water content is closely related with water content for test soil sample, and the no-load expansion rate after encountering water decreases with the increase of soil sample water content; (3) with the increase of soil water content, the expansive force of test soil sample decreases linearly; (4) with the excavation of foundation pit, the retaining pile horizontal displacement increases gradually, which mainly occurs between the first support and the third support, most of the pile body shift to the inside of the foundation pit, and a small part to the outside; (5) excessive supporting axial force may occur, and when the excavation reaches the supporting position at ZL32-3 axial force monitoring point, the supporting axial force at ZL32-1 point exceeds the design value by about 50 kN; (6) according to the ground vertical displacement monitoring results, the deep foundation pit excavation and support design of the project is generally controllable.

Key words metro; expansive soil; swell-shrink deformation

First-author's address College of Engineering and Technology, The Open University of Sichuan, 610073, Chengdu, China

膨胀土在我国分布范围很广, 遍及20多个省、市和自治区, 成都地区主要分布于东部区域。成都地铁2号线、4号线和17号线等多条线路均到达或穿越东部膨胀土区域, 由于膨胀土具有较强的水敏感性、超固结性、多裂隙性和长期潜在危险性等特性, 因此研究成都东部区域膨胀土特性及其对深基坑稳定性的影响具有较大的现实意义^[1-3]。

文献[3]通过对现场取回的膨胀土进行电镜扫

^{*} 中铁建十二局集团科研基金项目(2020研-10)

描测试,提出膨胀土颗粒的湿润膨胀和干燥收缩现象。文献[4]通过膨胀土的抗剪强度试验,获得了随着土体含水率的增加,土体抗剪强度逐渐降低的结论。文献[5]对成都地铁2号线东延伸段的膨胀土进行了室内膨胀力试验,试验结果表明,膨胀力随着土体干密度的增大而增大,随着含水率的增大而减小。文献[6]采用固结仪对现场取回膨胀土的膨胀变形特性进行了试验分析,获得了土体含水率越大,膨胀率越小,以及土体压实度越大,土体膨胀率越大的结论。

目前,已有文献大多停留在理论研究阶段,并没有对膨胀土开展现场实试验证,对于类似施工工程的参考针对性和指导性不强。基于此,本文以成都地铁17号线二期工程东延伸段威灵站为例,针对威灵站膨胀土的自由膨胀率、无荷载膨胀率和膨胀力等主要胀缩变形参数进行了力学试验,同时结合现场支护结构变形监测数据,提出针对成都地区典型膨胀土深基坑支护参数的相关建议。本研究可为类似地下工程的设计、施工及运营维护提供参考与借鉴。

1 试验材料及步骤

1.1 自由膨胀率试验

自由膨胀率是膨胀土一个重要的胀缩力学特性指标,是天然膨胀土经过烘干、碾磨过筛及浸水膨胀稳定后体积的增量与原体积的比值,以百分含量表示。本次试验对车站内的典型位置进行了取土。1号取土处的土样深度为7.7 m,土体呈红色且含水率高,具有较强的黏塑性;2号取土处的土样深度为8.1 m,土体呈红色且含水率较高,并含有较多的泥岩碎石,具有一定的黏塑性;3号取土处的土样深度为7.0 m,土体呈灰黄色且含水率较高,并含有较多的矿物质,黏塑性较强;在深度为5.0 m、6.0 m、7.5 m、9.0 m、10.0 m、11.5 m、16.0 m、19.0 m、22.5 m和26.0 m处对4号取土处进行取样。

自由膨胀率试验的具体步骤为:

1) 将取回的膨胀土置于烤箱中烘干,烤箱温度设为105℃,待土样烘干后进行碾磨,使其通过0.5 mm筛孔后获得所需膨胀土土样。

2) 将漏斗放在支架上,漏斗下口对准量土杯中中心并保持10 mm距离;取适量土样倒入漏斗,边倒入边搅动。待量土杯装满土样即将溢出时,移开漏斗并刮去杯口多余土样,称取10 mL量土杯中的试

样并测定其质量,另取一个量土杯重复上述操作,称取第2个试样的质量(两次测定的质量差值不得大于0.1 g^[7])。

3) 取2个内部干燥的100 mL量筒,向量筒内注入蒸馏水,同时加入5 mL纯氯化钠溶液(质量分数为5%),然后将已称量好的两份土样缓缓倒入2个50 mL的量筒中,搅拌量筒的悬浊液,将附着在筒壁上的土粒一起冲入量筒,直至量筒内液面达到50 mL刻度线后静置。

4) 将量筒放置在平整的试验台上,待量筒内溶液澄清,每隔2 h记录一次试样高度。若量筒内液面倾斜,则读取土样高低面读数的平均值。当相邻两次的读数差值低于0.2 mL时,可认为土样膨胀达到稳定状态,此时计算其自由膨胀率。

1.2 无荷载膨胀率试验

无荷载膨胀率指的是膨胀土在没有上覆荷载且完全侧限条件下的竖向膨胀变形增量与试样初始高度的比值,反映了膨胀土的竖向膨胀变形特性,是衡量膨胀土膨胀变形特性一个重要的室内试验指标。为了研究初始含水率对膨胀土膨胀特性的影响,本文选取4种土样的含水率情况进行研究。

由自由膨胀率试验结果可知,4号取土处、深度为10.0 m处的土样是弱膨胀土,故选择该处土样进行无荷载膨胀率试验。试验土样的干密度为1.500 g/cm³,当试验土样的含水率为18%、21%、24%和27%时,进行无荷载膨胀率试验。

无荷载膨胀率试验的具体步骤为:

1) 将取回的膨胀土土样置于烤箱中烘干,烤箱温度设为105℃,待土样烘干后进行碾碎,使其通过2.0 mm筛孔后获得所需膨胀土土样。

2) 取一定量的土样,根据预设含水率加入一定量的水充分搅拌,然后在搅拌盆上盖上保鲜膜静置24 h,使其充分润湿,静置后随机测取盆中两个不同点位的含水率,若含水率差值小于0.1%,则满足试验要求;若含水率差值大于0.1%,则说明润湿不均匀,需重新搅拌再制作土样。

3) 擦净环刀外壁,称取环刀和土样总质量,计算土样密度,用击实锤锤击试验土样;将余土称量并烘干,测取其含水率。

4) 将环刀钝口端用压环固定在底座上,使试样底面与透水板顶面密切接触,然后一起放置于水盒中,将有孔盖板放在试样顶面并对准试验土样中心,安装百分表并记录其初始读数。

5) 向水箱内注入纯水,使纯水自下而上进入试验土样,保持水面高出试验土样 5 mm,记录注水开始时间,按 5 min、10 min、15 min、20 min、30 min、60 min、120 min、180 min、360 min、720 min 和 1 440 min 时间间隔测读百分表的读数。

- 6) 计算任一时间的试验土样无荷载膨胀率。
- 7) 重复上述步骤,依次对其他不同含水率的试验土样进行测试。

1.3 膨胀力试验

膨胀力是指试验土样在保持体积不变的情况下,吸水膨胀产生的最大内应力。由自由膨胀率试验结果可知,4 号取土处、深度为 10.0 m 处的土样是弱膨胀土,故选择该处土样进行膨胀力试验。试验土样干密度为 1.500 g/cm³,当试验土样的含水率为 21%、24%、27%和 30%时,进行膨胀力试验。

膨胀力试验步骤为:

1) 将取回的膨胀土土样置于烤箱中烘干,烘箱温度设为 105 ℃,待土样烘干后进行碾碎,使其通过 2.0 mm 筛孔后获得所需膨胀土土样。

2) 取一定量的土样,根据预设含水率加入一定量的水充分搅拌,然后在搅拌盆上盖上保鲜膜静置 24 h,使其充分润湿,静置后随机测取盆中两个不同点位的含水率,若含水率差值小于 0.1%,则满足试验要求;若含水率差值大于 0.1%,则说明润湿不均匀,需重新搅拌再制作土样。

3) 制作环刀式样。根据预设的含水率计算所加入的水量,配置不同含水率的试验土样,采用环刀制作土样,并测试余下试验土样的含水率。

4) 根据压缩试验要求将试样放入容器内,同时放入透水石和滤纸。调整杠杆使其水平,并施加 1~2 kPa 的压力(保持该压力直到试验结束,不计算在加荷压力之内),再对试样施加 50 kPa 的瞬时压力,使加荷支架、压板、试验土样和透水石紧密接触。调整百分表,记录初始读数。

5) 在 5 min 内持续对试验土样施加所要求的压力(大于膨胀土的膨胀力),同时对试验土样的荷载增加至 100 kPa,使其固结压缩稳定。试验土样的压缩稳定标准为连续两次百分表的读数数值不超过 0.01 mm。

6) 待固结稳定后,自下而上向容器内注入纯水,保持水面高出试验土样 5 mm 直至试验结束。试样浸水稳定后,按 100 kPa、50 kPa、25 kPa 和 0 的加荷等级退荷。

7) 每隔 2 h 记录一次百分表的读数,当两次读数的差值不超过 0.01 mm 时,可认为在该荷载下试验土样的膨胀达到稳定状态,但每级荷载下的膨胀时间应不少于 12 h。

8) 试验结束后,吸去容器中多余的水,拆卸装置并处理数据。

2 试验结果及分析

2.1 自由膨胀率试验

根据 GB 50112—2013《膨胀土地区建筑技术规范》对不同取土位置处试验土样的自由膨胀率进行分析,如表 1 所示。由表 1 可知:1 号取土位置、3 号取土位置和 4 号取土位置(深度为 10.0 m)试验土样的自由膨胀率分别为 45.8%、48.0%和 45.1%,判定其为弱膨胀土。结合试验结果及现场实际情况可知,成都地铁 17 号线二期东延伸段的膨胀土主要为弱膨胀土,其深度为 5~10 m,在成都东部地区分布较广。

表 1 不同取土位置处试验土样的自由膨胀率

Tab. 1 Free expansion rate of test soil samples obtained at different positions

取土位置	深度/m	膨胀率/%	膨胀土性质
1 号	7.7	45.8	弱膨胀土
2 号	8.1	35.8	无
3 号	7.0	48.0	弱膨胀土
4 号	5.0	38.0	无
	6.0	37.6	无
	7.5	35.0	无
	9.0	37.4	无
	10.0	45.1	弱膨胀土

2.2 无荷膨胀率试验

不同含水率下,试验土样的无荷载膨胀率时程图如图 1 所示。由图 1 可知:①试验土样在无荷载作用下会发生膨胀,膨胀主要发生在土体浸水后的 0~720 min。② 0~180 min 时,试验土样遇水后膨胀较快;180~360 min 时,试验土样缓慢膨胀;360 min 后试验土样几乎处于稳定状态,膨胀速率较慢且膨胀变形较小。③当试验土样的含水率为 18%时,试验土样总膨胀量为 6.518 mm;0~720 min 时,试验土样的膨胀量为 6.170 mm,膨胀速率为 2.160 mm/h;180~360 min 时,试验土样的膨胀量为 0.018 mm,膨胀速率为 0.060 mm/h;360~1 440 min

时,试验土样的膨胀量为 0.618 mm, 膨胀速率为 0.009 mm/h。

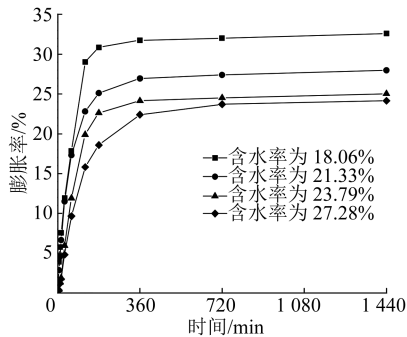


图 1 不同含水率下试验土样的无荷载膨胀率时程图
Fig. 1 No-load expansion rate time-history diagram of test soil samples with different water contents

不同含水率下试验土样的无荷载膨胀率如图 2 所示。由图 2 可知,在无荷载作用下,试验土样遇水后的无荷载膨胀率 δ 随着含水率 w 的增加而降低,两者之间具有一定的拟合函数关系(拟合度为 0.991),可以表示为:

$$\delta = 388.6e^{-w/5} + 22.2 \quad (1)$$

现场实测土体的含水率为 23.45%,由式(1)可以获得试验土样的无荷载膨胀率为 25.76%。这说明在地铁车站深基坑开挖暴露后,基坑壁会出现一定程度的膨胀变形,易引起桩间土体的崩塌破坏。

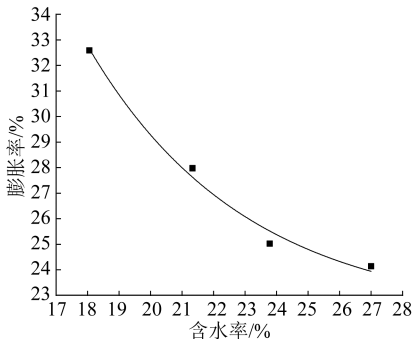


图 2 不同含水率下试验土样的无荷载膨胀率
Fig. 2 No-load expansion rate of test soil samples with different water contents

2.3 膨胀力试验

采用反压膨胀法测定试验土样的膨胀力,将环刀试样放入固结仪,施加竖向压力稳定后,再加入纯水使其缓慢膨胀。不同荷载下,试验土样的膨胀率如图 3 所示,其中曲线与横坐标的交点即为试验土样的膨胀力。不同含水率下,试验土样的无荷载膨胀力如图 4 所示。由图 4 可知:当含水率从

23.11%增加至 31.55%时,膨胀力由 42.81 kPa 减小至 12.53 kPa,减小幅值为 30.28 kPa;随着土体含水率的增加,膨胀力呈线性降低趋势。膨胀力 P 与含水率之间的函数关系式为:

$$P = -3.3w + 121.1 \quad (2)$$

现场实测土体的含水率为 23.45%,由式(2)可以获得试验土样的膨胀力为 42.56 kPa。

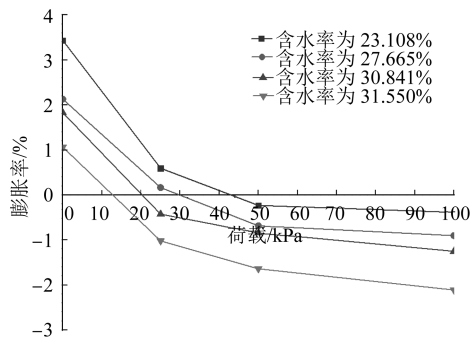


图 3 不同荷载下的试验土样膨胀率
Fig. 3 Expansion rate of test soil samples under different loads

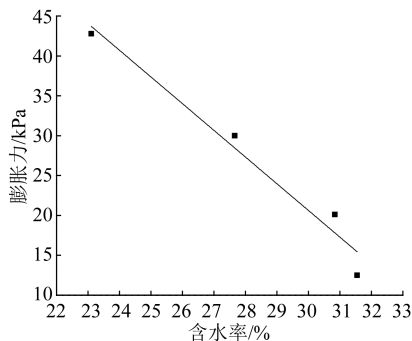


图 4 不同含水率下试验土样的无荷载膨胀力
Fig. 4 Expansion force diagram of test soil samples with different water contents

3 现场监控量测

3.1 威灵站支护设计参数

成都地铁 17 号线东延伸段威灵站的基坑深度为 19.6~27.5 m,标准段宽度为 24.5m,围护结构采用支护桩+内支撑形式。围护结构采用 φ 1 200 mm 旋挖桩,一般段间距取为 2 000 mm,临城市道路侧及靠近建筑物段间距加密为 1 800 mm。车站主体大里程端贴近邻近建筑物地下室独立基础处,采用 φ 1 000 mm@1 400 mm 旋挖桩;在盾构洞门处采用 φ 1 500 mm@1 800 mm 玻璃纤维筋旋挖桩。车站标准段竖向设置 3 道支撑,车站两端头 8 m 范围内第 1 道支撑采用钢筋混凝土支撑,其余支撑采用钢支撑,钢管支撑采用直径为 609 mm、壁厚为 16 mm

及直径为 800 mm、壁厚为 16 mm 两种钢管。桩顶设冠梁,桩间采用挂网喷射混凝土,钢筋网规格为 $\varphi 8\text{ mm}@150\text{ mm}\times150\text{ mm}$ (盾构洞门位置采用玻璃纤维筋),喷射早强 C20 混凝土厚 150 mm,支护桩和钢筋网之间保证可靠连接。

3.2 威灵站开挖施工情况

在基坑开挖及地下结构施工过程中,需要加强对基坑围护结构的变形监测,并及时反馈监测结果以指导施工。地铁车站基坑工程施工时,不同的支护结构体系所引起的基坑及周边环境的变形也有所不同,威灵地铁车站基坑工程主要采用支护桩+内支撑形式的支护体系。地铁车站基坑共布置了 38 个支护桩水平位移监测点,其中基坑左、右两侧各布置 17 个监测点,大小里程端头各布置 2 个监测点。监测点布设示意图如图 5 所示。

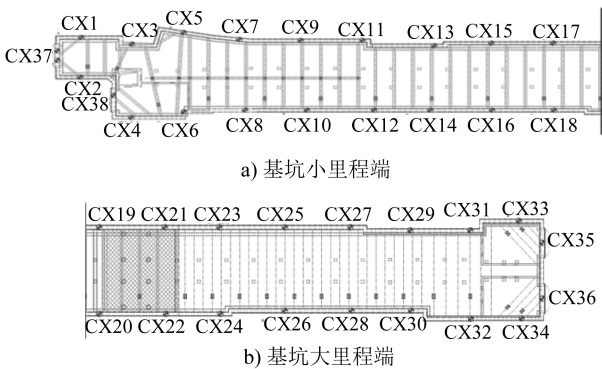


图 5 基坑监测点布设示意图

Fig. 5 Layout diagram of foundation pit monitoring points

- 车站主体采用明挖法施工,主要施工步骤为:
- 步骤 1 场地平整,管线改迁并施作冠梁和挡墙,开挖土体至相应标高处,架设第 1 道支撑;
 - 步骤 2 继续开挖至土体相应标高处,架设第 2 道支撑;
 - 步骤 3 开挖基坑至土体相应标高处,架设第 3 道支撑;
 - 步骤 4 基坑全部开挖完成;
 - 步骤 5 施工基坑底板,待底板强度稳定后,拆除第 3 道支撑,并施作地下二层侧墙和车站结构框架柱;
 - 步骤 6 施工基坑主体结构中板及框架梁,待中板和框架梁的强度稳定后,拆除第 2 道支撑,并施作地下一层的侧墙和框架柱;
 - 步骤 7 施作车站主体结构顶板,待顶板强度稳定后,拆除第 1 道支撑。

3.3 威灵站现场检测结果

结合威灵站现场实际监测结果,分析各施工步骤下基坑的支护桩水平位移、断面支撑轴力和地面竖向位移的情况。

3.3.1 支护桩水平位移

分析不同施工步骤下 CX31 测点的支护桩水平位移变化,如图 6 所示。由图 6 可知:在开挖阶段,随着基坑的开挖,支护桩的水平位移逐渐增大,基坑右侧支护桩的水平位移大于基坑左侧支护桩的水平位移;水平位移的变化主要发生在开挖第 1 道支撑与第 2 道支撑之间的土体;水平位移的最大值出现在第 2 道支撑位置处;在拆除支撑的过程中,支护桩的水平位移逐渐增大,但增大量较小。

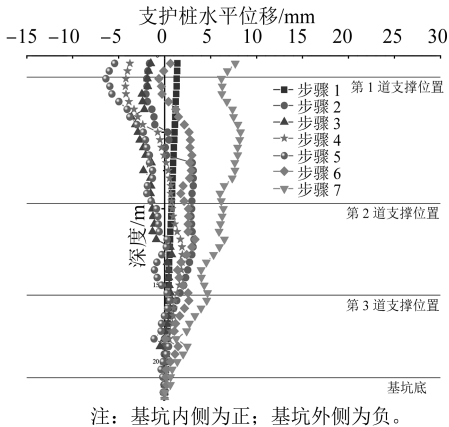


图 6 不同施工步骤下 CX31 测点的支护桩水平位移变化
Fig. 6 Retaining pile horizontal displacement changes of CX31 measuring point at different construction steps

3.3.2 支撑轴力

支撑轴力是分析基坑受力的重要依据,整个车站基坑共设 36 个轴力测点,本文选取轴力监测点 32(ZL32)的轴力数据进行研究分析,根据支撑位置每个测点又分为 3 个支撑监测点(ZL32-1—ZL32-3)。不同施工步骤下,3 个支撑监测点的轴力变化如图 7 所示。由图 7 可知:ZL32-1 监测点的支撑轴力为 550~900 kN(该位置处支撑轴力设计值为 850 kN,预加轴力值为 300 kN);ZL32-2 监测点的支撑轴力为 450~800 kN(该位置处支撑轴力设计值为 1 800 kN,预加轴力值为 400 kN);ZL32-3 监测点的支撑轴力约为 500 kN(该位置处支撑轴力设计值为 1 050 kN,预加轴力值为 400 kN);当开挖至 ZL32-3 点支撑位置处时,ZL32-1 点处的支撑轴力值超过设计值约 50 kN,其余实测轴力值都在设计范围内。

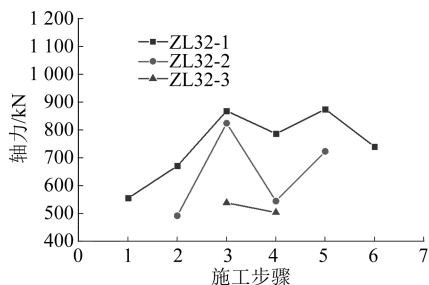


图7 不同施工步骤下3个支撑监测点的轴力变化

Fig. 7 Axial force changes of 3 support monitoring points at different construction steps

3.3.3 地面竖向位移

整个车站基坑共布置38个地面监测点,均位于支护桩后方,其中基坑左、右两侧各布置17个监测点,大小里程端头布置2个监测点。本文选取地面竖向位移监测点32(DB32)的地面竖向位移数据进行研究分析,根据支护桩位置每个测点又分为3个支护桩监测点(DB32-1—DB32-3)。不同施工步骤下,3个支护桩监测点的地面竖向位移变化如图8所示。由图8可知:在基坑开挖过程中,地面竖向位移逐渐增大,地面竖向位移范围为0~10 mm;在施作主体结构过程中,地面有向上隆起的现象,约为4 mm;整个开挖过程中,地面竖向位移均较小,在设计标准范围内。

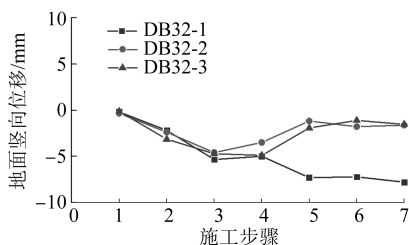


图8 不同施工步骤下3个支护桩监测点的地面竖向位移变化

Fig. 8 Ground vertical displacement changes of 3 retaining pile monitoring points at different construction steps

4 结语

本文以成都地铁17号线二期东延伸段威灵站深基坑工程为例,通过试验分析膨胀土的自由膨胀率、无荷载膨胀率及膨胀力,并结合现场施工监控量测分析,研究了各施工步骤下基坑的支护桩水平位移、断面支撑轴力和地面竖向位移的情况。主要获得以下结论:

1) 该地区膨胀土主要分布在地下5~10 m深度处,主要为弱膨胀土,自由膨胀率在50%以内。

2) 试验土样的无荷载膨胀率与含水率有较大的关系,遇水后的无荷载膨胀率随着土样含水率的增加而降低。

3) 随着土体含水率的增加,试验土样的膨胀力呈线性降低的趋势。

4) 随着基坑的开挖,支护桩的水平位移逐渐增大,其主要发生在第1道支撑和第3道支撑之间,桩体主要向基坑内侧偏移,少部分向基坑外侧偏移。

5) 支撑轴力出现过大的现象,当开挖至ZL32-3轴力监测点支撑位置处时,ZL32-1点处的支撑轴力超过设计值约50 kN。

6) 从地面竖向位移监测结果来看,该工程深基坑开挖支护设计总体可控。

成都地区膨胀土主要集中在东部区域,对于深基坑工程的开挖支护设计、施工及后期运营维护问题,均需在设计阶段就充分考虑该地区的膨胀土胀缩力学特性,做好相应的支护结构设计。

参考文献

- [1] 吉力此且,李江峰,路军富,等. 膨胀土地铁车站深基坑桩间土失稳特征研究[J]. 中国新技术新产品, 2022(7): 88.
JILI Ciqie, LI Jiangfeng, LU Junfu, et al. Study on instability characteristics of soil between piles in deep foundation pit of expansive soil railway station[J]. New Technology & New Products of China, 2022(7): 88.
- [2] 李小冰. 微生物改良膨胀土的微观结构和力学特性研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021.
LI Xiaobing. Study on microstructure and mechanical properties of expansive soil improved by MICP technology[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2021.
- [3] 孙丹曦. 原状弥勒膨胀土裂隙特征及持水特性试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
SUN Danxi. Experimental study on crack characteristics and water-retention characters of undisturbed Mile expansive soil[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [4] 杨庆,张慧珍,栾茂田. 非饱和膨胀土抗剪强度的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 420.
YANG Qing, ZHANG Huizhen, LUAN Maotian. Testing study on shear strength of unsaturated expansive soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 420.
- [5] 焦清杰. 成都东部地区膨胀土工程特性及对轨道交通工程建设的影响分析[J]. 勘察科学技术, 2014(2): 31.
JIAO Qingjie. Engineering properties of expansive soil in Chengdu east and its influence on construction of rail transit[J]. Site Investigation Science and Technology, 2014(2): 31.

(下转第64页)

表 2 引入多种轨道交通系统制式的枢纽机场 GTC 布局特性

Tab. 2 Layout characteristics of hub airport GTC with multiple rail transit systems

GTC 布局模式		布局特性	适用范围	典型案例机场
竖向错层式	并行错层式	不同类型的轨道交通可独立运营,轨道交通线路一般平行于航站楼设置	现有航站楼主楼前的改扩建	贵阳龙洞堡国际机场、西宁曹家堡国际机场、温州龙湾国际机场、南宁吴圩国际机场
	交叉错层式	不同轨道交通系统制式的站台分离,易受电梯等垂直换乘设施的容量限制,轨道交通线路可同时下穿机场跑道和主航站楼	航站区规划、建设和运营三者同步	成都天府国际机场、昆明长水国际机场、长沙黄花国际机场、重庆江北国际机场、天津滨海国际机场 T3 航站楼
同层集中式	平行主航站楼	场站采用就近布设,顺向设置,与轨道交通车站走向一致,避免轨道交通设施对航站区的影响	对称式双主楼布局的航站区	兰州中川国际机场、西安咸阳国际机场 T5 航站楼、上海浦东国际机场
	垂直主航站楼	可最大程度抵近航站楼,进出人流集中于主航站楼,同时还可服务周边其他航站楼	多航站楼呈围合式布局的航站区	北京大兴国际机场、广州白云国际机场、郑州新郑国际机场、青岛胶东国际机场、武汉天河国际机场、厦门翔安国际机场
同层分离式		可分期建设和运营,各部分相对独立,便于管理;有专属通道设施连接各轨道交通车站	航站区分期新建或改扩建	杭州萧山国际机场、北京首都国际机场、深圳宝安国际机场、福州长乐国际机场、宁波栎社国际机场

的地面综合交通中心设计方案。

参考文献

[1] 唐怀海,潘昭宇. 枢纽机场与多层次轨道交通体系的衔接布局[J]. 城市交通,2020,18(4): 79.
TANG Huaihai, PAN Zhaoyu. Connecting layout between hub airport and multilevel rail transit system[J]. Urban Transport of China,2020,18(4): 79.

[2] 孙一兵. 我国机场综合交通枢纽换乘中心建筑设计浅析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2014.
SUN Yibing. Explore the architectural design of the comprehensive transportation hub airport transfer center in China[D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology,2014.

[3] 欧阳杰,李相志,邓海超. 机场陆侧交通设施竖向布局模式研

究[J]. 城市轨道交通研究,2017,20(10): 53.
OUYANG Jie, LI Xiangzhi, DENG Haichao. On the vertical layout pattern of airport land transit facilities[J]. Urban Mass Transit,2017,20(10): 53.

[4] 欧阳杰,胡艳霞,张振飞. 枢纽机场航站区陆侧车道边布局模式研究[C]//工业建筑杂志社有限公司. 2020 年工业建筑学术交流会议论文集(中册). 北京:工业建筑杂志社,2020: 60.
OUYANG Jie, HU Yanxia, ZHANG Zhenfei. Research on landside driveway section layout mode of hub airport terminal area[C] //Industrial Construction Magazine. Proceedings of 2020 Industrial Construction Academic Exchanges Forum (Second Volume). Beijing: Industrial Construction Magazine Agency Co., Ltd., 2020: 60.

(收稿日期:2021-01-14)

(上接第 54 页)

[6] 王志强,赵祥. 南阳膨胀土膨胀特性的试验研究[J]. 中国水能及电气化,2013(4): 24.
WANG Zhiqiang, ZHAO Xiang. Experimental study of expansion characteristics of Nanyang expansive soil[J]. China Water Power & Electrification, 2013(4): 24.

[7] 于佳丽. 冻融循环下钢渣粉改良膨胀土工程力学特性试验研

究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2019.
YU Jiali. Experimental study on engineering mechanical properties of expansive soil improved by steel slag powder under freeze-thaw cycles[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2019.

(收稿日期:2020-10-15)

(上接第 58 页)

参考文献

[1] 中国城市轨道交通协会. 中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要[J]. 城市轨道交通,2020(4): 8.
China Association of Metros. Development outline of smart city rail transit in China[J]. China Metros, 2020(4): 8.

[2] 牛惠民,田小鹏,高如虎,等. 时变客流驱动的城市轨道交通客流匹配与时刻表调整方法: 201711340512.2[P]. 2018-05-29.

NIU Huimin, TIAN Xiaopeng, GAO Ruhui, et al. Passenger flow matching and timetable adjustment of urban rail transit driven by time-varying passenger flow: 201711340512.2[P]. 2018-05-29.

[3] 孙舒森,赵嘉伟,张宁. 轨道交通路网仿真中乘客出行路径的确定[J]. 铁路通信信号工程技术,2020(12): 41.
SUN Shumiao, ZHAO Jiawei, ZHANG Ning. Determination of passenger travel path in rail transit network simulation[J]. Railway Signalling & Communication Engineering,2020(12): 41.

(收稿日期:2022-11-14)