

西昌某高灵敏性地层基坑变形分析及加固处理

章宁¹, 孟宝华^{2*}, 邓宇¹

(1. 中冶成都勘察研究总院有限公司, 四川 成都 610023; 2. 绵阳市第三人民医院 四川省精神卫生中心, 四川 绵阳 621000)

摘要: 本文基于西昌某高灵敏性地层基坑, 讨论了基坑变形较大的原因及后续的加固处理方式。该基坑深约12 m, 开挖至3 m左右出现严重变形。经对基坑周边环境条件及变形特征分析发现, 地质条件差、降雨下渗导致土层饱和度增加、施工扰动及基坑的时空效应是变形的主要诱因。经参数反演, 基坑变形后上部受扰动土体抗剪强度参数最大约折减为勘察报告的1/3, 通过锚索基本试验, 锚固段每米长的轴向抗拔力标准值约为28.27 kN。在此基础上, 经过专家论证, 采取增加旋喷扩体锚索及角撑等措施, 有效地保证了基坑变形收敛及正常运行, 确保了工程建设顺利进行。基坑加固处理中, 采用施工过程中对土层扰动小的高压旋喷扩体锚索进行处理, 拓展了旋喷扩体锚索在西昌地区高灵敏性地层中的应用, 对类似项目有一定的参考意义。

关键词: 深基坑; 高灵敏性土; 基坑变形; 基坑加固; 锚索

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)03-0296-09

Reinforcing treatment and deformation analysis of a foundation pit on a highly sensitive stratum in Xichang

ZHANG Ning¹, MENG Bao-hua^{2*}, DENG Yu¹

(1. Chengdu Surveying Geotechnical Research Institute Co., Ltd. of MCC, Chengdu 610023, Sichuan, China;

2. Sichuan Mental Health Center, The Third Hospital of Mianyang, Mianyang 621000, Sichuan, China)

Abstract: This paper addresses the factors contributing to significant deformations in a highly sensitive foundation pit located in Xichang. The foundation pit, situated in an area characterized by highly sensitive soil layers, extends to a depth of approximately 12 meters. Notably, considerable deformations occurred just 3 meters into the excavation process. Analysis of the surrounding conditions and deformations identified that poor geological conditions, rainfall events, construction disturbance, and the temporal-spatial effects of the foundation pit were primary contributors to the observed deformations. Through parameter inversion, it was revealed that the maximum reduction of the shear strength parameter of the upper disturbed soil was about one-third of the values reported in the initial survey. Based on anchor cable tests, the standard axial pull-out force per meter of anchor section was determined to be around 28.27 kN. Subsequently, reinforcing measures, including the installation of jet grouting expansion anchor cables and corner braces, were adopted following expert consultation to ensure the deformation convergence and smooth operation of the foundation pit. During the reinforcing process, high-pressure jet grouting expansion anchor cables characterized by minimal soil disturbance were utilized, thereby expanding the applicability of this technique to highly sensitive strata within the Xichang region. This approach holds significant relevance and provides valuable insights for similar projects.

Key words: deep foundation pit; high sensitivity soil; foundation pit deformation; foundation pit reinforcement; anchor cable

收稿日期: 2023-01-29

基金项目: 中冶成都勘察研究总院有限公司科研课题 (ZYCK2021-003)。

作者简介: 章宁 (1986—), 男, 四川成都人, 本科, 工程师, 从事岩土工程设计与施工管理工作。E-mail: 441757836@qq.com。

*通信作者: 孟宝华 (1988—), 男, 河南周口人, 硕士, 工程师, 从事医院基建项目设计及运行管理工作。E-mail: 1032785236@qq.com。

0 引言

工程上采用原状土与其重塑土的无侧限抗压强度之比表示土的灵敏度。土的灵敏度越高, 其受扰动后土的强度降低就越明显。在具有高灵敏性、触变性和蠕变特征的深厚软弱土层中进行基坑施工, 基坑侧壁的松弛效应将导致深层土体发生位移, 从而对周边建筑物等产生不良影响^[1-2]。

在以内支撑、地连墙体系为主的基坑中, 针对松弛效应导致的基坑变形问题及应对措施的研究较多。刘志波^[3] 阐述了在某高灵敏性软土地铁深基坑施工过程中, 在地基加固、支撑体系、基坑开挖空间效应、降水等方面采取针对性变形控制措施的可行性。贾春雷等^[1] 结合南京某地铁站实例, 提出高灵敏性地层可通过地连墙外注浆、加设隔离桩及临时支撑等措施, 控制基坑变形。徐宪武^[4] 证明了“护坡桩+预应力锚杆支护体系”及“三轴水泥土搅拌桩”在灵敏地层基坑中应用的有效性。

潘启云等^[5] 以雅西公路为实例, 对高烈度地震区、地质构造复杂和地下水丰富地区的基坑问题做了分析, 通过对人工挖孔桩遇到的管涌和流砂采取有效处治措施, 探索了高灵敏性地层基坑的变形控制。

但在以四川为代表的西南丘陵及高原地区, “桩+斜撑”及“桩锚”等支护体系应用较多。在类似的膨胀土基坑中, 袁贵兴等^[6] 通过对“桩锚”、“桩+囊式扩体锚索”及“内支撑”支护形式进行对比, 说明了“桩+囊锚”支护形式的经济性和安全性。岳大昌等^[7] 通过对成都某膨胀土基坑的变形分析及加固处理, 指出潜孔钻在加入压缩空气后, 加剧土体裂缝贯通。张兆强等^[8] 通过实际工程的实践, 证明了高压旋喷扩体锚索在膨胀土深基坑支护中的适用性。

在高灵敏性地层中, 该类支护由于施工方式等

受限, 其主动控制变形能力存在滞后性, 相关研究及工程实践较少。在西昌临邛海地区, 有部分土属于高灵敏性土, 本文以西昌某临邛海深基坑为例, 通过对“桩+斜撑”支护之后变形过大进行分析, 采用高压旋喷扩体锚索加固处理, 为类似项目积累经验。

1 工程概况

1.1 工程简介

拟建场地位于西运集团公司汽车客运站旁, 用地面积约 2.2 万 m², 总建筑面积约 11.2 万 m²。本工程由 3 栋 18 层建筑、1 栋 15 层建筑、1 栋 6 层建筑及 2 层地下室组成, 高层建筑为剪力墙结构、筏板基础, 多层建筑及地下室为框架结构、筏板基础, ±0.000 为 1 512.80 m, 基础埋深-12.75 m (北地块) 及-11.55 m (南地块), 按场地平整高程, 基坑开挖深度约 9.9~12.1 m, 基坑现场照片如图 1 所示。



图 1 基坑现场照片

Fig. 1 Photo of foundation pit

管线: 南地块北侧红线外存在 1 000 kV 电缆沟 (顶高程 1 510.3~1 511.2 m, 高 0.5 m, 距地下室范围线约 4 m, 建设单位确定迁移), 其余地段红线外均存在不同埋深雨污管线。基坑周边环境条件如表 1 所示。

表 1 基坑周边环境条件

Table 1 Surrounding conditions of the foundation pit

区段	方位	建(构)筑物信息
北基坑	北	东段距 4F 混凝土商业用房约 4.1 m, 中段紧邻客运站, 西段支护外边距 2F 混凝土旅游客运中心约 24.8 m
	南	与南地块护壁桩距离约 20.6 m
	西	护壁桩外边距路边线约 2.3 m
	东	支护外边线距 2F 砖混约 2.2 m, 距加油站约 6.2 m
南基坑	北	与北地块支护结构距离约 20.6 m
	南	东段支护外边距 5F 混凝土建筑约 8.6 m, 中段距建筑(混)约 3.6 m, 距小学 6F 混凝土住宿楼约 7.3 m
	西	支护外边距 4F 砖混约 8.4 m, 距砖、木建筑约 4.4 m
	东	支护外边距砖混结构约 14.6 m, 距 3F 砖混约 23.5 m

1.2 工程地质和水文地质条件

根据地勘报告，勘探深度范围内按时代成因及土性特征划分为以下的工程地质层：第四系全新统填土（ Q_4^{al} ）、有机质粉黏土（ Q_4^{alp} ）、冲洪积粉质黏土、粉土（ Q_4^{apl} ）、粉砂。

根据钻探揭露，场地地下水主要是赋存于①素填土层及②粉质黏土层中的上层滞水及粉土、粉砂

层中的孔隙潜水，受大气降水及上游地下水补给，以地下径流及蒸发的形式排泄，水量较丰富，年变化幅度约 1.0m。勘察期间为平水期，测得其稳定水位相应标高为 1 510.11~1 511.12 m。

1.3 计算参数

场地岩土指标及基坑设计主要相关参数根据工程勘察报告^[9]确定，具体见表 2。

表 2 岩土指标及基坑设计主要相关参数
Table 2 Geotechnical indexes and main related parameters of foundation pit

土层	重度 γ / (kN/m ³)	浮重度 γ' / (kN/m ³)	承载力 特征值/kPa	压缩模量 E_s /MPa	黏聚 力/kPa	扰动后 黏聚力/kPa	内摩擦 角/(°)	扰动后 内摩擦角/(°)	土体与锚固体黏 结强度标准值 q_{sk} /kPa
①素填土	18.5	—	—	—	6.0	2.0	6.0	2.0	20
②粉质黏土	18.7	8.7	140	5.1	27.0	9.0	12.0	4.0	50
② ₁ 粉质黏土	18.2	8.2	90	3.5	14.0	5.0	8.0	3.0	36
③有机质粉黏土	18.6	8.6	100	5.4	21.0	7.0	11.0	4.0	24
④粉土	19.3	9.3	120	7.1	18.5	6.0	20.0	7.0	44
④ ₁ 粉砂	19.4	9.4	120	8.0	—	—	20.0	—	32
⑤粉质黏土	19.6	9.6	160	6.1	28.0	—	13.0	—	54
⑤ ₁ 有机质粉黏土	18.6	8.6	100	5.4	21.0	—	11.0	—	24
⑥粉土	19.1	9.1	140	6.8	18.0	—	20.0	—	48
⑦粉质黏土	19.4	9.4	180	6.4	29.0	—	14.0	—	60
⑧粉土	19.3	9.3	170	8.3	22.0	—	23.0	—	56

2 基坑支护方案

本基坑工程初始支护形式为：护壁桩+斜支撑系统+坑内土加固+坑外高压旋喷止水帷幕+明排。基坑支护结构平面布置图（北侧基坑）如图 2 所示。

基坑典型支护结构如下：护壁桩桩径 1.2 m，桩芯距 2.0 m，桩长不小于 22.5 m（含冠梁），冠梁尺寸 1.4 m×0.9 m；坑外止水帷幕桩长 17.0 m，坑内 2 排旋喷加固桩长 6.0 m，桩径 500 mm，两侧各咬合 100 mm。基坑上口线外 3 m 范围内做硬化防水处理。

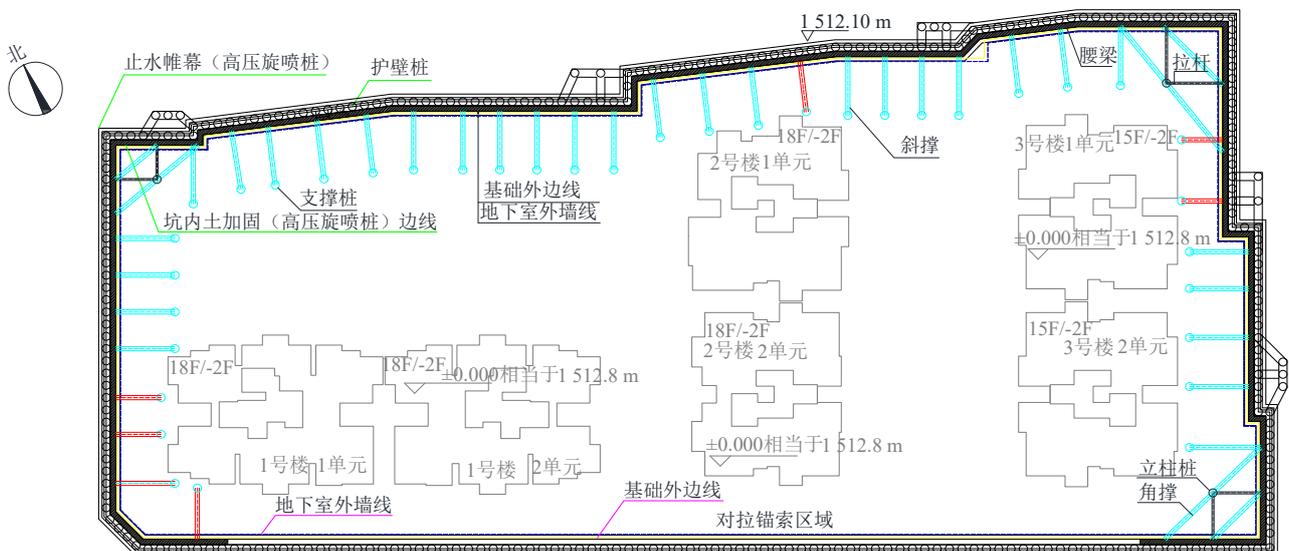


图 2 基坑支护结构平面布置图（北侧基坑）

Fig. 2 Layout of retaining structure of foundation pit (northern foundation pit)

3 基坑监测及变形原因分析

南北2个基坑, 共设44个基坑变形监测点, 对水平位移及竖向沉降进行监测。基坑变形监测点平面布置图见图3。针对北基坑, 埋设监测点24个, J1~J24。南基坑埋设监测点20个, J25~J44。周

边建筑变形监测点布置51个, A1~A51。由于周边环境条件较复杂, 建设单位委托第三方进行周边管线探测、建筑物及道路监测。水平位移报警值: 累计位移不超过20 mm且不超过基坑设计深度的0.25%。变形速率连续3 d大于等于3 mm/d。竖向沉降报警值: 累计位移不超过20 mm且不超过基坑设计深度的0.3%。监测频率满足规范要求^[10]。

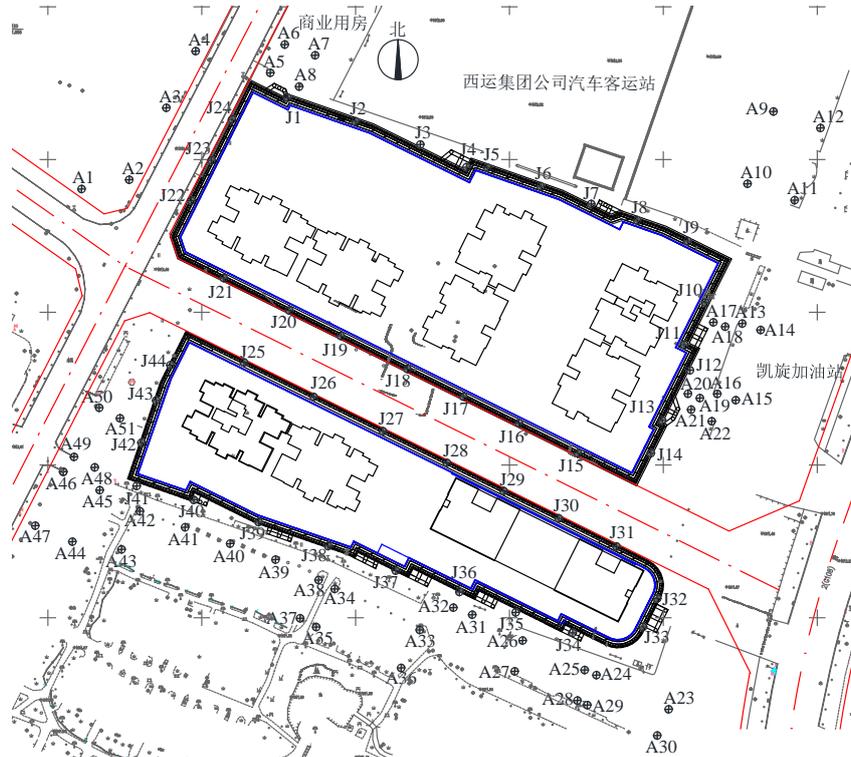


图3 基坑变形监测点平面布置图

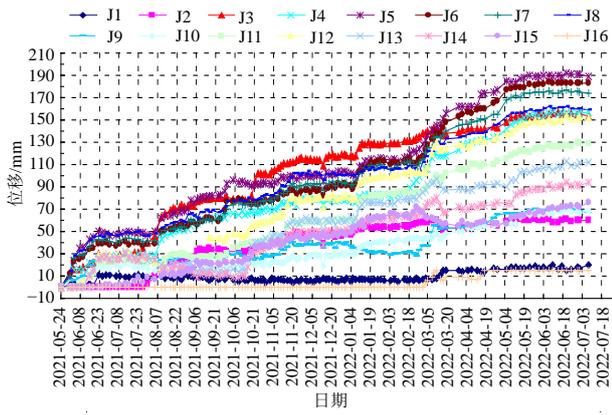
Fig. 3 Layout of foundation pit deformation monitoring points

3.1 基坑加固前变形分析

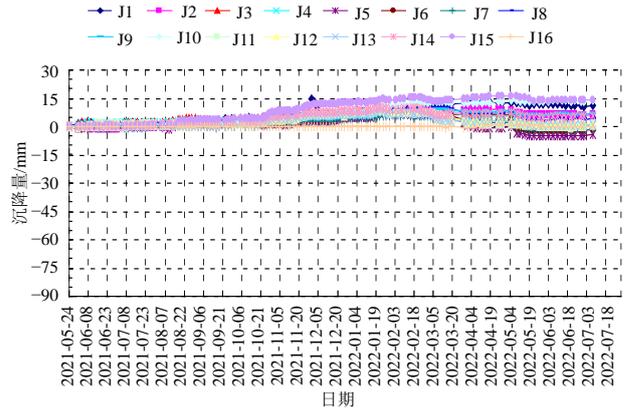
基坑开挖及支护期间位移及沉降监测累计值分别如图4及图5所示。自2021年5月底开挖, 至同年9月30日, 北基坑水平位移基本均超预警值(30 mm), 其中J5点位移量最大达93.25 mm; 南基坑水平位移除其东侧及西侧超过基坑位移预警值外, 其余侧也接近预警值。北基坑位移量在2021年6月21日之前均呈快速增长态势, 2021年6月21日—8月5日大部分地段位移变化较小且趋于稳定, 但仍呈现缓慢增长的态势, 2021年8月5日—9月30日位移数据一直处于增长态势, 其中J3~J8点位移量达到66.90~93.25 mm, 而南基坑部分监测点位移接近或已超过预警值, 其中J32点位移量最大达62.55 mm。

根据现场实际情况, 基坑施工时处于西昌地区的丰水期, 现场支撑腰梁施工持续时间约20 d, 2021年6月25日完成, 北基坑开挖至

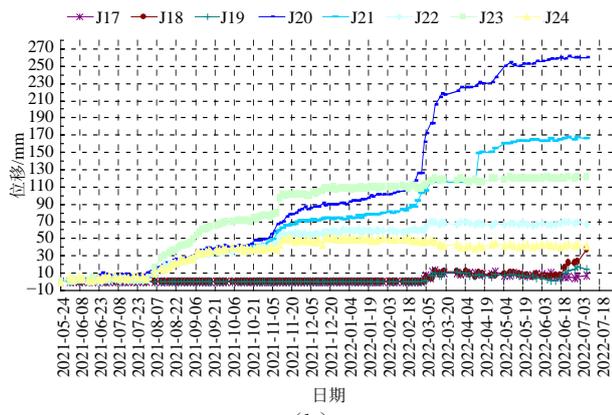
3.5~4.0 m(支撑腰梁底)时, 基坑北侧及东侧外临红线围墙的建筑及地面均存在不同程度的开裂情况, 基本上与基坑监测点位移量较大处吻合。南基坑开挖深度约3.0~3.5 m, 基坑南侧红线围墙外地面局部地段存在裂缝情况, 基坑变形最大至50.35 mm。之后基坑边预留一定斜坡土体对基坑中部土方进行开挖, 至2021年8月17日左右北基坑开挖至距基坑底部约3.5~4.0 m, 最大位移达68.70 mm, 至2021年10月30日北基坑最大位移为101.92 mm。按照基坑变形趋势, 在支撑体系完成之前, 北基坑累计位移整体处于远远超过预警值的状况, 南基坑开挖全部完成后的总位移变形量均有可能超过预警值, 进而引起周边建筑物及地面开裂的情况。根据国家及地方相关规定^[11-12]及原基坑设计文件的安全要求, 基坑应进行信息法施工, 对基坑应急处理后才能进行下一步工作。



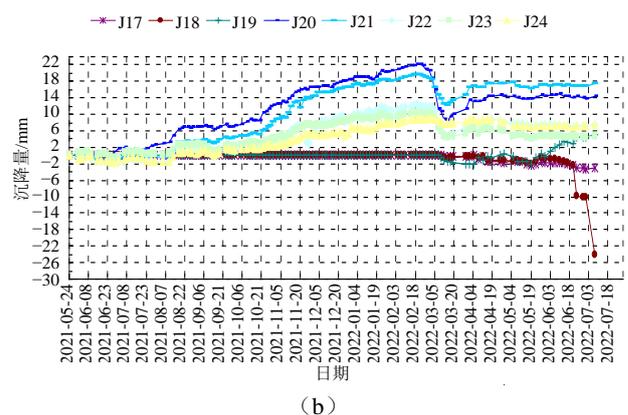
(a)



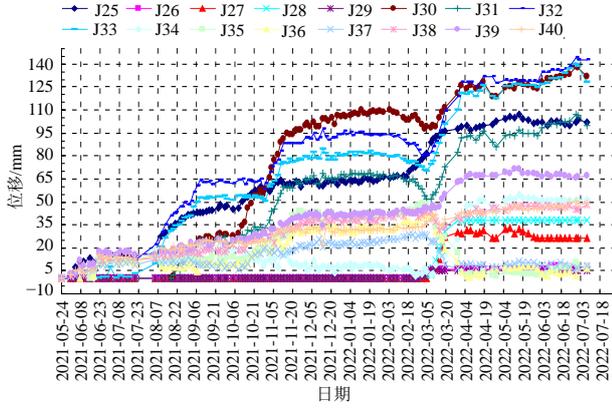
(a)



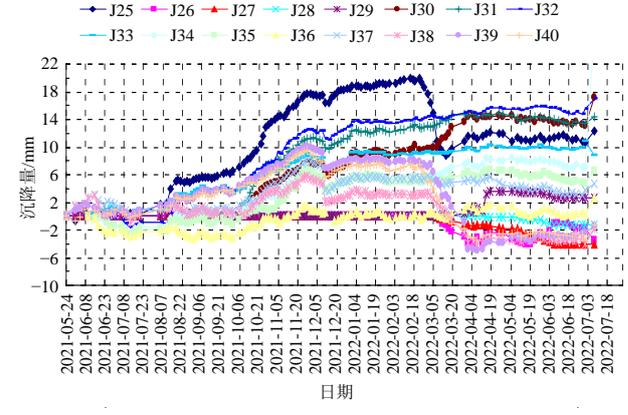
(b)



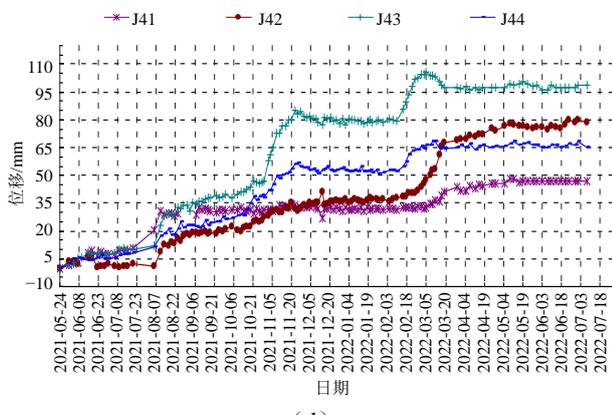
(b)



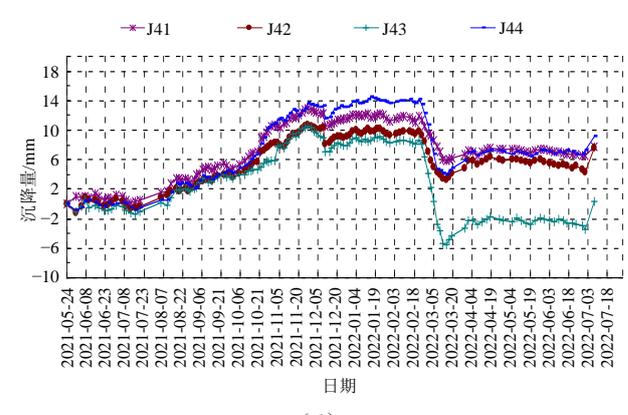
(c)



(c)



(d)



(d)

图4 基坑位移监测累计值

Fig. 4 Cumulative values of foundation pit displacement monitoring

图5 基坑沉降监测累计值

Fig. 5 Cumulative values of foundation pit settlement monitoring

3.2 基坑加固后变形分析

如图4~5所示,北侧基坑在2021年9月—11月期间进行斜撑施工,基坑变形持续增加;2021年11月26日及12月9日施工锚索后,变形得到进一步控制,在2021年12月9日—2022年2月中旬之前,北侧基坑位移及沉降均趋于收敛。在2022年2月中旬以后,由于受到梅雨季节的影响,加之基坑内进行CFG桩及抗浮锚杆的施工,南北基坑变形均再次呈现增长趋势,加固后位移最大增加约50 mm。之后基坑变形再次收敛,直至最终回填。说明旋喷扩体锚索在该阶段取得了一定的变形控制效果,但自2022年3月起,受降雨及坑内施工的影响,基坑发生蠕变,锚索在基坑长边发挥的作用减小。J20及J21位置由于是预留施工便道,坑内施工期间变形较其他监测点增大。

南基坑在2021年12月底施工基底对撑梁、顶部角撑及水平支撑之后,基坑变形趋于稳定,2022年3月坑内施工CFG桩及东段高压旋喷桩后,南基坑东段变形呈现减小的趋势,之后随着坑底抗浮锚杆及筏板施工,基坑变形缓慢增加直至收敛,最终反压段开挖,变形均得到了较好的控制。

3.3 基坑变形原因分析

(1) 地质原因

该区域临邛海约1 km,地层为冲洪积及湖相沉积土,土体灵敏度高。根据基坑深度为7.5 m时悬臂桩监测报告的水平变形位移量(按水平位移量北侧100 mm、东侧60 mm及西侧75 mm左右进行计算)综合测算(反算)坑壁土质在现状时的抗剪强度指标,反算扰动后的参数见表2,上部坑壁扰动后土体抗剪强度参数最大约降低为勘察报告提供参数的1/3。

桩身范围内主要有3种地层。地层②局部含植物残骸,夹薄层粉土,局部地段由于积水原因呈软塑;地层③浸水后产生气泡,干燥后体积收缩,含少量未完全分解的植物体;地层④局部夹薄层粉砂。地层灵敏度高,稍受扰动后抗剪强度参数下降明显,且持续蠕变,是基坑在加固后变形依然长时间增加的主要因素。

(2) 降雨因素

结合场地土质分布、施工情况,场地主要由黏性土、粉土及有机质黏性土等组成,受水体影响较大,在基坑开挖深度最大约4 m时,西昌持续暴雨,加之北基坑相邻的汽车站和加油站洗车场持续有地表水源,大量雨水和地表水渗入土层内形成大范围上层滞水,浸泡桩边土体,使得土体饱和度增加,

土质进一步劣化,同时水位急剧上升引起静水压力增大,护壁桩传递至基底附近土体的力急剧增大,致使土体产生较大的侧向变形,加大护壁桩位移,引起护壁桩后土体变形开裂进而导致基坑外侧部分地面开裂。而支撑腰梁在基坑底附近施工完成后,基底附近形成刚性整体约束,使变形最后趋于基本稳定,但基坑中部进一步开挖后,支撑腰梁下附近的水平向土层变薄及应力释放,土层侧向约束减小,加上水浸泡,导致护壁桩向基坑内进一步变形。基坑雨季后变形增加情况如表3所示。说明暴雨及基底附近土体饱和度增加、土质变差是引起周边变形的主要因素。

表3 基坑雨季后变形增加情况表

Table 3 Deformation increment of foundation pit after rainy season mm

施工节点	北基坑 J3 监测点 (高程为相对值)		北基坑 J8 监测点 (高程为相对值)	
	S_{\max}	H_{\max}	S_{\max}	H_{\max}
2021-11-26 完成1排锚索	115.77	867.8	102.29	794.5
2021-12-09 2排锚索张拉	114.06	867.9	101.76	795.2
2022-02-24 开挖至坑底	155.34	863.3	159.98	791.3

(3) 基坑的时空效应

基坑工程具有较强的时空效应。基坑的深度和平面尺寸对基坑支护结构的稳定性和变形有很大影响。如在本基坑中,基坑角部和中部的变形差异证明了基坑具有明显的时空效应,如图4所示,基坑中部J5点的位移远大于角部J1点和J9点的位移。土体具有蠕变性,作用在支护结构上的土压力随时间变化,蠕变使得土体强度降低,使得在应力不变的情况下,应变持续增加,表现为基坑变形的持续增加。

在土体应力较小的情况下,蠕变变形很小(主要为弹性蠕变)并且收敛,当土压力达到或超过弹性蠕变的极限应力水平时,蠕变速率会急剧增大而发生破坏^[13]。

如图4所示,北侧基坑长边中部J5、J18的变形小于南侧基坑中部J27和J37的变形。通过南北两基坑的长宽比分析,南侧基坑由于长宽比增大,围护结构长边的最大水平位移不断减小,空间效应减弱,基坑短边对基坑长边的变形有一定的贡献。

如图4~5所示,南、北基坑开槽施工斜撑阶段变形增加约35~60 mm。北侧基坑锚索施工后,基坑变形收敛,2022年1月初,北侧基坑位移增加约

20 mm，与基坑内土方大规模开挖有关，之后严格分层分段开挖，直至开挖至基底阶段，基坑变形均得到较好的控制。可以反映出：适当减小每步开挖土方的空间尺寸^[14]，并减少每步开挖土方的无支撑暴露时间，是降低土体应力水平、控制流变位移的有效手段，特别是在无支撑且暴露时间小于 24 h 时的效果尤其明显。

在南基坑具体施工中，沿纵向按限定长度（6 m）分段、逐段开挖；在每个开挖段中分层，每层先挖中间、再挖两端；随挖随撑，在开挖 16 h 内施工锚索并施加预应力。

在施工中要对基坑变形加强监测，如因侧压力造成钢支撑轴力过大而接近控制值时，必须及时采取相应措施进行处理，如增加支撑等措施，以免钢支撑挠曲变形过大，对基坑安全造成危害。

4 基坑加固处理

根据监测数据，随着时间的推移，基坑位移持续增大，很难实现基坑稳定，在支护体系变形未稳定前，无法进行后续基坑施工（基坑中部土方大范围开挖及桩边预留土体开挖），因此需结合监测结果及相关规范^[12] 要求对原基坑支护采取处理措施后，再依次进行土方开挖及支撑体系施工，以确保基坑安全。

经组织专家论证，认为依据监测结果，基坑存在整体滑移的可能性，应立即采取加固措施，加快主体结构施工，避免基坑长期暴露。鉴于主体暂不施工，基坑应回填反压至一层地下室底板标高，并碾压密实。为避免后续开挖进一步变形影响周边建筑，建议减少 1 层地下室。锚索施工应选用对土

体扰动较小的工艺。增加深层水平位移监测、坑内竖向位移监测和支撑内力监测。依据监测资料及整体验算结果对滑移范围内坑底 CFG 桩采取加筋处理，或单独增设阻滑措施。

根据加固计算，北基坑需增加锚索 1 排或者 2 排，依据锚索基本试验报告，本项目采用高压旋喷扩体锚索，当锚固段长度为 19 m 时，极限抗拔承载力标准值为 751.9 kN（5Φs15.2，5 根直径 15.2 mm 的钢绞线组成 1 束），按验收试验采用 1.4 倍计算抗拔力标准值为 537.07 kN，则锚固段每米长的轴向抗拔力标准值为 28.27 kN。旋喷扩体锚索基本试验参数如表 4 所示。最后根据加固设计计算中的锚索轴向抗拔力标准值，结合每米的轴向抗拔力标准值，综合计算出高压旋喷扩体锚索的锚固段长度。

表 4 旋喷扩体锚索基本试验参数

Table 4 Parameters of jet grouting expansion anchor cable			
序号	锚索编号	极限抗拔承载力/kN	备注（锚索破坏）
1	A1-3	751.9	锚固段 28 m
2	B1-3	751.9	锚固段 23 m
3	C1-3	751.9	锚固段 19 m

为提高基坑整体稳定的协同性，在北基坑四角增设水平角撑 5 根，水平角撑支撑于原支撑腰梁侧面，材料同斜撑。北基坑桩边预留土开挖至高 1 506.0 m 形成平台，进行桩间锚索施工。

南基坑四角增设水平角撑 6 根，水平角撑支撑于原支撑腰梁侧面，材料同斜撑。在基坑东段基底施工 5 道对撑梁，与支撑桩植筋连接，顶部设置 5 道水平钢支撑。基坑加固典型剖面如图 6 所示。

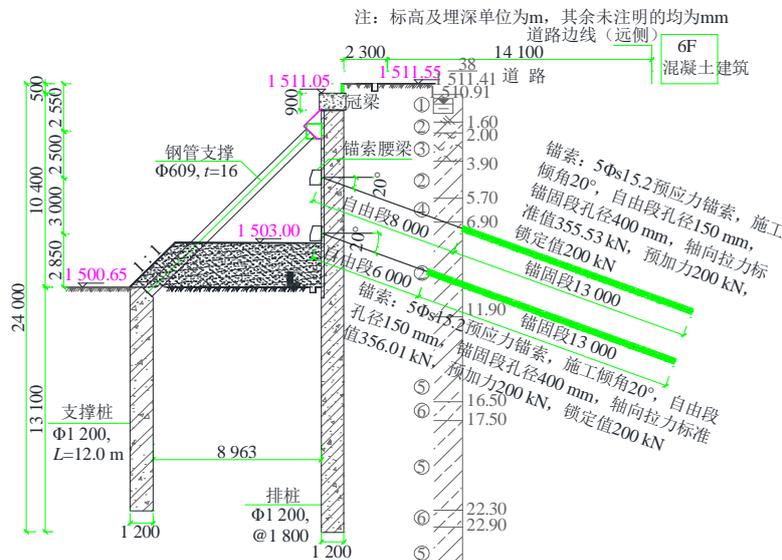


图 6 基坑加固典型剖面图

Fig. 6 Typical profile of foundation pit reinforcement

北基坑高压旋喷扩体锚索施工完成后, 该段基坑监测变形趋于收敛, 加固起到了保护基坑周边建(构)筑物的作用。南基坑基底对撑梁、顶部角撑及对撑施工后, 基坑变形得到较好的控制; 而对基坑变形控制最明显的时段, 出现在支护桩前5号楼高压旋喷桩施工之后。可见, 桩前土层加固, 对基坑变形控制起到了较好的作用。对西昌地区高灵敏性基坑的变形控制应采取综合性措施。基坑加固后效果图如图7所示。



图7 基坑加固后效果图

Fig. 7 Photos after foundation pit reinforcement

5 结论

本文基于西昌某高灵敏性地层基坑, 讨论了基坑变形较大的原因及后续的加固处理方式。得出结论如下:

(1) 雨水、地表水下渗及施工扰动对高灵敏性地层抗剪强度参数影响大, 基坑变形超报警之后, 上部受扰动土体抗剪强度参数最大约折减为勘察报告提供参数的1/3。该地层下施工宜避开多雨季节, 避免各种因素叠加对坑壁产生扰动。

(2) 旋喷扩体锚索在西昌地区高灵敏性地层中适用, 锚固段长度应综合基本试验及当地经验确定, 但应考虑工后锚索的蠕变问题。

(3) 高灵敏性地层基坑应更加注重时空效应对基坑支护的不利影响, 需减小每步开挖土方的尺寸, 并减少每步无支撑暴露时间。

(4) 高灵敏性地层基坑变形受地层蠕变效应的影响大, 应结合周边建(构)筑物变形控制要求采取综合性措施。

参考文献

[1] 贾春雷, 刘习生, 穆保岗. 高灵敏地层地铁站基坑施工及毗邻建筑物保护技术[J]. 施工技术, 2014, 43(21): 70-73.

JIA Chun-lei, LIU Xi-sheng, MU Bao-gang. Construction of foundation excavation and protection of adjacent building for subway station in sensitive soil[J]. Construction Technology, 2014, 43(21): 70-73.

[2] 吴连祥, 周宏博. 连云港软土区基坑支护方案分析与比较[J]. 地基处理, 2019, 1(3): 47-52.

WU Lian-xiang, ZHOU Hong-bo. Analysis and comparison of foundation pit support schemes of soft soil area in Lianyungang[J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2019, 1(3): 47-52.

[3] 刘志波. 高灵敏性软土深基坑变形影响因素分析及控制措施[J]. 铁道建筑技术, 2021(2): 90-92, 168.

LIU Zhi-bo. Analysis of influencing factors on deformation of deep foundation pit in high sensitivity soft soil and its control measures[J]. Railway Construction Technology, 2021(2): 90-92, 168.

[4] 徐宪武. 太原汾河阶地敏感环境下基坑锚杆的应用[J]. 建筑结构, 2016, 46(增刊): 765-769.

XU Xian-wu. Application of foundation pit support anchor in sensitive environment of the Fenhe river terraces of Taiyuan[J]. Building Structure, 2016, 46(S1): 765-769.

[5] 潘启云, 刘严才, 周小兵. 雅(安)西(昌)高速公路基坑施工中的工程地质问题分析与处治[J]. 公路, 2011(10): 247-250.

PAN Qi-yun, LIU Yan-cai, ZHOU Xiao-bing. Analysis and treatment of engineering geological problems in foundation pit construction of Ya'an-Xi'chang expressway[J]. Highway, 2011(10): 247-250.

[6] 袁贵兴, 伍军康, 毛家木, 等. 预应力承压型囊式扩体锚索在膨胀土地区基坑支护工程中的应用[J]. 四川建筑, 2015, 35(3): 255-257.

YUAN Gui-xing, WU Jun-kang, MAO Jia-mu, et al. Application of prestressed pressure-bearing bag-type expanded anchor cable in foundation pit support engineering in expansive soil area[J]. Sichuan Architecture, 2015, 35(3): 255-257.

[7] 岳大昌, 李明, 苏子将, 等. 成都某膨胀土基坑变形分析[J]. 施工技术, 2013, 42(9): 41-44.

YUE Da-chang, LI Ming, SU Zi-jiang, et al. Deformation analysis on some expansive soil foundation excavation in Chengdu[J]. Construction Technology, 2013, 42(9): 41-44.

[8] 张兆强, 曹帅, 姚勇, 等. 高压旋喷扩体锚索在膨胀土深基坑工程中的应用[J]. 施工技术, 2019, 48(7): 13-17.

- ZHANG Zhao-qiang, CAO Shuai, YAO Yong, et al. Application of high pressure jet grouting anchor cable of deep foundation excavation in expansive soil[J]. Construction Technology, 2019, 48(7): 13-17.
- [9] 张建川, 湛萌兵. 西运(集团)公司职工住房棚户区改造项目岩土工程详细勘察报告[R]. 成都: 成都西南交通大学设计研究院有限公司, 2020.
- ZHANG Jian-chuan, CHEN Meng-bing. Detailed geotechnical engineering investigation report of the western transport (group) company's staff housing shanty area reconstruction project[R]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Chengdu Design and Institute Co., Ltd., 2020.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 建筑基坑工程监测技术标准: GB 50497—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Technical Standard for Monitoring of Building Excavation Engineering: GB 50497—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2020.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specification for Retaining and Protection of Building Foundation Excavations: JGJ 120 — 2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [12] 四川省住房和城乡建设厅. 成都地区基坑工程安全技术规范: DB51/T5072—2011[S]. 成都: 西南交通大学出版社, 2011.
- Sichuan Provincial Department of Housing and Urban-Rural Development. Technical Code for Retaining of Foundation Excavations in Chengdu Region: DB51/T5072—2011[S]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2011.
- [13] 张颖, 范益群. 复杂边界深基坑考虑时空效应的设计优化及反思[J]. 城市道桥与防洪, 2015(6): 153-158, 165, 16, 17.
- ZHANG Ying, FAN Yi-qun. Design optimization and introspection of deep foundation pit with complex boundary based on space-time effect[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2015(6): 153-158, 165, 16, 17.
- [14] 蒋洪胜, 刘国彬, 刘建航. 软土地铁车站基坑开挖过程中的时空效应分析[J]. 建筑施工, 1999, 21(2): 30-33.
- JIANG Hong-sheng, LIU Guo-bin, LIU Jian-hang. Time-space effect analysis of soft clay excavation in a metro station[J]. Building Construction, 1999, 21(2): 30-33.