

组合支护体系及石灰桩加固在复杂 深基坑中的应用研究

黄 鹏¹, 张 咪², 余海龙¹

(1. 成都市勘察测绘研究院, 四川 成都 610081; 2. 四川省第一地质大队, 四川 成都 610072)

摘要:在建成区开展城市更新过程中,深大基坑安全控制与成本优化矛盾突出,组合支护体系联合被动区加固是解决该技术难题的有效途径。依托成都某厂提标改造基坑工程,针对基坑深大、深厚软弱土、不停产改造、临近已建物等复杂边界条件,分区分段提出以梅花形双排桩、放坡喷锚、钢支撑及逆作法桩间板联合被动区石灰桩加固的组合支护体系。监测表明,基坑变形指标均低于规范限值,保障了不停产条件下基坑及周边环境安全;通过支护桩兼作永久结构、敏感区高压旋喷桩补强等差异化措施,有效压缩工期并降低造价,取得显著经济社会效益。该基坑工程验证了组合支护体系联合被动区加固的合理性与可靠性,为成都平原类似深大基坑工程提供了可借鉴的技术路径与实践经验。

关键词:组合支护体系; 被动区加固; 石灰桩; 膨胀土基坑; 软弱土基坑; 复杂边界条件

中图分类号:TU753

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2026)07-0041-08

doi:10.13402/j.gcjs.2026.07.077

Performance of a combined retaining system with lime column reinforcement in deep excavations under complex boundary conditions

HUANG Peng¹, ZHANG Mi², YU Hailong¹

(1. Chengdu Institute of Survey and Investigation, Chengdu 610081, Sichuan, China; 2. The First Geological Brigade of Sichuan Province, Sichuan Geological Engineering Investigation Institute Group Co., Ltd., Chengdu 610072, Sichuan, China)

Abstract: During urban renewal in built-up areas, the conflict between safety control and cost optimization for deep and large foundation pits is increasingly pronounced. The combined support system integrated with passive zone reinforcement represents an effective approach to resolving this technical challenge. Drawing upon a foundation pit project for the upgrading and retrofitting of an industrial plant in Chengdu, this study addresses complex boundary conditions including deep and large excavation dimensions, thick soft soil strata, uninterrupted plant operations during construction, and close proximity to existing structures. A combined support system was proposed and implemented in a zoned and segmented manner, comprising quincunx-pattern double-row piles, graded slope excavation with shotcrete-anchorage, steel struts, and top-down inter-pile lagging panels, all integrated with passive zone lime pile reinforcement. Field monitoring results demonstrate that all deformation indices of the foundation pit remained within code-specified limits, thereby ensuring the safety of the excavation and the surrounding environment under uninterrupted production conditions. Moreover,

收稿日期: 2025-07-09

作者简介: 黄 鹏(1990—),男,高级工程师,从事岩土工程勘察设计,水文地质、工程地质和环境地质方面的研究及应用。

通信作者: 张 咪(1990—),女,高级工程师,从事水文地质、工程地质和环境地质,岩土工程勘察与治理,生态保护与修复方面的研究及应用。

differentiated measures, such as utilizing soldier piles to serve dual function as permanent structural components and applying high-pressure jet grouting piles for reinforcement in sensitive zones; effectively shortened the construction period and reduced overall costs, yielding notable economic and social benefits. This foundation pit project validates the rationality and reliability of the combined support system integrated with passive zone reinforcement, and offers a referable technical pathway and practical experience for similar deep and large foundation pit projects in the Chengdu Plain.

Key words: combined support system ; passive zone reinforcement ; lime pile ; expansive soil foundation pit ; soft soil foundation pit ; complex boundary conditions

在城市建成区深层地下空间加速开发利用的今天,地下结构的实施及上部工程的建设必须先行开展基坑支护工程。作为工程建设过程中的“先行军”与“中坚力量”,基坑工程向超深、大面积、复杂化方向发展,深厚填土、深厚软弱土、膨胀土、复杂边界条件基坑层出不穷。目前,已有大量基坑工程在工程建设过程中因支护周边环境调查不明、土层物理力学参数设置不合理、支护结构选型不当、施工质量偏差或施工时序错误等因素导致失稳^[1],如何选择安全可靠、经济合理的基坑支护体系,已成为一个系统性、综合性的岩土工程研究热点与技术难题。

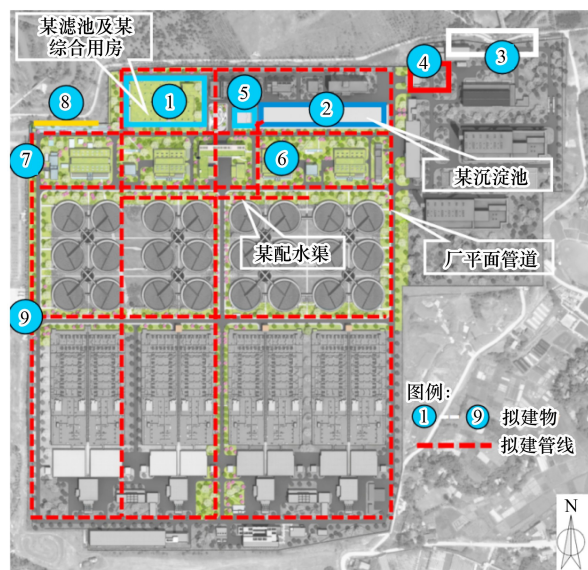
当前,针对组合基坑支护体系、对软弱土体进行加固已有相关研究和应用,龚晓南^[2]深入探讨了基坑工程设计与施工的相关问题。黄宏伟等^[3]结合工程实践,对深基坑工程施工中的风险管理进行了深入研究。卿培俊等^[4]分析了深基坑支护工程的主要特点与支护结构选型,采用分段组合支护方案,在提升基坑支护质量的基础上控制工程造价成本。邓长茂等^[5]围绕发生在合肥地区的基坑工程事故,对膨胀土基坑边坡的稳定性进行了多方面的分析。李朝阳等^[6]分析了成都东郊某膨胀土基坑工程失稳机理,从勘察、设计以及施工 3 个方面提出了膨胀土基坑相关建议。朱磊等^[7]通过研究“成都黏土”基坑支护现状及已有的设计方法,对膨胀土基坑土压力计算方法进行改进,并在实际工程中应用。张玉成等^[8]对软土基坑设计若干关键问题进行了探讨及实例应用分析。段尚磊^[9]基于某软土深基坑工程变形实测数据分析,并结合有限元数值模拟方法,系统地分析了被动区裙边加固方案对基坑围护桩变形及深层土体位移场的影响规律,对软土深基坑被动区裙边加固方案进行了深入优化研究。成都平原地区深厚填土、软弱土及膨胀土分布较为普遍,但相关研究

及应用在区域基坑工程中相对较少。

结合工程实际,本文以成都市某厂提标改造项目为着眼点,重点就组合支护体系及被动区土体石灰桩加固在复杂边界条件下的深大软弱土及膨胀土基坑中的应用进行研究,系统探讨技术路径、方法体系与应用成效,以期解决基坑开挖深度大、工程地质条件较差、周边环境条件复杂及施工难度高等技术难点,并为成都地区类似基坑工程提供参考与借鉴。

1 工程概况

成都市某厂提标改造项目拟在现有厂区新扩建建(构)筑物,对处理规模为百万吨/d 的厂区进行不停产提标改造建设,拟建物包括某滤池及某综合用房、某沉淀池、某配水渠、大量配套管线、门房及景观造型墙,涉及大量建筑物及管线的基坑开挖及支护工程。拟建项目概况如图 1 所示。



1—某滤池及某综合用房; 2—某沉淀池; 3—某浓缩脱水间及加药间; 4—某变配电站; 5—食堂; 6—某配水渠; 7—1#门卫室; 8—景观造型墙构筑物; 9—2#门卫室; 10—厂平面管道。

图 1 拟建项目概况

该项目基坑为典型的膨胀土场地深大软弱土基坑。某滤池及某综合用房基坑最大开挖深度约为 15.7 m, 某配水渠基坑最大开挖深度约为 12.6 m, 某沉淀基坑最大开挖深度约为 11.8 m, 拟建配套管线基坑最大开挖深度约为 6.5 m。以某沉淀池为例, 分析其特点如下。

(1) 基坑开挖深度大, 某沉淀基坑最大开挖深度约为 11.8 m。

(2) 工程地质条件较差, 基坑侧壁及坑底主要分布土层为杂填土、黏土(软)、黏土(可)、粉质黏土(可)、粉质黏土(软), 黏土膨胀潜势属弱。

(3) 周边环境条件复杂, 基坑内外分布大量已建管线及已建建(构)筑物。

(4) 厂区运行要求不停产提标改造建设, 工程建设时间紧、任务重, 工种多、交叉大, 需采取有效的基坑支护措施, 确保主体结构顺利施工及周边的安全, 保障工程建设质量和建设工期。

根据《成都地区基坑工程安全技术规范》

(DB51/T 5072—2011) 第 3.3.1 条, 拟某滤池基坑安全等级为一级, 该基坑周边环境如图 2 所示。



图 2 拟建某沉淀池基坑周边环境鸟瞰图

2 工程地质条件

项目场址位于岷江水系三级阶地, 主要地层工程特征分述见表 1, 主要地层物理力学指标见表 2。拟建场地区黏土自由膨胀率 δ_{ef} 为 27.0% ~ 63.0%, 膨胀潜势属弱, 可见网状裂隙分布; 从该基坑支护及地质剖面图可知, 基坑侧壁、坑底

表 1 主要地层工程特征

层序	时代/成因	名称	岩土特征简述
1	第四系全新统人工填土层(Q_4^{ml})	杂填土	色杂、主要由黏性土、卵石、建渣等混硬杂质组成,松散,自重固结尚未完成,最大厚度约为 1.1 ~ 8.5 m
2	第四系全新统冲洪积层(Q_4^{al+pl})	黏土(可)	褐黄色;含铁、锰质氧化物及其斑痕,可见网状裂隙分布,可塑;湿,厚度约为 1.2 ~ 7.8 m
		黏土(软)	褐黄色;含铁、锰质氧化物及其斑痕,可见网状裂隙分布,软塑为主,局部呈流塑;很湿,厚度约为 1.5 ~ 2.8 m
		粉质黏土(可)	灰色~灰黄色,含少量钙质结核,纹理不清晰,可塑,湿,局部夹薄层粉质黏土(软),厚度约为 0.9 ~ 5.2 m
		粉质黏土(软)	灰色~黑灰色,含少量钙质结核,软塑为主,局部呈流塑很湿,厚度约为 1.6 ~ 8.6 m
3	白垩系上统灌口组基岩(K_{2g})	砂质泥岩	紫红色,泥质结构,块状构造,产状近水平。据其风化程度可划分为强风化、中风化

表 2 主要地层物理力学指标

土名	厚度/m	天然容重/ ($kN \cdot m^{-3}$)	承载力特征 值/kPa	压缩模量/ MPa	天然抗剪		岩土体与锚固体极限 摩阻力标准值/kPa
					黏聚力/kPa	内摩擦角/($^{\circ}$)	
杂填土	1.1 ~ 8.5	19.0	60	—	3	12	10
黏土(可)	1.2 ~ 7.8	19.5	140	4.0	15	9	40
黏土(软)	1.5 ~ 2.8	17.5	75	3.0	10	4	25
粉质黏土(可)	0.9 ~ 5.2	19.5	130	4.0	14	9	35
粉质黏土(软)	1.6 ~ 8.6	17.5	70	3.0	10	6	25
强风化砂质泥岩	—	22.0	300	25.0	50	25	120
中风化砂质泥岩	—	23.5	1 200	—	120	35	200

均分布软塑及可塑黏性土层；是典型的膨胀土地地深大软弱土基坑。

场地地下水主要为上层滞水，呈透镜体状分布，赋存于黏土层之上人工填土中，上层滞水初见水位埋深约为 1.20 ~4.90 m。

3 支护体系设计

结合工艺需求、工程安全及造价,经主体工艺及结构设计核算,深化设计优化相关工艺设计并调整结构底板标高,或形成局部坑中坑结构，降低支护难度及工程量；联合运用被动区土体石灰桩加固、放坡喷锚 + 梅花形双排桩、放坡喷锚 + 钢支撑 + 排桩、放坡网喷 + 混凝土支撑 + 钢支撑 + 排桩、放坡网喷 + 钢支撑 + 钢支撑 + 排桩、放坡网喷、分级放坡网喷、内支撑 + 钢板桩、截(排)水

沟结合长大仰斜式泄水孔等支护结构形成组合支护体系。同时，根据《建筑基坑工程监测技术标准》(GB 50497—2019)，按约 20 m 的平均间距沿基坑周边布置基坑位移监测点、周边建(构)筑物沉降观测点，随时掌握施工过程中基坑的变形情况(表 3)。

下面以某沉淀池基坑为例（表 4），该基坑主要包含 C 型、D 型（前期作为基坑支护使用，后期作为工程桩使用）、E 型梅花形双排桩 3 种主要桩型。

某沉淀池基坑典型支护及地质剖面如图 3 所示。

3.1 基坑被动区土体石灰桩加固

结合场地工程地质条件，工程区软弱土层物理力学指标较低，对基坑支护结构被动区提供的土反力有限。若不进行加固，基坑支护结构变形

表 3 项目基坑支护设计一览

部位	名称	基坑最大开挖深度/m	支护形式
拟建物	某滤池及某综合用房	约为 11.9 ~15.7	被动区土体石灰桩加固、分级放坡喷锚 + 梅花形双排桩
	某沉淀池	约为 4.5 ~11.8	放坡喷锚 + 梅花形双排桩、放坡喷锚 + 钢支撑 + 排桩、钢支撑 + 排桩
	某配水渠	约为 12.6	放坡网喷 + 混凝土支撑 + 钢支撑 + 排桩、放坡网喷 + 钢支撑 + 钢支撑 + 排桩
	配套管线:S ₁ (管径 2.2 m 钢管)、S ₂ (管径 1.8 m 钢管)、S ₃ (管径 2.2m 钢管) 配套管线:S ₄ (管径 1.4 m 钢管)	约为 5.2 ~6.5	桩顶放坡 + 钢板桩 + 内支撑 放坡网喷、分级放坡网喷
基坑紧邻已建物	某水渠(S ₁ /S ₂)北侧分布有现状管径 2.4 m 钢管(管线 1)、西南侧及东南侧分布有现状管径 2.0 m 钢管(管线 2、管线 3)各一条,南侧分布有现状管径 1.0 m(管线 4)、管径 0.8 m(管线 5)、管径 1.2 m(管线 6)混凝土承插管。需保障不停产提标改造,均不能迁改	—	对管线 1 处采用高压旋喷桩对地基土进行加固,并采用逆作法对管线 1 ~6 穿越处桩间土采用逆作法结合钢筋混凝土桩间板对管线穿越处桩间土进行分层开挖和支护
	某滤池及某综合用房东侧培训和研发中心大楼(距基坑顶约为 5 m)、南侧某紫外线消毒渠构筑物(距基坑顶约 7 m)	—	在基坑顶设置抗滑桩进行支挡防护

表 4 某沉淀池基坑支护设计一览

基坑地段	最大开挖深度/m	桩型	桩径/m	桩长/m	冠梁尺寸/m	桩间距/m	内支撑/m
南侧	11.8	C 型桩	1.2	18.0	1.2 ×0.8	1.7	长度约为 11.0
基坑中部	4.5	D 型桩	1.2	15.0	1.2 ×0.8	1.7	间距约为 6.8
西侧、北侧、东侧	7.3	E 型梅花形双排桩	1.0	20.0	1.0 ×0.8	桩间距:1.5 桩排距:3.5	—

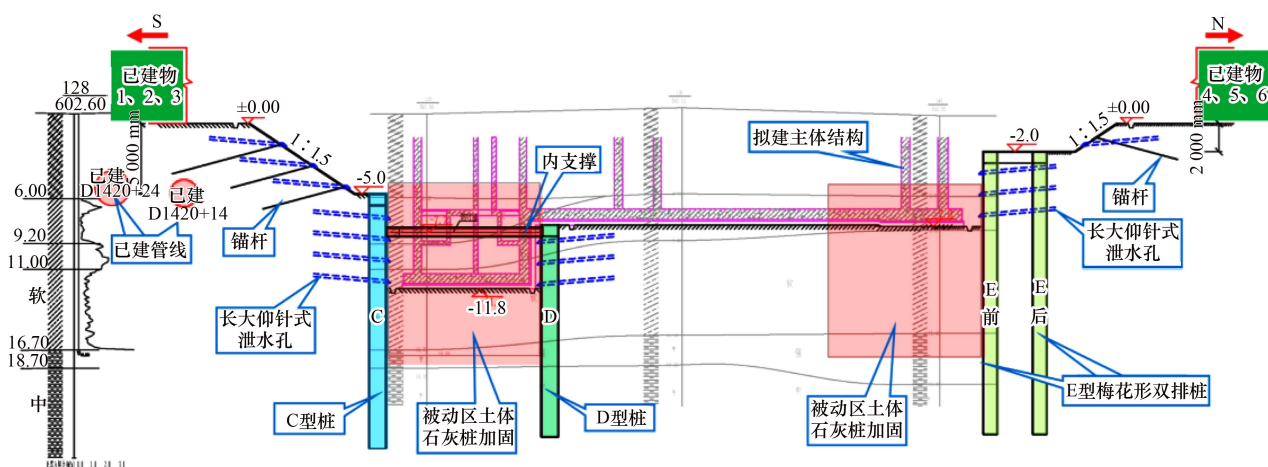


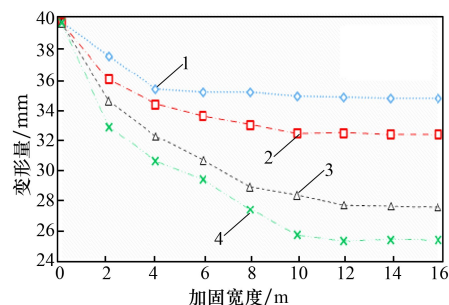
图3 基坑支护及地质剖面

m

量大, 需加强支护结构以保障坑边既有建筑的安全; 且施工过程中对被动区土体扰动大, 由于软弱土层的触变性, 将导致基坑内被动区土体土反力进一步降低, 进而影响基坑支护结构的稳定性, 可能造成支护结构踢脚破坏、局部破坏乃至整体破坏等工程事故。故有必要对基坑内土体进行加固处理, 以提高基坑被动区土反力、减小支护工程量, 保障基坑及工程的安全顺利实施。

石灰桩具有工程造价低、施工速度快、取材方便等优点, 其主要固化剂为生石灰, 掺合料包括粉煤灰、炉渣、矿渣等材料, 通过分层机械振压或人工夯实形成密实桩体。石灰桩通过桩体挤密置换、生石灰水化发热及吸水膨胀等物理加固作用, 以及生石灰与活性掺合料经过水化、胶凝等化学加固作用, 与桩周土充分作用后形成复合地基, 从而对软弱土体进行加固, 具有挤密、消除液化、降低基坑水位、提高土体物理力学指标等作用^[10]。在工程实践中, 石灰桩在地基基础、基坑工程中已有较为广泛的应用^[11-15]。

根据工程经验及相关地基处理技术规范, 场内分布有较为深厚的软弱杂填土、黏土及粉质黏土层, 项目施工组织工期主要在未枯水期及平水期, 且场内地下水以浅表埋深、水量较小的上层滞水为主, 采用石灰桩对基坑内土体进行加固具有较强的适宜性。通过采用理正深基坑结构设计软件, 对基坑被动区土体石灰桩加固宽度及厚度关系进行计算分析(图4), 表明加固宽度取10 m、深度至基覆交界面附近时, 对控制基坑变形量较为经济。



加固厚度/m: 1—2; 2—4; 3—6; 4—8。

图4 基坑被动区土体石灰桩加固宽度及厚度关系

基坑内土体加固采用400 mm桩径石灰桩, 按三角形布桩, 桩间距约为1.2 m, 最大处理宽度约为10 m。掺合料采用生石灰与粉煤灰按体积比1:1掺合。

石灰桩桩长根据场地工程地质条件确定, 桩顶标高位于软塑土层以上1 m或软塑土层上覆1 m可塑土层处, 桩端须至少进入强风化砂质泥岩1倍桩径, 平均有效长度约为6.5~8.0 m。

石灰桩施工前应做好场地排水设施, 采用螺旋钻机械成孔、成桩, 施工顺序宜由外围或两侧向中间进行、间隔成桩(图5)。石灰应选用新鲜生石灰块, 进入场地的生石灰应采取防水、防雨、防风、防火措施, 做到随用随进。石灰桩施工时应间隔成桩并采取防止冲孔伤人的有效措施, 确保施工人员的安全。石灰桩施工过程中应随时检查施工记录和计量记录, 并进行质量评定。

3.2 基坑西侧、北侧、东侧段(放坡喷锚+梅花形双排桩, E型桩)

已有研究表明, 梅花型布置相较于平行布置, 更有利于发挥双排桩的群桩效应^[16]; 通过采取适



图 5 基坑被动区土体石灰桩加固现场照片

中的桩间距和桩排距,在相邻前后排桩之间生成直接土拱,在直接土拱和后排桩的共同作用下,后排桩后形成了间接土拱,从而有效阻止土体的滑动^[17-18]。综上,为充分发挥主动区土体的土拱效应(即随着基坑的开挖,主动区土体在土压力、滑坡推力作用下产生不均匀位移后,经调整自身抗剪强度以抵抗土压力、下滑力的作用),基坑支护采用梅花型布置双排桩,并在双桩桩顶设置冠梁及连梁,相较于常见的前后排桩平行布置,可利用相邻前排桩与后排桩间的直接土拱,以及直接土拱与后排桩的共同作用形成的间接土拱,并充分发挥双排桩的群桩效应(图 6)。

西侧、北侧、东侧段基坑最大开挖深度约为 7.30 m,采用 E 型双排桩进行支护。E 型双排桩径均为 1.0 m,桩长均为 20.0 m,护壁桩桩心距约为 1.5 m,桩排距约为 3.5 m。基坑放坡高度为 2.0 m,坡率为 1:1.5;坡面预钻 150 mm 直径钻孔并植入长度为 6.0 m、直径为 22 mm 的 HRB400 级钢筋 1 排,纵横间距均为 1.5 m,放坡喷锚及梅花形双排桩的现场照片见图 7。

3.3 基坑南侧段(放坡喷锚+钢支撑+排桩,C 型桩)

基坑南侧段最大开挖深度约为 11.80 m,采用 C 型护壁桩支护。C 型护壁桩桩径为 1.2 m,桩长

为 18.0 m,护壁桩桩心距约为 1.7 m。基坑放坡高度为 5.0 m,坡率为 1:1.5;坡面由下至上预钻 150 mm 直径钻孔并植入直径为 22 mm 的 HRB400 级钢筋各 1 排,长度分别为 8.0、6.0、6.0 m,纵横间距均为 1.5 m;基坑顶下 5.0 m 桩顶处设一道 1.2 m×0.8 m 冠梁。

基坑顶以下约 -7.7 m 设一道腰梁,并设一排钢支撑,钢支撑水平间距约为 6.8 m。施工期间钢支撑的换撑拆除,应在水池结构浇筑至支撑以下、达到设计要求强度后,且在支护结构与水池结构外墙之间肥槽填筑压实后方可进行。

3.4 基坑中部段(钢支撑+排桩,D 型桩)

基坑中部段最大开挖深度约为 4.50 m,采用 D 型护壁桩支护,经核算确认,该段基坑排桩护壁结构前期作为基坑支护使用,后期作为工程桩使用,从而节省工程造价。D 型护壁桩桩径为 1.2 m,桩长为 18.8 m,护壁桩桩心距约为 1.7 m。桩顶处设一道 1.2 m×0.8 m 冠梁。冠梁顶以下约 -0.5 m 设一排钢支撑,水平间距约为 6.8 m。

3.5 排水措施

场地分布有深厚填土、软弱土及膨胀土,受各种地质应力作用易形成裂隙并贯通,应避免长时间暴露、暴晒或遭受地下水及地表水的浸泡和冲刷,须分层分段开挖并及时封闭,避免造成岩土体物理力学指标的降低乃至基坑支护工程的失稳。

本基坑采用明排法进行降水,基坑周边坡顶和基坑内均设置截(排)水沟,坡顶和坑底每隔 50 m 分别设一座集水坑。基坑坡顶、坡表支护桩桩间采用混凝土或网喷及时封闭,坑顶及坑底设置截排水沟,并于坡表及桩间采用大仰斜式泄水孔排水,有效控制地表水流入基坑或渗透至坑壁土体内。

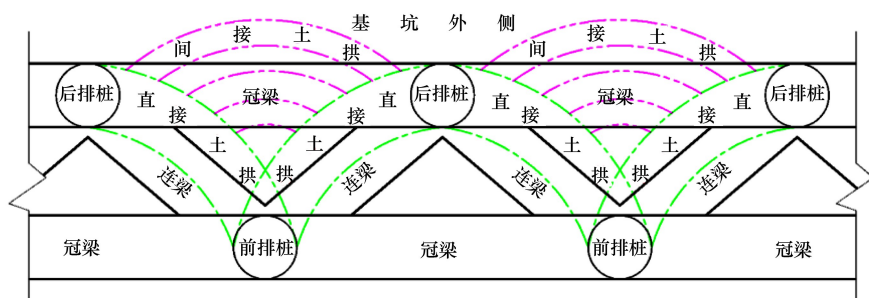


图 6 梅花型布置双排抗滑桩桩间土拱示意



图 7 放坡喷锚 + 梅花形双排桩现场照片

3.6 设计验算结果

本次研究分别运用理正深基坑支护结构设计软件 FSPW 7.5 及理正基坑平面有限元分析软件 deepexV1.0 pb2 软件进行单元结构计算和有限元分析, 相关设计验算结果均满足规范要求。如图 8 所示, 单元结构计算基坑位移包络图展示了基坑在不同位置 and 不同支护形式下的整体变形趋势与最大位移范围, 为评估基坑整体变形量满足规范要求提供了宏观依据。位移云图呈现了各支护区段变形极值的空间分布特征, 为评判不同组合支护方案的整体协调性与薄弱环节提供了宏观依据。由图 9 可知, 南侧 C 型桩区域最大变形量约为 28 mm, 位移云图显示放坡喷锚 + 钢支撑 + 排桩支护在 11.8 m 深基坑中位移呈中间大、两端小的分布规律, 紧邻既有建筑条件下变形仍处于可控范围。由图 10 可知, 西、北、东侧放坡喷锚 + 梅花形双排桩区域最大变形约为 22 mm, 位移云图表明双排桩群桩效应与土拱效应有效分担了土压力, 提高了支护体系整体抗倾覆能力。由图 11 可知, 基坑中部 D 型桩区域最大变形仅为 3.5 mm, 验证了钢支撑 + 排桩支护协同被动区石灰桩加固后, 坑中坑的侧向位移得到有效控制, 验证了支护兼作工程桩的合理性。此外, 结合图 9、10, 验证了桩顶放坡卸载可减小支护结构变形量, 同时可知悬臂桩、双排桩桩顶放坡部位变形量较大, 为避免土体越顶破坏, 桩顶放坡需结合网喷封闭 + 长大仰斜式泄水孔排水 + 锚杆进行支护的必要性。

4 效果评价

(1) 自基坑开挖至基底到基坑回填期间, 在经历两个年度丰水期(期间遭遇区域夏季罕见暴雨)之后, 基坑监测点相关指标均未超过计算值及相应规范要求, 能够有效地保护了场地周边环境, 保障了项目的顺利实施。

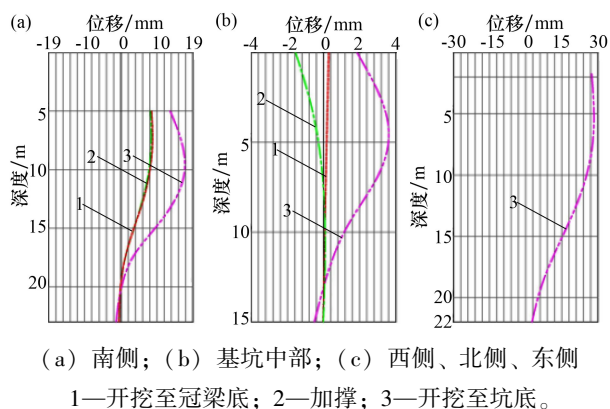


图 8 基坑位移包络图

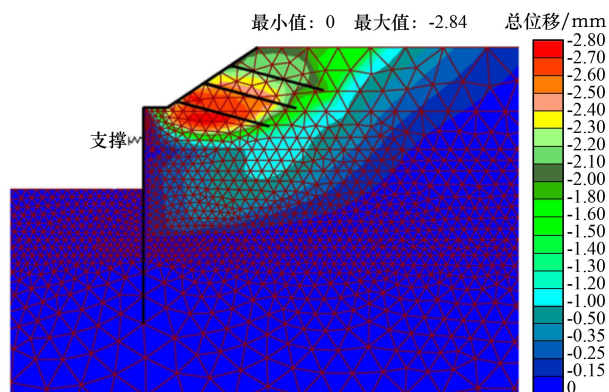


图 9 基坑南侧 (C 型桩) 位移云图

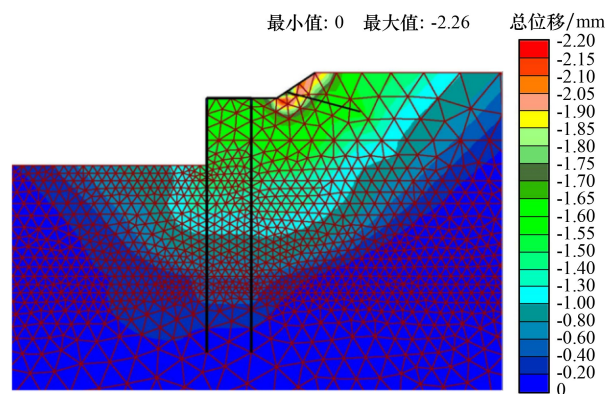


图 10 基坑西侧、北侧、东侧 (E 型梅花形双排桩) 位移云图

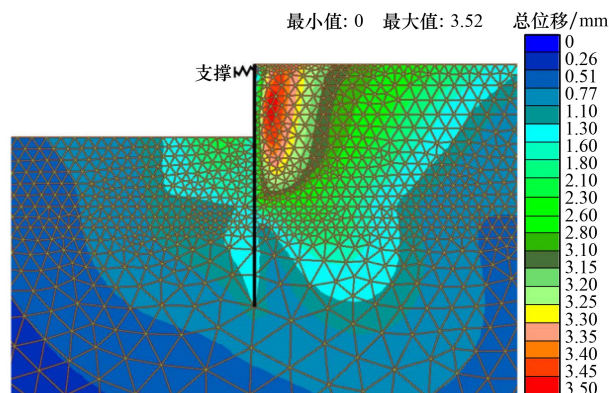


图 11 基坑中部 (D 型桩) 位移云图

(2) 基坑被动区土体通过采用石灰桩与桩周土充分作用后形成复合地基,对软弱土体进行了加固,提高了软弱土体物理力学指标等作用,有利于增加被动区土反力、减小支护工程量,保障基坑及工程的安全顺利实施。

(3) 在紧邻已建建筑的基坑顶设置抗滑桩进行支挡防护,对管线采用高压旋喷桩对地基土进行加固,并采用逆作法结合钢筋混凝土桩间板对管线穿越处桩间土进行分层开挖和支护,有效保障了既有建筑的安全运行和厂区的不停产提标改造。

(4) 针对位于绿化区域、快挖快填、施工周期较短的拟建配套管线,对软弱土分布较厚区域采用桩顶放坡+钢板桩+内支撑进行基坑支护,对基岩顶板埋深较浅区域采用放坡网喷、分级放坡网喷进行基坑支护,在保障安全可行的同时,也有效节省了造价,取得了良好的经济及社会效益。

(5) 工程建设周期及建设成本与方案论证总体相符,节省了造价及工期,取得了良好的经济及社会效益。

综上,本项目在复杂的基坑周边环境条件下,针对不同边界条件采用多种组合支护体系,充分论证和完善基坑支护体系,有效控制了基坑及已建物的变形,保证基坑稳定及控制周边环境变形;同时,设计方案节约了工程造价与建设周期,为基坑支护工程和拟建物主体结构的顺利实施提供了可靠保证,证明基坑支护设计方案选型合理可靠。

5 结 语

本文通过成都市某提标改造项目的工程实践,研究了组合支护体系及被动区石灰桩加固技术在复杂边界条件下的深大软弱土及膨胀土基坑中的应用,采用数值模拟与工程实施相结合的方法,取得了良好效果:被动区石灰桩加固提高了土体力学指标与被动土反力,有效控制了支护结构变形;梅花形双排桩、放坡喷锚+钢支撑等多种支护形式的灵活组合,针对性适应了不同边界条件,保障了基坑稳定与周边环境安全;此外,利用支护结构兼作工程桩、信息化施工监测等措施,实现了安全、经济、高效、不停产改造的工程目标。本文成果表明,该技术体系针对复杂深大基坑具有良好的安全

性、经济性与适应性,在成都平原类似深大基坑工程中具备良好的借鉴价值。

参考文献:

- [1] 刘国彬,王卫东. 基坑工程手册[M]. 第2版. 北京: 中国建筑工业出版社,2009.
- [2] 龚晓南. 关于基坑工程的几点思考[J]. 土木工程学报,2005,38(9):5.
- [3] 黄宏伟,边亦海. 深基坑工程施工中的风险管理[J]. 地下空间与工程学报,2005(4):5.
- [4] 卿培俊,王麒,张克杰. 深基坑组合支护形式优化选型[J]. 城市建筑,2023,20(14):205-207.
- [5] 邓长茂,李镜培. 合肥膨胀土基坑工程事故分析与预防[J]. 结构工程师,2011,27(1):105-109.
- [6] 李朝阳,谢强,康景文,等. 成都某膨胀土基坑边坡失稳机理分析[J]. 建筑科学,2015,31(9):5.
- [7] 朱磊,谢强,赵文,等. 膨胀土基坑悬臂桩支护设计中土压力计算方法探讨[J]. 铁道学报,2018,40(1):5.
- [8] 张玉成,杨光华,钟志辉,等. 软土基坑设计若干关键问题探讨及基坑设计实例应用分析[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(11):10.
- [9] 段尚磊. 软土深基坑被动区裙边加固方案优化研究[J]. 工程建设,2022(9):54.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 复合地基技术规范:GB/T 50783—2012[S]. 北京:中国计划出版社,2012.
- [11] 刘守城. 石灰桩加固软土地基减小基坑变形技术的理论研究[J]. 安徽建筑,2008,15(6):158-160.
- [12] 汪稔,陈善雄. 用石灰桩加固软弱地基[J]. 岩土力学,1994,15(3):7.
- [13] 薛巧玲,武锦钢. 石灰桩在工程中的实践与应用[J]. 广东土木与建筑,2002(2):2.
- [14] 杨天森,何秋萍. 石灰桩在基底加固和基坑围护工程中的应用[J]. 探矿工程:岩土钻掘工程,2006,33(1):3.
- [15] 吴景华. 某基坑涌砂与邻近建筑沉降变形防护处理[J]. 西部探矿工程,2001,13(增刊1):328-329.
- [16] 刘金龙,王吉利,袁凡凡. 不同布置方式对双排抗滑桩土拱效应的影响[J]. 中国科学院大学学报,2010,27(3):364-369.
- [17] 赵晓珂,雷用,张泽健,等. 梅花型布置双排抗滑桩土拱效应分布研究[J]. 四川建筑科学研究,2015,41(5):5.
- [18] 赵晓珂,雷用,胡明,等. 梅花型布置双排抗滑桩合理桩位研究[J]. 后勤工程学院学报,2015,31(2):6.