

临长江大堤基坑立体防渗体系构建与沉降控制

雷亚玲

湖北建艺岩土工程勘察设计有限公司，湖北 荆州 434000

[摘要]针对长江大堤沿岸第四系黏性土、砂土互层地层深基坑降水引发的渗流失稳与建筑物沉降风险，文章基于江汉平原工程地质与水文地质特征，根据渗流-变形耦合作用机制并提出综合防控体系。按“渗流路径重构-界面加固-动态调控”递进控制策略，结合降水参数优化、土体协同加固与沉降实时反馈，实现渗流干预与土体结构稳定的动态平衡。文中通过典型基坑工程案例分析与实践，为本地区临长江大堤敏感区深基坑工程提供地质适配性防控范式，对协调工程安全与环境保护发展提供一些参考。

[关键词]临长江大堤深基坑；第四系黏性土；砂土互层地层；立体防渗体系

DOI: 10.33142/ucp.v2i6.18549 中图分类号: U443 文献标识码: A

Construction of a Three-dimensional Anti-seepage System and Settlement Control for the Foundation Pit of the Yangtze River Embankment

LEI Yaling

Hubei Jianyi Geotechnical Engineering Survey and Design Co., Ltd., Jingzhou, Hubei, 434000, China

Abstract: In response to the risk of seepage instability and building settlement caused by deep foundation pit dewatering in the Quaternary cohesive soil and sand interbedded strata along the Yangtze River embankment, this article proposes a comprehensive prevention and control system based on the engineering geological and hydrogeological characteristics of the Jianghan Plain and the coupling mechanism of seepage deformation. According to the progressive control strategy of "seepage path reconstruction interface reinforcement dynamic regulation", combined with precipitation parameter optimization, soil collaborative reinforcement, and real-time settlement feedback, a dynamic balance between seepage intervention and soil structure stability is achieved. Through the analysis and practice of typical foundation pit engineering cases, this article provides a geological adaptive prevention and control paradigm for deep foundation pit engineering in sensitive areas near the Yangtze River embankment in this region, and provides some reference for coordinating engineering safety and environmental protection development.

Keywords: deep foundation pit near the Yangtze River embankment; quaternary cohesive soil; sandstone interbedded strata; three-dimensional anti-seepage system

引言

江汉平原作为我国长江经济带城镇化进程的核心区域，快速发展催生了大量临长江大堤的深基坑工程。本地区广泛分布着第四系黏性土、砂土互层地层，该层具有显著的渗透差异性；结合地下水埋藏浅，受长江水文动态影响显著等特点，使得基坑工程面临渗流控制与变形协调的双重挑战。在临江敏感地带，人为干预地下水有可能改变土体应力与渗流的动态平衡，不仅导致坑底管涌、支护结构失稳等直接风险，更可能通过水力联系诱发堤防基础潜蚀、周边建筑差异沉降等次生灾害，对长江黄金水道安全屏障与城市基础设施构成双重威胁。

当前，如何构建地质适配性防控体系，在保障基坑安全施工的同时，实现大堤稳定与生态环境保护等多目标协同，已成为制约沿江城市地下空间可持续发展的重要课题。本文通过笔者工作地区江汉平原某工程实例出发，探索复杂水文地质条件下融合防渗效能与变形协同控制的综合性方案，旨在为类似基坑工程设计、施工提供一些参考。

1 工程概况

场地位于江汉平原腹地的荆州市，为商业综合体项目。本项目设计为地上 4~25 层地下 1 层建筑，建筑高度为 20.0~98.0m，框剪结构，基础形式为钻孔灌注桩基础。基坑开挖深度 6.25m，整体呈长方形，平面尺寸约 50×100m，基坑开挖面积约 5000m²，基坑开挖周长约 400m。荆江大堤禁脚与本项目地下室（车库）距离为 100.67m。

1.1 场地环境条件

场地南侧为城市主干道，北侧及东侧均为城市支路，西侧为既有多层建筑。坑壁四周距用地红线约 1.5~1.8m；南侧坑壁距离道路中心线约 25.0m，北侧及东侧坑壁距离道路中心线约 11.5m，既有道路分布有市政天然气管道、雨污管线及自来水管道，其埋深约 1.5~2.5m；西侧坑壁距离多层建筑约 13.0~19.0m，既有多层建筑为 2 层（天然地基，基础埋深 1.0m），4~9 层（桩基础，基础埋深 2.0m）。基坑开挖边线距离荆江大堤禁脚距离为 97.4~101.6m。场地环境条件紧张，对变形极为敏感。

1.2 工程地质条件

项目场地属长江一级阶地地貌单元,地形平坦,本场区分布的地层主要为人工堆积层、第四系全新统冲洪积层及第四系上更新统冲洪积层。

(1) 人工堆积填土层分布在表部 0~3.0m: 主要为素填土层,以粉质黏土、粉土为主,夹植物根茎。该层属高压缩性土,软硬不均,物理力学性质较差,属不均匀岩土。

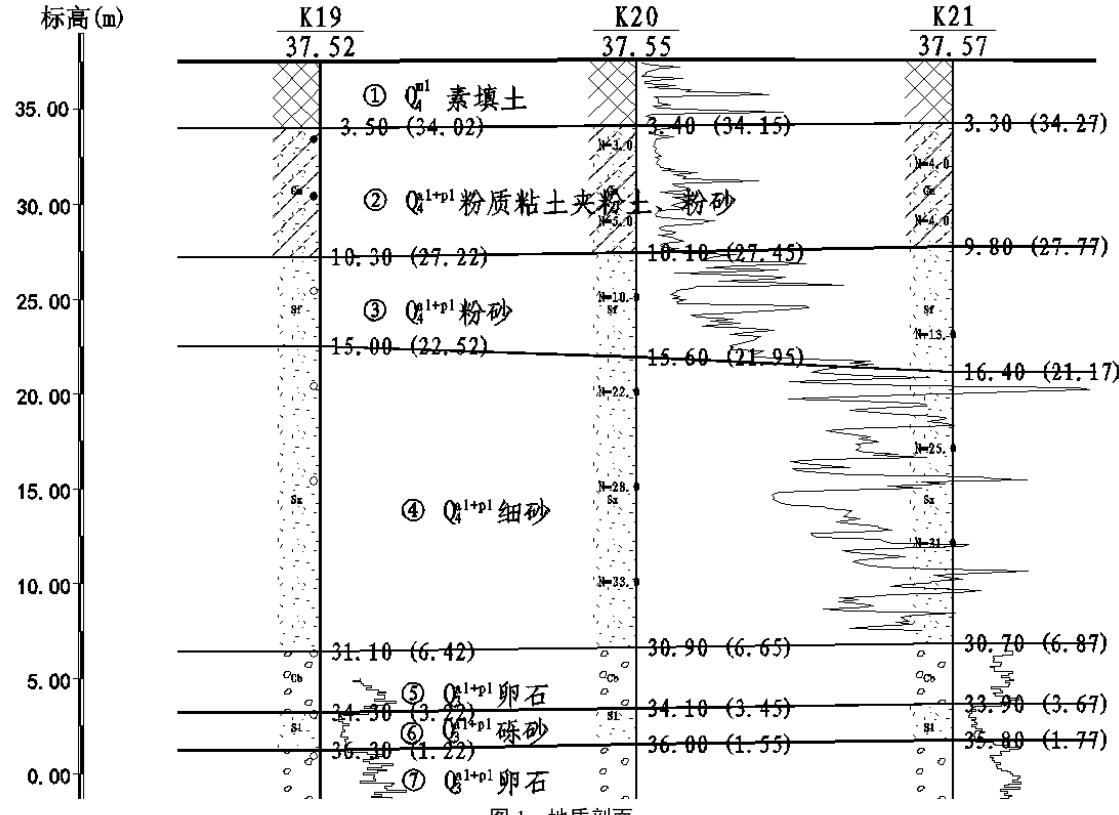
(2) 第四系全新统冲洪积层 (Q_4^{al+pl}) 分布在中部 3.0~31.0m: 3.0m~14.0m 为粉质黏土夹粉土、粉砂层,湿,可塑; 10.0m~15.0m 为粉砂,饱水,稍密; 15.0m~31.0m 为细砂,饱水,中密。这三层均属中压缩性土,层内构造均匀性一般。

(3) 第四系上更新统冲洪积层 (Q_3^{al+pl}) 分布在 31.0m 以下: 主要为卵石层,孔隙间充填粗砂、粉细砂等。该层属低压缩性土,层内构造均匀性一般。

地质剖面如下: 基坑支护设计有关参数取值于下表 1:

表 1 基坑设计参数表

土层编号及名称	γ	f_{ak}	E_s	抗剪强度	
	(kN/m ³)	(kPa)	(MP _a)	C (kPa)	Φ (°)
①素填土	18.5	/	/	10.0	10.0
②粉质粘土夹粉土、粉砂	20.2	100	6.5	14.0	13.0
③粉砂	19.6	135	12.5	0	27.0
④细砂	20.2	230	21.0	0	33.0



1.3 水文地质条件

(1) 地下水类型。场地地下水类型主要为上层滞水和承压水。上层滞水赋存于场区内填土层中,受气候的影响水幅变化较大,但其总体水量不大,可通过坑内排水沟将其汇集于一处集中抽排。承压水主要赋存于深部卵石层中,该承压水主要接受临区含水层及长江侧向补给,层间侧向径流排泄。年水位变幅一般 3~5m,根据收集场地附近长观孔水位资料,场地承压水历史最高水位标高约 38.0m,勘察期间测得水位埋深为 6.2~6.5m,对应标高为 31.0~31.2m。

(2) 抗突涌稳定性分析。基底虽坐落于黏性土隔水层中。根据《基坑工程技术规程》(DB42/T159—2024)中的 6.2.15 式对承压水进行抗突涌稳定性验算,验算结果表明本工程基坑在施工至基底设计标高后会产生突涌,基坑开挖中须采取有效降低承压水水头措施,以保基坑安全、正常施工。

(3) 渗透系数

各土层渗透系数见下表 2:

表 2 各岩土层的渗透系数

土层编号及名称	渗透系数 k (cm/s)	渗透性等级
②粉质粘土夹粉土、粉砂	3×10^{-6}	弱透水
③粉砂	5×10^{-3}	强透水
④细砂	8×10^{-3}	强透水
⑤卵石	9×10^{-2}	强透水

2 基坑方案

因场地环境条件紧张,基坑侧壁距离既有红线仅1.5~1.8m,场地无放坡条件;基坑开挖深度达6.25m,场地南侧、北侧及东侧红线外围道路分布有市政天然气管道、雨污管线及自来水管线,且北侧及东侧地下市政管线分布在坑壁2倍开挖深度范围内,西侧坑壁外围既有多层建筑,场地四周对变形较为敏感。综合以上分析,结合本地区类似工程经验,支护方案采用钻孔灌注桩($\varphi 1000 @ 1500\text{mm}$)

+止水帷幕+砼内支撑的支护形式。

止水帷幕采用两排三轴搅拌桩（Φ850@600mm）交错咬合布置，竖向加固体形成止水帷幕，使坑壁土层得到固化，与支护桩联合作用，既挡土又止水。为保障基坑施工工作面要求，项目支护桩采用三轴搅拌桩+内切钻孔灌注桩方案，具体为先施工三轴搅拌桩，再在搅拌桩设置宽度范围内内切施工钻孔灌注桩，确保支护体与止水结构无缝衔接。

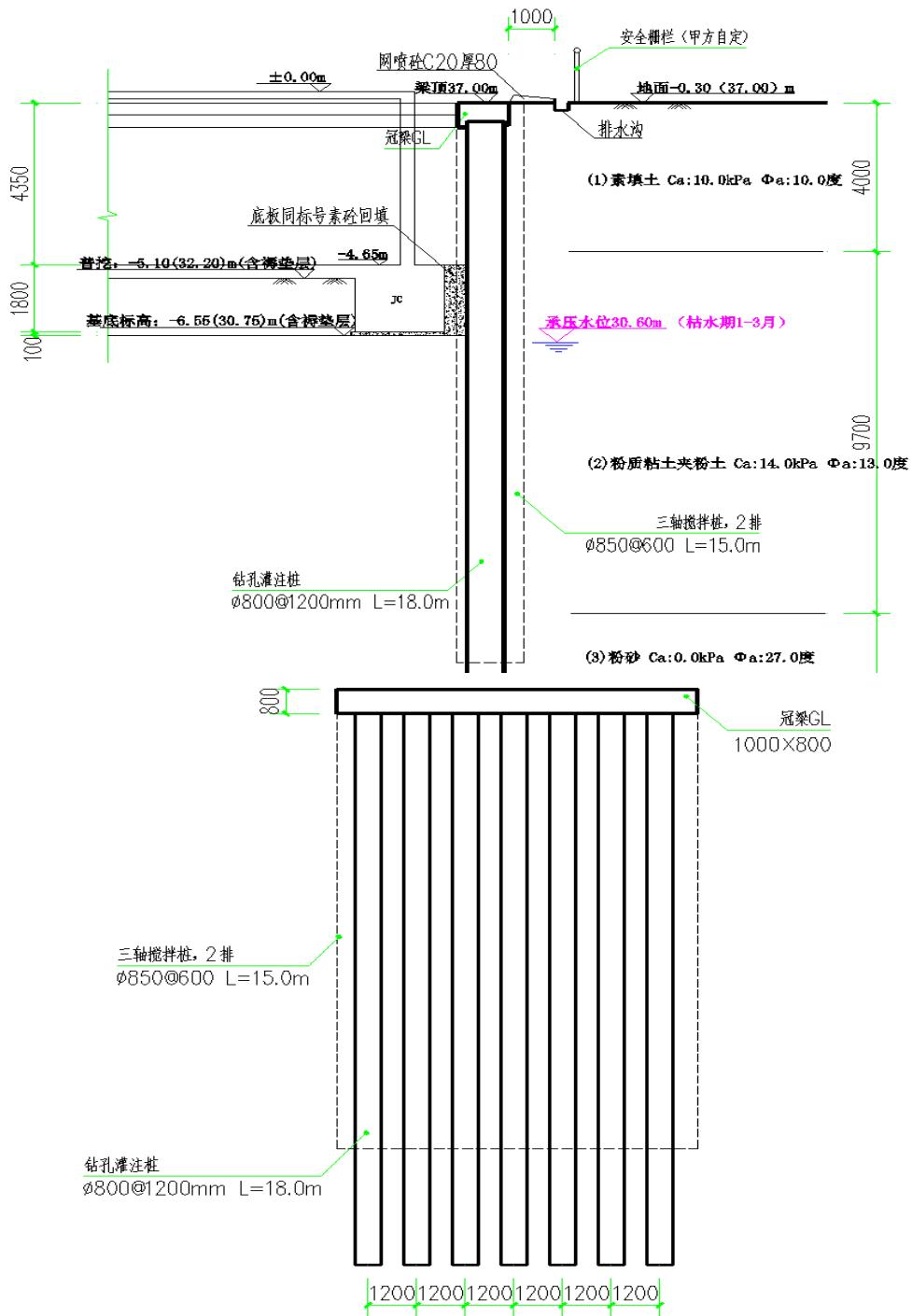


图 2 支护剖断面图

针对下伏砂卵石层中的承压水头压力,按减压降水的原则布置管井降水群,将承压水头降至基底 4.0m 以下。

3 基坑方案的不足

本项目基坑开挖边线距离荆江大堤禁脚距离仅为 97.4~101.6m,地下水埋藏浅、水量丰富且水位变化与长江同步,周边环境紧张。通过报审基坑工程设计方案技术评审、专项防洪评价及实际施工。发现该方案存在以下几点不足:

(1) 防渗性能方面

两排三轴搅拌桩采用 $\Phi 850 @ 600\text{mm}$ 交错布置时,搭接量为 250mm,但受施工精度偏差(垂直度、定位误差)及地层不均影响,施工时存在实际有效搭接不足的情况,导致桩间出现渗水通道。钻孔灌注桩(C30 混凝土,渗透系数 $1 \times 10^{-4}\text{cm/s}$,弹性模量 $3 \times 10^4\text{MPa}$)与三轴搅拌桩(水泥土,渗透系数 $5 \times 10^{-6}\text{cm/s}$,弹性模量 300MPa)存在显著材料性能差异,界面结合易产生微裂缝。当采用先施工搅拌桩再内切钻孔桩的工艺时,钻孔桩对搅拌桩的切割扰动进一步破坏桩体连续性,尤其在砂土-黏性土界面突变带,渗流力集中导致渗漏风险提升,严重削弱止水帷幕整体性。此外,三轴搅拌桩在粉细砂层(渗透系数 $5 \times 10^{-3} \sim 8 \times 10^{-3}\text{cm/s}$)中成桩连续性差,易形成渗漏薄弱区;在粉质黏土层(渗透系数 $3 \times 10^{-6}\text{cm/s}$)中因搅拌不均产生“夹心”缺陷。高水压环境(渗透压力 $> 0.1\text{MPa}$)加剧帷幕结构变形,防渗性能呈指数级衰减。

(2) 降水对长江大堤及周围环境的影响

基坑管井降水在临近长江大堤的工程中可能引发多重风险。首先,地下水位骤降会破坏大堤地基平衡:背水侧土体因有效应力增加易产生不均匀沉降或开裂,而堤基承压含水层渗透压力突变可能诱发流土、管涌等渗透破坏,直接威胁抗洪能力;长期降水形成的地下水降落漏斗还会逆转江水与地下水的补排关系,加剧临江侧渗透压力。其次,降水影响呈放射状扩散,邻近建筑因地层压缩产生附加沉降(浅基础或桩基结构易开裂),地下管线面临接口错位风险;因含水层与江水水力联系密切,过量抽排将加速江水侧向补给,形成基坑内外水位差持续扩大的恶性循环,进一步威胁大堤安全。此外,长江高水位与汛期叠加时,基坑内外水头差可达数米,对降水系统效能和止水帷幕完整性构成严峻考验;含水层各向异性或透镜体分布易导致局部渗流路径突变,诱发地面塌陷等次生灾害。

4 最终基坑方案

根据上述问题得知,本项目需采取更加合理的立体防渗体系,以满足敏感环境工程控制要求。通过将三轴搅拌桩帷幕升级为“桩间高压旋喷桩+桩后 TRD 等厚水泥土连续墙”的复合止水结构,同时将管井降水群改为高压旋喷桩封底,形成多维立体防渗体系。三者协同作用可有效

阻断长江高水头条件下的渗流通道,为深基坑工程提供兼顾安全性与经济性的支护解决方案。

其优势与必要性体现在以下方面:

(1) 立体防渗体系

钻孔灌注桩与 TRD 水泥土墙的组合,既发挥灌注桩的高承载力优势,又利用 TRD 的低模量特性缓冲大堤地基的不均匀沉降变形。桩间高压旋喷桩通过高压喷射注浆技术填充钻孔灌注桩施工间隙,形成连续致密的止水屏障,有效解决传统桩间搭接不足导致的渗漏问题,其材料相容性优于传统搅拌桩-灌注桩组合,交界面的结合强度也有所提升。桩后采用 TRD 等厚水泥土连续墙,凭借其全断面连续成墙特性(墙体厚度达 800mm),在长江砂卵石地层中可形成渗透系数低的封闭防渗体系,显著优于搅拌桩的防渗性能。底部高压旋喷桩封底则阻断基坑底部承压水的层间越流,封底旋喷桩与 TRD 墙形成封闭阻水环,防止因地下水位骤降引发的堤基渗透破坏。形成“侧向-底部”三维立体截渗结构,适应长江高水头及砂卵石层的地层条件。

(2) 复杂地层适配与质量可控性

TRD 工法在砂卵石层中通过多刀轮切割搅拌,可实现地层颗粒与水泥浆的均匀混合,成墙均匀性较三轴搅拌桩提升 60%,解决传统工艺在卵砾石层中易出现“夹泥芯”的质量缺陷。高压旋喷桩采用双重管或三重管工艺,通过实时监测喷射压力(20-40MPa)与提升速度,可动态调整参数以应对地层渗透性突变(如透镜体分布),确保帷幕完整性。

(3) 风险防控

相较于多排搅拌桩方案,该体系通过 TRD 单排连续墙实现高效截渗,减少水泥用量,同时桩间旋喷桩局部加固降低了施工机械的频繁移位风险。结合基坑监测数据(如孔隙水压力、墙体侧向位移)动态调整内支撑轴力,可实现支护体系安全与经济性的平衡,为长江大堤深基坑工程提供兼具安全性、适应性与可持续性的解决方案。

5 结论

本研究通过构建立体防渗体系,实现了复杂地质条件下支护与防渗技术的系统性升级。该方案通过 TRD 等厚水泥土连续墙与高压旋喷桩的多维协同,有效解决了传统搅拌桩体系在桩间搭接、材料界面耦合及地层适应性方面的不足,形成兼顾高水头截渗、结构稳定与环境低扰动的立体防护网络。相较于原有工艺,新体系显著提升了大堤安全防护等级,通过刚柔并济的结构设计平衡了地层变形与荷载传递需求,同时以微扰动施工技术保障了长江堤防及周边生态的稳定性,为类似深基坑工程提供了一些参考。

未来,此类复合支护体系的智能化监测技术、新型材料应用及与生态修复的深度融合,将成为提升重大工程全生命周期安全与可持续性的关键方向。

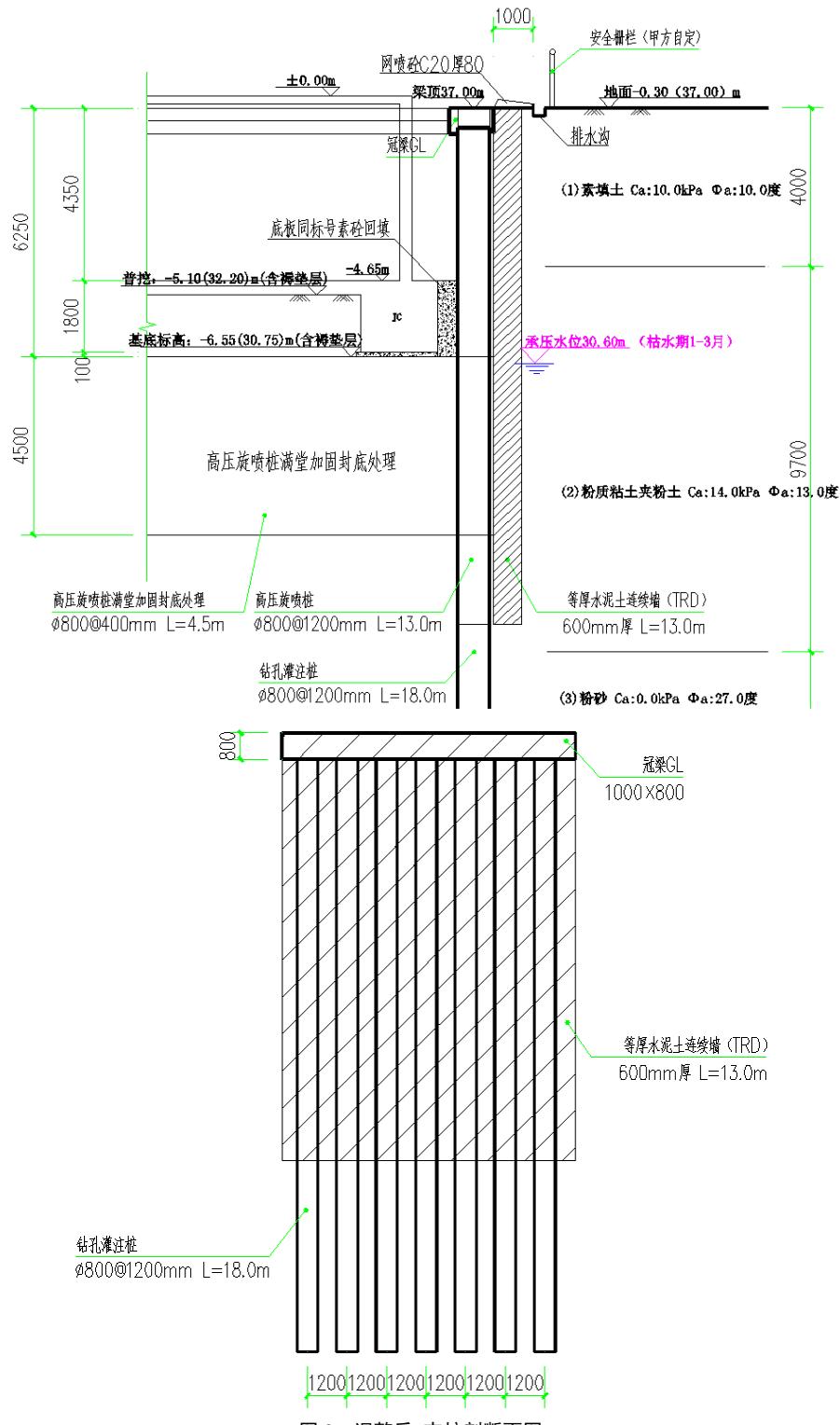


图3 调整后 支护剖面图

[参考文献]

- [1] 刘昭希,王军,宗全利,等.含水率变化对荆江河岸黏性土体力学特性的影响 [J]. 长江科学院院报,2019,11(12):11-12.
- [2] 刘国权.复杂环境下基坑降水影响邻近建筑结构的对策

分析 [J]. 工程技术研究,2024,14(5):22-23.

[3] 刘文强.深基坑降水对周围地表沉降的影响 [J]. 建设科技,2022,14(6):16-18.

[4] 邓晨.深基坑降水方案设计及沉降变形规律分析 [J]. 江西建材,2024,2(11):31-32.

- [5] 黄建华,李瑞.基于 HS-Small 模型临江深基坑降水变形特性分析[J].水电能源科学,2023,3(9):12-13.
- [6] 崔莎莎,朱腾腾,鲍丰.城市建筑群中 TRD 工法在深基坑工程中的应用[J].智能建筑与工程机械,2024,8(12):6-7.
- [7] 葛永超.TRD 工法原理及其在深基坑止水帷幕中的应用[J].工程建设与设计,2021,18(3):11-12.
- [8] 察双元,周恒,栗全旺,等.TRD 工法构建等厚水泥土连续墙在富水砂土层中的适用性研究 [J].湖南交通科技,2020,11(12):11-12.
- [9] 虞伟,吴俊.TRD 工法在紧邻河道狭长深基坑工程中的应用[J].建设监理,2024,7(12):33-34.
- [10] 蔡德庆.灌注桩和高压旋喷桩组合止水帷幕在邻江深基坑中的探究[J].建筑技术开发,2022,8(12):7-8.
- [11] 吕善国,凌国华,董志高.高压旋喷桩在某临江深基坑止水帷幕中的应用[J].江苏建筑,2012,11(12):11-12.
- [12] 刘强,刘建国,梁毅飞.高压旋喷桩局部断面封底减渗加固基坑施工关键技术研究[J].安徽建筑,2023,8(12):44-45.
- 作者简介:雷亚玲,毕业院校:中国地质大学, 所学专业:工程管理, 当前就职单位:湖北建艺岩土工程勘察设计有限公司, 职称级别: 工程师。