

软土地区紧邻既有车站深基坑施工安全技术*

张榜武

(上海城建市政工程(集团)有限公司, 上海 200065)

[摘要] 深基坑开挖造成的坑外地层损失会对邻近建(构)筑物安全造成严重威胁。然而, 目前仍缺少关于软土地区紧邻既有地铁车站深基坑施工安全技术研究。基于上海某紧邻既有车站深基坑工程, 分析了项目实施期间面临的主要挑战, 包括高压线下方施作地下连续墙、既有车站保护及坑底突涌风险管控。此外, 提出了低净空超深地下连续墙施工技术、紧邻既有车站基坑变形控制技术和复杂承压含水层抽水影响控制技术, 有效确保了项目施工安全。

[关键词] 深基坑; 软土; 既有车站; 变形; 风险管控; 施工技术

[中图分类号] TU753

[文献标识码]

A

[文章编号]

Construction Safety Technology of Deep Foundation Excavation Adjacent to Existing Subway Station in Soft Soil Area

ZHANG Bangwu

(Shanghai Urban Construction Municipal Engineering (Group) Co.,Ltd., Shanghai 200065,
China)

Abstract: The deep foundation excavation-induced ground volume losses outside the excavation will severely threaten the safety of adjacent buildings and facilities. However, very few studies have been known about safety-control technologies of deep foundation excavation close to existing stations in soft soil area. Based on a foundation excavation project close to one existing subway station in Shanghai, the major challenges faced throughout implementation of deep foundation excavation were analyzed, including implementation of underground diaphragm walls below high voltage lines, protection of the existing subway station, and risk control of hydraulic failures. Moreover, construction technology of ultra-deep diaphragm walls under low-net-clearance conditions, deformation-control technology of deep foundation excavation close to existing stations, and dewatering impact-control technology of complex confined aquifers were proposed, which effectively ensured the safety of project construction.

Keywords: deep foundation excavation; soft soils; existing station; deformation; risk control; construction

0 引言

我国城镇化的快速推进导致城市人口拥挤和交通拥堵等问题愈发严重。为缓解这

些问题, 城市空间开发逐渐从地上向地下转变。深基坑工程作为地铁、商业广场、高层建筑和地下综合体等项目的重要前置工程, 在城市地下空间开发浪潮中大量涌现^[1-3]。由于开挖卸荷将不可避免地诱发周围地层运动并改变其初始应力状态, 会导致坑外地表沉降区内的既有建(构)筑物易遭受沉降、倾斜、开裂甚至倒塌等严重损害。

因此, 目前已有不少学者对深基坑邻近

*上海紧邻并行地铁车站深基坑施工安全控制技术课题

[作者简介] 张榜武, 工程师, E-mail: 374724494@qq.com

[收稿日期] 2023-11-12

敏感建（构）筑物的保护技术展开了研究。涂文良^[4]指出，对于高岩溶、高富水地层的深基坑工程而言，可通过基础加固托换方式提高紧邻高层建筑物基础承载力从而抵抗开挖带来的不利影响。周晓军等^[5]针对成都地铁6号线金府站深基坑紧邻既有建筑物和下穿隧道问题，提出了坑内采用预应力锚索加固紧邻建筑物下方地层的施工方法。方能榕等^[6]采用数值手段探究了紧邻古建筑的深基坑支护结构方案优化，结果表明，采用灌注桩+锚杆/钢筋混凝土对撑/钢斜撑方式能有效控制基坑变形并确保邻近建筑物安全。栾金龙等^[7]建立三维有限元数值模型探究了富水砂土深基坑邻近高耸建筑物的保护方案，指出采用隔离墙能有效隔断基坑开挖降水对建筑物造成的不利影响。尽管如此，上述研究主要聚焦于深基坑邻近建筑物和隧道的保护问题，很少有深基坑紧邻既有运营地铁车站保护的相关报道。近年来，随着深基坑工程逐渐向“深、大、近”发展，许多新建、改建和扩建工程距离既有地铁车站越来越远，这给设计和施工都带来极大挑战。

本文依托上海市域线某在建深基坑工程，详细分析了项目施工期间所面临的工程难点，并提出既有车站紧邻软土深基坑的有效保护措施，可为后续类似项目设计和施工提供有效参考。

1 工程概况

1.1 工程简介

在建地铁车站深基坑位于上海市嘉定区，沿曹安公路呈东西向布置。车站为地下3层岛式站台，规模尺寸为21.6m×250m（内

净），标准段开挖深度为26.2~26.6m，端头井开挖深度为28.7~29.3m。车站主体采用地下连续墙作为围护结构兼作止水帷幕，采用明挖顺作法施工。基坑周边环境非常复杂，存在大量既有敏感建（构）筑物；其中，地铁14号线既有运营车站位于在建车站北侧，底板埋深约为17.2m，底板下方布设了一定数量的抗拔桩（ $\phi 850\text{mm}$ ，桩长35m）用于车站抗浮，围护结构采用800mm厚地下连续墙，墙高约35m。既有车站距离深基坑标准段最近处约10.2m，距离端头井最近处约4.4m，两者相对位置关系如图1所示。

1.2 工程地质与水文地质

车站场址范围内地层由上至下依次为①₁₋₁杂填土、②₁灰黄色粉质黏土、③灰色淤泥质粉质黏土、④灰色淤泥质黏土、⑤₁灰色黏土、⑤₃灰色粉质黏土、⑤₄灰绿色粉质黏土、⑦草黄~灰色砂质粉土、⑧₁灰色粉质黏土、⑧₂₋₁灰色粉质黏土及黏质粉土互层、⑧₂₋₂灰色砂质粉土夹粉质黏土、⑧₃粉质黏土和⑨₁粉砂。场址地质纵剖面如图2所示，典型土层主要物理力学参数如表1所示。

场地潜水主要赋存于浅部杂填土、黏土和粉土中，补给来源主要为大气降水入渗及地表水侧向径流，水位稳定埋深0.5~2.2m。场址内承压水主要分布于⑦₁层、⑧₂层和⑨₁层中，⑧₂₋₁层与⑧₂₋₂层根据上海区域经验可视为同一承压含水层。根据勘察资料，⑦₁层承压水水位埋深4.2~4.3m，⑧₂层承压水水位埋深5.3~6.2m，⑨₁层承压水水位埋深7.1~7.5m。

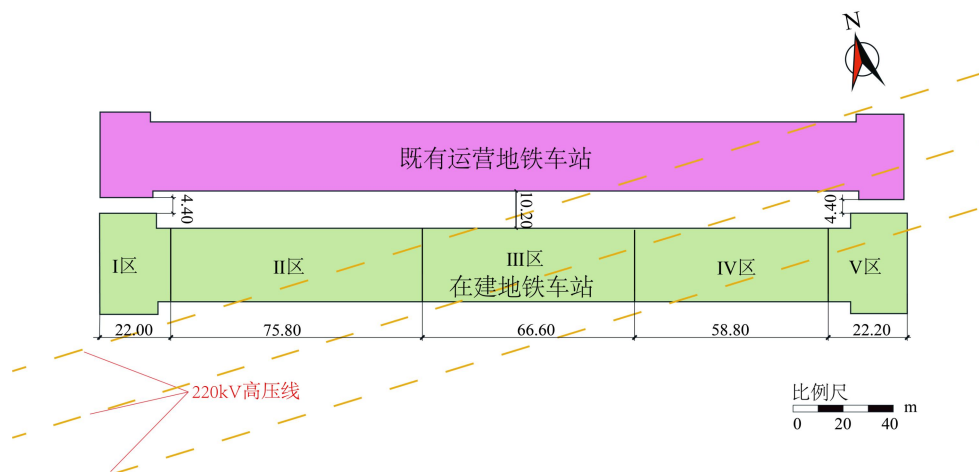


图 1 车站平面布置 (单位: m)
Fig.1 Plan layout of the subway station (unit: m)

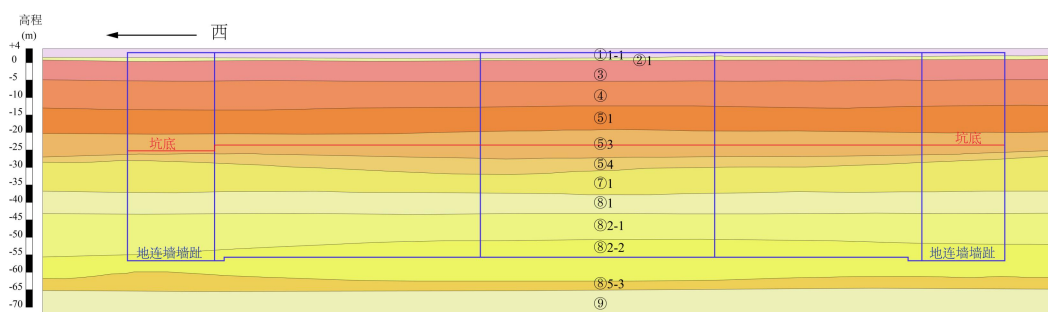


图 2 场址地质纵剖面
Fig.2 Longitudinal geological profile of the site

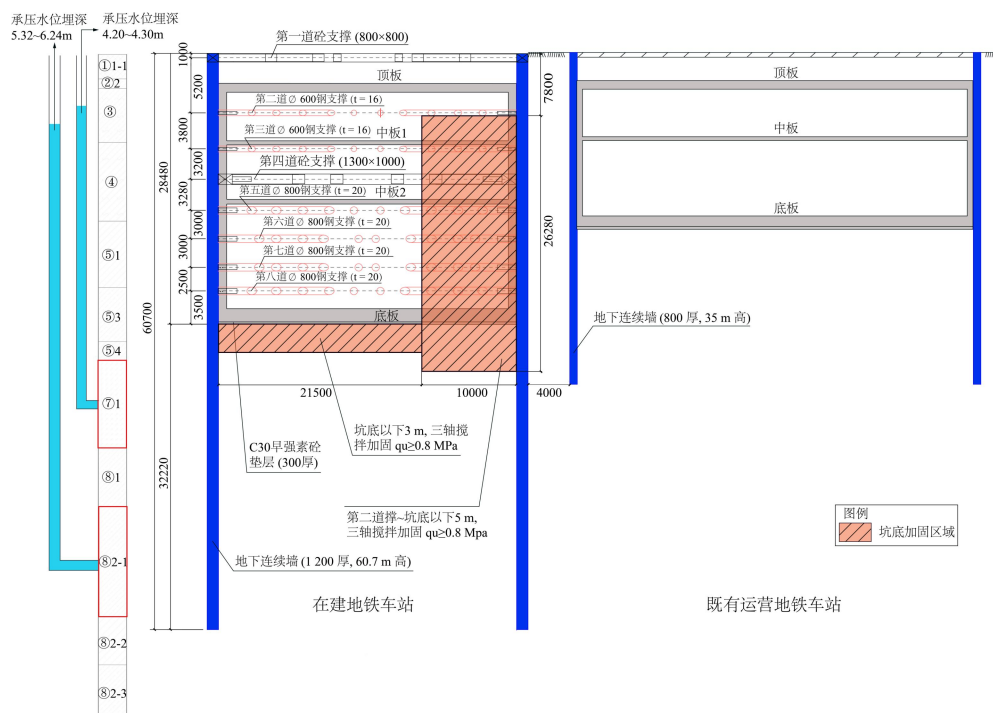


图 3 基坑西端头井典型横剖面

Fig.3 Typical cross sections at the west shaft

表 1 土体主要参数

Table 1 Major parameters of the soil

土层	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	压缩模 量/MPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	黏聚力 /kPa
② ₁	18.9	4.99	17.5	21
③	17.8	3.19	18.0	12
④	16.9	2.03	11.5	12
⑤ ₁	17.6	3.04	12.0	16
⑤ ₃	18.1	4.30	18.0	17
⑤ ₄	19.7	6.47	17.5	35
⑦ ₁	19.2	10.85	32.0	5
⑧ ₁	18.1	4.47	17.5	17
⑧ ₂₋₁	18.6	6.23	22.5	16
⑧ ₂₋₂	19.0	9.22	16.0	11
⑧ ₃	19.5	5.98	17.5	32
⑨ ₁	19.4	14.33	34.0	2

1.3 基坑支护方案

本基坑采用明挖顺作法施工，围护结构采用 1200mm 厚地下连续墙，墙高约 60m。标准段设置 7 道支撑，其中第 1，4 道为钢筋混凝土支撑，其他均为钢支撑（第 2，3，7 道为 $\phi 609\text{mm}$ 钢管支撑，其余为 $\phi 800\text{mm}$ 钢管支撑）；西端头井和东端头井设置 8 道支撑，其中第 1，4 道为钢筋混凝土支撑，其他均为钢支撑（第 2，3 道为 $\phi 609\text{mm}$ 钢管支撑，其余为 $\phi 800\text{mm}$ 钢管支撑）。基坑典型横剖面如图 3 所示。

2 施工技术重难点

2.1 高压线保护区内地下连续墙施工

如图 1 所示，在建地铁车站上方的高压线斜跨车站，线下施工净空仅 27m，因此高压线保护区范围内钢筋笼无法一次性吊装，需进行分节吊装，这对钢筋接头对接成功率和对接质量要求很高；另外，该范围内无法使用大型成槽机械，易诱发槽壁坍塌，影响成墙质量。由于地下连续墙施作深（60m），在稳定性较差的浅层软土和粉砂土中进行成槽时极易发生塌方，这对泥浆护壁质量要求很高^[8]；另外，超深地下连续墙的垂直偏差要求 $\leq 3/1000$ ，并对超深地下连续墙混凝土的水下抗分散、离析性能要求也极高。如地下连续墙施工质量不佳，基坑施工期间极易发生穿墙渗漏事故，造成坑外显著水土流失，从而严重危及邻近既有运营地铁车站安全。

2.2 开挖期间不影响既有车站正常运营

由于深基坑距离北侧的既有地铁车站仅 4.4~10.2m，且车站已开始正常运营，因此，深基坑施工期间需在保证其自身结构安全的前提下，同时降低开挖对紧邻车站造成的不利影响，避免出现运营中断等问题。既有研究表明^[9]，软土地层深基坑侧墙最大侧移出现在开挖面附近，这表明在建深基坑围护结构最大侧移出现位置可能恰好位于紧邻既有车站墙趾附近，如图 3 所示。过量坑外地层运动会对邻近车站的结构内力产生显著影响，从而诱发结构开裂损坏等一系列严重后果。可见，深基坑施工期间紧邻地铁车站的保护难度非常大。

2.3 坑底承压水突涌风险管控

由地质勘察报告可知，本工程场址范围内⑦₁层和⑧₂层可视为第一和第二承压含水层。依据相关规范要求，对深基坑抗渗流稳定性进行验算，设计安全系数为 1.05，结果表明，车站范围内均需进行减压降水，标准段需降深约 3.1m，端头井需降深约 7.2m，且施工期间需加强承压水观测工作。现场施作减压井如图 4 所示。



图 4 现场减压井

Fig.4 In-situ relief wells

2.4 坑内抽水不利影响控制

如图 3 所示，由于地下连续墙无法完全隔断⑧₂层承压含水层，该承压含水层减压降水过程中会导致坑外水位显著下降和土体压缩固结变形，从而对坑外紧邻既有车站结构造成不同程度的损坏。因此，非常有必

要采取有效措施控制复杂承压含水层抽水引起的紧邻车站变形。

3 紧邻既有车站深基坑施工关键技术

3.1 低净空条件下超深地下连续墙施工技术

为保证低净空条件下超深地下连续墙施工质量，可采取如下对策。

1)高压线下方的地下连续墙钢筋笼采用分节施作方式，并在墙体两侧采用 TRD 法或三轴搅拌桩进行槽壁加固来有效避免浅层塌方；选用优质膨润土，严格控制护壁泥浆参数并适当增大密度及黏度指标等来确保槽段稳定，泥浆具体参数如表 2 所示。

2)采用配有自动纠偏装置的进口小型成槽机在高压线保护区内开展作业，成槽垂直度可达 1/1 000；抓斗上的传感器可实时反映偏斜情况，驾驶员根据反馈结果启动液压成槽机上的液压推板进行动态纠偏，从而确保墙体垂直精度要求。

3)超深地下连续墙选用大流态高黏聚性的耐久性混凝土配方，混凝土坍落度控制在 180~220mm 且扩展度在 550~600mm，来避免混凝土浇筑期间出现离析沉降。

4)新拌制泥浆静置储放 24h 以上，使用膨润土水化，并定期检查泥浆质量；雨季需加强地面及槽段内两端防水工作，避免雨水灌入槽段内污染泥浆。

5)钢筋笼先整体制作，然后再进行切割分节，从而保证接头对接准确性。

表 2 泥浆质量控制指标

Table 2 Quality control criteria of slurry

泥浆性能		密度 /(g·cm ⁻³)	黏度 /(Pa·s)	含砂量 /%	pH 值
新配	黏性	1.04~1.05	20~24	<3	8~9
制土	砂性	1.06~1.08	25~30	<4	8~9
循环	黏性	<1.10	<25	<4	>8
泥	砂性	<1.15	<35	<7	>8
浆	黏性	<1.25	>50	>8	>14
废弃	砂性	>1.35	>60	>11	>14
泥	砂性				
浆	黏性				

3.2 紧邻既有运营地铁车站深基坑变形控制技术

为有效缓解深基坑施工对紧邻既有车站的不利影响，可采取如下对策。

1)深基坑内设置 4 道横向封堵墙，将 250m 长、21.6m 宽的狭长形基坑分隔为 5 个小型基坑（见图 1），利用基坑角部效应来约束围护结构变形。

2)采用三轴搅拌桩进行坑内被动区土体加固。标准段北侧在第 4 道支撑以下 6m 至坑底以下 3m 设置 5m 宽裙边加固，南侧则在第 4 道支撑以下 6m 至坑底以下 6m 设置裙边+抽条加固，裙边宽度为 4m，抽条宽度为 3m、间距为 6m；端头井北侧在第 2 道支撑至坑底以下 5m 设置 10m 宽裙边加固，南侧则在第 4 道支撑以下 3m 至坑底以下 3m 设置 5m 宽裙边加固，如图 3 所示。

3)主体基坑内所有钢支撑均采用伺服轴力系统，对支撑轴力进行实时监控，实现低压条件下自动伺服、高压条件下自动报警，来有效平衡基坑内外土压力，从而约束基坑变形。

4)加强施工监测，实施动态信息化施工管理，同时对在建深基坑变形和既有车站结构变形及轨道沉降进行实时监控。

5)为有效控制地下连续墙施工对既有车站及其盾构区间的不利影响，在高压线两侧 20m 保护区范围内设置 TRD 槽壁加固。

6)严格按“时空效应”原理开展深基坑开挖施工，随挖随撑，避免围护结构出现过大量变形从而诱发墙体接缝渗漏。

3.3 复杂承压含水层抽水影响控制技术

为避免坑底出现突涌事故同时降低抽水不利影响，可采取如下对策。

1)施工前针对场址内实际工程水文地质情况，科学计算坑内⑦₁层和⑧₂层承压水降压量，其中⑦₁层布置 15 口减压井（井深 42m，滤管 7m），⑧₂层布置 15 口减压井（井深 55m，滤管 7m），防止坑底突涌。

2)在主体基坑外侧，按组分别布设一定数量的⑦₁层和⑧₂层水位观测井兼应急回灌井；基坑与既有运营车站间的回灌井组间

距约 20m, 其他侧井组间距约 30m; 此外, 在开挖期间密切监测坑外水位及地表沉降变化, 一旦这 2 个指标变化异常, 及时开启回灌井并进行应急回灌, 根据情况适当调整回灌参数来延缓周边环境沉降, 确保紧邻车站安全。

4 新建基坑施工期间既有车站变形

为评估上述关键技术的保护效果, 本文对基坑开挖期间既有运营车站结构顶部沉降量进行分析, 如图 5 所示。可见, 车站沉降量在整个施工期间缓慢增长, 且最大值远小于变形控制标准 (10mm)。

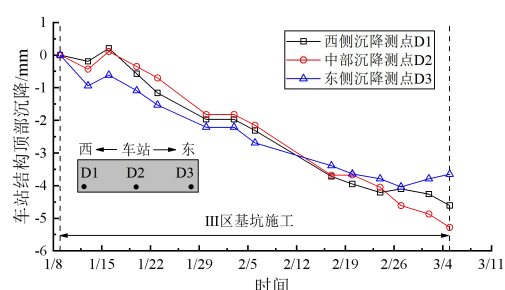


图 5 既有车站结构顶部沉降时变曲线

Fig.5 Time-histories curves of the settlement at the top of the existing subway station structure

5 结语

1)对于类似深基坑工程, 可借鉴本文提出的低净空条件下超深地下连续墙施工技术、紧邻既有运营地铁车站深基坑变形控制技术、复杂承压含水层抽水影响控制技术来有效降低深基坑近接既有地铁车站施工风险。

2)通过分节施作钢筋笼、加固墙侧槽壁、优化控制泥浆质量、自动成槽纠偏及采用大流态高黏聚性混凝土等方式能确保低净空作业条件下超深地下连续墙施工质量。

3)通过分坑开挖、坑内土体加固、伺服支撑、密切监控并按时空效应开挖施工等手段能有效约束深基坑及紧邻既有车站变形。

4)通过合理布设减压降水井及回灌井, 不仅能有效避免坑底突涌事故, 还能控制坑内抽水对周边环境造成的不利影响。

参考文献:

- [1] LIU J C, TAN Y, LIAO S M. Protection of a 193.5m high concrete tube-shaped TV tower close to subway excavations [J]. Journal of performance of constructed facilities, 2023, 37 (5): 04023043.
- [2] 韩旭,刘俊城,张建辉,等.深厚富水砂土层深基坑开挖降水变形研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(S2): 2246-2255.
- HAN X, LIU J C, ZHANG J H, et al. Deformation induced by deep excavation and dewatering in thick water-rich sandy strata [J]. Building structure, 2022, 52 (S2): 2246-2255.
- [3] 刘祥勇,樊冬冬,景旭成,等.南通市某地铁车站深基坑施工案例分析[J]. 施工技术, 2020, 49(S1): 187-189.
- LIU X Y, FAN D D, JING X C, et al. Case study on deep excavation construction of a station in water-rich sand layer area [J]. Construction technology, 2020, 49(S1): 187-189.
- [4] 涂文良.浅析深基坑紧邻高层建筑施工控制技术[J]. 工程建设与设计, 2018(4): 46-48.
- TU W L. The construction control technology of deep foundation adjacent to high-rise building [J]. Construction & design for engineering, 2018(4): 46-48.
- [5] 周晓军,刘建国.地铁车站明挖深基坑近接既有建筑物基础的预应力锚索施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(1): 77-84.
- ZHOU X J, LIU J G. Construction technology of prestressed cable for open-cut deep foundation excavation of subway station adjacent to existing building foundation [J]. Construction technology, 2022, 51(1): 77-84.
- [6] 方能榕,李继光,蓝燕金,等.复杂条件下深基坑开挖对古建筑影响及变形控制[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(12): 69-73, 93.
- FANG N R, LI J G, LAN Y J, et al. Influence of deep foundation excavation on ancient buildings and deformation control under complex conditions [J]. Construction technology, 2023, 52(12): 69-73, 93.

[7]栾金龙,刘俊城,樊冬冬,等.富水砂性地层基坑周边建筑物隔离墙保护技术[J].土工基础,2022,36(2):115-121.

LUAN J L, LIU J C, FAN D D, et al. Cut-off walls for building surrounded deep excavation in saturated sandy stratum[J]. Soil engineering and foundation, 2022, 36(2): 115-121.

[8]LIU J C, TAN Y. Review of through-wall leaking incidents during excavation of the subway stations of Nantong metro line 1 in

thick water-rich sandy strata [J]. Tunnelling and underground space technology,2023, 135: 105056.

[9]TAN Y, WANG D. Characteristics of a large-scale deep foundation pit excavated by the central-island technique in Shanghai soft clay. II: top-down construction of the peripheral rectangular pit[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2013, 139 (11): 1894-1910.