

# 成都膨胀土地层大型地铁车站施工 方法及力学特征研究<sup>\*</sup>

程敏杰

(中铁十二局集团第四工程有限公司, 610051, 成都)

**摘要** [目的] 成都部分膨胀土地区下伏基岩为泥岩, 为地下水的富集提供了良好的空间, 导致膨胀土吸水膨胀, 较大的膨胀力易使得该地区车站主体结构侧墙开裂。为避免此类情况发生, 需对该地区车站主体结构施工过程中侧墙、中板、顶板等易受拉部位的受力特性进行深入研究。[方法] 以成都地铁17号线二期东延线威灵站主体结构工程为研究对象。介绍了车站主体结构施工工序; 并采用室内试验以及数值模拟的研究方法, 分析了不同施工工序下主体结构易受拉部位的应力变化特征; 确定了主要影响施工工序和施工过程的最不利监测位置。[结果及结论] 车站施工范围内膨胀土的自由膨胀率均在40.0%以上, 最高的为48.0%, 为弱膨胀土, 膨胀压力随着天然含水率的增加而减小, 现场土体膨胀力为42.8 kPa; 威灵站主体结构施工中采用了“两端向中间合拢施工方法”, 缩短了膨胀土基坑开挖后的暴露时间, 成功避免了侧墙等主体结构开裂; 拆除第一道和第二道支撑会使结构拉应力明显增大, 为施工主要影响工序; 车站主体结构中受力最不利位置为负一层侧墙距离中板7.23 m处、顶板及底板距离右侧墙4.00 m处、中板跨中位置处, 最大拉应力为0.587 MPa, 满足安全控制要求。

**关键词** 成都地铁; 车站; 结构受力; 膨胀土地层; 数值模拟

中图分类号 U231.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.08.027

## Construction Methods and Mechanical Characteristics of Large Metro Stations in Expansive Soil Layers in Chengdu

CHENG Minjie

(The 4th Engineering Co., Ltd., China Railway 12th Bureau Group, 610051, Chengdu, China)

**Abstract** [Objective] In parts of Chengdu, the underlying bedrock in expansive soil area is mudstone, providing a conducive space for groundwater accumulation. This leads to the swelling of expansive soil upon water absorption, causing significant expansion pressure that can easily crack the sidewalls

of station structures in the area. To prevent such occurrences, it is necessary to conduct in-depth research on the mechanical characteristics of tension-prone parts such as side walls, middle slabs, and top slabs during the construction of station main structure in this area. [Method] Taking the main structure of Chengdu Metro Line 17 Weiling Station East Extension Line Phase II project as research object, the construction procedures of station main structure are introduced. By employing laboratory tests and numerical simulation methods, the stress variation characteristics of tension-prone areas under different construction procedures are analyzed. The most unfavorable monitoring locations for the major influencing construction processes are identified. [Result & Conclusion] The free expansion rate of expansive soil within the station construction area is over 40.0%, with a maximum of 48.0%, classifying it as weak expansive soil. The expansion pressure decreases with increasing natural moisture content, with the on-site soil expansion force measured at 42.8 kPa. The construction of Weiling Station main structure adopts a construction method of 'both ends closing towards the middle', which reduces the exposure time of the expansive soil foundation pit after excavation, successfully preventing cracks in the main structure such as the side walls. Removing the first and second supports significantly increases tensile stress in the structure, marking it as a major influencing construction process. The most critical stress locations in the main structure are 7.23 m from the middle slab on the sidewalls of first basement level, 4.00 m from the right sidewall on both the top and bottom slabs, and the midpoint of the middle slab span, with a maximum tensile stress of 0.587 MPa, meeting safety control requirements.

**Key words** Chengdu Metro; station; structural stress; expansive soil layer; numerical simulation

## 0 引言

膨胀土在我国分布广泛, 在成都主要分布于东

<sup>\*</sup> 中铁十二局集团有限公司科技计划项目(公司2020研-10)

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。膨胀土具有胀缩性、裂隙性和超固结性等特性,给成都地铁车站设计和施工带来了非常不利的影响<sup>[1-3]</sup>。

成都地铁 17 号线东延线正在建设的高洪站在主体结构施工过程中出现了侧墙开裂现象,裂缝最长达到 2 000 mm,最宽为 0.4 mm。据现场人员调查,该地区下伏基岩为泥岩,岩体结构致密,透水性较差,为地下水的富集提供了良好的空间。车站周边膨胀土吸水膨胀,导致其抗剪强度、压缩模量等力学指标降低,造成围护桩桩体变形增大、横撑轴力增加,在拆除支撑后的几天时间,支撑所承受的土压力转换到主体结构上,最终导致侧墙开裂。

目前,部分学者针对膨胀土地层地铁车站施工开展了一系列研究。文献[4]依托合肥地铁1号线望湖城站工程,开展了膨胀土在基坑开挖和主体结构施作两阶段中的影响研究,提出了主体结构施作阶段的免换撑工法。文献[5]以成都膨胀土地层某地铁站基坑开挖工程为背景,采用数值模拟手段,分析了围护桩插入深度及横撑轴力增量、桩体最大位移、桩端位移随膨胀力变化的规律。文献[6]依托成都某地铁车站深基坑工程,通过数值模拟分析了考虑膨胀效应时基坑稳定性和支护结构受力与变形规律,并通过现场监测结果进行了验证。文献[7]介绍了膨胀土地层地铁车站深基坑开挖支护的施工方法和控制措施,并通过监测技术进行数据分析,确保了深基坑施工安全稳定。综上所述,国内外学者对膨胀土地层地铁车站施工研究甚多,但大多都是针对基坑开挖和支护的研究,鲜有关于车站主体结构施作及其受力变化规律的研究。

成都地铁 17 号线威灵站与高洪站相邻,两者工程地质情况基本一致,而威灵站在主体结构建设过程中并没有出现侧墙开裂现象。鉴于高洪站施作主体结构时出现的问题,本文以威灵站主体结构建造工程为例,介绍该车站主体结构施工工序,并通过室内试验和数值模拟的分析方法,研究膨胀土地层地铁车站主体结构施工过程中的受力变化规律,探明车站主体结构中受力最不利的位置。研究成果可为类似工程避免发生开裂等问题提供有益参考。

## 1 工程背景

## 1.1 工程概况

成都地铁 17 号线二期威灵站为地下两层双柱

岛式车站,总长 323.4 m,标准段总宽 23.5 m,有效站台长 186 m,顶板覆土厚度约为 3.7~6.3 m,底板埋深 19.5~25.3 m(局部扶梯下沉处底板埋深为 28.7 m)。

基坑围护结构采用围护桩 + 内支撑形式。围护桩直径 1.2 m, 桩间距 0.6 m。车站标准段竖向设置 3 道支撑, 第一道为混凝土支撑, 其余支撑均采用钢支撑。钢管支撑采用直径 609 mm、厚度 16 mm, 以及直径 800 mm、厚度 16 mm 的空心钢管。车站标准断面示意图如图 1 所示。

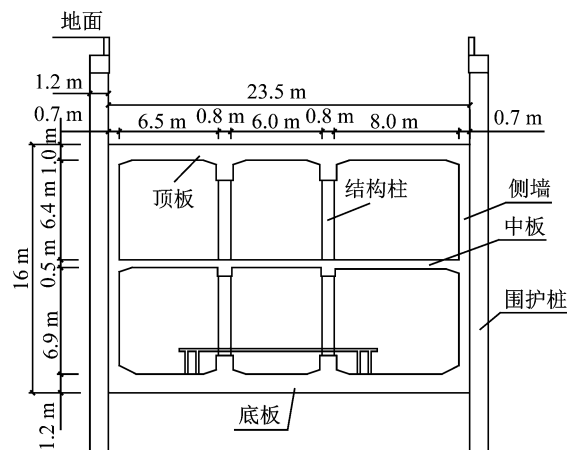


图 1 车站标准断面示意图

Fig. 1 Diagram of station standard section

## 1.2 工程地质

根据区域地质资料、野外调查及岩土工程勘察结果,从地面至基坑底部依次分布有机质土、黏土;下伏基岩为泥岩;地面下 2~11 m 范围内主要为膨胀性黏土;地下水赋存于基岩裂隙中,含水量较小,但局部节理、裂隙发育地段储存有一定量的裂隙水,常形成局部富水段。根据现场地勘资料得出各地层的物理力学参数见表 1。

表 1 围岩力学参数

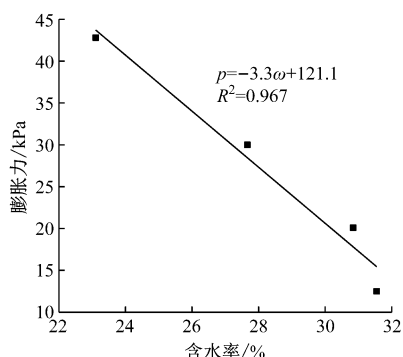
**Tab.1 Surrounding rock mechanical parameters**

名称	弹性模量/MPa	重度/(kN/m <sup>3</sup> )	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	泊松比	厚度/m
杂填土	6.1	18.0	10	8	0.30	0.6
黏土	15.1	20.1	7	15	0.33	10.8
全风化泥岩	30.0	18.7	16	38	0.26	4.0
强风化泥岩	1 214.0	22.0	25	50	0.25	3.0
中风化泥岩	3 250.0	23.0	30	300	0.22	81.6

### 1.3 膨胀力计算分析

根据车站岩土工程勘察及室内试验结果,该地区膨胀土自由膨胀率均在 40.0% 以上,最高为

48.0%。采用反压膨胀法测定土体膨胀力,本次试验的取土选取现场距地面 7 m,对该深度处的土体进行膨胀力试验。设置干密度为  $1.5 \text{ g/cm}^3$ ,含水率分别为 21.0%、24.0%、27.0% 和 30.0%,对 4 个不同含水率的试样进行试验。试验结果及拟合曲线如图 2 所示。



注:  $p$ —膨胀力,单位 Pa;  $\omega$ —含水率,单位 %;  $R^2$ —决定系数。

图 2 不同含水率下的膨胀力及拟合曲线

Fig. 2 Expansion force and fitting curves under different moisture contents

由图 2 可知,在土体干密度不变时,膨胀力随含水率的增加而减小。现场取样测得的膨胀土天然含水率为 23.1%,则现场土体膨胀力为 42.8 kPa。

## 2 主体结构施工工序

现场采用“两端向中间合拢施工方法”,将车站主体结构划分为 11 段,自大小里程端向中心里程方向,采用平行流水线施工的方式进行施工。即当一段主体进行负二层侧墙施工时,相邻的下一段主体在进行底板施工。主体结构施工方向如图 3 所示。

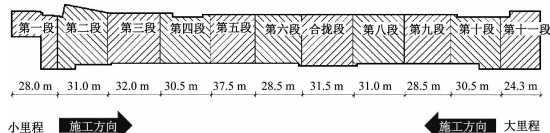


图 3 车站主体结构施工方向

Fig. 3 Construction direction of station main structure

主体结构在基坑深度方向上的施工工序如下:

- 1) 当开挖至基底时,进行基底验槽,施作综合接地、垫层、底板及部分侧墙防水、底板防水保护层。
- 2) 安装底板及底纵梁钢筋和模板,浇筑底板、底纵梁混凝土,施作侧墙混凝土至底板腋角以上 30 cm。
- 3) 待底板达到设计强度后(特别注意的是合拢段每层隔板混凝土的强度都需要达到设计强度的

90% 时才能够拆除上面相邻的钢支撑),拆除第三道钢支撑,安装负二层结构柱及侧墙钢筋模板,并浇筑结构混凝土。结构柱浇筑到中纵梁底面上 5 cm,侧墙浇筑到中板腋角以下 30 cm。

4) 搭设中板脚手架及模板,安装中板、中纵梁钢筋并浇筑混凝土,浇筑混凝土侧墙至中板以上 30 cm。

5) 中板达到设计强度后,拆除第二道钢支撑,安装负一层结构柱、侧墙钢筋、模板及支架,并浇筑混凝土立柱到顶纵梁底面上 5 cm,浇筑混凝土侧墙到顶板腋角以下 30 cm。

6) 待顶板达到设计强度后,拆除第一道混凝土支撑。

## 3 主体结构施工模拟计算概况

### 3.1 建立计算模型

根据理论分析和设计资料,基坑开挖底部至模型边界下底面距离为基坑开挖深度的 2~4 倍,基坑两侧至模型边界的距离至少为 3 倍基坑开挖深度,故模型尺寸为 170 m(长) × 120 m(宽) × 100 m(高),共计生成 396 358 个网格单元。土体膨胀力以面荷载的形式施加在围护桩和桩间土上,膨胀压力为 42.8 kPa。模型边界约束:上部边界为自由面;底部为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三向约束;两侧边界均施加法向约束,自动添加重力。模型中土体、车站主体结构采用 3D(三维)实体单元进行模拟,冠梁、混凝土支撑、腰梁、钢支撑采用 1D(一维)梁单元进行模拟。土体采用摩尔-库伦模型,其余结构均采用弹性模型。车站主体结构有限元模型如图 4 所示。

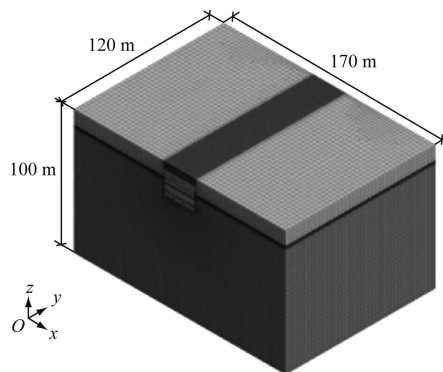


图 4 车站主体结构有限元模型示意图

Fig. 4 Diagram of station main structure finite element model

### 3.2 受力监测点布置

计算模型中主体结构施作总长度为 120 m,将其划分为 6 段进行施工模拟,每段 20 m。取第一段

主体结构中部位置作为模拟监测断面。根据模型生成的节点确定模拟监测点的位置,负二层侧墙模拟监测点距离底板 0.80 m 设置第 1 个,每隔 0.80 m 设置 1 个;负一层侧墙模拟监测点距离中板 0.77 m 设置第 1 个,每隔 0.77 m 设置 1 个;顶板、中板和底板各设置 3 个模拟监测点,监测断面模拟监测点布置如图 5 所示。

### 3.3 选取主要施工步骤

选取的关键模拟施工步骤及其施工内容见表 2。

表 2 关键施工步骤及其施工内容

Tab.2 Key construction steps and their construction contents

序 号	关键施 工步骤	施工内容	序 号	关键施 工步骤	施工内容
①	9	基坑开挖至底部	⑪	19	第三段拆除第二道钢支撑、第五段拆除第三道钢支撑完成
②	10	第一段底板施作完成	⑫	20	第二段顶板、第三段侧墙、第四段中板、第五段侧墙、第六段底板施作完成
③	11	第一段拆除第三道钢支撑完成	⑬	21	第四段拆除第二道钢支撑、第六段拆除第三道钢支撑完成
④	12	第一段侧墙、第二段底板施作完成	⑭	22	第三段顶板、第四段侧墙、第五段中板、第六段侧墙施作完成
⑤	13	第二段拆除第三道钢支撑完成	⑮	23	第五段拆除第二道钢支撑完成
⑥	14	第一段中板、第二段侧墙、第三段底板施作完成	⑯	24	第四段顶板、第五段侧墙、第六段中板施作完成
⑦	15	第一段拆除第二道钢支撑、第三段拆除第三道钢支撑完成	⑰	25	第六段拆除第二道钢支撑完成
⑧	16	第一段侧墙、第二段中板、第三段侧墙、第四段底板施作完成	⑱	26	第五段顶板、第六段侧墙施作完成
⑨	17	第二段拆除第二道钢支撑、第四段拆除第三道钢支撑完成	⑲	27	第六段顶板施作完成
⑩	18	第一段顶板、第二段侧墙、第三段中板、第四段侧墙、第五段底板施作完成	⑳	28	拆除全部第一道支撑

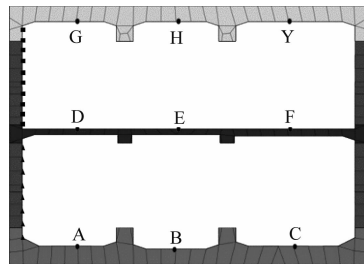
## 4 主体结构受力分析

### 4.1 侧墙受力分析

车站侧墙模拟监测点随主体结构施工而产生的最大主应力变化曲线如图 6 和图 7 所示,正值表示受拉,负值表示受压。

由图 6 可知:当拆除完第二道支撑时,距离底板 6.64 m 处中隔板附近的侧墙最大主应力急剧增加,从  $-0.015$  MPa 变为  $0.23$  MPa,从受压状态变为受拉状态;同时,距离底板 5.81 m 处侧墙最大主应力大幅度增加,为  $-0.06$  MPa;拆除下一段第二道钢支撑时,距离底板 6.64 m 处侧墙最大主应力达到最大值  $0.24$  MPa。产生以上现象的原因是拆除支撑后,支撑所承受的部分坑外主动土压力和膨胀压力转换到侧墙上,使得其拉应力骤增。

由图 7 可知:当拆除完下一段主体结构的第二



注:■—负一层侧墙监测点;▲—负二层侧墙监测点。

图 5 模拟监测点布置图

Fig.5 Layout diagram of simulation monitoring points

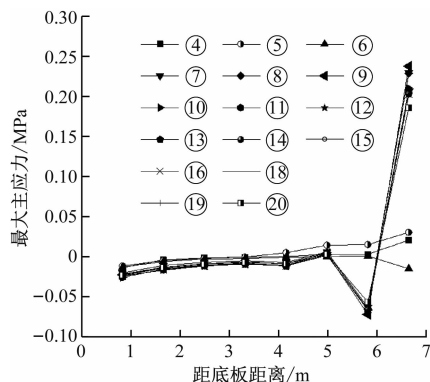


图 6 负二层侧墙模拟监测点最大主应力变化

Fig.6 Variation of maximum principal stress at monitoring points on second basement level sidewall

道支撑时(序号⑨),距离中板 3.38 ~ 6.46 m 范围的负一层侧墙拉应力增长明显,其中距离中板 4.92 m 处的侧墙最大主应力从  $0.005$  MPa 增加为  $0.082$  MPa;当拆除完全部第一道混凝土支撑时(序号



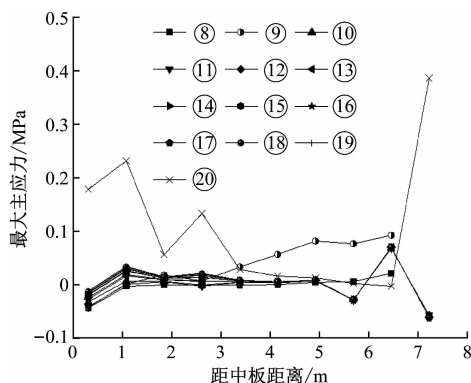


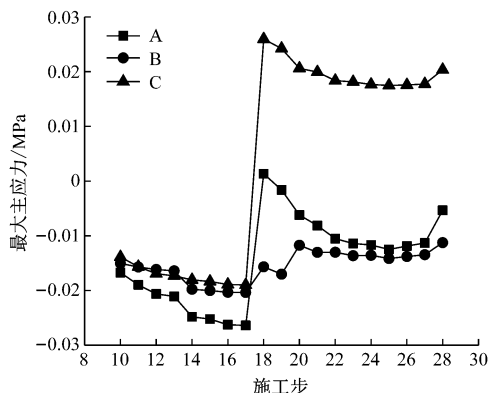
图7 负一层侧墙模拟监测点最大主应力变化

Fig. 7 Variation of maximum principal stress at monitoring points on the first basement level sidewall

⑳), 距离中板 7.23 m 处侧墙最大主应力较工序⑨的增长更为明显, 所受的最大主应力为 0.38 MPa。

#### 4.2 底板受力分析

车站底板模拟监测点随主体结构施工而产生的最大主应力变化曲线如图 8 所示。



注: 监测点 A、B、C 见图 5。

图8 底板模拟监测点最大主应力变化

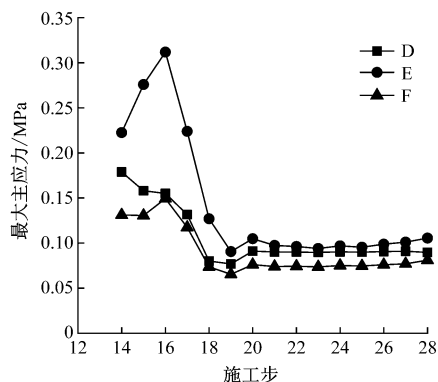
Fig. 8 Variation of maximum principal stress at monitoring points on bottom slab

选取底板模拟监测点 A、B、C (见图 5) 进行分析。由图 8 可知: 第一段主体结构施工过程中, 3 个模拟监测点最大主应力不断增大且均为负值, 在施工作业 17 时, 3 个模拟监测点最大主应力分别为 -0.026 MPa、-0.020 MPa 和 -0.019 MPa, 即施作完第一段顶板前底板主要受压应力; 当第一段主体结构施作完顶板时 (序号⑩), 监测点 A 和 C 向受拉转变, 监测点 C 最大主应力为 0.026 MPa, 监测点 B 的最大主应力减小至 -0.016 MPa, 这是由于顶板施工完成后主体结构完成闭合, 顶板分担了部分土压力和膨胀压力, 使得底板内侧的压应力降低。

#### 4.3 中板受力分析

车站中板模拟监测点随主体结构施工而产生

的最大主应力变化曲线如图 9 所示。



注: 监测点 D、E、F 见图 5。

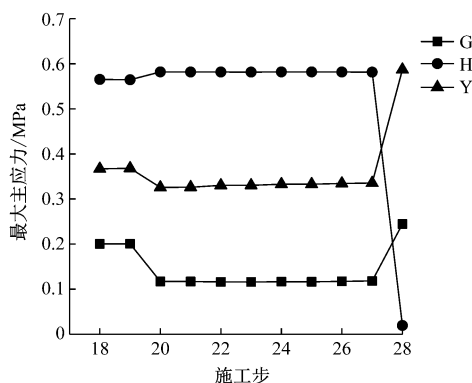
图9 中板监测点最大主应力变化

Fig. 9 Variation of maximum principal stress at monitoring points on middle slab

由图 9 可知: 在主体结构施作过程中, 中板的 3 个监测点最大主应力为正值, 始终处于受拉状态; 当拆除相邻段第二道支撑时 (序号⑨), 各监测点最大主应力显著降低, 监测点 E 的最大主应力由 0.312 MPa 减小为 0.224 MPa, 为中板拉应力最大处。

#### 4.4 顶板受力分析

车站顶板模拟监测点随主体结构施工而产生的最大主应力变化曲线如图 10 所示。



注: 监测点 G、H、Y 见图 5。

图10 顶板监测点最大主应力变化

Fig. 10 Variation of maximum principal stress at monitoring points on top slab

由图 10 可知: 在主体结构施作过程中, 3 个监测点均处于受拉状态; 当拆除完第一道混凝土支撑时, 监测点 G 的最大主应力为 0.245 MPa, 增长 118%; 监测点 Y 的最大主应力为 0.587 MPa, 增长 75.8%; 监测点 H 的最大主应力为 0.020 MPa, 下降 96.6%, 这是由于拆除支撑后, 作用在主体结构上的土压力增大, 使得顶板应力骤变。

## 5 结论

1) 经现场施工验证,威灵站主体结构施工中由于采用了“两端向中间合拢施工方法”,缩短了膨胀土基坑开挖后的曝露时间,成功避免了侧墙等主体结构开裂,在确保施工安全的同时保障了工期。

2) 拆除第二道钢支撑和第一道混凝土支撑会使车站主体结构中的顶板、中板、负二层侧墙中上部以及负一层侧墙拉应力明显增大,为施工主要影响工序,现场施工需控制拆撑时机和拆撑长度。

3) 车站主体结构中受力最不利位置为负一层侧墙距离中板 7.23 m 处、底板模拟监测点 C 处、中板模拟监测点 E 处、顶板模拟监测点 Y 处,最大拉应力为 0.587 MPa,未超过主体结构所用 C35 混凝土的轴心抗拉强度设计值 1.570 MPa,处于安全状态。现场施工需在以上受力最不利位置处加强配筋,提高混凝土强度等级,预防结构开裂。

## 参考文献

- [1] 吉力此且,李江峰,李红学,等. 成都地铁 17 号线东延伸段膨胀土胀缩变形力学特性[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(5): 49.
- JILI Ciqie, LI Jiangfeng, LI Hongxue, et al. Swell-shrink deformation mechanical property of expansive soil in Chengdu Metro Line 17 east extension section[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(5): 49.
- [2] 周学. 膨胀土地层基坑支护稳定性研究[D]. 北京: 交通大学, 2018.
- ZHOU Xue. Study on stability of foundation pit support in expan-

sive soil layer[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.

- [3] 杨圣春, 许有俊, 孙海枫. 膨胀土地层地铁车站基坑围护结构稳定性探讨[J]. 铁道建筑, 2015, 55(11): 55.
- YANG Shengchun, XU Youjun, SUN Haifeng. Discussion on stability of foundation pit enclosure structure of subway station in expansive soil layer[J]. Railway Engineering, 2015, 55(11): 55.
- [4] 刘璐. 合肥膨胀土地层明挖地铁车站两阶段施工关键技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- LIU Lu. Key construction technology of two-stage on the open-cut subway station in Hefei expansive soil layer[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [5] 徐仁中, 袁顺德. 膨胀土地层地铁车站基坑围护结构受力与变形分析[J]. 铁道建筑, 2016, 56(2): 84.
- XU Renzhong, YUAN Shunde. Analysis of stress and deformation in enclosure structure of metro foundation pit in expansive soil stratum[J]. Railway Engineering, 2016, 56(2): 84.
- [6] 游建学. 膨胀性地层超大规模深基坑稳定性研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2020.
- YOU Jianxue. Study on stability of super-large deep foundation pit in swelling stratum[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2020.
- [7] 夏祥保. 弱膨胀土地层超深基坑施工技术[J]. 铁道建筑技术, 2017(7): 106.
- XIA Xiangbao. Construction technique of super-large deep foundation pit in weak expansive soil layer[J]. Railway Construction Technology, 2017(7): 106.

· 收稿日期:2024-02-06 修回日期:2024-03-13 出版日期:2024-08-10  
Received:2024-02-06 Revised:2024-03-13 Published:2024-08-10  
· 作者:程敏杰,高级工程师,749832396@qq.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

### (上接第 154 页)

- [7] 王佳庆,李俊,周欢,等. 建筑物下地铁车站横向扩挖关键技术[J]. 中国高新科技, 2020(8): 76.
- WANG Jiaqing, LI Jun, ZHOU Huan, et al. Lateral enlarging excavation method for subway station construction under buildings[J]. China High and New Technology, 2020(8): 76.
- [8] 郭宏博,李少友. 新建地铁车站大断面密贴暗挖下穿既有地铁车站施工方案[J]. 施工技术, 2018, 47(增刊1): 576.
- GUO Hongbo, LI Shaoyou. Construction scheme of new subway station with large cross-section close-fitting and underground excavation under existing subway station[J]. Construction Technology, 2018, 47(S1): 576.
- [9] 李利,王永红,柏林. 大断面暗挖平顶直墙结构密贴下穿既有有线沉降控制关键技术[J]. 北京交通大学学报, 2016, 40(2): 114.
- LI Li, WANG Yonghong, BAI Lin. Key techniques of settlement control for large section mined tunnel with horizontal proof and

straight wall closely crossing underneath the existing tunnel[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2016, 40(2): 114.

- [10] 杨辉,裴俊豪,朱吉斌,等. 大断面浅埋隧道下穿公路进洞施工技术应用研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(增刊2): 440.
- YANG Hui, PEI Junhao, ZHU Jibin, et al. Study on the application of construction technology of large-section shallow-buried tunnel under highway[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(S2): 440.

· 收稿日期:2023-09-15 修回日期:2023-11-14 出版日期:2024-08-10  
Received:2023-09-15 Revised:2023-11-14 Published:2024-08-10  
· 作者:潘伍,高级工程师,451057810@qq.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license