

DOI: 10.7672/sgjs2024210103

富水地层地铁车站基坑降水开挖变形与控制措施研究

刘 帅

(中铁十八局集团市政工程有限公司,天津 300350)

[摘要] 依托某地铁车站基坑开挖工程,通过数值模拟方法,对富水地层地铁车站基坑降水开挖变形及影响因素进行研究,分析基坑竖向位移变化及地层渗透系数和围护结构厚度对基坑变形的影响,并给出基坑变形控制措施。研究表明,地表竖向和水平位移及围护结构水平位移均随着砂卵石土层渗透系数的增大而增大,而基坑底部隆起逐渐减小;地表竖向和水平位移、围护结构水平位移及基坑底部隆起均随着围护结构厚度的增大而减小。对于渗透系数大的地层,须采取措施减小基坑变形,可适当增大围护结构厚度以控制基坑底部隆起。

[关键词] 地铁;车站;基坑;围护结构;变形;渗透系数

[中图分类号] TU46

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2024)21-0103-06

Research on Deformation and Control Measures of Dewatering Excavation in the Subway Station Foundation Excavation in Water-rich Stratum

LIU Shuai

(China Railway 18th Bureau Group Municipal Engineering Co., Ltd., Tianjin 300350, China)

Abstract: Based on the excavation project of a subway station foundation excavation numerical simulation methods were used to study the deformation and influencing factors of dewatering excavation of a subway station foundation excavation in water-rich stratum. The vertical displacement changes of the foundation excavation, the permeability coefficients, and the thickness of enclosure structures were analyzed, and control measures for foundation excavation deformation were proposed. The research results show that the vertical and horizontal displacement of the ground surface and the horizontal displacement of the enclosure structure both increase with the increase of the permeability coefficient of the sand and gravel soil layer, while the uplift at the bottom of the foundation excavation gradually decreases. The vertical and horizontal displacement of the ground surface, the horizontal displacement of the enclosure structure, and the uplift at the bottom of the foundation excavation all decrease with the increase of the thickness of enclosure structures. For strata with high permeability coefficient, measures should be taken to reduce the deformation of the foundation excavation, and the thickness of the enclosure structure can be appropriately increased to control the uplift at the bottom of the foundation excavation.

Keywords: subway; station; foundation excavation; enclosure structure; deformation; permeability coefficient

0 引言

我国西南地区砂卵石地层分布广泛,该地层含水量高,渗透性好,但自稳能力差,如果在该地层进行建筑基坑施工,对基坑变形控制提出了更高要求。为探求富水砂卵石地层建筑工程基坑开挖变

形规律,已有学者进行了多方面研究,如何华飞等^[1]以北京城市副中心交通枢纽深基坑为研究背景,采用数值模拟方法,分析了基坑开挖与不同降水方案对钢管柱竖向变形的影响;刘怀宇^[2]研究了基坑底板施作后降水渗流对基坑变形的影响规律,研究表明,降水深度对基坑顶部沉降影响显著,降水至基坑底部时导致的基坑沉降较不降水时增加了55%;朱宇^[3]对基于变形控制的基坑开挖与

邻近运营铁路相互影响进行了分析,结果表明,基坑右侧围护结构水平位移明显大于左侧,其变形特征呈内凸型,且越靠近铁路路基位移越大;邓晨^[4]对深基坑降水方案设计及沉降规律进行了研究,结果表明,基坑沉降具有明显收敛趋势,且最终沉降预测值为 18.34~21.25mm,在变形控制值范围内;黄帅^[5]对基于数值模拟的超深基坑降水技术及变形进行了研究,结果表明,由降水引起的地表沉降在总沉降中的占比最高达 51.69%,且最大占比沉降出现在距基坑边缘 55m 处。以上学者对基坑开挖与邻近运营铁路相互影响进行了研究,对基坑降水沉降规律进行了分析。

为考虑不同因素对基坑降水开挖的影响^[6-7],本文依托实际工程,通过数值模拟方法,对富水地层地铁站基坑降水开挖变形及影响因素进行了研究。

1 工程概况

某地铁车站为地下 3 跨双柱 2 层岛式车站,东、西端分别为盾构始发井和接收井,车站顶板中心埋深 4.8m,车站底板位于富水砂卵石地层。车站基坑开挖总长度为 228.6m,中间区域标准段深度为 32.4m、宽度为 23.4m,两端基坑最大深度为 36m、最大宽度为 29.6m。由于基坑开挖深度大,附近建筑物多,因此在开挖过程中需对基坑进行支护,车站标准段支护采用灌注桩,直径为 1.3m,间距为 1.8m,长度为 40m,桩体嵌入基岩深度为 7.6m,整个基坑剖面水平支护设置了 5 道支撑。基坑开挖过程中,为避免过度降水导致地面沉降,采用坑内明排的方法进行降水。

2 数值模型建立

本研究采用 COMSOL Multiphysics 软件建立数值模型进行模拟计算,根据现场情况,设置基坑总长度为 230m、深度为 36m,标准段长度为 181m、宽度为 23.4m,车站两端长度均为 24.5m、宽度均为 29.6m。为避免出现边界效应,设置模型长度为 510m、宽度为 308m、深度为 62m,建立的模型如图 1 所示。

根据基坑开挖区地质勘测报告,地表人工填土厚度为 3.2m,人工填土向下依次为稍密砂卵石土层、中密砂卵石土层、密实砂卵石土层及泥岩层,厚度依次为 11.5,7.1,14.5,25.7m。设置岩土体、基坑支护结构为连续、各向同性材料,基坑支护结构包括围护桩和钢支撑,岩土体采用遵循莫尔-库仑准则的弹塑性材料模拟,车站结构采用理想弹性材料模拟,各材料物理力学参数如表 1 所示。

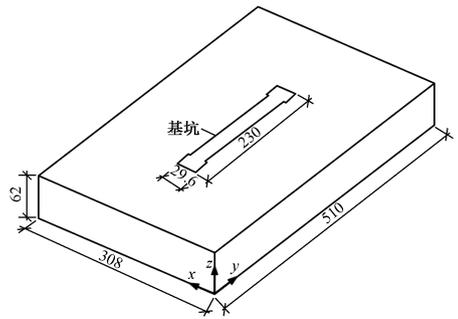


图 1 数值模型(单位:m)

Fig. 1 Numerical model (unit: m)

表 1 材料物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of materials

土层与结构名称	容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	渗透系数/ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	孔隙比
人工填土	19.6	6.5	0.41	11.2	12	3.40	0.50
稍密砂卵石土	20.4	26.4	0.32	1.2	32	29.40	0.43
中密砂卵石土	21.3	38.2	0.30	1.2	37	24.80	0.32
密实砂卵石土	22.6	58.3	0.27	1.2	39	22.30	0.29
泥岩	26.2	362.5	0.27	282.0	26	0.64	0.05
围护桩	26.4	3.2×10^4	0.22	—	—	—	—
钢支撑	78.6	2.2×10^5	0.32	—	—	—	—

建模过程中,设置模型四周为定水头边界,水平方向(x 向)和垂直方向(y 向)为固定约束,竖直方向(z 向)为自由加载,设置模型顶面为零流量边界,在任意方向均为自由加载,设置模型底部为零流量边界,在任意方向均为固定约束。边界设置完成后对模型进行网格划分,采用 C3D8R 实体单元对模型进行有限元离散,将该模型划分为 57 690 个域单元、27 684 个边界单元。

3 数值模拟步骤与参数设置

在基坑开挖过程中,由于含水砂卵石土层厚度大,围护结构最深处位于砂卵石中,因此采用坑外降水开挖的方式进行施工。设置初始地下水位为 3.600m,地下水预降至地表以下 13.8m 后进行开挖,按开挖深度 3.6,12,20.2,22,29.8,36m 确定数值模拟步骤,开挖的同时进行坑外降水。

为研究不同砂卵石土层渗透系数和围护结构厚度对基坑变形的影响,设置砂卵石土层渗透系数分别为 14.7,29.4,58.8,88.2,117.6m/d,设置围护结构厚度分别为 1.1,1.3,1.5,1.7,1.9m。

4 基坑竖向位移变化规律

选取 1/2 模型研究开挖过程中基坑及周围土体

竖向位移,如图2所示。由图2可知,随着开挖深度的增大,基坑表面土体沉降逐渐增大,且沉降范围也逐渐增大;基坑长边范围土体沉降大于短边;在基坑底部开挖面,周围土体在开挖作用下呈隆起趋势,基坑开挖深度越大,隆起量越大。

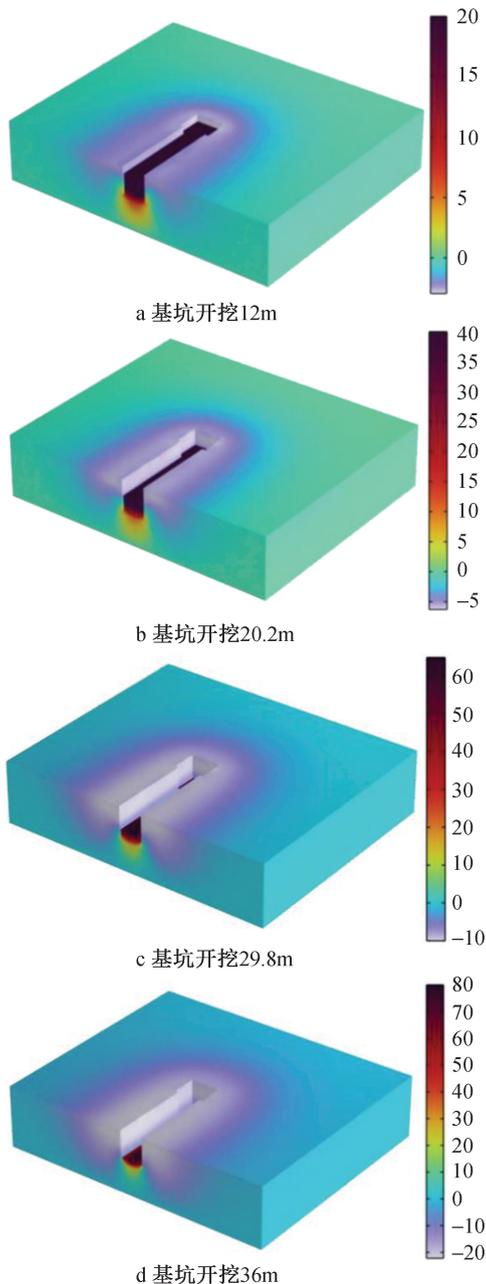


图2 基坑及周围土体竖向位移云图(单位:mm)

Fig. 2 Vertical displacement cloud map of foundation excavation and surrounding soil (unit: mm)

5 不同因素对地表、基坑与围护结构位移的影响

5.1 渗透系数

1) 地表竖向位移

保持其他参数不变,不同砂卵石土层渗透系数下地表竖向位移如图3所示。由图3可知,随着砂

卵石土层渗透系数的增大,地表竖向位移逐渐增大,最大竖向位移位于距基坑边缘10~13m处。随着距基坑边缘距离的增大,地表竖向位移先增大后减小,当距基坑边缘距离>120m时,地表竖向位移逐渐稳定并趋于0。随着砂卵石土层渗透系数的增大,地表最大竖向位移分别为15.91,20.00,33.25,51.62,69.16mm。在距基坑边缘距离<50m区域,地表竖向位移变化幅度较大,受基坑开挖的影响也较大,因此实际基坑开挖过程中,对该区域应重点关注。

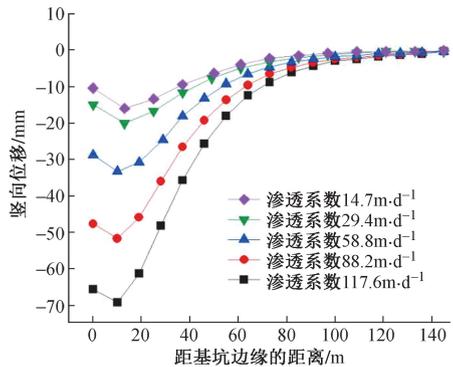


图3 不同渗透系数下地表竖向位移

Fig. 3 Ground surface vertical displacement under different permeability coefficients

2) 地表水平位移

保持其他参数不变,不同砂卵石土层渗透系数下地表水平位移如图4所示。由图4可知,随着砂卵石土层渗透系数的增大,地表水平位移逐渐增大,最大水平位移位于距基坑边缘28~31m处。随着距基坑边缘距离的增大,地表水平位移先增大后减小最终趋于稳定。随着砂卵石土层渗透系数的增大,地表最大水平位移分别为13.85,16.08,23.81,33.22,43.53mm。在距基坑边缘20~50m区域,地表水平位移变化幅度较大,基坑变形也较大。

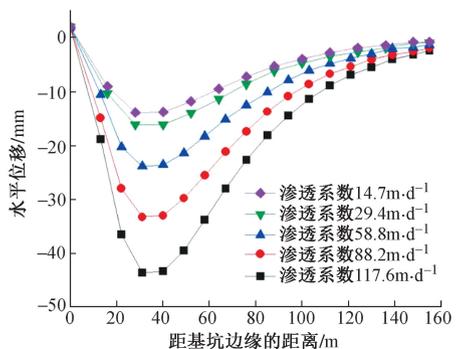


图4 不同渗透系数下地表水平位移

Fig. 4 Ground surface horizontal displacement under different permeability coefficients

3) 基坑竖向位移

保持其他参数不变,不同砂卵石土层渗透系数下基坑竖向位移如图 5 所示。由图 5 可知,在基坑开挖过程中,基坑底部土体表现为隆起状态。随着砂卵石土层渗透系数的增大,基坑底部隆起逐渐减小,基坑中心区域底部隆起最大。随着砂卵石土层渗透系数的增大,基坑中心区域底部隆起分别为 82.89, 81.52, 76.52, 70.4, 63.9mm。随着基坑中心至边缘距离的增大,基坑底部隆起逐渐减小,相对于基坑边缘,基坑中心区域受渗流的影响较大,且渗流作用的增大可抑制基坑底部的隆起。

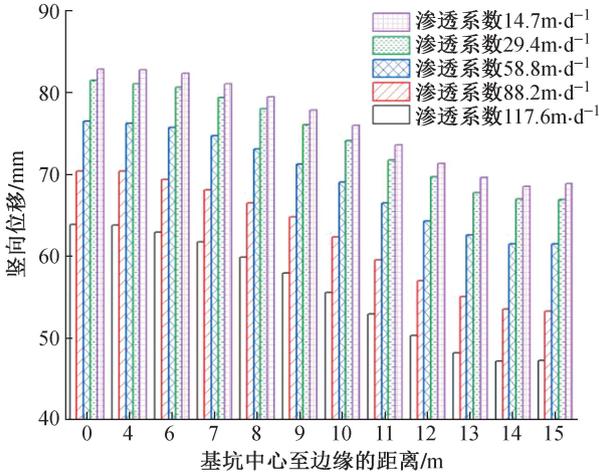


图 5 不同渗透系数下基坑竖向位移

Fig. 5 Foundation excavation vertical displacement under different permeability coefficients

4) 围护结构水平位移

保持其他参数不变,不同砂卵石土层渗透系数下围护结构水平位移如图 6 所示。由图 6 可知,随着砂卵石土层渗透系数的增大,围护结构水平位移基本逐渐增大。随着围护结构施工深度的增大,围护结构水平位移先增大后减小,最大水平位移位于 24.8~25m 深度处。随着砂卵石土层渗透系数的增大,围护结构最大水平位移分别为 18.39, 19.53, 20.6, 21.65, 22.67mm。

5.2 围护结构厚度

1) 地表竖向位移

保持其他参数不变,不同围护结构厚度下地表竖向位移如图 7 所示。由图 7 可知,随着围护结构厚度的增大,地表最大竖向位移逐渐减小,分别为 17.75, 16.90, 15.83, 15.77, 15.42mm。当围护结构厚度 < 1.5m 时,地表最大竖向位移变化幅度较大;当围护结构厚度 > 1.5m 时,地表最大竖向位移变化幅度减小。随着距基坑边缘距离的增大,地表竖向位移先增大后减小最终趋于稳定,在距基坑边缘

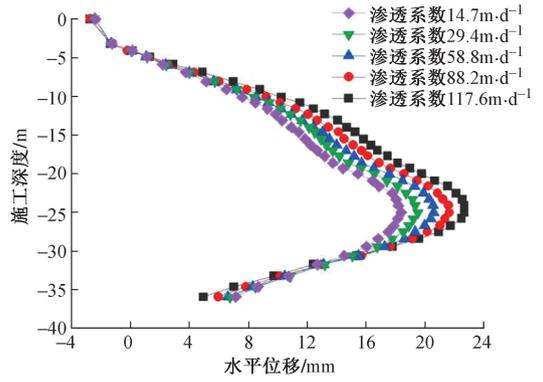


图 6 不同渗透系数下围护结构水平位移

Fig. 6 Enclosure structure horizontal displacement under different permeability coefficients

16~17m 处地表竖向位移最大,距基坑边缘距离 > 120m 时地表竖向位移趋于 0。不同围护结构厚度下地表竖向位移差异较小,这表明围护结构厚度对地表沉降的影响较小,降水为地表沉降的主要原因。

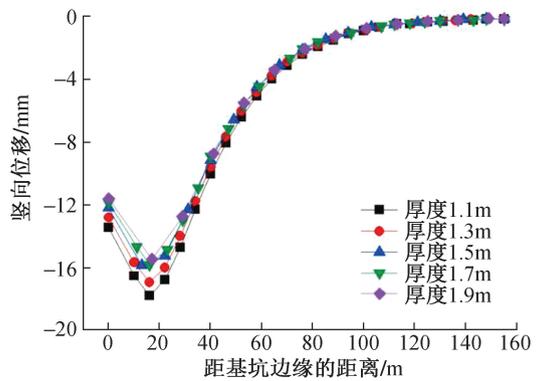


图 7 不同围护结构厚度下地表竖向位移

Fig. 7 Ground surface vertical displacement under different thicknesses of enclosure structures

2) 地表水平位移

保持其他参数不变,不同围护结构厚度下地表水平位移如图 8 所示。由图 8 可知,随着围护结构厚度的增大,地表最大水平位移逐渐减小。随着距基坑边缘距离的增大,地表水平位移先增大后减小。随着围护结构厚度的增大,地表最大水平位移分别为 15.91, 15.53, 14.47, 14.05, 13.6mm,出现在距基坑边缘 38m 区域。

3) 基坑竖向位移

保持其他参数不变,不同围护结构厚度下基坑竖向位移如图 9 所示。由图 9 可知,基坑开挖过程中底部整体呈隆起状态。随着围护结构厚度的增大,基坑底部隆起逐渐减小。随着基坑中心至边缘距离的增大,基坑底部隆起逐渐减小并趋于稳定。当基坑中心至边缘距离 < 6.5m 时,基坑底部隆起减

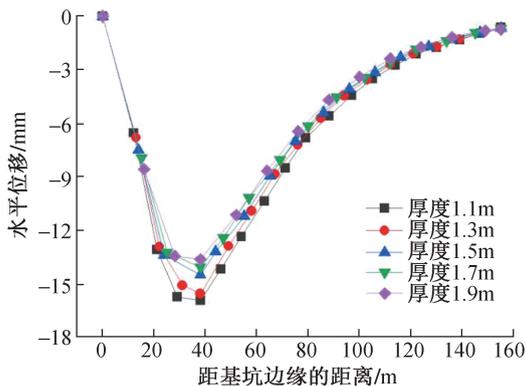


图 8 不同围护结构厚度下地表水平位移

Fig. 8 Ground surface horizontal displacement under different thicknesses of enclosure structures

小缓慢;当基坑中心至边缘距离 $>6.5\text{m}$ 时,基坑底部隆起快速减小,减幅较大。随着围护结构厚度的增大,基坑底部最大隆起逐渐减小,分别为 $88.54, 82.72, 78.67, 75.36, 72.92\text{mm}$,出现在基坑中心处。

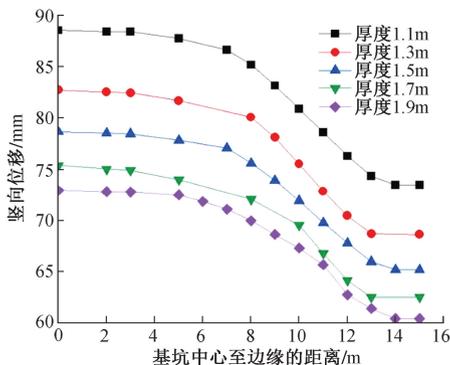


图 9 不同围护结构厚度下基坑竖向位移

Fig. 9 Foundation excavation vertical displacement under different thicknesses of enclosure structures

4) 围护结构水平位移

保持其他参数不变,不同围护结构厚度下围护结构水平位移如图 10 所示。由图 10 可知,随着围护结构厚度的增大,围护结构水平位移逐渐减小。随着围护结构施工深度的增大,围护结构水平位移先增大后减小。随着围护结构厚度的增大,围护结构最大水平位移逐渐减小,分别为 $23.7, 18.98, 14.52, 12.71, 11.28\text{mm}$,出现在 $24.2\sim 24.8\text{m}$ 深度处。当围护结构厚度增至一定程度,围护结构水平位移减幅降低。

6 基坑变形控制措施

1)合理的围护结构设计是防止变形的基础,根据工程与水文地质条件、周边环境及基坑深度等因素,选择适宜的围护结构是保障结构安全和效能的前提,常见的围护结构包括钢支撑、深层土钉墙、地

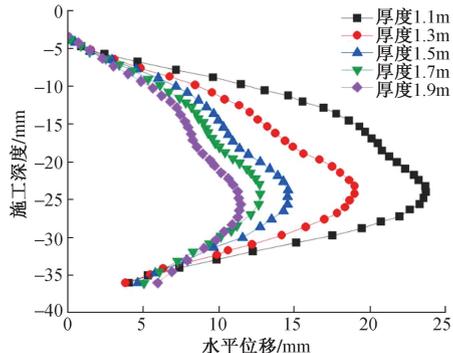


图 10 不同围护结构厚度下围护结构水平位移

Fig. 10 Enclosure structure horizontal displacement under different thicknesses of enclosure structures

下连续墙、深层搅拌墙、组合结构等。同时,合理设计围护结构截面尺寸和插入比及支撑系统是保证变形得到有效控制的关键。

2)加固基坑周边土体,防止土体失稳导致变形。对基坑影响范围内的建筑物进行预埋袖阀管跟踪注浆加固,以使被加固土体在平面和深度范围内连成整体。适当加强桩基、混凝土支撑等,及时设置临时钢支撑,避免结构受力过大或土体变形过大。基坑开挖面侧壁及时挂网锚喷,锚喷厚度及强度符合设计要求。

3)基坑暴露时间应尽可能短,合理安排施工顺序和时序,确保每个开挖和支撑过程均可在最短时间内完成,从而最大程度地减少土体暴露的机会。在基坑开挖过程中应及时进行底板浇筑,以稳定土体并减少变形。施工工序的合理安排也是防止变形的重要环节,可通过加密竖向支撑道数或减小水平间距提高结构稳定性。开挖接近坑底时,应提高支撑刚度,以防止上部土体自重及施工荷载对已完成部分造成影响。

4)基坑降水的合理控制也是防止变形的重要措施。基坑开挖前的降水工作需充分考虑周边建筑物和地下设施安全及基坑自身的稳定性。通过合理的降水计划,减小水压力对土体的影响,避免由于地下水位变化导致的土体不均匀沉降,这对于控制基坑变形至关重要。

5)如果基坑周边地面荷载不对称,可根据实际情况对部分区域进行人工堆载,有利于控制基坑围护结构整体变形。严格杜绝超挖,避免造成基坑整体失稳。

6)控制挖土速度与开挖宽度,开挖时遵循分层、分块原则,条件允许的情况下尽量对称开挖。

7 结语

1)随着开挖深度的增大,基坑表面土体沉降逐

渐增大,基坑底部隆起增大。

2)随着砂卵石土层渗透系数的增大,地表竖向和水平位移及围护结构水平位移均逐渐增大,而基坑底部隆起逐渐减小。相对于基坑边缘,基坑中心区域受渗流的影响较大,渗流作用的增大可抑制基坑底部的隆起。

3)随着围护结构厚度的增大,地表竖向和水平位移、围护结构水平位移及基坑底部隆起均逐渐减小。基坑中心区域底部隆起最大,围护结构厚度增大可有效控制基坑底部隆起,并减小围护结构水平位移,但当围护结构厚度增至一定程度时,围护结构水平位移减幅降低。

4)实际基坑开挖过程中,建议重点关注地层渗透系数,对于渗透系数大的地层,应采取措施减小基坑变形,在考虑施工成本的前提下,适当增大围护结构厚度,可控制基坑底部隆起,减小围护结构水平位移。

参考文献:

[1] 何华飞,王富强,郭飞,等. 多层承压水地层盖挖基坑钢管柱竖向变形和对结构影响的研究[J]. 市政技术,2024,42(5): 63-68.

HE H F, WANG F Q, GUO F, et al. Study on vertical deformation of steel pipe columns in multi-story pressure water ground cover excavation and its impact on structures [J]. Journal of municipal technology, 2024, 42 (5): 63-68.

[2] 刘怀宇. 基坑底板施作后降水渗流对基坑变形影响规律[J]. 市政技术,2024,42(5):123-128.

LIU H Y. Influence law of precipitation seepage on deformation after construction of foundation excavation bottom plate [J]. Journal of municipal technology, 2024, 42 (5): 123-128.

[3] 朱宇. 基于变形控制的基坑开挖与邻近运营铁路相互影响分析[J]. 甘肃科学学报,2024,36(2):110-116.

ZHU Y. Analysis of mutual influence between excavation for foundation excavation and adjacent operating railways based on deformation control [J]. Journal of Gansu sciences, 2024, 36 (2): 110-116.

[4] 邓晨. 深基坑降水方案设计及其沉降变形规律分析[J]. 江西建材,2024(3):139-141.

DENG C. Design of deep foundation excavation dewatering scheme and analysis of settlement deformation law [J]. Jiangxi building materials, 2024 (3): 139-141.

[5] 黄帅. 基于数值模拟的超深基坑降水技术及变形研究[J]. 地下水,2024,46(2):47-49.

HUANG S. Research on dewatering technology and deformation of ultra-deep foundation excavation based on numerical simulation [J]. Ground water, 2024, 46 (2): 47-49.

[6] 马玉飞,刘焕玉,熊辉,等. 深基坑开挖降水对周边环境的影响分析[J]. 水利技术监督,2022(7): 250-255.

MA Y F, LIU H Y, XIONG H, et al. Analysis of the impact of deep foundation pit excavation and dewatering on the surrounding environment[J]. Technical supervision in water resources, 2022 (7): 250-255.

[7] 雷华. 不同初始水头下基坑降水对开挖影响研究[J]. 低温建筑技术,2018,40(3):150-152,157.

LEI H. Study on influence of foundation pit dewatering on excavation under different initial water head[J]. Low temperature architecture technology,2018,40(3):150-152,157.

(上接第45页)

[6] 房凯,张忠苗,刘兴旺,等. 工程废弃泥浆污染及其防治措施研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(S2):238-241.

FANG K, ZHANG Z M, LIU X W, et al. Pollution of construction waste slurry and prevention measures[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2011, 33(S2):238-241.

[7] 吕林海,谢开仲,王炳华,等. 基于正交设计试验的地铁施工废弃泥浆分离影响因素研究[J]. 施工技术,2022,51(4): 123-127.

LÜ L H, XIE K Z, WANG B H, et al. Research on influencing factors of subway construction waste slurry separation based on orthogonal design test [J]. Construction technology, 2022, 51 (4):123-127.

[8] 杨爱武,王韬,许再良. 石灰及其外加剂固化天津滨海软土的试验研究[J]. 工程地质学报,2015,23(5):996-1004.

YANG A W, WANG T, XU Z L. Experimental study on lime

and its additional agent to cure Tianjin marine soft soil [J]. Journal of engineering geology, 2015, 23(5):996-1004.

[9] 赵玉波,代跃强,卢守龙,等. 狭小场地条件下深基坑建筑废弃泥浆固化回填施工技术[J]. 施工技术,2023,52(10): 95-98.

ZHAO Y B, DAI Y Q, LU S L, et al. Construction technology for curing backfill of construction waste mud in deep foundation excavation under narrow site conditions [J]. Construction technology, 2023, 52(10):95-98.

[10] 王峻,李海涛,吴东阳,等. 泥水盾构废弃泥浆无害化处理技术及资源化处置分析[J]. 施工技术,2023,52(23): 27-35.

WANG J, LI H T, WU D Y, et al. Analysis on zero discharge treatment technology and resource disposal of waste slurry [J]. Construction technology, 2023, 52(23):27-35.