

管廊深基坑不同降水工况对周边环境的影响分析

Analysis of the Influence of Different Dewatering Conditions on the Surrounding Environment

贺 晓, 郑会桓

(北京京投城市管廊投资有限公司, 北京 100027)

摘要: 为探究管廊深基坑对周围环境的影响, 基于 Midas GTS NX 有限元软件, 结合综合管廊基坑工程实例, 建立分步降水开挖和一次性降水开挖工况下的数值模型, 研究不同工况下基坑降水开挖对周边环境的影响, 对渗流场、基坑周边地表沉降和既有构筑物的变形进行分析。结果表明: 分步降水较一次性降水方式, 土层渗流速度明显下降; 基坑周边地表沉降近似呈“勺形”分布, 沉降值符合变形要求; 既有地铁隧道靠近基坑一侧水平位移和顶部竖向位移较大, 且竖向位移总体大于水平位移; 分步降水工况下基坑降水开挖对周边环境影响较一次性降水小, 建议在进行基坑降水开挖时, 尽量选择分步降水, 以减少对周边环境的影响, 可对类似工程提供参考。

关键词: 基坑降水; 降水工况; 渗流场; 周边沉降; 地铁隧道变形

中图分类号: TU473 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2025) 02-0074-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.02.013

HE Xiao, ZHENG Huihuan

(Beijing Jingtou Urban Utility Tunnel Investment Co., Ltd., Beijing 100027, China)

Abstract: To investigate the impact of deep foundation pits for pipe galleries on the surrounding environment, based on the Midas GTS NX finite element program, combined with a comprehensive pipe gallery foundation pit engineering example, the numerical model under the condition of step precipitation excavation and one-time precipitation excavation is established, and the influence of foundation pit precipitation excavation on the surrounding environment under different working conditions is studied, the sewerage field, the surface settlement around the foundation pit and the deformation of the existing subway tunnel are analyzed. The results show that compared to one-time water application, the infiltration rate of soil exhibits a significant decreasing trend under stepwise water application; The ground settlement around the approximate distribution is "spoon", settlement values conform to the requirements of the deformation; Near the existing subway tunnel excavation side top horizontal displacement and vertical settlement deformation, overall is greater than the horizontal displacement and vertical settlement; Under the condition of step-by-step precipitation, the impact of foundation pit precipitation excavation on the surrounding environment is smaller than that of one-time precipitation. it is recommended to choose step-by-step precipitation when conducting foundation pit precipitation excavation, so as to reduce the impact on the surrounding environment.

Key words: foundation pit precipitation; precipitation conditions; seepage field; peripheral settlement; deformation of subway tunnels

0 引言

城市地下综合管廊工程是指将各类管线分类存放管理,以减少管线的破坏,减少路面的开挖次数,达到经济环保目的的基础设施。其在现代城市运营中发挥着不可替代的作用,为城市的正常运行提供必要保障。在大中型城市中地下管廊普遍存在年久失修的情况,因此导致地面塌陷事故频发,以及在维修过程中,反复开挖地面,严重影响居民日常生活。因此,地下空间开发及综合利用成为城市建设的新的发展方向。由于地层水的复杂多样性,所以在综合管廊基坑开挖过程中降水必不可少。有大量学者对基坑工程的降水问题进行了研究,任壮等^[1]研究了基坑降水开挖过程中土体的变形规律及渗流特性;厉立兵等^[2]提出了一种计算基坑降水影响半径的有限单元法,该方法可有效提高基坑降水涌水量的计算精度;徐帮树等^[3]研究了高压摆喷止水帷幕、基坑管井降水、坑外回灌等不同降水工况下,对基坑周边地下水水位的影响;刘均红等^[4]、郭晓炜等^[5]研究了基坑降水的方法并具体就不同降水方法进行了分析;孙焱^[6]通过工程实例研究了止水帷幕在深基坑支护及降水中的作用;陈凌铜等^[7]采用 HSS 模型模拟隔断式基坑降水,隔水帷幕在控制地表沉积物和由基坑降水引起的相邻管道变形方面具有显著优势;江杰等^[8]在广西南宁地铁 5 号线广西大学站的基坑项目中,使用 Abaqus 有限元软件建立了三维流固耦合数值模型,分析和验证了降水引起的周边地表沉降量随着地下连续壁泄漏缺陷的大小和降水深度而增加;高旭等^[9]以武汉长江航运中心深基坑为实例,用概化其水文地质模型得到降水效果;张军等^[10]基坑降水开挖相对于不降水开挖,地连墙墙体的环向应力、竖向弯矩、侧向位移均增大,增加地连墙的墙体厚度可一定程度上提高地连墙的自稳稳定性;马玉飞等^[11]研究表明在基坑降水前,设置封闭式止水帷幕,可以有效降低降水对周边环境的影响;魏嵩琦^[12]、周勇等^[13]使用 Adina 有限元软件,建立的 1/2 基础坑的三维有限元模型,通过对深基坑开挖降水的分析,总结了周围土壤的孔隙水压和地下管道的规律,表明深基坑开挖对周围地下管道有重要影响;朱大鹏等^[14]基于工程实例,分析了同时考虑开挖和降水前后土体自重应力变化、渗流动水压力引起的有效应力变

化以及止水帷幕对土体沉降约束作用时,基坑外侧土体沉降机理;李曙光等^[15]以苏州市轨道交通 S1 线帆路站深基坑项目为例,通过 Midas GTS/NX 数值模拟研究表明,分步降水对工程开挖工况下的地下连续墙的水平位移和周围地表沉降均比一次性降水造成的影响小。

以上研究对降水工况的分析普遍存在单一化,对周边环境响应的多因素耦合分析不足,缺乏全生命周期视角的环境影响评估,存在风险评估盲区,导致渗漏风险防控策略缺乏针对性、经济性和安全性,难以实现监测-预警-调整一体化管理,因此,基于 Midas GTS NX 有限元软件的数值模拟,对不同降水工况下基坑开挖对周边环境的影响进行分析,以期为富水地层基坑降水工程提供更科学的决策支持。

1 工程概况

北京轨道交通 3 号线一期地下综合管廊(东坝大街段)起点位于阜阳东街与东坝大街相交路口,沿东坝大街敷设至北小河东岸,途经轨道交通 3 号线东风站。管廊位于东坝大街南侧,长度约 1.9 km。其中里程 GLK0+020~GLK0+415.1 采用明挖法施工,管廊位于 3 号线地铁盾构区间上方。鉴于该综合管廊的工程比较复杂,因此取该管廊的一段进行数值模拟,分别设置一次性降水条件下基坑降水开挖和分步降水开挖两种工况,通过对比分析不同工况下周边土体渗流场、地表沉降、地铁隧道的变形等关键指标,定量判断不同降水开挖方式对周边环境的影响程度,以期为工程设计与施工提供科学、可靠的理论依据,助力现场作业安全、高效开展,切实保障工程质量与周边环境安全。

该段地形总体比较平坦,地形起伏不大,工程范围内土层划分为人工堆积层及第四纪沉积层两大类及其亚层,在人工堆积层以下为第四纪沉积层,岩性主要以黏性土、粉质黏土与砂土互层为主。

拟建场地存在四层地下水,各层地下水水位情况及类型见表 1。

表 1 地下水水位量测情况

Table 1 Measurement of groundwater level		
地下水类型	水位/水头埋深/m	水位/水头标高/m
潜水(二)	2.60	27.36
层间水(三)	6.79~7.10	18.83~22.86
层间水(四)	16.39~18.00	9.23~11.96
层间水(五)	24.39~27.00	1.23~2.96

岩土力学

2 数值模拟

2.1 数值模型建立

采用 Midas GTS NX 有限元软件建立数值模型, 如图 1 所示, 模型尺寸为 56 m × 49 m × 26 m。土体采用 3D 实体单元、围护桩 (转换成地连墙) 用板单元、隧道衬砌用板单元、冠梁及内支撑采用 1D 梁单元进行模拟, 并用节点水头模拟基坑降水, 界面单元充当止水帷幕。模型各部分的具体参数见表 2、表 3。

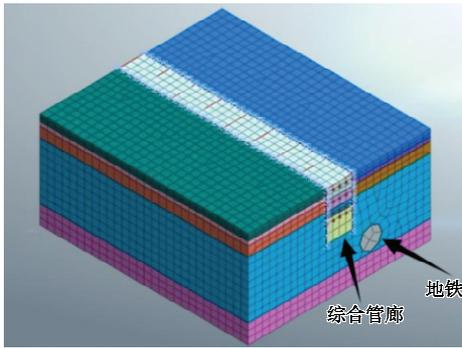


图 1 模型图

Fig. 1 Model diagram

表 2 基坑土体物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of foundation pit soil

地层名称	层厚 /m	变形模量/MPa	重度 / (kN · m ⁻³)	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角/(°)
1-2 杂填土	1.8	4.21	18.0	0.28	13	10
3-1 粉质黏土	1.1	6.50	19.0	0.25	14	6
10-1 黏土	2.7	9.00	17.9	0.35	23	10
10-2 黏土	15.4	9.50	18.7	0.35	30	16
中风化石灰岩	5.0	126.00	24.0	0.30	66	15

表 3 基坑支护结构参数

Table 3 Supporting structure parameters of foundation pit

结构名称	结构尺寸	弹性模量/MPa	重度 / (kN · m ⁻³)	泊松比
水泥土搅拌桩	0.613 m	1 000	20	0.3
C30 混凝土冠梁	1.2 m × 0.8 m	30 000	25	0.2
钢筋混凝土撑	0.8 m × 0.8 m	30 000	25	0.2
地铁隧道衬砌	0.3 m	30 000	20	0.3

2.2 不同施工工况

采用节点水头模拟基坑的降水水位 (不考虑降水井的位置和降水速率), 分别进行分步降水和一次性降水。分步降水以 1 m 为水位梯度逐级降低地下水位, 由初始标高 -2.0 m 分 4 次降至坑底设计标高 -6.0 m; 一次性降水将地下水位由 -2.0 m 直接骤降至 -6.0 m, 研究不同降水工况下基坑降水开挖对周边环境的影响, 具体施工步骤见表 4。由于基坑临

近既有地铁隧道, 所以在进行基坑开挖时应特别关注地铁隧道的变形情况, 在基坑降水后要降水变形分析, 通过建立渗流场与应力场动态耦合模型, 评估地下水位变化对隧道稳定性的影响。

表 4 基坑降水开挖施工步骤

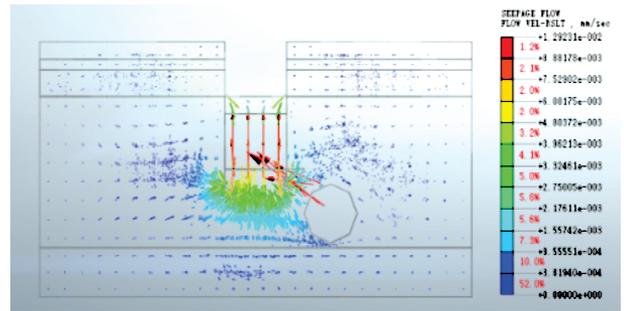
Table 4 Construction steps of dewatering excavation of foundation pit

基坑分步降水	基坑一次性降水
1 初始渗流场分析	1 初始渗流场分析
2 初始应力场分析	2 初始应力场分析
3 地连墙施工	3 地连墙施工
4 第一次降水	4 降水
5 第一次降水变形分析	5 降水变形分析
6 第一次基坑开挖	6 第一次基坑开挖
重复第 4 到第 6 步骤	重复第 6 步骤

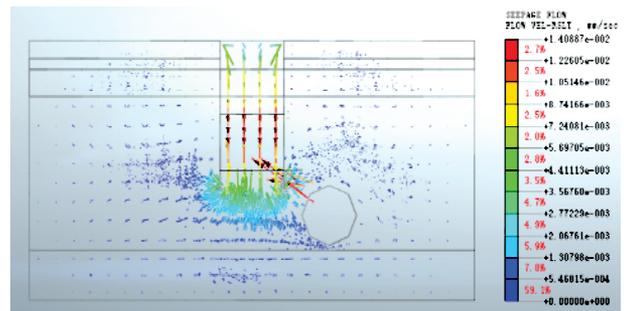
3 模拟结果分析

3.1 渗流场分析

图 2 为基坑分步降水和一次性降水条件下, 水位降至基坑底部 1 m 以下位置时土层渗流速度变化情况。渗流速度矢量在靠近基坑处分布密集, 在基坑底部附近分布最密集, 分步降水时最大流速为 0.012 mm/s, 一次性降水时最大流速 0.014 mm/s。分析表明, 分步降水通过阶梯式水位调控有效缓解



(a) 分步降水



(b) 一次性降水

图 2 降水流速图

Fig. 2 Precipitation velocity diagram

水力梯度突变，而一次性降水为平衡水位差，基坑外部的地下水大量快速涌入基坑内部，水流速度加快，渗流路径减少，对渗流场产生较大的影响，所以在进行基坑降水开挖时，要尽量选择分步降水方式。

3.2 周边地表沉降

基坑开挖降水过程中，基坑内外产生的水头差，会导致基坑周围的地下水向基坑内部移动，使基坑周边一定范围内的地面出现沉降，为研究不同基坑降水工况对周边地表沉降的影响，取不同降水工况条件下垂直于基坑边缘处的点（从基坑边缘起每隔 1 m 设置）对基坑的周边地表沉降进行分析，如图 3 所示。

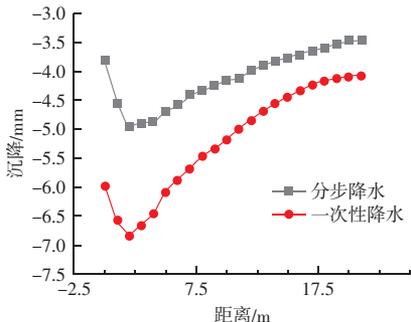


图 3 基坑周边地表沉降图

Fig. 3 Surface settlement around the foundation pit

不同降水工况下，基坑周边地表监测点的沉降值都随着远离基坑边缘方向先急剧增加后逐渐减小并趋于稳定，最大沉降均在距基坑边缘 3 m 左右，变化趋势基本相同，大致呈“勺形”分布。分步降水时，周边最大地表沉降值约为 4.9 mm；一次性降水时，周边最大地表沉降值约为 6.8 mm，最大沉降值均满足设计要求，即不超过 0.2% 基坑设计深度（14.7 mm），但相对来说一次降水比分步降水大了约 38.8% 左右，所以在实际施工过程中，在条件允许情况下要尽量采用分步降水，以减小基坑周边地表沉降，保证基坑的稳定性。同时，由于止水帷幕的存在，使地下水的渗流通道增加，基坑周边的地表沉降量也相应降低。

3.3 地铁隧道的变形分析

在基坑降水开挖过程中，随着基坑内部水位的降低和土体大量的移走，围护结构以外的地铁隧道在土压力和水压力的共同作用下会产生一定的变形，

现就其水平和垂直方向的位移变化进行分析。分别在地铁隧道靠近基坑一侧、远离基坑一侧以及其顶部、底部各取 3 个点进行分析，如图 4 所示，分别以 A、B、C、D 点为起始点，沿 X 轴负半轴方向，取距离为 14、28、42 m 的 3 个点，A 为靠近基坑一侧的点（A、B 点负值表示靠近基坑方向移动，C、D 点负值表示产生沉降）。不同降水工况下的变形如图 5 所示。

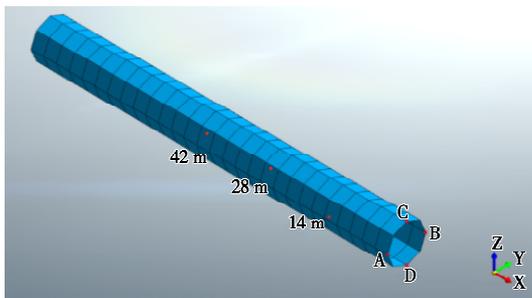
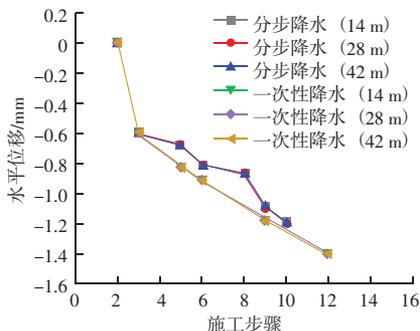


图 4 地铁隧道分析点位置图

Fig. 4 Location diagram of subway tunnel analysis points

由图 5 (a) 和 (b) 可以看出，分步降水和一次性降水条件下，地铁隧道的最大水平位移随着基坑的降水和开挖逐步增大，且靠近基坑一侧的位移变化量要大于远离基坑一侧，所以在基坑施工过程中要加大地铁隧道靠近基坑一侧的变形监测。由图 5 (b) 可看出，从基坑第二次开挖开始，地铁隧道向基坑方向移动，主要是由于随着基坑开挖深度的增加周围的土压力也随着增大，且靠近基坑一侧位移变化较大，使地铁隧道整体向基坑一侧移动。

由图 5 (c) 和 (d) 可以看出，分步降水和一次性降水条件下，随着基坑的降水开挖地铁隧道的沉降逐渐减小，其整体呈下沉趋势，但地铁隧道顶部沉降量要比底部沉降量大，主要是由于上部土体的重力作用，使其沉降增大。



(a) 靠近基坑一侧 (A 点)

岩土力学

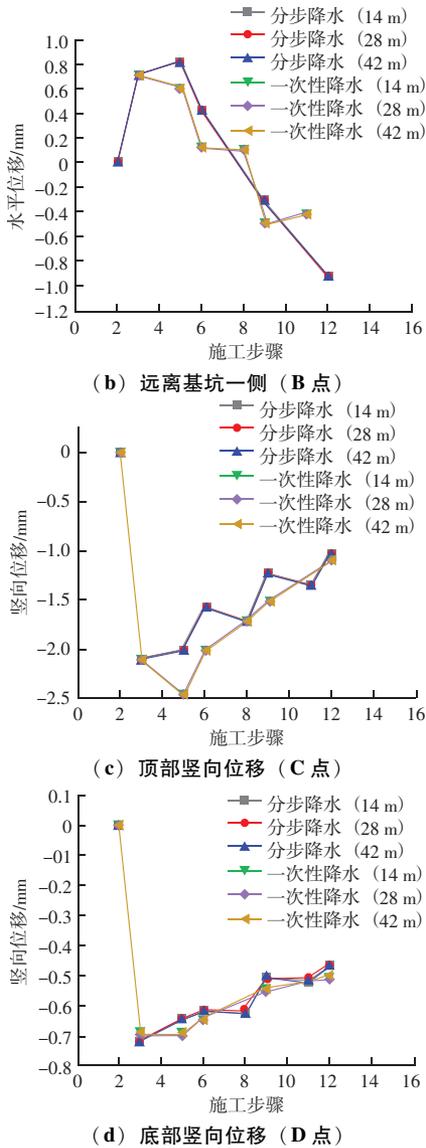


图5 地铁隧道变形分析

Fig. 5 Analysis of subway tunnel deformation

总体来说, 不论是分步降水还是一次性降水, 基坑在水平方向上的位移总体呈椭圆状变化, 主要是因为随着基坑的降水开挖, 基坑周边的土体会产生一定的变化, 会造成地铁隧道在上部土体的重力作用下有一定程度的压扁情况; 同时, 地铁隧道在竖直方向的沉降变化大于其在水平方向的位移变化。

一次性降水条件下地铁隧道的变形均较分步降水条件下大, 所以在进行基坑降水开挖时, 在条件允许的情况下, 要尽量选择分步降水开挖, 以减少基坑降水开挖对周边环境的影响。与开挖阶段相比, 基坑降水阶段对隧道水平位移和竖向沉降的影响更大, 所以在基坑开挖降水时要选择合适的降水方式,

时刻注意周边既有构筑物的变形, 避免水平和竖向位移过大。

4 结论

通过 Midas GTS NX 有限元软件对不同降水工况下基坑开挖降水进行模拟, 分析渗流场、周边地表沉降和既有构筑物的变形, 得到以下主要结论:

(1) 渗流速度矢量在靠近基坑处分布密集, 分步降水通过阶梯式水位调控有效缓解水力梯度突变, 而一次性降水为平衡水位差, 基外部的地下水大量快速涌入基坑内部, 水流速度加快, 渗流路径减少, 对渗流场产生较大的影响。

(2) 在基坑开挖降水期间, 周围地面的沉降量呈现“勺状”分布, 并随距基坑边缘的距离增加而逐渐趋于稳定。

(3) 由于地铁隧道上部土体的重力作用, 基坑降水开挖对既有构筑物的竖向位移影响大于水平位移。

(4) 基坑降水步骤对周边环境的影响大于开挖步骤, 要注意选择合理的降水方式; 在一次性降水条件下基坑降水开挖对周边环境的影响要大于分步降水开挖, 所以在进行基坑降水时, 在条件允许的情况下尽量选择分步降水。

参 考 文 献

- [1] 任壮, 丁春林, 吴烁, 等. 富水软弱地层基坑开挖中的土体变形与渗流特性 [J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25 (8): 107-111.
- [2] 厉立兵, 侯兴民, 李远东. 一种基坑降水影响半径的有限元计算方法 [J]. 岩土力学, 2021, 42 (2): 574-580.
- [3] 徐帮树, 张芹, 李连祥, 等. 基坑工程降水方法及其优化分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9 (5): 1161-1165.
- [4] 刘均红, 张保圆, 冯超. 地铁车站深基坑坑内降水方案设计 [J]. 铁道勘察, 2009, 35 (1): 85-88.
- [5] 郭晓炜. 富水砂层地地铁深基坑降水设计方法研究 [J]. 工程建设与设计, 2020 (23): 37-39.
- [6] 孙焱. 止水帷幕在深基坑支护及降水中的应用分析 [J]. 产业创新研究, 2022 (4): 105-107.
- [7] 陈凌铜, 朱丹, 杨超, 等. 隔水帷幕对深基坑降水开挖变形控制的影响 [J]. 土木与环境工程学报 (中英文), 2021, 43 (4): 24-32.
- [8] 江杰, 杨杉楠, 胡盛斌, 等. 预降水过程中止水帷幕缺陷对基坑变形的影响 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2020, 45 (5): 996-1005.

(下转第 123 页)

- (16): 2507-2517.
- [15] CAO C Y, LIU M, WANG Q Y, et al. Reliability assessment under combinations of snow load effect: the lightweight steel structures with gabled frames and components designs [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 1799 (166-169).
- [16] TOGAN V, DURMAZ M, DALOLU A. Optimization of roof trusses under the snow loads given in turkish code and the gis - based snow load map [J]. *Engineering structures*, 2022 (11): 62.
- [17] 孙绪杰, 王凤来, 张厚, 等. 改变结构体系加固方法的应用 [J]. *建筑结构*, 2013, 43 (14): 87-89, 99.
- [18] 谢阳, 戴阳, 王永泉. 门式刚架钢结构厂房新型加固技术的应用 [J]. *江苏建筑*, 2019 (4): 57-60.
- [19] 赵更歧, 倪克, 王庆辉, 等. 粘钢加固门式刚架 Γ 型梁柱节点锚固方法研究 [J]. *工程抗震与加固改造*, 2021, 43 (2): 130-136.
- [20] 门式刚架轻型房屋钢结构技术规范: GB 51022—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [21] Eurocode 1 - Actions on structures - Part 1 - 3: general actions - Snow loads - National annex to NF EN 1991 - 1 - 3: 2004 - General actions - Snow loads: NF P06 - 113 - 1/NA/A1 - 2011 [S]. The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC.
- [22] 倪桂和. 基于荷载规范的轻钢结构雪致破坏原因研究 [D]. 广州: 广州大学, 2017.

(上接第 78 页)

- [9] 高旭, 郭建波, 晏鄂川. 考虑止水帷幕的深基坑降水预测解析计算 [J]. *岩土力学*, 2018, 39 (4): 1431-1439.
- [10] 张军, 冯佳蕊, 翟少磊. 洞庭湖大桥锚定基坑降水及对地连墙影响分析 [J]. *地下空间与工程学报*, 2018, 14 (增刊 1): 256-262.
- [11] 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.
- [12] 魏嵩琦. 兰州地铁车站深基坑开挖及降水对周边管道影响的数值分析研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
- [13] 周勇, 魏嵩琦, 朱彦鹏. 兰州地铁车站深基坑开挖过程中降水对邻近地下管道的影响 [J]. *岩土工程学报*, 2014, 36 (增刊 2): 495-499.
- [14] 朱大鹏, 谢昌建, 杨阳. 深基坑开挖及降水诱发邻近建筑物变形破坏机理及影响因素 [J]. *科学技术与工程*, 2022, 22 (3): 1166-1172.
- [15] 李曙光, 吴应明, 王洪坤. 富水软土地区不同降水开挖工况下深基坑变形研究 [J]. *施工技术 (中英文)*, 2022, 51 (1): 26-31.

(上接第 101 页)

- [5] HU J Z, LI S, ZHANG J, et al. Pitting corrosion initiated by $\text{SiO}_2\text{-MnO-Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ - based inclusions in a 304 stainless steel [J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2024, 31 (9): 2281-2293.
- [6] ZOU J Y, WANG Z W, MA Y L, et al. Role of gradient nano-structured surface in collapsed pitting corrosion on AISI 316L stainless steel during tribocorrosion [J]. *Corrosion Science*, 2022, 197: 110043.
- [7] 阮建, 王欣怡, 刘宏洲, 等. 基于均匀和局部腐蚀模型的海上风电单桩基础承载特性 [J]. *中国海洋平台*, 2023, 38 (4): 42-47.
- [8] 赵炳震, 杜颜胜, 李存良. 随机锈蚀 H 型钢柱偏压承载力分析 [J]. *结构工程师*, 2024, 40 (2): 33-41.
- [9] 张志强. 石墨烯改性复合涂层体系制备及其在环氧树脂生产装置钢结构设施的防腐蚀应用 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2024.
- [10] WYSOKOWSKI A. The impact of corrosion on the fatigue strength of steel used in bridge structures [J]. *Ochrona przed Korozją*, 2024, 67 (1): 2-8.
- [11] ALMASHAKBEHY Y, SALEH E., AL - AKHARS N M, et al. Evaluation of half - cell potential measurements for rein forced concrete corrosion, *Coatings*, 2022, 12 (7): 975.
- [12] 张恩旺, 潘金龙, 梁鸿宇, 等. 钢结构的腐蚀及防腐措施的研究 [J]. *安徽建筑*, 2022, 29 (6): 70-71.
- [13] 刘新宇. 加装电梯钢结构防腐涂装的技术 [J]. *全面腐蚀控制*, 2024, 38 (10): 197-199.
- [14] 石廷阁, 杨晓红, 程馨, 等. 钢结构表面光电阴极保护材料及其光阳极最新研究进展 [J]. *表面技术*, 2024, 53 (19): 27-39.
- [15] 吴斌, 王晓天. 钢结构建筑锈蚀及防腐处理的技术研究 [J]. *全面腐蚀控制*, 2024, 38 (11): 93-95.
- [16] 何童童. 钢结构桥梁设计中的耐久性防腐防护措施 [J]. *新城建科技*, 2024, 33 (3): 86-88.