

河流水位对深浅式地铁基坑变形和受力的影响*

Effects of River Water Level on the Deformation and Stress of Deep and Shallow Subway Foundation Pit

孟英杰¹, 王维俊¹, 李 猛¹, 胡天龙¹, 龙大愚²

(1. 北京市政路桥股份有限公司, 北京 100068; 2. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘 要: 为了研究河流水位对深浅式地铁基坑工程的影响, 运用 RS3 有限元软件中流固耦合计算模型, 探究了河流水位变化对深浅式基坑变形和受力的影响规律。结果表明: 地连墙的水平位移和弯矩、坑底隆起位移和格构柱的竖向位移均随河流水位的增加而增加; 坑边地表沉降位移和基坑的稳定安全系数随着河流水位的增加而减小。河流水位变化对格构柱的竖向位移影响较小; 而河流水位标高为 21~22 m 范围时, 对地连墙的水平位移和弯矩、坑边地表沉降位移、坑底隆起位移和基坑的稳定安全系数有较大的影响; 随河流水位的增加, 坑边地表沉降位移和坑底隆起位移的影响范围均会向下部和临河侧的土体扩大, 临河侧基坑浅部和围护桩底的塑性破坏区域也会增大。

关键词: 临河条件; 深浅式地铁基坑; 河流水位; 有限元分析; 流固耦合

中图分类号: TU463 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 01-0093-08

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.01.017

MENG Yingjie¹, WANG Weijun¹, LI Meng¹, HU Tianlong¹, LONG Dayu²

(1. Beijing Municipal Road Bridge Holding Group Co., Ltd., Beijing 100068, China;

2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The paper aims to study the influence of river water level on deep and shallow subway foundation pit engineering. The fluid-solid coupling calculation model in RS3 finite element software was used to study the influence of river water level change on the deformation and stress of deep and shallow subway foundation pit. The results show that the horizontal displacement and bending moment of the diaphragm wall, uplift displacement of pit bottom and vertical displacement of the lattice column all increase with the increase of river water level. The ground surface settlement displacement and the stability safety factor of foundation pit decrease with the increase of river water level. The variation of river water level has little effect on vertical displacement of lattice columns. When the elevation of river water level is in the range of 21~22 m, it has great influence on the horizontal displacement and bending moment of the diaphragm wall, ground surface settlement displacement, the uplift displacement of pit bottom and the stability safety factor of foundation pit. With the increase of river water level, the influence range of ground surface settlement displacement and uplift displacement of pit bottom expand to the soil at the bottom of the pit and the river side, and the plastic failure area at the shallow part of the foundation pit and the bottom of the retaining pile will also increase.

Keywords: riverside conditions; deep and shallow subway foundation pit; stage of river; finite element analysis; fluid-solid coupling

* 基金项目: 北京市自然科学基金面上项目 (8202033)。

作者简介: 孟英杰 (1989—), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向: 城市地下工程与空间施工技术研究。

通信作者: 龙大愚 (1994—), 男, 硕士, 主要研究方向: 岩土工程研究。

收稿日期: 2023-09-05

岩土力学

0 引言

地铁基坑工程已经成为我国城市地下空间发展的必要手段,而基坑开挖施工可能遇到临近江河与海洋、城市建筑物和综合地下管线等复杂环境^[1-2]。深浅式异形深基坑开挖非常复杂,基坑的受力和变形特征受到多种因素的影响,尤其是临近河流且河流水与地下水位存在补给联系时,河流水位变化对基坑工程的稳定安全性造成不利影响。

目前,针对临河基坑工程的研究,一些学者取得了一定的研究成果。陈骏峰等^[3]运用饱和-非饱和渗流理论,对临河基坑进行了渗流计算且评估了基坑的渗透稳定性;董建军等^[4]通过数值模拟分析得到河流水位突变对河岸基坑变形及支护结构内力产生显著影响;汪映红等^[5]通过有限元分析并结合强度折减法,得到河流水位升降对一级坡有较明显的影响,当河流水位上升时,边坡的安全系数减小;孙俊^[6]和陶俊^[7]通过室内模型试验和数值分析,研究了河流水位对挡土墙水平位移和弯矩的影响,随着坑外水位升高,两侧挡土墙的水平位移和弯矩均呈现增大的趋势;罗飞等^[8]通过 GeoStudio 软件对临河基坑整体稳定性分析,得出临近河道水位上升,基坑的整体稳定性减小;王宝存等^[9]采用室内缩尺模型试验对邻水深基坑开挖下变形机制进行研究,在邻水状态下,应力应变幅值曲线会有明显的拐点;何蕃民等^[10]通过对某临河富水砂卵石层深基坑工程采用规范和理论公式进行降水方案设计,并结合数值方法,优化了临河基坑降水的设计方案。

在已有的研究成果中,针对河流水位变化对临河深浅式基坑工程的影响研究较少。本文以北京地铁 3 号线出入段线深浅式基坑工程为背景,通过 RS3 有限元分析软件的流固耦合计算模型,探究了河流水位变化对临河深浅式基坑的变形和受力的影响,为类似的基坑工程施工和设计提供了理论参考。

1 工程概况

北京地铁 3 号线是北京市轨道交通线网中一条东西向的轨道交通干线,全长 35.06 km,全部为地下线。其中出入段线区间自东风站引出后接入东坝车辆段。出入段线四线段为非对称深浅基坑,长度为 608 m,主体基坑宽度为 6.6~38.5 m,深度为

12.09~23.74 m,东侧紧邻北小河,离河道最近距离为 6 m。施工方式为明挖基坑,采用地连墙和钢支撑的围护形式,设置格构柱和临时格构桩,其位置在坑底中心偏右。地连墙的厚度为 800 mm,围护桩的直径为 1 000 mm,共设置 5 道钢支撑,直径为 800 mm,钢管壁厚为 20 mm,钢支撑材料为 Q235,基坑典型剖面如图 1 所示。

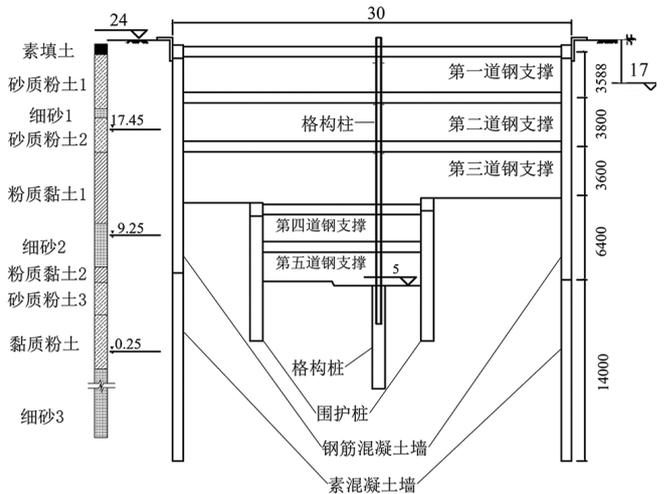


图 1 地铁基坑典型剖面

Fig. 1 Typical section of subway foundation pit

2 地质条件

基坑区域各土层岩性及分布特征划分为 10 个层次,土层的物理力学参数见表 1。地下水主要分布为台地潜水,埋深为 2.8~3.7 m,主要存在于素填土层中;层间水共 3 层,第 1 层埋深为 3.7~7.0 m,主要土层为细砂 1 和砂质粉土 2;第 2 层埋深为 15.0~19.6 m,主要土层为细砂 2;第 3 层埋深为 23.2~28.6 m,主要土层为砂质粉土 3 和细砂 3。位于基坑东侧的北小河与第一层层间水存在补给联系,河流水位标高正常工况为 18 m,在暴雨等特殊工况下的水位标高可达到 22 m。

3 数值模拟

3.1 模型建立

采用 RS3 有限元软件建立三维计算模型,对基坑工程开挖及支护过程进行模拟。根据基坑开挖的影响范围及地质条件,建立模型的尺寸为 40 m×180 m×90 m,如图 2 所示。

表 1 土的物理力学参数
Table 1 Physical and mechanical parameters of soil

土层名称	天然容重 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	饱和容重 $\gamma_{\text{sat}}/(\text{kN}/\text{m}^3)$	压缩模量 E_s/MPa	渗透系数 $k/(\text{cm}/\text{s})$	内聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	泊松比 μ
素填土	19.8	20.8	4.9	1.0×10^{-5}	10.7	10.8	0.30
砂质粉土 1	19.5	20.5	7.3	5.2×10^{-6}	20	25.1	0.25
细砂 1	19.6	20.6	35.0	5.0×10^{-3}	0	30.0	0.23
砂质粉土 2	20.1	21.0	9.4	1.04×10^{-5}	17	27.9	0.23
粉质黏土 1	19.8	20.8	8.3	1.79×10^{-6}	41	11.8	0.26
细砂 2	20.5	21.5	45.0	6.0×10^{-3}	0	32.0	0.23
粉质黏土 2	19.8	20.8	10.6	2.25×10^{-6}	37	13.0	0.25
砂质粉土 3	20.3	21.3	19.2	1.78×10^{-5}	18	27.6	0.25
黏质粉土	20.5	21.5	22.7	1.0×10^{-6}	17	28.2	0.25
细砂 3	20.5	21.5	60.0	6.5×10^{-3}	0	33.0	0.23

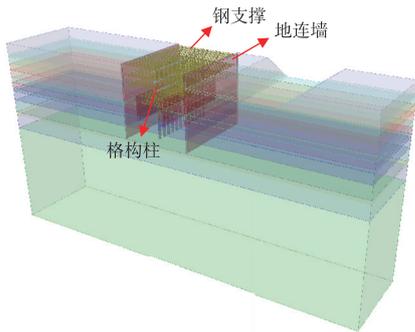


图 2 地铁基坑计算模型

Fig. 2 Calculation model of subway foundation pit

土体建模为三维实体单元，地连墙为三维板单元，钢支撑、格构柱为三维梁单元，格构桩为三维桩单元。围护桩按照式 (1) 等效为厚度为 h 的围护墙^[11]。

$$h = \sqrt[3]{\frac{3\pi D^4}{16L}} \quad (1)$$

式中： D 为围护桩的直径； L 为桩间距。因现场桩径 1 m 和桩间距 1.5 m，则可以等效为厚度为 0.732 m 的围护墙。

3.2 模型参数与边界条件

各层土体设定为理想的弹塑性材料，采用修正 Mohr-Coulomb 本构模型。围护结构采用弹性本构模型，各项参数见表 2。模型计算类型采用流固耦合模拟。

表 2 围护结构的物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of the support structure

结构类型	容重 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	模型
地连墙	25	30	25.1	板
钢支撑	78	206	26.6	梁
格构柱	78	206	26.6	梁
格构桩	25	30	30.0	桩

模型的四周为法向约束，底部为固定约束，上

表面为自由面。通过软件中定义水位面的方式模拟层间水，由软件中的节点水头模拟河流水位，水的荷载作用单独采用同样大小的外力荷载替代。

3.3 模拟方案

基坑开挖的模拟过程与实际的开挖顺序一致，首先施作地连墙、临时格构柱及柱下桩基，后续的开挖支护原则为开挖至支撑标高下 0.5 m 时及时进行支护，具体的工况和开挖深度见表 3。其中工况 6 为深浅部交界处，在开挖至第三道钢支撑中心线位置施做钻孔灌注桩。为了研究河流水位对深浅式地铁基坑的变形影响，建立了 5 种不同河流水位的基坑模型进行对比分析，河流水位的标高分别为 18、19、20、21 及 22 m，分别对应河水的深度为 1~5 m。

表 3 开挖工况

Table 3 Excavation conditions

工况	内容	施作深度/m
1	地连墙及格构桩施工	—
2	开挖第一层土	1.4
3	架设第一道钢支撑	0.9
4	开挖第二层土	5.0
5	架设第二道钢支撑	4.5
6	开挖第三层土	8.8
7	围护桩施工	—
8	架设第三道钢支撑	8.3
9	开挖第四层土	13.1
10	架设第四道支撑	12.6
11	开挖第五层土	16.4
12	架设第五道钢支撑	15.9
13	开挖至坑底	18.6、18.9

4 数值模拟结果

4.1 地连墙水平位移分析

地连墙水平位移曲线如图 3 所示。在不同河流水位下，地连墙的水平位移均有相同的变化规律，即上下两端的变形小，中部变形大，呈现“弓”形分布的特点^[12]，挡土墙表现为向坑内的挤压变形。不同河流

岩土力学

水下地连墙最大水平位移的位置基本一致，均在距离墙顶 15.6 m 附近。由图 3 可知，地连墙中部 (7.5~21.5 m) 的水平位移受河流水位的影响较大，而地连墙顶部 (距地表 5 m 范围内) 和地连墙下部 (24 m 以下) 的水平位移受河流水位的影响较小。

在不同河流水位下，地连墙的最大位移变化规律如图 4 所示。地连墙的最大水平位移随着河流水位的增加而增加，呈现为非线性正相关关系。当河流水位标高从 18 m 增加到 22 m 时，地连墙最大水平位移逐步增加 0.28、0.64、0.91 和 1.73 mm，增加的幅度分别为 2.0%、4.7%、6.3% 和 11.3%；由以上分析可知，当河流水位标高增加至 21~22 m 范围时，会对地连墙的水平位移产生较大影响。

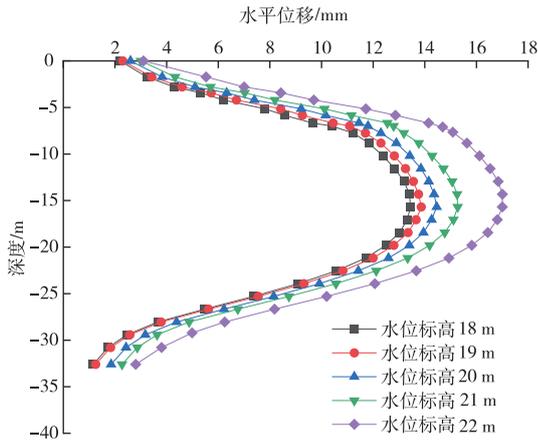


图 3 地连墙水平位移

Fig. 3 Horizontal deformation of diaphragm wall

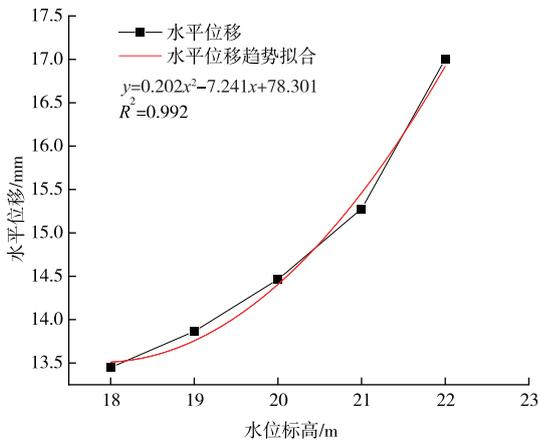


图 4 不同河流水位下地连墙最大水平位移

Fig. 4 Maximum horizontal displacement of diaphragm wall at different river water levels

4.2 地连墙弯矩分析

地连墙弯矩如图 5 所示。规定地连墙弯矩的正方向为坑内。在不同河流水位的影响下，地连墙弯矩均呈现相同的变化规律，表现为弯矩随着地连墙与地表距离的增加先增加后减小的趋势。地连墙最大弯矩的位置为距地表 14.5 m 处，距地表 7~17.5 m 范围内的地连墙弯矩变化最大，受河流水位的影响较大。

由图 6 不同河流水位对地连墙最大弯矩变化曲线可知，随着河流水位的增加，地连墙最大弯矩呈现非线性增加规律。当水位标高为 18~21 m 时，弯矩最大值从 469.5 kN·m 增加到 510.6 kN·m，每增加 1 m 水位标高，弯矩增加的幅度不大于 4%；当水位标高为 21~22 m 时，弯矩从 510.6 kN·m 增加到 555.7 kN·m，增加了 9%。因此，当河流水位标高增加为 21~22 m 范围时，对地连墙弯矩的影响较大。

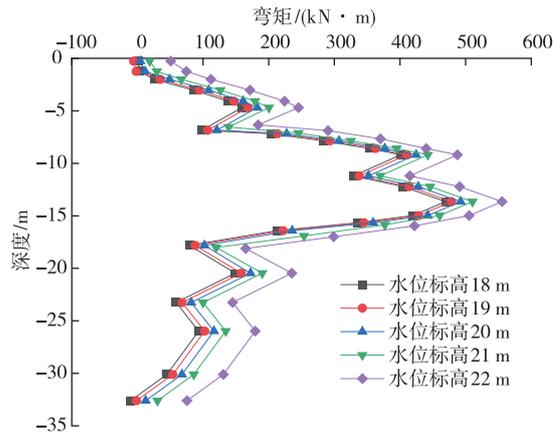


图 5 地连墙弯矩

Fig. 5 Bending moment of diaphragm wall

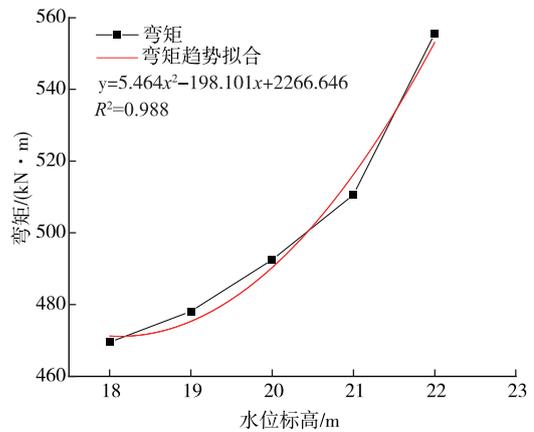


图 6 不同河流水位下地连墙最大弯矩

Fig. 6 Maximum bending moment of diaphragm wall at different river water levels

4.3 地表沉降分析

基坑临河侧地表土体沉降的变化规律如图 7 所示。在不同河流水位条件下，临河侧地表土体的沉

降趋势基本相同，随着与基坑边缘距离的增加，地表土体的沉降值均表现为先减小后增加的变化规律。最大沉降位置距离基坑约有 5 m，在距基坑边缘 3.5~6.5 m 范围内，河流水位的变化对地表沉降的影响比较显著。

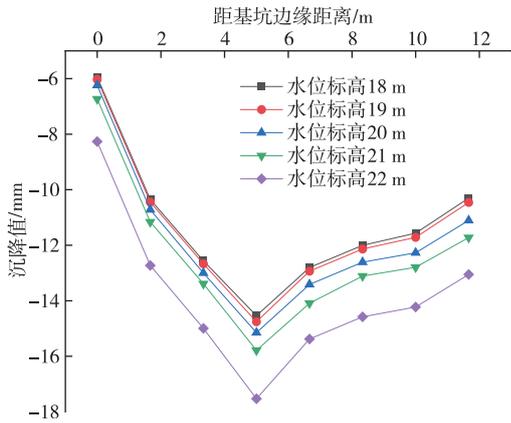


图 7 地表土体沉降位移
Fig. 7 Ground surface settlement displacement

不同河流水位对抗边地表最大沉降值的影响趋势如图 8 所示。坑边地表沉降最大值随着河流水位的增加而增加，且河流水位与坑边地表最大沉降值为非线性负相关关系。当河流水位标高从 18 m 增加到 22 m 时，坑边地表最大沉降值分别增加了 0.21、0.40、0.64 和 1.75 mm，增加了 1.5%、2.7%、4.2% 和 11%；因此，当河流水位标高增加为 21~22 m 范围时，对抗边地表的沉降影响较大。

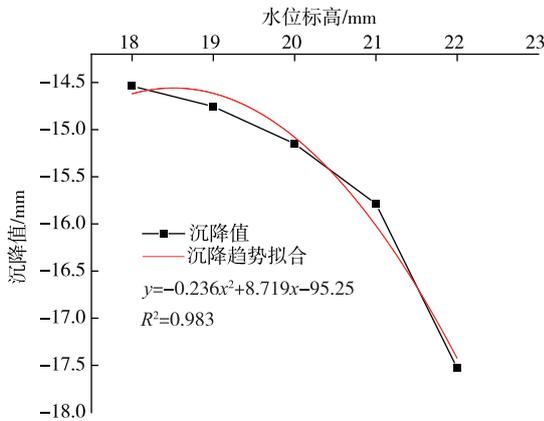


图 8 不同水位条件下地表最大沉降位移
Fig. 8 Maximum ground surface settlement displacement at different river water levels

基坑临河侧土体的竖向位移云如图 9 所示。由图 9 可知，随着河流水位的增加，坑边地表位移的影响范围会逐渐向下扩大，且当河流水位标高超过 20 m

时，河流水位变化加深了对河流边缘土体竖向位移的影响。此外，通过图 9 也进一步印证了上述临河侧地表的最大沉降点的位置与地表土体沉降分布规律。

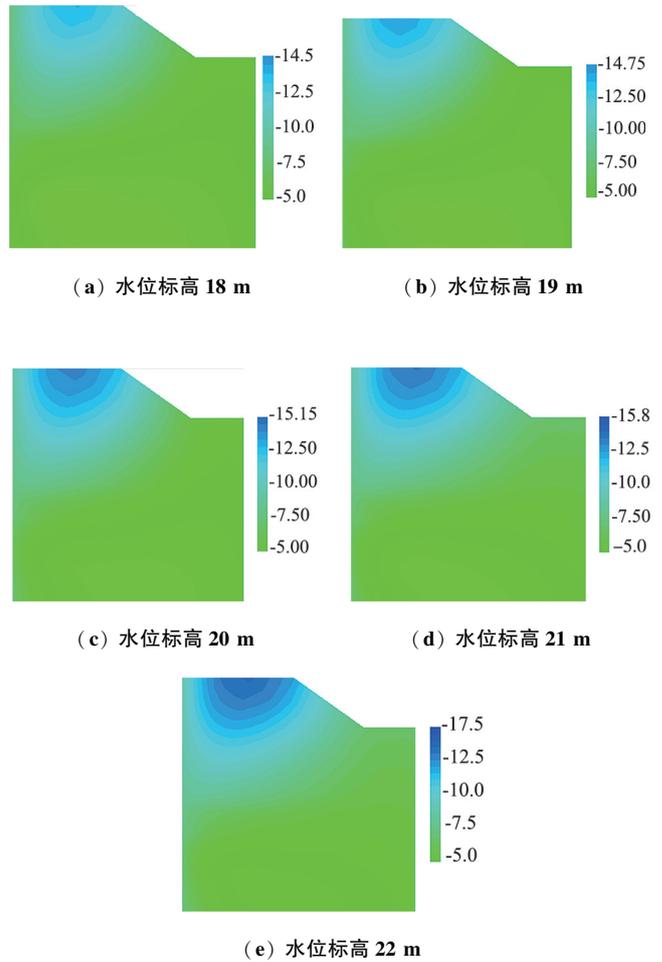


图 9 临河侧土体竖向位移云图
Fig. 9 The cloud map of vertical displacement of soil near river

4.4 基坑隆起变形

不同河流水位条件下基坑隆起的位移如图 10 所示。规定距离 0~12 m 方向为基坑背河侧到基坑临河侧。在不同河流水位下，坑底隆起位移的变化趋势基本一致，呈现中间隆起位移大，两边隆起位移小的变形规律。最大隆起位移的位置在坑底水平方向 5 m 左右，即坑底中部偏左，说明格构柱的位置对坑底的隆起变形分布规律产生了影响。坑底两侧围护桩处的隆起位移值存在一定的差异，临河侧坑底隆起变形稍大于背河侧坑底隆起变形，这是由于临河侧受河流水位的影响较大，地下水的渗流作用增加了临河侧围护桩处坑底的隆起变形。

岩土力学

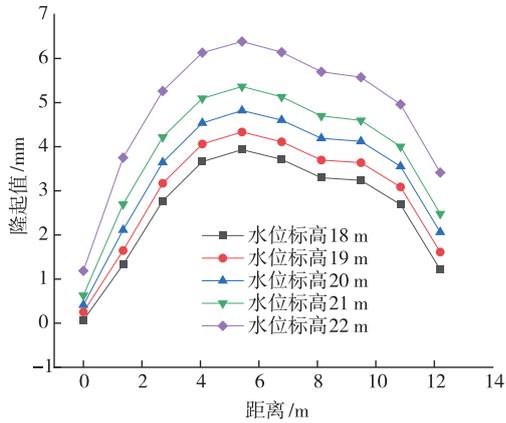
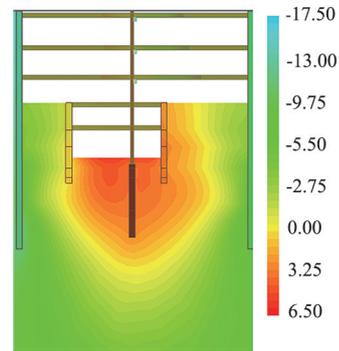


图 10 坑底隆起位移

Fig. 10 Uplift displacement displacement of pit bottom

坑底隆起位移云图如图 11 所示。由图 11 可知，当河流水位增加，坑底隆起位移的主要影响范围由坑底逐渐向下部土体延伸，且向临河侧的土体扩散，而背河侧的土体受影响较小。当水位标高大于 21 m 时，河流水位对于坑底隆起位移的影响相对加大。格构柱的位置也对坑底隆起位移分布产生了一定影响，最大隆起位移偏向背河侧而不是在坑底中部位置。由坑底隆起位移云图结果也进一步验证了上述坑底隆起位移最大值的位置与坑底隆起位移的分布规律。



(e) 水位标高 22 m

图 11 坑底隆起位移云图

Fig. 11 The cloud map of uplift displacement of pit bottom

不同河流水位变化对坑底最大隆起值的影响趋势如图 12 所示。由图 12 可知，坑底最大隆起值随着河流水位的增加而增加，且河流水位与坑底最大隆起值呈现非线性正相关关系。当河流水位标高从 18 m 增加到 22 m 时，坑底最大隆起值分别增加 0.40、0.49、0.54 和 1.02 mm，增加的幅度分别为 10.1%、11.2%、11.3% 和 19.1%。由以上分析可知，当河流水位标高增加为 21~22 m 范围时，对坑底隆起变形影响较大。

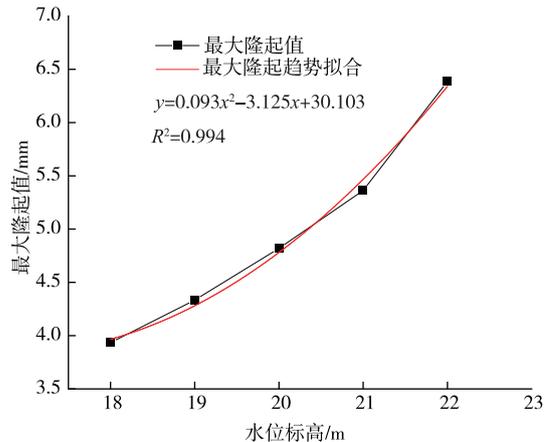
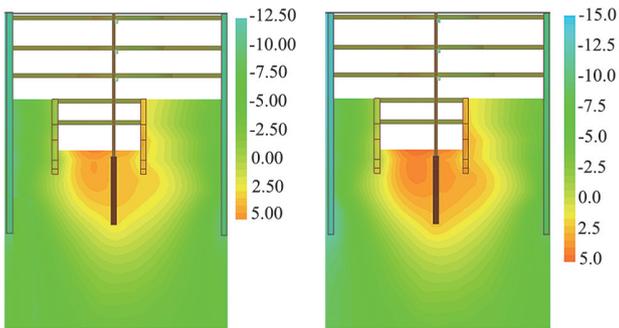


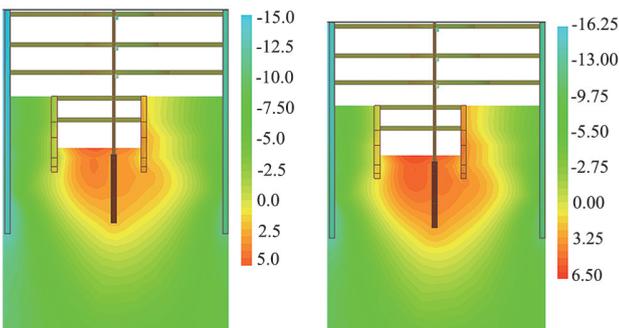
图 12 不同水位条件下坑底最大隆起位移

Fig. 12 Maximum uplift displacement of pit bottom at different river water levels



(a) 水位标高 18 m

(b) 水位标高 19 m



(c) 水位标高 20 m

(d) 水位标高 21 m

4.5 格构柱竖向沉降

不同河流水位下，各开挖工况格构柱竖向位移变化规律如图 13 所示。不同河流水位下，各工况格构柱竖向位移发展趋势相同。以水位标高 20 m 为例，格构柱的竖向位移随着开挖深度的增加而增加。工况 3 到工况 8 的格构柱竖向位移急剧增加，从 0.28 mm 增加到 6.72 mm，增大了 21 倍；工况 8 到

工况 13 格构柱竖向位移仅增加了 1.08 mm，仅增加了 16%。这说明基坑深部未开挖土体和围护桩的共同作用明显降低了格构柱竖向位移的增加速度。在相同的开挖深度下，随着河流水位的增加，格构柱的竖向位移呈现逐渐增加的趋势。

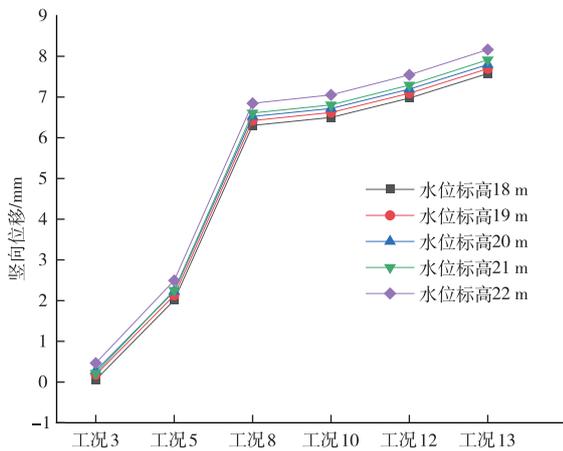


图 13 不同工况下格构柱竖向位移

Fig. 13 Vertical displacement of lattice column under various working conditions

不同水位条件对格构柱竖向位移的影响趋势如图 14 所示。格构柱竖向位移随着河流水位的增加而增加，呈现非线性正相关关系。当河流水位标高从 18 m 增加到 22 m 时，格构柱竖向位移的最大值增加了 0.6 mm，增加了 8%。通过上述分析可知，河流水位变化对格构柱的竖向位移影响较小。

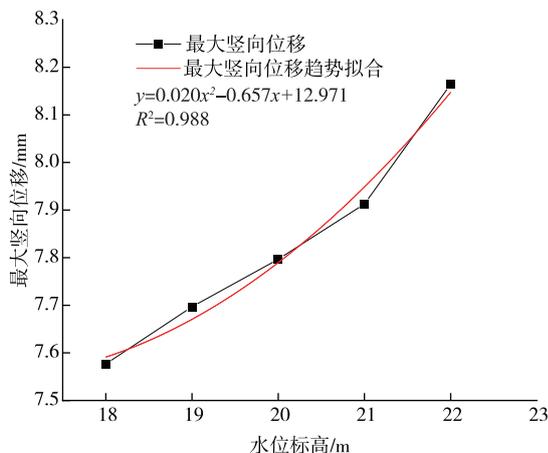


图 14 不同水位条件下格构柱竖向最大位移

Fig. 14 Maximum vertical displacement of lattice column at different river water levels

4.6 基坑稳定性分析

根据已有的文献资料^[13]可知，当基坑开挖到底时，可以采取强度折减法获取强度折减系数，即基

坑的稳定安全系数 F_s 。不同河流水位下基坑的稳定安全系数变化规律如图 15 所示。随着河流水位的增加，基坑的稳定安全系数 F_s 逐渐降低，呈现非线性负相关关系。河流水位从 18 m 增加到 21 m 时，稳定安全系数分别下降 0.07、0.09、0.14 和 0.24，下降幅度分别为 4.1%、5.5%、9% 和 17%。因此，当河流水位标高增加为 21~22 m 范围时，基坑的稳定性会急剧减小，因此在现场施工过程中，必须采取合理的降水措施，减少坑外水位对基坑稳定性的影响。

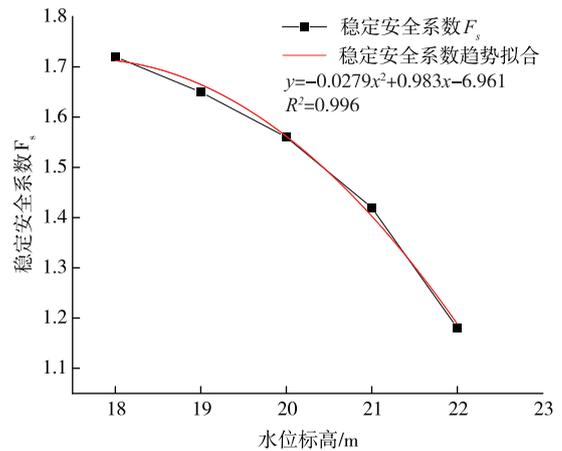


图 15 不同河流水位下基坑的稳定安全系数

Fig. 15 Stability safety factor of foundation pit at different river water levels

5 结论

针对临河深浅式地铁基坑开展动态河流水位对其稳定性的研究，通过数值模拟方法进行分析，主要得到以下结论：

(1) 地连墙的水平位移和弯矩、坑底隆起位移和格构柱的竖向位移均随着河流水位的增加而增加。基坑临河侧坑边地表沉降位移和基坑的稳定安全系数随着河流水位的增加而减小。

(2) 河流水位变化对格构柱的竖向位移影响较小。当河流水位标高为 21~22 m 范围时，对地连墙的水平位移和弯矩、地表沉降位移、坑底隆起位移和基坑的稳定安全系数有较大的影响，地表沉降位移增大了 11%，地连墙的水平位移增大了 15%，基坑的稳定安全系数下降了 17%。

(3) 随着河流水位的增加，基坑地表沉降位移和坑底的隆起位移的影响范围均会（下转第 106 页）

岩土力学

参 考 文 献

- [1] 程康, 徐日庆, 应宏伟, 等. 考虑开挖全过程的基坑坑外任意地表沉降实用计算方法 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2023, 54 (5): 1851-1862.
- [2] 韩文君, 赵宇豪, 闫鑫, 等. 常州地区基坑降水引起的地面沉降计算方法 [J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26 (1): 55-59, 64.
- [3] 胡长明, 林成, 赵金凤, 等. 黄土深基坑降水诱发的地基附加应力和沉降简化计算 [J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18 (4): 160-167.
- [4] 于澜涛, 徐光黎. 基坑降水引起地表沉降计算系数 M_s 的修正 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (2): 700-706.
- [5] 李晓生. 富水深厚砂卵石地层深基坑降水引起的地层沉降预测 [J]. 河南科技大学学报 (自然科学版), 2023, 44 (1): 77-83, 9.
- [6] 王涛, 施斌, 王鑫永, 等. 漫滩二元地层基坑开挖及降水引起的地表沉降预测 [J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40 (5): 724-731.
- [7] 刘政伟, 崔琳, 张熠鑫. 改进狮群优化算法的鲁棒波束形成 [J]. 计算机工程与设计, 2023, 44 (3): 770-776.
- [8] 郝付军. 运营桥梁的变形程度评价和预测分析 [J]. 噪声与振动控制, 2022, 42 (4): 121-126, 137.
- [9] 王娟, 王兴科. 软土地区基坑侧位移动形变预警及预测 [J]. 长江科学院院报, 2021, 38 (8): 91-96, 103.

(上接第 99 页)

向下部土体扩大, 坑底的隆起位移向临河侧的浅部土体扩散。

参 考 文 献

- [1] 郑刚, 朱合华, 刘新荣, 等. 基坑工程与地下工程安全及环境影响控制 [J]. 土木工程学报, 2016, 49 (6): 1-24.
- [2] 丁智, 张霄, 金杰克, 等. 基坑全过程开挖及邻近地铁隧道变形实测分析 [J]. 岩土力学, 2019, 40 (S1): 415-423.
- [3] 陈骏峰, 冯美果. 基于饱和-非饱和渗流理论的基坑防渗措施分析 [J]. 岩土力学, 2009, 30 (5): 1425-1430.
- [4] 董建军, 吴军虎. 渗流作用下河岸深基坑支护结构稳定性分析 [J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34 (5): 543-550.
- [5] 汪映红, 董城, 陈乐. 水位变化对临河基坑边坡稳定性的影响 [J]. 水运工程, 2019 (3): 121-125.
- [6] 孙俊. 考虑临河有限土体与水位影响的基坑支护土压力研究 [D]. 苏州: 苏州科技大学, 2019.
- [7] 陶俊. 临河条件下承压水深基坑开挖稳定性与降水风险源分析 [D]. 苏州: 苏州科技大学, 2020.
- [8] 罗飞, 朱大勇, 蒋泽锋, 等. 邻河深大复杂基坑整体稳定分析 [C] // 《工业建筑》2016 年增刊 I. 北京, 《工业建筑》杂志社, 2016: 574-579.
- [9] 王宝存, 朱大勇, 王小金, 等. 邻水深基坑开挖室内模型试验研究 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2016, 39 (6): 790-794.
- [10] 何蕃民, 彭涛, 邓安, 等. 临河富水砂卵石层深基坑降水方案分析 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20 (32): 13386-13393.
- [11] 刘波, 席培胜, 章定文. 偏压作用下非等深基坑开挖效应数值分析 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2016, 46 (4): 853-859.
- [12] 孙小力, 孙铁成, 张旭, 等. 地铁基坑开挖数值模拟及变形特征研究 [J]. 施工技术, 2020, 49 (7): 41-44, 53.
- [13] 胡安峰, 陈博浪, 应宏伟. 土体本构模型对强度折减法分析基坑整体稳定性的影响 [J]. 岩土力学, 2011, 32 (S2): 592-597, 603.