

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2024.05.006

特大暴雨引起的深基坑变形分析及降水处理

田瑞端^{1,3}, 肖见航^{2,3}, 王晓睿^{2,3}

- (1. 上海隧道工程有限公司, 上海 200000;
2. 华北水利水电大学 地球科学与工程学院, 河南 郑州 450046;
3. 城市地下交通工程防灾减灾河南省交通运输行业技术创新中心, 河南 郑州 450046)

摘要: 降雨通常易导致土体力学性质变化, 进而影响基坑的安全性, 尤其是在强降雨情况下。以受郑州7.20暴雨影响较大的郑州地铁小南岗站深基坑工程为背景, 结合降雨期内工程实测数据, 采用MIDAS有限元软件进行分析, 以揭示短时特大暴雨导致的地铁深基坑变形的关键因素, 分析基坑满蓄水情况下的降水处理方法, 并提出基坑工程面对特大暴雨时的一些防范措施。结果表明: 特大暴雨影响地铁深基坑的关键因素是内支撑脱落及基坑回灌水的作用, 其中内支撑脱落主因是基坑回灌降低了围护结构两侧的水土压力差, 从而削弱了围护变形; 对满蓄水基坑进行降水时, 宜采用基坑内外联合降水的方法, 并及时施作钢支撑; 面对特大暴雨, 应及时加高挡土墙, 加固钢支撑与围檩的连接。

关键词: 短时强降雨; 地铁深基坑; 有限元分析; 支护结构; 影响因素

中图分类号: TU753

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)05-0038-08

Deformation Analysis and Dewatering Treatment of Deep Foundation Pit Caused by Heavy Rain

TIAN Ruiduan^{1,3}, XIAO Jianhang^{2,3}, WANG Xiaorui^{2,3}

- (1. Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200000, China; 2. College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450046, China;
3. Disaster Prevention and Mitigation for Urban Underground Transportation Engineering Henan Provincial Transportation Industry Technology Innovation Center, Zhengzhou, Henan 450046, China)

Abstract: Precipitation can alter soil mechanical properties and affect excavation safety, particularly during periods of high precipitation. This study is based on the "7.20" rainstorm that occurred in Zhengzhou, Henan Province. A deep foundation pit of "xiaonangang" station of Zhengzhou was taken as a case study, and MIDAS finite element software was adopted to analyze engineering data measured during rainfall. This work also reveals the key factors of subway deep foundation pit deformation caused by short-term exceptionally heavy rainfall, analyzes the method of precipitation handling in the case of fully storing water in the foundation pit, and proposes some precautionary measures for the foundation pit project facing exceptionally heavy rainfall. The results are as follows. The main factors of the extra heavy rain affecting the deep foundation pit of the subway are the dislocation of the internal support and the role of pit filling, of which the main reason for the dislocation of the internal support is that the pit filling reduces the difference between the soil and water pressure on both sides of the enclosing structure, thus weakening the deformation of the enclosure. When descending the full storage pit, it is appropriate to use the method of joint descending of both the inside and outside of the pit, and timely apply steel support; In the face of extra heavy rain, the steel support should timely raise retaining wall and strengthen the connection between steel support and walings.

Keywords: short-time intense rainfall; deep foundation pit of subway; finite element analysis; support structure; influencing factors

收稿日期: 2024-06-03

修稿日期: 2024-07-15

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51309100); 河南省科技攻关项目(222102320135)

作者简介: 田瑞端(1985—), 男, 硕士, 主要从事基坑工程、隧道工程等方面研究工作。E-mail: tianrd0517@163.com

从我国开通第一条地铁线路至 2022 年底,已开通运营地铁 10 287.45 km,地铁事业的蓬勃发展,带来了大量的地下深基坑工程。在基坑工程的施工中,降雨对基坑工程的安全性影响较大,降雨会导致土体含水率升高、抗剪强度降低、基坑内外水头差增大等不利影响,降低基坑的整体安全性,使基坑存在倒塌的风险^[1-3]。

土体的降雨入渗行为是复杂的。一般认为雨水入渗会降低土体的抗剪强度,改变土体的孔隙压力梯度,当含水率超过一定阈值时,降雨入渗对土体的弱化作用就会减弱^[4-6]。秦会来等^[7]验证了数值模拟方法在基坑开挖计算的可行性。Xu 等^[8]对某个发生渗流破坏的基坑进行分析,提出了含水层基坑发生渗流的破坏机理及加固重建方法;孙振华等^[9]以沈阳地区典型的非饱和和粉质黏土基坑作为研究对象,对该地区非饱和和粉质粘土的水土特性曲线进行拟合,认为降雨对土体的影响深度约为 0.9 m,均匀型降雨对基坑的危害最大;李炜明等^[10]以武汉地铁苗栗路车站基坑工程为例,对短时强降雨引起的地表沉降与结构变形展开研究,认为基坑短边方向受短时强降雨影响较小,提出了应加强对无辅助加固措施区段、狭长基坑长边中部的监测的防控方法;张瑛颖^[11]以中国水利博物馆工程基坑开挖引起的降水为实例,采用三维模型进行了数值模拟,分析了降水过程中基坑内外渗流场变化来解决地下水水位自由面升降问题;Guo 等^[12]简化了分析工况,不考虑地下水的影响,采用有限差分法对基坑开挖进行模拟,得到了基坑开挖变形规律;崔凤展^[13]采用 FLAC3D 软件对强降雨作用下基坑稳定性进行模拟分析,揭示了强降雨作用下不同支护状态的深基坑边坡应力和位移演化规律。

综上所述,众多学者研究了降雨对土体边坡的影响,但针对地铁深基坑工程受短时强降雨的影响研究较少。不同于其他土质边坡,地铁深基坑工程具有开挖深度大、呈狭长形式设计、对周边环境影响大等特征,一旦出现短时强降雨,基坑就会迅速积水,进而导致基坑侧壁土体软化、抗剪强度急剧降低,最终可能引发基坑坍塌,从而对周边人员和环境构成严重威胁。然而目前尚未形成一套成熟的针对短时强降雨的防控措施,随着地铁事业的发展,地铁基坑面对短时强降雨的概率大大增加,如何减小强降雨作用对地铁深大基坑的影响,是工程界中亟需解决的问题^[14]。本文以受郑州 7.20 暴雨影响较大的小南岗站深基坑工程为例,运用数值模拟方法,探讨在特大暴雨影响下深大基坑支护体系及周边地表

的变形机理及相关影响因素,分析满蓄水基坑的降水处理措施,为其它深大基坑工程在防范特大暴雨时提供理论支持与科学依据。

1 工程案例

1.1 工程概况

小南岗站位于郑汴物流通道与郑信路交叉口处,沿郑汴物流通道敷设,是郑州市轨道交通 8 号线一期工程的第二十三座车站,站点周边无控制性建筑。车站主体外包长度为 238.95 m,该深基坑开挖标准段宽 21.1 m,坑深约 17.14 m,主体基坑围护结构采用钻孔灌注桩+3 道钢支撑的支护形式并设置三轴搅拌桩做止水帷幕,主体结构横断面如图 1,土层分布及相应物理力学参数如表 1 所示。

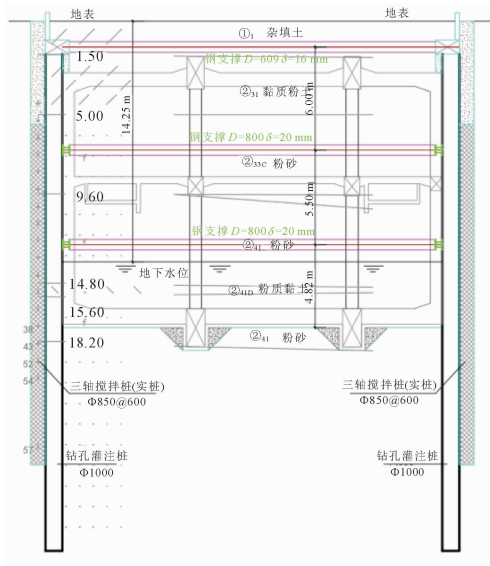


图 1 标准段横剖示意图

表 1 土体物理力学参数表

土层名称	重度 /(kN·m ⁻³)	黏聚力 /kPa	摩擦角 /(°)	泊松比 ν	弹性模量 E/MPa	压缩模量 E _s /MPa
杂填土	18.00	8.00	10.00	0.32	23.00	5.50
黏质粉土	18.50	13.00	22.00	0.28	34.00	6.70
粉砂	19.00	3.00	28.00	0.23	35.00	11.00
粉质黏土	19.25	21.00	13.50	0.30	36.00	13.00
粉砂	19.50	3.00	30.00	0.23	45.00	20.00
细砂	20.00	2.00	32.00	0.23	50.00	25.00
粉质黏土	20.50	31.50	15.60	0.28	43.00	18.00

1.2 郑州 7·20 暴雨险情分析

小南岗站基坑在标六段开挖完成、标七段开始开挖时,遭遇 7·20 暴雨,其施工进度示意如图 2 所示,强降雨主要集中在 2021 年 7 月 20 日 16 时至 18

时,期间峰值降雨量 201 mm/h;19 日 20 时到 20 日 20 时,单日降雨量 552.5 mm;17 日—20 日,3 日降雨量达 617.1 mm。

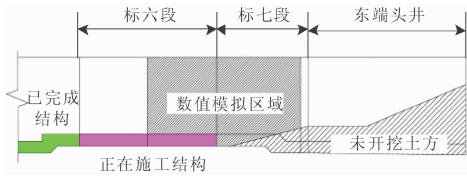


图 2 施工进度示意图

特大暴雨对小南岗基坑造成的影响主要在 20 日下午至 21 日凌晨:

20 日 15 点至 16 点,大雨,漏点处安排堵漏人员尝试用土工布、快干水泥及引流管进行封堵引流。

20 日 16 点 30 至 20 点 40,持续暴雨,对积水较深区域进行抽排。

20 日 20 点 40 至 21 点 30,西侧东风渠河道决堤,地面积水 40 cm,有迅速上涨趋势。决定对小南岗基坑进行引导性回灌。

21 日 00 点 00 至 00 点 43,小南岗基坑回灌至第三道支撑底 2 m 处。

21 日 4 点左右,小南岗回灌满水,第二、三道支撑出现上浮情况,基坑回灌满水。

受强降水影响,小南岗站基坑 2021 年 7 月 21 日 4 时基坑灌满水,6 时场地完全被淹,周边道路完全被淹,积水最深约 1.5 m,部分钢支撑上浮,现场受灾如图 3 所示。由前述知,小南岗基坑开挖深度大于 12 m,结合现场实际情况,具有极高安全风险,因此被判定为一级基坑。



图 3 小南岗现场受灾图

1.3 监测数据分析

特大暴雨造成了小南岗基坑部分钢支撑脱落上浮,支护结构产生较大位移。基坑典型断面变形结果如表 2 所示,从表 2 中不难发现,基坑支护结构在 7·20 暴雨期间的水平增量较大,暴雨期间平均变

形速率达 2.10 mm/d。在暴雨过后的连续监测中,支护结构的变形较为稳定,平均变形速率均在 1 mm/d 以下。可以看出,降雨导致基坑支护结构产生了显著位移。

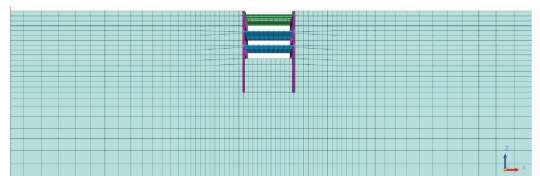
表 2 暴雨前后桩体水平位移增量

监测日期	最大累积变化值 /mm	变化速率 / $(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	工况
7 月 18 日	10.15	—	降雨
7 月 19 日	10.43	0.28	降雨
暴雨、场地被淹、基坑回灌水			
7 月 23 日	16.73	2.10	
7 月 24 日	16.80	0.07	场地积水消散
7 月 25 日	17.36	0.56	
7 月 26 日	17.20	-0.16	
7 月 27 日	17.94	0.74	基坑降水

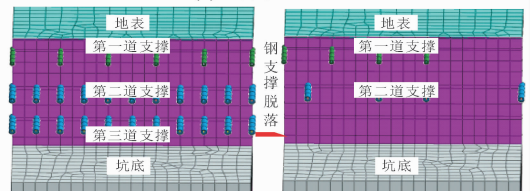
2 数值模型的建立

2.1 计算模型尺寸及参数的确定

根据工程所在土层分布,采用表 1 所示土层参数进行模型的建立。考虑降水井抽水的影响范围^[14],基坑两侧支护结构后方土体取 100 m,开挖深度为 17 m,宽度为 21 m,长度方向取开挖至坑底、受暴雨影响支护结构变形较大且支撑脱落的 30 m 范围(如图 2 所示),模型整体尺寸取 30 m × 221 m × 60 m,计算模型如图 4(a)所示,计算模型范围内支撑脱落情况如图 4(b)所示。约束模型四周及底部的法向位移。钻孔灌注桩简化为地下连续墙进行模拟,根据基坑支护结构方案及混凝土和钢材的标准强度,弹性模量取 31.5 GPa,重度 25 kN/m³;钢支撑弹性模量取 206 GPa,重度 78.5 kN/m³,其中,土体采用 HS 本构模型、钢支撑及围护结构采用线弹性本构^[16-20]。



(a) 计算模型图



(b) 计算范围内支撑脱落示意图

图 4 计算模型示意图

2.2 模拟结果分析

根据上述工程背景、假定条件及相关参数,所建立的数值模型计算结果与实测结果对比如图5所示。从图5可知,数值模拟与工程实测的基坑围护结构变形趋势相近,均表现出上部变形小、中部变形大、底部几乎无变形的内凸形特性。开挖至坑底时模拟与实测的围护结构最大位移量均出现在地表以下11 m~13 m的范围内,且最大位移量仅相差0.65 mm。在短时强降雨作用后围护结构均产生了较大的变形,整体变形趋势仍为内凸形特性,数值模拟最大变形量为16.96 mm,工程实测最大变形量为16.47 mm,两者较为接近,说明基坑开挖至坑底时模拟结果与工程实测结果吻合度较高,计算结果可为进一步分析提供依据。

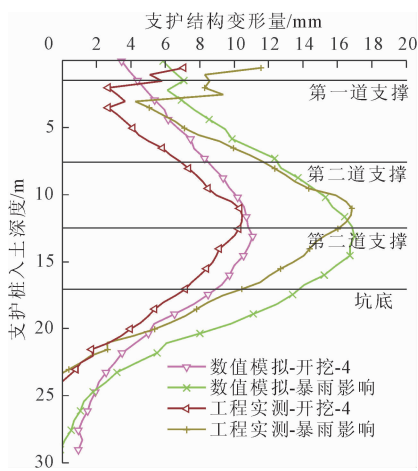


图5 模拟所得支护结构位移与实测结果对比图

3 降雨对基坑的影响因素分析

降雨前,基坑坑内水位已降水至开挖面以下1 m位置,降雨会导致基坑内外表层土体饱和度增加,土颗粒之间的摩擦性减弱造成土体软化,短时强降雨造成坑外存在1.5 m深的积水;坑内回灌满水且基坑支护结构产生部分渗漏点;基坑内支撑脱落;暴雨前后,地下水位发生明显上升。为研究特大暴雨对基坑的影响因素,采用数值模拟方法进行单一因素分析,分别对可能造成基坑支护结构及周边地表变化的几种因素进行分析。

3.1 积水荷载影响

在短时强降雨作用下,场地周围聚集了最深约1.5 m的积水。在MIDAS中,通过设置水压力来模拟积水荷载,四种工况下的桩体最大水平位移及桩顶位移如表3所示。

表3 不同积水工况下支护结构位移

积水工况	最大位移 /mm	桩顶位移 /mm
工况1:基坑内外均无积水荷载	11.05	2.33
工况2:基坑外存在1.5 m深的积水	11.30	2.93
工况3:基坑内存在1.5 m深的积水	11.00	2.35
工况4:基坑内外均存在1.5 m深的积水	11.21	2.46

在基坑外主动区施加积水荷载,支护结构的最大位移量增加了0.25 mm,桩顶向坑内的位移量增加了0.6 mm;仅在基坑内施加积水荷载,支护结构的变形量略微减小,但整体变化不大;对基坑内外均施加积水荷载,基坑支护结构变形量较工况2偏小,表明基坑内积水对支护结构的变形有弱化作用。

3.2 基坑回灌水影响

在破除基坑挡土墙进行引导性回灌水后,基坑内部快速回灌水。以地表表面为水位零点,对基坑支护结构内侧及坑底设置水位为1.5 m的水压力来模拟基坑回灌水的影响,基坑回灌水前后地表沉降变形如图6。

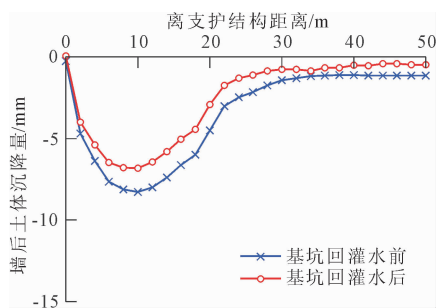


图6 基坑回灌水前后地表沉降对比图

基坑内回灌水后,支护结构产生向坑外侧位移的趋势,基坑回灌水后支护结构变形如图7所示。支护结构位移量由11.05 mm减小1.47 mm至9.58 mm,减小了13.30%;坑外土体沉降略有减小,沉降槽向坑内方向少量偏移。基坑回灌水对基坑支护结构造成的影响主要是减弱支护结构的变形量。图8为基坑回灌水前后支护结构两侧的土压力变化图。由图8可知,坑内回灌水增大了基坑内侧对支护结构的水土压力,水压力的作用对支护结构产生了向支护结构外侧的法向力,减小支护结构两侧的水土压力差,减弱了主动土压力对支护结构的变形影响,从而使支护结构的变形产生“回弹”现象。

降雨过程中综合因素影响下典型断面支撑轴力变化见表4,在降雨前,第一道支撑轴力最大值为390 kN,第二道支撑最大轴力为1 150 kN,降雨后基

坑内部分回灌水而支撑未脱落后,第一道支撑轴力减小了 348 kN 至 42 kN,第二道支撑轴力减小了 783 kN 至 367 kN,而当支撑发生脱落后,支撑轴力又有较大的增加。

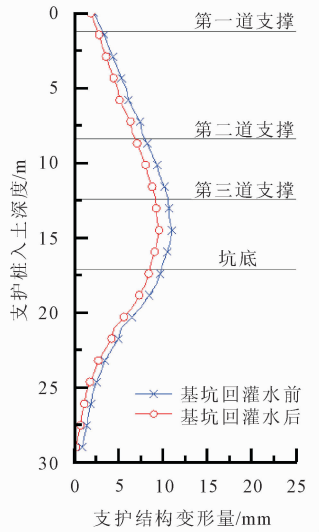


图 7 基坑回灌水后支护结构变化图

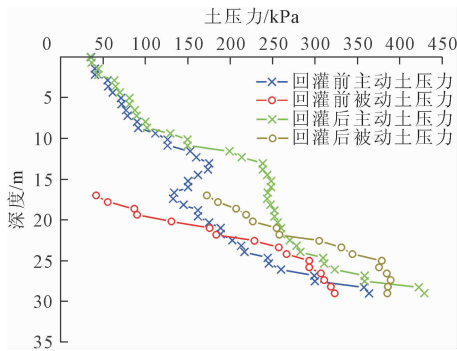


图 8 支护结构两侧土压力变化

表 4 支撑轴力变化表

施工阶段	第一道钢支撑轴力/kN	第二道钢支撑轴力/kN
开挖-2	758	—
开挖-3	485	1191
开挖-4	390	1150
回灌水	42	367
内支撑脱落	1644	5924

结合基坑回灌水单独作用影响,当基坑发生回灌水后,支护结构向外侧产生较小的变形,该变形导致部分钢支撑无法与围檩充分接触,从而减小了支撑轴力的大小,在水中浮力的综合作用下,最终导致钢支撑与围檩的连接失效,造成钢支撑的脱落。当钢支撑脱落后,内部支撑体系残缺,在墙后土压力作

用下基坑支护结构向坑内产生较大位移,紧压剩余钢支撑,造成剩余支撑轴力极大增加。

3.3 内支撑是否脱落影响

基坑开挖的整体过程中,内支撑的稳定性决定着基坑整体防护的稳定。对小南岗站基坑第二、三道支撑部分脱落前后进行模拟,地表沉降结果如图 9,支护结构变形如图 10。

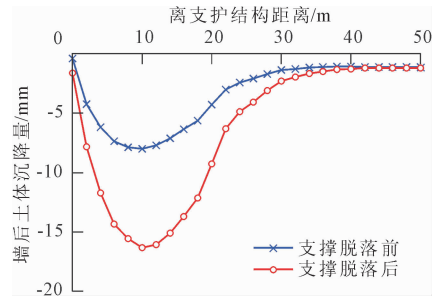


图 9 内支撑脱落后地表沉降对比图

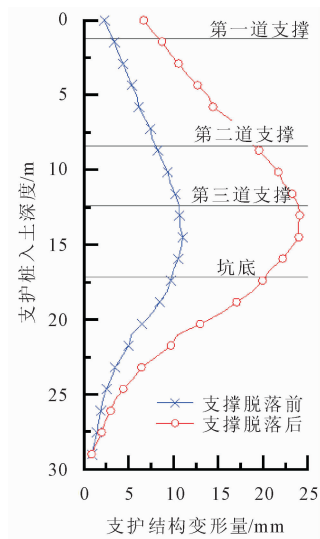


图 10 内支撑脱落后支护结构变化图

钢支撑发生脱落后,基坑支护结构水平位移及坑外土体沉降均发生较大变化,支护结构最大位移量由 11.05 mm 增加至 24.01 mm,增幅 117.29%,且桩顶有向坑内位移的趋势;坑外土体最大沉降量由 -8.04 mm 增加至 -16.36 mm,增幅 103.48%。内支撑的脱落对基坑支护结构及周边地表均造成了较大的影响,该因素极大地降低了基坑工程的安全性。

基坑钢支撑脱落后围护结构的应力变化如图 11 所示。在内支撑脱落后,围护结构的最大应力点出现在坑底上 1.7 m 附近,为 1705 kPa,在第一、二、三道钢支撑施作位置,围护结构的应力存在明显的减弱现象,即内支撑对围护结构的应力发展具有明

显的抑制作用。在内支撑脱落后,钢支撑对围护结构的应力减弱作用失效,围护结构的最大应力点出现在坑底上 3.5 m 附近,为 3047 kPa,最大应力点较内支撑脱落前有所上升,且应力分布较为平滑,整体应力值发生了较大的增加。支护结构的变形及应力分布表明,内支撑的稳定对整体支护结构安全起着重要作用,是控制整个支护体系变形的重要构件。

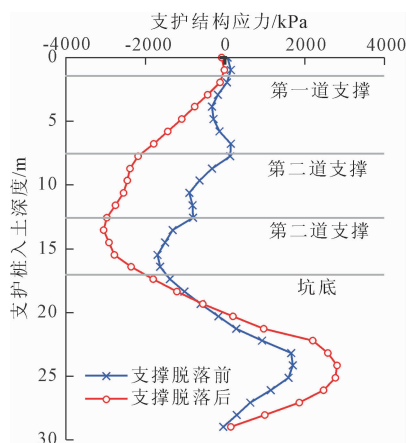


图 11 内支撑脱落后支护结构应力对比图

3.4 地下水位上升影响

在暴雨过程中,基坑周边地下水位明显上升且在支护结构部分产生渗漏点。对地下水位上升的模拟采用简化处理,通过改变初始地下水位来实现地下水位的上升,不考虑支护结构产生渗漏点的影响,地下水位上升后,坑内外总孔压差值增大,地下水位从 14.25 m 上升至 9.5 m。

图 12 为地下水位上升后基坑支护结构变形图,图 13 为地下水位上升前后周边地表沉降图。地下水位上升 4.75 m 后,基坑支护结构未产生明显的变形,但周边地表产生了较为明显的隆起,最大沉降量由 -8.04 mm 至 -4.39 mm,减小了 45.39%。在忽略基坑支护结构产生渗流的情况下,地下水位上升对基坑围护结构的影响不大,反而由于地下水增多造成坑外地表整体表现出隆起趋势。

3.5 防控措施分析

结合上述降雨对基坑的各种影响因素的分析,可以看出,基坑内部钢支撑的脱落对基坑支护结构的影响最大,其次是基坑回灌水的影响,这两者对基坑支护结构产生的影响效果相反;降雨入渗区内土体软化与土体上方积水荷载作用主要对基坑外侧土体沉降产生影响,对支护结构影响较小;地下水位的上升使地表产生隆起现象,对支护结构的影响也较小。

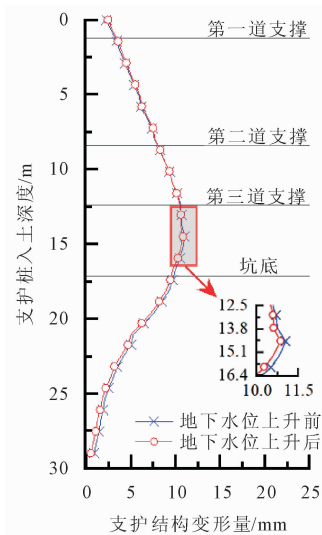


图 12 地下水位上升后支护结构变化图

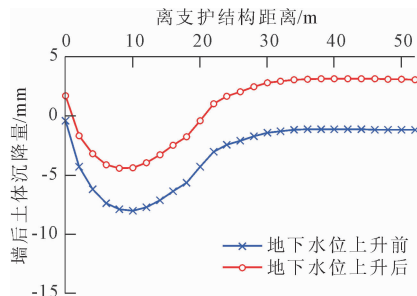


图 13 地下水位上升前后地表沉降对比图

基于以上对郑州 7·20 暴雨的分析,面对短时特大暴雨时,基坑工程可从基坑内和基坑外两部分进行防护,基坑外部宜在降雨前在原有挡土墙的基础上进行加高,防止积水流入基坑造成坑内积水;若降雨量不大应尽快将坑内积水排出,若降雨量过大坑内积水无法有效排出,破除基坑边缘挡土墙对基坑进行引导性回灌水可减小支护结构两侧压力差,有利于维持基坑的稳定,但在进行引导性回灌水前,要注意对支撑与围檩连接处进行加固,改进原有防脱落措施,防止支撑脱落对基坑造成危害。

4 满蓄水基坑降水措施分析

基坑在回灌满水后,若仅依靠天然水位的下降来降低坑内水位,则会对工程进度造成较大的延误。为此分别考虑了基坑内降水及坑内内外联合降水的降水方式,提出了较为合适的满蓄水基坑降水方法。

4.1 基坑内降水方法

在表 3 分析工况的基础上,通过逐步减小小施作在支护结构内侧的水压力,以此来实现坑内降水的

效果。仅进行基坑坑内降水的情况下,降水前后支护结构及地表沉降的变化情况如图 14 所示。基坑坑内降水后,支护结构的最大位移由 17.46 mm 增加至 19.77 mm,而地表最大沉降由 -14.26 mm 增加至 -15.07 mm。在基坑降水完成后,坑内水的减少增大了围护结构内外的压力差,支护结构的变形进一步增大。

4.2 基坑内外联合降水方法

在对满蓄水基坑进行抽水处理时,若只在坑内进行降水,在坑外水位大于坑内水位的情况下,则会出现坑外水向坑内渗流的情况,因此在基坑外侧设置降水井,以保证基坑内外水位一致,减小支护结构两侧的水头压力差。基坑内外联合降水完成后的孔隙水压力分布如图 15 所示。

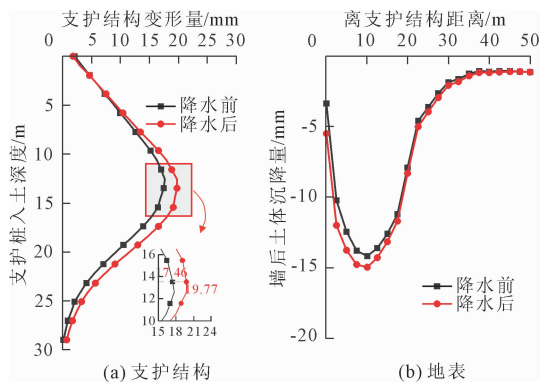


图 14 坑内降水前后支护结构及地表沉降变形图

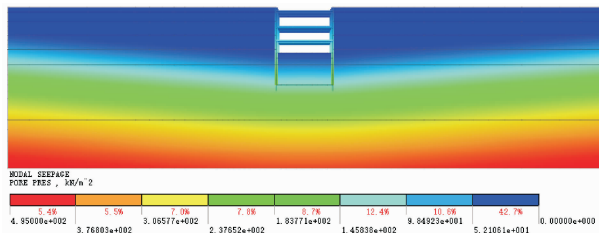


图 15 孔隙水压力分布图

基坑内外联合降水完成后的支护结构变形及地表沉降变形如图 16 所示,由图 16 可知,联合降水的情况下支护结构最大变形量由 17.46 mm 增加至 18.02 mm。与图 14 仅进行坑内降水的情况相比,支护结构的最大变形量减小了 8.9%,采用坑内外联合降水可有效减小支护结构的变形。因此在工程实际应用中,应首先考虑基坑内外联合降水的降水方式。

5 结论

通过对郑州某个在暴雨作用下产生大变形的基

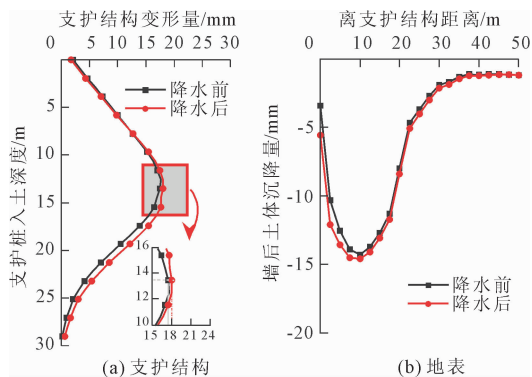


图 16 基坑内外联合降水前后支护结构及地表沉降变形图

坑进行分析,验证了 MIDAS 有限元软件在地铁深基坑及降水工况下进行数值模拟分析的可行性,并探讨了暴雨作用造成支护结构变形的影响因素及降水处理方法,得到以下结论:

(1) 特大暴雨对地铁深基坑的造成影响的主要因素是内支撑脱落、基坑回灌水的作用,地下水位上升、积水荷载所造成的影响较小。其中,基坑回灌水减弱了围护结构两侧的水土压力差,从而减弱了围护结构变形造成内支撑脱落,进一步致使基坑产生更大的变形。

(2) 在对满蓄水基坑进行降水时,应考虑坑内坑外水位的联动作用,同时对坑内外进行降水以减弱支护结构的变形。

(3) 面对特大暴雨短时强降雨时,及时对钢支撑进行加固,加高基坑外侧挡土墙对防范积水具有积极意义;当积水过深,对基坑进行引导性回灌可减弱支护结构变形。

参考文献:

- [1] 王伟星,盛 斌,韩 侃,等. 降雨对浅埋黄土隧道围岩沉降变形影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021,17(4):1132-1136.
- [2] 刘 畅,季凡凡,郑 刚,等. 降雨对软土基坑支护结构影响实测及机理研究[J]. 岩土工程学报,2020,42(3):447-456.
- [3] Tang C S, Gong X P, Shen Z, et al. Soil micro-penetration resistance as an index of its infiltration processes during rainfall[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022,14(5):1580-1587.
- [4] Li Z, Luo Z, Xu C, et al. 3D fluid-solid full coupling numerical simulation of soil deformation induced by shield tunnelling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019,90:174-182.
- [5] 王祥秋,刘文添,周治国. 暴雨与河流水位涨落耦合作用基坑稳定性分析[J]. 土木建筑与环境工程,2012,

- 34(1):66-70,84.
- [6] Ge M, Pineda J A, Sheng D, et al. Microstructural effects on the wetting-induced collapse in compacted loess [J]. *Computers and Geotechnics*, 2021,138:104359.
- [7] 秦会来,张甲峰,郭院成,等. ABAQUS 在计算基坑开挖变形中的应用研究[J]. *岩土工程学报*,2012,34(S1):82-86.
- [8] Xu X B, Hu Q, Huang T M, et al. Seepage failure of a foundation pit with confined aquifer layers and its reconstruction[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022,138:106366.
- [9] 孙振华,姜 闯,辛全明,等. 降雨对非饱和粉质粘土基坑土水特性及稳定性的影响研究[J]. *工程勘察*, 2021,49(11):6-12,47.
- [10] 李炜明,任 虹,柳雨叶,等. 短时强降水对地铁车站明挖施工引起的地表沉降与结构变形的影响[J]. *铁道建筑*,2018,58(7):80-82,120.
- [11] 张瑛颖. 杭州地区粉砂土中基坑降水面的数值模拟[D]. 杭州:浙江大学,2006.
- [12] Guo P P, Gong X N, Wang Y X. Displacement and force analyses of braced structure of deep excavation considering unsymmetrical surcharge effect [J]. *Computers and Geotechnics*, 2019,113:103102.
- [13] 崔凤展. 强降雨作用下土质深基坑稳定性及其控制技术研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2016.
- [14] 高永红,任辉启,王明洋,等. 城市地下空间重大灾害防御探讨[J]. *地下空间与工程学报*,2023,19(4):1051-1057.
- [15] 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.
- [16] Ye G L, Ye B. Investigation of the overconsolidation and structural behavior of Shanghai clays by element testing and constitutive modeling[J]. *Underground Space*, 2016,1(1):62-77.
- [17] Hamidi A, Turchi S, Karooni F. A critical state based thermo-elasto-plastic constitutive model for structured clays [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2017,9(6):1094-1103.
- [18] 宗露丹,徐中华,翁其平,等. 小应变本构模型在超深大基坑分析中的应用[J]. *地下空间与工程学报*, 2019,15(S1):231-242.
- [19] 李 平,陈育民,沈 扬. 基坑卸荷回弹变形计算的一种简化分析法[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*,2012,13(1):88-91.
- [20] 徐中华,王卫东. 敏感环境下基坑数值分析中土体本构模型的选择[J]. *岩土力学*,2010,31(1):258-264,326.

(上接第37页)

- [13] 施微丹,吴繁超,林婷婷,等. 既有石结构民宅外走廊重建置换的加固分析[J]. *水利与建筑工程学报*, 2022,20(3):147-153.
- [14] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010(2016年版)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [15] 杨颜志. 土体-复杂结构耦合系统地震响应数值模拟方法及应用[D]. 上海:上海交通大学,2012.
- [16] Johnson H G R. A computational constitutive model for glass subjected to large strains, high strain rates and high pressures[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2011,78(5):051003.
- [17] 张丰宇,何佰昭,吴志刚,等. 粘钢加固既有石楼板抗弯性能试验研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2023,31(5):1262-1277.
- [18] 张 岩,刘沛允,秦 宇,等. 砌体单片墙结构的平面内静力与动力性能分析[J]. *应用力学学报*,2018,35(6):1273-1279,1420.
- [19] LS-DYNA Theoretical Manual [M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2003.
- [20] 韩庆华,何金明,刘铭劼. 考虑土-结构相互作用的空间网格结构地震响应分析[J]. *地震工程与工程振动*,2018,38(2):42-52.
- [21] 陈启冬,许立英,刘 阳,等. 不同土性地基考虑 SSI 效应的隔震结构地震响应分析[J]. *水利与建筑工程学报*,2021,19(2):149-154,214.