

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210616005

某在建城际铁路明洞段地基回填土缓坡 稳定性研究*

董聪慧¹, 阎长虹¹, 娄志会², 郭建强³, 郭书兰¹,
俞良晨¹, 万佳佳², 张文龙²

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 2. 北京城建中南土木工程集团有限公司, 北京 102200;
3. 南京地铁集团有限公司, 江苏 南京 210008)

摘要: 南京某在建城际铁路隧道明洞段穿越矿山废弃宕口回填区, 受极端强降雨和明洞地基开挖卸荷影响, 矿坑南侧陡崖下部的截排水沟多处出现变形裂缝, 因此, 宕口填土边坡稳定性关系到在建铁路的施工和运营安全。对此, 在地质分析的基础上, 运用数值模拟方法对持续性强降雨天气条件下回填土缓坡渗流场、位移场的变化规律及边坡稳定性进行了研究, 探讨不同降雨类型对缓坡稳定性的影响。结果表明, 在持续性强降雨天气条件下, 降水入渗使缓坡下滑力逐渐增大, 同时在弱透水层中形成暂时性承压水, 产生渗流力和浮托力, 在其共同作用下, 边坡稳定性显著降低, 出现边坡失稳; 前峰型降雨和均布型降雨在较短时间内即会对边坡稳定性造成很大影响, 而中峰型降雨和后峰型降雨对边坡稳定性的影响在降雨后期逐渐显现。故此, 需要对明洞隧道地基进行加固处理, 采取有效的截排水措施, 以保证城际铁路施工及运营安全。

关键词: 回填土缓坡; 城际轨道交通工程; 渗流; 暂时性承压水; 边坡稳定性

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)04-0835-10

Stability of a Gentle Backfill Slope in the Open Tunnel Section of an Intercity Railway under Construction

DONG Conghui¹, YAN Changhong¹, LOU Zhihui², GUO Jianqiang³, GUO Shulan¹,
YU Liangchen¹, WAN Jiajia², ZHANG Wenlong²

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. Beijing Urban Construction Zhongnan Civil Engineering Group Co., Ltd., Beijing 102200, China;

3. Nanjing Metro Group Co., Ltd., Nanjing 210008, China)

Abstract: The open cut section of an excavating intercity railway tunnel in Nanjing crosses the backfill area of a large abandoned mine. Due to the influence of extremely heavy rainfall and excavation unloading of open cut tunnel foundation, many deformation cracks appeared in the intercepting and drainage ditch at the lower part of the steep cliff on the south side of the mine. Therefore, the stability of the

* 收稿日期: 2021-06-16; 修回日期: 2021-07-31

基金项目: 江苏省科技厅社会发展面上项目(BE2019705)、南京地铁宁句城际科研项目(2020200595)资助

作者简介: 董聪慧(1997—), 男, 硕士研究生。主要从事地质工程方面的研究。E-mail: mg1929068@smail.nju.edu.cn

通讯作者: 阎长虹(1959—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事水文地质工程地质研究与教学工作。

E-mail: yanqh@nju.edu.cn

backfill gentle slope is related to the construction and operation safety of the railway under construction. In order to solve this problem, on the basis of geological analysis, the numerical method is used to simulate and analyze the changes of the seepage field, displacement field and the slope stability of the gentle backfill slope under continuous heavy rainfall. The influence of different rainfall types on the stability of the gentle slope is discussed. The results show that under the condition of continuous heavy rainfall, precipitation infiltration makes the sliding force of the gentle slope increase gradually, and forms temporary confined water in the aquitard, which results in seepage force and buoyancy force. Under the combined action of the two forces, the slope stability decreases significantly and the slope instability occurs. Besides, it is found that the early-peak rainfall and uniform rainfall will affect the slope stability in a short time, while the influence of the mid-peak rainfall and late-peak rainfall on the slope stability gradually appears in the later stage. Therefore, it is necessary to reinforce the foundation of the open cut tunnel and take effective measures to intercept and drain water in order to ensure the safety of the intercity railway during the construction and operation periods.

Keywords: gentle backfill slope; intercity railway engineering; seepage; temporary confined water; slope stability

0 引言

我国是一个多山地的国家,滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害频繁发生,对国民经济建设和人民的生命财产安全带来非常大的威胁。据统计,我国已发生滑坡中90%与降雨作用有关^[1-4]。近年来,宁镇地区极端天气频发,降雨时长和降雨强度显著增加,导致该地区山前缓坡发生多起地质灾害^[5-7]。随着城市建设的不断发展,一些重要的铁路、公路工程从山区及山前缓坡地段穿越,山前缓坡的稳定性直接关系到这些工程建设及运营安全。因此,在工程建设中应加强线状工程穿越区缓坡稳定性的研究。

从目前国内外大量滑坡地质灾害成因机制研究资料来看,强降雨是影响边坡稳定性最主要因素。降雨通过坡面冲刷、地下水渗流等形式对边坡的稳定性造成不利影响,其中坡面冲刷造成边坡表层岩土体物理力学性质发生改变,引起局部破坏,坡体内地下水渗流则会对边坡整体稳定性产生不利影响,甚至可能造成边坡整体发生滑移破坏^[8-9]。许建聪等^[10]结合工程实践,研究了碎石土的物理力学及渗透特性,采用数理统计分析法和不平衡推力法,分析了持续性强降雨条件下碎石土滑坡破坏机制。S. E. Cho^[11]通过对浅层堆积层滑坡进行概率稳定性分析,研究了渗透系数的空间变异性及降雨诱发非饱和边坡破坏的机制。朱元甲等^[12]通过数值模拟方法,研究了间歇性降雨对缓倾滑坡稳定性

的影响。张泰丽等^[13]采用有限元法,模拟了台风暴雨时等强度降雨和渐变强度降雨下边坡地下水暂态渗流场及稳定性。

过去就坡体内地下水渗流对边坡稳定性影响的研究主要是按潜水渗流场进行分析,地下水位最高达到其坡面。近年来,有关学者开始研究承压水对边坡稳定性的影响。阎长虹等^[5]研究了暂时性承压水诱发山前缓坡间歇性滑坡的形成机理。孙红月等^[14]通过构建包含隔水层的边坡模型,模拟了隔水层对边坡稳定性的影响。赵权利等^[15-18]分析了缓倾滑坡中承压水形成机理,建立承压水边坡模型,通过受力和渗流场分析,得到承压水孔压时空分布规律和作用范围及其对坡体稳定性的影响,并对滑坡启动判据进行了修正。J. J. Jiao^[19-20]等分析了香港地区风化火成岩中承压水的形成机制,并提出概念模型解释了承压水影响下边坡失稳机理。W. C. Li等^[21]通过建立概念模型,解释了风化裂隙岩层中延时降雨滑坡的触发机制。

近年来,南京地区极端强降雨天气明显增多,由此诱发了一系列的中型-大型滑坡地质灾害,给当地政府和居民带来了巨大的经济损失。本文以某城际铁路明洞段回填土缓坡为研究对象,结合现场工程地质条件,研究持续性强降雨天气条件下边坡不同位置处坡体内地下水渗流场、位移场特征及其边坡稳定性,为这一缓坡的治理、地铁隧道设计与施工提供科学依据。

1 边坡工程地质特征

1.1 研究区概况

南京某在建城际铁路拟从一大型矿山废弃宕口回填土缓坡上通过,该回填土缓坡位于南京市江宁区宁杭公路(S122)南侧,处于城际铁路隧道西侧

人口位置,该矿坑于2016年前后分三期进行了回填。山体整体呈现上陡下缓的地貌形态,回填区地形较缓,矿坑回填区后缘基岩裸露陡峭,受长期风化剥蚀作用影响,岩体中裂隙发育,为地表水入渗提供了良好的入渗通道,如图1所示。2020年夏季该回填土缓坡受极端强降雨及路基开挖卸荷影响,陡坎下部的坡面及截排水沟多处出现裂缝,如图2所示。

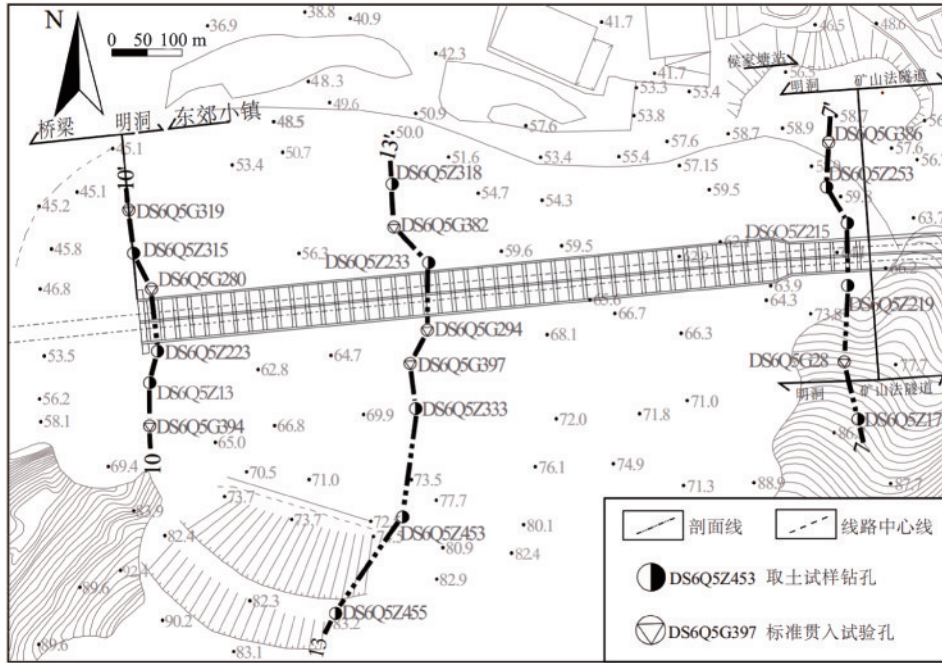


图1 明洞段场地回填土缓坡平面

Fig.1 Plan for the gentle backfill slope in the open cut tunnel section



图2 缓坡后缘截排水沟裂缝发育情况

Fig.2 Development of cracks in the intercepting and drainage ditch at the rear of the gentle slope

1.2 研究区地层岩性特征

工程地质勘察资料显示,城际铁路明洞段穿越大型矿山废弃宕口回填土缓坡,其地层岩性主要由人工填土和下伏基岩组成。宕口后缘(南侧)基岩中节理、裂隙发育,局部岩体破碎,填土边坡表层为粉质黏土夹风化形成的大小不等的岩块,强度低,结构松散。在废弃矿坑治理过程中分3期填筑,第一期填筑的杂填土透水性较好,后两期填土透水性相对较差。填土之下的矿坑受采矿扰动的影响,岩体较为破碎,其透水性较好。总体来看,回填土缓坡工程性质差异性较大。综合考虑宕口岩土体的物理力学性质、成因、形成时代等因素,可将宕口及坡体岩土层分为18个工程地质层组。填土边坡的典型工程剖面如图3所示,坡体地层岩性及其物理力学性质指标见表1。从图3可以看出,对宕口边坡稳定性影响的主要有5个工程地质层组。

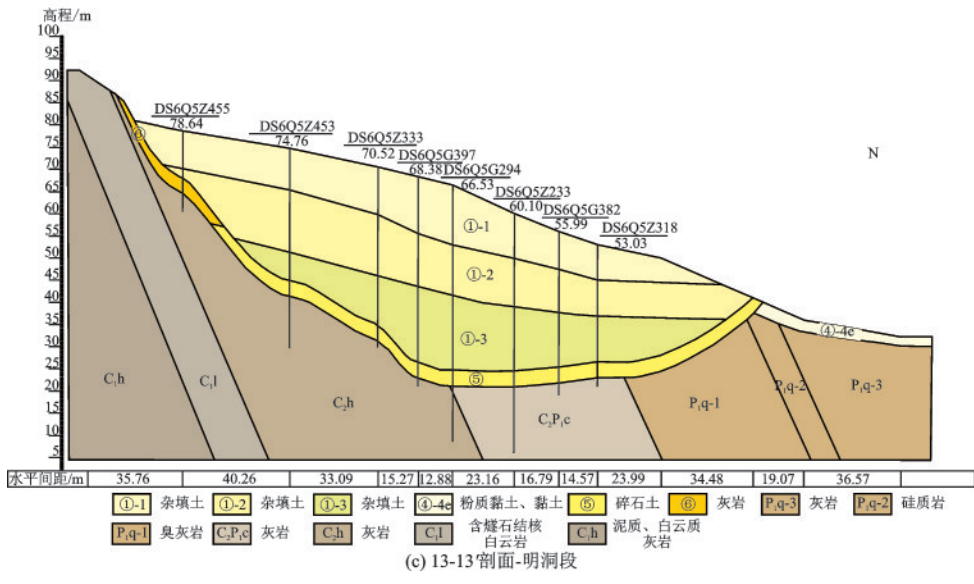
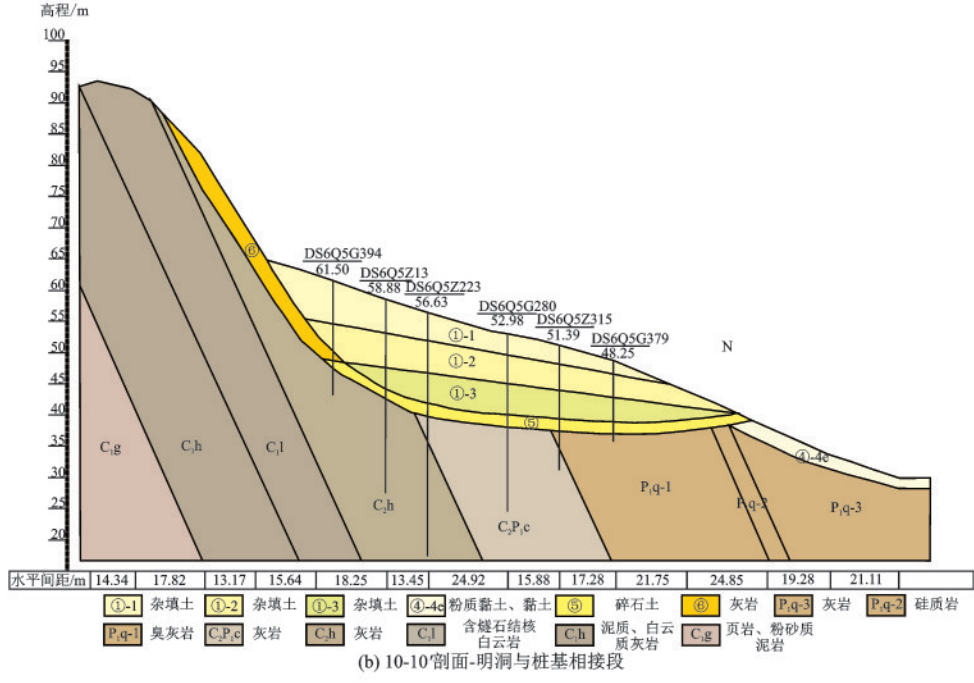
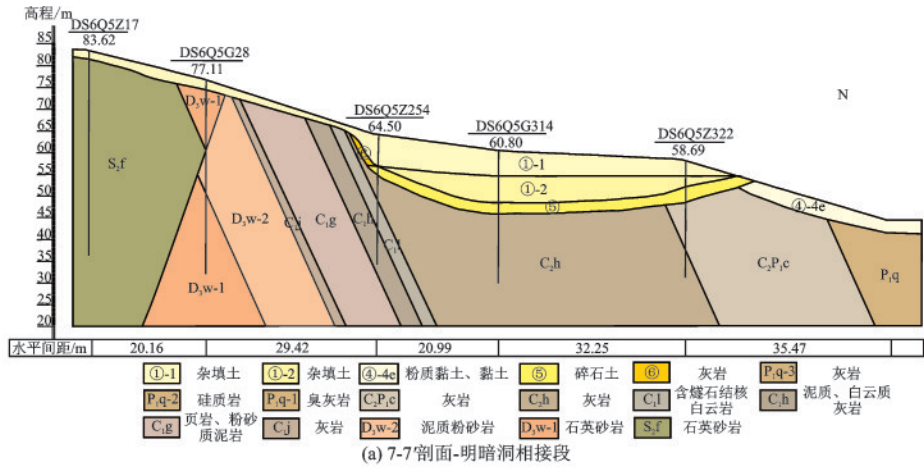


图3 回填土缓坡工程地质横剖面

Fig.3 Engineering geology cross-section of the gentle backfill slope

表1 岩土层性质参数

Table 1 Geotechnical parameters

层号	地层名称	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	饱和含水率/ %	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	渗透系数/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
①-1	杂填土	19.4	38.95	6	12	4.48	0.33	3×10^{-6}
①-2	杂填土	19.6	37.5	4	13	5.89	0.34	5×10^{-6}
①-3	杂填土	20.0	36.8	4	15	6.47	0.32	5×10^{-5}
④-4e	粉质黏土、黏土	20.1	40.3	19	25	7.89	0.31	5×10^{-8}
⑤	碎石土	23.6	40	110	34	28.11	0.29	2×10^{-4}
⑥	灰岩	26.8	—	140	34	5 000	0.26	3×10^{-3}
P ₁ q-3	灰岩	27.1	—	200	40	12 400	0.24	2×10^{-7}
P ₁ q-2	硅质岩	27	—	105	48	46 800	0.21	5×10^{-9}
P ₁ q-1	臭灰岩	26.3	—	180	41	11 500	0.24	1.5×10^{-7}
C ₂ P ₁ c	灰岩	26.5	—	200	39	12 400	0.24	9.5×10^{-8}
C ₂ h	灰岩	26.5	—	190	37	12 400	0.24	2×10^{-7}
C ₁ l	含燧石结核白云岩	25.9	—	175	35	15 000	0.22	3×10^{-7}
C ₁ h	泥质、白云质灰岩	25.3	—	210	25	11 800	0.19	1×10^{-6}
C ₁ g	页岩,粉砂质泥岩	24.3	—	70	33	2 000	0.28	3×10^{-7}
C ₁ j	灰岩	26.9	—	240	38	13 000	0.24	5×10^{-8}
D ₃ w-2	泥质粉砂岩	26.0	—	80	34	3 600	0.28	3×10^{-6}
D ₃ w-1	石英砂岩	25.8	—	90	33	3 000	0.28	3×10^{-7}
S ₂ m	石英砂岩	26.5	—	170	35	4 500	0.25	2.5×10^{-6}

注:⑥层灰岩为石炭系黄龙组灰岩,受采矿开挖扰动及长期风化作用影响,岩体中裂隙发育,岩石破碎,渗透系数远大于完整灰岩;P₁q-3层灰岩为二叠系栖霞组上段灰岩;C₂P₁c层为石炭系-二叠系船山组灰岩;C₂h层为石炭系黄龙组灰岩;C₁j层为石炭系金陵组灰岩;P₁q-3层、C₂P₁c层、C₂h层、C₁j层灰岩受扰动及风化作用影响较小,完整性好,强度高,渗透系数小

1.3 研究区水文地质特征

根据工程地质勘察资料,场区地下水类型主要有第四系松散层孔隙水和基岩裂隙水。孔隙潜水赋存于边坡表层的填土层中,受大气降水补给和基岩裂隙水侧向补给。填土下伏岩层及坡体后缘裸露基岩为降雨提供了良好渗流通道,有利于降雨入渗及地下水径流。在极端强降雨天气条件下,雨水沿山体基岩中裂隙渗入坡体,地下水赋存于渗透性较好的碎石土层和早期填筑的①-3层杂填土层内,由于边坡表层为透水性较差的填土,即粉质黏土、黏土;且坡脚基岩为透水性较差的泥灰岩,坡体地下水排泄受阻,这将会在强降雨条件下使坡体地下水位快速升高,由此在坡体内形成暂时性承压水。

2 影响边坡稳定性的主要因素

近年来宁镇地区山前缓坡发生滑移地质灾害多是由暂时性承压水引起的。该地区受到极端强

降雨影响时,降水渗入坡体后主要沿渗透系数较大的地层渗流,由于其上覆、下伏地层及地下水渗流出口处岩土体渗透系数较小,地下水短时间内无法排出,使坡体内地下水位持续升高,部分地段地下水位线超过了透水层顶板,形成了暂时性承压水^[5,7,22-23]。故此,下又将从场区地形地貌、地层结构、降雨及人类工程活动等因素,对该回填土缓坡的稳定性进行分析。

2.1 地形地貌与地层结构

整体边坡的地形特征表现为上陡下缓的坡形,其矿山边坡可以分为上下两个部分。上部基岩裸露,为采矿预留的岩层挡墙,受采矿开挖扰动及长期风化作用影响,岩体中断裂裂隙发育,岩石破碎,为降雨提供了良好的入渗通道。其下部为宕口填土边坡,坡度较缓,属典型填土缓坡。

从矿坑回填土缓坡地层结构来看,上部填土以细颗粒土为主,其渗透系数较小,强降雨时,雨水短时间内无法渗入坡体内部,可视为相对隔水层,最下部的填土成分复杂,以粗颗粒为主,结构松散,渗

透系数较大,可视为弱透水层。而矿坑填土层以下为采石残留的矿石矿渣,宕口底部以下为基岩,残留岩体受矿山开采扰动作用影响,裂隙发育,完整性较差,透水性较好,有利于地下水的径流。在其之下岩体完整性较好,渗透系数小,透水性弱。这种特殊的地层结构为极端降雨天气时形成暂时性承压水提供了良好的水文地质基础。

2.2 降雨入渗的影响

从已有降雨性滑坡成因机理的研究看,降水入渗对边坡稳定性的影响主要有两个方面:一是降水强度及持续时间,二是入渗通道。在持续性强降雨过程中,降雨沿边坡后缘破碎岩体中的节理裂隙及层面渗入坡体内并通过径流进入缓坡内弱透水层中。上覆回填土及下伏基岩透水性较差,而且坡脚处第四系黏土、粉质黏土及栖霞组硅质岩渗透系数较小,不利于地下水的排泄。特别是工程建设活动进一步降低了坡脚的透水性,使得坡体内地下水排出受阻。极端强降雨入渗使坡体内地下水位快速抬升,在透水性较好的碎石土和第一期回填土层中形成暂时性承压水,随着降雨的持续,地下水位不断升高,而其下滑力、渗流力和浮托力不断增大,导致缓坡抗滑力减小、边坡稳定性下降。

2.3 人类工程活动的影响

宕口填土边坡坡脚为宁杭公路及其辅路,路基的加深加宽及路面的大范围硬化处理,降低了坡脚的透水性,阻塞了边坡内地下水的排泄,加剧了坡体内地下水位升高,对边坡稳定性带来极其不利的影

响。轨道交通工程建设过程中,土方开挖、覆土、桩基施工和机械设备产生的振动荷载等引发边坡后缘裂隙岩体和回填土结构松动,对边坡稳定造成不利影响。

3 地下水渗流与边坡位移场数值分析

3.1 水文地质模型的建立

基于回填土缓坡工程地质剖面图建立回填土缓坡渗流场—应力场耦合模型,进行回填土缓坡地下水渗流场及其稳定性计算。本文以南京地区年平均降雨量作为初始条件,以年平均地下水位作为

两侧常水头边界,采用稳态分析方法给出边坡初始孔隙水应力分布。在此基础上,根据如图4所示的南京地区2020年7月连续16天的降雨量进行瞬态分析,计算得到降雨过程中边坡内地下水渗流场变化,并将其分析结果导入Sigma/W和Slope/W模块中计算分析持续降雨条件下边坡位移场和稳定性系数变化情况。

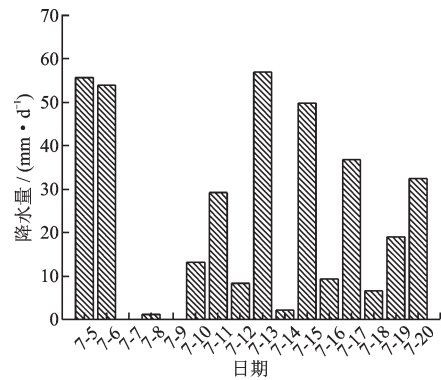


图4 南京地区2020年7月降雨量
Fig.4 Rainfall in Nanjing in July 2020

这里选取10-10'剖面,采用数值模拟计算给出基于2020年7月的持续性强降雨过程中不同时间节点的地下水渗流场及其位移场,进行降雨前、降雨过程中边坡内孔隙水应力分布和边坡位移分析,如图5所示。

3.2 边坡渗流分析

由图5可以看出,降雨开始前,缓坡内地下水位位于碎石土和①-3层回填土中,上覆回填土处于非饱和状态。在强降雨条件下坡面水流沿边坡后缘裸露节理岩体的裂隙和坡面渗入坡体内。强降雨初期,降水主要沿宕口后缘渗入坡体内,边坡后缘地下水位迅速升高。当降雨达到第3d时,边坡内地下水受降雨的补给量较小,在水力梯度的作用下,地下水向孔隙水应力较小的边坡前缘渗流,引起坡体内地下水水位抬升和回填土层内土体孔隙水应力升高;强降雨达到6d时,地下水从饱和区向非饱和区域渗流,地下水位持续抬升,浅层土体暂态饱和区面积不断扩大,部分地段地下水位抬升至坡面以上,在坡体下部形成暂时性承压水;降雨达到10d时,暂时性承压水的作用范围基本达到整个填土缓坡区域;降雨至16d时,整个缓坡坡体均达到暂态饱和,地下水位达到缓坡顶部,暂时性承压水作用于整个填土缓坡区域。

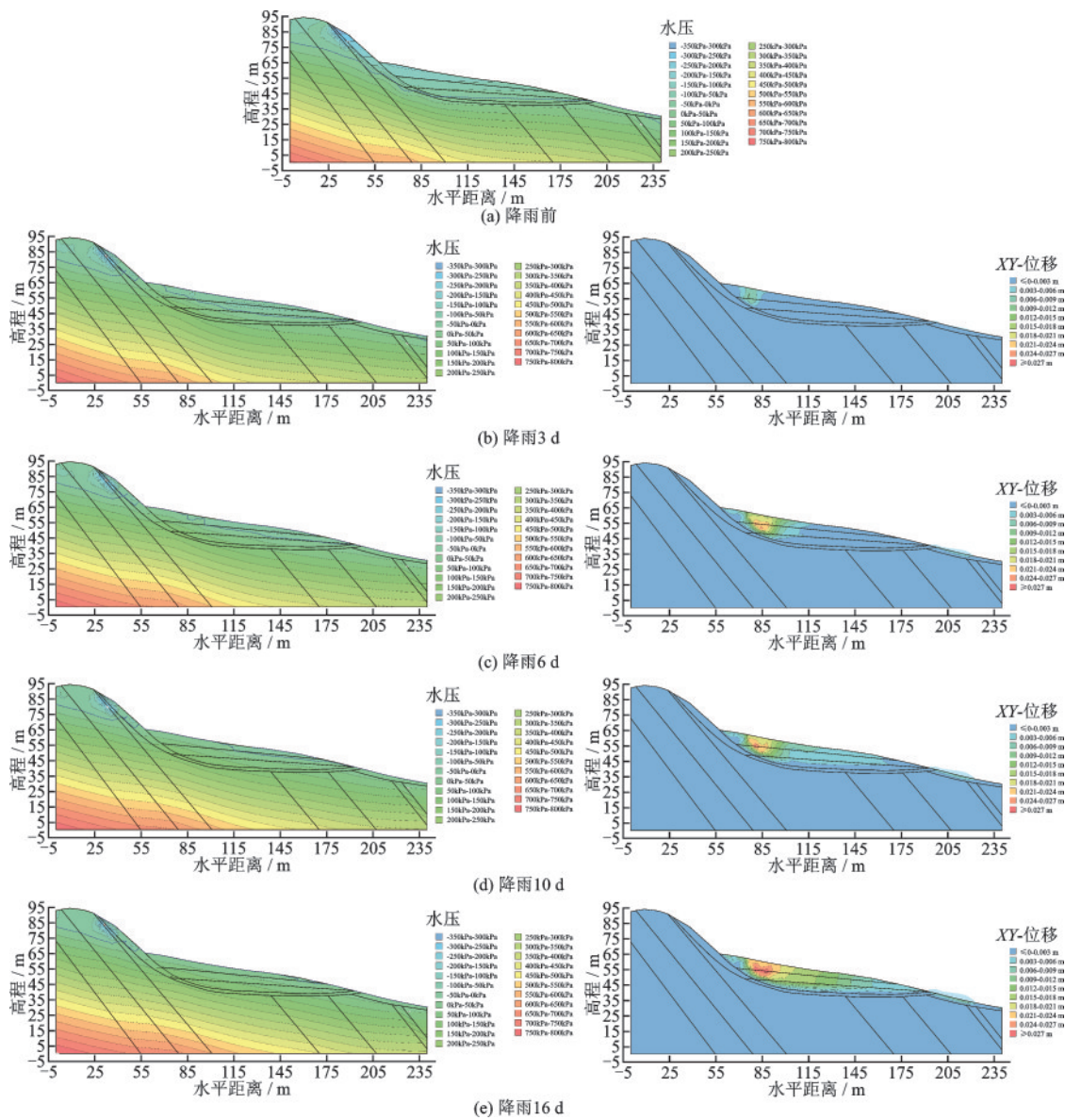


图5 10-10'剖面孔隙水应力分布特征与边坡位移变化

Fig.5 Distribution characteristics of pore water pressure and variation of slope displacement in profile 10-10'

3.3 边坡变形分析

在降雨达到第3 d时边坡后缘部分位置地下水位线即超过了①-3层回填土层的顶板,缓坡开始产生微小变形。当降雨达到第6 d时,缓坡后缘受暂时性承压水产生的浮托力作用,抗滑力减小,缓坡后缘较大范围内产生了变形。降雨持续至第10 d时,边坡后缘滑动区范围和变形值进一步增大,与此同时,缓坡前缘土体较薄位置被暂时性承压水顶裂。当降雨达到第16 d时,在①-2层与①-3层填土接触面形成整体滑动面,缓坡后缘的破坏区与前缘贯通,填土边坡沿滑动面产生滑动。

4 边坡稳定性评价

4.1 持续性降雨情况下边坡稳定性计算

基于上述地质分析和坡体渗流场计算结果,假定滑动面位于渗透系数较大的①-3层回填土与渗透系数较小的①-2层回填土的接触面上,采用Morgenstern-Price分析法对图4所示持续降雨条件下边坡稳定性的变化情况进行分析,结果如图6所示。

在降雨开始前,10-10'与13-13'剖面的边坡稳定性系数均大于1.35,满足规范中对稳定性系数的要求,边坡处于稳定状态。

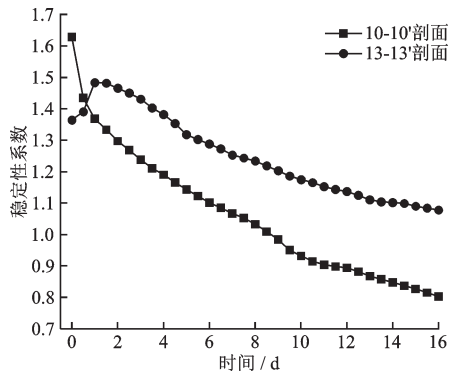


图6 持续性降雨情况下边坡稳定性系数与降雨时间关系
Fig.6 Relationship between slope stability coefficient and rainfall time during continuous rainfall

降雨开始后的前2 d,研究区即遭受了日降雨量超过 50 mm/d 的暴雨。大量降雨入渗引起坡体内地下水位快速升高至滑动面附近,水的软化作用使土体抗剪强度减小,10-10'剖面稳定性系数迅速下降。降雨入渗使土体自重增加,13-13'剖面在降雨第1 d,抗滑力增加,边坡稳定性系数不降反升,降雨第2 d后,边坡稳定性系数开始急剧下降。降雨进入第3 d后,日降雨量有所减小,边坡稳定性系数的下降速率减缓。雨水渗入坡体后,暂态饱和区面积和暂时性承压水作用区域不断扩大,坡体内产生了浮托力、渗流力和下滑力,在其作用下,滑体浮起,滑动面上的摩擦系数显著降低,抗滑力减小,引起边坡稳定性持续下降。13-13'剖面在降雨结束时,稳定性系数降至1.075,处于极限状态;10-10'剖面在降雨进行到第9 d时,稳定性系数已降至1.0左右,处于不稳定状态,伴随降雨的持续,稳定性系数仍在继续下降,至降雨结束时,稳定性系数降至0.8,边坡发生破坏。

4.2 不同降雨类型对边坡稳定性的影响

2015~2020年每年的7~8月,南京地区均经历了不同程度的持续性强降雨过程,如图7所示。2015年及2020年,降雨初期降雨量较大,随着降雨过程的持续,日降雨量逐渐减小。2016年,日降雨量最大出现在持续性降雨过程的中后期,2019年的持续性降雨过程中,日降雨量并未有明显的峰值,日降雨量分布较为均匀。

据此,将南京地区近年来的持续性强降雨分为均布型、前峰型、中峰型和后峰型四种降雨类型。以此控制总降雨量为374.9 mm,分析不同降雨类型对回填土缓坡稳定性的影响,并与2020年7月的强降雨过程进行对比,计算结果如图8所示。

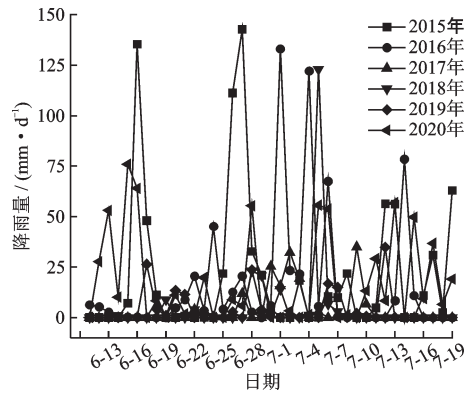


图7 2015~2020年7~8月日降雨量
Fig.7 Daily rainfall from July to August in 2015-2020

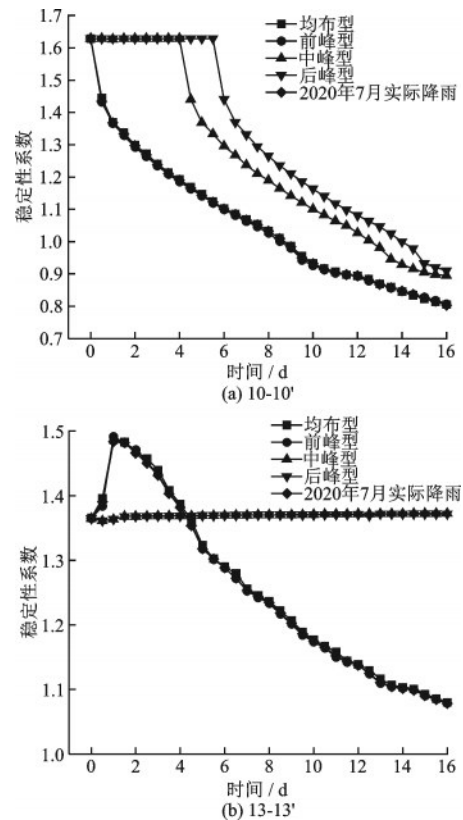


图8 不同降雨类型条件下边坡稳定性系数变化
Fig.8 Variation of slope stability coefficient with different rainfall types

从图8可以看出,前峰型降雨在降雨之初就经历了47 mm/d的强降雨,大量的降水渗入坡体内来不及排出导致在降雨后短时间内,边坡稳定性系数即产生显著变化。降雨进行到第9 d时,10-10'剖面的稳定性系数接近1.0,降雨持续进行,稳定性系数持续下降,边坡产生破坏。13-13'剖面在降雨结束时稳定性系数也已下降至1.07,边坡处于临界状态。2020年7月降雨为前峰型,所以研究区边坡稳定性系数变化与其一致。

中峰型和后峰型降雨在降雨之初,降雨量较小,降雨渗入坡体后地下水位缓慢抬升,边坡稳定性未发生变化。中峰型降雨进行至第4 d时,累计降雨47 mm,日降雨量达到了23.5 mm/d,10-10'剖面边坡稳定性系数开始下降,降雨进行至第13 d时,稳定性系数小于1.0,边坡处于不稳定状态。后峰型降雨其稳定性系数开始下降的时间晚于中峰型降雨,降雨进行至第6 d,累计降雨达到53 mm,日降雨量增至17.625 mm/d时,10-10'剖面边坡稳定性系数才产生了显著下降,至第14 d时,稳定性系数小于1.0,边坡处于不稳定状态。

综上,在持续性降雨过程中,降雨类型对边坡稳定性影响存在明显差异,其中,前峰型降雨和均布型在降雨开始较短时间内即会对边坡稳定性造成影响,而中峰型降雨和后峰型降雨,当累计降雨量达到一定值且降雨强度达到中雨以上时,对边坡稳定性的影响才会逐渐显现。

5 结 论

采用数值计算方法分析了极端强降雨对南京某城际铁路明洞段场地回填土缓坡稳定性的影响,主要探讨了不同降雨类型工况下,坡体内地下水渗流场、位移场变化规律,在此基础上对回填土缓坡稳定性进行了评价。取得以下主要结论:

(1)该回填土缓坡后缘裸露的基岩裂隙发育,岩体破碎,形成了良好的降雨入渗通道。在强降雨天气条件下,坡面径流沿破碎岩体的节理裂隙及层面渗入坡体内,使地下水位升高,在回填土坡体的弱透水层之间形成暂时性承压水,对回填土缓坡体产生浮托力作用,使边坡稳定性系数迅速降低。

(2)降雨渗入坡体后,在暂时性承压水作用下,边坡后缘部位首先产生变形。随着降雨的持续,边坡滑动区范围和变形值不断增大。最终,在弱透水层与不透水层界面形成整体滑动面,边坡沿该滑动面产生滑动。

(3)在降雨量和降雨历时相同的条件下,对于前峰型和均布型降雨,初期降雨强度较大,降雨沿后缘裂隙渗入坡体后引起地下水位迅速升高,形成暂时性承压水,导致在较短时间内即对边坡稳定性造成影响;而在中峰型和后峰型降雨条件下,初期降雨量较小,地下水位上升缓慢,在降雨中后期日降雨量逐渐增加接近峰值,对其边坡稳定性的影响才逐渐显现。

根据上述研究结论,对边坡治理提出如下

建议:

(1)本填土缓坡失稳主要由暂时性承压水诱发,因此,可考虑在坡顶采取截排水措施,减少降水入渗,特别是减少裸露基岩部位降雨入渗。

(2)在坡体中下部地下水位较高处设置降水井进行降水减压,并在边坡前缘设置地下水渗出通道,将坡体内地下水排出。

(3)加强雨季雨量及地下水位的监测工作,保障隧道明洞段施工和后期运营安全。

参考文献:

- [1] 黄润秋,徐则民,许模.地下水的致灾效应及异常地下水诱发地质灾害[J].地球与环境,2005,33(3):1-9. Huang R Q, Xu Z M, Xu M. Hazardous effects of underground water and extraordinary water flow-induced geohazards[J]. Earth and Environment, 2005,33(3):1-9. (in Chinese)
- [2] 黄发明,殷坤龙,蒋水华,等.基于聚类分析和支持向量机的滑坡易发性评价[J].岩石力学与工程学报,2018,37(1):156-167. Huang F M, Yin K L, Jiang S H, et al. Landslide susceptibility assessment based on clustering analysis and support vector machine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018,37(1):156-167. (in Chinese)
- [3] 胡涛,樊鑫,王硕.考虑不同降雨概率和雨型的滑坡渗流场及稳定性变化率特征分析[J].科学技术与工程,2020,20(14):5521-5529. Hu T, Fan X, Wang S. Analysis on landslide seepage and change rate of stability coefficient of different rainfall probability and rainfall type[J]. Science Technology and Engineering, 2020,20(14):5521-5529. (in Chinese)
- [4] 李媛,孟晖,董颖,等.中国地质灾害类型及其特征——基于全国县市地质灾害调查成果分析[J].中国地质灾害与防治学报,2004,15(2):29-34. Li Y, Meng H, Dong Y, et al. Main types and characteristics of geo-hazard in China-Based on the results of geo-hazard survey in 290 counties [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004,15(2):29-34. (in Chinese)
- [5] 阎长虹,许宝田,吴澄宇,等.宁镇地区山前缓坡地层结构及其稳定性分析[J].工程地质学报,2019,27(1):48-54. Yan C H, Xu B T, Wu C Y, et al. The stratigraphic structure and stability analysis in gentle slopes of piedmontat Ningzhen area[J]. Journal of Engineering Geology, 2019,27(1):48-54. (in Chinese)

- [6] 燕晓莹, 阎长虹, 郜泽郑. 镇江地区降雨导致滑坡规律统计分析[J]. 高校地质学报, 2019, 25(5): 772-778.
Yan X Y, Yan C H, Gao Z Z. Statistical analysis of landslides law caused by rainfall in Zhenjiang area [J]. Geological Journal of China Universities, 2019, 25(5): 772-778. (in Chinese)
- [7] 俞良晨, 阎长虹, 郭书兰, 等. 受暂时性承压水影响的南京游子山滑动机制分析[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(1): 133-141.
Yu L C, Yan C H, Guo S L, et al. Analysis of sliding mechanism of Youzi Mountain affected by temporary confined water in Nanjing [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2020, 47(1): 133-141. (in Chinese)
- [8] 施斌, 阎长虹. 工程地质学[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
Shi B, Yan C H. Engineering Geology [M]. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese)
- [9] 卢廷浩. 土力学[M]. 2版. 南京: 河海大学出版社, 2005.
Lu T H. Soil Mechanics [M]. 2nd ed. Nanjing: Hohai University Press, 2005. (in Chinese)
- [10] 许建聪, 尚岳全. 碎石土渗透特性对滑坡稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2264-2271.
Xu J C, Shang Y Q. Influence of permeability of gravel soil on debris landslide stability [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2264-2271. (in Chinese)
- [11] Cho S E. Probabilistic stability analysis of rainfall-induced landslides considering spatial variability of permeability [J]. Engineering Geology, 2014, 171: 11-20.
- [12] 朱元甲, 贺拿, 钟卫, 等. 间歇型降雨作用下缓倾滑坡稳定性数值模拟[J]. 灾害学, 2020, 35(3): 208-212.
Zhu Y J, He N, Zhong W, et al. Numerical simulation of the stability of gently landslides under intermittent rainfall [J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(3): 208-212. (in Chinese)
- [13] 张泰丽, 周爱国, 孙强, 等. 台风暴雨条件下滑坡地下水渗流特征及成因机制[J]. 地球科学, 2017, 42(12): 2354-2362.
Zhang T L, Zhou A G, Sun Q, et al. Characteristics of the groundwater seepage and failure mechanisms of landslide induced by typhoon rainstorm [J]. Earth Science, 2017, 42(12): 2354-2362. (in Chinese)
- [14] 孙红月, 吴红梅, 李焕强, 等. 松散堆积土中的隔水层对边坡稳定性的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(10): 2016-2020.
Sun H Y, Wu H M, Li H Q, et al. Effect of temporal and spatial variation of pore water pressure induced by confined groundwater on slope stability [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(10): 2016-2020. (in Chinese)
- [15] 赵权利, 孙红月, 王智磊, 等. 承压水对平推式滑坡的作用分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 762-769.
Zhao Q L, Sun H Y, Wang Z L, et al. Influence of confined water on translational landslide [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 762-769. (in Chinese)
- [16] 赵权利, 孙红月, 尚岳全, 等. 承压水孔压的时空变化对边坡稳定性影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(8): 1366-1372.
Zhao Q L, Sun H Y, Shang Y Q, et al. Effect of temporal and spatial variation of pore water pressure induced by confined groundwater on slope stability [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2013, 47(8): 1366-1372. (in Chinese)
- [17] 赵权利. 缓倾滑坡中承压水作用机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
Zhao Q L. Research on mechanism of confined groundwater in the gently inclined landslide [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- [18] 赵权利, 尚岳全, 支墨墨. 平推式滑坡启动判据的修正[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(2): 596-602.
Zhao Q L, Shang Y Q, Zhi M M. Modification of the start-up criterion of translational gliding landslide [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44(2): 596-602. (in Chinese)
- [19] Jiao J J. A confined groundwater zone in weathered igneous rocks and its impact on slope stability [C] // Proceedings of the International Symposium on Hydrogeology and the Environment. Wuhan: [s.n.]. 2000: 1-8.
- [20] Jiao J J, Wang X S, Nandy S. Confined groundwater zone and slope instability in weathered igneous rocks in Hong Kong [J]. Engineering Geology, 2005, 80(1-2): 71-92.
- [21] Li W C, Dai F C, Wei Y Q, et al. Implication of subsurface flow on rainfall-induced landslide: a case study [J]. Landslides, 2016, 13(5): 1109-1123.
- [22] 郜泽郑. 镇江地区降雨诱发滑坡机制与降雨阈值研究[D]. 南京: 南京大学, 2019.
Gao Z Z. Study on the mechanism and rainfall threshold of rainfall-induced landslide in Zhenjiang area [D]. Nanjing: Nanjing University, 2019. (in Chinese)
- [23] 刘羊. 间歇性蠕动滑坡中暂时性承压水的作用机理研究[D]. 南京: 南京大学, 2019.
Liu Y. Research on mechanism of temporary confined groundwater in the intermittent creep landslide [D]. Nanjing: Nanjing University, 2019. (in Chinese)

(本文编辑: 赵霞)