

降雨-堆载耦合作用下深厚填土边坡 稳定性分析

杨子跃¹, 王济君¹, 徐 鹏²

(1. 中建三局工程设计有限公司, 湖北 武汉 430074; 2. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

摘要:以湖北咸宁某深厚填土边坡为工程背景,采用Geo-studio数值模拟软件,进行了降雨-堆载耦合作用下深厚填土边坡稳定性数值模拟分析,研究了降雨作用下边坡内部孔隙水压力分布特征,探究了降雨持续时间及坡顶堆载对边坡稳定系数的影响规律,结果表明:初始边坡在降雨及坡顶堆载条件下处于欠稳定状态,且边坡稳定系数随着降雨时间的增加逐渐减小,与降雨因素相比,坡顶堆载对该处边坡稳定性影响更大。据此提出了刷坡减载及防水护坡的边坡防护方案,边坡稳定性数值模拟分析结果表明处理后边坡稳定性较好,满足建筑工程要求,同时也验证了数值分析结果的合理性和有效性。

关键词:降雨-堆载耦合;深厚填土边坡;稳定性;数值模拟;刷坡减载

中图分类号:TU43 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)04-0094-09

Stability analysis of deep fill slope under the influence of rainfall-surge coupling

YANG Ziyue¹, WANG Jijun¹, XU Peng²

(1. China Construction Third Bureau Engineering Design Co., Ltd, Wuhan Hubei 430074, China;

2. ChangJiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: This paper takes a deep fill slope in Xianning Hubei as the construction background. The numerical simulation software—Geo-studio was adopted to analyze the influence of rainfall-surge coupling effect on the stability of deep fill slope, the pore water pressure distribution inside the slope and the influence of constant rainfall and surcharge at the top of slope on the stability coefficient were also analyzed. The results showed that the original slope was in metastable state under the condition of rainfall and surcharge at the top of slope, the stability coefficient decreased with the rainfalls time, compared with the constant rainfall, the surcharge load had a greater impact on the stability of fill slope. To the end, a reinforcement scheme of a slope scouring and load reduction and waterproof surface was proposed. The numerical simulation results confirmed the feasibility of the scheme, which meet the requirement of the construction, meanwhile, the rationality and validity of the simulation results were verified.

Key words: rainfall-surge coupling; deep fill slope; stability; numerical simulation; slope scouring and load reduction

0 引言

边坡失稳作为世界三大地质灾害之一^[1],近年来受到地质工作者的广泛关注,已有研究结果表

明,降雨作用是导致和诱发边坡失稳的重要因素,许多工程案例表明边坡失稳往往发生在雨季^[2-3]。而在建筑工程中,高填深挖边坡屡见不鲜,由于填

收稿日期:2022-12-08; 修回日期:2023-03-14 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.04.013

第一作者:杨子跃,男,1986年生,汉族,高级工程师,注册土木工程师(岩土),从事岩土工程设计、地质灾害治理等方面研究及设计工作,湖北省武汉市武昌区新时代商务中心东裙楼二楼,cscec3bkc@163.com。

引用格式:杨子跃,王济君,徐鹏.降雨-堆载耦合作用下深厚填土边坡稳定性分析[J].钻探工程,2023,50(4):94-102.

YANG Ziyue, WANG Jijun, XU Peng. Stability analysis of deep fill slope under the influence of rainfall-surge coupling[J]. Drilling Engineering, 2023,50(4):94-102.

土力学性质复杂,受降雨入渗及工程施工时机械荷载的影响,填土边坡极易在施工期间发生变形失稳破坏^[4],因此进行深厚填土边坡稳定性分析及施工前边坡防护方案评价对确保边坡施工安全具有非常重要的意义。

近年来,工程地质学者对降雨条件下边坡稳定性进行了深入研究。饶鸿等^[5]、吴志轩等^[6]采用有限元极限分析方法进行了降雨条件下边坡开挖稳定性分析,分析结果表明雨季施工边坡安全系数更低;蔡军等^[7]、蒋中明等^[8]基于FLAC^{3D}进行了降雨过程中边坡土体内部渗流场特征数值分析,研究了降雨入渗引起的边坡暂态饱和区变化过程;刘利等^[9]、李冰冰等^[10]、陈洪翠等^[11]采用Geo-studio分析了降雨入渗作用下边坡的稳定性,计算结果表明降雨入渗对高渗透性土体影响较为显著。部分学者也对特殊土边坡稳定性进行了研究,潘俊义等^[12]进行了不同雨强下黄土边坡降雨入渗现场试验与数值模拟分析,张良以等^[13]、靳福杰等^[14]进行了降雨条件下膨胀土边坡渐进破坏数值模拟研究。填土作为建筑边坡中常见工程材料,其力学性质也引起了工程地质工作者的广泛关注,陈正汉等^[15]总结了前人关于填土的研究成果,但并未将研究成果应用于边坡稳定性分析中。综上所述,目前关于降雨-堆载耦合作用下深厚填土边坡稳定性研究成果较少,进行深厚填土边坡稳定性数值模拟分析是十分必要的。

1 工程概况

1.1 边坡概况

某填筑边坡临近咸宁市咸安区大洲湖水域,该边坡由生态建设管理中心地块建筑填方形成,对原地形改变较大。根据建筑规划设计方案,填筑完成后将形成总体坡高最大12~13 m、总体坡度约1:1.32~1:3.00的人工填土边坡。由于填土未经压实处理,使得管理中心南岸一侧形成了高陡松散填土边坡,边坡局部陡坡地段虽采用了土工网护坡处理,但受土体松散及施工期间机械设备行走等的各种因素的影响,填土边坡顶部部分区域已出现了裂缝(见图1),同时考虑到秋季降雨影响,该边坡可能进一步发生失稳变形破坏,不利于管理中心的建设及运营安全。

根据现场调查,选取中心南侧高填土边坡为研究对象,运用Geo-seep/w及Geo-slope软件进行数

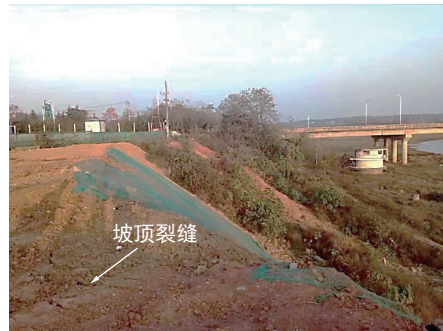


图1 边坡坡顶局部裂缝

Fig.1 The crack at the top of the slope

值分析,研究降雨入渗及坡顶堆载对边坡的影响规律,同时对刷坡防水的边坡防护设计方案进行评价。

1.2 工程地质条件

场区属垄岗地貌,大洲湖以北区域,地形主要为山地丘陵地貌,大洲湖范围内的湿地,属官埠河一级阶地,场区地势上属咸宁-横沟沉积盆地。场地地形为斜坡地形,南部近横沟河阶地,标高约19.5~22.0 m,管理中心南部广场经过填方处理后,标高约32.5~34.0 m,场地地形总体呈北高南低。

根据场地勘察资料,场地内地层上部主要为填土层,该层主要为近期施工形成,层厚0.6~10.0 m,下卧层为可塑状粉质粘土(Q_4^{al}),层厚1.30~3.40 m,局部分布有软塑状淤泥质粘土(Q_4^l),层厚1.3~2.9 m,下伏基岩为中风化砂砾岩(K_2-E),边坡工程地质剖面图如图2所示。

根据场地地质条件和地下水赋存条件、水理性质和水力特征,边坡区主要有松散堆积层上层滞水、基岩裂隙水两种地下水类型。上层滞水赋存于填土

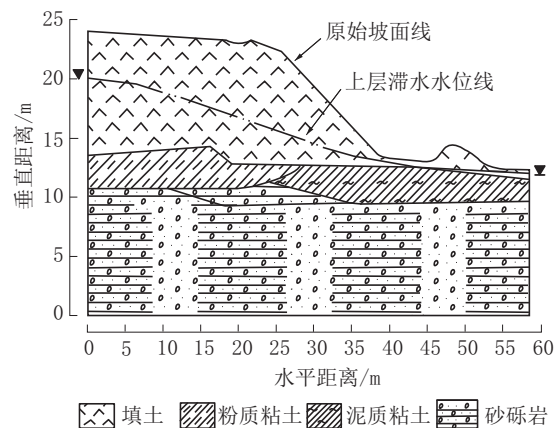


图2 边坡工程地质剖面

Fig.2 Engineering geological profile of the slope

层内,勘察期间测得上层滞水水位高程 19.85~21.39 m。从工程地质剖面图可以看出,边坡顶部分布有厚度较大的松散填土层,坡脚处填土层较薄,但下卧有强度较低的淤泥质粘土层,边坡有在填土层内滑动的可能,也可能穿过淤泥质粘土层发生失稳破坏。

边坡底部为横沟河,横沟河是当地最低侵蚀基准面,边坡处于施工阶段,暂未建设排水设施,大气降雨或地表水体径流时,坡顶或坡上水体沿地表、坡面直接排放,极易渗入土体转化为地下水,影响边坡稳定性。

2 数值模型的建立

2.1 数值计算方法

本文采用二维有限元 Geo-studio 进行降雨及坡顶堆载条件下边坡稳定性分析,其中采用 Geo-seep/w 模块分析边坡在降雨入渗过程中内部孔隙水压力及水位变化特征,边坡降雨入渗过程实质上是边坡土体由不饱状态变为饱状态的过程,Geo-seep/w 中采用达西定律进行土中水的渗流计算,Geo-seep/w 中考虑了非饱和土体中基质吸力对土体渗透系数的影响规律,能较好反映非饱和土体渗流特征。

边坡稳定性计算分析选用 Geo-slope 模块进行,该模块采用极限平衡分析法进行边坡稳定性评估,能提供包括瑞典条分法、毕肖普法、简布法、摩根斯坦-普拉斯法等方法,同时继承 Geo-seep/w 模块中渗流场计算结果,这使得进行降雨-堆载耦合作用下边坡稳定性计算分析成为可能。

2.2 数值计算模型

采用相对高程建立有限元计算模型,原始边坡计算高度 24 m,计算水平距离 57.7 m,边坡最大坡率 1:1.5,刷坡及防护后边坡计算高度 25 m,计算水平距离 57.7 m,边坡最大坡率 1:2.5,数值计算中初始水位线根据岩土工程勘察资料获得,数值计算模型如图 3 所示。

数值计算模型选用边坡实际尺寸,模型根据边坡地层进行分区,进一步划分成有限元网格,原始边坡共划分节点数 696 个、网格数 644 个,设计边坡模型共划分节点数 694 个、网格数 646 个,初始水位以上的边坡坡面为降雨流量边界,将弱透水粘土和基岩面设定为零流量边界。

根据现场原位测试及室内试验结果,其物理力学性能参数具体如表 1 中所示,从表 1 中可以看出,天然及饱状态下边坡岩土体物理力学性质差异较小,表明降雨对边坡土体力学性质影响较小。

图 4 给出了边坡土体渗透力学特征,结合表 1 中所示的地层岩土力学参数可以看出,尽管边坡表层填土强度不低,但其结构松散,体积含水量较高,因此其饱和渗透系数较大,相对的,尽管其下卧层②₂淤泥质粘土强度较低,但其内部结合水较多而自由水较少,因此其渗透系数较低。

2.3 计算工况

根据该地区气象统计资料,咸宁市秋季日均降水约 24.59 mm,边坡施工时期连续降雨持续时间平均为 1 h,边坡坡顶受施工机械碾压,坡顶堆载值取为 10 kN/m。根据降雨条件、坡顶堆载及边坡防水

表 1 边坡地层岩土力学参数

Table 1 Geotechnical parameters of slope stratum

地层编号	岩土名	容重 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$		粘聚力 c/kPa		内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$		渗透系数 $k/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
		饱和	天然	饱和	天然	饱和	天然	
①	素填土	18.4	17.8	12	13	9	9	7.65×10^{-6}
② ₁	粉质粘土	19.0	18.6	22	24	11	14	8.40×10^{-8}
② ₂	淤泥质粘土	17.2	17	10	12	4	4	1.76×10^{-8}
③ ₁	粉质粘土	19.4	19.2	32	48	14	16.2	3.13×10^{-8}
③ ₂	碎石土	19.6	19.2	10	12	30	32	—
④ ₁	粉质粘土	19.6	19.4	30	32	16	17	3.73×10^{-8}
④ ₂	粉质粘土	19.4	19.2	27	29	14	15	3.16×10^{-8}
⑤ ₁	强风化砂砾岩	22.8	22.5	—	—	—	—	—
⑤ ₂	中风化砂砾岩	—	—	—	—	—	—	—

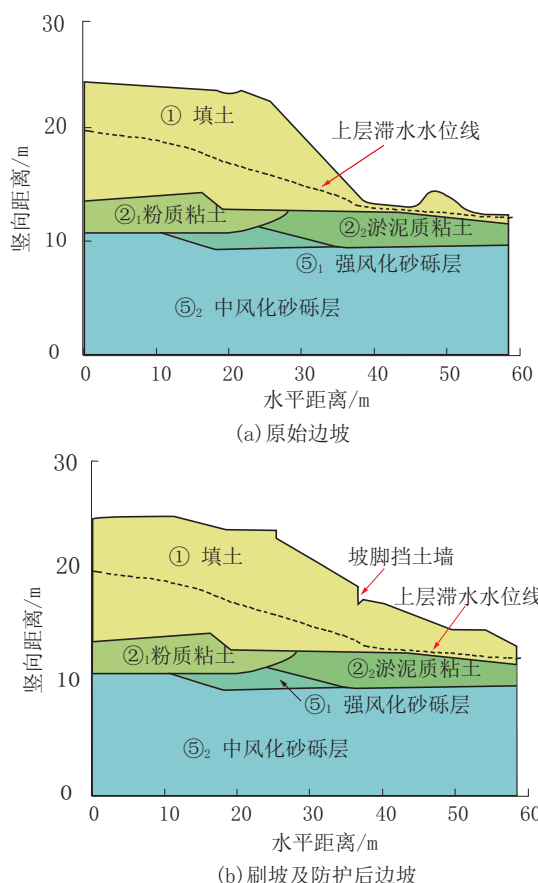


图3 深厚填土边坡数值计算模型

Fig.3 Numerical calculation model of the deep fill slope

的不同组合,确定数值分析计算工况如表2所示。

数值计算分析过程中首先采用Geo-seep/w模块进行降雨过程中边坡内部渗流场分析,得到降雨过程中边坡内部孔隙水压力、体积含水量演化规律,随后将该计算结果作为下一步边坡稳定性分析的初始条件,运用Geo-seep/w与Geo-slope耦合分析降雨过程中边坡稳定性。

3 数值计算结果分析

3.1 降雨对边坡稳定性的影响

由于降雨强度小于边坡表层填土渗透系数,故认为降雨全部入渗,边坡表面不会形成径流。根据Geo-seep/w模块中饱和/非饱和渗流分析原理,计算得到持续降雨过程中边坡内部水头压力分布特征,如图5所示。从图5中可以看出,降雨24 h后,边坡内部浸润线升高,坡体内部暂态饱和区范围显著增大,其中坡脚处受降雨影响最大。

进行降雨条件下边坡稳定性分析,计算结果如

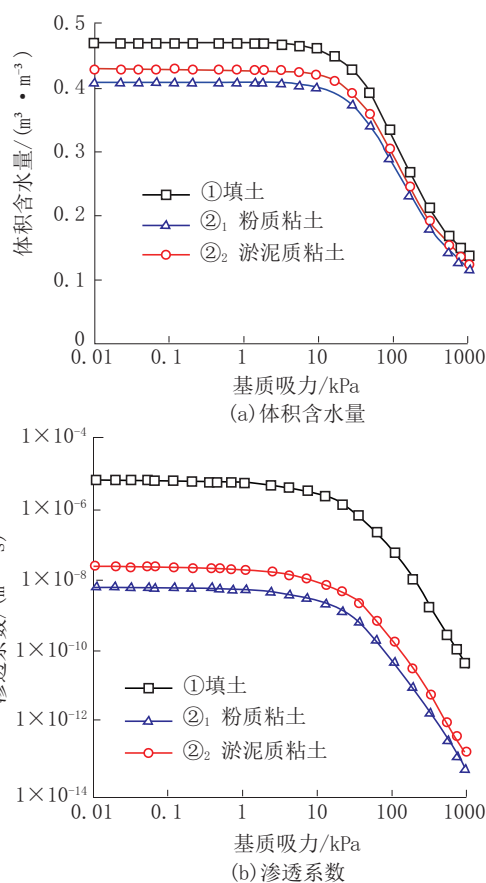


图4 边坡土体渗透力学特征

Fig.4 The permeability mechanical characteristics of slope soil mass

表2 边坡稳定性分析数值计算工况

Table 2 Numerical calculation of construction conditions for slope stability analysis

计算工况	降雨强度/ (mm·d ⁻¹)	降雨持 时/h	坡顶堆载/ (kN·m ⁻¹)	边坡防水
工况1	24.59	24	无	无
工况2	无	无	10	无
工况3	24.59	24	10	无
工况4	24.59	24	10	有

图6所示,从图6中可以看出,降雨前后边坡稳定系数 $f < 1.0$,边坡处于欠稳定状态,边坡滑动体剪入口位于坡顶,剪出口位于边坡底部,对比图6与图1可以看出,数值计算结果与现场观测结果吻合较好,表明了数值计算的有效性。

采用瑞典条分法、毕肖普法、简布法及摩根斯坦-普拉斯法四种方法计算降雨条件下边坡稳定系数,图7给出了边坡稳定性系数随降雨持续时间的

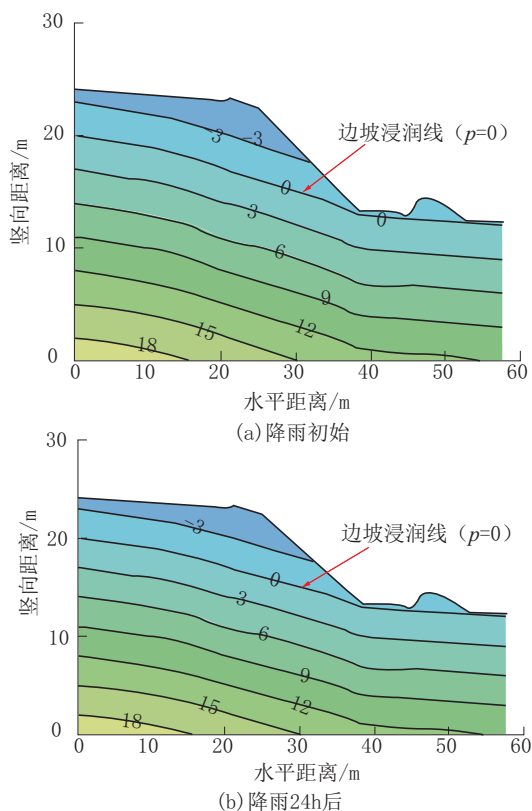


图5 降雨过程中边坡水头压力分布特征

Fig.5 Distribution characteristics of water head pressure in slope during rainfall

演化规律,从图中可以看出,4种方法计算所得边坡稳定系数随降雨持续时间的演化规律基本一致,但不同方法计算所得稳定系数差别较大。随着降雨持续时间的增加,边坡稳定系数逐渐减小,尤其在降雨初始阶段,边坡稳定系数随降雨持续时间的增加迅速减小,降雨24 h后,边坡岩土体接近饱和状态,继续降雨对边坡土体影响较小,因此边坡稳定系数受降雨的影响较小。

表3中给出了不同计算方法所满足的平衡条件和条间力特征,从表中可以看出,瑞典条分法、毕肖普法及简布法均为单因素稳定系数计算方法,而摩根斯坦-普拉斯法同时考虑了力平衡和力矩平衡,适用于圆弧和非圆弧面破坏。而瑞典条分法和简布法并未考虑条块间的切向力,导致对边坡稳定系数的严重低估,由此计算所得稳定系数偏低,因此这里选用摩根斯坦-普拉斯法进行边坡稳定系数计算。根据数值计算结果,在降雨初期,边坡稳定系数 $f=0.859$,降雨24 h后边坡稳定系数 $f=0.835$,边坡稳定系数减小约3%。

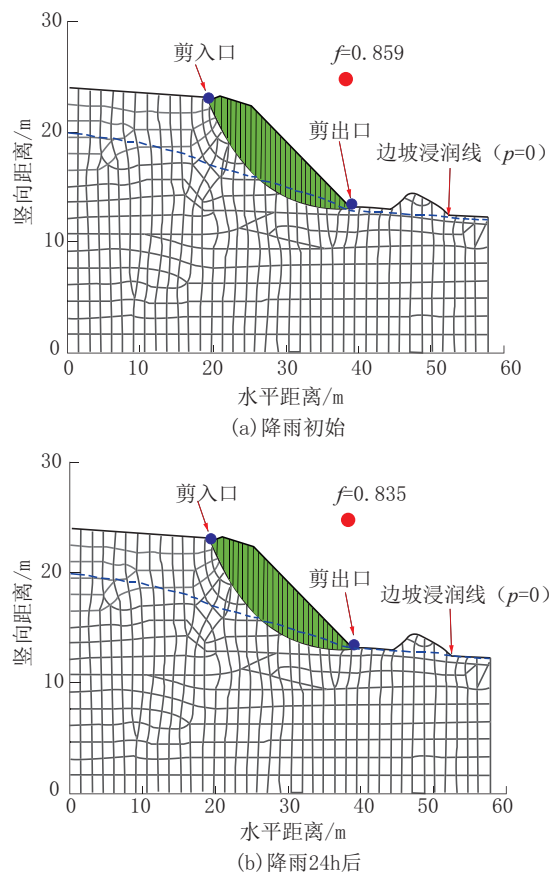


图6 降雨过程中边坡最危险滑移面特征

Fig.6 Characteristics of the most dangerous slip surface of slope during rainfall

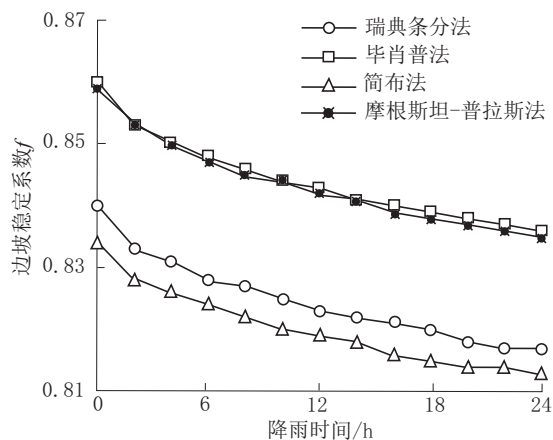


图7 降雨过程中边坡稳定安全系数演化规律

Fig.7 Evolution law of slope stability stability coefficient during rainfall process

降雨24 h后边坡滑动体内部孔隙水压力及条块抗剪强度分布特征如图8所示,从图中可以看出,边坡滑动体内部孔隙水压力随条块高度的增加而减

表 3 不同计算方法满足的平衡关系及条间力特征
Table 3 Balance relationship and force characteristics between strips satisfied by different calculation methods

计算方法	力平衡	力矩平衡	法向条间力	切向条间力
瑞典条分法	满足	不满足	不考虑	不考虑
毕肖普法	满足	不满足	考虑	不考虑
简布法	不满足	满足	考虑	不考虑
摩根斯坦-普拉斯法	满足	满足	考虑	考虑

小,滑动体顶部孔隙水压力最小,坡脚处靠近滞水水位线,因此孔隙水压力也较小。当孔隙水压力为 0 时,滑动体抗剪强度达到最大值,滑动体抗剪强度在边坡顶部及底部出现最小值,因此滑动体最先在坡顶及坡脚处发生破坏。

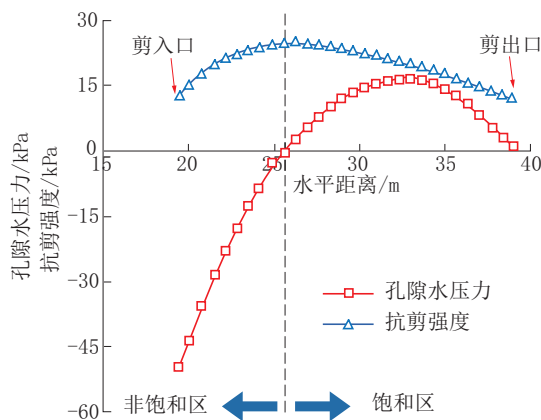


图 8 滑动体抗剪强度及孔隙水压力分布特征

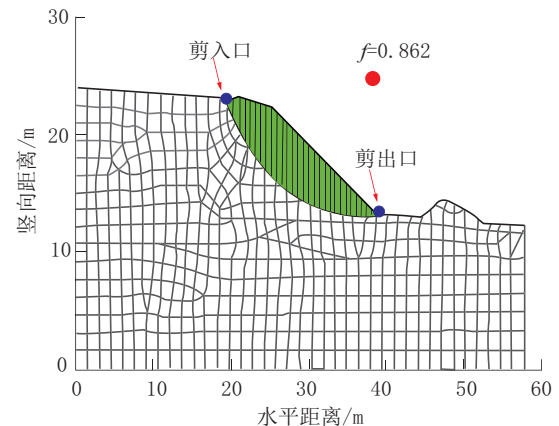
Fig.8 Shearing resistance of sliding mass and distribution characteristics of pore water pressure

3.2 坡顶堆载对边坡稳定性的影响

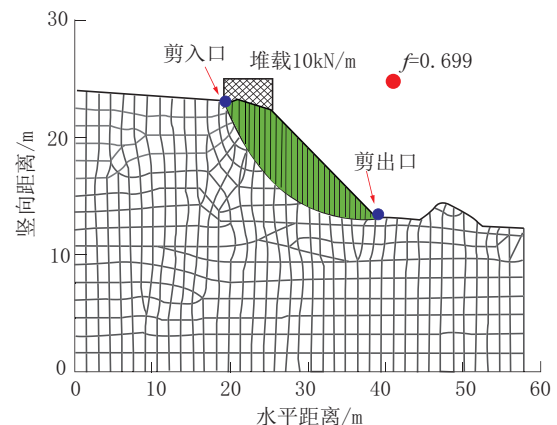
坡顶堆载同样影响着边坡稳定性,对比分析坡顶有无堆载条件下边坡稳定性,数值计算结果如图 9 所示,从图中可以看出,坡顶处堆载对边坡稳定性影响较大。原始边坡无堆载条件下,边坡稳定系数 $f=0.862$,滑动体剪入口位于坡顶附近,剪出口位于坡脚处,此时在坡顶处堆载,边坡稳定系数显著减小至 0.699,稳定系数减小约 20%。由此可见,原始边坡坡顶处施工机械的碾压也是引起该处填土边坡失稳的重要因素。对比图 9 与图 6 可知,与降雨因素相比,坡顶堆载对该处边坡稳定性影响更大。

3.3 降雨-堆载耦合作用对边坡稳定性的影响

为了分析雨天施工时边坡的稳定性,进行降雨-



(a) 坡顶无堆载



(b) 坡顶有堆载

图 9 坡顶堆载后边坡最危险滑移面特征

Fig.9 Characteristics of the most dangerous slip surface of the slope after surcharging on the top of the slope

堆载耦合作用边坡稳定性分析。先计算降雨引起的边坡内部孔隙水压力和体积含水量的变化,在此条件下增设施工荷载,计算边坡在降雨引起的渗流压力和施工荷载共同作用下的边坡稳定性。数值计算结果如图 10 所示,从图 10 中可以看出,降雨-堆载耦合作用下边坡滑动体特征基本相同,滑动剪入口位于坡顶,滑动剪出口位于坡底,降雨-堆载耦合作用初期边坡稳定系数 $f=0.752$,降雨 24 h 后,边坡稳定系数减小至 0.732,边坡稳定系数减小约 3%。可以预见,随着降雨时间的进一步延长,边坡稳定系数将进一步减小,直至边坡发生失稳破坏。

图 11 给出了降雨-堆载耦合作用下坡顶堆载对边坡稳定系数的影响规律,从图中可以看出,两种条件下,边坡稳定系数均随降雨时间的增加而逐渐减小。相比降雨时间,坡顶堆载对边坡影响更大。

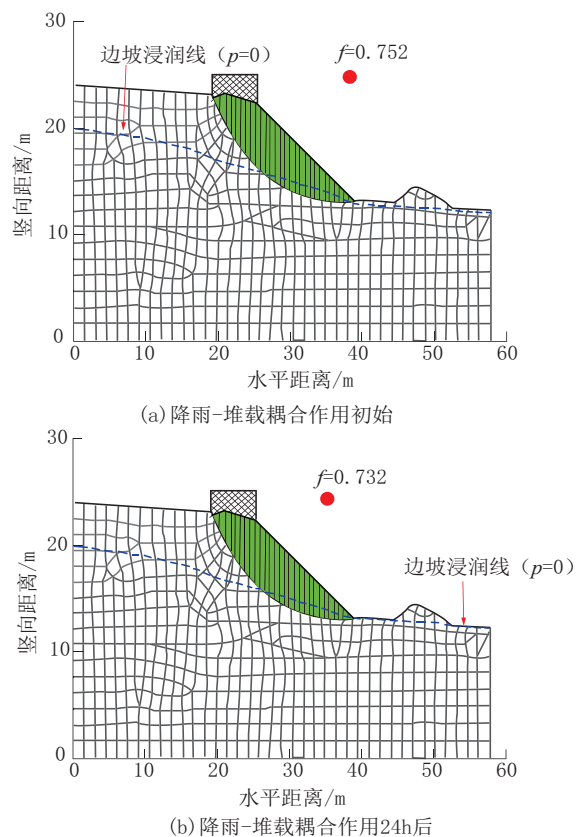


图10 降雨-堆载耦合作用下边坡最危险滑移面特征

Fig. 10 Characteristics of the most dangerous slip surface of slope under rainfall-surge coupling

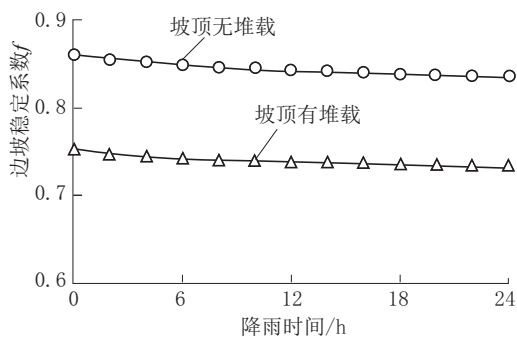


图11 降雨-堆载耦合作用下边坡稳定安全系数演化规律

Fig.11 Evolution law of slope stability stability coefficient under rainfall-surge coupling

3.4 刷坡防水护坡效果分析

根据原始边坡稳定性现状及变形失稳破坏特征,提出对原始边坡进行刷坡减载的护坡措施,将边坡坡率从1:1.5减小至1:2.5,同时在原坡脚处施加挡土墙,为了减小降雨入渗对边坡稳定性的影响,对边坡上层填土进行分层碾压夯实,同时在坡顶修筑

排水沟及截水坎。设计边坡稳定性分析计算结果如图12所示,从图中可以看出,设计边坡滑动体范围显著大于原始边坡,滑动体剪入口同样处于边坡顶部,但滑动剪出口延伸至坡体下部,设计边坡在降雨-堆载耦合作用下稳定系数较高,降雨-堆载耦合作用24 h后边坡仍处于稳定状态。

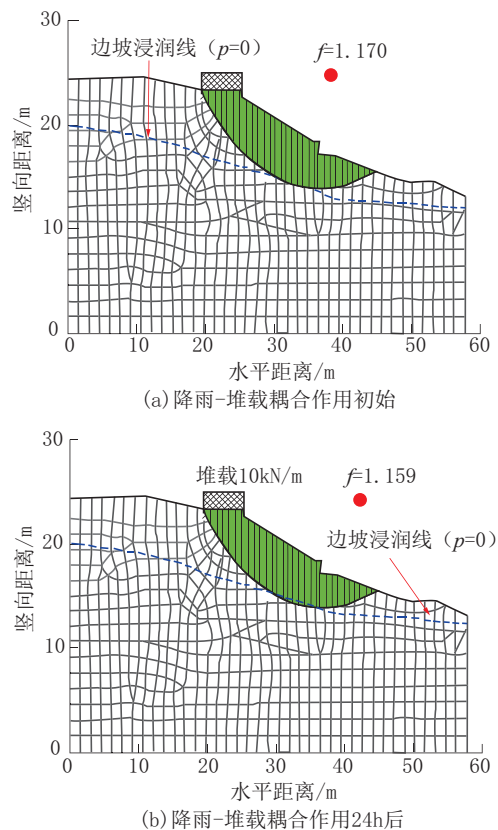


图12 刷坡后降雨-堆载耦合作用下边坡最危险滑移面特征

Fig.12 Characteristics of the most dangerous slip surface of slope under rainfall-surge coupling after slope scouring

图13给出了设计边坡稳定系数随降雨-堆载耦合作用时间的演化规律,从图13中可以看出,设计边坡稳定系数同样随降雨持续时间的增加而逐渐减小。无堆载条件下,边坡稳定系数约1.21,堆载后边坡稳定系数减小至1.17,稳定系数仅减小约3%,降雨-堆载耦合作用24 h后,稳定系数减小至1.159,稳定系数减小仅约1%。

图14给出了原始边坡和设计边坡在降雨-堆载耦合作用下稳定系数随降雨时间的演化规律,对比可知,经过刷坡减载和防水护坡后,边坡稳定系数均有了显著提高,同时坡顶堆载及降雨对边坡稳定系数的影响显著减小,表明本文提出了刷坡减载及防

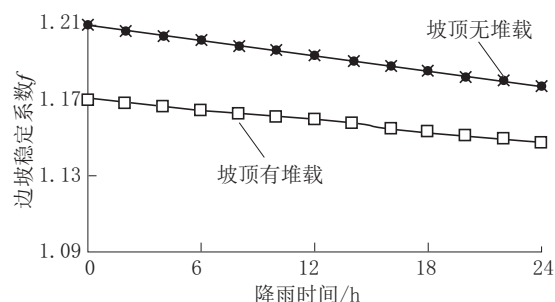


图13 刷坡后降雨-堆载耦合作用下边坡稳定系数演化规律

Fig.13 Evolution law of slope stability coefficient under rainfall-surge coupling after slope scouring

水护坡措施能有效提高边坡的稳定系数,减小降雨入渗对边坡的影响。

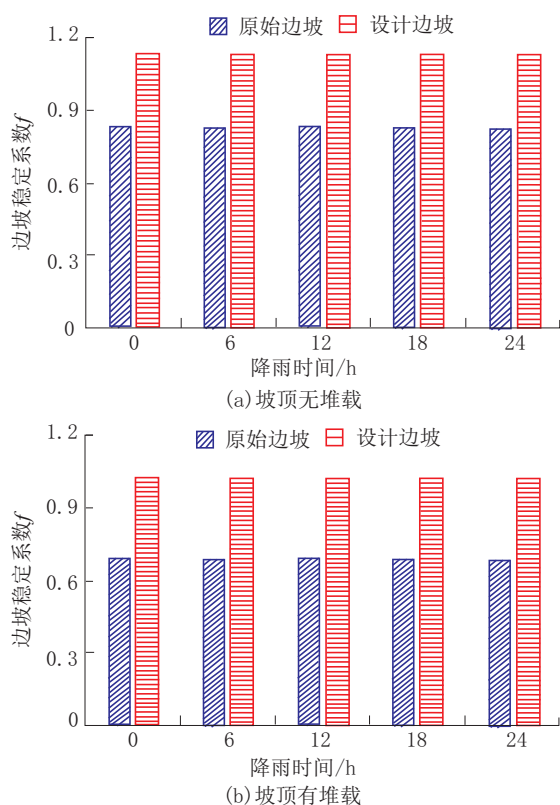


图14 刷坡防护条件下边坡稳定系数特征

Fig.14 Characteristics of slope stability coefficient under slope scouring protection

4 边坡防护效果评价

根据设计方案,对该处边坡坡顶深厚填土区域进行刷坡减载,在原始坡脚处修筑挡土墙,同时对坡顶填土进行分层夯实,为防止降雨入渗影响边坡稳定,在坡顶修筑截水坎和排水沟,施工完成后边坡如

图15所示。边坡防护处理完成后坡面变形得到有效控制,边坡整体处于稳定状态。



图15 刷坡减载及防水护坡施工完成后边坡

Fig.15 Photograph after slope scouring, load reduction, waterproof and slope protection

5 结论

根据降雨-堆载耦合作用下边坡稳定性数值模拟分析及边坡防护效果评价,得出以下结论:

(1)采用瑞典条分法、毕肖普法、简布法及摩根斯坦-普拉斯法四种方法计算得到边坡的稳定系数并不相同,其中瑞典条分法和简布法并未考虑条块间的切向力,因此计算所得稳定系数偏低,而摩根斯坦-普拉斯法同时满足滑动体条块力平衡和力矩平衡,能较好描述边坡圆弧滑动破坏特征。

(2)初始边坡在降雨及坡顶堆载条件下,边坡稳定系数均 <1.0 ,边坡处于欠稳定状态,与现场勘察结果相符。随着降雨时间的增加边坡稳定系数而逐渐减小,降雨24 h后,边坡稳定系数下降约3%,坡顶堆载后边坡稳定系数下降约20%,与降雨因素相比,坡顶堆载对该处边坡稳定性影响更大。

(3)根据原始边坡稳定性现状及变形失稳破坏特征,提出对原始边坡进行刷坡减载的护坡措施,同时在坡顶修筑排水沟及截水坎。数值计算结果表明,降雨-堆载耦合作用下设计边坡稳定系数均 >1.0 ,边坡处于稳定状态,坡顶堆载后,边坡稳定系数下降约3%,降雨24 h后,边坡稳定系数下降约1%,表明刷坡减载及防水护坡措施能有效提高边坡的稳定性。对设计施工后边坡进行观测,边坡稳定性较好,验证了本文数值计算分析的合理性和有效性。

参考文献(References):

[1] 武永波.基于物联网的滑坡灾害监测预警技术研究[D].武汉:中

- 国地质大学, 2021.
- WU Yongbo. Research on landslide monitoring and early warning technology based on internet of things [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2021.
- [2] 李远宁, 潘勇, 冯晓亮, 等. 三峡库岸滑坡变形特征及影响因素分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(8): 127-131.
- LI Yuanning, PAN Yong, FENG Xiaoliang, et al. Landslide deformation characteristics in Three Gorges Reservoir area and the corresponding influencing factor analysis [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(8): 127-131.
- [3] 雷小芹, 刘恩龙, 何思明, 等. 非饱和堆积土边坡降雨-渗流潜蚀耦合过程模拟[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(2): 28-37.
- LEI Xiaoqin, LIU Enlong, HE Siming, et al. Modelling of coupled process of rainfall infiltration and internal erosion within unsaturated deposited soil slopes [J]. Advanced Engineering Science, 2021, 53(2): 28-37.
- [4] 王志强, 马晓亮. 持续降雨环境下高速公路边坡稳定性影响的数值模拟分析[J]. 公路工程, 2018, 43(5): 310-315.
- WANG Zhiqiang, MA Xiaoliang. Numerical simulation analysis on the stability of highway slope under continuous rainfall environment [J]. Highway Engineering, 2018, 43(5): 310-315.
- [5] 饶鸿, 王金淑, 赵志明, 等. 基于有限元软件自定义本构模型的膨胀土边坡降雨入渗分析[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(1): 154-162.
- RAO Hong, WANG Jinshu, ZHAO Zhiming, et al. An analysis of rainfall infiltration of expansive soil slope based on the finite element software custom constitutive model [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(1): 154-162.
- [6] 吴志轩, 杨军, 邱天琦, 等. 基于FELA的随机场方法在考虑降雨入渗的边坡开挖稳定性分析中的应用[J]. 地质力学学报, 2018, 24(6): 813-821.
- WU Zhixuan, YANG Jun, QIU Tianqi, et al. Application of the random field method based on FELA in the analysis of slope excavation stability considering rainfall infiltration [J]. Journal of Geomechanics, 2018, 24(6): 813-821.
- [7] 蔡军, 许胜才. 基于FLAC^{3D}软件FISH语言二次开发的降雨工况下航道工程开挖边坡渗流场的分析[J]. 水电能源科学, 2021, 39(10): 156-159.
- CAI Jun, XU Shengcai. Seepage field analysis of channel slope excavation under rainfall condition based on secondary development of FLAC^{3D} software with the FISH language [J]. Water Resources and Power, 2021, 39(10): 156-159.
- [8] 蒋中明, 熊小虎, 曾铃. 基于FLAC^{3D}平台的边坡非饱和降雨入渗分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 855-861.
- JIANG Zhongming, XIONG Xiaohu, ZENG Ling. Unsaturated seepage analysis of slope under rainfall condition based on FLAC^{3D} [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 855-861.
- [9] 刘利, 余寿全, 陈一劳, 等. 降雨入渗对填土边坡稳定性影响研究[J]. 路基工程, 2018(2): 52-56.
- LIU Li, YU Shouquan, CHEN Yilao, et al. Study on influence of rainfall infiltration on stability of soil-filled slope [J]. Subgrade Engineering, 2018(2): 52-56.
- [10] 李冰冰, 贺勇, 张可能, 等. 基于流固耦合作用的某尾矿坝渗流稳定性分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(10): 104-108.
- LI Bingbing, HE Yong, ZHANG Keneng, et al. Analysis of seepage stability of a tailings dam based on fluid solid coupling effect [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(10): 104-108.
- [11] 陈洪翠, 贺可强, 左斌, 等. 降雨型堆积层边坡的增载-弱化耦合规律及其稳定性灾变机制[J]. 工程建设, 2015, 47(5): 6-13.
- CHEN Hongcui, HE Keqiang, ZUO Bin, et al. Study on load-weakening coupling laws of accumulative-formation slope induced by rainfall and its stability catastrophe mechanism [J]. Engineering Construction, 2015, 47(5): 6-13.
- [12] 潘俊义, 侯大勇, 李荣建, 等. 不同雨强下黄土边坡降雨入渗测试与分析[J]. 工程地质学报, 2018, 26(5): 1170-1177.
- PAN Junyi, HOU Dayong, LI Rongjian, et al. Rainfall infiltration test and analysis of loess slope under different rainfall intensities [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(5): 1170-1177.
- [13] 张良以, 陈铁林, 张顶立. 降雨诱发膨胀土边坡渐进破坏研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(1): 70-77.
- ZHANG Liangyi, CHEN Tielin, ZHANG Dingli. Progressive failure of expansive soil slopes under rainfall [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(1): 70-77.
- [14] 靳福杰, 王叶娇, 徐永福, 等. 蒸发-降雨条件下膨胀土边坡裂隙演化模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 239-249.
- JIN Fujie, WANG Yejiao, XU Yongfu, et al. Simulation of cracks evolution in expansive soil slope under evaporation rainfall condition [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(1): 239-249.
- [15] 陈正汉, 郭楠. 非饱和土与特殊土力学及工程应用研究的新进展[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 1-54.
- CHEN Zhenghan, GUO Nan. New developments of mechanics and application for unsaturated soils and special soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 1-54.

(编辑 王文)