

考虑运行风险的某岩质边坡坡比优选分析*

杨超¹, 王乐华², 陈再谦¹, 程瑞新¹

(1. 中国电建集团 贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵阳 550081;

2. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 为了研究某水电站岩质边坡在运行期内不同坡比下的抗风险能力并优化坡比, 设计了不同工况(暴雨、地震)和不同坡比下的数值模拟分析。结果表明:(1)坡比一定时, 随着降雨强度增加, 位移逐渐增大, 拉应力则变化较小; 随着地震烈度增加, 位移和拉应力均逐渐增大, 且趋势愈明显。(2)断层区域对坡体位移场有着明显的分割作用, 顺向断层则会使应力沿断层方向发生突变。(3)暴雨和地震分别作用下, 边坡越陡最大位移均出现了不同程度的减小, 且地震强度越大, 最大位移对坡比越敏感。(4)在考虑边坡稳定性与工程造价的前提下, 对开挖坡比进行组合优化设计后在各工况下为最优选择。研究成果对该工程边坡开挖施工具有较大的参考价值。

关键词: 岩质边坡; 运行风险; 坡比优化; 数值模拟

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)05-1424-07

Slope Ratio Optimization Analysis on a Rock Slope in Operation Period

Yang Chao¹, Wang Lehua², Chen Zaiqian¹, Cheng Ruixin¹

(1. Guiyang Engineering Co. Ltd., PowerChina, Guiyang 550081, P.R.China; 2. School of

Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, P.R.China)

Abstract: To study a hydropower station rock slope's ability to resist risks under different slope ratio at operation period and optimize slope ratio, numerical simulation are designed under different conditions (rainstorm, seismic) and different slope ratios. The results show that: (1) when slope ratio unchanged, with the increase of rainfall intensity, displacement increases gradually, but tensile stress's changing range is not big; with the increase of seismic intensity, both displacement and tensile stress increase gradually and the trend is more obvious. (2) the fault zone has a clear segmentation effect on slope displacement field, normal fault cause stress to be mutated along the direction of normal fault. (3) under the action of rainstorm and seismic respectively, maximum displacements are reduced in different degrees when slope ratio increases, and more sensitive to slope ratio with larger seismic intensity. (4) considering slope stability and engineering cost, excavation slope ratio after combining optimization design is optimal selection. Research results have great reference value to construction of slope excavation.

Keywords: rock slope; operation risk; slope ratio optimization; numerical simulation

* 收稿日期: 2018-04-15(修改稿)

作者简介: 杨超(1991-), 男, 湖北孝感人, 硕士, 助理工程师, 主要从事岩土工程、地质工程等领域的研究工作。
E-mail: yangchaojt@163.com

0 引言

水电站地形条件复杂、地质病害多样、施工条件差,在进行水电站建设时往往伴随高陡边坡的稳定性问题。由于项目建设时需要开挖边坡,边坡开挖则可能引起其稳定性降低,特别在边坡基岩风化程度高,或者边坡坡积覆盖层较厚、坡度很陡的情况下,不当开挖极易导致边坡失稳,从而发生工程事故。鉴于此,如何提高和保证水电站的设计质量、经济节省和工程安全得到最优化显得尤为重要^[1]。张永兴^[2]对坡率法和削坡减载设计方面的内容作了详细的讲解,为坡形改造滑坡防治措施提供了有力的理论依据,李景等^[3]在保证边坡开挖工程既安全可靠又经济合理的基础上,采用剩余推力法计算天然斜坡的稳定性,确定了在开挖与支护总费用最低时的边坡开挖坡比为最优坡比。崔宪丽^[4]设计了不同工况的坡形改造方案,通过分析不同方案对边坡其稳定性影响的关系规律,得出了最优坡形改造设计方案,并说明坡形改造在治理滑坡工程中具有非常好的应用前景。王乐华等^[5]分别根据不同的工况建立有限元模型进行边坡稳定性分析,并给出加固措施建议。贾梁^[6]对降雨入渗条件下结合数值模拟手段进行稳定性分析,计算并得到了相应的合理、经济的设计坡比。马宇等^[7]采用非线性强度包络线计算的坝坡安全系数,论证了采用非线性强度包络线在不同坡比中应用的合理性。综合上述研究成果分析发现,不同的工况和不同坡比对边坡的稳定性均存在明显的影响,但考虑不同坡比下边坡在运行期对不同暴雨工况和地震工况抗风险能力的研究并不多见。

本文结合实际工程岩体的赋存环境,以某水电站下水库一期进出水口岩质边坡在各种运营工况下的稳定性分析为工程背景,考虑不同工况,通过数值模拟,研究不同开挖坡比对边坡模型的位移场、应力场的影响效应,进而确定岩质高边坡运行期风险并合理设置开挖坡比,对确保水电工程建设的顺利进行及正常运营具有重大的参考价值。

1 水利水电工程边坡工程概况及初始条件分析

某水电站区内地势复杂,高程为 800~2 300 m,基本可分为坝上和坝下两个区。该边坡区域河谷宽缓,呈“U”字形,河谷两岸山体雄厚,有冲沟发育,基本与河流正交,宽度多在 20~70 m 之间,冲沟基岩底高程均高于河床,坡降较大。局部发育陡壁。断层主要有 f373、f374 等,以中、陡倾角为主,宽度 0.5~2 m,由断层泥、碎裂岩、碎粉岩、碎块岩等组成。基岩主要为干沟门单元中粗粒花岗岩,干沟门单元花岗岩以垂直风化和球状风化为主,受构造影响,沿断层多有带状或囊状风化,规模较大的断层两侧岩体风化程度均较强烈。全风化深度为 0~12 m,强风化深度为 1.4~30 m,弱风化深度为 62~101.5 m。地下水主要为覆盖层孔隙水和基岩裂隙水 2 种,均受大气降水补给。

在对边坡岩体进行稳定性分析时,最重要的问题是选取合适的宏观力学参数,根据地质资料以及相关试验结果选取合理的岩体物理力学参数,初始物理力学参数如表 1。

表 1 初始物理力学参数

Table 1 Initial physico-mechanical parameters

岩性	变形模量 /GPa	泊松比	粘聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)
堆积体	0.45	0.4	0.021	28	21
强风化	5.5	0.3	0.4	40	25
微风化	9	0.25	1.25	45	26.1
基岩	12.5	0.23	2.5	50	26.2
裂隙	0.45	0.33	0.03	23	21.5
断层	0.45	0.33	0.15	34	21.5

2 水利水电工程边坡坡比设计

2.1 水利水电工程边坡坡比设计模型

以 Flac3d 为平台,利用某进出水口边坡 1-1 剖面图根据不同坡比分别建立二维有限元模型,其中 x 为水平垂直边坡方向,以朝坡内为正,长 200 m; y 为高程方向,以向上为正,长 150 m。由于水工建筑物位于边坡底部,对边坡的稳定性影响较小,且

考虑到尺寸效应以及便于建模计算,因此,以坡脚处为左边界建立计算模型,除坡面设为自由边界外,模型底部($y=0$)设为固定约束边界,模型四周设为单向边界。在初始条件中,采用摩尔-库仑屈服准则,仅考虑自重应力产生的初始应力场。基于边坡地质环境,均分为 6 步开挖,考虑运行期不同工况位移及应力分析,在边坡每步开挖面的中部分别布设相应的监测点,不同坡比边坡开挖方量统计见表 2。二维有限元模型用三角形和四边形网格进行划分,出露断层和开挖面附近网格密度较大,

并向附近逐渐增大尺寸,如图 1 分别为坡比 1:0.5、1:0.75、1:1 和 1:2.5 的边坡计算模型。

岩体开挖方案设计是一个复杂的系统工程,主要受稳定和经济两个因素的影响^[8],由表 2 可知,边坡越缓,开挖工程量相对增加,则工程造价越高,边坡稳定性随之增加;相反,边坡越陡,开挖工程量相对减小,则工程造价越低,边坡稳定性却越差,因此在满足工程的安全性和可靠性的前提下,对岩体边坡开挖方案进行优化,以最低的费用来实现工程的必要功能显得尤为重要。

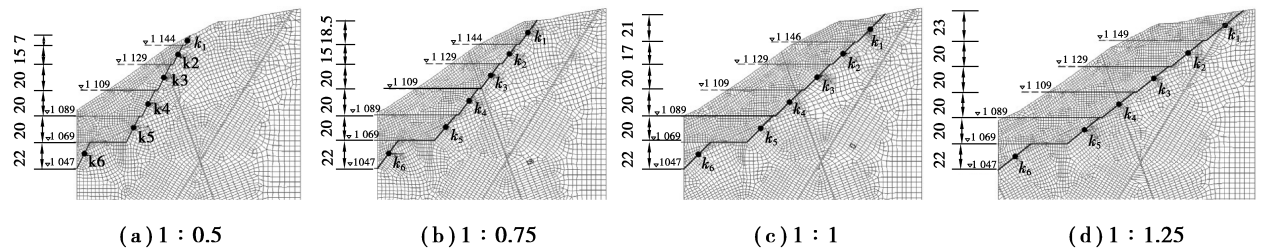


图 1 不同开挖坡比地质模型及监测点布置(单位:m)

Fig. 1 Geological model and key points layout of slope with different slope ratio (unit: m)

表 2 不同坡比边坡开挖方量统计

Table 2 Excavation volume statistics of different slope ratio

开挖步		1	2	3	4	5	6	共计
开挖方量 /m ³	1:0.5	37.83	233.12	591.83	880.1	890.23	118.8	2 751.91
	1:0.75	291.86	516.99	882.83	1124.6	1069.5	176.04	4 061.82
	1:1	770.4	725.87	1 093.83	1 273.45	1 200.7	237.62	5 301.87
	1:1.25	1 232.6	994.74	1 338.18	1 430.5	1 306.75	297.05	6 599.82

2.2 水利水电工程边坡坡比优化计算工况

边坡在运行期时主要考虑以下 2 种工况:①短暂工况,即暴雨工况。本工况主要模拟边坡在暴雨作用下的稳定性,对于陡倾岩质边坡,雨水的物理冲刷作用不明显,主要考虑雨水入渗对岩土体材料强度的软化,设计 3 种不同降雨强度的暴雨工况:50 mm/d、100 mm/d、250 mm/d。②偶然工况,即地震工况。本工况主要采用拟静力法模拟边坡在地震作用下的稳定性,根据《中国地震动参数区划图》中地震加速度峰值与地震基本烈度的对应关系,确定边坡区域的地震基本烈度为Ⅵ度。通过输入地震幅值的惯性力来进行计算分析,设计 3 个级别,分别为:0.05g、0.1g、0.2g。

3 水利水电工程边坡坡比敏感性分析

3.1 不同工况下地形对边坡稳定性影响分析

以 1:0.5 坡比为例同时对不同工况下边坡整体的位移和应力分布进行了分析,如图 2~3 分别为 1:0.5 坡比边坡典型工况的位移云图和应力云图所示,可以看出:

(1)由于断层的存在,相应区域的岩土体力学参数减弱,位移场而言,坡体内顺向断层和逆向断层对位移场有着明显的分割作用;应力场而言,逆向断层对应力场没有任何影响,顺向断层则使原本几乎相互平行,平滑的应力等值线沿顺向断层方向发生了一定的突变。

(2)最大位移均集中在逆向断层坡表出露处,并以此为中心逐渐向四周扩散减小,最大拉应力则均集中在坡脚处,同时坡顶位移也较大,为相对不

稳定区域,易发生失稳。暴雨(大)工况对边坡的位移场和应力场影响区域相比地震(大)工况较小,说明地震工况对边坡的影响更为明显。

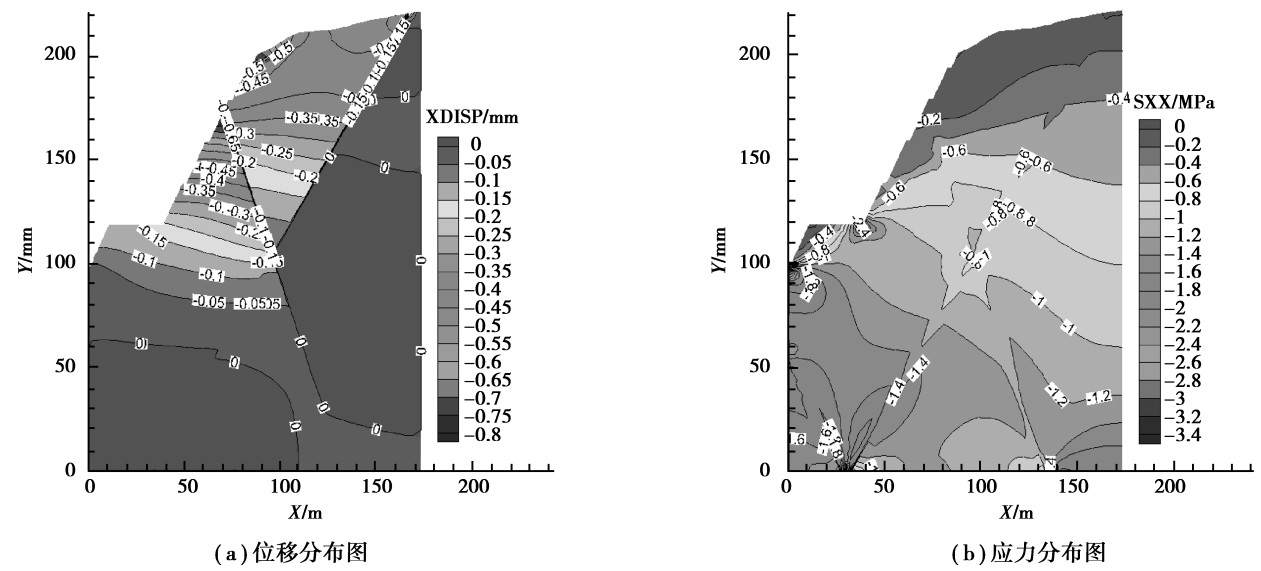


图 2 1:0.5 坡比边坡暴雨(大)工况位移云图和应力云图

Fig. 2 Nephogram of displacement and stress under 1:0.5 slope ratio and rainstorm (high) condition

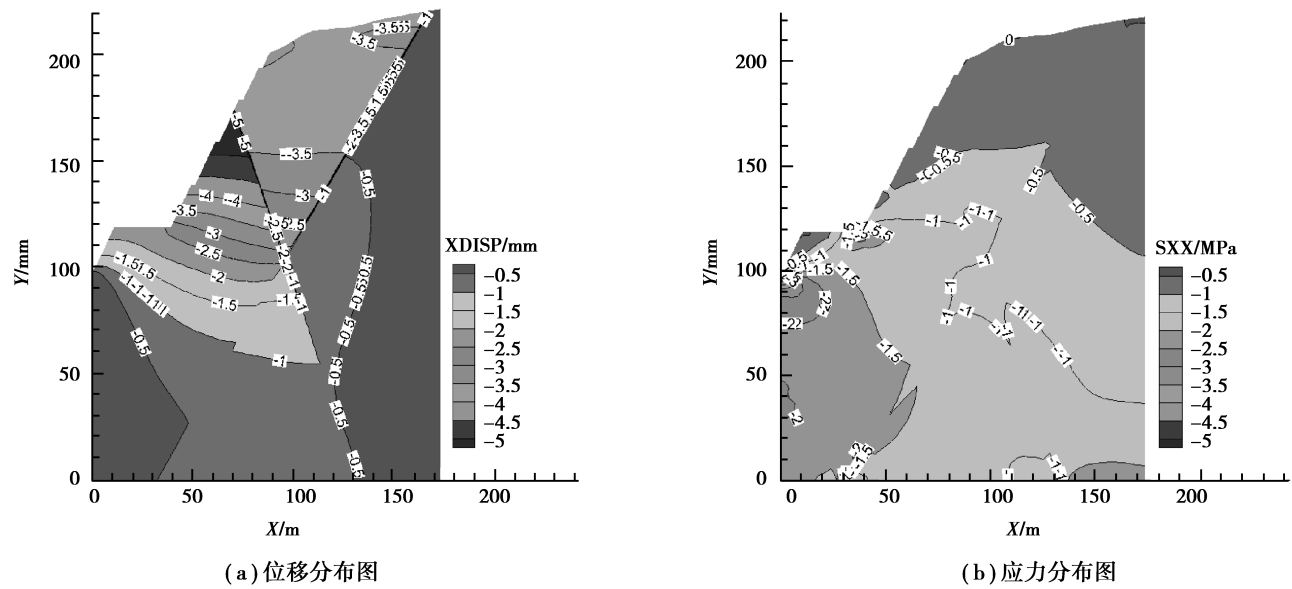


图 3 1:0.5 坡比边坡地震(大)工况位移云图和应力云图

Fig. 3 Nephogram of displacement and stress under 1:0.5 slope ratio and seismic (high) condition

同时给出了不同坡比边坡在各工况下的水平向朝坡外最大位移和最大拉应力值,如表 3 分析可知,当坡比一定时,在暴雨工况下,随着降雨强度的增加,最大位移逐渐增大,最大拉应力则变化幅度不大,大致保持一致,这是由于降雨对坡表的冲刷作用使细颗粒向坡脚汇集而使斜坡面出现较大侵蚀破坏,同时降雨入渗使得表层岩土体抗剪强度进

一步弱化,使得坡体朝坡外变形逐渐增大,然而边坡在降雨时仍然主要受到来自坡体自重力的作用,故水平应力基本没变化;地震工况下,由于地震动荷载对边坡的水平向应力场的影响极大,水平加速度峰值越大,水平向位移和应力均逐渐增大,且增大的趋势更为明显。

表3 边坡不同工况最大位移和拉应力值

Table 3 The maximum displacement and tensile stress under different conditions of slope

坡比	工况	Xdisp/mm	SXX/MPa
1:0.5	暴雨(低)	-0.16	-3.40
	暴雨(中)	-0.41	-3.42
	暴雨(高)	-0.85	-3.46
	地震(低)	-0.90	-3.71
	地震(中)	-2.40	-4.17
	地震(高)	-6.53	-4.94
1:0.75	暴雨(低)	-0.09	-2.81
	暴雨(中)	-0.24	-2.81
	暴雨(高)	-0.46	-2.81
	地震(低)	-0.73	-2.96
	地震(中)	-1.43	-3.35
	地震(高)	-3.59	-4.11
1:1	暴雨(低)	-0.04	-2.70
	暴雨(中)	-0.12	-2.70
	暴雨(高)	-0.20	-2.70
	地震(低)	-0.32	-2.72
	地震(中)	-0.90	-2.85
	地震(高)	-1.80	-3.37
1:1.25	暴雨(低)	-0.02	-2.67
	暴雨(中)	-0.04	-2.67
	暴雨(高)	-0.07	-2.67
	地震(低)	-0.23	-2.69
	地震(中)	-0.54	-2.72
	地震(高)	-1.05	-2.77

当边坡处于同一工况时,不同开挖坡比条件下坡体内最大位移和拉应力的变化趋势是相同的,总体而言,边坡越缓,最大位移和拉应力均呈现出相应减小的趋势,则边坡越安全,抗灾能力越强。最大位移方面,随着坡比的不断增大,最大位移逐渐减小且减小幅度逐渐变缓,最后趋向于0,此时边坡处于一种相对稳定的状态,说明不同的开挖坡比对坡体的变形程度有极大的影响,边坡越缓,坡体变形幅度越小,最后则基本没有变形,稳定性则得到相应的提高。

为了具体分析不同坡比条件下各工况对边坡位移场和应力场的影响,特别对坡表每步开挖面的中间监测点的位移和应力进行了统计分析,由于随着边坡坡比逐渐增大,监测点位移和应力变化同样趋于平缓,但是在同一工况下的变化趋势总体是一致的,因此,仅给出监测点的位移和应力变化规律示意图(如图4~5),同时,为了对比分析边坡开挖方量与变形之间的对应关系,不同坡比下各个开挖

面开挖方量曲线图如图6所示。

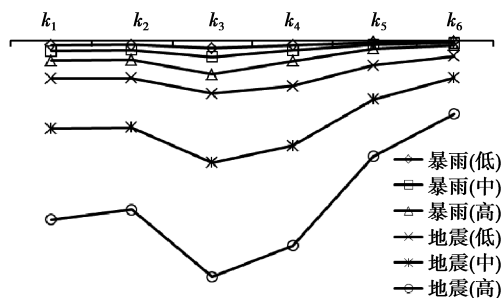


图4 不同工况监测点位移变化规律示意

Fig. 4 Variation of keypoints displacement under different conditions

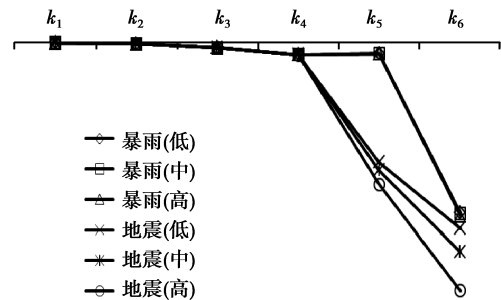


图5 不同工况监测点应力变化规律示意

Fig. 5 Variation of keypoints stress under different conditions

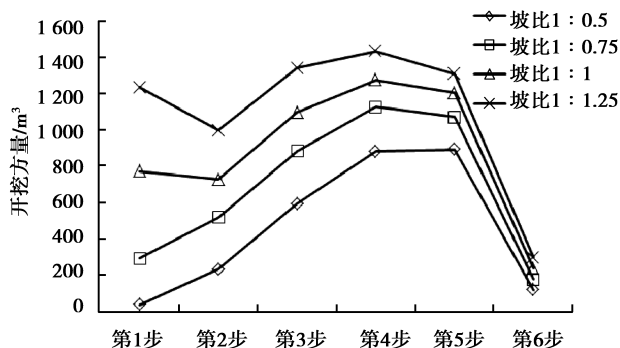


图6 不同坡比下开挖面开挖方量曲线

Fig. 6 Excavation volume curves of slope under different slope ratio

综合图4~6可以看出,边坡开挖面监测点的变形对开挖方量极为敏感,这是由于边坡岩体开挖卸荷较大,高边坡岩体在侧向约束及上覆荷载消除或减弱时,在一定宽度和深度界限内,使原有的结构面扩展或产生新的结构面,对一定范围内岩体质量的损伤劣化和宏观力学参数的降低具有更大的促进作用,从而使得开挖面岩体发生较大变形,但是应力则变化幅度不大。

位移角度而言,暴雨工况和地震工况强度的不同对边坡的位移有显著的影响,随着强度的增加,每个开挖面水平向坡外变形逐渐增大,地震工况则

造成的朝坡外变形有更为明显的效果。由于第 1 步开挖方量较少, k_1 与 k_2 位置相近均位于逆向断层上方, k_2 的位移比 k_1 略微减小, 由于 k_3 距离逆向断层与边坡交汇处最为接近, 且第 3、4 和 5 步开挖方量很大, 因此 k_3 的位移陡然增大, 达到所有检测点的位移最大值, 随后监测点的位移逐渐较小, 在 k_6 点处达到所有监测点的最小值。

对应力角度而言, 暴雨工况所有监测点的拉应力变化趋势且应力值大致相同, 前 4 个观测点, 降雨工况与地震工况对边坡造成的拉应力几乎没有区别, 应力值大小完全相同, 但是在 k_5 监测点, 暴雨工况下应力依然没有变化, 地震工况下该处拉应力急剧突变增大, 且随着地震强度的增加, 该点处的应力值略微增加, 在 k_6 检测点, 暴雨工况下拉应力突然急剧增大, 地震工况下则拉应力继续增加, 但增加幅度相对减小。

3.2 不同工况下坡形优选分析

由上可知, 不同工况对边坡的拉应力影响区别不大, 因此, 在考虑不同坡比对边坡的影响研究时, 仅对不同坡比、不同工况作用下边坡的最大位移进行了统计并作出了相应的关系曲线, 如图 7~8 所示。

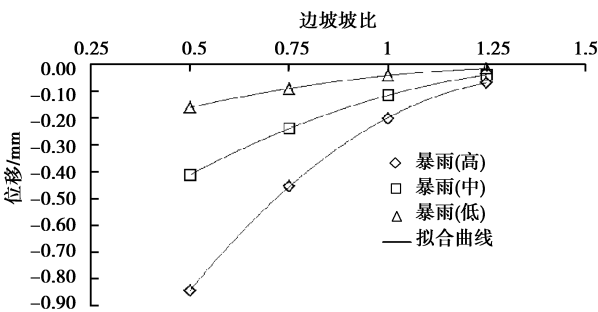


图 7 不同暴雨工况下最大位移与坡比关系曲线

Fig. 7 Relation curves of maximum displacement and slope ratio under different rainstorm condition

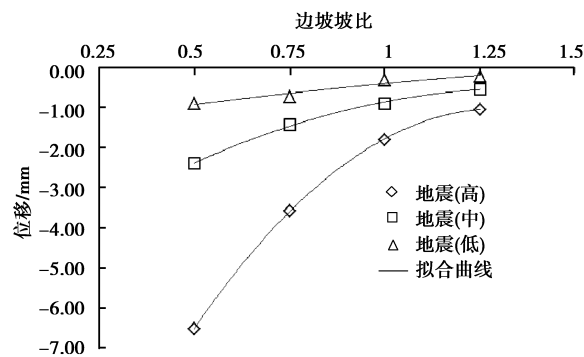


图 8 不同地震工况下最大位移与坡比关系曲线

Fig. 8 Relation curves of the maximum displacement and slope ratio under different seismic condition

从图 7 和图 8 可以看出, 不同暴雨工况和地震

工况的作用下, 坡体水平向朝坡外最大位移随边坡坡比的变化趋势是一致的, 即随着坡比的增大, 最大位移出现了不同程度的减小, 此时边坡的抗风险能力逐渐上升, 且曲线呈凸型, 说明当坡比较小, 且有很小的增长时, 对应的最大位移会有较大的变化, 而随着坡比的持续增大, 曲线则趋于平缓, 最大位移也趋于平缓。

在不同坡比(1:0.5、1:0.75、1:1、1:1.25)条件下, 暴雨(高)、暴雨(中)和暴雨(低)工况边坡最大位移的降低百分比为 81.07%~52.24%、80.22%~47.25%、79.6%~42.79%、77.94%~42.65%, 其平均降幅依次为 66.15%、63.74%、61.19%、60.28%。由此可以看出相同暴雨工况下, 随着坡比的增大, 边坡的水平向朝坡外变形幅度逐渐减小; 地震(高)、地震(中)和地震(低)工况最大位移的降幅范围分别为 86.22%~63.25%、79.67%~60.17%、82.24%~50.06%、78.1%~48.57%, 其平均降幅依次为 74.73%、69.92%、66.15%、63.33%, 比较而言, 相同地震工况下, 随着坡比的增大, 边坡的水平向朝坡外变形逐渐减小, 与暴雨工况下的变化规律较为一致, 但其衰减幅度更为明显, 说明地震强度越大, 最大位移对坡比越敏感。

综上所述, 考虑岩体开挖方案优化设计原则, 即顺应性与协调性原则、安全性和经济性原则^[8], 结合前面的计算分析和该边坡的地质情况, 认为在 1 047~1 089 m 范围内采用坡比为 1:0.5 进行开挖, 在 1 089~1 129 m 范围内采用坡比为 1:1 进行开挖, 在 1 129 m 以上采用坡比为 1:0.75 进行开挖, 能够保证变形不超过 3 mm, 具有一定的安全余度。

3.3 优选坡比稳定性验算

分别取暴雨(强)工况和地震(强)工况计算得到每个开挖面中间监测点的位移和开挖方量如图 9 所示。

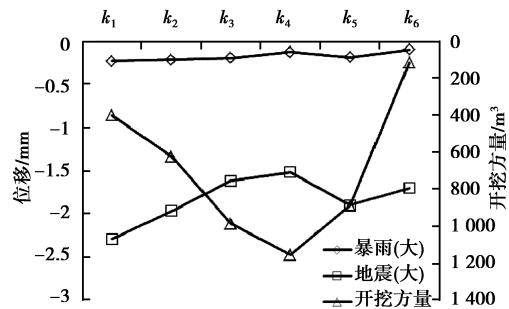


图 9 典型工况下监测点位移与开挖方量对比图

Fig. 9 Contrast of keypoints displacement and excavation volume under typical conditions

优选坡比边坡在暴雨(强)工况和地震(强)工况的水平朝坡外最大位移分别为 0.39 mm 和 2.8 mm,满足上述要求。同时由图 9 和前面计算成果进行对比分析, k_1 、 k_2 、 k_5 和 k_6 监测点由于变形幅度不大,因此采用较陡坡比,有效减少了工程的开挖方量,并且 k_3 和 k_4 监测点处开挖面有断层出露,坡体变形极大,因此,采用较缓边坡,导致开挖方量相对较大,但是其位移却大大改善减小。说明坡比优化后,在考虑开挖工程量经济性的前提下,保证了工程在运行期不产生可能影响工程运行功能的过大变形,使边坡处于较为稳定的状态。

因此,在工程施工进行时,应在考虑运行期可能遇见风险的前提下结合不同开挖坡比的影响程度,合理制定施工方案,特别在应力和位移剧变处,应重点进行防护,降低工程事故发生的风险。

4 结论

(1)当坡比一定时,暴雨工况下随着降雨强度的增加,水平向朝坡外位移逐渐增大,水平向拉应力则变化幅度不大;地震工况下随着地震烈度的增加,水平向位移和拉应力均逐渐增大,且增大的趋势更为明显。

(2)断层对坡体位移场有着明显的分割作用,最大位移均集中在逆向断层坡表出露处,并以此为中心逐渐向四周扩散减小,对应力场而言,逆向断层没有影响,顺向断层则会使应力沿顺向断层方向发生了一定的突变,最大拉应力则均集中在坡脚处;地震工况比暴雨工况对边坡的影响更为明显。

(3)不同暴雨工况和地震工况的作用下,坡体水平向朝坡外最大位移均随着坡比的增大而出现了不同程度的减小,且相同工况下,随着坡比的增大,边坡的水平向朝坡外变形幅度逐渐减小,但地震工况衰减幅度更为明显,说明地震强度对坡比优选的影响大。

(4)结合开挖方量、变形、应力的比较,对边坡优选坡比进行稳定性校核:在高程 1 047~1 089 m 范围内采用坡比为 1:0.5 进行开挖,在高程 1 089~1 129 m 范围内采用坡比为 1:1 进行开挖,在高程 1 129 m 以上采用坡比为 1:0.75 进行开挖,能够保证变形不超过 3 mm,具有一定的安全余度,认为满足工程需求,说明优化措施有效可行。

参考文献(References)

- [1] 中华人民共和国行业标准编写组. 水电水利工程边坡设计规范(DL/T 5353—2006)[S]. 北京:中国电力出版社, 2007. (The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Design specification for slope of hydropower and water conservancy project (DL/T 5353—2006)[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2007. (in Chinese))
- [2] 张永兴. 边坡工程学[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008. (Zhang Yongxing. Slope engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008. (in Chinese))
- [3] 李景, 李彧磊, 晏鄂川. 沪蓉西主干线施谭坝边坡工程最优坡比分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(增1): 439-441. (Li Jing, Li Yulei, Lan Echuan. Study of optimal design of the Shitanba slope at Hu-Rong West expressway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29 (Supp.1): 439-441. (in Chinese))
- [4] 崔宪丽. 堆积层滑坡的坡形改造数值模拟与优化防治研究[D]. 青岛:青岛理工大学, 2010. (Cui Xianli. Study on the numerical simulation of slope shape transformation and the optimized prevention of the debris landslides [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [5] 王乐华, 李建林, 李映霞, 等. 茨哈峡水电站右岸泄洪雾化影响区岩质高边坡稳定分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 32(2): 603-606. (Wang Lehua, Li Jianlin, Li Yingxia, et al. Stability analysis of high rock slope in flood-affected and atomization zone at right bank of Cihaxia Hydropower Station [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 32(2): 603-606. (in Chinese))
- [6] 贾梁. 降雨条件下干堆尾矿坝稳定性分析及设计坡比的探讨[D]. 绵阳:西南科技大学, 2015. (Jia Liang. The stability analysis and the design of slope ratio discussion of dry-tailing stacking under the condition of rainfall[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2015. (in Chinese))
- [7] 马宇, 郑亚娜, 杨宏丽. 非线性强度参数在软岩筑高面板堆石坝坡比确定中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2013(4): 80-83, 87. (Ma Yu, Zheng Yana, Yang Hongli. Nonlinear strength parameter in determining the slope ratio of soft rock high CFRD [J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(4): 80-83, 87. (in Chinese))
- [8] 李建林, 王乐华. 卸荷岩体力学原理及应用[M]. 北京:科学出版社, 2016. (Li Jianlin, Wang Lehua. Theories of unloading rock mass mechanics and its engineering practice [M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese))