

岩质陡高边坡稳定性评价与防治措施

刘力英, 魏立新

(广州市市政工程设计研究总院, 广州 510060)

摘 要:以典型工程实例为背景,借助 surfer 软件生成实际地形曲面。以此为基础,采用有限元软件建立较为接近实际的计算模型。计算分析了强降雨和地震作用对岩质高边坡的影响。研究表明:不同影响因素作用下,边坡均表现为开挖面以上近山顶坡面向临空面滑动,并形成浅层局部贯通的塑性区;降雨和地震作用对边坡产生了显著的影响,安全系数较自重作用分别减小 11.3% 和 14.5%;边坡形成了贯穿的塑性区,处于稳定状态,说明塑性区贯通是边坡失稳的必要条件;坡顶局部几乎临近极限平衡状态,在地震和降雨诱发因素作用下易产生局部失稳破坏。基于分析结果,制定了边坡防治措施,计算表明措施有效可行。

关键词:高边坡;稳定性评价;降雨影响;地震作用;数值计算

中图分类号:TU99

文献标志码:A

引 言

岩质高边坡是山区工程建设中的主要地质环境和工程载体,高边坡稳定问题是重大工程建设的首要工程地质问题和岩石力学问题^[1]。高边坡的稳定问题大多由外部条件诱发所致,其中降雨和地震作用最为突出。降雨使岩土基质吸力减小、下滑力增大并产生物化作用影响边坡的稳定;地震作用增加了山体下滑力矩,且易引起差异位移和液化而导致山体失稳。可见地震和降雨作用对岩质高边坡稳定性的影响值得探讨。

通过解析的方法很难求解边坡稳定对降雨和地震作用的响应,所以降雨和地震作用对边坡的影响研究集中在数值模型上;数值计算能够较好地刻画降雨和地震引起的土层应力和变形的变化,因此得到了很好的发展^[2-8]。然而现有边坡三维数值计算中,鲜有考虑岩土

的起伏状态,大多采用等厚均质地层进行建模计算,无法考虑实际边坡倾向的影响,从而导致边坡计算稳定系数出现较大偏差。事实上,山体边坡是一种具有分布不均匀、层面交错天然地质体,一般都处于起伏,甚至层间交错的状态。

鉴于此,以典型工程实例为依托,利用 surfer 软件形成实际地形曲面,以此为基础,采用有限元软件建立较为精细的计算模型。计算分析强降雨和地震作用下陡高岩质边坡的变形规律与稳定性,并提出了边坡防治措施。研究得到一些有益的结论,以期为类似工程实践提供借鉴。

1 工程概况

梅州市客家小镇风景区处于谷底,尾部南面边坡较缓构成峡谷,东侧坡高约 128 m,局部人工边坡段的坡度为 65°~85°,西侧坡高约 119 m。其中东侧坡面建有廊

收稿日期:2015-12-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51508119)

作者简介:刘力英(1978-),女,广东惠州人,高级工程师,硕士,主要从事岩土工程方面的研究,(E-mail)541055859@qq.com

桥、雕塑及亭阁等构筑物,且坡度较大,地质条件复杂(图1),因此该侧边坡能否在其使用期内安全可靠,一直是人们最为关心的问题。根据该项目岩土勘察报告可知场地岩土物理力学参数(表1)。

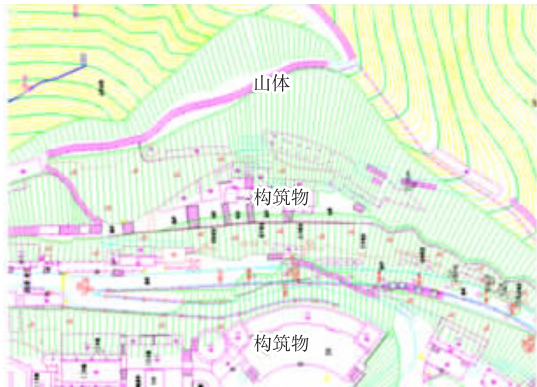


图1 山体边坡示意图

表1 岩土物理力学参数

岩土名称	重力密度 /(kN/m ³)	变形模量 E/MPa	抗剪强度	
			内摩擦角 φ/°	黏聚力 C/kPa
素填土	19.1	12	9.4	11
中风化粉砂质泥岩	19.8	50	20.2	130
微风化粉砂质泥岩	20.2	70	23.6	200
中风化中砂岩	21.3	900	25.5	100
中风化板岩	22.1	3000	29.7	150
微风化板岩	22.2	5000	31.15	187

2 数值计算

2.1 计算模型的建立

利用三维可视化软件 Surfer9.0,将位置分散的钻孔点所揭示的各地层插值为连续的数据点信息,形成如图2所示实际起伏地层分界面,进而导入有限元软件生成实际地层分界面。

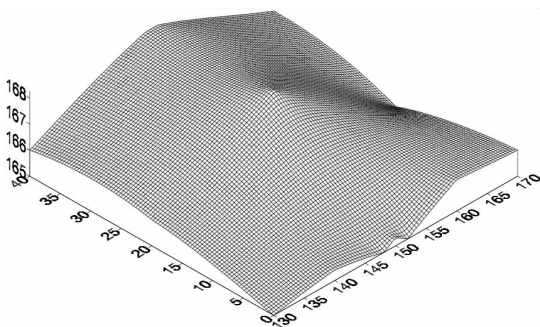


图2 填土地层起伏曲面(单位:m)

查阅项目所在场地降雨资料,计算所用降水量以当地暴雨标准施加,约为110 mm/d。渗流计算边界通过节点水头和流量表征,通过稳定流计算获取孔隙水压,而后以外荷载的形式加入应力计算以考虑应力渗流耦合作用。地震波竖向输入加速度约为0.65倍横向加速度^[9-10],其破坏性较横向弱,故本文重点考虑0度角入射剪切波对高边坡产生的影响;当前未取得该项目实际场地相应的强震记录,故选取已有强震记录EI Centro地震波,该波适用于II类场地,且该项目场地实际情况为II类场地。地震波在35s处趋于稳定,取地震持续时间35s。地震动幅值按照50a超越概率10%的地震加速度PGA=0.12g施加(图3)。

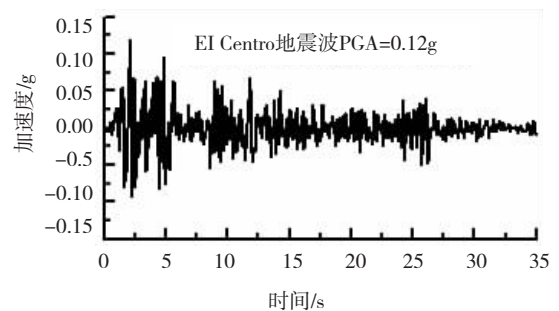


图3 地震加速度时程曲线

模型人工边界采用Lysmer提出的粘性边界,假想边界处设置阻尼器,采用Rayleigh阻尼^[11]表达式:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (1)$$

式中, $[C]$ 为阻尼矩阵, $[M]$ 为质量矩阵, $[K]$ 为刚度矩阵, α 为质量阻尼系数, β 为刚度相关阻尼系数。根据振型分解方法可由选定的2个振型阻尼比和相应的自振频率表示:

$$\alpha = 2 \left(\frac{\xi_i}{\omega_i} - \frac{\xi_j}{\omega_j} \right) \left(\frac{1}{\omega_i^2} - \frac{1}{\omega_j^2} \right) \quad (2)$$

$$\beta = \frac{2(\xi_i \omega_j - \xi_j \omega_i)}{(\omega_j^2 - \omega_i^2)} \quad (3)$$

式中, ξ_i 和 ω_i 分别表示第 i 振型的阻尼比和自振频率。计算中假定 $\xi = 0.05$, 根据特征值分析结果,采用周期最大的两个主振型计算的自振频率求解 α 与 β 值。

基于工程实践经验,充分考虑边界效应,取坡底以下1/3坡高为边界,侧向取1/5坡高为边界,由此确定东坡三维模型计算范围X、Y及Z方向分别取220m、320m和172m,总体模型如图4所示。模型中岩土采用

实体单元模拟,边坡稳定数值计算采用基于理想弹塑性的强度折减法,考虑到 Mohr - Coulomb 模型应用简单,计算所需参数较易获得,故岩土用该本构模型。

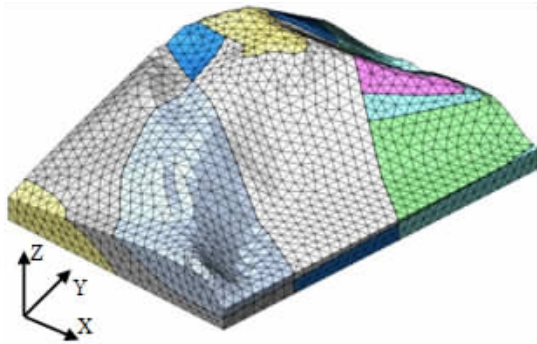


图 4 边坡总体计算模型

2.2 计算结果与分析

为了考察自重、降雨及地震作用对边坡变形和稳定性的影响,基于不同的因素设定相应的计算工况,即计算共含三个工况。图 5 为不同工况下边坡最大剪应变云图,图 6 为不同影响因素作用下对应的边坡稳定系数。根据强度折减法定义,安全系数 = 原强度指标/折减后的强度指标。

由图 5、图 6 可得到如下 4 点认识:

(1) 不同影响因素作用下,边坡剪应变呈现的规律相近,表现为开挖段以上近山顶坡面向临空侧滑动,并形成浅层局部贯通的塑性区。

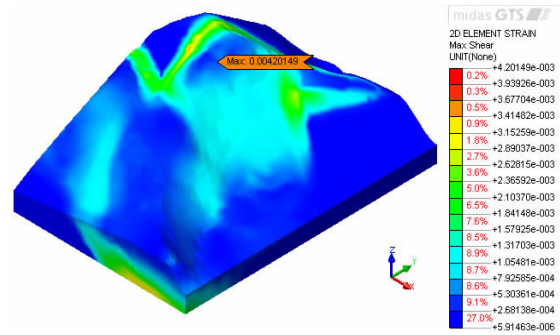
(2) 降雨和地震作用对边坡产生了显著的影响,两者对应的稳定系数分别为 1.41 和 1.36,较自重作用稳定系数 1.58 减小 11.3% 与 14.5%。

(3) 从剪切塑性变形分析,形成了贯穿的塑性区,但边坡在三种工况下稳定系数均大于《建筑边坡工程技术规范》1.35 的标准^[12],处于整体稳定状态,由此可见塑性区的贯通是边坡破坏失稳的必要条件,而非充分条件。

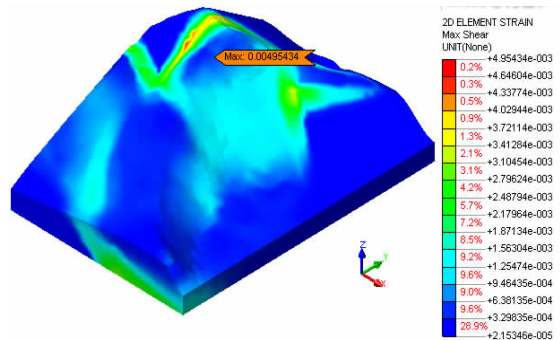
(4) 边坡开挖后,整体稳定性良好,但应注意到坡顶局部几乎临近极限平衡状态,在地震和降雨诱发因素作用下有可能产生局部失稳破坏。

3 边坡防治措施设计分析

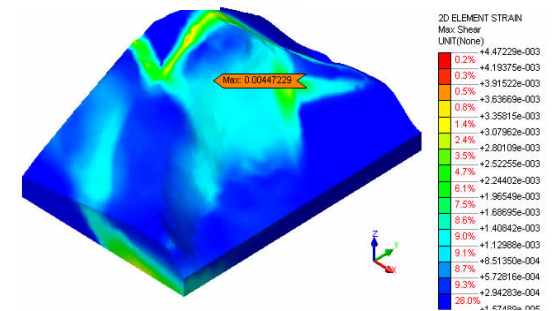
基于计算结果,为确保项目的安全稳定,有必要采取相应的防治措施予以加固。对于浅层滑动,加



(a)自重作用下山体最大剪应变



(b)地震作用下山体最大剪应变



(c)降雨作用下山体最大剪应变

图 5 不同工况最大剪应变云图

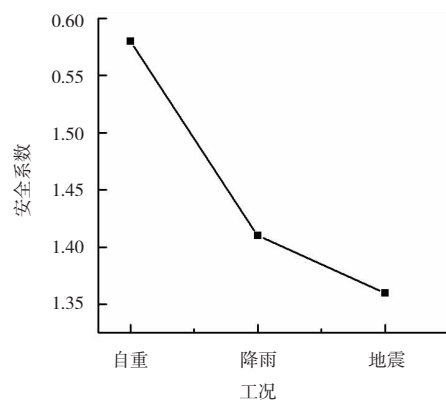


图 6 不同工况稳定系数

固的关键在于增强其薄弱层面间的抗剪强度。基于上述考虑采用锚固段长为 7 m,自由段长为 5 m,设计

拉力为 700 kN, 钻孔直径为 $\varphi 150$ mm, 倾角为 15° 的预应力锚索支护体系, 表面挂钢筋网喷射 20 cm 厚 C25 混凝土。

图 7 为坡面局部加固后边坡稳定性计算分析模型, 模型中挂网喷混用壳单元模拟, 锚杆用植入式桁架单元模拟。计算加固后边坡稳定系数如图 8 所示, 由图 8 可知, 三种工况加固后的稳定系数分别为 1.75、1.58 和 1.52, 较加固前稳定系数分别增加 10.7%、12.1% 和 11.7%, 说明利用预应力锚索较好地提高了围岩整体稳定性, 充分发挥了围岩自稳能力, 也从一个侧面说明基于计算结果采取的防治措施可行。

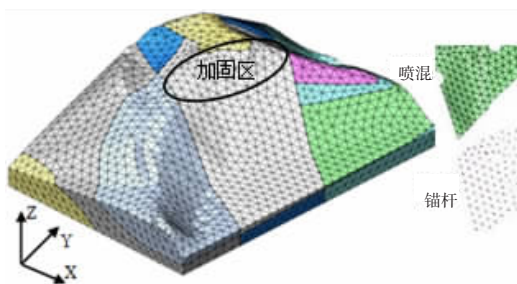


图 7 边坡加固后计算模型

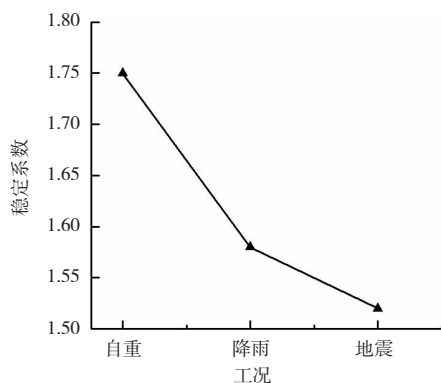


图 8 加固后不同工况稳定系数

4 结论

(1) 不同影响因素作用下, 边坡剪切变形呈现的规律相近, 均表现为开挖面以上近山顶坡面向临空面滑动, 并形成浅层局部贯通的塑性区。

(2) 降雨和地震作用对边坡产生了显著的影响, 两者对应的稳定系数分别为 1.41 和 1.36, 较自重作用稳定系数 1.58 减小 11.3% 与 14.5%。

(3) 边坡剪切变形形成了贯穿的塑性区, 但边坡仍处于稳定状态, 由此可知塑性区贯通是边坡失稳破坏的

必要条件, 而非充分条件。

(4) 坡顶局部几乎临近极限平衡状态, 在地震和降雨等诱发因素作用下有可能产生局部失稳破坏。基于数值结果制定边坡防治措施, 并通过计算表明措施有效可行。

参考文献:

- [1] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1525-1544.
- [2] 谢瑾荣, 周翠英, 程晔. 降雨条件下软岩边坡渗流-软化分析方法及其灾变机制[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 197-202.
- [3] 吴李泉, 张锋, 凌贤长, 等. 强降雨条件下浙江武义平头村山体高边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1193-1199.
- [4] 张登, 简文彬, 叶琪, 等. 尾矿库边坡时变分析模型及其应用[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 835-840.
- [5] 张社荣, 谭尧升, 王超, 等. 强降雨特性对饱和-非饱和边坡失稳破坏的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增 2): 4102-4112.
- [6] 于仁全. 复杂条件下边坡支护结构型式选择的关键因素[J]. 中国市政工程, 2014(5): 67-70.
- [7] 李祥龙, 唐辉明, 胡巍. 层面参数对顺层岩质边坡地震动力破坏过程影响研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 465-472.
- [8] 宋波, 黄帅, 蔡德钧, 等. 地下水位变化对砂土边坡地震动力响应的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增 1): 2698-2706.
- [9] 冯丽娟, 肖从真, 徐自国, 等. 悬挑结构竖向地震作用分析及设计要点[J]. 土木工程学报, 2008, 41(3): 65-70.
- [10] YANG Chunshan, MO Haihong, CHEN Junsheng, et al. Influence of seismic loading on segment opening of a shield tunnel[J]. The Scientific World Journal, 2014(3): 1-8.
- [11] 程选生, 郑颖人. 地震作用下无衬砌黄土隧道围岩结构安全系数的计算探讨[J]. 岩石力学与工程学

Stability Evaluation and Protection Measures of High Rock Slope

LIU Liying, WEI Lixin

(Guangzhou Municipal Engineering Design & Research Institute, Guangzhou 510060, China)

Abstract: The actual terrain surface was obtained with the aid of surfer software based on the typical engineering example. On this basis, the relatively actual calculation model was established by FEM software. The influence of rainfall and seismic action on high rock slope was explored. Research shows that excavation surface near the top of the hill slope moves to the free face and forms shallowly local plastic zone under the influence of different factors. Rainfall and seismic action have a significant effect on slope stability and the safety coefficient is reduced by 11.3% and 14.5% respectively compared with the dead weight. The slope is in stable state when it forms transfixion of plastic zone, which is the necessary condition of slope failure. The slope top is almost in limit state, and local instability and destruction are easy to be produced under rainfall and seismic action. Based on the analysis results, the measures to prevent and control the slope are established, and the calculation results show that the measures are effective and feasible.

Key words: high slope; stability evaluation; rainfall influence; seismic action; numerical calculation