

地震荷载作用下加筋高边坡的稳定性分析

屈 波¹, 邹 晖², 顾强康¹, 洪盛远³, 殷帛成¹, 郝 东⁴

(1.空军工程大学航空航天工程学院,陕西西安,710038;2. 93481 部队,北京 100070;
3. 西华大学建筑与土木工程学院,四川成都,610039;4. 空军航空大学校务部,吉林长春,130022)

摘要 为了更加准确地分析加筋高边坡在地震荷载作用下的稳定性,采用拟静力法结合有限元软件和强度折减法分析了加筋高边坡在不同地震荷载作用下的安全系数,经过分析,发现水平地震荷载对边坡的稳定性影响更大,水平向外的地震加速度最大只能加到 $0.154 g$, 竖直向下的加速度最大可以加到 $0.318 g$ 。通过对最不利情况下地震加速度的计算分析,绘制了加筋高边坡在地震荷载作用下安全系数的空间曲面图。并且定义了安全系数的影响因子 η , 计算了各个方向上地震加速度对安全系数的影响,从而确定出最危险的地震加速度方向为水平方向,为加筋高边坡的抗震设计提供了参考。

关键词 边坡稳定性;地震荷载;拟静力法;强度折减法;加筋

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.02.019

中图分类号 TU433 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)02-0081-05

Analysis of Stability on Reinforced Soil Slope under the Action of Earthquake Load

QU Bo¹, ZOU Hui², GU Qiang-kang¹, HONG Sheng-yuan³, YIN Bo-cheng¹, HAO Dong⁴

(1.Aeronautics and Astronautics Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2.Unit 93481, Beijing 100070, China; 3.School of Architecture and Civil Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China; 4. Department of Bovrrack, Airforce Aviation University, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to precisely analyze the stability of reinforced soil slope under the action of earthquake load, a method combining finite element method, pseudo static analysis and strength reduction method are adopted to calculate the safety factor of reinforced soil slope under condition of earthquake load. The results show that the stability of reinforced soil slope is more sensitive to the acceleration of horizontal. In the analysis, the most acceleration of horizontal is $-0.154 g$ and the most acceleration of vertical is $0.318 g$. Through the calculation of seismic acceleration of different directions, the surface diagram of safety factor of reinforced soil slope under earthquake load is obtained. And is defined to evaluate the effect of earthquake of different directions and the horizontal direction is the most dangerous. This research provides some effective reference for the earthquake resistant design of reinforced slope.

Key words: stability of slope; earthquake load; pseudo static method; strength reduction method; reinforced

收稿日期:2013-07-20

作者简介:屈 波(1989-),男,陕西咸阳人,博士生,主要从事机场地基处理和边坡加固技术研究.E-mail:15109249570@126.com

引用格式:屈波,邹晖,顾强康,等.地震荷载作用下加筋高边坡的稳定性分析[J].空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(2):81-85. QU Bo, ZOU Hui, GU Qiangkang, et al. Analysis of stability on reinforced soil slope under the action of earthquake load[J]. Journal of air force engineering university, natural science edition, 2014, 15(2): 81-85.

加筋高边坡以其较传统边坡占地少、稳定性高等优势而得到了广泛应用^[1]。但是其在地震作用下的失稳一直是加筋工程中亟待解决的一个难题。地震荷载作用下,加筋高边坡受力较为复杂,目前其稳定分析方法仍然基于极限平衡理论,所以只满足了平衡,而没有涉及到屈服准则及相关流动法则^[2-3],在考虑筋带作用下,土体的受力会发生改变。现行《公路加筋土工程设计规范》按简单土坡稳定性评价方法“拟静力法”评价整体稳定性。加筋高边坡采用简单土坡动力整体稳定性分析方法存在一定的不合理性。

地震作用从零增加到破坏荷载时,进行加筋高边坡完整的应力和应变渐进性破坏分析显然是不可能的。然而,若知道地震作用下加筋高边坡土体破坏时的荷载,再考虑适当的安全性来分析地震作用下加筋高边坡整体稳定性,往往也能满足工程的实际需求。近几十年来,地震作用下加筋高边坡稳定性分析方法有拟静力法、Newmark 滑块法、数值法、极限分析法等^[4-9]。本文以西南地区某加筋高边坡为背景,在考虑筋带对高边坡填土稳定性影响的情

表1 各土层的物理力学指标

Tab.1 The physical and mechanical parameters of soil

土层	天然容重 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	饱和容重 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘聚力 /kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	渗透系数 /($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	压缩模量 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	泊松比
粘土	18	21	60	24	0.001	30.0	0.32
填土	17	20	31	22	1.000	12.8	0.30

况下,利用有限元软件,基于强度折减法分析了加筋高边坡的稳定状况,实现了地震作用下加筋高边坡的稳定性计算。

1 建立加筋高边坡有限元模型

1.1 几何模型的建立和材料属性

该边坡位于我国的西南地区,属于地震多发区,地震设防烈度为8度。选取一个典型剖面进行分析,加筋边坡设计高度为26.4 m,分为上下2级,中间留有宽为1.5 m的马道。土工布的间距为0.6 m,上下各22层。加筋体的坡度为1:0.25,顶面筋材的铺设长度为10 m,沿深度依次增加,底面筋材的铺设深度为18.1 m。

加筋高边坡采用土工布加筋,其下部为粘土,强度较高。填土材料选用当地的砂粘土,具有较高的强度参数,适于高边坡的修筑。各土层的物理力学指标见表1,土体均采用莫尔-库伦模型。土工布的参数根据青岛旭域公司提供的资料选取,抗拉强度为500 kN/m。

表1 各土层的物理力学指标

Tab.1 The physical and mechanical parameters of soil

土层	天然容重 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	饱和容重 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘聚力 /kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	渗透系数 /($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	压缩模量 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	泊松比
粘土	18	21	60	24	0.001	30.0	0.32
填土	17	20	31	22	1.000	12.8	0.30

况下,利用有限元软件,基于强度折减法分析了加筋高边坡的稳定状况,实现了地震作用下加筋高边坡的稳定性计算。

计算中用土工格栅单元模拟土工布,其它材料用实体单元模拟。土工格栅与填土之间相当于钢筋混凝土计算中的组合式方法,也相当于应变比例系数为1的等效附加应力法^[10-11],即认为筋土之间变形协调,没有相对滑移。

1.2 网格的划分及计算过程设计

模型采用平面应变模型,使用15节点单元,网络疏密程度设置为中等,采用了绕坡脚点加密,经过软件的网络划分,单元数为1 452,节点数为11 889,应力点数为17 424,平均单元尺寸为1.54 m,具体的网格划分见图1。

2 地震荷载作用下的稳定性分析

2.1 竖直方向地震加速度对稳定性的影响

本文采用拟静力法进行分析。考虑到地震位置的不同会对边坡产生不同的影响。当震源位于加筋边坡下部时,主要产生竖向的加速度。并且在地震过程中,边坡的加速度的大小和方向会不断改变。所以,采用拟静力法,对边坡施加竖向加速度,变化范围为 $-0.4 g \sim 0.4 g$ 。计算步骤的设计主要是在边坡建成之后,施加一个塑性分析的计算步骤,通过总乘子来激活施加的惯性力。通过有限元计算分析,不同竖向加速度下,边坡的安全系数变化见表2和图2。最大的竖直向下的加速度只能加到0.318

图1 模型的网格划分

Fig.1 Divided mesh of model

g , 再增加时计算不收敛。

表 2 不同 α_y 下的安全系数 K

Tab.2 The safety factor under different vertical acceleration α_y

α_y	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.3	0.318
K	2.178	2.04	1.845	1.644	1.436	1.296	1.249	1.157	1.106

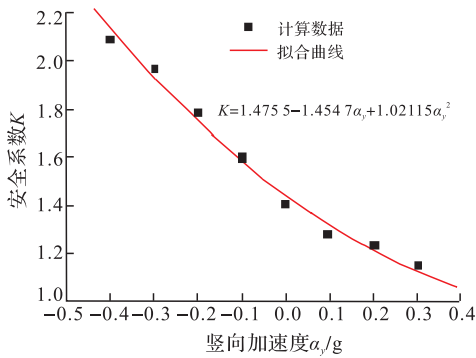


图 2 K 与 α_y 竖向加速度之间的关系

Fig.2 Relation of safety factor and vertical acceleration

当加速度为负,即向上施加了一个惯性力,随着惯性力的增大,边坡的 K 会不断增大,基本呈现出线性增长的趋势。

从图中可以看出,当加速度为正,即向下施加了一个惯性力,随着惯性力的增大,边坡的安全系数不

断减小,并且当加速度小于 $0.3 g$ 时,安全系数总是大于 1.1 ,说明边坡是稳定的。通过进一步的计算,安全系数大于 1.1 时,最大的竖向加速度为 $0.318 g$,即边坡保持稳定的临界竖向加速度为 $0.318 g$ 。通过数据拟合得到加筋高边坡与竖向地震加速度的关系为: $K = 1.48 - 1.45\alpha_y + 1.02\alpha_y^2$ 。

2.2 水平方向地震加速度对稳定性的影响

对于边坡的稳定性,水平方向的加速度的影响会更加明显。考虑到震中距边坡较远时,就会对边坡产生一个水平向的作用力,根据已有的研究,地震对高边坡的破坏主要集中在水平向的作用力上。所以,采用拟静力法,对边坡施加水平向的加速度,变化范围为 $-0.4 g \sim 0.4 g$ 。通过有限元计算分析,在不同水平向加速度作用下,边坡的安全系数的计算结果见表 3 和图 3。最大的水平向外的加速度只能加到 $0.154 g$,再增加时计算不收敛。

表 3 不同水平加速度 α_x 下的安全系数 K

Tab.3 The safety factor under different horizontal acceleration α_x

α_x	-0.154	-0.15	-0.106	-0.10	-0.05	0	0.1	0.2	0.3	0.4
K	1.004	1.024	1.103	1.121	1.238	1.436	1.969	2.442	3.039	4.356

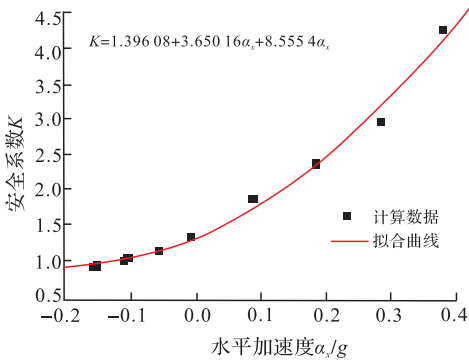


图 3 安全系数与水平加速度之间的关系

Fig.3 Relation of safety factor and horizontal acceleration

从图中可以看出,当加速度为正,即向坡体内部施加了一个水平惯性力,随着惯性力的增大,边坡的安全系数系数不断增大,说明这样的水平加速度对边坡稳定是有利的。

当加速度为负,即向坡体外侧施加了一个惯性力,随着惯性力的增大,边坡的安全系数系数会不断减小,基本呈现出线性递减的趋势。当加速度增大到 $0.15 g$ 时,安全系数减小到 1.024 ,相比于静力条件下的边坡,安全系数减小了 29% ,处于极限平衡状态,而边坡要保持稳定的极限水平加速度为

$0.106 g$,此时的安全系数为 1.103 。通过数据拟合得到加筋高边坡与水平向地震加速度的关系为: $K = 1.40 + 3.65\alpha_x + 8.56\alpha_x^2$ 。

通常情况下,边坡失稳是由坡体在重力作用下,剪应力达到了土体的抗剪强度,并且形成了塑性区造成的。从微观角度来分析,一个微观单元土体的破坏是一种轴向受压的破坏状态,当施加一个水平向的力时,力的作用点位于微观单元体的重心,即刚好位于滑裂面上,所以,水平向外的惯性力对土体的破坏起着加速促进作用,而水平向内的惯性力则阻碍土体的剪切破坏。从宏观上分析,水平向外的惯性力能够加速裂缝的形成与开展,而水平向内的惯性力对裂缝的形成有一定的阻碍作用。所以,安全系数会随着惯性力的方向的改变而呈现出完全相反的变化规律。

2.3 不同方向地震加速度对稳定性的影响

对于实际中的地震荷载,往往会同时产生水平和竖直的惯性力。所以,我们要分析不同惯性力组合作用下,边坡安全系数的变化规律。当有 2 个方向的加速度时,因为方向上会有 360° 的改变,计算量过大,所以先选取代表性的 4 个方向进行分析,方

向的分布见图 6。

首先考虑最危险和最安全的情况。通过有限元计算分析,在不同的加速度作用下,边坡的安全系数的计算结果见图 4 和图 5。

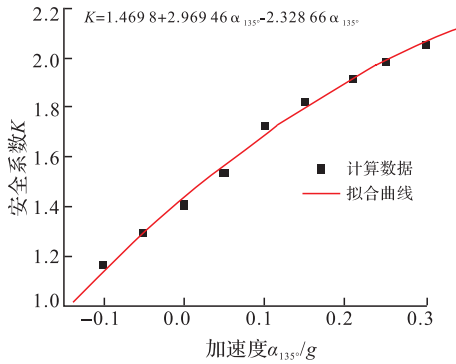


图 4 K 与加速度 α_{135° 之间的关系

Fig.4 Relation of safety factor and acceleration α_{135°

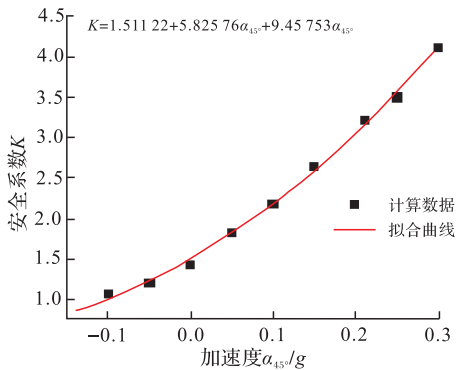


图 5 K 与加速度 α_{45° 之间的关系

Fig.5 Relation of safety factor and acceleration α_{45°

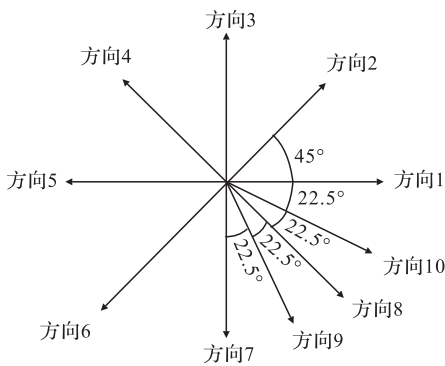


图 6 方向分布图

Fig.6 Distribution diagram of directions

从图 4 和图 5 可以看出,主要的控制变量是水平方向的加速度,只要水平方向向外的加速度不大于 $0.1g$,边坡的安全系数就大于 1,即边坡是稳定的。向坡体内部斜向上成 45° 方向是一个最为有利的情况。与之相对的加速度方向就是最不利的情况。在这 2 个方向上,加速度大小的改变,会引起安全系数明显的变化,变化范围为 $0.027 \sim 4.10$,变化幅度为 4.073 。这主要是由于,在这 2 个方向上水平和垂直方向的加速度的作用是一致的,起到相互

促进的作用。而在向坡体内部斜向下成 45° 方向即方向 6 和与之相对的方向 2 上,安全系数随加速度的变化不是太明显,变化范围为 $0.098 \sim 2.143$,变化幅度为 2.04 。这是因为,在这 2 个方向上,水平和垂直方向的加速度的作用是不同的,有相互抑制的效果。除去加速度为 $-0.15g$ 的数据,在 4 个方向上,安全系数随加速度呈线性变化。

通过以上的计算分析可知,最危险的加速度方向在方向 1 与方向 7 之间,所以补充计算了方向 9、和方向 10 的数据,运用 origin 软件进行分析计算,绘制出了安全系数随地震加速度变化的三维图(在最不利的情况下),见图 7。

图 7 安全系数的三维曲面图

Fig.7 Three dimensional surface of safety factor of reinforced soil slope

从图 7 可以看出,随着加速度的增大,在 α_x 较大, α_y 较小时, K 快速减小,而在 α_x 较小, α_y 较大时, K 表现出先快速减小后缓慢减小最后又快速减小的趋势。为了研究地震加速度在哪个方向上对边坡的影响最大。定义安全系数的影响因子为:

$$\eta = \left| \frac{K_1 - K_2}{\alpha_1 - \alpha_2} \right|$$

式中 K_1 、 K_2 为加速度,是 α_1 、 α_2 下对应的安全系数,通过计算各个方向的平均安全系数影响因子,确定出最危险的地震荷载作用方向,计算结果见表 4。

表 4 不同方向的下的 η

Tab.4 The η under different directions

加速度的方向	方向 1	方向 10	方向 8	方向 9	方向 7
η	3.16	3.05	2.82	2.21	1.08

从表 4 可以看出,水平向外的地震加速度对边坡的稳定性影响最大,而垂直向下地震的加速度对边坡的稳定性影响最小,并且当地震加速度的方向从水平向外逐渐变化到垂直向下时,其对边坡稳定性的影响也呈现出逐渐减弱的趋势。说明最危险的地震加速度方向为水平方向,在加筋高边坡的设计当中,可以根据该地区的地震烈度施加适当的地震水平方向的加速度来进行稳定性分析。

3 结论

加筋高边坡在地震荷载作用下的稳定性向来是加筋边坡设计的一大难题,一直未能很好地解决,是制约加筋工程设计理论发展的主要障碍,其主要原因是在于加筋高边坡的应力应变场的复杂性和地震荷载的随机性。本文以西南地区某加筋高边坡为背景,建立了加筋高边坡的有限元模型,并进行了水平和竖直方向的地震加速度作用下的高边坡稳定分析。通过计算分析,发现水平地震荷载边坡的影响最大更为敏感,水平向外的地震加速度最大只能加到 $0.154 g$, 竖直向下的加速度最大可以加到 $0.318 g$ 。通过对最危险情况下地震加速度对安全系数的影响,运用 origin 软件进行分析计算,绘制出了安全系数随地震加速度变化的三维图,并且定义了安全系数的影响因子,计算了各个方向上地震加速度对安全系数的影响,从而确定出最危险的地震加速度方向为水平方向。

参考文献(References):

- [1] 介玉新.加筋高边坡及计算方法[J].工程地质学报, 2010, 18(增刊): 263-267.
JIE Yuxin. High reinforced slope and related computation method[J]. Journal of engineering geology, 2010, 18(S): 263-267. (in Chinese)
- [2] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Geotechnique, 1999, 49(3): 387-403.
- [3] 陈惠发.极限分析与土体塑性[M].詹世斌,译.北京:人民交通出版社,1995:49-57.
CHEN Huifa. Limit analysis and plastic soil[M]. Zhan Shibin translation. Beijing: China communications press, 1995: 49-57. (in Chinese)
- [4] 田英豪,王秉纲.土工格栅加筋路堤机理研究进展[J].中外公路,2007,27(3):24-27.

- TIAN Yinghao, WANG Binggang Mechanism of geogrid reinforced slope[J]. Chinese and foreign highway engineering, 2007, 27(3): 24-27. (in Chinese)
- [5] 郭存鸽,杨有海,刘永河.用有限元强度折减法对加筋路堤边坡特性分析[J].路基工程,2010(1):101-103.
Guo Cunge, Yang Youhai, Liu Yonghe. Analysis on slope characteristics of reinforced slope with strength reduction finite element method [J]. Subgrade engineering, 2010(1): 101-103. (in Chinese)
- [6] 顾强康,刘伟.爆夯加固法在机场地基处理中的应用[J].空军工程大学学报(自然科学版),2004,5(2):20-22.
GUQiang-kang, LIU Wei. Application of Explosion Compaction Technology to Ground Strengthening in Airfield [J]. Journal of air force engineering university; natural science edition, 2004, 5(2): 20-22. (in Chinese)
- [7] 孙倩.高填方土工格栅加筋土边坡非线性有限元分析[J].勘察科学技术,2008(5):34-39.
Sun Qian. Non-linear finite element analysis of high slope geogrid reinforced soil slope [J]. Science and technology of investigation, 2008(5): 34-39.
- [8] Shiotani T. Evaluation of long-term stability for rock slope by means of acoustic emission technique [J]. NDT&E International, 2006, 39(8): 217-228.
- [9] HUANG Run-qiu, XIAO Hua-bo, JU Neng-pan, et al. Deformation mechanism and stability of a rocky slope [J]. Journal of china university of geosciences, 2007, 18(1): 77-84.
- [10] Koerner R M, Soong T Y. Geosynthetic reinforced segmental retaining walls [J]. Geotextiles and geomembranes, 2001, 19 (6): 465-476.
- [11] Ling H I, Mohri Y, Leshchinsky D, et al. Large-scale shaking table tests on modular-block reinforced soil retaining walls [J]. Journal of geotechnical and environmental engineering, 2005, 131(4): 465-476.

(编辑:徐敏)