

# 公路高边坡的稳定性分析与处理方法

周亦唐,任志华,费维水,杨坤华  
(昆明理工大学 建筑工程学院,云南 昆明 650224)

**摘要:**以云南省水普高速公路边坡稳定性分析和处理方法为对象,提出有针对性的边坡稳定性及应用加固岩土工程分析软件,考虑地震作用下山区高速公路高边坡的稳定性,最终提出工程处理的计算机分析方法.计算实例表明:该方法具有计算分析准确,工程安全可靠,快捷方便的特点,有较好的工程应用价值.

**关键词:**高边坡稳定性;岩土工程;地震作用

**中图分类号:**U417.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-855X(2005)01-0048-04

## Stability Analysis and Treatment Method of High Side Slope along Highway

ZHOU Yi-tang, REN Zhi-Hua, FEI Wei-Shui, YANG Kun-Hua

(Faculty of Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China)

**Abstract:** Based on the stability analysis and the treatment method of high side slope along normal and express ways, the analyzing software to account for the stability and application geotechnical engineering is proposed. In terms of the stability of high side slope under seismic actions, the final computer analysis method is demonstrated. The result of real case calculation indicates that this method is accurate, reliable, speedy and convenient, which is of great application value in engineering.

**Key words:** stability of high side slope; geotechnical engineering; seismic action; computer analysis method

## 0 引言

山岭重丘地区公路是交通运输的主要方式.我国国道主干线(高速公路)系统中的“五纵”、“七横”有相当一部分地处山区或重丘地区,而在西部,其地貌变化就更为复杂<sup>[1]</sup>.随着西部大开发的进行,将在西部山区修建越来越多的高等级公路.西部地区公路的工程地质条件非常复杂,地形、地貌变化大,且地震活动频繁,地震烈度、频率都较高.地震作用下山区公路高边坡的防治一直是山区公路修建的难点,所以有必要对地震作用下高边坡的稳定性及加固措施进行研究.以云南省水普高速公路高边坡为研究对象,介绍一种边坡防治设计的计算机分析方法,应用岩土工程分析软件对其进行稳定性分析,根据分析结果提出具体的加固措施.

软件采用的分析理论是极限平衡法,它包含了 Bishop,简化的 Janbu, Spencer, Morgenstern - Price, GLE 方法等,它通过选择滑动面的圆心及半径范围来搜索最危险的滑动面,涉及的影响因素比较全面,理论较为完善,其精度完全满足工程应用的要求.

## 1 工程设计资料概况

水富—普洱渡高速公路 K48 + 836 ~ K48 + 960 段(越岭线)处于浅~中切割的中低山斜坡地带,无断裂褶皱穿越该山坡.第四系崩积、残坡积物零星覆盖于基岩面上,主要为灰褐、灰黄、紫红色亚粘土含碎石,结构松散,容许承载力 200 ~ 250 kPa,局部泥质粉砂岩出露地表,上部为强风化,碎石状,容许承载力 300 ~ 350 kPa.下伏为三迭系地层,岩性由灰、深灰、灰黑色砂岩、泥质粉砂岩、泥岩夹炭质页岩组成,容许承载力 400 ~ 500 kPa.该地段地下水以裂隙水为主,富水性中等,其流量较小,对路基无影响,可忽略不计.路线

收稿日期:2004-09-07.

第一作者简介:周亦唐(1959~),男,教授.主要研究方向:土木工程交通土建. E-mail: ytzhou@public.km.yn.cn

所经区域内地震活动较频繁,震级大.根据中华人民共和国国家标准 GB18306 - 2001《中国地震参数区划图》地震峰值加速度为 0.2,对应的地震烈度为 8°.

## 2 稳定性分析

针对该路段边坡坡面较陡、边坡过高的情况,在设计中初步拟定边坡削方,并分台降低边坡坡率:弱风化地层取 1:0.5(下部两台),强风化碎石土层取 1:0.75(上部两台),台阶高度取 12 m,平台宽 2 m,平台上设凸埂式截水沟.根据实际地勘资料,利用岩土工程专业分析软件,建立如图 1 示分析模型.

地震作用下的边坡稳定性,如图 2 所示,通过岩土计算软件分析,计算中考虑地震烈度 8°,在未采取加固措施的情况下,其计算结果为:安全系数为 0.77,小于规范规定的 1.15.故需采取加固处理措施.

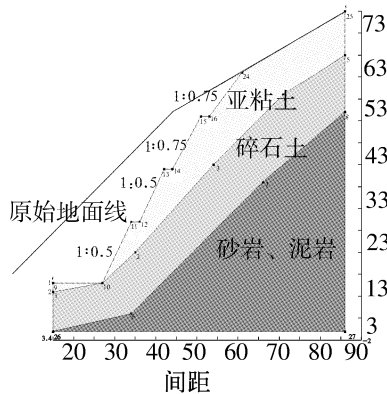


图 1 K48+900 未加固边坡模型

Fig.1 K48+900 unguayed side slope model

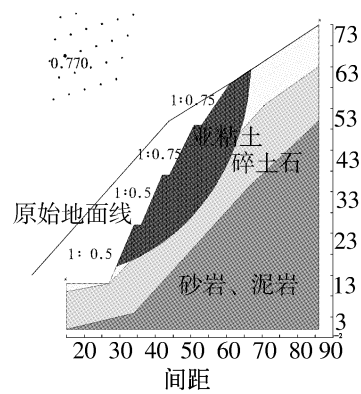


图 2 地震作用下的最危险滑动及安全系数

Fig.2 Most dangerous slipping surface and safety coefficient under earthquake function

## 3 混合方式加固处理

针对该边坡的加固设计,经技术经济分析,采用混合式加固处理.所谓混合式锚固结构即为由预应力锚索和普通锚杆构成的锚固格子梁结构.预应力为主动锚,普通锚杆为被动锚.对路堑边坡破坏机理研究表明,相同岩土体组成的路堑坡,其坡的不同部位的破坏机理是不同的.边坡下部因为剪应力高度集中而易剪裂,中部因压力差过大而受压致拉裂,上部因中下部岩土体变形牵引产生拉应力而拉裂.因此,所采用的加固措施为:边坡下部采用桩,并设墙结构结合被动锚杆,中部则采用主动锚,当中下部边坡岩土体变形受制约后,上部边坡岩土体仅能产生少量的蠕动变形,此时,可采用被动锚,这样既节约工程造价,又能达到有效加固的目的.主动锚与被动锚在路堑边坡的布置应遵循两个原则:(1)同一片梁采用同一种锚;(2)主动锚用于保证边坡的整体稳定性,被动锚用于防止浅层岩体失稳<sup>[2]</sup>.

### 3.1 设计方法

#### 3.1.1 锚杆(索)的计算<sup>[3]</sup>

1) 当施加锚固力后,安全系数计算式为:

$$K = \frac{\sum c_i l_i + \sum (W_i \cos \alpha_i - E_i \sin \alpha_i) \tan \varphi_i + T \cos \beta \tan \varphi}{\sum (W_i \sin \alpha_i + E_i \cos \alpha_i)} \quad (1)$$

式中:  $T$  为作用于边坡上的加固力(kN);  $\beta$  为锚杆轴线与滑动面的垂直夹角;  $\varphi$  为各土层内摩擦角的加权平均值;  $\alpha_i$  为第  $i$  土层破坏面与水平面的夹角;  $l_i$  为破坏面在第  $i$  土层的长度(m);  $W_i$  为第  $i$  层土的自重(kN).

当给定满足边坡稳定的许用安全系数  $[K]$  后,单位厚度边坡所需的加固力计算公式为:

$$T = \frac{[K] \sum (W_i \sin \alpha_i + E_i \cos \alpha_i) - \sum c_i l_i - \sum (W_i \cos \alpha_i - E_i \sin \alpha_i) \tan \varphi_i}{\cos \beta \tan \varphi} \quad (2)$$

2) 锚杆(索)的布置

依据上述两个布置原则,在边坡上部和下部布设被动锚,中部采用主动锚.布置锚杆(索)时注意以下

几点:(1) 为避免单根锚索(杆)承载力过大而应力集中及产生群锚效应而降低锚固力,锚索的水平垂直间距控制在  $1 \sim 4 \text{ m}$ ; (2) 为避免上部地表的动、静荷载对锚固的影响及防止高压注浆上覆土的隆起,减少对路基或桥台桩基的影响,锚索(杆)自上而下布设; (3) 锚索(杆)角度以能最大限度发挥其抵抗滑体滑动的能力,一般为  $15^\circ \sim 39^\circ$  或尽量与滑动面垂直<sup>[4]</sup>.

3) 锚索(杆)承载力为:

$$T_i = TL_i/n \quad (3)$$

式中:  $T_i$  为锚索(杆)沿坡面按一定水平和垂直间距布设后,每根的承载力(kN);  $L_i$  为锚索(杆)的水平间距(m);  $n$  为单元宽度内沿坡高布设的根数.

4) 锚杆(索)锚固长度由下式计算:

$$L_a = kN_i/\pi d q_s \quad (4)$$

式中:  $L_a$  为锚索锚固长度(m);  $N_i$  为每根锚索的设计锚固力(kN);  $d$  为锚索的锚固直径(m);  $q_s$  为锚固体表面与周围岩土间的粘结强度(kPa);  $K$  为永久性锚索安全系数.

### 3.1.2 框格梁的设计

混合式锚固框格梁简图如图3所示.框格梁是由纵梁和横梁组成的框架型结构,在一个框架单元内,纵梁与横梁的交接处设有锚索(杆).边界处纵梁有外延而横梁没有外延.

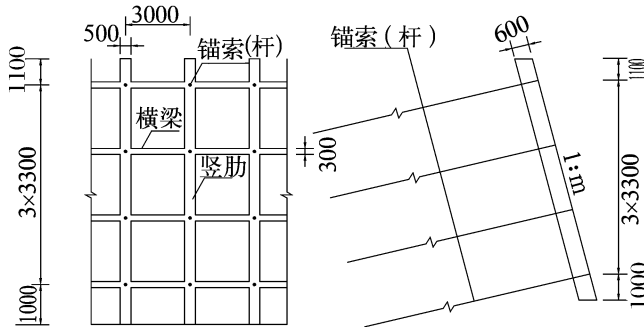


图3 混合式锚固框格梁及锚索(杆)布置图  
Fig.3 Composite anchor form grid roof beam and its fixing up pursue

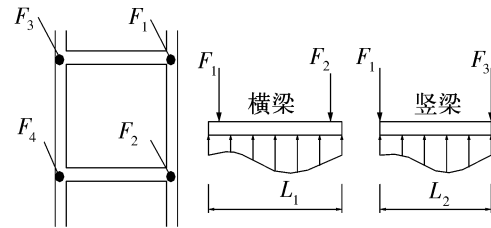


图4 框格梁受力模式  
Fig.4 Strength mode of the grid roof beam

框格梁的计算模型采用弹性地基梁进行分析计算.将框格梁分成纵梁和横梁按井字梁进行研究.不论是纵梁还是横梁,将其置于坡面上,在外力作用下地梁-地基系统都必须满足两个力学相容关系:静力平衡和变形协调.针对地梁来说,首先在各外力作用下要满足静力平衡条件;其次在外力作用下要使地梁底面与坡面始终接触,即地梁产生的挠度要等于坡面产生的相应方向的位移.在工作阶段,作用于地梁上的地基压力为已知,而锚索张力则通过程序分析计算确定<sup>[5]</sup>,这样计算地梁的问题就可以看成求解倒置于坡面上的连续梁的内力与支座反力(锚索张力)的问题.其计算模式见图4.具体求解时,直接求得梁的内力和弯矩.根据计算出的内力和弯矩,即可确定横梁和纵梁的尺寸和配筋.工程锚索设计荷载为600 kN,锚杆荷载为50 kN( $\phi 32$ )和30 kN( $\phi 25$ ),拟定纵梁尺寸为500 mm  $\times$  600 mm,横梁尺寸为300 mm  $\times$  300 mm.横梁每3.3 m一品.根据如下计算公式,计算框格梁的弯矩:

$$y(x) = y_0 \cos \lambda x \operatorname{ch} \lambda x - \frac{M_0}{2\lambda^2 EI} \sin \lambda x \cos \lambda x - \frac{Q_0}{4\lambda^3 EI} (\sin \lambda x \operatorname{ch} \lambda x - \cos \lambda x \operatorname{sh} \lambda x) + \frac{q}{4\lambda^4 EI} (1 - \cos \lambda x \operatorname{ch} \lambda x) - \frac{R_{a1}}{4\lambda^4 EI} [\sin \lambda (x - a_1) \operatorname{ch} \lambda (x - a_1) - \cos \lambda (x - a_1) \operatorname{sh} \lambda (x - a_1)] \quad (5)$$

$$M(x) = M_0 \cos \lambda x \operatorname{ch} \lambda x - 2\lambda^2 EI y_0 \sin \lambda x \operatorname{sh} \lambda x + \frac{Q_0}{2\lambda} (\sin \lambda x \operatorname{ch} \lambda x + \cos \lambda x \operatorname{sh} \lambda x) - \frac{q}{2\lambda^2} \sin \lambda x \operatorname{sh} \lambda x + \frac{R_{a1}}{2\lambda} [\sin \lambda (x - a_1) \operatorname{ch} \lambda (x - a_1) + \cos \lambda (x - a_1) \operatorname{sh} \lambda (x - a_1)] \quad (6)$$

式中:  $y_0$ ,  $M_0$ ,  $Q_0$  及  $R_{a1}$  分别为中跨跨中的挠度、弯矩、剪力和支点反力,可由下边界条件求解:

$$y(a_1) = 0, y(a_2) = 0, M(a_2) = 0, Y'(0) = 0 \tag{7}$$

计算出格子梁的内力后,即可按钢筋混凝土结构原理进行框格梁的配筋设计.按上式计算出的框格梁的配筋如图 5,图 6 所示:

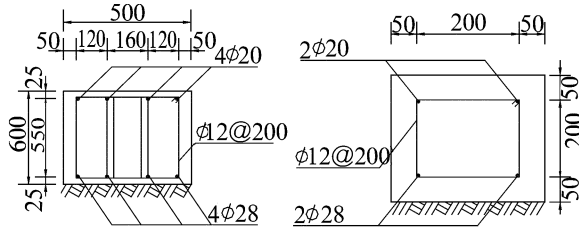


图 5 锚索框架纵梁与横梁配筋图

Fig.5 Muscle matches of longeron and cross-beam for the anchor

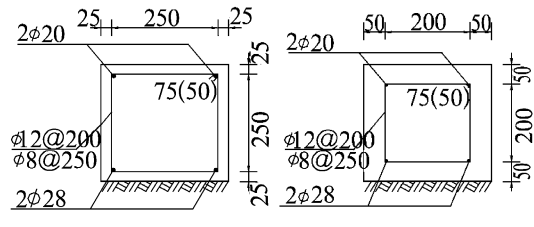


图 6 锚杆框架纵梁与横梁配筋图

Fig.6 Muscle matches of longeron and crossbeam for the stock

### 3.2 模型分析

根据规范规定的锚杆(索)的最大间距及其不发生群锚效应的最小间距来布设锚杆(索).边坡沿高度方向每3.3 m布设一根如图 3 所示.锚杆长度的设置根据图 2 边坡土层的滑裂面来确定,即锚索(杆)的长度至少延伸至滑裂面外一定锚固长度.

底部一阶由于岩性较好,弱风化,承载力较高,依据边坡破坏理论采用锚杆加固,根据上述锚杆长度设置原则,设置两层8 m和两层10 m,锚杆为φ32 钢筋.底部第二层是整个边坡最薄弱的环节,最容易出现滑动,设置两层16 m和两层18 m长的锚索,锚索为4φ15.2 钢绞线.最上面两层由于放坡较缓,仅可能发生局部滑动,采取构造措施,锚杆锚固,长度8~12 m,锚杆为φ32 钢筋.采取以上加固措施后,建立边坡分析模型.

采取以上加固措施后,在8°地震作用下的稳定性分析如图 7 所示.可以看出,采用混合式锚固结构加固后安全系数提高到 1.19,大于规范要求的 1.15,故该加固措施是有效的.

如果计算出的安全系数不满足要求,我们可以改变锚索(杆)的长度和根数来提高边坡的稳定性.这一步需要反复调节、试算,直到达到设计要求.

### 4 结束语

综上所述,该边坡稳定分析的计算机方法及混合式锚固加固结构设计经过实际工程检验是可行的.采用混合式锚固对边坡进行加固,有效的防止了边坡局部或整体失稳破坏,达到了边坡加固的目的.该分析方法可以很好的模拟边坡的真实形态,只要地勘准确,边坡分析模型具有很强的针对性,可靠性较高.

采用 G - Slope 软件对地震作用下的高等级公路进行防治设计具有快速、准确、可靠的优点.采用混合式锚固结构进行加固不仅设计方便、快捷,技术上可靠,而且经济上合理,值得在山区公路建设中加以应用.

#### 参考文献:

[1] 赵明阶,何光春.边坡工程处治技术[M].北京:人民交通出版社,2003.101~108.  
 [2] 唐树名,吕常新.混合式锚固结构在高速公路路堑边坡加固中的应用研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(5):702~704.  
 [3] 喻林青.预应力锚索框架在土质高边坡加固工程中的应用[J].路基工程,2001,102(2):58~61.  
 [4] 中国岩土锚固工程协会.岩土锚固工程技术[C].北京:人民交通出版社,1998.93~98.  
 [5] 李德芳,张友良,陈从新.边坡加固中预应力锚索地梁内力计算[J].岩土力学,2000,21(2):170~172.

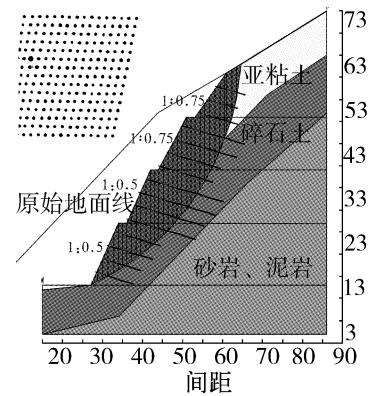


图 7 采用图中的加固方式后的稳定性分析

Fig.7 Side slope stability analysis after strengthening