

黄土路堑高边坡稳定性分析新方法 ——特殊滑裂面快速搜索法

郑良飞¹, 折学森¹, 叶万军²

(1 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2 西安科技大学 地质与环境工程系, 陕西 西安 710054)

摘要: 黄土路堑高边坡自身的特点, 决定了其失稳破坏时滑裂面的特殊特征。综合考察大量失稳黄土高边坡实例, 发现其滑裂面剖面形态多呈上陡下缓的“L”形。利用传统稳定系数的概念进行分析, 与实际情况出入较大。利用数学方法, 将黄土路堑高边坡的滑裂面概化为“抛物线”形, 推导出其稳定性分析表达式, 建立特殊滑裂面快速搜索的方法。实际检验表明, 该方法弥补了其他分析方法的不足, 更符合实际。

关键词: 黄土高边坡; 抛物线形滑裂面; 稳定性分析方法

中图分类号: P931.2 文献标志码: A 文章编号: 1672-6561(2008)02-0188-04

New Stability Analysis Method for High Cutting Loess Slope —Quick Search Method for Special Slide Surface

ZHENG Liang-fei¹, SHE Xue-sen¹, YE Wan-jun²

(1 Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2 Department of Geological and Environmental Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: The characteristics of high cutting loess slope determine the special character of its sliding surface when it is in unstable condition. It is discovered that the sliding surface on the section along slope shows L-shape. There is a big difference between calculation result and the real situation when computing by the conception of traditional safety coefficient. The mathematic method is used to simplify the sliding surface of high loess slope as “parabola” shape, the formula for stability analysis is deduced, and the method for quickly searching the special sliding surface is established. The application results show that this method can overcome the disadvantage of other methods.

Key words: loess high slope; damage face of parabola shape; method for stability analysis

0 引言

在黄土地区修筑公路, 常会遇到黄土边坡问题。公路行业认为高度大于 20 m 的土质边坡或高度大于 30 m 的岩石边坡称为高边坡。黄土高边坡一般由马兰黄土、离石黄土、午城黄土或不同时代的软弱基岩(基底)组成, 坡体结构构造较复杂, 滑裂面形状特殊, 组成物质强度差异明显^[1-3]。按常用的裂隙法和圆弧法对高边坡进行稳定性分析, 因

其假定条件与实际情况有所差异, 分析结果与实际情况差别较大, 不利于快速、高效、正确地解决工程问题^[4-9]。为此, 笔者根据大量实际黄土高边坡的调查和分析, 针对黄土路堑高边坡, 提出了一种新的分析评价方法。

1 黄土路堑高边坡滑动失稳特征

为了深入了解黄土高路堑边坡失稳滑动特点, 对陕北、关中等地已建和在建公路数百处路堑边坡

收稿日期: 2007-10-20

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2007E209); 陕西省交通厅项目(06-19K)

作者简介: 郑良飞(1976-), 男, 湖南平江人, 博士研究生, 从事路基工程研究。E-mail: zhengliangfei@126.com

进行了较详细调查, 将调查结果及国内已有的调研资料进行综合分析, 得出几点认识^[2]。

(1)黄土边坡失稳的滑裂面与土体物理力学性质关系密切。如榆林—佳县公路黄土边坡以坍塌为主要失稳破坏形式, 其土体粉粒含量高, 塑性小, 因此滑裂面接近为直线(图 1)。而铜川、关中塬边地区的黄土边坡土体塑性指数大, 天然结构性强, 滑动面形状通常为上部直线段和下部曲线段组成的复合面(图 2)。

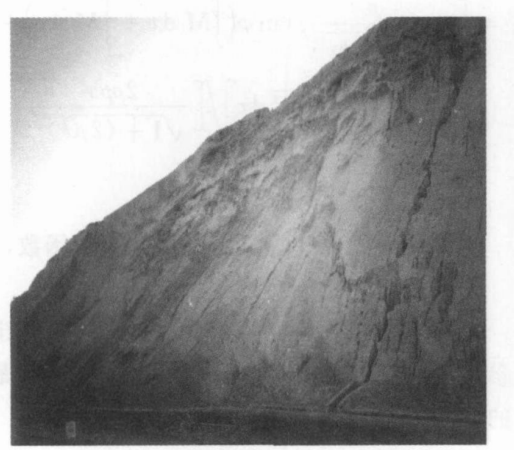


图 1 榆林—佳县公路黄土边坡坍塌

Fig. 1 Collapse in Loess Slope of Yulin-Jiaxian Highway

都出现在坡脚以上一定高度处, 出现局部坍塌情况较多(图 3)。而关中塬边地区地下水系较发达, 边坡坡脚土体含水量较高, 结构强度低, 因此, 坡脚处土体塑性区发展是边坡失稳的主要原因。

(4)切断山嘴或山梁的黄土边坡, 因侧向约束条件的变化, 常出现向两侧的坍塌(与路线走向近平行, 而非垂直路线走向)。如降法汤及延安姚店—延川公路堑口边坡的滑坍(图 4)。

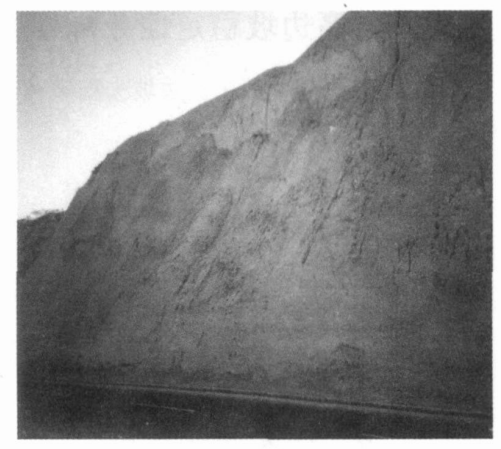


图 3 黄陵—延安公路边坡破坏

Fig. 3 Slipperiness in Loess Slope of Huangling-Yan'an Highway

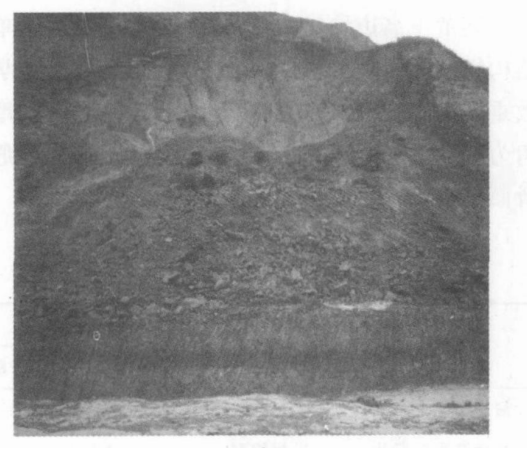


图 2 铜川—黄陵公路黄土滑坡

Fig. 2 Slide in Loess Slope of Tongchuan-Huangling Highway

(2)土体中的节理常控制黄土边坡的坍塌。如延安姚店—延川公路边坡, 多处边坡滑动面顺节理形成。黄土节理发育路段, 十余米高的边坡也会产生坍塌。坡体较高段, 滑动面一部分顺节理形成, 一部分为剪裂面。

(3)黄土高边坡滑动面形式各异, 常由多种地层组成, 强度差异大。如陕北地区黄土边坡沿坡顶向下, 强度逐渐增大, 地下水位低, 因此, 滑动面大

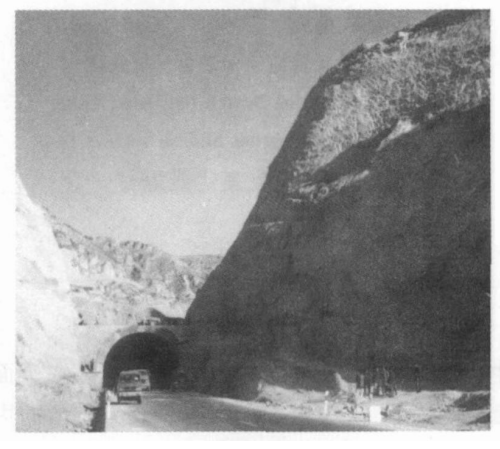


图 4 堑口边坡的滑坍

Fig. 4 Collapse in Loess Slope of Yakou Highway

(5)阶梯形黄土高边坡坍塌情况大体可分整体边坡失稳滑动和局部某一台阶边坡坍塌两种。

(6)大气降雨及气温变化对组成黄土边坡的土体强度影响显著, 常促成灾变, 对滑裂面形状影响很小, 但不可忽视其对裂隙深度的影响。

(7)黄土边坡失稳滑动, 常形成复合滑裂面形状, 其上部直线型(垂直或倾斜); 中部曲线型或直线型, 下部直线型或曲线型。复合滑裂面形状由多

方面因素决定, 主要包括坡体地层结构、土体性质、节理分布及发育情况、坡高、坡型、坡度以及坡顶倾斜度等。

理论分析时, 滑裂面形状假定十分重要, 应注意假定的滑裂面形状要尽可能逼近实际情况, 所做的假定要合理、正确并便于研究和工程应用。有鉴于此, 根据黄土高边坡滑裂面的特征, 可将滑裂面形状简化为上陡下缓的抛物线形。

2 黄土路堑高边坡稳定性分析方法

依据实际情况, 建立黄土高边坡失稳破坏稳定性分型模型, 选用坐标系如图 5。

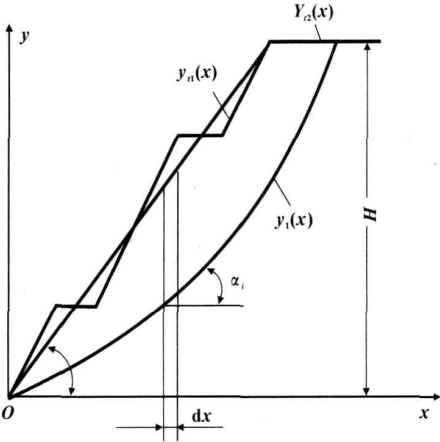


图 5 确定最危险滑动面计算简图

Fig. 5 Calculation Sketch for Determining the Most Dangerous Sliding Surface

瑞典条分法稳定系数表达式为

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n \tan \varphi_i W_i \cos \alpha_i + \sum_{i=1}^n l_i c'_i}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i} \quad (1)$$

式中: W_i 为第 i 条块的质量; l_i 为第 i 条块滑面的长度; α_i 为第 i 条块滑面的倾角; c'_i 为土体的内聚力; φ_i 为第 i 条块土体的内摩擦角。

当滑体划分的条块数趋于无穷时, 对式(1)取极限, 再根据积分的定义, 稳定系数可表示为

$$F_s = \frac{\gamma \cos \alpha \tan \varphi \left[\int M_1 dx + \int M_2 dx \right] + \int c' \frac{dx}{\cos \alpha}}{\gamma \sin \alpha \left[\int M_1 dx + \int M_2 dx \right]} \quad (2)$$

式中: $M_1 = y_{i1}(x) - y_l(x)$; $M_2 = y_{i2}(x) - y_l(x)$; γ 为土的重度。

由于黄土高边坡失稳破坏的主要方式是坍塌型, 破坏面为上陡下缓的似“L”型, 可用抛物线近似

拟合。设滑裂面方程为

$$y = px^2 \quad (3)$$

式中: p 为形状参数。

又 $\tan \alpha = y' = 2px \quad (4)$

$$\sin \alpha = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha}} = \frac{2px}{\sqrt{1 + (2px)^2}} \quad (5)$$

$$\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2px)^2}} \quad (6)$$

将式(5)、(6)代入式(2), 可得

$$F_s = \left[\frac{\rho}{\sqrt{1 + (2px)^2}} \tan \varphi \left(\int M_1 dx + \int M_2 dx \right) + \int c' \frac{1}{\sqrt{1 + (2px)^2}} dx \right] \left/ \left[\frac{2px}{\sqrt{1 + (2px)^2}} \left(\int M_1 dx + \int M_2 dx \right) \right] \right. \quad (7)$$

显然, 稳定系数是滑弧形状参数 p 的函数, 即

$$F_s = f(p) \quad (8)$$

视具体边坡情况, 建立滑面曲线方程, 给出形状参数 p 的搜索范围和合理步长, 找到使 F_s 最小时的 p , 便可找到最危险滑面。

3 算例

3.1 算例一

某黄土高边坡, 高 40 m, 坡度 53° , 为黄土单一结构模型, 系一类均质体边坡, 其土体物理力学参数重度为 17.3 kN/m^3 , 内聚力为 65.5 kPa , 内摩擦角为 26° , 以本文法和圆弧法对该边坡进行最危险滑面搜索, 结果如表 1。

表 1 某高边坡稳定安全系数计算结果

Tab. 1 Computed Results for a High Loess Slope

类型	本文法	圆弧法	
		瑞典法	毕肖普法
最小稳定安全系数	1.24	1.28	1.34
最危险滑面形状	抛物线型	圆弧型	

从表 1 可以看出, 特殊滑裂面快速搜索法计算结果偏小, 原因是圆弧法计算时假定的滑面总体上缓于本文法计算时所假定的滑面, 从而使计算结果偏大。

3.2 算例二

铜黄公路 K105+790~+950 高边坡是该路线高度最大的边坡, 地层结构较复杂。现对其未改变设计方案时的坡型用本文提出的方法计算。在搜索最危险滑面时, 将边坡作为均质体, 但各参数对

稳定性计算的贡献按其厚度所占数值进行加权平均处理,计算结果如表2。

加权平均后各参数分别为:重度 17.3 kN/m^3 ,内聚力为 88.75 kPa ,内摩擦角为 24.19° 。从加权平均值结果分析可以看出,如果将加权平均参数与纯黄土参数进行比较,重度及内摩擦角变化不大,但内聚力增长显著,主要原因是古土壤及钙质结核内聚力较大。

表2 K105+790~+950 计算参数加权平均统计

Tab. 2 Statistics Characteristics of Calculation					
Parameters for the High Loess Slope K105+790~+950					
土名	指标	厚度/m	平均值	权值	权参数
Q ₃ 黄土	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	9	16.3	0.1	1.63
	c/kPa		44		4.4
	$\varphi/^\circ$		22.7		2.27
Q ₂ ² 黄土	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	27	16.6	0.3	4.98
	c/kPa		51.2		15.36
	$\varphi/^\circ$		22.8		6.84
Q ₂ ¹ 黄土	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	31	16.7	0.35	5.58
	c/kPa		41.8		14.63
	$\varphi/^\circ$		24.1		8.44
古土壤	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	16.7	18.9	0.2	3.78
	c/kPa		96.8		19.36
	$\varphi/^\circ$		24.7		4.94
钙核层	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	4.3	23.1	0.05	1.16
	c/kPa		700		35
	$\varphi/^\circ$		41.2		2.06

根据原始坡面形状,进行3次曲线拟合出坡面方程

$$y = -0.0001x^3 + 0.0052x^2 + 1.2729x + 1.1492 \tag{9}$$

设滑面形状为

$$y = px^2 \tag{10}$$

对公式(1)用Matlab编制程序,通过自动搜索,可得到形状参数与稳定系数关系(图6)。搜索结果,最小稳定系数1.15,形状参数0.0168。即最危险滑面方程为

$$y = 0.0168x^2 \tag{11}$$

4 结语

公路路堑黄土高边坡一般由多种性质不同的土层组成,坡顶面通常有一定的倾斜度且坡型多为阶梯形,常用的圆弧法分析结果偏于保守。根据典型黄土高边坡失稳破坏特点,建立了一种新的黄土

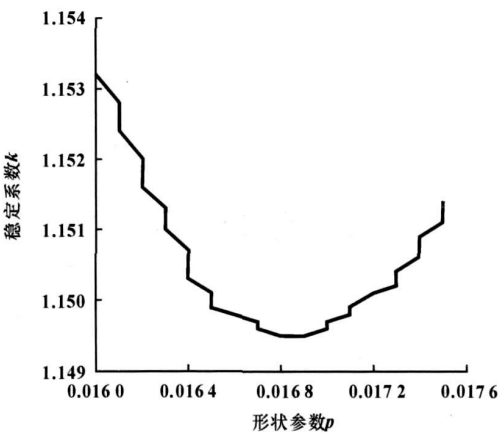


图6 形状参数p与稳定系数k的关系

Fig. 6 Relation Between Shape Coefficient p and Safety Stability Coefficient k

路堑高边坡稳定性分析方法——特殊滑裂面快速搜索法,算例分析结果表明:该方法应用可靠,其稳定系数计算值与实际边坡的稳定性状况能较好吻合。同时该方法较圆弧法适用范围更广且使用方便。进一步应着重研究该方法与圆弧法、推力传递法等其他成熟分析方法的区别,并尽可能简化,使其应用更灵活、更方便。

参考文献:

[1] 赵学勤,陈运理.考虑垂直裂隙影响的均质黄土挖方边坡稳定性分析[J].岩土工程学报,1981,3(3):43-49.

[2] 长安大学.铜黄公路黄土高边坡性状分析与治理对策研究[R].西安:陕西省交通厅,2002.

[3] 周欣华,党进谦,李靖.黄土边坡及其稳定分析图简介[J].西北农业大学学报,1999,27(2):101-104.

[4] 徐军,刘东升,郑颖人.具有高次非线性和复杂性功能函数的岩土工程可靠度分析[J].岩石力学与工程学报,2001,20(2):160-163.

[5] 吉锋,刘汉超.渐进性破坏随机法在边坡稳定性分析中的应用[J].水文地质工程地质,2004,31(3):62-65.

[6] Donald, Chen Z Y. Slope Stability Analysis by Upper Bound Approach[J]. Fundamentals and Methods, 1997, 34: 853-862.

[7] 时卫民,叶晓明,郑颖人.阶梯形边坡的稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2002,21(5):698-701.

[8] 王东耀,折学森,叶万军.基于可拓工程法的黄土路堑边坡稳定性评价方法[J].地球科学与环境学报,2006,28(3):57-60.

[9] 叶万军,折学森,陈志新,等.基于可靠度理论的黄土高边坡优化设计[J].地球科学与环境学报,2005,27(2):82-85.