

文章编号: 1005-0523(2007)05-0001-04

长晋高速公路顺层滑坡形成机理数值分析

郑明新¹, 马国正¹, 王恭先², 张 华², 赵小平¹, 张卢明¹, 钟亮根¹

(1. 华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 中铁西北科学研究院, 甘肃 兰州 73000)

摘要:在对长晋高速公路K25—K32段顺层滑坡现场地质调研及设计资料分析的基础上,从顺层滑坡发育的地层岩性与坡体结构出发,总结了顺层变形破坏特性;进而针对长晋高速K31顺层滑坡,采用有限元程序分析路堑开挖前后、抗滑桩等工程治理实施后及在降雨入渗工况下应力分布与变形机制,结合位移监测资料探讨了具体滑坡稳定状态。

关键词:顺层滑坡;形成机理;数值分析

中图分类号:P642.2

文献标识码:A

1 前言

山西省长治——晋阳高速公路K25+285—K32+200路堑地段为P₂砂岩夹砂质泥岩、泥岩,或砂泥岩互层,并夹有煤系地层,公路建设中因路基开挖使原来处于不稳定状态或极限平衡状态的边坡发生了顺层滑移。本文在调研顺层滑坡特征基础上,依据滑坡形成条件、诱发因素,对典型滑坡开展数值分析,结合滑坡动态监测资料探讨顺层滑坡形成机理。

顺层滑坡^[1]一般指主滑带与岩层产状基本一致,滑动后滑体的结构基本保持较为完整状态的滑坡。通常主要发生在以下两种地层中:

(1) 砂泥岩软硬互层地层:滑动面多沿渗水的砂岩底部或不透水的泥页岩顶部滑动,常形成多层性滑坡;巨厚层的软硬岩相间结构在滑动过程中因巨厚硬岩层易于开裂而形成多级滑坡。例如长晋高速公路K28+700~K29+100段为硬质砂岩与软质薄层泥页岩互层,滑动面多沿不透水软质泥页岩顶部滑动,形成2~3层滑坡。

(2) 滑体与滑床均为厚层硬岩,厚层硬岩间存在软弱夹层,易于沿此软弱夹层发育形成滑坡。

+200段为构造剥蚀基岩中低山区,山势平缓,公路在该段以路堑形式通过。

(2) 地质构造特征:地处太行隆起区,是地震活动较弱的构造单元,地震基本烈度未Ⅵ级,构造活动格局基本稳定。

(3) 地层岩性:该段地层为二叠系上统石盒子组P₂,岩性为黄绿色中厚层状中细粒砂岩夹砂质泥岩、泥岩及砂泥岩互层,夹有煤系地层。试验表明,泥岩软化系数为0.3~0.7,孔隙率13%~17%,抗压强度80~1500 MPa。砂泥岩地层中粘土矿物含量较高,加上构造运动、风化等作用使之亲水性强、抗水性弱、抗风化弱的特点。

(4) 坡体结构特征:① 岩层倾向与线路左侧边坡坡向一致(顺坡向);② 基岩产状为270°~310°∠17°~25°,岩层倾角较大,呈单斜构造。③ 软弱夹层发育在砂岩底部与泥岩顶部接触部位,软弱夹层含水量较大。局部地段煤系地层发育,煤系地层遇水极易于软化,上部岩石多沿其层面蠕动形成顺层滑坡。例如长晋高速公路K32段处在砂岩底部与泥岩顶部接触的软弱夹层部位不断有渗水现象,渗水地带多形成滑动带。

2 长晋高速公路K25—K32段地质环境特征

3 长晋高速公路顺层滑坡形成机制分析

3.1 顺层滑坡形成的主要特征

(1) 地形地貌:长晋高速公路K25+285—K32

收稿日期:2007-09-28

基金资助:山西省交通厅科研项目及国家自然科学基金项目(50668002)

作者简介:郑明新(1966—),男,陕西大荔人,教授,博士,从事岩土工程教学与科研,主研滑坡与路基病害防治。

(1) 当前缘筑路遭受切割,则产生从坡外向坡内的应力松弛,近坡面一带的岩体因松弛而导致降水渗入并集中至底部软弱带,使主滑带沿着此软弱层由前向后逐渐形成.

(2) 滑坡中后部的加载造成软弱带由后向前逐渐变形.

(3) 软弱夹层某一部分受到水的补给,潜在滑带从此处最先形成,逐渐向前、向下发展.此变形主要在主滑段,处于蠕变阶段,该过程非常漫长,时滑时停,逐渐加速直到整个滑带贯通进入滑动阶段.

3.2 顺层滑坡形成机制分析

研究段砂泥岩地层极易沿着泥岩层顶部或软弱薄煤地层形成顺层变形,其过程大体经历3个阶段:

(1) 蠕变阶段:伴随剪应力集中产生蠕变挤压的过程.主要由于开挖、堆载等造成潜在滑动带的应力局部集中,渐进破坏滑带土体单元,并在边坡表面开始出现裂缝.

(2) 剪切阶段:随着边坡岩土体蠕变位移的增加和剪切带应力集中,逐步将岩土体单元剪切破坏并形成连贯剪切面的过程.

(3) 滑动阶段:当剪切面全部贯通后,岩土体沿着软弱滑动带做整体滑动形成顺层滑坡.

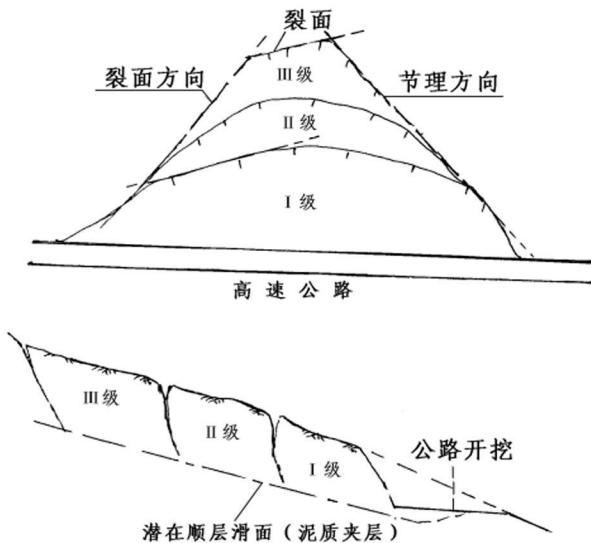


图1 顺层滑坡扩展模式(上平面图,下纵断面图)

上述三个阶段对于不同的边坡可能会表现出不同的特点,但总体上存在三个阶段^[2].对于塑性较大的泥岩及沿软弱层滑动者,其塑性变形特征明显,滑坡产生前兆迹象明显,滑动较缓慢.而进入滑动阶段后,降雨入渗使滑动带泥化,从而顺向边坡易于形成顺层滑动,这正是砂泥岩地层顺层滑坡的形成机制.

顺层滑坡一般都是由小到大随着时间具有扩展特点.蠕变周期因边坡条件不同而异,短者几天,长者达几年.有的经历若干次周期性的扩展,形成多级

滑坡,如图1所示.

I:不稳定边坡的蠕变→剪切→滑动;

II:滑坡后壁土体蠕变→剪切→滑动;

III:新滑体后壁土体蠕变→剪切→滑动.长晋高速公路K25段顺层滑坡复发即如此.

4 长晋高速公路K31顺层滑坡形成机制的数值分析

K31+170~K31+700顺层滑坡地处挖方路段,斜坡平均坡度约 22° ,滑坡前缘高程1051~1060m,后缘高程1110m,前缘宽约125m,中上部宽约90~100m,长度达260m,体积60万 m^3 ,其中浅层滑塌体总方量约6万 m^3 ,见图2.现路堑有五级平台,平台前缘斜坡坡度 $40^\circ\sim 45^\circ$.目前已采取预应力锚索及一排钢轨微桩,顶部刷方减重进行了综合治理.

4.1 滑坡地质条件及其成因分析

(1) 地层岩性与坡体结构特征:地层由第四系黄土(Q₁₋₃)、第三系上新统冲洪积物(N₂)与P_{2s}砂岩、砂质泥岩夹泥岩或薄层煤层及P_{1x}砂、泥岩互层构成.地层为倾向线路的单斜构造, $275^\circ\sim 295^\circ\angle 17^\circ\sim 25^\circ$,可见两组节理 $330^\circ\angle 65^\circ\sim 70^\circ$ 和 $65^\circ\angle 75^\circ$.在砂岩底部与泥岩接触面处软弱夹层含水量约20%,夹层因受挤压泥化具明显的揉皱滑动现象,形成潜在滑动带.

(2) 水文地质条件:该段地下水类型为松散岩类孔隙水,属潜水类型,局部地下水埋藏较浅.边坡开挖出露基岩表明节理裂隙发育,坡体内地下水丰富出现上层滞水,K32+157右侧探槽揭示在深3.5m位置沿软弱面向外渗水,泥岩夹层呈流塑状.

(3) 成因分析

① 特殊的坡体结构是形成滑坡的内在因素,其中砂、泥岩互层中夹薄层煤系地层,遇水软化,且有倾向坡体外侧的软弱层面,极易造成坡体沿该薄层煤系夹层滑动;两组张性节理形成滑坡的南侧、北侧界线.

② 人工开挖坡脚是造成滑坡的触发原因.

③ 长期降水下渗是造成滑坡的诱发因素.该路段从2004年5月~7月降水量较常年高50%~80%且连续降水,造成坡体中后部积水地层泥化、强度降低,导致坡体持续滑移.

4.2 形成机理数值分析

4.2.1 分析思路

以K31+381纵断面作为该顺层滑坡的典型断面.考虑滑坡是由坡脚开挖引起,2004年雨季连续强降水激发滑动加剧,故计算将分析:

① 路堑开挖后

② 防治工程实施后降雨前后坡体的应力分布与变形机制.

计算模型以 1/500 滑坡工程地质图为基图,坡体结构以钻探、坑探为依据,结合深部位移监测资料(深度 5m 和 15m 均有蠕动变形)综合确定滑坡边界及软弱滑动带,见图 2.

4.2.2 路堑开挖后坡体应力的重分布与变形机制分析

1. 计算模型

(1)考虑原地面坡脚遭到开挖,岩土体松弛,将坡体前部考虑至道路中心并设为约束边界,山侧至坡顶平台原裂缝以外;(2)路堑为非均质多层状结构;(3)降水入渗造成上部岩土体容重增大,同时使软弱滑动带强度降低.(4)单元划分适当考虑节理裂隙及潜在破裂面的分割作用.共划分单元 607 个,节点 658 个,见图 2.

隙及潜在破裂面的分割作用.共划分单元 607 个,节点 658 个,见图 2.

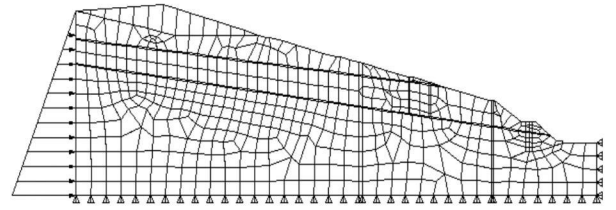


图2 K31 坡体开挖应力场有限元分析模型

2. 计算参数

参数的选取通过现场采样室内土工试验外,还参照了工程地质手册;同时考虑降雨入渗使土体容重增大、中前部滑带土强度降低,见表 1.

表 1 K31 滑坡体与软弱层计算参数一览表

材料种类	弹性模量 /Mpa	泊松比 μ	初始粘聚力 /Mpa	初始内摩擦角/°	残余粘聚力 /Mpa	残余内摩擦角/°	容重 /MN/m ³	单轴抗拉强度 /Mpa
滑体	9 000	0.23	0.3	32	0.03	20	0.021 5	20
滑床	15 000	0.20	0.5	40	0.08	30	0.026	50
软弱层	2 500	0.25	0.02	18	0.0	12	0.020	0.5
钢筋混凝土抗滑桩	1.2e6	0.20	20	65	28	35	0.032	2 000

锚索材料:弹性模量 2E8 Mpa,横截面积 2.12E-3 m²,屈服强度 1E6 Mpa,安装倾角 35°

3. 数值计算成果分析

原坡体坡脚遭到开挖,岩土体松弛,坡体由地表至深部各单元应力发生巨大变化,计算结果采用最大剪应力 $\tau_{max} = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2$ 来表征,见图 3. 表明:最大剪应力 τ_{max} 随深度的增大而增大,至滑面附近,尤其是坡脚地带应力集中明显,最大剪应力达到 0.8 Mpa,软弱层的应力普遍增大至 1.5~2.0 倍.破坏面积达到 6 577 m²,接近计算面积的 40%,即潜在两层滑动面以上岩体均发生大的滑动,造成应力转移至滑床部位,故应力集中出现.可见,公路开挖是造成坡体应力集中、岩土体松弛,坡脚发生累进性破坏而向后牵引导致整个坡体顺层的诱发因素.

1. 计算模型的确定

考虑坡体在开挖后及时采取了抗滑、减滑措施,即前部实施抗滑桩工程、中部做双排钢轨微型桩、坡顶一带实施减载工程.共划分单元 594 个,节点 646 个,计算模型见图 4. 参数选取见表 1.

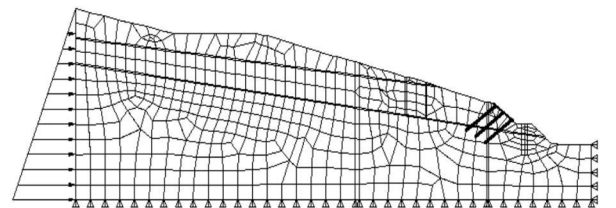


图4 K31 滑坡实施防治工程后应力场有限元分析模型

2. 防治工程实施后坡体数值模拟成果分析

(1) 计算结果仍然采用最大剪应力 τ_{max} 来表征.防护后最大剪应力分布见图 5. 可以看出,坡体防护后在抗滑桩、微型抗滑桩及锚索附近最大剪应力集中并且表现明显,破坏面积仅仅 152 m²,是开挖破坏面积的 1/40,几乎保证了坡体的稳定,说明及时防护是正确的,阻止了坡体因开挖可能产生的累进性破坏,治理效果较好.

The maximum shear stress of section K31

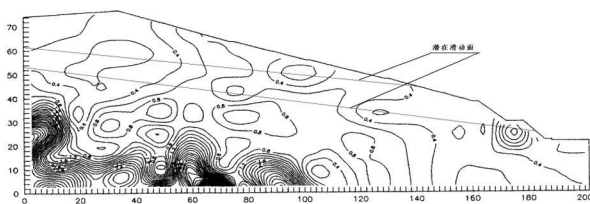


图3 长晋高速 K31 段开挖后坡体最大剪应力分布图(应力单位: Mpa)

4.2.3 治理工程实施后坡体应力重分布分析

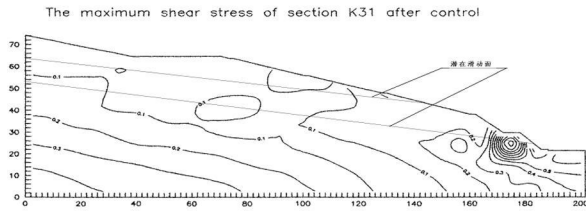


图5 K31段防治后坡体最大剪应力分布图(应力单位: Mpa)

(2) 防治后降雨下渗前后的应力分析: 根据降雨前后土体强度变化特征, 计算参数考虑坡体岩土容重变大, 滑带土强度降低, 具体参数略。

计算表明, 治理后在降雨入渗情况下, 抗滑桩及锚索附近应力集中明显, 破坏面积 169 m^2 比正常情况下破坏面积 152 m^2 稍有所增大, 说明降雨对坡体稳定有影响但不十分明显, 坡体基本仍处于比较稳定状态, 再次证明治理效果好。

5 主要结论

(1) 以砂泥岩互层为主的单斜地层地段, 泥岩粘土矿物含量较高, 遇水易于软化导致强度降低是导致边坡易变形破坏的基本物质条件。而人工开挖坡脚是造成滑坡的触发原因, 长期降水下渗是造成

滑坡的诱发因素。

(2) 砂泥岩地层边坡变形破坏机制一般经历蠕变、剪切及滑动三阶段; 泥岩中粘土矿物含量较高是其具有较明显的蠕变特性, 其变形发展因边坡受力、浸水软化等而有所差异。

(3) 数值分析可知: 典型顺层滑坡 K31 目前在天然状态下处于基本稳定状态, 当考虑地震等作用时则稳定性降低。结合深部位移监测料, 该滑坡在深约 5 m 和 15 m 处均有一定的蠕变变形, 2004 年雨季变形达 6 mm/月, 坡顶出现张拉裂缝分析, 可能由于抗滑桩埋深仅 12.5~14 m, 尚未达到稳定地层以下, 因此对该坡体变形应在变形监测基础上有计划地予以加固, 特别是重视地表地下截排水工程的修筑与维护。

参考文献:

- [1] 徐邦栋. 滑坡分析与防治[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.
- [2] 郑明新, 等. 山西省高速公路滑坡类型、分布规律及形成机理研究[R]. 华东交通大学道桥与岩土工程研究所, 2005
- [3] 郑明新. 滑坡防治工程效果的后评价方法研究[M]. 南京: 河海大学出版社, 2007.

Numerical Analysis of Bedding-rockslide's Formation Mechanism along Changjin Throughway

ZHENG Ming-xin¹, MA Guo-zheng¹, WANG Gong-xian², ZHANG Hua², ZHAO Xiao-ping¹
ZHANG Lu-ming¹, ZHONG Liang-gen¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. China Northwest Academy of Railway, Lanzhou, 730000, China)

Abstract: Based on the in-situ survey of K25-K32 high slope and its protective design data, analyzing the Geological stratum and geomorphological setting, the deformation and failure mechanism of bedding-rockslide is set up. Then, using program of FEM and considering of roadbed digging, anti-slide measurements, penetrating of rain and the stress distribution, the formation mechanism of K31 bedding-rockslide is discussed. Moreover, combining the displacement of monitoring data, the effectiveness of protective structure is evaluated.

Key words: bedding-rockslide; formation mechanism; numerical analysis