

# 切层滑坡侵蚀有限元分析研究

郑书彦<sup>1,2</sup>, 李占斌<sup>2</sup>, 张惠霞<sup>1</sup>, 徐伯荣<sup>3</sup>

(1. 长安大学 地测学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安理工大学 水电学院, 陕西 西安 710048;  
3. 杨凌职业技术学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 以切层滑坡侵蚀实例, 以西马峪滑坡侵蚀体为研究对象, 定性分析了西马峪滑坡侵蚀体的形成与变形破坏特征。结果表明, 西马峪滑坡侵蚀体处于临界—不稳定状态; 建立了地质模型、数学力学模型, 对西马峪滑坡侵蚀体进行有限元分析计算, 由有限元计算结果可知, 滑动面上已形成了应力集中、分异现象, 表明西马峪滑坡侵蚀体处于不稳定状态, 如果有暴雨、地震、人工切割坡脚等触发因素, 还会导致其再次滑动。应当采取工程治理措施, 制止此类水土流失的发生。

**关键词:** 切层滑坡侵蚀; 有限元分析; 地质模型

文献标识码: A 文章编号: 1000—288X(2004)05—0031—04 中图分类号: P642.22, S157.1

## Finite Element Study of Landslide Erosion in Incision Terrain

ZHENG Shu-yan<sup>1,2</sup>, LI Zhan-bin<sup>2</sup>, ZHANG Hui-xia<sup>1</sup>, XU Bo-rong<sup>3</sup>

(1. Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi Province, China; 2. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi Province, China; 3. Yangling Profession Training Institute, Yangling 712100, Shaanxi Province, China)

**Abstract:** Based on a case study of the incision terrain at Ximayu, landslide erosion, forming characteristics, deformation and destruction characteristics are qualitatively analyzed. Results show that the Ximayu landslide-body is unstable. The authors constructed a geological model and a math-mechanical model, and then calculated the landslide body by means of finite elements. The result shows that stress has concentrated on the failure plane, which further supports the evidence that the Ximayu landslide is unstable and may move under heavy rainfall conditions, due to an earthquake or as a result of human activities such as slope cutting. It is suggested that engineering measurements be conducted in order to determine methods for stabilization and the prevention of further erosion.

**Keywords:** landslide erosion of the incision terrain; finite element analysis; geological model

西马峪滑坡侵蚀位于山西省清徐县马峪乡西马峪村, 大运高速公路北侧边坡上。西马峪老滑坡前缘盖在汾河的阶地上, 后缘岩体产状倾向山体内部, 即西马峪老滑坡是在破碎岩石中形成的切层滑坡。

西马峪滑坡沿公路方向宽为 550 m, 沿滑动方向长大约 300 m, 滑坡厚度 10~20 m, 主滑动方向为 175°; 平面面积大约  $1.00 \times 10^5 \text{ m}^2$ , 滑坡侵蚀体潜在侵蚀量约为  $1.9 \times 10^6 \text{ m}^3$ , 滑坡体地表坡度一般为 16°~20°; 局部达到 25°; 海拔高度介于 805~900 m 之间。由于大运高速公路建设开挖坡脚和爆破, 该路段北侧山体于 2001 年 7 月 17 日开始出现裂缝, 并迅速扩展, 随后发生了大规模的滑动, 致使公路路基被掩埋。为确保安全, 该段路基施工被迫停工, 进行西马峪滑坡的现场调查和治理。

## 1 滑坡侵蚀体的形成与变形破坏特征

西马峪滑坡位于晋中盆地与吕梁山接壤带的斜坡上, 大地构造属于晋中新生代断陷盆地北段西北边缘, 主要受晋交大断裂之控制, 西马峪滑坡即处于该断裂带上, 由于晋交大断裂多次活动对滑坡区地貌形成起决定性作用, 并对滑坡的发生创造了有利条件。西马峪滑坡所在的地区出露地层为二叠系下石盒子组砂页岩夹煤系。受区域大地构造和地壳活动的综合影响, 该区的砂页岩地层曾经发生过多滑动, 许多老滑坡就形成在这套地层中。该滑坡侵蚀体主要由页岩、砂质页岩组成的碎石和巨大的长石石英砂岩块石构成, 夹有透镜状煤层, 滑坡侵蚀体组成物质杂乱无章, 无层理。滑坡侵蚀体上发育有近等间距分布的冲

收稿日期: 2003-12-26

资助项目: 国家自然科学基金项目(40371075) 资助; 陕西省自然科学基金项目(2000D08) 资助

作者简介: 郑书彦(1958—), 男(汉族), 博士后, 研究员, 副教授, 硕士生导师。主要从事水土保持和边坡稳定的教学与科研工作。

电话(029) 88021021, E-mail: zhengshuyan@sina100.com。

沟,将滑坡横向分割成沟梁相间的破碎地貌形态。

由于公路建设中的路基开挖和爆破,使得西侧滑坡侵蚀体上首先发生总体上呈弧形展布的张性裂隙,张性裂缝迅速扩展加宽,西侧滑坡侵蚀体后缘裂缝集中发育,随即在这些裂隙上布置了观测点,通过测量跨裂缝观测点,发现西侧滑坡侵蚀体后缘地段处相对变化量比其它观测点变化量大,平均变化量达到了 20 cm/d,降雨及以后速度更快,到了 2001 年 8 月 13 日,西侧滑坡侵蚀体上发生错落,张性裂隙发育成宽约 25 m 的陷落带,使得位于该裂隙带的一条小路错断 2~5 m,截水渠错开 6 m,导致截水渠彻底毁坏。接着滑坡不断的破坏变形、发展,使得老的滑坡侵蚀体迅速解体,形成许多错断台阶和大量裂隙,根据现场实测资料,变形破坏比较大的地段水平位移达到了 15 m,垂直下错达到了 10 m 余,在西侧滑坡侵蚀体后缘形成 5~8 m 高的滑坡陡壁,而滑坡前缘则推进到了正在建设中的公路路基部位,致使部分路基被掩埋。

西马峪滑坡西侧变形滑动后,西侧后缘裂缝继续向东迅速扩展,导致滑坡侵蚀体东侧上部形成 4~5 条张性裂缝,张性裂缝一般宽度可以达到 20~30 cm,垂直向下错落一般可以达到 30~50 cm,东侧后缘裂缝变形速度相对西侧缓慢,继续向东变形减弱直至变形消失。在东侧路基内侧坡脚处没有明显的剪出和变形迹象,路南的东面山丘南侧可以观测到一处滑塌,西面山丘南侧坡脚的干砌石田埂 2 处垮塌,在这东西 2 个小山丘上都可以观测到多处张性裂缝,现场调查时在东西山丘之间的冲沟底部小路上见到了显著的小鼓包,以及坡度变陡现象,由此推断这一带为滑坡侵蚀体的前缘剪出口。西马峪滑坡的滑动是在西马峪老滑坡前部抗滑段,由于大运高速公路建设中进行大挖方及爆破震动而产生的滑动。西马峪滑坡在滑动和变形破坏过程中,整体受力不均匀使得西马峪滑坡解体为东西 2 部分,这 2 部分的受力状况、运动性质、运动方向、影响范围等截然不同。西马峪滑坡的西侧首先失稳,后缘发生张性裂隙,随即发生错落式滑动,接着自西向东进一步发展,西马峪滑坡东侧开始出现张性裂隙、坡体滑移及破坏变形。

大运高速公路所在的西马峪滑坡东侧沿原有的西马峪滑坡老滑动面滑动,滑坡剪出口在路基外侧的坡脚处,整个大运高速公路坐落在西马峪老滑坡侵蚀体上,西马峪滑坡东侧滑坡侵蚀体目前处于缓慢的变形破坏阶段,现场调查推断其为自上向下的推移式破坏变形,大运高速公路路基以下的前缘为挤压区,形成压张裂缝和卸荷滑塌,西马峪滑坡东侧后缘属拉张性质。西马峪滑坡东侧滑坡势能正在释放中,远没有

达到完全释放,潜在滑动的趋势非常明显。

大运高速公路所在的西马峪滑坡西侧滑坡剪出口与西马峪老滑坡不一致,西马峪老滑坡的前缘剪出口在路基以外的坡脚处,由于西马峪滑坡西侧地形坡度陡,大运高速公路路基挖方量较大,西马峪滑坡在该段的上部顺西马峪滑坡老滑面滑动,向下则在大运高速公路路基内侧形成新的滑动破裂面和剪出口。西马峪滑坡西侧的破坏形式是从后缘到前缘逐级错落滑动,位移量一般比较大,滑坡侵蚀体因拉张变形产生解体,表现为一种错落式滑动的形式。从现场调查的资料看,西马峪滑坡西侧大运高速公路路基以下的西马峪滑坡老滑面处于稳定状态,特别是西马峪新滑坡发生后,储存的大量势能被释放,西马峪老滑坡目前不会复活。

## 2 地质模型

从西马峪滑坡滑动与破坏变形资料分析可知,西马峪滑坡仍处于不稳定状态,一旦触发因素达到了一定的强度,西马峪滑坡将进一步滑动,这将直接影响大运高速公路建设,加剧滑坡侵蚀的进程,形成新的水土流失。由于西马峪滑坡侵蚀规模大,滑坡侵蚀体上各部分的稳定性存在着差异,在本次滑坡侵蚀稳定性评价中,选择西马峪滑坡西侧的主滑断面作评价,并由此建立地质模型(图 1)。

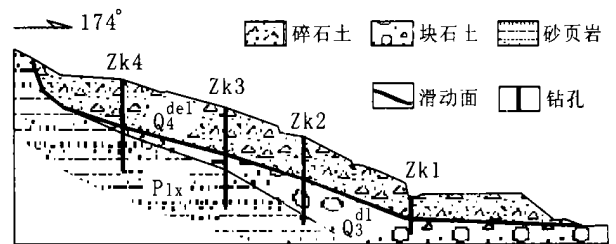


图 1 西马峪滑坡侵蚀地质模型

所选西马峪滑坡西侧的主滑断面所在地段位于滑坡侵蚀体中部中轴线上,该部位后缘高、坡度大、滑坡侵蚀体厚、潜在势能高、稳定性差,处在变形破坏阶段。滑坡侵蚀体中部中轴线最西侧所在段最不稳定,由于已发生大幅度的位移,滑坡侵蚀后缘高程已经大幅度降低,稳定性有所提高,但是,滑坡前缘大运高速公路路基还没有开挖到设计标高,大运高速公路恢复施工后,路基开挖还有可能导致滑坡滑动。滑坡侵蚀体中部中轴线西侧所在段稳定性较低,小规模滑动虽然降低了潜在势能,但潜在势能还没有完全释放彻底,潜在滑动的趋势还比较明显。滑坡侵蚀体中部中轴线东侧所在段地形较缓,滑坡侵蚀体薄,稳定性相对较好。滑坡侵蚀体中部中轴线最东侧所在段地形也

很平缓, 滑坡侵蚀体厚度比较小, 基本处于稳定状态, 这一地段滑坡侵蚀体上基本没有发现明显的变形破坏痕迹。从这些定性分析中知道, 西马峪滑坡侵蚀整体处于不稳定状态。

### 3 滑坡侵蚀有限元计算

为了进行滑坡侵蚀有限元分析评价, 根据西马峪滑坡侵蚀地质模型(图 1), 将其概化并离散成如图 2 所示的计算模型。

#### 3.1 计算范围的选取

在主滑方向上, 模型的北边界取至滑体后缘往上 10 m, 即高程 890.0 m, 为一截离边界, 水平方向设为  $o$  点,  $x$  方向为约束边界; 模型的南边界取至从剪出口水平方向上 20.0 m 位置, 为另一截离边界, 即 805.0 m 高程, 水平方向 320.0 m 处, 为另一  $x$  方向约束边界; 下部取 800.0 m 高程为计算底界, 加  $y$  方向约束。以 800.0 m 作水平线, 以水平方向  $o$  点与 320.0 m 作垂直线, 水平线与垂直线相交的范围为本次计算范围(详见图 2)。

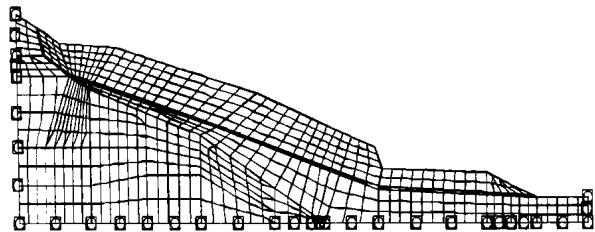


图 2 西马峪滑坡侵蚀计算模型

由于斜坡的变形与破坏主要发生于坡体的表部一定深度范围内, 构造应力在过去的地质历史时期已释放, 因此模型边界上不考虑水平构造应力的作用只考虑重力的影响。计算时将整个求解域离散为在节点处相互交接的某种几何形状的单元集合体, 本计算采用双线性四节点四边形单元和常应变三节点三角形单元的组合将整个计算模型离散化为 2 048 个节点、643 个单元(图 2)。其单元位移模式必须满足位移协调条件, 根据分割近似原理, 当单元尺寸愈分愈小时, 离散误差将趋于减小。从理论上讲, 当单元尺寸接近于 0 时, 这种误差也将趋于 0。采用简化的弹塑性本构模型, 岩土体符合小变形情况下的线弹性及弹塑性基本假定, 计算时滑坡面按一个带来划分, 材料常数单独取值。

#### 3.2 西马峪滑坡侵蚀有限元计算参数的选取

容重取现场试验结果  $1.9 \text{ g/cm}^3$ 。滑带土成分不均, 夹有碎石, 抗剪强度现场试验值比较分散, 残余内聚力介于  $3.9 \sim 60.3 \text{ kPa}$  之间, 内摩擦角介于  $2.2 \sim$

$25.9^\circ$  之间, 变异性非常大。

考虑到滑坡侵蚀体稳定性较为明显, 反演计算结果比较可靠, 滑动面内聚力  $C$  和内摩擦角(通过反演计算确定。由于滑坡侵蚀体各部分的含水情况、受力状态, 滑动面物质组成均不相同, 抗剪强度参数取值存在差异。一般牵引段受拉, 内聚力小, 摩擦角大; 滑动段强度较低, 抗滑段相对较高。参考现场试验结果和过去的经验值, 在现场试验结果范围值之内给定牵引段和抗滑段的  $C, \varphi$  值, 反算滑动段的  $C, \varphi$  值。

根据经验值和反算结果, 滑坡侵蚀体各部分的强度参数取值为: 牵引段  $C$  取  $5 \text{ kPa}$ ,  $\varphi$  取  $20^\circ$ ; 反演计算得出滑动段  $C = 10 \text{ kPa}$ ,  $\varphi = 12^\circ$ ; 抗滑段  $C$  取  $10 \text{ kPa}$ ,  $\varphi$  取  $12^\circ$ ; 反算滑动段  $C = 8 \text{ kPa}$ ,  $\varphi = 10^\circ$ 。

### 4 滑坡侵蚀有限元计算结果分析

图 3、图 5 是由主应力给出的计算成果图, 图 4、图 6 是由剪应力给出的计算成果图。

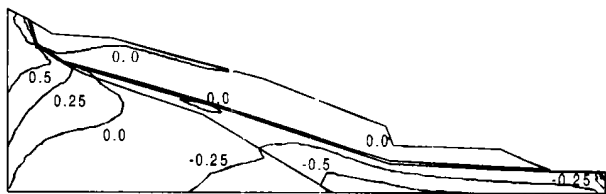


图 3 滑坡体主应力等值线

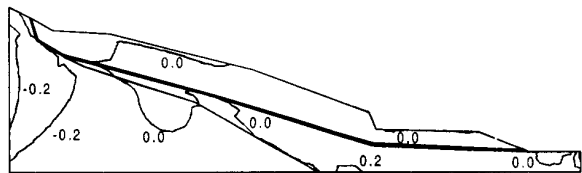


图 4 滑坡体剪应力等值线

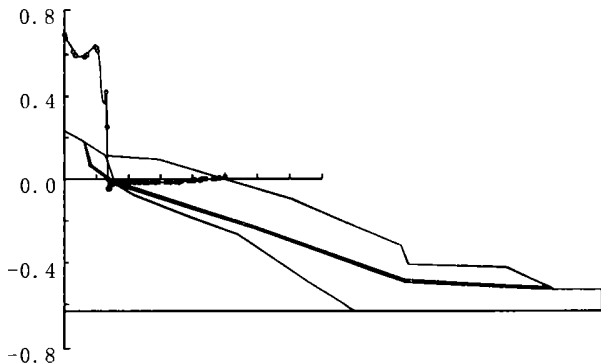


图 5 862 m 高程滑坡体主应力曲线

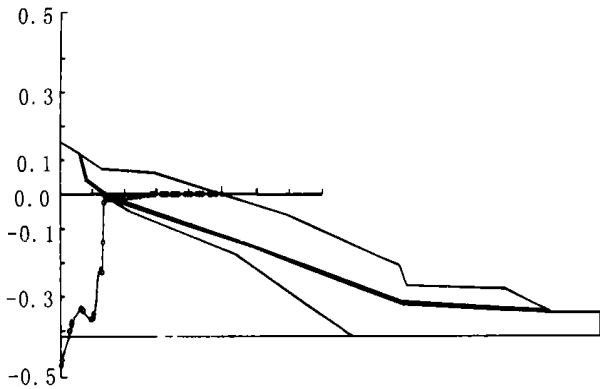


图 6 862 m 高程滑坡体剪应力曲线

(1) 主应力成果分析。由最大主应力等值线图与 862 m 高程的主应力曲线图可以看出, 由于滑动面的存在, 从而沿滑动面产生了应力的分异、集中现象, 在滑坡侵蚀体后部附近出现了主应力增高现象, 这种现象说明滑动面的存在对滑坡侵蚀体内的应力分布影响较大。

(2) 剪应力成果分析。由剪应力等值线图与 862 m 高程的剪应力曲线图可以看出, 同样由于滑动面的影响, 出现了剪应力的分异、集中现象, 并在滑坡侵蚀体后部下部形成了较大的剪应力集中现象。

## 5 结 论

(1) 西马峪滑坡的滑动是由于大运高速公路建设中进行的大挖方及爆破震动而产生的滑动。西马峪滑坡在滑动和变形破坏过程中, 整体受力不均匀使得西马峪滑坡解体为东西 2 部分, 这 2 部分的受力状况、运动性质、运动方向、影响范围等截然不同。

(2) 西马峪滑坡西侧的主滑断面所在地段位于滑坡侵蚀体中部中轴线上, 该部位后缘高、坡度大、滑坡侵蚀体厚、潜在势能高、稳定性差, 处在变形破坏阶段。从这些定性分析中知道, 西马峪滑坡侵蚀基本处于不稳定状态。

(3) 西马峪滑坡滑动后, 虽然坡面变缓、重心降

低、势能减少, 但是根据有限元计算结果可以得知, 滑动面上已经形成了应力集中、分异现象, 如果有暴雨、地震、人工切割坡脚等触发因素, 还会导致该滑坡再次滑动。西马峪滑坡侵蚀土体的潜在侵蚀量大约为  $1.9 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

(4) 西马峪滑坡治理必须选取技术可行、经济合理、不留后患的工程治理方案。由于滑坡各段各部分的稳定性、推力大小和滑动面深度都有不同, 可以分段采取削方减载、回填压脚、抗滑桩支挡、挡墙支挡、在滑坡体上设置排水系统等治理措施, 防止滑坡侵蚀灾害进一步加剧, 确保大运高速公路建设的顺利进行, 防止产生新的水土流失。

## [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] Eckel E B. Landslides and Engineering Practice [ R ]. Highway Research Board, Special Report 1958. 29.
- [ 2 ] 山田刚二, 度正亮, 小桥澄治. 地すべリ・斜面崩壊の实态と对策 [ M ]. 日本: 山海堂, 1971.
- [ 3 ] Broms B B. Landslides, Foundation Engineering Handbook [ M ]. Van Nostrand Reinhold Company, 1975.
- [ 4 ] 郑书彦. 滑坡侵蚀及其动力学机制与定量评价研究 [ D ]. 中国科学院研究生院 2002 届博士研究生学位论文, 2002.
- [ 5 ] 郑书彦, 李占斌, 等. 宝塔山滑坡侵蚀有限元分析 [ J ]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 113—116.
- [ 6 ] 郑书彦, 李占斌, 等. 黄土滑坡稳定性及其整治对策研究 [ J ]. 水土保持通报, 2002, 22(3): 25—27.
- [ 7 ] 周平根, 等. 大型滑坡地下水系统的概念模型 [ J ]. 工程地质学报, 2000, 8(2): 186—190.
- [ 8 ] 章根德, 剡公瑞. 岩体高边坡流变学性状有限元分析 [ J ]. 岩土工程学报, 1999, 21(2): 1—9.
- [ 9 ] 张信宝, 等. 黄土高原重力侵蚀的地形与岩性组合因子分析 [ J ]. 水土保持通报, 1989, 9(5): 40—44.
- [ 10 ] 中国科学院黄土高原综合科学考察队. 黄土高原地区土壤侵蚀区域特征及其治理途径 [ M ]. 北京: 中国科学技术出版社, 1990.