

淤地坝减轻坡沟系统滑坡侵蚀的数值模拟

邹兵华¹, 袁洁¹, 李占斌^{2,3}, 李鹏^{2,3}

(1. 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 四川 成都 610072; 2. 西安理工大学 西北水资源
与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048; 3. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 基于边坡分析软件及有限元软件, 通过建立陕北绥德县关地沟 4 号坝上游典型坡沟系统的概化模型, 应用概率统计和数值仿真分析方法, 从坡沟系统的力学稳定和受力破坏的角度, 得到了随淤地坝坝地的逐渐淤高坡沟系统的稳定性、滑塌概率和滑塌量分别增强、减弱和减少, 其随坝地淤高的变化分别满足二项式、二项式和直线规律。应用有限元强度折减法原理, 对坡沟系统的应力场和位移场进行了仿真分析, 指出了稳定系数最小, 滑坡概率最大时坡沟系统濒临滑坡侵蚀时的最大应力和位移分布区域: (1) X 方向的最大位移是沟坡中下部垂直向坡体内约 15 m 的范围; (2) Y 方向的最大位移是从坝顶向两侧各延伸 10 m 左右的扇形区域; (3) 拉应力最大值区域是从坝顶经坝坡向沟坡坡缘线向坡体内延伸 9 m 左右的带形区域。研究结果可为坡沟系统水土保持工程措施的配置及生物措施的实施提供有益的参考, 并为评价坡沟系统的稳定性提供一定可靠度的依据。

关键词: 坡沟系统; 淤地坝; 有限元强度折减法; 稳定性; 滑坡概率

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2013)01-0265-06

中图分类号: S157.3⁺1

Numerical Simulation for Reducing Slide Erosion in Slope-gully System by Check Dam

ZOU Bing-hua¹, YUAN Jie¹, LI Zhan-bin^{2,3}, LI Peng^{2,3}

(1. *Hydrochina Chengdu Engineering Corporation, Chengdu, Sichuan 610072, China;*

2. *Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environment Ecology of the MOE at XAUT, Xi'an, Shaanxi 710048, China;* 3. *Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering at XAUT, Xi'an, Shaanxi 710048, China*)

Abstract: Based on slope analysis software and finite element software, simulation analysis method and probability statistics were applied by establishing a generalization model of Guandigou watershed in Suide County of Northern Shaanxi Province that is a classical slope-gully system. Concerning on the mechanical stabilization and damage by stress in the slope-gully system, the stability, land sliding probability and land sliding amount of the slope-gully system with gradual dam land rise were enhanced, weakened and reduced, respectively. Variation of the dam land rise satisfies binomial, binomial or linear relation. The stress field and displacement field in the slope-gully system were also analyzed by FEM(finite element method) strength reduction theory. When the stability factor was the lowest, the land sliding probability was the greatest, and the slope-gully system was on the edge of sliding erosion, the maximum stress and displacement fields obtained were as follows: (1) The maximum displacement of X direction: the region about 15 m perpendicular to vivo slope in the middle and lower segment of slope-gully system; (2) The maximum displacement of Y direction: the sector region of about 10 m extension from the top of mound slope to both sides; (3) The maximum region of tensile stress: strip region of about 9 m vertical extension from the top of mound slope to the edge line of gully slope, through mound slope. The result may offer valuable reference for allocating the engineering measures of soil and water conservation and implementing the biological measures, and provide a certain reliability basis for evaluating the stability of slope-gully system.

Keywords: slope-gully system; check dam; FEM strength reduction method; stability; land sliding probability

收稿日期: 2012-02-29

修回日期: 2012-03-19

作者简介: 邹兵华(1982—), 男(汉族), 四川省成都市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为水土资源与生态环境, 岩土边坡工程等。E-mail: zbh2340@163.com。

黄土高原有大小沟壑 27 万多条,沟壑纵横,支离破碎,沟壑密度 $3\sim 5\text{ km}/\text{km}^2$,沟壑面积占土地总面积的 $20\%\sim 40\%$,其支离破碎的地貌主要是由沟蚀造成的,沟蚀的发展使沟壑面积日益扩大,耕地面积日趋缩小^[1],是世界上水土流失最严重的地区之一。黄土高原的各类沟壑中以沟头前进、沟底下切、沟岸扩张 3 种形式的沟蚀危害最为严重^[1]。沟蚀加剧了面蚀的发展,造成了更多的陡峭临空面,加剧了重力侵蚀^[2-3]。重力侵蚀作为黄土区主要侵蚀类型,其研究一直处于滞后状态^[4]。理论研究方面,重力侵蚀的微观及宏观力学机理尚不明晰,计算模型的构建刚起步;试验及观测方面,至今仍未形成重力侵蚀系统观测和试验研究体系^[4]。根据黄河水利委员会西峰、天水、绥德 3 个水土保持站在典型小流域的调查,黄土高原沟壑区的西峰南小河流,重力侵蚀面积占流失面积的 9.1% ,重力侵蚀量占总流失量的 57.5% ;黄土丘陵沟壑区第 III 副区的天水吕二沟,重力侵蚀面积占流失面积的 30.7% ,重力侵蚀量占总流失量的 68.0% ;黄土丘陵沟壑区第 I 副区的绥德韭园沟,重力侵蚀面积占流失面积的 12.9% ,重力侵蚀量占总流失量的 20.2% 。在黄土塬区和丘陵区,沟头前进多以土体崩塌形式进行,沟岸扩张是崩塌与滑坡共同作用的结果^[5-7]。

淤地坝系作为治理水土流失的主要工程措施,在蓄水拦沙、防洪保收等方面起到了重要作用^[1,5,8-10],有机统一了当地致富和治河的关系,深受黄土高原地区群众的喜爱,同时又为治河部门所关注。打坝淤地、蓄水拦沙是流域水土保持综合治理的一项重要措施,目前国内外有关淤地坝的研究主要集中在坝系相对稳定、减水减沙和生态环境效应等方面^[10-11],而对淤地坝减轻坡沟系统重力侵蚀特别是滑坡侵蚀方面的研究则少有人提及。淤地坝通过抬高沟底侵蚀基准面,提高了沟坡的稳定性,减少了沟坡重力滑坡侵蚀发生的可能性。本研究采用数值模拟方法对随着坝地逐渐淤高沟道坡沟系统的稳定性、滑塌概率以及坡沟系统滑坡侵蚀破坏的部位等方面进行研究,以期对坡沟系统水土保持工程措施及生物措施的配置提供有益的参考,并为评价坡沟系统的稳定性提供一定可靠度的依据。

1 研究区概况

本研究选取的关地沟是王茂河流域左岸的一条典型支沟。王茂沟是陕北绥德县韭园沟中游左岸的一条试验性治理支沟,是无定河的一条 2 级支沟,地理坐标为东经 $110^{\circ}20'26''\sim 110^{\circ}22'46''$,北纬 $37^{\circ}34'13''\sim$

$37^{\circ}36'03''$,海拔高度 $940\sim 1\ 188\text{ m}$,流域面积 5.97 km^2 ,主沟长 3.75 km ,沟道平均比降为 2.7% ,沟谷地面积 2.97 km^2 ,占流域总面积的 46.7% ,沟壑密度 $4.3\text{ km}/\text{km}^2$ 。流域内共有沟道 46 条,其中 $<0.1\text{ km}^2$ 的沟道 24 条, $0.1\sim 0.5\text{ km}^2$ 的沟道 18 条, $0.5\sim 1.0\text{ km}^2$ 的沟道 2 条, $>1.0\text{ km}^2$ 的沟道 2 条。地面坡度一般在 20° 以上,坡度 $<10^{\circ}$ 的面积仅占 2.2% ,坡度 $>45^{\circ}$ 以上的面积占 34.7% 。地形地貌主要由梁、峁以及分割梁、峁的沟谷组成^[12],地形破碎,沟壑纵横,坡陡沟深。梁顶和峁顶面积不大,均略成穹形,坡度在 $8^{\circ}\sim 10^{\circ}$,梁、峁坡的坡度一般在 $20^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 。梁、峁坡以下为沟谷,沟谷横断面在上游及支沟均呈“V”字型,在下游略呈“U”字型。沟谷坡极陡,一般都在 35° 以上。按土壤侵蚀区划,属黄土高原丘陵沟壑区第 I 副区。

流域内地质构造比较单纯,表层多被质地匀细、组织疏松的黄绵土覆盖,厚度 $20\sim 30\text{ m}$,在梁、峁顶,梁、峁坡上均有分布。其下为红色黄土,厚度 $50\sim 100\text{ m}$,多出露于沟谷。再下为基岩,基岩主要为三迭纪的砂页岩,岩层倾角甚小,接近水平,其露头只在干沟中下游沟床及其两侧有所见。

流域属北温带干旱大陆性气候,年平均气温 $10.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,无霜期 160 d 左右,夏季多东南风,春秋多西北风。流域多年平均降水量 513.1 mm ,降雨量的年际变化率大,年最大降雨量是年最小降水量的 3.5 倍;降雨的年内分配极不均匀,年内降雨量主要集中在汛期 7—9 这 3 个月,汛期降水量占年降水量的 73.1% ,且多以暴雨形式出现,一次暴雨产沙量为全年产沙量的 60% 以上,土壤侵蚀以水蚀及重力侵蚀为主,治理前流域年平均侵蚀模数为 $18\ 000\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$,属剧烈侵蚀区,在黄土丘陵沟壑区具有一定的代表性。

2 坡沟系统滑坡侵蚀的数值分析原理与方法

2.1 崩塌滑坡的蒙特卡洛概率计算

对于土质边坡,根据其土体结构、破坏机理和受力状况,可以建立坡体地质条件和环境因素的状态函数: $Z=g(X_1, X_2, \dots, X_m)$ 其中 X_1, X_2, \dots, X_m 为 m 个具有一定分布、独立统计的随机变量,假定它们的统计量已知。如果把状态函数定义为安全系数,且随机地从诸随机变量 X_i 的全体中抽取同分布的变量 X'_1, X'_2, \dots, X'_m ,则由上述状态函数可求得安全系数的一个随机样本。如此重复,直到达到预期精度的充分次数 N ,则可得到 N 个相对独立的安全系数

Z_1, Z_2, \dots, Z_n 。安全系数所表征的极限状态为 $Z=1$, 可构造一个随机变量 R ; 当 $Z \leq 1$ 时, $R=1$; 当 $Z > 1$ 时, $R=0$ 。设在 N 次随机抽样的试验中, 出现 $R=1$ 即 $Z \leq 1$ 的次数为 M , 则坡体破坏的概率 p_f 为^[13-14]:

$$p_f = \frac{M}{N} \quad (1)$$

式中: p_f ——坡体破坏的概率; M ——出现安全系数 $Z \leq 1$ 的次数; N ——随机抽样试验的次数。

此式即为直接蒙特卡洛法计算坡体破坏概率的公式。显然当 N 足够大时, 由安全系数的统计样本 Z_1, Z_2, \dots, Z_n 可比较精确地近似安全系数的分布函数 $G(z)$, 并估计其分布参数, 其均值和标准差分别为:

$$\mu_z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i \quad (2)$$

$$\sigma_z = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (z_i - \mu_z)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中: z_i ——安全系数的样本值; μ_z ——安全系数的均值; σ_z ——安全系数的标准差。

进而可根据 $G(z)$ 拟合的理论分布, 通过积分方法求得破坏概率。本文中 N 取值为 10 万次, 滑坡计算选用 Spencer 法。

2.2 有限元强度系数折减法的基本原理

有限元强度系数折减法的基本原理是将坡体强度参数黏聚力 c 和内摩擦角 φ , 同时除以一个折减系数 ω , 得到一组新的 c', φ' , 其中:

$$c' = \frac{c}{\omega}, \quad \varphi' = \arctan(\tan \frac{\varphi}{\omega}) \quad (4)$$

式中: c ——岩土体原本的黏聚力; φ ——岩土体原本的内摩擦角; ω ——岩土体强度折减系数; c' ——岩土体折减后的黏聚力; φ' ——岩土体折减后的内摩擦角。

然后作为新的资料参数输入, 再进行试算, 利用相应的稳定判断准则, 程序可以自动根据弹塑性计算结果得到破坏滑动面, 确定相应的 ω 值为坡体的最小稳定安全系数, 此时坡体达到极限状态, 发生剪切破坏, 同时又可得到坡体的破坏滑动面^[15-17]。有关研究^[15-19]表明, 有限元强度折减法的安全系数在本质上与传统方法是一致的。郑颖人等^[15]通过多种比较计算说明有限元折系数法用于分析土坡稳定问题是可行的, 但必须合理地选用屈服条件以及严格地控制有限元法的计精度。

2.3 强度系数折减法失稳判断准则与屈服准则

采用有限元强度折减法分析边坡稳定性的一个关键问题, 是如何根据有限元计算结果来判别边坡是否处于破坏状态。目前的失稳判据主要有两类: 第一

类是在有限元计算过程中采用力和位移的不收敛作为边坡失稳的标志^[18]; 第二类以广义塑性应变或等效塑性应变从坡脚到坡顶贯通作为坝坡破坏的标志^[19], 以上两种判据得到的安全系数相差不大^[15]。本文采用节点不平衡力的不收敛作为判据, 便于计算和可视化, 同时根据塑性区的范围及其连通状态确定相应的安全系数, 以此评价坡体的稳定性。当前流行的有限元软件中采用的均是广义米赛斯准则^[15], 由于强度折减有限元法计算的安全系数与选用的屈服准则密切相关, 郑颖人等^[15, 18]等研究发现不等角六边形外接圆(DP1)屈服准则计算的安全系数较传统的莫尔—库仑准则会偏大许多, 而郑颖人^[15]研究提出的莫尔—库仑等面积圆准则的计算精度与 Spencer 的平均误差在 5% 左右, 可满足工程要求, 并给出了不等角六边形外接圆(DP1)屈服准则求得的安全系数与莫尔—库仑等面积圆准则求得的安全系数之间的转换关系式(5)。本文把在外接圆(DP1)屈服准则下求得的安全系数转换为莫尔—库仑等面积圆屈服准则下的安全系数:

$$\eta = f\varphi = \sqrt{\frac{2\pi}{3\sqrt{3}} \times \frac{3 + \sin\varphi}{3 - \sin\varphi}} \quad (5)$$

式中: η ——外接圆(DP1)屈服准则下安全系数转换为莫尔—库仑等面积圆屈服准则下安全系数的转换系数; φ ——岩土体的内摩擦角。

3 坡沟系统滑坡侵蚀的有限元数值模拟与分析

3.1 坡沟系统概化模型及有限元计算模型

根据相关地质资料, 关地沟地层构造主要是马兰黄土(Q_3^{col}), 梁、峁顶、峁坡均有分布, 厚度 20~30 m, 其下为离石黄土(Q_2^{col}), 厚度 50~100 m, 多出露于沟坡上, 再下主要是三叠纪砂页岩层, 基本接近水平, 多出露于干沟、支沟的下游及其两侧。通过实测数据统计分析得知, 坡沟系统峁坡坡度在 $21^\circ \sim 25^\circ$ 所占比例最大, 达到 50%, 而实测坡度在 $21^\circ \sim 25^\circ$ 的平均值为 23.1° , 取峁坡坡度 24° ; 沟坡坡度在 $36^\circ \sim 45^\circ$ 所占比例最大, 达到 43.6%, 而实测坡度在 $36^\circ \sim 45^\circ$ 范围内的平均值为 40.8° , 取沟坡坡度 41° 。通过对关地沟基本坡沟地貌特征的综合分析, 建立了坡沟系统概化模型。该重力滑坡侵蚀模型取峁坡坡度 24° , 沟坡坡度为 41° 。沟坡概化模型土层从上到下分别为马兰黄土(Q_3^{col})和离石黄土(Q_2^{col}), 厚度分别取为土层厚度的平均值 25 m 和 75 m。

关地沟流域典型坡沟系统的有限元网格见图 1。坡沟系统的计算采用平面应变条件下摩尔—库仑不

等角六边形外接圆屈服准则(DP1)和非关联流动的理想弹塑性模型^[20-21]。坡沟系统二维模型基岩底边界为固定约束,左边界为水平约束,其他自由。弹塑性有限元计算采用大变形静态分析选项,最大迭代次数为 1 000。

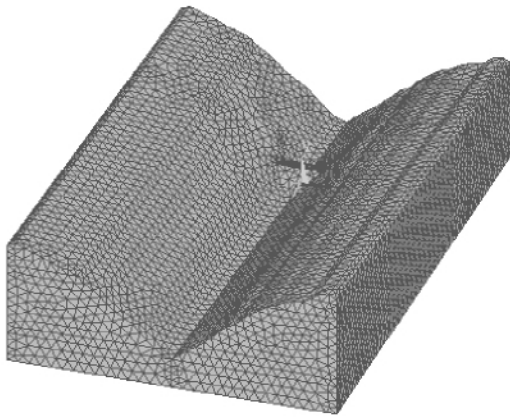


图 1 坡沟系统三维有限元网格

3.2 计算参数取值

根据边坡工程经验^[13-14]、现场资料分析、现场及室内岩土物理学试验和有限元计算的需要,沟坡概化模型各土层材料特征取值如表 1 所示。

表 1 坡沟系统的计算参数

土层类型	压缩模量/MPa	泊松比/ μ	容重/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力/kPa	内摩擦角/ $(^\circ)$
马兰黄土(卵坡)	7.1	0.34	14.42	46.82	29.6
离石黄土(沟坡)	8.4	0.33	13.92	47.25	28.3
砂页岩(基岩)	10 000	0.29	23.90	31 000	21.0

3.3 沟坡系统稳定性随坝地淤高度的变化

由于关地沟 4 号坝从 1959 年修建到 1987 年被洪水冲毁的 28 a 运行过程中,累计淤高 4.86 m,年均淤高 0.18 m;垮坝后由于群众对坝体的零星修复填筑及 2005 年的修复加高,坝地被填高,坝地已不再是原来垮坝前的自然淤高,截至 2007 年坝地累计淤高 10.8 m。由于关地沟 4 号淤地坝跨坝前坝地的年均淤高仅为 0.18 m,在跨坝前的淤高模拟计算中以 5 a 为 1 个时间跨度,计算坝地每淤高 0.9 m 时的坡沟系统稳定特征参数;垮坝后为了与垮坝前保持一致性,坝地以 0.9 m 递增。在有限元程序中,模拟淤地坝坝地按 0~0.9,0.9~1.8,1.8~2.7,2.7~3.6,3.6~4.5,4.5~4.86,4.86~5.4,5.4~6.3,6.3~6.48,6.48~7.2,7.2~8.1,8.1~9.0,9.0~9.9,9.9~10.8 m 的淤积过程每淤积(增高)0.9 m 其相应的稳定系数、滑塌概率和滑塌量的散点图如图 2—4 所示。

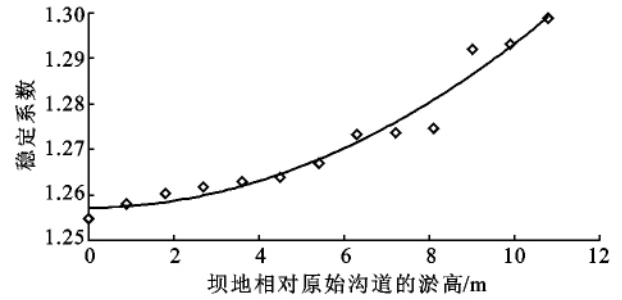


图 2 随坝地淤高坡沟系统稳定系数的变化规律

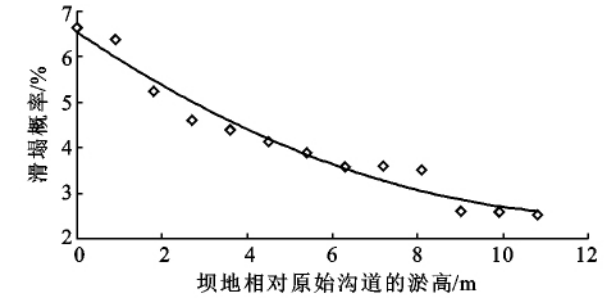


图 3 随坝地淤高坡沟系统滑坡侵蚀滑塌概率的变化规律

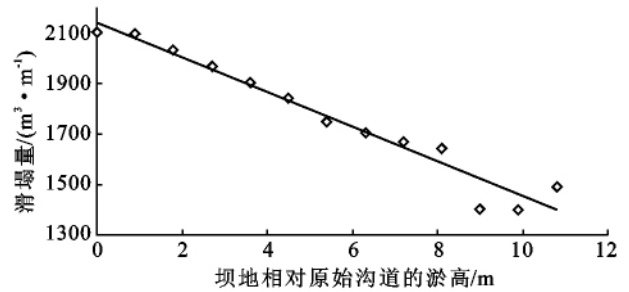


图 4 随坝地淤高坡沟系统滑坡侵蚀滑塌量的变化规律

由图 2—4 分别拟合出相关系数最高的随坝地淤高坡沟系统的稳定系数、滑塌概率和滑塌量变化规律的相关方程如表 2 所示。

表 2 随坝地淤高坡沟系统的稳定系数、滑塌概率和滑塌量的变化规律

类别	相关方程	相关系数
稳定系数	$y=0.0004x^2+0.00004x+1.2572$	0.980
滑塌概率/%	$y=0.025x^2-0.6346x+6.5439$	0.980
滑塌量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1})$	$y=-68.775x+2141.5$	0.977

当坝地分别淤高到 11.7,12.6,3.5,14.4 和 15.3 m 时,由程序计算得到坡沟系统的稳定系数、滑塌概率和滑塌量与通过上述拟合出的相关方程计算得到的对应值的比较如表 3 所示。

由表 2—3 可以得出,随坝地淤高坡沟系统的稳定系数和滑塌概率满足二项式分布规律,而滑塌量则满足线性减少分布规律。稳定系数和滑塌概率的相关系数最高,达到 0.980;滑塌量的相关系数为

0.977,也相当的高。通过坝地累计淤高 11.7,12.6,13.5,14.4 和 15.3 m 时坡沟系统的稳定系数、滑塌概率和滑塌量的程序计算值和拟合方程计算值的比较,稳定系数的最大相对误差为 1.61%,可见稳定系数的变化是很有规律的,而且稳定性好;滑塌概率的相对误差较大,最大达到 15.67%。这是由于滑塌概率本身就是另一个概率计算的结果,还有别的影响因

素。滑塌量的最小误差 7.92%,最大误差 20.09%,这可能是由于随着坝地的淤高,坡沟系统形态的改变,滑坡侵蚀发生过程中最危险和最可能滑动面变化,导致滑坡侵蚀中量的波动比较大,故而滑塌量的相对误差较大的原因。总体来说,三者的相对误差均在满足的范围内,拟合出的方程精度较高,可应用于该沟道重力滑坡侵蚀的定量分析和计算。

表 3 坡沟系统的稳定系数、滑塌概率和滑塌量软件计算值和相关方程计算值的比较

检验淤高/m	类别	软件计算值	拟合方程计算值	绝对误差	相对误差/%
11.7	稳定系数	1.312 0	1.312 0	-0.000 4	0.03
	滑塌概率/%	2.197 1	2.541 3	-0.344 3	15.67
	滑塌量/(m ³ ·m ⁻¹)	1 451.8	1 336.8	115.0	7.92
12.6	稳定系数	1.312	1.321	-0.008 6	0.66
	滑塌概率/%	2.182	2.516 9	-0.334 9	15.35
	滑塌量/(m ³ ·m ⁻¹)	1 454.6	1 274.9	179.7	12.35
13.5	稳定系数	1.313	1.331	-0.017 6	1.34
	滑塌量/(m ³ ·m ⁻¹)	1 426.5	1 213.0	213.463 0	14.96
14.4	稳定系数	1.319 4	1.341	-0.021 3	1.61
	滑塌量/(m ³ ·m ⁻¹)	1 440.9	1 151.4	289.472 0	20.09
15.3	稳定系数	1.342 4	1.351	-0.009 0	0.67
	滑塌量/(m ³ ·m ⁻¹)	1 183.9	1 089.2	94.660 0	8.00

注:由于拟合出的滑塌概率方程的对称轴为 $x=12.69$,故淤高检验只检验到 12.6 m,因为对称轴另一面的变化关系不清楚。

3.4 稳定系数最小、坡沟系统濒临破坏时的应力和位移分布

由图 2 可得,在坝地相对原始沟道累计淤高 0 m 的时候,其稳定系数最小,滑塌的概率最大。为了优化配置坡沟系统的水土保持工程措施和生物措施,达到水土保持措施的最佳防治效果,从力学机理上对坡沟系统的应力场和位移场进行分析,得出坡沟系统应力场和位移场的最危险区域,有针对性地进行措施强化,保证坡沟系统的土壤侵蚀减到最小。由于坡沟系统的近似对称性,这里只考虑沟道的 1/2 来进行有限元分析。关地沟 4 号坝上游典型坡沟系统的有限元网格见图 1。由有限元强度折减法得摩尔—库仑不等角六边形外接圆屈服准则(DP₁)下求得此时的安全系数为 1.507,将其按式(5)转换为莫尔—库仑等面积圆屈服准则下的安全系数为 1.224,其与滑坡分析采用 Spencer 法求得此时的安全系数 1.255 的相对误差为 2.42%,在郑颖人等^[16,18]研究指出莫尔—库仑等面积圆屈服准则的安全系数与 Spencer 法的平均误差 5% 范围内,精度满足要求。

由计算可得,坡沟系统中 X 方向的位移均为正,在沟坡中下部位垂直向坡体内约 15 m 的范围为 X 方向位移的最大值区域,X 方向的其他位移从右向

左、从沟坡向沟脚递减,直至减小为最小值 0。Y 方向均为下沉位移,最大值在从沟顶向左向右各延伸 10 m 左右的扇形区域,其他下沉位移从沟顶向沟坡脚递减,直至减小为最小值 0。

坡沟系统中除沟坡和沟脚坡缘线向坡体内一定范围内出现了局部拉应力外第 1 主应力和第 3 主应力几乎全为压应力,且第 1 主应力的拉应力区域几乎包括在第 3 主应力拉应力区域内。由于土体是抗压不抗拉的,出现拉应力就会使土体发生破坏,进而发生侵蚀,这就从力学机理上说明了坡沟兼治的正确性和沟坡和沟脚进行生物措施和工程措施治理的必要性。坡沟系统中第 1 主应力的最大拉应力值区域位于从沟顶到沟脚坡缘线的整个坡缘线在沟坡向坡体内延伸 6 m 左右、在沟脚向坡体延伸 3 m 左右的带形区域内;第 3 主应力的最大拉应力值在从沟顶经沟脚向沟脚坡缘线向坡体内延伸 9 m 左右的带形区域内。

4 结论

基于边坡分析软件和有限元技术,通过建立关地沟典型坡沟系统的概化模型,得到并验证了随淤地坝地淤高坡沟系统的稳定系数和滑塌概率满足二项式分布规律,而滑塌量则满足线性减少分布规律,三

者的精度均较高,可用于该沟道重力滑坡侵蚀的预报、滑坡侵蚀的定量计算和指导淤地坝的分期加高。

应用有限元强度折减法对坡沟系统的应力场和位移场进行了分析,指出了稳定系数最小、滑坡概率最大、坡沟系统濒临滑坡侵蚀时的最大应力和位移分布区域。(1) X 方向的最大位移:沟坡中下部位垂直向坡体内约 15 m 的范围;(2) Y 方向的最大位移:从崩顶向左向右各延伸 10 m 左右的扇形区域;(3) 拉应力最大值区域:从崩顶经崩坡向沟坡坡缘线向坡体内延伸 9 m 左右的带形区域。这些区域是坡沟系统最容易发生侵蚀的危险区域,在配置坡面水土保持工程措施(水平沟和鱼鳞坑等)和生物措施的时候要有针对性地进行重点防护,以使坡沟系统的土壤侵蚀降低到最低限度。

[参 考 文 献]

- [1] 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [2] Williams J R, Berndt H D. Sediment yield prediction based on watershed hydrology[J]. Transaction of the ASAE,1977,20(6):1100-1104.
- [3] Nachtergaele J, Poesen J, Vandekerck H L, et al. Testing the ephemeral gully erosion model(CEGEM) for two mediterranean environment[J]. Earth Surface Process and Landforms, 2001,26(1):17-30.
- [4] 薛海,王光谦,李铁键. 黄河中游区重力侵蚀研究综述[J]. 水科学进展,2009,7,20(4):599-606.
- [5] 崔灵周,李占斌,朱永清,等. 流域侵蚀强度空间分异及动态变化模拟研究[J]. 农业工程学报,2006,22(12):17-22.
- [6] 高鹏,刘作新,邹桂霞. 丘陵半干旱区小流域土地资源定量化评价研究[J]. 农业工程学报,2003,19(6):298-301.
- [7] 于国强,李占斌,李鹏,等. 黄土高原小流域重力侵蚀数值模拟[J]. 农业工程学报,2009,25(12):74-79.
- [8] 陈浩. 黄土丘陵沟壑区流域系统侵蚀与产沙关系[J]. 地理学报,2000,55(3):354-363.
- [9] 郭文元,贾志军. 晋西淤地坝试验研究文集[M]. 郑州:黄河水利出版社,2001:102-165.
- [10] 郑宝明. 黄土高原丘陵沟壑区淤地坝建设效益与存在问题[J]. 水土保持通报,2003,23(6):32-35.
- [11] 黄自强. 黄土高原地区淤地坝建设的地位及发展思路[J]. 中国水利,2003(17):8-11.
- [12] 郑宝明,王晓,田永宏,等. 淤地坝实验研究与实践[M]. 郑州:黄河水利出版社,2003:152-367.
- [13] 王家臣. 边坡工程随机分析原理[M]. 北京:煤炭工业出版社,1996:68-139.
- [14] 祝玉学. 边坡可靠性分析[M]. 北京:冶金工业出版社,1993:45-96.
- [15] 郑颖人,赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(19):3381-3388.
- [16] Zienkiewicz O C, Taylor R L. The finite element method[M]. New York: McGraw-Hill, 1989.
- [17] Zienkiewicz O C, Humpeson C, Lewis R W. Associated and nonassociated visco-plasticity in soil mechanics[J]. Geotechnique, 1975,25(4):671-689.
- [18] 赵尚毅,郑颖人,时卫民,等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报,2002,24(3):343-346.
- [19] 吴海真,顾冲时. 有限元强度折减法在土石坝边坡稳定分析中的应用[J]. 水电能源科学,2006,8(4):54-58.
- [20] 石长. 赵新铭. 用有限元强度折减法分析边坡稳定[J]. 隧道建设,2006,26(3):5-8.
- [21] 张彩双,李俊杰,胡军. 有限元强度折减法的边坡稳定分析[J]. 中国农村水利水电,2006(5):72-74.