

文豪,陈国庆,李红,等.考虑降雨滑坡多级滑动的改进传递系数法研究[J].地质科技通报,2022,41(6):162-168.

Wen Hao, Chen Guoqing, Li Hong, et al. Improved transfer coefficient method considering multistage sliding of rainfall landslides[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(6): 162-168.

考虑降雨滑坡多级滑动的改进传递系数法研究

文豪¹, 陈国庆¹, 李红¹, 马金根², 吴章雷²

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059;

2. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 成都 610072)

摘要:在多级滑坡的渐进破坏过程中,滑带不同部位的屈服程度和破坏模式不同,强度参数也不同。在强降雨条件下,坡表产生的张拉裂缝充水,会产生静水压力。当前广泛应用的传递系数法对滑带不同位置取同一强度参数,也尚未考虑到静水压力作用。为此提出了一种考虑静水压力作用和滑带不同部位强度参数差异的改进传递系数法,对降雨引起的西安市柳西村南部的牛角沟滑坡进行了计算。结果表明:与不考虑静水压力和滑带不同部位强度参数差异的计算方法比,改进传递系数法计算的抗滑力相对较小,剩余下滑力计算结果相对较大,各级滑坡稳定性系数分别减小了约33.26%、17.92%、24.95%和16.94%;而改进前的稳定性系数偏高,可能会导致支护工程的安全储备不足。本研究提出的改进传递系数法可为多级滑坡处置提供更安全的参考。

关键词:改进传递系数法;多级滑坡;稳定性评价;滑坡渐进破坏特征;静水压力作用;降雨

中图分类号:P642.22

文章编号:2096-8523(2022)06-0162-07

收稿日期:2022-07-07

doi:10.19509/j.cnki.dzkg.2022.0231

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Improved transfer coefficient method considering multistage sliding of rainfall landslides

Wen Hao¹, Chen Guoqing¹, Li Hong¹, Ma Jin'gen², Wu Zhanglei²

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Chengdu Engineering Corporation Limited, Power Construction Corporation, Chengdu 610072, China)

Abstract: In the progressive failure process of multiple landslides, different parts of the slip zone have different yielding degrees and failure modes with different strength parameters. Under strong rainfall conditions, water-filled tension cracks generated on the slope surface give rise to hydrostatic pressure. The current widespread transfer coefficient method, which takes the same strength parameter for different locations of the slip zone, also has not yet taken into account the hydrostatic pressure effect. In this paper, we propose an improved transfer coefficient method which takes into account the hydrostatic pressure effect and the difference in strength parameters of different parts of the slip zone. The results show that, compared with the calculation method without considering the hydrostatic pressure and the difference in strength parameters in different parts of the slip zone, the anti-sliding force calculated by the improved transfer coefficient method is relatively small, the residual sliding force is relatively large, and the stability coefficients of landslides at all levels are reduced by approximately 33.26%, 17.92%, 24.95% and

基金项目: 国家自然科学基金项目(42090054;41972284)

作者简介: 文豪(1999—),男,现正攻读土木工程专业硕士学位,主要从事边坡稳定性方面的研究。E-mail: 2101284420@qq.com

通信作者: 陈国庆(1982—),男,教授,博士生导师,主要从事地质灾害防治和岩石力学方面的教学与研究工作。E-mail: chgq1982@126.com

16.94%, respectively. Based on the high stability coefficient before the improvement, it may lead to insufficient safety reserve of the retaining engineering. The improved transfer coefficient method proposed in this paper can provide a safer reference for multiple landslide disposal.

Key words: improved transfer coefficient method; multiple landslide; stability evaluation; landslide progressive failure characteristics; hydrostatic pressure effect; rainfall

多级滑坡是指以相同滑动模式多次重复出现的多滑动面地质灾害,常见模式有前缘卸荷诱发后部滑移的逐级牵引式滑坡多级失稳^[1],以及坡体中后部岩土体首先滑动,推挤中前部岩土体产生变形的推移式滑坡。在实际工程中,复杂地质条件以及不同工况下导致启滑机制复杂进而难以对其稳定性做出快速准确的评价^[2-4]。因此,研究多级滑坡的稳定性评价具有十分重要的现实意义。

针对多级滑坡的稳定性分析方法,现阶段主要概括为4类研究方法:①采用 Conventional Newmark 法对存在多个潜在滑动面的边坡进行稳定性分析^[5];②采用数值模拟进行研究,通过建立地质模型采用局部强度折减法对多级滑坡进行潜在多级滑面搜索并采用极限平衡方法求出其稳定性系数^[6-7];③采用以现代非线性科学、信息科学为主的新技术,以及蒙特卡洛法等其他概率论和数理统计方法对多级滑坡进行可靠性分析^[8];④采用极限平衡分析法,以静力平衡原理分析滑坡在各种破坏模式下的受力状态,通过分析滑坡抗滑力与下滑力之间的关系确定滑坡稳定性^[9]。其中,传递系数法作为一种极限平衡法,因其计算简单、方法原理直观,在我国实际工程中得到广泛应用。

然而,目前的研究表明,在运用传递系数法时,常常受制于复杂演化机制^[10]以及滑带土参数取值问题导致所求稳定性系数偏大,支挡工程安全储备不足。因此不少学者开展了对传递系数法的改进研究。关于传递系数法在多级滑坡稳定性评价中的改进,国内外学者研究视角多聚焦于以下3点:①各级滑坡间相互作用力对稳定性评价的影响,通过多级滑坡形成机制分析各级滑坡间的相互作用力进而对滑坡推力计算公式进行修改^[11]。②考虑条块间作用力与条块底部滑面倾角不一致,而进行方向角修正的研究。通过将条块底滑面倾角与未知常数相乘对下滑力计算公式进行相关修改^[12]。③在动水条件下,基于渗流作用滑带土颗粒理论对传递系数法进行修正,使其计算结果更加符合库岸坡体^[13]。以上研究以不同的研究视角对传递系数法进行修正,使之能更加符合工程需求。

综上所述,不同学者以不同的研究视角进行传递系数法的改进,但考虑到在降雨条件下多级滑坡在渐进破坏时,上述方法无法表征滑带土不同破坏

状态以及静水压力作用,导致滑坡稳定性及推力计算出现较大偏差^[14-18]。为此,本研究在充分考虑雨水入渗时,后缘张裂缝静水压力作用、多级滑坡渐进破坏过程中滑带土参数取值以及各级滑坡之间的相互作用,提出了一种改进传递系数法,并以西安市柳西村南部的牛角沟滑坡为例,计算验证该方法的准确性。计算结果表明,相较于传统的传递系数法,改进后的传递系数法给出的滑坡稳定性更加符合多级滑坡的渐进破坏过程。

1 多级滑坡渐进破坏中的力学特征分析

1.1 渐进破坏过程中滑带参数取值

滑面由前往后依次贯通而形成多级滑坡,前级滑体会首先失稳滑动并导致后续块体抗滑段缺失,造成后续块体抗滑力下降,形成具有共同滑面的多个次级滑坡由坡脚到坡顶依次滑动。其中,每个次级滑坡均为渐进破坏,而渐进破坏的实质为滑带力学参数渐进弱化的过程,滑带土强度参数将经历3个阶段:峰前应力阶段、软化应力阶段、残余应力阶段^[11]。当坡顶发生张拉破坏以及坡脚处发生剪切破坏时由于具有宏观的破裂面,因此本研究视其土体强度参数处于残余阶段,而在滑面未贯通时,中部土体未发生明显破坏迹象,可视为其强度参数处于峰值阶段。因此,本研究为表征滑带土应变软化特点每级滑坡可分为:滑带处于残余应力状态的破坏区,以及仍处于峰前状态或正处于临界状态(抗滑力 $\geq$ 下滑力)的未破坏区,此时的滑带参数为峰值强度。

在多级滑坡渐进破坏过程中,从坡顶向下扩展的张拉破坏和从坡脚向上延伸的剪切破坏同步发生。其中,张拉破坏对坡表形态具有一定影响。当土体发生渐进变形时,由于张拉裂缝的存在,坡体微地貌常表现为“负地形”,而部分具有高抗滑力的土体常导致其后土体表面发生挤压膨胀,因此实际滑坡的坡表常为凹凸组合型坡面。在渐进破坏过程中每级滑坡的土体状态可大致分为3个区域(图1):最上方第一个区域为张拉破坏区,张拉裂缝使该处岩土体破裂,在发生失稳破坏时,可沿该破裂面发生剪切运动。考虑其出现宏观破裂面,因此本部分土体强度参数为零;中间第2个区域为临界未破坏区,此时的黏聚力和内摩擦角均为峰值;最下方第3个

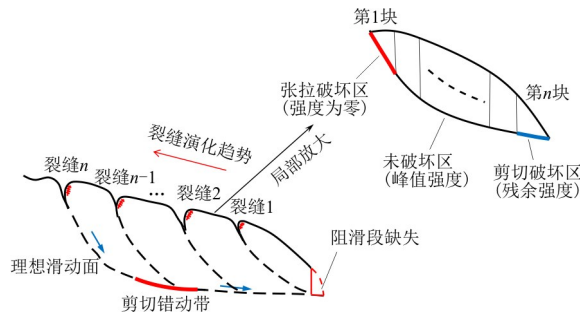


图1 多级滑坡滑带土参数分区图

Fig. 1 Partition diagram of the multiple landslide sliding zone soil parameter

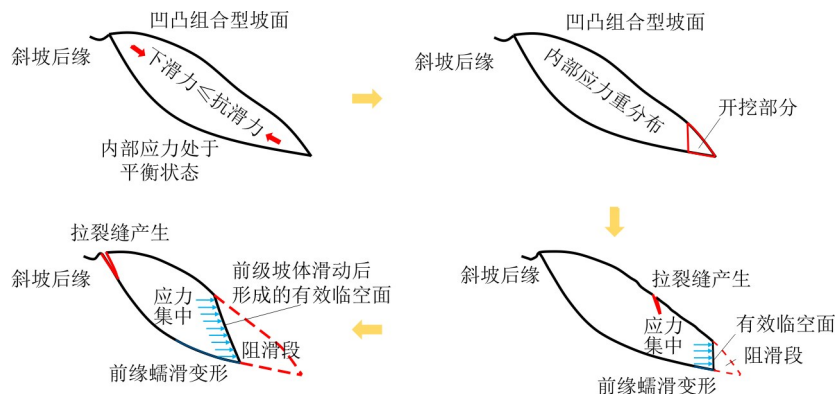


图2 多级滑坡中单级滑体渐进失稳过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the progressive destabilization process of a single-stage slide in a retrogressive multiple landslide

多级滑坡破坏是由每个次级滑坡以相同破坏模式重复出现的方式发生。当前一个次级滑坡失稳破坏时,将导致后续块体由于关键阻滑段的缺失而造成抗滑力下降,促使其发生失稳破坏,即多级滑坡在发生渐进破坏时,前部次级滑坡发生失稳破坏将对后续次级滑坡的抗滑力造成影响。

除了各次级滑坡位置及体积不同外,多级滑坡各次级坡体最终受力特征大同小异,其次级滑动面形式如图3所示。以两级滑体交界处的2个滑块相互作用为例,为简化受力分析过程,第 k 级滑坡的第一条

区域为剪切破坏区,其岩土体发生明显剪切破坏,具有较大位移变化,此时土体黏聚力和内摩擦角视为残余值。同时,随着进一步变形张拉破坏区和剪切破坏区逐渐向中部扩展,最终使滑带土全部处于破坏后状态,张拉破坏区和剪切破坏区贯通,滑坡彻底失稳滑动(图2)。由图2可知,渐进破坏过程中土体强度呈现3种不同的状态,而对于这3种土体状态的区域如何划分应根据滑坡实际情况而定。

1.2 各级滑坡体间的相互作用力

对于多级滑坡而言,各级滑坡体间的相互作用力不可忽视。通过对多级滑坡破坏过程分析,可知

块与第 $k+1$ 级滑坡的最后条块之间的位置关系如图3-a所示。在两级滑坡交界处,作用于该处的力为第 $k+1$ 级滑体最后条块的剩余下滑力,则第 k 级滑坡对第 $k+1$ 级滑坡的阻力应大于或等于该力的绝对值,为方便计算,可假定第 k 级滑坡处于临界状态;同时第 $k+1$ 级滑体已有向下变形滑动迹象,后级滑体对前级滑体有一定推力作用,即后级滑体最后条块剩余下滑力向下传递的推力作用(图3-b)。

1.3 降雨入渗对多级滑坡影响机理

在降雨作用下,滑坡体表面极易产生各级张拉裂缝,张拉裂缝的发育将导致雨水的加速入渗,积水沿裂缝渗入坡体内部,此外,裂缝的产生将导致坡体出现明细的错落台阶,容易破坏其内部可能已有的管道设施。降雨入渗对滑坡土体影响的总体表现为强度软化作用和静水压力作用。如图4所示:降雨会降低土体的物理力学性能,降低滑坡的抗滑力,并且裂缝处的静水压力将导致滑坡下滑力的进一步提高。当降雨强度大于土体的入渗能力时,过剩的雨水还会在坡体表面形成地表径流,破坏坡体形态,改变坡体结构,将会冲刷侵蚀坡脚,从而发生失稳破坏。

雨水从坡体表面开始入渗,在强降雨作用下,坡体部分饱和区域将出现地表径流,此时地表土体很快达到饱和状态;在径流的作用下,坡体表面的张拉

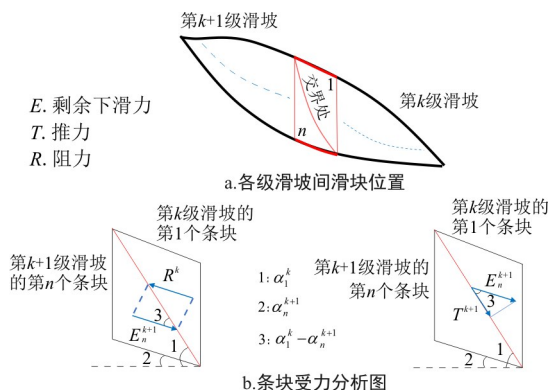


图3 多级滑坡各级滑体受力分析图

Fig. 3 Multiple landslide force analysis diagram for each level of landslide

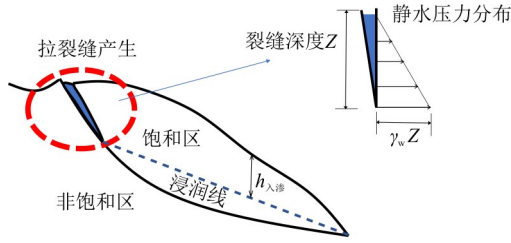


图4 单级滑坡后缘拉裂缝静水压力示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the hydrostatic pressure of tensile fractures at the posterior border of each landslide stage

裂缝将加速发育,并且导致雨水快速进入坡体内部,加速入渗锋面向坡体内部的推移。伴随降雨入渗的过程,入渗锋面所经过的坡体将很快达到饱和状态,滑体参数将快速降低,滑坡稳定性系数将不断降低,

$$\begin{cases} E_i^k = W_i^k \sin \alpha_i^k - W_i^k \cos \alpha_i^k \tan \varphi_i^{k, \text{resid}} - c_i^{k, \text{resid}} l_i^k + \phi_i^k E_{i-1}^k - \frac{1}{2} \gamma_w Z^2, & i = 1 \\ E_i^k = W_i^k \sin \alpha_i^k - W_i^k \cos \alpha_i^k \tan \varphi_i^{k, \text{peak}} - c_i^{k, \text{peak}} l_i^k + \phi_i^k E_{i-1}^k, & 2 \leq i \leq n-1 \\ E_i^k = W_i^k \sin \alpha_i^k - W_i^k \cos \alpha_i^k \tan \varphi_i^{k, \text{resid}} - c_i^{k, \text{resid}} l_i^k + \phi_i^k E_{i-1}^k, & i = n \end{cases} \quad (1)$$

式中: W_i^k 为第 k 级滑坡的第 i 条块的重力; ϕ_i^k 为第 k 级滑坡的第 i 条块的传递系数; α_i^k 为第 k 级滑坡的第 i 条块的倾角; E_i^k 为第 k 级滑坡的第 i 条块的剩余下滑力; E_{i-1}^k 为第 $i-1$ 条块的剩余下滑力; $c_i^{k, \text{peak}}$ 、 $\varphi_i^{k, \text{peak}}$ 为对应滑块的峰值强度参数; $c_i^{k, \text{resid}}$ 、 $\varphi_i^{k, \text{resid}}$ 为对应滑块的残余强度参数; Z 为张拉裂缝深度; γ_w 为水的容重; l_i^k 为第 k 级滑体破坏区的第 i 条块的长度。

传递系数计算公式如下:

$$\phi_i = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \tan \varphi_i \quad (2)$$

式中:当 $2 \leq i \leq n-1$ 时, $\varphi_i = \varphi^{\text{peak}}$; 当 $i = n$ 时, $\varphi_i = \varphi^{\text{resid}}$ 。

其中,张拉裂缝深度 $Z = \frac{2c}{\gamma \sqrt{K_a}}$, $K_a = \tan^2(45^\circ$

$- \varphi/2)$; 此处 c, φ 取值为相应的残余强度值。

根据对滑坡剩余下滑力的计算,可知当 $E_n = 0$ 时,条块抗滑力和下滑力正好相等,该级滑坡此时处于临界状态;当 $E_n < 0$ 时,表示条块抗滑力大于下滑力,该级滑坡处于稳定状态;当 $E_n > 0$ 时,表明条块下滑力大于抗滑力,该级滑坡此时处于不稳定状态。对于处于不同状态的边坡,其稳定性系数 F_s 包含在一个线性方程中,但各级坡体间存在不可忽视的相互作用力。因此,本研究基于郑颖人等^[20]推导出的公式做出如下修改:将各级滑坡稳定性系数计算分为两部分:在第一级滑坡中,计算抗滑力时应当考虑到前缘坡体的缺失所造成抗滑力的缺失应当减去;计算下滑力时,应当考虑到后续滑坡的推力作

但决定滑坡是否发生失稳破坏的关键因素之一是滑带土的力学参数,当入渗锋面达到滑面时,滑带土物理力学参数将发生骤降,导致滑坡的失稳破坏。故本研究考虑入渗锋面达到滑面时,坡体发生失稳破坏,并且此时土体参数均为饱和状态。

2 改进传递系数法

考虑到土体渐进破坏过程中的土体强度差异、相互作用力以及降雨作用下的静水压力,在此对传统的传递系数法相关计算公式进行了改进,使之更适用于多级滑坡稳定性分析。

根据对第 k ($k=1, 2, 3, \dots, m$) 级滑体破坏区间的具体划分,将基本剩余下滑力计算公式^[19]进行了相应改进,如式(1)所示:

用。在计算后续滑坡时,计算抗滑力应考虑前一级滑坡的缺失,计算下滑力时应当考虑后续块体的抗滑力作用。当该滑坡发育有 m 级滑坡时,各级滑坡的稳定性系数计算公式如下:

$$\begin{cases} F_s^k = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (R_i^k \prod_{j=i}^{n-1} \phi_j^k) + R_n^k - |R^0|}{\sum_{i=1}^{n-1} (T_i^k \prod_{j=i}^{n-1} \phi_j^k) + T_n^k + T^{k+1}}, & k = 1 \\ F_s^k = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (R_i^k \prod_{j=i}^{n-1} \phi_j^k) + R_n^k - |R^{k-1}|}{\sum_{i=1}^{n-1} (T_i^k \prod_{j=i}^{n-1} \phi_j^k) + T_n^k + T^{k+1}}, & k = 2, 3, L, \dots, m-1 \end{cases} \quad (3)$$

其中:

$$\begin{cases} T_i = W_i \sin \alpha_i, & i \neq n \\ T_i = W_i \sin \alpha_i + \frac{1}{2} \gamma_w Z^2, & i = n \end{cases} \quad (4)$$

$$R_i = W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i + c_i l_i \quad (5)$$

式中: R^{k-1} 为第 $k-1$ 级滑坡对第 k 级滑坡的阻力; R^0 是致使第一级滑坡滑动的启滑动力(开挖坡脚等方式使坡脚卸载); l_i 为第 i 个条块的长度; T^{k+1} 为第 $k+1$ 级滑坡对第 k 级滑坡的推力,具体公式如下:

$$T^{k+1} = \cos(\alpha_1^k - \alpha_n^{k+1}) E_n^{k+1}, \quad k \geq 1 \quad (6)$$

$$R^{k-1} = -E_n^k \quad (7)$$

多级滑坡滑动面由前往后依次形成。因此,最后级滑坡为第 k 级滑坡,依次向前至第一级滑坡。

3 计算实例

3.1 牛角沟滑坡工程地质条件

牛角沟滑坡位于西安市柳西村南部,紧靠秦岭山坡坡脚,属于黄土丘陵地貌。滑坡结构具有明显的分层性(图 5),滑坡体主要岩性为马兰黄土,滑带主要成分为红黏土,下伏为全风化状态的云母石英片岩。该滑坡为黄土—红黏土结构,其基本发育特征^[21]如下:

(1)滑坡体 滑坡主滑方向约 10° ,平面上呈“扇形”。坡体纵向长约 260 m,前缘宽约 280 m,后缘宽约 40 m,滑坡前后缘高程差约为 80 m,滑体厚 15~20 m,体积约为 $50 \times 10^4 \text{ m}^3$,属于中型黄土滑坡,整体呈南高北低之势,坡度约 15° 。

(2)滑动面 滑动面位于黄土和红黏土的交界面,呈圆弧曲线状。

(3)滑带 滑带土厚 4 m 左右,滑带中部和前缘为褐红色的高塑性红黏土,具有相对隔水作用,该层与滑坡失稳密不可分,后缘为粉质黏土和云母石英片岩的分界面。

(4)滑床 滑床岩性主要为云母石英片岩,部分区域有少量的中更新统粉质黏土。

(5)滑坡台阶 因局部修整梯田和平整土地,坡表张拉裂隙发育,梯田错断现象严重,形成的错台高度在 10~150 cm 之内,斜坡形成多台阶地形。但整体而言,分级特征不明显,坡面绝大部分向外突出,局部错台较高形成凹陷,呈凹凸组合型坡面形态。

3.2 牛角沟滑坡变形机制

牛角沟滑坡位于秦岭北麓山前大断裂附近,因此滑坡区地质结构松散且极易软化,是边坡滑动的地质基础。其次,坡脚开挖取土导致其关键阻滑段缺失、中前部发生局部滑移和垮塌为其失稳滑动的根本原因。在持续降雨的影响下,由于上部洪积层

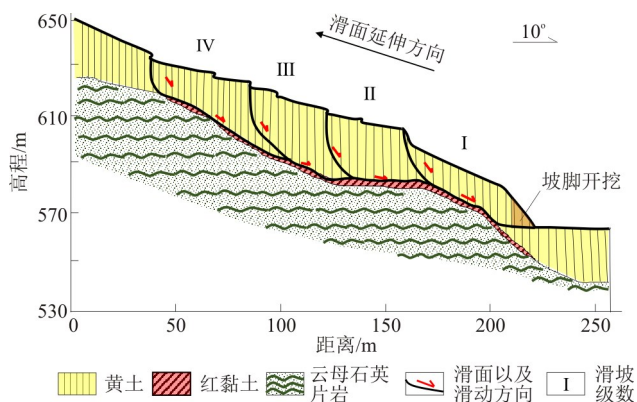


图 5 西安市牛角沟滑坡地质剖面图

Fig. 5 Geological profile of the Niujiagou landslide in Xi'an City

以及马兰黄土地层结构垂直裂隙较发育,渗水性较好。滑床因渗透性较差而形成相对隔水层,导致大量水分不能及时排泄而形成相对汇水区,水分的浸泡使得土体强度迅速降低,形成滑移控制面,使斜坡失稳滑动的可能性增大。坡体出现的错台导致坡体内部的输水管断裂,改变了坡体的排水条件,使土体强度显著降低。

牛角沟滑坡的地形地貌反映多级滑坡的各级坡体位置关系,多级滑体由于坡脚处高陡临空面而发生沿着同一主滑面、多次级滑面由坡脚到坡顶依次并行剪出。在坡脚重要抗滑段缺失或岩土体强度急剧降低的情况下,前缘坡体会最先形成拉裂缝并贯通破坏,为后部未滑移滑体提供有利的滑移空间,并且由于前缘关键块体的缺失,导致抗滑力的降低,进而导致滑坡以多级滑动的形式发生渐进破坏。根据牛角沟滑坡的破坏特征可知:坡表裂隙的发育、凹凸不平的坡面形态、松散破碎以及软硬相间的坡体结构等特殊地质条件是该滑坡发生多级滑动的前提条件。同时诱发多级滑动的外部因素大致有:降雨、灌溉与人工开挖,其中降雨和人工开挖的影响最大。

3.2 牛角沟滑坡土体参数选择

滑体土体饱和容重为 20.7 kN/m^3 ,通过室内环剪试验测得滑带部分的强度参数如表 1 所示。

表 1 西安市牛角沟多级滑坡滑带土强度参数取值

Table 1 Slip zone soil strength parameters of the Niujiagou gully multiple landslide in Xi'an City

土体状态	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
峰值强度	15.0	14.9
残余强度	12.2	12.1

为计算方便,考虑到牛角沟滑坡经历了几次暴雨事件,默认浸润线达到滑面处,即滑面以上均达到饱和状态。将牛角沟滑坡边坡模型简化,条块划分如图 6 所示。

根据第 1 节中对多级滑坡各级滑坡间相互作用机理的分析,以及不同区域滑带参数取值的确定,图

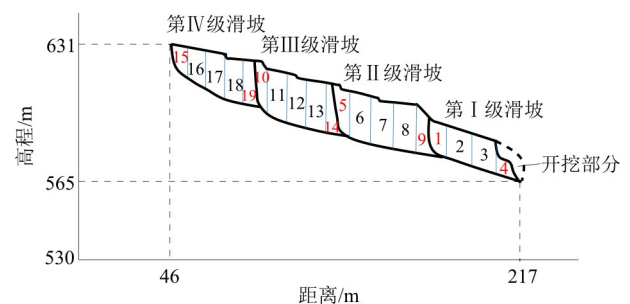


图 6 西安市牛角沟多级滑坡条块划分与计算模型

Fig. 6 Block division and calculation model of the Niujiagou gully multiple landslide in Xi'an City

6 标红区域中 1,5,10,15 区域为张拉破坏区,4,9,14,19 区域为剪切破坏区,其余未标红区域为未破坏条块。滑坡因坡角处开挖导致 4 号条块自重缺

失。因此本研究将土体自重的缺失视为启滑动力——690.17 kN/m,每级滑坡剩余下滑力计算如表 2 所示。

表 2 西安市牛角沟多级滑坡剩余下滑力计算明细

Table 2 Detailed calculation of the residual sliding force of the multiple landslides in the Niujiao gully landslide, Xi'an City									
滑坡级数	条块编号	$W_i/$ (kN·m ⁻¹)	$\alpha/(^\circ)$	$\Delta\alpha/(^\circ)$	ϕ_i	$R_i/$ (kN·m ⁻¹)	$T_i/$ (kN·m ⁻¹)	$\psi_i E_{i-1}/$ (kN·m ⁻¹)	静水推力/ (kN·m ⁻¹)
第一级滑坡	1	2 810.20	73	/	/	493.53	2 838.19	/	151.31
	2	4 094.58	16	57	0.32	1 237.42	1 128.06	2 344.66	/
	3	3 914.22	16	0	1.00	1 186.51	1 078.37	645.86	/
	4	5 106.18	16	0	1.00	518.11	483.62	537.73	/
第二级滑坡	5	3 177.57	79	/	/	487.47	3 270.07	/	151.31
	6	5 136.10	29	50	0.44	1 363.55	2 488.88	2 782.60	/
	7	5 013.10	22	7	0.96	1 400.20	1 877.35	2 348.23	/
	8	5 409.02	10	2	0.92	1 589.58	938.80	2 731.82	/
	9	2 794.20	10	0	1.00	777.14	484.96	1 870.43	/
第三级滑坡	10	2 499.21	65	/	/	403.62	2 415.76	/	151.31
	11	4 588.11	35	25	0.73	1 160.51	2 630.47	2 012.14	/
	12	4 793.28	14	21	0.84	1 387.64	1 159.02	2 945.36	/
	13	4 586.80	14	0	1.00	1 324.61	1 109.09	2 240.74	/
	14	2 701.83	10	4	0.98	718.36	468.93	2 025.23	/
第四级滑坡	15	1 962.31	66	/	/	321.67	1 943.50	/	151.31
	16	3 199.48	29	37	0.64	900.44	1 550.42	1 621.83	/
	17	4 054.42	25	4	0.98	1 140.66	1 712.66	1 686.10	/
	18	3 781.95	11	14	0.91	1 123.05	721.66	222.74	/
	19	2 757.38	10	1	1.00	685.92	478.57	1 612.06	/

结合式(3)~(5)可得,4 级滑坡由下至上滑坡稳定性系数分别为:0.626,0.788,0.734,0.814,从各级滑面对应的稳定性系数值可以看出,滑坡是由坡脚往坡顶依次发生,属于典型多级滑坡。

4 与传统传递系数法对比分析

针对牛角沟多级滑坡,采用改进的传递系数法和只考虑单方面或两者均不考虑计算所得的稳定性系数如表 3 所示。其中只考虑单方面是指:①不考虑坡体间的相互作用力,即每级坡体均视为一个独立的滑坡,各级坡体间不存在拖拽和阻挡作用;②不考虑滑带参数取值,即每级滑坡的滑带强度参数并不是渐进弱化的,坡体失稳滑动时,滑面上的破坏状态一致。为了比较不同破坏模式下滑坡稳定性系数的差异,本研究还将对比采用整体式滑移失稳所计算的滑坡稳定性系数。

据表 3 数据分析可知,当两者均不考虑时,各级滑体由下至上稳定性系数分别较改进传递系数法分别大 49.84%、21.83%、33.24%、20.39%,并且相较于发生整体式失稳破坏,多级滑坡各级滑坡稳定性系数均小于整体式滑移失稳的稳定性系数。因此常规传递系数法所计算的滑坡稳定性系数偏于乐观,不符合实际的滑坡稳定性系数,由此可进一步分析:多级滑坡的发生,是由于前缘滑坡的失稳破坏导

致后续滑坡的阻滑体缺失,抗滑力下降,发生以多个次级滑面破裂并以共同主滑面滑动剪出的多级滑坡渐进失稳破坏。因此,对于分级、分块滑动的多级滑坡而言,在对其进行稳定性评价时,若不考虑其多级破坏特征以及各级滑坡之间的相互作用和滑带土强度参数的差异,将使得滑坡整体计算结果偏于安全,导致支护结构的支护力度不足,治理效果不佳。本方法中抗滑力与黏聚力、内摩擦角密切相关,而下滑力只与坡体自身重力有关,这使得稳定性系数整体偏小。

表 3 不同条件下的稳定性系数对比

Table 3 Comparison of stability factors under different conditions

滑坡级数	两者均考虑	不考虑相互作用力	不考虑滑带参数取值	两者均不考虑	整体式滑移失稳
第Ⅰ级滑坡	0.626	0.787	0.761	0.938	0.96
第Ⅱ级滑坡	0.788	0.877	0.843	0.960	
第Ⅲ级滑坡	0.734	0.878	0.897	0.978	
第Ⅳ级滑坡	0.814	0.881	0.950	0.980	

5 结 论

(1)改进传递系数法可以准确评价在降雨条件下每一级滑坡的稳定性系数,根据计算结果可知,利用改进传递系数法的计算结果相较于常规传递系数法小,利用改进传递系数法所计算的滑坡稳定性系数作为设计依据,支护结构的支护力更大。

(2)在多级滑坡的渐进破坏过程中,在滑带土不同部位存在3种不同状态,发生张拉破坏的区域在滑动破坏时,土体强度参数取值为零;发生剪切破坏区域的土体,其强度参数为残余值;而未破坏区的土体强度参数则为峰值强度。根据不同破坏状态确定滑带土参数所计算的滑坡稳定性系数将更加符合多级滑坡的渐进破坏特征。

(3)由于雨水汇集在坡体表面的张拉裂缝处,考虑静水压力作用将更加符合降雨条件下多级滑坡受力特点。采用改进的传递系数法对牛角沟滑坡进行稳定性分析可知,各级滑坡稳定性系数整体上呈现增大的趋势,即滑面是从前往后贯通形成的,属于典型的多级滑坡。

参考文献:

- [1] Bromhead E N, Ibsen M L. A review of landsliding and coastal erosion damage to Historic Fortifications in South East England[J]. Landslides, 2006, 3(4): 341-347.
- [2] Wang J, Schweizer D, Liu Q B, et al. Three-dimensional landslide evolution model at the Yangtze River[J]. Engineering Geology, 2021, 292: 106275.
- [3] 吴维义. 龙家岩多级滑坡机理分析及其防治技术研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2016.
Wu W Y. Research on evolution mechanism and controlling techniques for Longjiayan multi-stage landslide[D]. Guiyang: Guizhou University, 2016(in Chinese with English abstract).
- [4] 全德富, 谭飞, 苏爱军, 等. 基于多源数据的谭家湾滑坡变形机制及稳定性评价[J]. 地质科技通报, 2021, 40(4): 162-170.
Tong F D, Tan F, Su A J, et al. Deformation mechanism and stability evaluation of Tanjiawan landslide based on multi-source data[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(4): 162-170(in Chinese with English abstract).
- [5] Song J, Fan Q Q, Feng T G, et al. A multi-block sliding approach to calculate the permanent seismic displacement of slopes[J]. Engineering Geology, 2019, 255: 48-58.
- [6] 肖锐铨, 王思敬, 贺小黑, 等. 非均质边坡多级稳定性分析方法[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1062-1068.
Xiao R H, Wang S J, He X H, et al. Multi-level stability analysis of inhomogeneous slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1062-1068(in Chinese with English abstract).
- [7] 张晓奇, 胡新丽, 刘忠绪, 等. 呷爬滑坡滑带土蠕变特性及其稳定性[J]. 地质科技通报, 2020, 39(6): 145-153.
Zhang X Q, Hu X L, Liu Z X, et al. Creep properties and stability of sliding zone soil in Gapa landslide[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(6): 145-153(in Chinese with English abstract).
- [8] 何淑军, 刘景儒, 吴树仁, 等. 夏呀河多级滑坡三维稳定性模拟分析研究[J]. 铁道工程学报, 2011, 28(11): 24-29.
He S J, Liu J R, Wu S R, et al. Analysis and research on 3D simulation for stability of Xiayahe multi-stage landslide[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011, 28(11): 24-29(in Chinese with English abstract).
- [9] 谭福林, 胡新丽, 张玉明, 等. 牵引式滑坡推力计算方法研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊2): 532-538.
Tan F L, Hu X L, Zhang Y M, et al. Study of calculation method of retrogressive landslide thrust[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S2): 532-538(in Chinese with English abstract).
- [10] 杨登芳, 胡新丽, 徐楚, 等. 基于物理模型试验的多层滑带滑坡变形演化特征[J]. 地质科技通报, 2022, 41(2): 300-308.
Yang D F, Hu X L, Xu C, et al. Deformation and evolution characteristics of landslides with multiple sliding zones based on physical model test[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(2): 300-308(in Chinese with English abstract).
- [11] 谭福林, 胡新丽, 张玉明, 等. 不同类型滑坡渐进破坏过程与稳定性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊2): 597-606.
Tan F L, Hu X L, Zhang Y M, et al. Study of progressive failure processes and stabilities of different types of landslides[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2): 597-606(in Chinese with English abstract).
- [12] 何木, 赵其华. 基于方向角修正的改进传递系数法[J]. 地质灾害与环境保护, 2010, 21(1): 79-82.
He M, Zhao Q H. Improved transfer coefficient method based on correcting direction angle[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2010, 21(1): 79-82(in Chinese with English abstract).
- [13] 任聪聪. 水库运行期涉水岸坡稳定系数计算的传递系数法改进[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
Ren C C. Improvement of transfer coefficient method for stability coefficient of wading slope during reservoir operation[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020(in Chinese with English abstract).
- [14] Feng Z K, Xu W J. GPU material point method(MPM) and its application on slope stability analysis[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(7): 5437-5449.
- [15] 范宣梅, 许强, 张倬元, 等. 平推式滑坡成因机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊2): 3753-3759.
Fan X M, Xu Q, Zhang Z Y, et al. Study on genetic mechanism of translation landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S2): 3753-3759(in Chinese with English abstract).
- [16] Wang Y K, Sun S W, Liu L. Mechanism, stability and remediation of a large scale external waste dump in China[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37(6): 5147-5166.
- [17] Tang L S, Zhao Z L, Luo Z G, et al. What is the role of tensile cracks in cohesive slopes? [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019, 11(2): 314-324.
- [18] Regmi R K, Jung K, Nakagawa H, et al. Study on mechanism of retrogressive slope failure using artificial rainfall[J]. Catena, 2014, 122: 27-41.
- [19] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
Qian J H, Yin Z Z. Geotechnical principles and calculations [M]. Beijing: China Water & Power Press, 1996(in Chinese).
- [20] 郑颖人, 时卫民, 杨明成. 不平衡推力法与 Sarma 法的讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 3030-3036.
Zheng Y R, Shi W M, Yang M C. Discussion on imbalance force method and sarma's method[J]. China Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(17): 3030-3036(in Chinese with English abstract).
- [21] 曲国鹏. 降雨入渗作用下非饱和黄土滑坡稳定性研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
Qu G P. Study on the stability of loess slope under rainfall infiltration [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012(in Chinese with English abstract).