

doi: 10.12029/gc20190214

王佳运, 王根龙, 石小亚. 2019. 陕西山阳滑坡视向滑移-溃屈破坏力学分析[J]. 中国地质, 46(2): 381-388.

Wang Jiayun, Wang Genlong, Shi Xiaoya. 2019. Mechanical analysis of apparent dip creep-buckling failure of Shanyang rockslide in Shaanxi Province[J]. Geology in China, 46(2): 381-388(in Chinese with English abstract).

陕西山阳特大型滑坡视向滑移-溃屈破坏力学分析

王佳运^{1,2}, 王根龙^{1,2}, 石小亚²

(1. 自然资源部黄土地质灾害重点实验室, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 陕西山阳滑坡为典型的陡倾层状斜向岩质斜坡, 其破坏模式不同于常见的顺倾层状岩质斜坡溃屈破坏模式, 也不同于斜倾层状山体的视向滑移-剪切破坏模式, 更不同于陡倾顺层岩质斜坡的倾倒-倾倒-滑移破坏模式, 属于视向滑移-溃屈破坏模式。在实地调查的基础上, 从斜坡结构特征、结构面组合特征以及剪出口特征分析了滑坡的破坏模式, 进而分析了山阳滑坡的视向滑移-溃屈破坏机制; 以梁板理论、层状板裂结构岩体弯曲-溃屈破坏的力学模型为基础, 结合斜倾层状岩质滑坡的视向滑动机制研究, 建立了基于斜坡自重、地下水静水压力、侧向摩阻力以及斜坡岩体厚度变化作用下的陡倾层状斜向岩质斜坡视向滑移-溃屈破坏力学模型, 进行力学分析, 推导了溃屈段长度条件方程, 并以山阳滑坡为例验证了长度条件方程的正确性。

关键词: 陡倾层状斜向岩质斜坡; 视向滑移-溃屈破坏模式; 破坏机制; 侧向摩阻力; 条件方程

中图分类号: P642.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2019)02-0381-08

Mechanical analysis of apparent dip creep-buckling failure of Shanyang Super large-scale rockslide in Shaanxi Province

WANG Jiayun^{1,2}, WANG Genlong^{1,2}, SHI Xiaoya²

(1. Key Laboratory for Geohazards in Loess Area, MNR, Xi'an, 710054, Shaanxi, China; 2. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an, 710054, Shaanxi, China)

Abstract: As a typical steep stratified oblique rock slope, Shanyang rockslide in Shaanxi Province is different from buckling failure of inclination-parallel rockslide, apparent dip slide of inclined bedding rockslide and, what is more, toppling and sliding of steeply inclined rockslide, and belongs to the apparent dip creep-buckling. On the basis of field investigation and analysis of characteristics of structure planes, structure of sliding rockmass and shear outlet, the authors analyzed the failure mode in combination with the buckling mechanism. The authors established and analyzed the buckling mechanical model of steep stratified oblique rock slope under gravity, hydrostatic pressure of groundwater, lateral friction and rockmass depth of the rockslide according to the beam plate theory and mechanical model of bending-buckling failure of slab rent structure rockmass, as well as the condition equation of buckling length. The validity of the condition equation was verified.

Key words: steep stratified oblique rock slope; apparent dip creep-buckling failure mode; failure mechanism; lateral friction;

收稿日期: 2018-01-19; 改回日期: 2019-03-15

基金项目: 中国地质调查局项目(121201011000150018、DD20190642)资助。

作者简介: 王佳运, 男, 1978年生, 博士, 高级工程师, 主要从事地质灾害调查与研究; E-mail: wjy311_2000@sohu.com。

condition equation

About the first author: WANG Jiayun, male, born in 1978, doctor, senior engineer, engages in investigation and study of geological hazards; E-mail: wjy311_2000@sohu.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Project (No. 121201011000150018, DD20190642).

1 引 言

2015年8月12日0时30分,陕西省山阳县中村镇发生山体滑坡灾害,造成65人死亡的重大灾害性滑坡灾害,直接经济损失约5亿元。

溃屈型破坏是顺倾层状岩质斜坡一种典型的滑坡破坏模式,已成为众多研究学者关注的焦点。Kutte(1981)曾在介绍英国矿山边坡破坏实例中提出了溃屈破坏型式,并根据欧拉公式的基本原理,给出了层状岩质边坡溃屈失稳的极限荷载公式。Cavers(1981)以平坡三段溃屈等模式对层状岩质斜坡的溃屈稳定性评价进行过研究。孙广忠等学者(孙广忠等,1985;孙广忠,1988)基于岩体结构类型与层状岩质斜坡的地质背景条件,建立了溃屈型滑坡的地质力学模型,并运用静力法与能量守恒原理给出了层状岩质斜坡产生溃屈破坏的极限荷载公式。国内一些学者(倪国荣等,1987;潘瑞林等,1990;李树森等,1999)对于层状岩质边坡溃屈破坏的力学模型与失稳判据也进行了大量深入的研究。以上研究成果奠定了层状岩质斜坡溃屈破坏机制的研究基础。后期很多学者(任光明等,1998;朱晗旸等,2004;刘春香等,2014;杜应琼等,2014;汤明高等,2016;刘云鹏,2017)利用公式修正推导、物理模拟、数值模拟等手段对顺层岩质斜坡溃屈破坏的形成机制、力学特性、影响因素等方面进行了大量的探索研究,但是大多数的研究并未考虑地下水静水压力以及岩体厚度变化作用下的影响。刘传正、殷跃平等人(刘传正等,1995;殷跃平,2010;冯振等,2012)对斜倾层状岩质斜坡的变形破坏模式与视向滑动失稳机制进行了大量深入的研究,指出侧向摩阻作用对斜倾厚层山体滑坡的变形起到非常重要的作用(殷跃平,2010),重点研究了斜倾层状岩层滑坡体的变形滑移-剪切过程,但是对该类型滑坡的溃屈破坏模式尚未进行过探索与研究。而在陡倾层状岩质斜坡方面的研究,前人(Goodman et al., 1976;任光明等,2009;李滨等,

2015)也做了相关的探索,研究认为其破坏模式为倾倒变形或倾倒-滑移,亦未对溃屈破坏模式进行过研究。

本文以层状岩质斜坡溃屈破坏的梁板理论为基础,建立了陡倾层状斜向岩质斜坡视向滑移-溃屈破坏力学模型,进行了力学分析,推导出基于斜坡自重、地下水静水压力、侧摩阻力以及岩体厚度变化作用下的溃屈段长度条件方程,为研究陡倾层状斜向岩质滑坡视向滑移-溃屈机制以及减缓该类型滑坡灾害风险提供了依据。

2 地质环境条件

滑坡区地处亚热带向暖温带过渡的季风性半湿润气候区,年降雨量700~900 mm,多年平均降水量709 mm。年内降水量分配不均,5—10月是区内主要降水期,7—9月份是多雨期,占全年降水量的50%以上,并多呈暴雨形式出现。

滑坡区位于基岩中山陡坡地带,滑坡所发育的山体三面临空,前部面向呈深切“V”字形的大西沟,形成陡倾的斜向山梁地貌,整体坡度 38° ;山体斜坡高程1025~1300 m,相对高差275 m,相对滑坡堆积区前部高程970 m,高差则达330 m。

滑坡所处大地构造单元属南秦岭薄皮逆冲推覆构造带,耀岭河复式背斜南翼。斜坡出露地层层序倒转,上部为震旦系灯影组(Z_2dn)坚硬厚层-巨厚层白云岩,单层厚度0.5~1.0 m,产状 $345^\circ\sim 20^\circ\angle 43^\circ\sim 60^\circ$,下伏寒武系水沟口组(C_1sh)软弱-较软弱炭质泥岩与硅质板岩互层,产状 $340^\circ\sim 20^\circ\angle 32^\circ\sim 56^\circ$,两套地层呈平行不整合接触,形成了上部坚硬、下部软弱的斜坡结构。

大西沟与烟家沟于滑坡前缘交汇,沟内未见有地表径流,但是降雨通过岩体节理裂隙以及溶蚀通道补给地下水(图1),在下伏的软弱夹层表部汇聚并形成暂时性地下水。滑坡体下伏的硅质板岩表面富集的网状钙质胶结物表明了雨水沿节理裂隙及溶蚀通道入渗的强烈程度(图2)。在软弱夹层表



图1 滑坡西侧壁发育的溶蚀通道

Fig.1 Karst dissolution channel in the west side wall



图2 硅质板岩表部富集的网状钙质胶结物

Fig.2 Reticulate calcareous cement on the surface of siliceous slate

面汇聚形成的地下水侵蚀并降低软弱夹层的强度,导致斜坡沿软弱夹层的顺层蠕动滑移与软弱夹层内的层间剪切错动。

3 破坏模式与失稳机理

3.1 斜坡结构特征

山阳滑坡山体受单斜构造影响,上下地层倒转,并呈平行不整合接触,岩层向北陡倾并与斜坡前部临空方向斜交,形成典型的陡倾层状斜向岩质斜坡(图3)。受下伏平行不整合软弱结构面分离作用,山体形成层状板裂结构;同时,由于下伏软弱结构面隐伏于坡脚地表之下,成为受控于下伏软弱夹层的“隐伏型”视向顺层坡。

3.2 滑坡结构面组合特征

如图4所示,滑坡体主要发育3组结构面并受

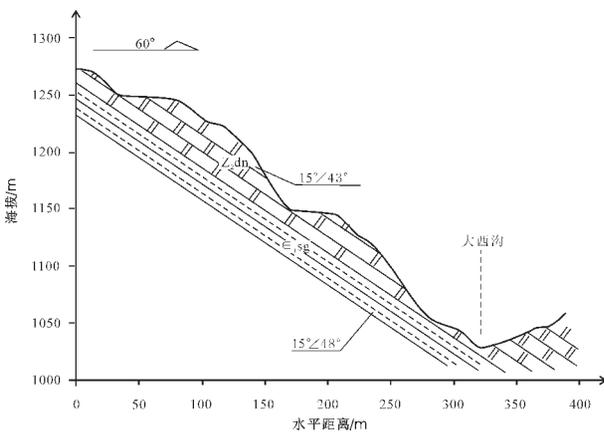


图3 山阳滑坡滑前斜坡结构

Fig.3 Original slope structure of Shanyang rockslide

其控制,平行不整合面T0构成了滑坡的天然滑动面与右翼分界面,西侧溶蚀结构面T1则控制了滑坡体的西侧分界面,反坡陡倾卸荷结构面T2则横向切割滑坡体。T0、T1交割线与滑坡滑向比较接近,是滑坡的控滑结构面;T0、T2交割线与滑坡滑向接近垂直方向,而T1、T2交割线则与滑坡滑向几乎相反,两者起到切割分离坡体作用。

3.3 滑床与剪出口特征

滑床整体裸露,表部未见有明显滑动擦痕,但

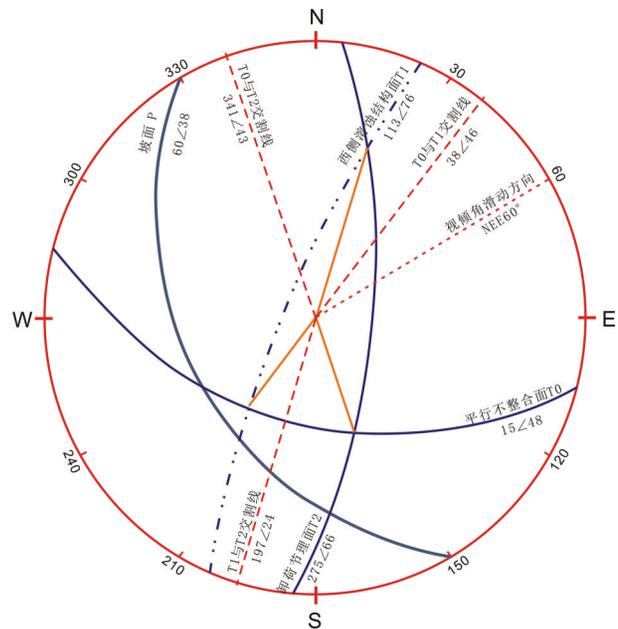


图4 滑动山体三组结构面赤平投影

Fig.4 Three groups of joints stereographic projection in the slide rockmass



图5 滑床表部的反坡阶步现象
Fig.5 Antistep on surface of sliding bed



图6 滑床表面残留的泥化物
Fig.6 Residual swelled mudstone on sliding bed

反坡阶步现象明显(图5),反映出在自重力与地下水作用下,软弱夹层强烈的层间剪切错动作用,并造成软弱夹层的泥化(图6),从而导致山体沿软弱夹层形成长期的顺层蠕动滑移过程。

滑坡剪出口因被滑体掩埋未出露,但其变形破坏特征显著,其右部残留岩层弯曲-隆起变形明显(图7),左部张拉性破坏特征明显(图8),反映出滑坡的溃屈破坏特征;与中后部视向滑移产生的平整剪切擦痕形成鲜明对比,反映了滑坡的视向滑移特征。

3.4 滑坡破坏模式

根据山阳滑坡“隐伏型”视向顺层坡的斜坡结构特征、三组结构面组合特征、剪出口的弯曲隆起变形与拉张破坏特征,山阳滑坡体结构分为两部



图7 剪出口右翼岩体弯曲隆起变形显著
Fig.7 Outstanding bending deformation of rockmass on the right of rockslide outlet

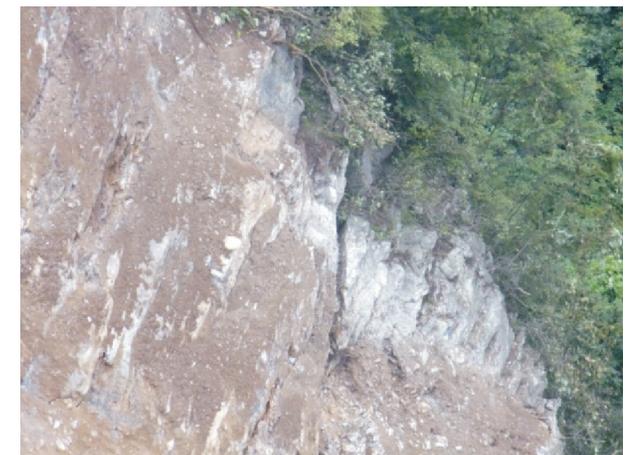


图8 剪出口左翼岩体张拉破坏特征显著
Fig.8 Outstanding tension deformation of rockmass on the left of rockslide outlet

分:滑坡体中后部沿下伏平行不整合软弱结构面顺层蠕动滑移形成下滑驱动块体(图9),因顺层滑移受阻形成视向顺层滑移;滑坡体前部因阻挡山体下滑而形成阻滑块体,并在下滑驱动块体挤压下产生溃屈破坏。据此可判定山阳滑坡的破坏模式为视向滑移-溃屈破坏模式。

3.5 滑坡视向滑移-溃屈破坏机理

山阳滑坡所处的山体呈陡倾层状斜向结构,岩体因平行不整合面的分离作用而板裂化形成板裂结构,地形呈上陡下缓特征,岩性组合结构为上硬下软,大大降低了山体斜坡的稳定性。

在地下水与山体自重力的双重作用下,软弱夹层内产生层间剪切错动作用并逐渐泥化,滑坡中

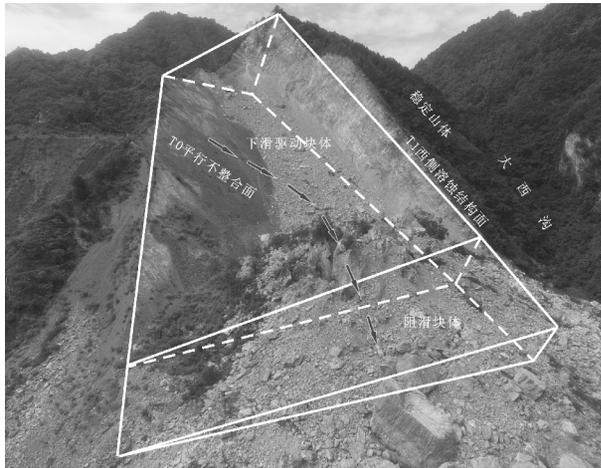


图9 滑坡结构

Fig.9 Structure of sliding rockmass

后部山体沿真倾角方向(NNE15°)经历了长期的顺层蠕动滑移过程,并形成下滑驱动块体。

下滑驱动块体顺层滑移受阻,产生平面旋转滑移,被迫沿视倾向方向(NEE60°)滑动,形成视向顺层滑移,并挤压滑坡前部起支撑与阻滑作用的阻滑块体。伴随溶蚀作用,溶蚀结构面侧向摩阻力不断降低,导致阻滑块体产生弯曲变形与溃屈破坏,并造成滑动面的贯通,促使滑坡整体沿西侧溶蚀结构面产生脆性剪断破坏,并形成整体视向滑移-溃屈破坏。

4 模型建立与力学分析

4.1 模型的建立

И.А. Турчанинов(И.А. 屠尔昌宁诺夫,1981)借助梁理论对岩体进行力学作用过程分析。孙广忠等(1985,1988)采用梁板理论建立了层状板裂结构岩体溃屈破坏力学模型。后期,层状岩质边坡弯曲-溃屈破坏方面的力学模型建立与分析是以孙广忠的层状斜坡溃屈破坏力学模型演化发展而来。山阳滑坡为陡倾层状斜向岩质斜坡,由于岩层的斜向结构,滑动山体在顺层滑移受阻、产生平面旋转滑移并形成视向滑移的过程中,受到山体侧向摩阻力的阻滑作用。由于山阳滑坡在视倾向滑动方向呈视向顺层滑动,为了研究陡倾层状斜向岩质斜坡的视向滑移-溃屈破坏特征,假定滑坡的底滑面对滑坡整体的控制作用相同,山体斜坡长度与厚度呈线性函数关系,将山阳滑坡由顺层真倾向蠕动滑移

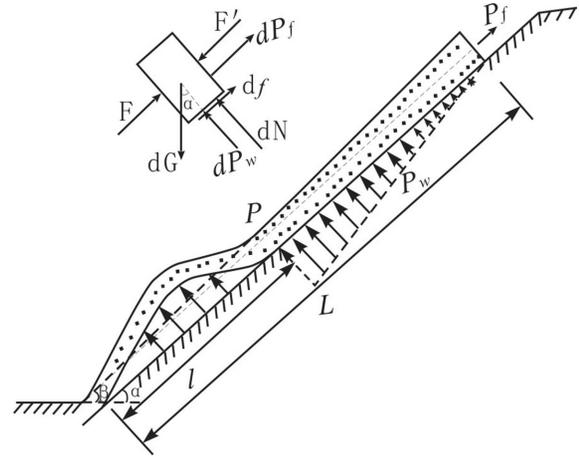


图10 力学模型与微元受力分析

Fig.10 Mechanical model and force diagram of element

转为视向滑动的三维问题简化为二维平面问题,即在顺倾层状岩质边坡溃屈破坏的力学模型的基础上考虑地下水静水压力的同时,考虑岩层厚度变化影响,并将岩层厚度变化简化为线性问题进行分析(图10)。

4.2 力学分析

孙广忠等(1985)对板裂岩体边坡进行力学分析时,考虑了边坡的自重与地下水,同时,不考虑动水压力,只考虑静水压力及软化作用,并假定边坡产生溃屈破坏前边坡内的地下水由上至下是连通的。山阳滑坡内的地下水主要来源于大气降水,通过节理裂隙及岩溶通道入渗并赋存于平行不整合面之上,属于孔隙裂隙型潜水,对斜坡主要产生静水压力及软化侵蚀作用。在自重与地下水的双重作用下,炭质泥岩与硅质板岩层内产生层间错动,山体沿真倾角方向经历了长期的顺层蠕动滑移过程,滑动面沿平行不整合面逐步形成,裸露的滑床表面呈光滑镜面状,滑动擦痕并不明显,说明滑坡滑动面在滑坡产生视向整体滑动前已经滑脱、贯通,即滑坡产生溃屈破坏前的滑动面上的地下水是上下连通的。因此,山阳滑坡的滑动特征是符合孙广忠等人在对板裂岩体边坡进行力学分析时所作的假定条件,不同的则是山阳滑坡需要考虑侧向摩阻力与岩体厚度变化的作用因素。据此,山阳滑坡的溃屈破坏力学分析是基于孙广忠等人对板裂岩体边坡在自重与地下水作用下进行的力学分析基础上,考虑侧向摩阻力与岩体厚度变化的作用因

素,受力作用如图10所示。

溃屈破坏前斜坡体内的地下水静水压力 P_w 为:

$$P_w = \gamma_w h = \gamma_w L \sin \alpha, \quad (1)$$

其中, α —板裂面即平行不整合面的视倾角, γ_w —水的容重, L —斜坡视向滑动方向的长度。

设岩层的容重为 γ_r , 坡脚岩层厚度为 A , 则溃屈段 l 上部斜坡的下滑力 F_T 为:

$$F_T = \int_l^L \gamma_r [A + x \sin(\beta - \alpha)] \sin \alpha dx, \quad (2)$$

其中, l —溃屈段长度, β —斜坡视倾向坡度。

抗滑力 $F_{抗}$ 则由两部分组成, 一部分为斜坡底滑面产生的抗滑力 $f_{底}$, 另一部分则为侧向摩阻力 P_f , 底滑面上的抗滑力则为:

$$f_{底} = \int_l^L \{ \gamma_r [A + x \sin(\beta - \alpha)] \cos \alpha \tan \varphi_w + C_w \} dx - \frac{1}{2} \gamma_w (L-l)^2 \sin \alpha \tan \varphi_w \quad (3)$$

其中, φ_w —滑床炭质泥岩饱和状态下的内摩擦角, C_w —滑床炭质泥岩饱和状态下的内聚力。

通过真倾向滑动方向微单元的受力分析(图11), 可得真倾角方向下滑力 P_1 为:

$$P_1 = \int_l^L \gamma_r [A + x \sin(\beta - \alpha)] \sin \theta dx, \quad (4)$$

其中, θ —板裂面即平行不整合面的真倾角。

在式(4)的基础上, 通过产生侧摩阻力的滑坡左翼侧壁的视向滑动方向受力分析(图12), 可得到侧摩阻力 P_f 为:

$$P_f = \int_l^L \{ \gamma_r [A + x \sin(\beta - \alpha)] \sin[\theta \sin \delta \tan \varphi_r + C_r] \} dx \quad (5)$$

其中, δ —斜坡滑动的真倾向与视倾向夹角, φ_r —产生侧摩阻力的滑坡西侧壁白云岩内摩擦角, C_r —白云岩内聚力。

根据式(2)、(3)、(5), 可得溃屈段 l 以上斜坡

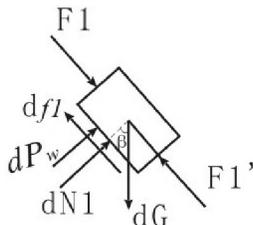


图11 真倾角方向边坡微元受力分析
Fig.11 Force diagram of element of slope in the true angle direction

($L-l$)段沿板裂面产生的的向下推力 P 为:

$$P = \int_l^L \gamma_r [A + x \sin(\beta - \alpha)] \sin \alpha dx - \int_l^L \{ \gamma_r [A + x \sin(\beta - \alpha)] \cos \alpha \tan \varphi_w + C_w \} dx + \int_l^L \gamma_w x \sin \alpha \tan \varphi_w dx - \int_l^L \{ \gamma_r [A + x \sin(\beta - \alpha)] \sin \theta \sin \delta \tan \varphi_r + C_r \} dx \quad (6)$$

根据孙广忠等(1985, 1988)对板裂岩体边坡的力学作用分析, 溃屈段长度为 l 的破坏极限荷载 P_{cr} 为:

$$P_{cr} = \frac{4\pi^2 EI}{l^2} - \frac{q \sin \alpha}{2} l \quad (7)$$

将式(7)中单位宽度斜坡的重力 q 修改为对斜坡长度的函数带入, 得式(8)

$$P_{cr} = \frac{4\pi^2 EI}{l^2} - \frac{\sin \alpha}{2} l \int_l^L \gamma_r [A + x \sin(\beta - \alpha)] dx \quad (8)$$

其中, E —斜坡岩体弹性模量, l —斜坡岩体截面矩。

令 $P = P_{cr}$, 并记 $\frac{l}{L} = \Delta$, 则: $l = L \cdot \Delta$, $L - l = (1 - \Delta)L$, 则得: $B_1 \Delta^5 + B_2 \Delta^4 + B_3 \Delta^3 + B_4 \Delta^2 = Z$ (9)

其中 $Z = 4 \pi^2 EI$, $B_1 = -\frac{1}{2} LC_1$, $B_2 = C_2 + C_3 - C_1 - C_4 + C_5$, $B_3 = (1 - \frac{2}{L})C_4 + \frac{LC_1}{2} - 2C_5 + C_6 + \frac{2AC_3}{(L \sin(\beta - \alpha))} + C_7$, $B_4 = \frac{2C_4}{L} + C_1 - C_6 - 2C_2 + C_5 - \frac{2AC_3}{(L \sin(\beta - \alpha))} - C_7$,

$$C_1 = \frac{\gamma_r L^4 \sin \alpha \sin(\beta - \alpha)}{2},$$

$$C_2 = \frac{\gamma_r L^4 \cos \alpha \sin(\beta - \alpha) \tan \varphi_w}{2},$$

$$C_3 = \frac{\gamma_r L^4 \cos \alpha \sin(\beta - \alpha) \sin \theta \sin \delta \tan \varphi_w}{2},$$

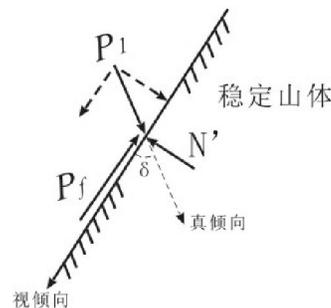


图12 视倾角方向边坡西侧壁受力分析
Fig.12 Force diagram of element of the west side slope in the apparent dip angle direction

$$C_4 = \frac{\gamma_r AL^4 \sin \alpha}{2}, C_5 = \frac{\gamma_r AL^4 \sin \alpha \tan \varphi_w}{2},$$

$$C_6 = \frac{\gamma_r AL^3 \cos \alpha \tan \varphi_w}{2}, C_7 = (C_w + C_r)L^3$$

式(9)即为陡倾层状斜向岩层斜坡溃屈段长度条件方程。通过式(9)可求得 Δ ,进而求得溃屈段长度 l ,为防御陡倾层状斜向岩层斜坡产生溃屈破坏提供依据。

4.3 实例验算

以陕西山阳滑坡为例验证溃屈段长度条件方程。山阳滑坡发生于2015年8月12日00:30,滑坡体沿大西沟与烟家沟沟内呈斜长喇叭状分布,滑坡平面面积约 $7 \times 10^4 \text{ m}^2$,滑坡总体积约 $168 \times 10^4 \text{ m}^3$,是一大型陡倾层状斜向岩层滑坡。根据现场调查分析,该滑坡为一典型的视向顺层滑移-溃屈破坏模式的岩质滑坡。

该滑坡实测的岩体力学参数为:白云岩弹性模量 $E=59 \times 10^3 \text{ MPa}$,白云岩天然内摩擦角 $\varphi_r=48.53^\circ$,白云岩天然内聚力 $C_r=12.85 \text{ MPa}$,白云岩容重 $\gamma_r=2830 \text{ kg/m}^3$,水的容重为 $\gamma_w=1000 \text{ kg/m}^3$,饱和炭质泥岩内摩擦角 $\varphi_w=24.23^\circ$,饱和炭质泥岩内聚力 $C_w=75 \text{ kPa}$,斜坡距剪出口前部沟底高差250 m,坡脚板裂面上部岩层厚度约25 m,板裂面真倾角 $\theta=48^\circ$,板裂面视倾角 $\alpha=38.12^\circ$,斜坡视向坡度 $\beta=38^\circ$,真倾角与视倾角夹角 $\delta=45^\circ$ 。

将以上参数代入式(9),可得 $\Delta=0.0936$,则得到山阳滑坡溃屈段长度 $l=38.01 \text{ m}$ 。通过山阳滑坡滑动前后地形推测的剪出口位置高出坡脚约22 m,利用坡度可求得剪出口位置距坡脚沿斜坡坡面长度约35.7 m,与溃屈段长度条件方程求得的溃屈段长度接近一致。

5 结 论

(1)山阳滑坡为陡倾层状斜向岩质斜坡,为典型的视向滑移-溃屈破坏模式。

(2)山阳滑坡受下伏软弱结构面分离形成层状板裂结构,同时,滑体受两组节理结构面的切割形成块裂结构,既具有层状板裂结构特征,又具有层状块裂结构特征。

(3)以孙广忠的梁板理论、层状板裂结构岩体弯曲-溃屈破坏的力学模型为基础,建立了基于斜坡自重、地下水静水压力、侧向摩阻力以及岩体厚

度变化作用下的陡倾层状斜向岩质斜坡视向滑移-溃屈破坏力学模型,建立了溃屈段长度条件方程,并以山阳滑坡为例验证了条件方程的正确性。

致谢:在本文的撰写过程中,得到了殷跃平研究员的指导与建议,特表示衷心的感谢!

References

- Cavers D S. 1981.Simple methods to analyze buckling of rock slopes[J]. *Rock Mechanics*, 14(2):87-104.
- Du Yingqiong, Ren Guangming, Du Fei.2014. Physical simulation of consequent slope buckling deformation and its influencing factor sensitivity analysis[J]. *Journal of Sichuan University of Science & Engineering(Natural Science Edition)*, 27(6):68-71(in Chinese with English abstract).
- Feng Zhen, Yin Yueping, Li Bin.2012. Mechanism analysis of apparent dip landslide of Jiweishan in Wulong, Chongqing[J]. *Rock and Soil Mechanics*: 33(9):2704-2712(in Chinese with English abstract).
- Goodman R E, Bray J W. 1976.Toppling of rock slopes[C]// *Proceedings of ASCE Specialty Conference, Rock Engineering for Foundations and Slopes*. Boulder: 201-234.
- и.А. Турчанинов. 1981. *Rock Mechanics Foundation of Mine*[M]. Liu Tingcheng et al.(translator). Beijing:China Coal Industry Publishing House(in Chinese).
- Kutte H K, Müller L. 1981. *Rock mechanics*[M]. Li Shiping, et al. (translator). Beijing: China Coal Industry Publishing House(in Chinese).
- Li Bin, Wang Guozhang, Feng Zhen, Wang Wenpei. 2015. Limit equilibrium and stability analysis of steep stratified rock slope[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 37(5):839-846(in Chinese with English abstract).
- Li Shusen, Ren Guangming, Zuo Sansheng. 1995. Mechanical analysis of instability mechanism of consequent slope in bedded rockmass[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 6(2):24-29((in Chinese with English abstract).
- Li Shusen, Zhu Donglin, Fu Wenxi. 2000. Association analysis of sliding plane feature of outburst landslide and strength parameters of sliding zone soil[J]. *Journal of Mountain Science*, 18(supp.):34-38(in Chinese with English abstract).
- Liu Chuazheng, Shi Tao, Zhang Mingxia. 1995.On the mechanism of deforming—cracking on the segment of cracks T8-T12 of Lianzi cliff dangerous rock body[J]. *Journal of Engineering Geology*, 3(2):29-41(in Chinese with English abstract).
- Liu Chunxiang, Zhu Yuanwu. 2014.Buckling failure mode of inclination- paralleled rock slopes[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 25(1):82-86(in Chinese with English abstract).
- Liu Yunpeng. 2017.Slip- bending model instability mechanism and calculation methods comparison of slab- rent structure slope[J].

- Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 13(Suppl.): 943-954(in Chinese with English abstract).
- Ni Guorong, Ye Meixin. 1987. Mechanical analysis of rock mass with the "plate fracture" structure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 9(1):99-108(in Chinese with English abstract).
- Pan Ruilin, Li Bingsheng, Jiang Jueguang. 1990. Research on the buckling failure of the slab-rent structure rock bedding slopes[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, (3):82-88(in Chinese with English abstract).
- Ren Guangming, Li Shusen, Nie Dexin. 1998. The physical simulation and mechanical analysis on landslide's formation mechanism on consequent slope[J]. Mountain Research, 16(3):182-187(in Chinese with English abstract).
- Ren Guangming, Xia Min, Li Guo. 2009. Study on toppling deformation and failure characteristics of steep bedding rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 28(Suppl.1):3193-3200 (in Chinese with English abstract).
- Sun Guangzhong. 1988. Structure mechanics of rock mass[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Sun Guangzhong, Zhang Wenbin. 1985. A commonly-sighted rock mass structure—slab-rent structure and its mechanical model[J]. Chinese Journal of Geology, (3):275-282(in Chinese with English abstract).
- Tang Minggao, Ma Xu, Zhang Tingting. 2016. Early recognition and mechanism of creep-buckling of bedding slope[J]. Journal of Engineering Geology, 24(3):442-450 (in Chinese with English abstract).
- Yin Yueping. 2010. Mechanism of apparent dip slide of inclined bedding rockslide—a case study of Jiweishan rockslide in Wulong, hongqing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 19(2): 217-226(in Chinese with English abstract).
- Zhu Hanyu, Ma Meiling, Shang Yuequan. 2004. Analysis of buckling failure of consequent rock slope[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 38(9):1144-1149(in Chinese with English abstract).
- 素敏感性分析[J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 27(6):68-71.
- 冯振, 殷跃平, 李滨. 2012. 重庆武隆鸡尾山滑坡视向滑动机制分析[J]. 岩土力学, 33(9):2704-2712.
- И.А. 屠尔昌宁诺夫. 1981. 矿山岩石力学基础[M]. 刘听成等译. 北京: 煤炭工业出版社.
- Kutte H K, 米勒 L(主编). 1981. 岩石力学[M]. 李世平等译. 北京: 煤炭工业出版社.
- 李滨, 王国章, 冯振, 王文沛. 2015. 陡倾层状岩质斜坡极限平衡稳定分析[J]. 岩土工程学报, 37(5):839-846.
- 李树森, 任光明, 左三胜. 1995. 层状结构岩体顺层斜坡失稳机理的力学分析[J]. 地质灾害与环境保护, 6(2):24-29.
- 李树森, 朱冬林, 符文熹. 1999. 溃屈型滑坡滑动面特征及滑带土强度参数的关联性分析[J]. 山地学报, 10(1):39-41.
- 刘春香, 朱元武. 2014. 顺倾向层状岩质边坡溃屈破坏分析[J]. 地质灾害与环境保护, 25(1):82-86.
- 刘传正, 施韬, 张明霞. 1995. 链子崖危岩体 T8-T12 缝段开裂变形机制的研究[J]. 工程地质学报, 3(2):29-41.
- 刘云鹏. 2017. 板裂结构边坡滑移-弯曲失稳机制与计算方法对比[J]. 地下空间与工程学报, 13(增刊2):943-954.
- 倪国荣, 叶梅新. 1987. "板裂"结构岩体的力学分析法[J]. 岩土工程学报, 9(1):99-108.
- 潘瑞林, 李秉生, 蒋爵光. 1990. 板裂结构岩体顺层边坡溃屈破坏的研究[J]. 西南交通大学学报, (3):82-88.
- 汤明高, 马旭, 张婷婷. 2016. 顺层斜坡溃屈机制与早期识别研究[J]. 工程地质学报, 24(3):442-450.
- 孙广忠. 1988. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社.
- 孙广忠, 张文彬. 1985. 一种常见的岩体结构——板裂结构及其力学模型[J]. 地质科学, (3):275-282.
- 任光明, 李树森, 聂德新. 1998. 顺层坡滑坡形成机制的物理模拟及力学分析[J]. 山地研究, 16(3):182-187.
- 任光明, 夏敏, 李果. 2009. 陡倾顺层岩质斜坡倾倒变形破坏特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 28(增1):3193-3200.
- 殷跃平. 2010. 斜倾厚层山体滑坡视向滑动机制研究——以重庆武隆鸡尾山滑坡为例[J]. 岩石力学与工程学报, 19(2): 217-226.
- 朱哈迓, 马美玲, 尚岳全. 2004. 顺倾向层状岩质边坡溃屈破坏分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 38(9):1144-1149.

附中文参考文献

杜应琼, 任光明, 杜飞. 2014. 顺层斜坡溃屈变形物理模拟及影响因