

块裂层状岩质边坡稳定性极限分析上限解

张子新^{1,2}, 徐营^{1,2}, 黄昕^{1,2}

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 采用室内模型试验仿真构造了顺层和反倾斜块裂层状岩质边坡, 分别定性确定了可能出现的两种类型边坡的破坏模式, 并根据实际工程中可能出现的边坡破坏特征, 进一步拓展了这两种类型边坡的破坏模式, 使其更具有普遍性. 然后根据极限分析上限法基本原理, 对室内模型试验结果进行分析求解, 验证了极限分析上限法在该类型边坡稳定性分析中的适用性, 并使极限分析上限法演绎到普遍破坏模式中. 这进一步拓展了极限分析法的应用范围, 为块裂层状岩质边坡稳定性分析提供了一种有效的分析手段.

关键词: 块裂层状岩体; 顺层边坡; 反倾斜边坡; 破坏模式; 极限分析

中图分类号: P 642.22

文献标识码: A

Upper Bound Solution of Limit Analysis for Stability of Block-layered Rock Slope

ZHANG Zixin^{1,2}, XU Ying^{1,2}, HUANG Xin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical & Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The bedding and anti-dip block-layered rock slopes are modeled in detail by laboratory tests and the possible failure modes of two typical block-layered rock slopes are qualitatively determined. And the failure modes are extended to a general state based on the possible failure characteristics in practical engineering. In addition, the upper bound limit analysis method is adopted to analyze the results of the laboratory model tests and proves to be able to perfectly analyze the stability of a block-layered rock slope. A general failure mode of a block-layered rock slope is deducted, which develops the method to an effective approach for stability analysis of a block-layered rock slope.

Key words: block-layered rock mass; bedding slope; anti-dip slope; failure mode; limit analysis method

自然界中层状岩质边坡工程十分常见, 其稳定性问题复杂而突出. 以前由于对层状岩质边坡特性缺乏深入了解而造成重大事故的工程屡见不鲜, 如意大利瓦依昂水库近坝库段沿层面发生的巨型滑坡^[1]. 我国小浪底工程洞群进水口层状岩质边坡也出现了滑塌破坏现象^[2]. 因此, 许多学者对层状岩质边坡的变形特征与破坏过程进行大量调研和分析, 得到层状岩质边坡的破坏模式(倾倒塌塌、顺层滑动和滑动弯曲), 提出了稳定性分析模型, 并在模型试验和工程实践中得到了很好的检验^[3-7]. 但是, 在实际工程中, 层状岩体常被大量纵横交错的节理组所切割, 致使岩体被分裂成许多大小不一的岩块, 构成块裂层状岩体系统, 具有独特的“砌块式”结构特征. 相应地, 对比层状岩质边坡, 块裂层状岩质边坡的破坏机理和破坏模式具有较大的差别, 本文对其进行了更为深入的研究.

在边坡稳定分析方法中, 极限分析法是一种常用的方法. 1975年, Chen W F 首次在土力学的边坡稳定性评价领域中引入了极限分析方法, 为土质边坡稳定性分析方法做出了开创性的工作^[8]. 随后, 众多学者在他的研究基础上做了更多有意义的研究工作^[9-11], 尤其将极限分析法应用到岩体稳定性分析中^[12-15]. 本文以块裂层状岩质边坡为研究对象, 采用室内模型试验和推理演绎手段, 真实地确定了顺层和反倾斜块裂层状岩质边坡的破坏模式, 并从极限分析上限法出发, 验证极限分析上限法在这两类边坡稳定性分析中的适用性, 并拓展到实际边坡工

收稿日期: 2009-03-18

基金项目: 上海市曙光计划资助项目(2006); 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金资助项目(2010); 上海市重点学科建设基金资助项目(B308)

作者简介: 张子新(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向隧道及地下工程、非连续岩体力学.

E-mail: zxzhang@tongji.edu.cn

程中,从而为边坡稳定性分析提供一种有效的分析手段.

1 块裂层状岩质边坡破坏模式

1.1 基本假定

岩体是一个非常复杂的地质体,经历了漫长的地质变动,呈现不连续性、不均匀性和各向异性,并赋存有分布复杂的地下水、地温等.为了有的放矢地分析问题,并结合极限分析基本原理,对研究对象做以下假定^[16-17]:

(1) 研究对象假定为平面二维问题,不考虑侧向边界条件.

(2) 近似地认为岩质边坡滑裂面是塑性区.

(3) 岩块假定为理想刚性体.

1.2 边坡破坏模式

构造合适的破坏模式是利用极限分析上限法计算边坡稳定性的关键.通常,通过工程实例、模型试验或数值计算等手段来构造破坏模式.本文通过室内模型试验来分析顺层和反倾斜块裂层状岩质边坡的破坏模式.

1.2.1 相似材料

相似材料选取原则是尽可能地相似于天然脆性岩石.由于金属铝的材料性能(见表1)和岩石的性能差别不大,并且采用铝块模拟硬岩块体具有易操作性、可重复性及结果的易处理性,同时又不失实验结果真实性等优点,因此铝块被选作相似材料.为了构造顺层和反倾斜块裂层状岩质边坡,制作铝块的形状及尺寸如图1所示.

1.2.2 试验平台

室内模型试验所用的试验平台为自主研发的二维模型架,如图2所示.其主体由10 mm厚的不锈钢板焊接而成,以确保整个相似试验模型放置在模型架上时,该模型架不发生变形.此外,为了保持模型的稳定性,在模型架后侧镶嵌12 mm厚的钢化玻璃.由于岩块假定为刚体,边界条件对模拟结果影响不大.试验过程中,采用高速摄影机来连续拍摄两种类型边坡的破坏过程,依次确定其破坏模式.

表1 铝的物理参数

Tab.1 Physical parameters of aluminum

容重/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	摩擦角/ $^\circ$	杨氏模量/MPa
26.4	0.2	22	640

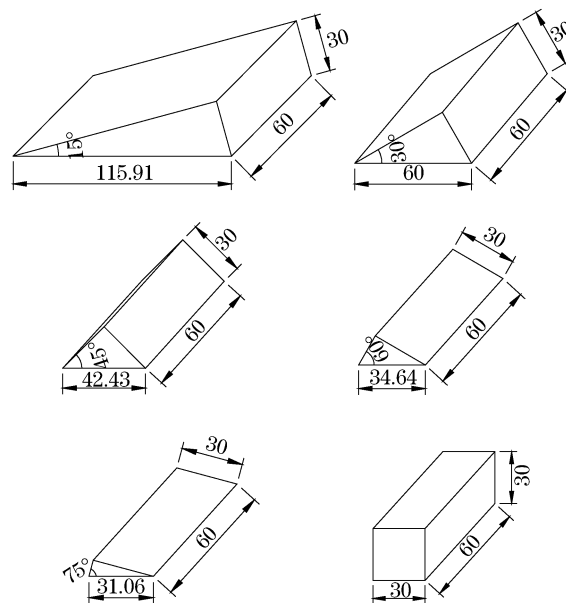


图1 铝块形状及尺寸(单位:mm)

Fig.1 Dimension of aluminum blocks(Unit:mm)



图2 模型架

Fig.2 Model setup

1.2.3 顺层块裂层状岩质边坡破坏模式

(1) 室内模型试验结果

按图3a、图4a和图5a所示,布置铝块,分别构造具有 15° 、 30° 和 45° 层理倾角的顺层边坡.手动分层拿去开挖线外铝块,来模拟边坡的开挖.边坡的破坏模式分别如图3b、图4b和图5b所示.

对于 15° 层理倾角的顺层边坡,由于层理倾角角度小于铝块间的摩擦角,开挖时,边坡岩块不发生位移.而对于 30° 和 45° 层理倾角的顺层边坡,由于层理倾角角度已经超过了铝块间的摩擦角,开挖时,边坡岩块沿层理面整体滑动,产生较大位移.因此,对于顺层块裂层状岩质边坡,其破坏模式为岩体沿某一层理面(底滑面)发生整体性滑移.

(2) 顺层边坡的普遍破坏模式

由于在室内模型试验中,铝块间不存在拉应力,所以破坏模式为底滑面上部岩体沿某一层理面发生整体性滑移.但是,在实际工程中,由于岩层被切断,

其破坏模式可能为沿岩层中一些节理面拉开,即有一个失稳破坏的极限长度,如图6所示.所有岩层失稳破坏部分的后缘拉裂边界组合在一起,就构成了顺层块裂层状岩质边坡的失稳破坏范围内边界,失稳岩层的最下面层理面则构成失稳破坏范围的底边界^[18-19].而对于室内模型试验结果,岩层的极限长度是整个岩层的长度,试验结果为普遍破坏模式下的一种特殊情况.

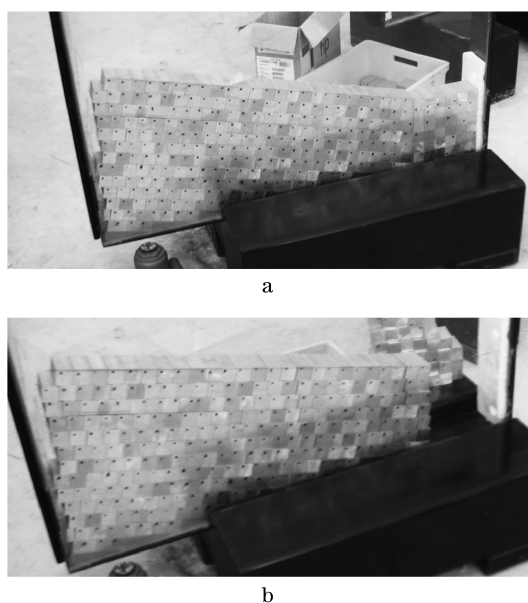


图3 15°层理倾角顺层边坡布置和破坏模式
Fig.3 Configuration and failure mode of a bedding slope with 15° dip

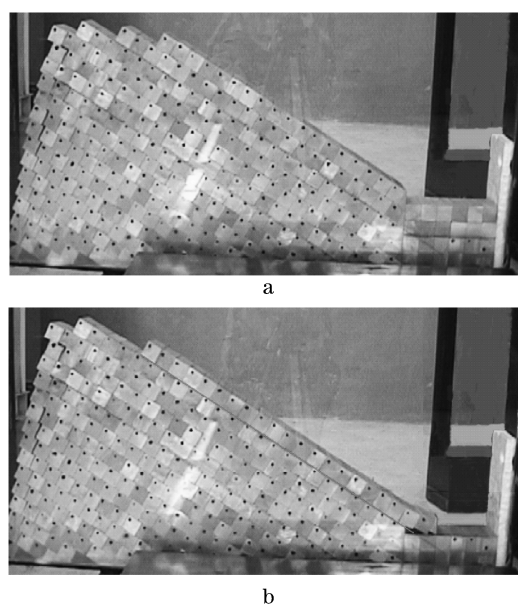


图4 30°层理倾角顺层边坡布置和破坏模式
Fig.4 Configuration and failure mode of a bedding slope with 30° dip

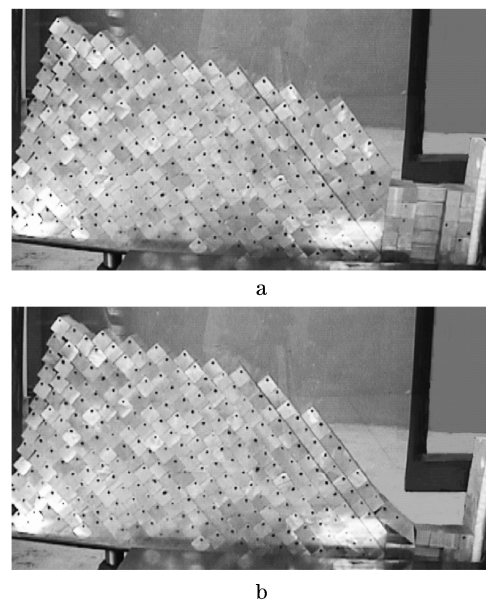


图5 45°层理倾角顺层边坡布置和破坏模式
Fig.5 Configuration and failure mode of a bedding slope with 45° dip

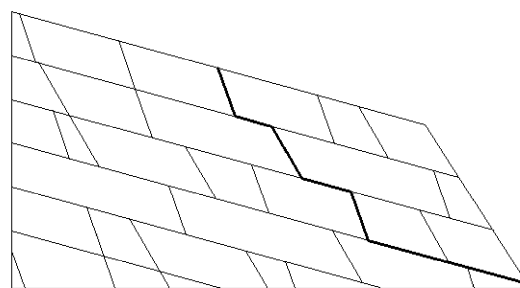


图6 顺层块裂层状岩质边坡普遍破坏模式
Fig.6 General failure mode of a bedding block-layered rock slope

1.2.4 反倾斜块裂层状岩质边坡破坏模式

(1) 室内模型试验结果

按图7a和图8a所示布置铅块,分别构造具有135°和150°层理倾角的反倾斜边坡.对于前者,开挖后破坏模式如图7b所示,部分块体沿着一台阶面发生滑动,台阶面是有层理面和节理面交错连接而成.其中,层理面为拉裂面,节理面为底滑面.而对于150°层理倾角的反倾斜边坡,自然状态下,岩块不发生位移.人工将其抬到使其层理倾角近乎水平时,才发生失稳破坏,破坏模式也是沿某一台阶面发生滑动,如图8b所示.因此,对于反倾斜块裂层状岩质边坡,破坏模式为岩体沿某一台阶面发生整体性滑移.

(2) 反倾斜边坡的普通破坏模式

在模型试验中,由于所构造的节理面垂直于层

理面,并且只有一组节理面,所以破坏模式为岩体沿某一比较规则的台阶面滑动.但是在实际工程中,绝大部分岩体存在多组节理面,滑裂面极其不规则,其各底滑面具有不同产状,破坏模式如图9所示.

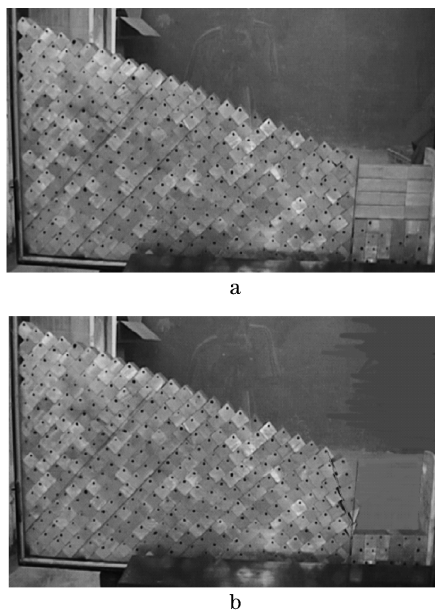


图7 135°层理倾角反倾斜边坡布置和破坏模式
Fig.7 Configuration and failure mode of an anti-dip slope with 135° dip

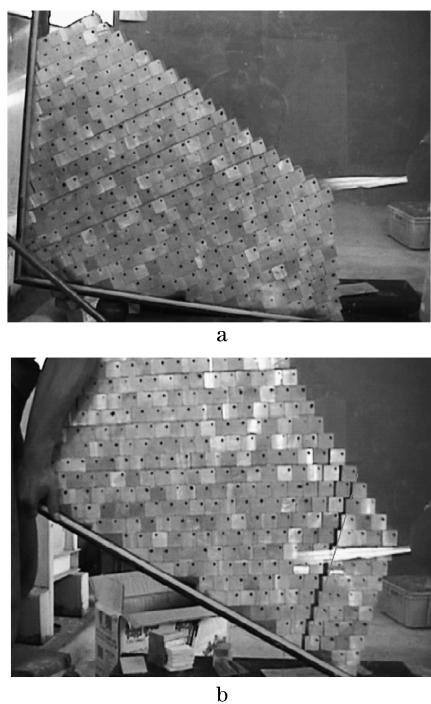


图8 150°层理倾角反倾斜边坡布置和破坏模式
Fig.8 Configuration and failure mode of an anti-dip slope with 150° dip

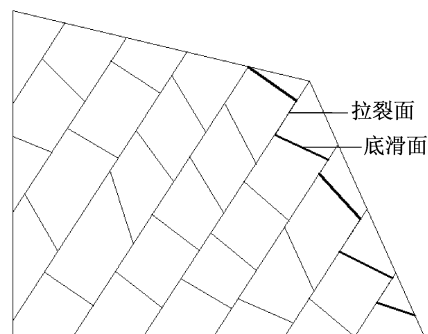


图9 反倾斜块裂层状岩质边坡普遍破坏模式
Fig.9 General failure mode of an anti-dip block-layered rock slope

2 边坡稳定性极限分析上限解

2.1 极限分析上限法基本原理^[8]

极限分析上限法是从构筑一个处于塑性区 Ω^* 内的机动许可应变场 ϵ_{ij}^* 和滑裂面 Γ^* 上的协调速度场 V^* 出发,找到满足力的平衡、变形协调与本构关系的外荷载 T^* ,且 T^* 一定比相应真实塑性区 Ω 的真实荷载 T 大, T^* 可通过虚功率原理求得,即

$$\int_{\Omega^*} \sigma_{ij}^* \epsilon_{ij}^* dV + \int_{\Gamma^*} dD_{\Omega}^* = FV^* + T^* V^* \quad (1)$$

式中: V^* 是外荷载增量引起的塑性应变速度; F 是塑性区的体积力;式中左侧两项分别是产生于破坏体 Ω^* 内和沿滑裂面 Γ^* 上的内部耗散能.

2.2 顺层边坡极限分析上限解

(1) 模型试验结果分析

由基本假定知,岩块被定义为刚体,因此在块体内部将不存在应力和应变,所以块体内部就没有内能的耗散,反映在虚功率方程(1)中,方程左边第一项值为零.而内能的耗散只发生在底滑面上,即层理面上,而拉裂面上没有内能耗散.

针对顺层块裂层状岩质边坡室内模型试验结果所表现出的破坏模式,设极限分析上限法的计算模型如图10所示.

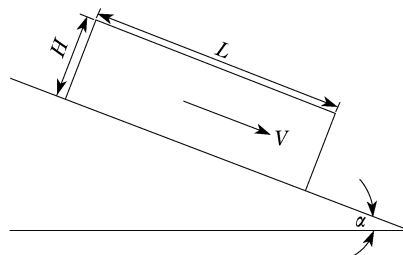


图10 顺层边坡极限分析上限法计算模型
Fig.10 Calculation model of upper bound limit analysis for a bedding slope

图中： α 为层理倾角； L 和 H 为失稳破坏范围的长度和高度； V 为岩体滑移速度。根据极限分析上限法基本原理，确定失稳破坏岩体重力所做的功率是速度的垂直分量与失稳破坏岩体重力的乘积

$$W_{\text{外}} = \gamma LHV \sin \alpha \quad (2)$$

而沿底滑面的能量耗损率为

$$D_{\text{内}} = \gamma LH \cos \alpha \tan \varphi V \quad (3)$$

由于在实际工程中，分析对象往往是一个具有一定安全储备的结构，分析这样的稳定结构往往要解决的问题是对已处于稳定的一个结构，需要多大的干扰因素方可将其过渡到极限状态。这里以稳定系数 k 为评价边坡的稳定性。

$$\begin{cases} k > 1 & \text{稳定状态} \\ k = 1 & \text{临界状态} \\ k < 1 & \text{失稳状态} \end{cases} \quad (4)$$

将稳定系数(超载系数) k 隐含于块体所受的外荷载中，使其达到极限荷载，从而使边坡处于极限状态，即外功率与能量耗损率相等，则

$$k\gamma LHV \sin \alpha = \gamma LH \cos \alpha \tan \varphi V \quad (5)$$

解得

$$k = \frac{\tan \varphi}{\tan \alpha} \quad (6)$$

针对顺层块裂层状岩质边坡室内模型试验中的三种工况稳定系数如表 2 所示，符合试验结果，由此表明极限分析上限解在该类型边坡中的适用性，并且该结果与极限平衡法中单一平面滑动法的结果一致^[20]。

表 2 模型试验中的稳定系数

Tab.2 Safe factors of model test

顺层边坡层理倾角/ $^{\circ}$	上限解/ k
15	1.51
30	0.70
45	0.40

(2) 普遍破坏模式下的上限解

针对顺层块裂层状岩质边坡的普通破坏模式，设极限分析上限法的计算模型如图 11 所示。

图中 l_i 为底滑面 s_i 的长度。 L_i 为失稳破坏岩体各层理的极限长度。根据极限分析上限法基本原理，确定失稳破坏岩体重力所做的功率为

$$W_{\text{外}} = \sum G_i V \sin \alpha \quad (7)$$

式中， $\sum G_i$ 为失稳破坏岩体每个岩块的重力总和。

岩体破坏时，拉裂面不存在能量耗损，而沿底滑

面上的能量耗损率为

$$D_{\text{内}} = \sum_{i=1}^n \left(f_{ni} \frac{l_i}{L_i} \cos \alpha \tan \varphi_i + c_i l_i \right) V \quad (8)$$

式中： f_{ni} 为各底滑面上覆荷载， $f_{ni} \frac{l_i}{L_i}$ 为上覆荷载分担到底滑面上的荷载。

由此，求得顺层块裂层状岩质边坡的安全系数上限解为

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n \left(f_{ni} \frac{l_i}{L_i} \cos \alpha \tan \varphi_i + c_i l_i \right)}{\sum G_i \sin \alpha} \quad (9)$$

回归到室内模型试验中，式(9)中令 $c_i = 0$ ；并且

各节理面 $\varphi_i = \varphi$ ， $\sum_{i=1}^n \left(f_{ni} \frac{l_i}{L_i} \right) = \sum G_i$ ，从而得 $k =$

$\frac{\tan \varphi}{\tan \alpha}$ ，与式(6)相同，也就说明室内模型试验结果为

普遍破坏模式下的一种特殊情况。

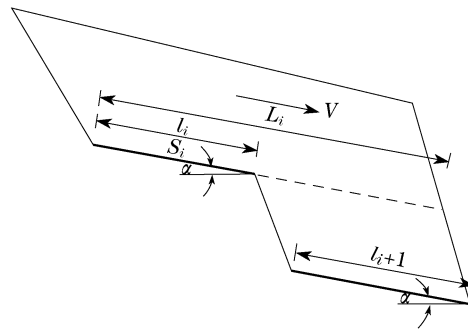


图 11 顺层边坡极限分析上限法计算模型

Fig.11 Calculation model of upper bound limit analysis for a bedding slope

但是，该破坏模式下有多种破坏路径，如块体组合①、①②、①②③、①②③④、①②③④⑤、①②③④⑤⑥、①②③④⑤⑥⑦都可能为失稳破坏岩体，但极少数出现虚线所示的破坏路线，这里不予考虑，如图 12 所示。

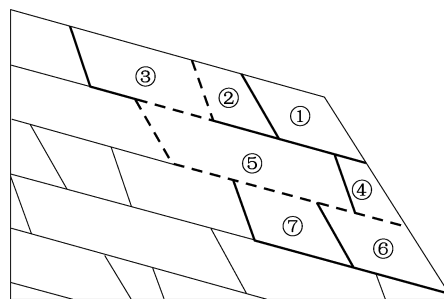


图 12 多种破坏路线

Fig.12 Possible failure paths

在这复杂的破坏路线结构图中,如何确定最危险的块体组合,即确定失稳破坏岩体极限范围.首先,根据块体受力分析,确定每层岩层中的极限长度,再顺序组合各岩层极限长度,寻找出最危险的破坏路线,计算出相应的稳定系数.

如图12所示,假定边坡最上部岩层的极限长度为块体①,②,③的总长,在其有滑动趋势下,第二层中块体⑤可能具有一起滑动的趋势.设块体⑤的受力状态如图13所示,对其建立局部坐标,设轴平行于层层面.图中: f_{t1} 和 f_{t2} 为块体间所承受的最大拉力; α_1 和 α_2 为拉力的方向角; f_{n1} 和 f_{n2} 为上下滑面的法向力, f_{s1} 和 f_{s2} 为摩擦力;由于块体滑移时不脱离层理面,所以在 y 方向上,满足静力平衡条件,即

$$f_{n2} - f_{n1} + f_{t1} \sin \alpha_1 + f_{t2} \sin \alpha_2 = 0 \quad (10)$$

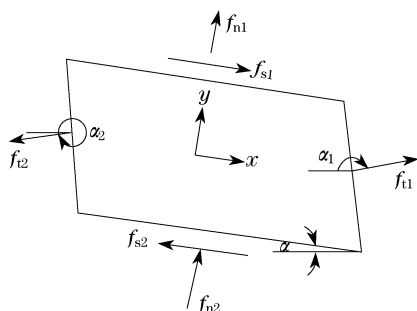


图13 块体受力分析

Fig. 13 Force analysis for a block

并且由于块体所有受力点都经过块体重心,故满足力矩平衡条件.所以,根据 x 方向上的受力状态,就可判断块体是否具有滑移趋向,如

$$f_{s1} - f_{t1} \cos \alpha_1 > f_{s2} + f_{t2} \cos \alpha_2 \quad (11)$$

则块体属于该岩层极限长度内,反之,块体就不属于极限长度内.因此,对每一岩层逐块进行块体受力分析,可求得每一岩层的极限长度.

然后,顺序组合各岩层极限长度,把每一岩层失稳破坏部分的后缘拉裂边界组合在一起,构成了边坡的失稳破坏范围的边界,如顶部两层组合或顶部三层组合等.最后结合前面建立的普遍破坏模式下的极限分析上限法来求出各种岩层组合的稳定系数,从中找出最小系数的岩层组合,作为边坡最危险的失稳破坏范围.

2.3 反倾斜边坡的极限分析上限解

(1) 模型试验结果分析

根据反倾斜边坡室内模型试验结果,其计算模型如图14所示.

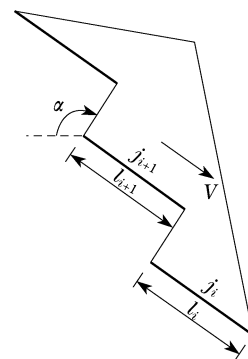


图14 反倾斜边坡极限分析上限法计算模型

Fig. 14 Calculation model of upper bound limit analysis for an anti-dip slope

在极限分析上限解求解过程中,确定失稳破坏岩体重力所做的功率为

$$W_{\text{外}} = - \sum G_i V \cos \alpha \quad (12)$$

由于在反倾斜边坡室内模型试验中,节理面与层理面成垂直关系,故只有块体重力提供底滑面上的法向力,并且块体间不发生相互滑移.由此,沿底滑面上的能量耗损率为

$$D_{\text{内}} = \sum_{i=1}^i (G_i \sin \alpha \tan \varphi_i + c_i l_i) V \quad (13)$$

故求得反倾斜块裂层状岩质边坡的稳定系数上限解为

$$k = \frac{\sum_{i=1}^i (G_i \sin \alpha \tan \varphi_i + c_i l_i)}{- \sum G_i \cos \alpha} \quad (14)$$

针对室内模型试验中 135° 层理倾角反倾斜边坡的工况, $c_i = 0$, $\varphi_i = \varphi$,得

$$k = - \tan \alpha \tan \varphi \quad (15)$$

计算稳定系数上限解为0.40,符合试验结果,由此表明极限分析上限法在反倾斜块裂层状岩质边坡中的适用性.

(2) 普遍破坏模式下的上限解

针对反倾斜块裂层状岩质边坡的普遍破坏模式,设极限分析上限法的计算模型如图15所示.

根据极限分析上限定理,对相邻块体间建立一个协调的速度场 V_i , V_{i+1} 和 $V_{i,i+1}$,位移协调条件要求相邻块体移动不至于导致它们的重叠或分离,即相邻块体速度多边形要矢量闭合^[21],表示为

$$V_{i,i+1} = V_{i+1} - V_i \quad (16)$$

根据相邻块体速度矢量闭合三角形的几何关系,速度场也可表示为

$$V_{i+1} = V_i \frac{\sin(\theta_i - \theta_{i,i+1})}{\sin(\theta_{i+1} - \theta_{i,i+1})} \quad (17)$$

$$V_{i,i+1} = V_i \frac{\sin(\theta_i - \theta_{i+1})}{\sin(\theta_{i+1} - \theta_{i,i+1})} \quad (18)$$

式中, θ_i 和 $\theta_{i,i+1}$ 为速度 V_i 和 $V_{i,i+1}$ 与 x 轴的夹角, 定义为从 x 负方向开始, 以顺时针旋转为正, 同时 $0 \leq \theta \leq 2\pi$. θ_i 和 θ_{i-1} 的计算公式为

$$\theta_{i,i+1} = \alpha \quad (19)$$

$$\theta_i = \pi + \alpha_i \quad (20)$$

式中, α_i 为各底滑面的方向角.

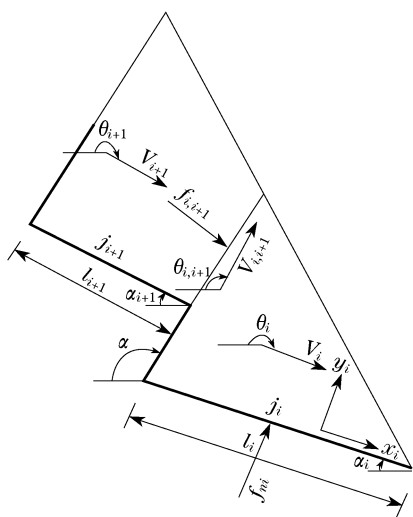


图15 反倾斜边坡极限分析上限法计算模型

Fig.15 Calculation model of upper bound limit analysis for an anti-dip slope

根据图15所示的破坏模式,第 $i+1$ 个块体为上侧块体,第 i 个块体为下侧块体.对于第 i 个块体和第 $i+1$ 个块体间的层理面,可分为以下两种情况:当 $\theta_{i+1} > \theta_i$ 时,说明下侧块体相对于上侧块体向上移动,此时下侧块体对上侧块体起到了阻滑的作用.当 $\theta_{i+1} < \theta_i$ 时,说明下侧块体相对于上侧块体向下移动,此时下侧块体对上侧块体不但起不到阻滑的作用,反而有了下滑的危险.

至此,作用于滑体的外力仅考虑岩体自重,在速度场 V 所做的外功率计算公式为

$$W_{外} = \sum (G_i V_i \sin \alpha_i) \quad (21)$$

根据极限分析基本原理,由于底滑面和层理面是塑性区,所以内能的耗散发生于底滑面和块体间相互滑移的层理面上,即

$$D_{内} = D_s + D_c = \sum_{i=1}^n [(f_{ni} \tan \varphi_i + c_i l_i) V_i] + \sum_{i=1}^{n-1} [(f_{i,i+1} \tan \varphi_i + c_i l_i) V_{i,i+1}] \quad (22)$$

式中:左边第一项为失稳破坏岩体底滑面上的摩擦力在速度场所产生的内能耗散;左边第二项为相邻块体间层理面上的摩擦力在速度场所产生的内能耗散.式中存在两个未知数 f_{ni} 和 $f_{i,i+1}$,即底滑面和层理面上的法向力.下面根据块体受力分析来确定它们.

首先对每个块体建立局部坐标系 (x_i, y_i) ,块体所受重力 G_i ,底滑面法向力 f_{ni} ,层理面法向力 $f_{i,i+1}$ 和摩擦力 $(f_{ni} \tan \varphi_i + c_i l_i)$, $(f_{i,i+1} \tan \varphi_i + c_i l_i)$,并且假定块体在失稳破坏时不脱离、不旋转、故满足静力平衡条件为

$$\sum F_{yi} = 0 \quad (23)$$

$$\sum M_i = 0 \quad (24)$$

据此,可求得 f_{ni} 和 $f_{i,i+1}$,从而得到反倾斜块裂层状岩质边坡普遍破坏模式下的稳定系数上限解为

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n [(f_{ni} \tan \varphi_i + c_i l_i) V_i] + \sum_{i=1}^{n-1} [(f_{i,i+1} \tan \varphi_i + c_i l_i) V_{i,i+1}]}{\sum (G_i V_i \sin \alpha_i)} \quad (25)$$

回归到室内模型试验中,式(25)中若令 $V_{i,i+1} = 0$, $c_i = 0$, $\alpha_i = \alpha - \frac{\pi}{2}$, $\varphi_i = \varphi$,则得 $k = -\tan \alpha \tan \varphi$,与式(15)一致,说明室内模型试验结果为普遍破坏模式下的一种特殊情况.

3 结论

采用室内模型试验手段,得出块裂层状岩质边坡的破坏模式,并结合实际工程,提出其普遍破坏模式.然后基于极限分析上限法原理和试验结果,验证了该方法在块裂层状岩质边坡稳定性分析中的适用性,进而求得普遍状况下块裂层状岩质边坡稳定系数的上限解,并得到一些有意义的结论:

(1) 顺层块裂层状岩质边坡失稳时为岩体沿某一层理面发生整体性滑移;而反倾斜块裂层状岩质边坡失稳时为岩体沿某一台阶面发生整体性滑移,台阶面是有层理面和节理面交错连接而成,层理面为拉裂面,节理面为底滑面.

(2) 在求解极限分析上限解时,结合静力平衡条件,可有效地解决求解过程中所需的未知量,如顺层边坡中的失稳破坏范围,反倾斜边坡中的块体间相互作用力.

(3) 极限分析上限法是从上限逼近真实解,过高地估计了边坡稳定系数,但从研究的角度出发,本文进一步拓展了极限分析法的应用范围,为边坡稳定性分析提供了一种有效的分析手段。

在本文研究过程中,仅考虑了岩体的滑移失稳,实际工程中存在的岩体转动、弯曲拉裂失稳状况有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 王兰生. 意大利瓦依昂水库滑坡考察[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(3): 145.
WANG Lansheng. Investigation of landslide for Vajont reservoir in Italy [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18(3): 145.
- [2] 陈志坚. 层状岩质边坡工程安全监控建模理论及关键技术研究[D]. 南京: 河海大学, 2001.
CHEN Zhijian. Monitoring and evaluation model establishment theory and key technology about layered rocky slope engineering [D]. Nanjing: Hohai University, 2001.
- [3] 孙书伟, 朱本珍, 马惠民. 典型顺层高边坡工程病害的地质力学模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1349.
SUN Shuwei, ZHU Benzhen, MA Huimin. Geomechanical model tests on slope hazards of typical high bedding rock slopes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(9): 1349.
- [4] 李云鹏, 杨治林, 王芝银. 顺层边坡岩体结构稳定位移理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 747.
LI Yunpeng, YANG Zhilin, WANG Zhiyin. Displacement theory of structure stability for rock mass bedding slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(6): 747.
- [5] 杨治林. 顺层边坡岩体结构的非完善屈曲性态研究[J]. 岩土力学, 2008, 28(增): 353.
YANG Zhilin. Imperfect buckling behavior for side slope with bedding rock mass [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 28 (Suppl): 353.
- [6] 冷先伦, 盛谦, 廖红建, 等. 反倾层状岩质高边坡开挖变形破坏机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增1): 4468.
LENG Xianlun, SHENG Qian, LIAO Hongjian, et al. Analysis on deformation and failure mechanism of high antidip sandwich rock slope in excavation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(Suppl 1): 4468.
- [7] 位伟, 段绍辉, 姜清辉, 等. 反倾边坡影响倾倒稳定的几种因素探讨[J]. 岩土力学, 2008, 29(增): 43.
WEI Wei, DUAN Shaohui, JIANG Qinghui, et al. Research on some factors influencing the toppling stability in anti-inclined slope [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(Suppl): 431.
- [8] Chen W F. Limit analysis and soil plasticity [M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Cooperation, 1975.
- [9] Donald I, CHEN Zuyu. Slope stability by the upper bound approach: fundamentals and methods [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34: 853.
- [10] Sloan S W. Lower bound limit analysis using finite element and linear programming [J]. International Journal Analytical Methods in Geomechanics, 1988, 12: 61.
- [11] Sloan S W. Upper bound limit analysis using discontinuous velocity field [J]. Computer Methods Application Mechanics Engineering, 1995, 127: 293.
- [12] Sutcliffe D J, Yu H S, Sloan S W. Lower bound solutions for bearing capacity of jointed rock [J]. Computers and Geotechnics, 2004(31): 23.
- [13] 陈祖煜, 汪小刚, 杨健, 等. 岩质边坡稳定分析——原理、方法、程序 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
CHEN Zuyu, WANG Xiaogang, YANG Jian, et al. Stability analysis of rock slope——principle, method, program [M]. Beijing: China Waterpower Press, 2005.
- [14] 王根龙, 伍法权, 李巨文. 岩质边坡稳定塑性极限分析方法——斜分条法 [J]. 岩土工程学报, 2007, 29(12): 1767.
WANG Genlong, WU Faquan, LI Juwen. Rock slope stability analysis based on plasticity limit theory——method of slices with inclined interfaces [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(12): 1767.
- [15] 陈炜, 王均星. 节理岩质边坡的块体元塑性极限分析下限法 [J]. 岩土工程学报, 2008, 30(2): 272.
CHEN Wei, WANG Junxing. Plastic lower bound limit analysis using block element method for jointed rock slope [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(2): 272.
- [16] 周维垣. 高等岩石力学 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1989.
ZHOU Weiyuan. Advanced rock mechanics [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Engineering Press, 1989.
- [17] 杨峰, 阳军生. 浅埋隧道围岩压力确定的极限分析方法 [J]. 工程力学, 2008, 25(7): 179.
YANG Feng, YANG Junsheng. Limit analysis method for determination of earth pressure on shallow tunnel [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(7): 179.
- [18] 冯君, 周德培, 江南, 等. 顺层岩质边坡顺层滑动岩体范围分析 [J]. 山地学报, 2007, 25(3): 376.
FENG Jun, ZHOU Depei, JIANG Nan, et al. On the extent of bedding slipping rockmass of consequent rock slope [J]. Journal of Mountain Science, 2007, 25(3): 376.
- [19] 钟卫, 周德培, 杨涛, 等. 顺层岩石高边坡在卸荷条件下失稳长度的确定 [J]. 四川建筑科学研究, 2008, 34(5): 113.
ZHONG Wei, ZHOU Depei, YANG Tao, et al. Determination of the instability length of layered rock high slope under unloading condition [J]. Sichuan Building Science, 2008, 34(5): 113.
- [20] 沈明荣. 岩体力学 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2006.
SHEN Mingrong. Rock mechanics [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2006.
- [21] 李广信. 高等土力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
LI Guangxin. Advanced soil mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.