

DOI: 10.11779/CJGE201609022

# “挡墙溃屈”型滑坡锁固段抗滑稳定性研究

钟 助<sup>1</sup>, 黄 达<sup>1, 2</sup>, 黄润秋<sup>3</sup>

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044;  
3. 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, 四川 成都 610059)

**摘 要:** “挡墙溃屈”型滑坡是一类典型的大型岩质边坡破坏失稳模式, 锁固段的物理力学性能为该边坡稳定性的控制因素。依据此类边坡的受力特征, 将上部坡体按其地质结构(如岩体层面)划分计算条块, 采用极限分析上限法求出上部坡体对锁固段的作用力(方向和大小)。通过对锁固段的极限剪切平衡分析, 推导了剪切破坏模式下锁固段的稳定性系数计算公式。以四川溪口滑坡为例进行了应用分析。首先根据稳定性系数与锁固段剪切面倾角的关系, 确定锁固段最危险截面位置。进而定量分析了最危险截面宽度与边坡稳定状态的相关性。研究成果对“挡墙溃屈”型滑坡的稳定性评价及灾害控制具有较好的指导意义。

**关键词:** “挡墙溃屈”; 锁固段; 边坡; 极限分析上限法; 抗滑稳定性

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)09-1734-07

**作者简介:** 钟 助(1989-), 男, 湖北通城人, 博士研究生, 主要从事岩体力学与工程方向的科研工作。E-mail: 20121602037t@cqu.edu.cn。

## Anti-sliding stability of locked patch of rock slopes with landslide mode of retaining wall collapse

ZHONG Zhu<sup>1</sup>, HUANG Da<sup>1, 2</sup>, HUANG Run-qi<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing 400044, China; 3. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** The landslide mode of retaining wall collapse is a kind of typical failure mode of large-scale rock slopes. The physical and mechanical properties of the locked patch play a key role in maintaining the stability of such slopes. Based on the force analysis of the slopes, the upper sliding mass can be divided into several calculation slices according to its geological structures (for example, bedding planes), and then the forces (including magnitude and direction) applied on the locked patch can be efficiently determined based on the upper bound method of limit analysis. On the basis of limit shear balance analysis, the safety factor of the locked patch with shear failure mode can be calculated. Xikou landslide in Sichuan is taken as a case study to verify the practical application of the theory proposed by the authors. Firstly, the most dangerous section in the locked patch can be obtained according to the relation between safety factor and dip angle of the shear plane. And then the relationship between the width of the most dangerous section and the safety factor is quantitatively analyzed. These results are of great significance for the stability evaluation and hazard control of the landslides with the failure mode of retaining wall collapse.

**Key words:** retaining wall collapse; slope; locked patch; upper bound method of limit analysis; anti-sliding stability

## 0 引 言

岩质边坡的稳定性主要受坡体结构及岩体结构控制<sup>[1-2]</sup>。常见的破坏类型主要有沿软弱面的平面滑动、切割岩体的楔形滑动、碎裂岩体的旋转滑动、沿断续岩体间贯通的折线滑动及弯曲倾倒破坏等<sup>[3]</sup>。岩质边坡的稳定性很大程度上取决于结构面的空间分布, 当其中一些控制性结构面间的岩桥完全贯通, 边坡极易

失稳而发生崩滑灾害, 故这些岩桥对边坡稳定性的影响非常重要<sup>[4-6]</sup>。

“挡墙溃屈”式滑坡是一类典型的岩桥贯通失稳

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(41172243; 41472245); 国家自然科学基金重点项目(41130745); 重庆市国土房管科技计划项目(CQGT-KJ-2014049); 中央高校基本科研业务费项目(106112016CDJZR208804)

**收稿日期:** 2015-07-24

\*通讯作者(E-mail: dahuang@cqu.edu.cn)

模式, 该类边坡地质结构特征 (见图 1) 为: 上部较硬而下部岩土体非常软, 且在坡体中部存在局部高强度的锁固段岩体。由于其锁固段的刚度远远高于下部软弱体, 它向下部坡体传递的荷载很小, 犹如一座“挡土墙”, “挑住”上部坡体传递下来的巨大推力, 导致应力及能量在锁固段处过量积累。当集中应力超过锁固段岩体长期强度时, 锁固段发生突发性的脆性破坏, 形成高速滑坡, 很容易造成重大地质灾害<sup>[6-10]</sup>。因此, 锁固段起到维系整个边坡整体稳定的关键作用, 对锁固段的抗滑稳定性研究非常重要。

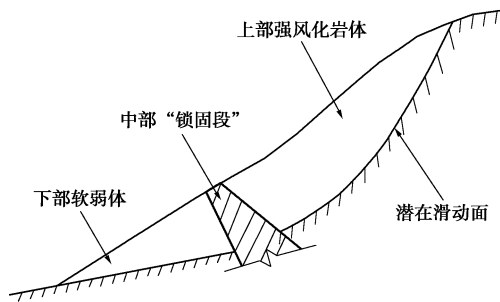


图 1 “挡墙溃屈”式滑坡概念模型<sup>[11]</sup>

Fig. 1 Conceptual model for landslide with mode of retaining wall collapse<sup>[11]</sup>

目前, 针对“挡墙溃屈”式滑坡的研究相对较少, 主要是基于滑移机制的描述和数值分析。黄润秋<sup>[12]</sup>收集了 20 世纪以来发生在中国大陆的典型大型滑坡灾害实例, 对“挡墙溃屈”式滑坡的演化机理和过程进行了详细的描述, 并以四川华蓥山溪口滑坡<sup>[11]</sup>和云南昭通头寨滑坡<sup>[13]</sup>两个典型工程为研究对象, 采用小变形黏弹塑性非线性有限元及大变形离散元数值模拟方法, 详细地分析了这类边坡的变形及锁固段受力特性, 论证了锁固段对该类边坡的稳定性具有显著的控制作用<sup>[14-15]</sup>。

基于以上研究成果, 本文根据塑性力学的极限分析上限法得出了上部坡体对锁固段的推力和抗滑力, 并根据锁固段的静力平衡方程, 得到了锁固段的稳定性系数, 结合四川溪口滑坡的工程实例分析, 验证了该方法的可行性。研究成果在此类边坡稳定性评价、加固设计和灾害预警等方面具有重要的理论及实用价值。

## 1 “挡墙溃屈”型滑坡力学模型

### 1.1 基本假定

本文中对上部坡体的力学分析是基于极限分析上限法进行的, 岩体满足以下假定条件<sup>[16]</sup>:

#### (1) 岩体刚塑性假定

上部坡体在进入极限平衡以后, 可能发生较大的

塑性变形, 弹性变形与其相比可忽略。

#### (2) 主应力轴与主应变轴重合假定

应用虚功原理对耗散能求解时 (式 (1) 左边), 假定了上部坡体单元的主应力轴与主应变轴重合。Chen<sup>[17]</sup>研究表明: 在固体力学领域, 大变形的剪切极限状态, 在莫尔-库仑准则的框架下, 假定两轴重合是基本合理的。

#### (3) 完全塑性区假定

上部坡体处于极限状态时, 假定潜在滑动面以上的岩体单元均处于完全塑性状态。

#### (4) 锁固段刚化假定

锁固段的变形远小于上部坡体和下部软弱地质体, 在利用上限法求解坡体对锁固段推力时, 假定锁固段虚拟速度为 0, 即不产生变形。

### 1.2 上部坡体对锁固段的作用力

锁固段承受的作用力有: 上部坡体传递下来的作用力 ( $T_0$  和  $C_0$ , 见图 2), 锁固段自身重力作用, 下部软弱地质体的抗力 (很小, 可忽略)。上部坡体对锁固段的推力, 是求解锁固段稳定性的关键, 可以通过虚功原理求解, 虚功原理是指对于任意静力平衡的力系, 如果让构成力系的诸多力在一个协调的位移上做功, 其总和为零<sup>[16]</sup>, 即

$$\int_V \dot{\sigma}_{ij} \cdot \dot{\varepsilon}_{ij} dv = \int_V W_i \dot{u}_i dv + \int_S T_i \cdot \dot{u}_i ds \quad (1)$$

式中,  $\sigma_{ij}$  为任意静力许可的应力场,  $\dot{u}_i$ ,  $\dot{\varepsilon}_{ij}$  为任意协调的位移场增量,  $W_i$  为体积力,  $T_i$  为面力。

对于岩质边坡, 特别是层状岩体边坡, 控制性结构面 (如层状岩体的层面) 为坡体应力的分界面, 故对上部强风化岩体按地质界面 (层面) 进行条分, 将上部岩体划分成  $n$  个条块。方便起见, 从锁固段开始依次对条块编号为 0, 1, 2, ...,  $i$ , ...,  $n$ , 见图 2。对于锁固段与条块 1 的界面, 作用有与界面法向成  $\varphi_0$  角的推力  $T_0$ 。而对于其中的任意第  $i$  条块, 设其重力为  $W_i$ , 其在滑面上的切向阻力可分为两部分: 黏聚力  $C_i$  (其值为  $c_i A_i$ ,  $A_i$  为滑面的面积), 重力法向分力引起的摩擦力, 将法向力与摩擦力合成为“组合摩擦力”  $P_i$ <sup>[16]</sup>, 其与滑面法向的夹角即为滑面的摩擦角  $\varphi_i$ 。依据极限平衡上限理论, 假设第  $i$  条块有垂直于  $P_i$  方向的速度  $V_i$ , 第  $i+1$  条块有垂直于  $P_{i+1}$  方向的  $V_{i+1}$ , 对于第  $i$  条块与第  $i+1$  条块的界面, 同样作用有黏聚力  $C_i^j$ 、“组合摩擦力”  $P_i^j$  和垂直于  $P_i^j$  方向的速度  $V_i^j$ 。要使条块间的变形协调,  $P_i^j$ ,  $V_i$ ,  $V_{i+1}$  必须满足以下条件:

$$V_i^j = V_i - V_{i+1} \quad (2)$$

根据虚功原理, 外力功与内能的耗散相等, 可得

$$\sum_{i=1}^n C_i V_i \cos \varphi_i + \sum_{i=1}^n C_i^j V_i^j \cos \varphi_i^j = \sum_{i=1}^n W_i V_i \cos \left( \varphi_i + \frac{\pi}{2} - \alpha_i \right) + T_0 V_0^j \cos \omega + C_0 V_0^j \cos \left( \frac{\pi}{2} + \omega - \varphi_0 \right), \quad (3)$$

式中,  $C_i$ 表示条块*i*滑面上的黏聚力,  $C_i^j$ 为条块*i*与条块*i+1*界面上的黏聚力,  $V_i$ 和 $V_i^j$ 分别为 $C_i$ 与 $C_i^j$ 作用面上的虚拟速度,  $\varphi_i$ 为条块*i*滑面上摩擦角,  $\varphi_i^j$ 为条块*i*与条块*i+1*界面上的摩擦角,  $W_i$ 为条块*i*的重力,  $T_0$ ,  $C_0$ ,  $\varphi_0$ ,  $V_0^j$ 分别为锁固段与条块1间界面的“组合摩擦力”、黏聚力、摩擦角和虚拟速度,  $\omega$ 为 $V_0^j$ 与 $T_0$ 方向的夹角。

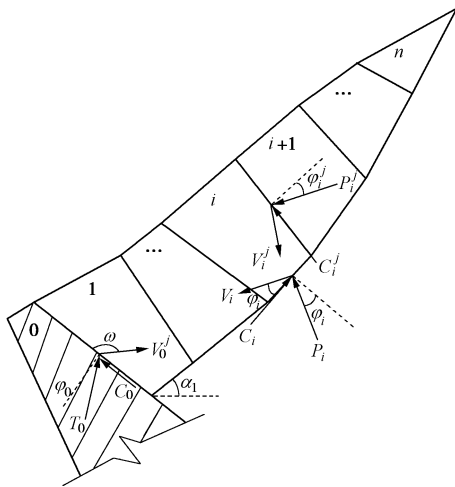


图2 上部坡体条分示意图

Fig. 2 Schematic of slices of upper slope

取厚度方向为单位长度1 m, 式(3)可化为

$$\sum_{i=1}^n C_i \cdot V_i \cos \varphi_i + \sum_{i=1}^n C_i^j \cdot V_i^j \cos \varphi_i^j = \sum_{i=1}^n W_i \cdot V_i \cos \left( \varphi_i + \frac{\pi}{2} - \alpha_i \right) + T_0 \cdot V_0^j \cos \omega + C_0 \cdot V_0^j \cos \left( \frac{\pi}{2} + \omega - \varphi_0 \right), \quad (4)$$

式中,  $A_i$ 为第*i*条块底部滑面的面积,  $A_i^j$ 为条块*i*与条块*i+1*间界面面积,  $A_i^v$ 为条块*i*立面面积,  $\gamma_i$ 为条块*i*的重度。

为了避免 $V_i$ ,  $V_i^j$ 这两个未知量对式(4)求解的干扰, 可通过平面几何知识将 $V_i$ 和 $V_i^j$ 转化为 $V_1$ 的线性函数。如图3所示, 以水平向右为*x*正方向, 定义从*x*的正方向逆时针旋转为正,  $\theta_i$ ,  $\theta_{i+1}$ ,  $\theta_i^j$ 分别为 $V_i$ ,  $V_{i+1}$ ,  $V_i^j$ 与*x*正方向的夹角, 条块*i*底部滑面倾角为 $\alpha_i$ , 条块*i*与条块*i+1*间的界面倾角为 $\alpha_i^j$ , 则

$$\left. \begin{aligned} \theta_i &= \pi + \alpha_i - \varphi_i, \\ \theta_{i+1} &= \pi + \alpha_{i+1} - \varphi_{i+1}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

而 $\theta_i^j$ 的值根据条块间的相对运动方向不同而有

以下两种情况:

(1) 当 $\theta_i \geq \theta_{i+1}$ 时, 左边条块相对于右边条块向上移动, 见图3(a), 则

$$\theta_i^j = \alpha_i^j + \varphi_i^j. \quad (6)$$

(2) 当 $\theta_i < \theta_{i+1}$ 时, 左边条块相对于右边条块向下移动, 见图3(b), 则

$$\theta_i^j = \pi + \alpha_i^j - \varphi_i^j. \quad (7)$$

通过式(5)~(7)可得到图3中 $V_i$ ,  $V_{i+1}$ ,  $V_i^j$ 构成的矢量三角形的3个内角, 根据正弦定理有

$$\left. \begin{aligned} V_{i+1} &= V_i \frac{\sin(\theta_i - \theta_i^j)}{\sin(\theta_{i+1} - \theta_i^j)}, \\ V_i^j &= V_i \frac{\sin(\theta_{i+1} - \theta_i)}{\sin(\theta_{i+1} - \theta_i^j)}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

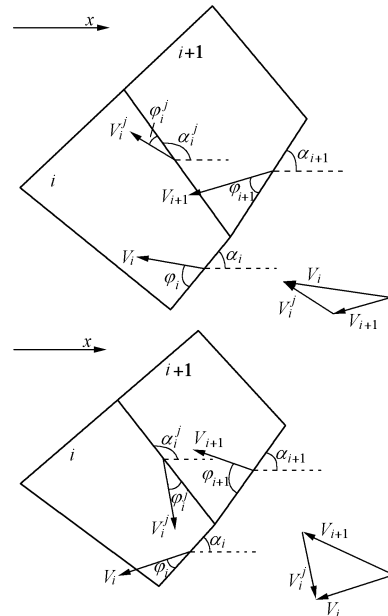


图3 相邻条块间相对运动方向

Fig. 3 Directions of relative motion for adjacent slices

由于式(8)中 $\theta_i^j$ 的值根据条块间的相对运动方向不同有两种情况, 代入式(8)后, 也有以下两种情况:

(1) 当左边条块相对于右边条块向上移动时,

$$\left. \begin{aligned} V_{i+1} &= V_i \frac{\sin(\alpha_i - \varphi_i - \alpha_i^j - \varphi_i^j)}{\sin(\alpha_{i+1} - \varphi_{i+1} - \alpha_i^j - \varphi_i^j)}, \\ V_i^j &= -V_i \frac{\sin(\alpha_{i+1} - \alpha_i - \varphi_{i+1} + \varphi_i)}{\sin(\alpha_{i+1} - \varphi_{i+1} - \alpha_i^j - \varphi_i^j)}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

(2) 当左边条块相对于右边条块向下移动时,

$$\left. \begin{aligned} V_{i+1} &= V_i \frac{\sin(\alpha_i - \varphi_i - \alpha_i^j + \varphi_i^j)}{\sin(\alpha_{i+1} - \varphi_{i+1} - \alpha_i^j + \varphi_i^j)}, \\ V_i^j &= V_i \frac{\sin(\alpha_{i+1} - \alpha_i - \varphi_{i+1} + \varphi_i)}{\sin(\alpha_{i+1} - \varphi_{i+1} - \alpha_i^j + \varphi_i^j)}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式(9)、(10)得到了 $V_{i+1}$ ,  $V_i^j$ 与 $V_i$ 的关系, 则可通过逐步迭代的方式, 将 $V_i^j$ 与 $V_i$ 表示为 $V_1$ 的线性函

数。迭代结果如下:

(1) 当左边条块相对于右边条块向上移动时,

$$\left. \begin{aligned} V_i &= \prod_{k=1}^i \frac{\sin(\alpha_k - \varphi_k - \alpha_k^j - \varphi_k^j)}{\sin(\alpha_{k+1} - \varphi_{k+1} - \alpha_k^j - \varphi_k^j)} V_1, \\ V_i^j &= \prod_{k=1}^{i-1} -\frac{\sin(\alpha_{k+1} - \alpha_k - \varphi_{k+1} + \varphi_k)}{\sin(\alpha_{k+1} - \varphi_{k+1} - \alpha_k^j - \varphi_k^j)} V_1. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

(2) 当左边条块相对于右边条块向下移动时,

$$\left. \begin{aligned} V_i &= \prod_{k=1}^i \frac{\sin(\alpha_i - \varphi_i - \alpha_i^j + \varphi_i^j)}{\sin(\alpha_{i+1} - \varphi_{i+1} - \alpha_i^j + \varphi_i^j)} V_1, \\ V_i^j &= \prod_{k=1}^{i-1} \frac{\sin(\alpha_{i+1} - \alpha_i - \varphi_{i+1} + \varphi_i)}{\sin(\alpha_{i+1} - \varphi_{i+1} - \alpha_i^j + \varphi_i^j)} V_1. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

为了方便记录, 将式 (11)、(12) 归纳为以下的形式为

$$\left. \begin{aligned} V_i &= k_i \cdot V_1, \\ V_i^j &= k_i^j \cdot V_1, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中,  $k_i$  为条块  $i$  滑面的速度系数,  $k_i^j$  为第  $i$ 、 $i+1$  条块间界面的速度系数, 其值根据条块间相对运动方向的不同有以下两种情况:

(1) 当左边条块相对于右边条块向上移动时,

$$\left. \begin{aligned} k_i &= \prod_{k=1}^i \frac{\sin(\alpha_k - \varphi_k - \alpha_k^j - \varphi_k^j)}{\sin(\alpha_{k+1} - \varphi_{k+1} - \alpha_k^j - \varphi_k^j)}, \\ k_i^j &= \prod_{k=1}^{i-1} -\frac{\sin(\alpha_{k+1} - \alpha_k - \varphi_{k+1} + \varphi_k)}{\sin(\alpha_{k+1} - \varphi_{k+1} - \alpha_k^j - \varphi_k^j)}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

(2) 当左边条块相对于右边条块向下移动时,

$$\left. \begin{aligned} k_i &= \prod_{k=1}^i \frac{\sin(\alpha_i - \varphi_i - \alpha_i^j + \varphi_i^j)}{\sin(\alpha_{i+1} - \varphi_{i+1} - \alpha_i^j + \varphi_i^j)}, \\ k_i^j &= \prod_{k=1}^{i-1} \frac{\sin(\alpha_{i+1} - \alpha_i - \varphi_{i+1} + \varphi_i)}{\sin(\alpha_{i+1} - \varphi_{i+1} - \alpha_i^j + \varphi_i^j)}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

需指明的是, 大多数情况下左边条块相对于右边的条块向上运动。当左边条块底部为一软弱层面时, 其摩擦角很小, 此时左边条块相对于右边条块向下运动<sup>[16]</sup>。

为了从式 (4) 中求出  $T_0$ , 必须将  $V_0^j$  也转化为  $V_1$  的线性函数, 即当  $i=0$  时, 式 (2) 变为

$$V_0^j = V_1 - V_0, \quad (16)$$

式中,  $V_0^j$  为锁固段与条块1界面上的速度,  $V_1$  为条块1底部滑面的速度,  $V_0$  为锁固段底部的速度。

由于锁固段的变形远小于上部坡体和下部软弱地质体<sup>[14]</sup>, 则可认为锁固段在极限状态未发生运动, 即

$$V_0 = 0. \quad (17)$$

则锁固段与条块1间界面的速度与条块1的速度大小和方向均相同, 即

$$V_0^j = V_1. \quad (18)$$

从以上推导确定了  $V_0^j$  的方向, 则通过几何知识可

求出  $T_0$  与  $V_0^j$  的夹角  $\omega$  (如图4所示):

$$\omega = \pi + \alpha_1 - \varphi_1 - \varphi_0 - \alpha_0. \quad (19)$$

将式 (13)、(18)、(19) 代入式 (4) 得

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n k_i c_i A_i \cos \varphi_i + \sum_{i=1}^n k_i^j c_i^j A_i^j \cos \varphi_i^j \\ &= \sum_{i=1}^n k_i \gamma_i A_i^v \sin(\alpha_i - \varphi_i) - T_0 \cos(\alpha_1 - \varphi_1 - \varphi_0 - \alpha_0) + \\ & \quad c_0 A_0 \sin(\alpha_1 - \alpha_0 - \varphi_1 - 2\varphi_0). \end{aligned} \quad (20)$$

故可得到  $T_0$  为

$$\begin{aligned} T_0 &= \frac{1}{\cos(\alpha_1 - \varphi_1 - \varphi_0 - \alpha_0)} \cdot \left[ \sum_{i=1}^n k_i \gamma_i A_i^v \sin(\alpha_i - \varphi_i) + \right. \\ & \quad c_0 A_0 \sin(\alpha_1 - \alpha_0 - \varphi_1 - 2\varphi_0) - \sum_{i=1}^n k_i c_i A_i \cos \varphi_i - \\ & \quad \left. \sum_{i=1}^n k_i^j c_i^j A_i^j \cos \varphi_i^j \right]. \end{aligned} \quad (21)$$

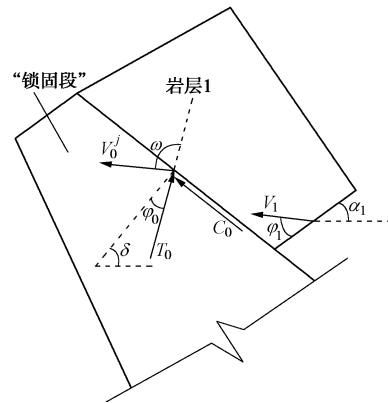


图4  $T_0$  与  $V_1$  方向关系

Fig.4 Relationship between directions of  $T_0$  and  $V_1$

### 1.3 边坡抗滑稳定性计算

由 1.1 节求出了  $T_0$  的大小及方向, 但是作用点的位置不能确定, 故无法计算锁固段抗倾覆破坏。下面将通过锁固段自身的极限平衡条件分析锁固段的抗滑移稳定性。

假设锁固段的剪切破坏面与水平方向的夹角为  $\alpha_0$ , 如图 5 所示, 由静力平衡条件, 得剪切破坏面上的轴力  $N$  和剪力  $V$  为

$$\left. \begin{aligned} N &= W_0 \cos \alpha_0 + T_0 \sin(\varphi_0 + \alpha_0 + \delta) + C_0 \cos(\alpha_0 + \delta), \\ V &= W_0 \sin \alpha_0 + T_0 \cos(\varphi_0 + \delta - \alpha_0) - C_0 \sin(\delta - \alpha_0). \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

根据莫尔-库仑准则, 锁固段剪切破坏面的抗剪力为

$$\begin{aligned} V_f &= [W_0 \cos \alpha_0 + T_0 \sin(\varphi_0 + \alpha_0 + \delta) + \\ & \quad C_0 \cos(\alpha_0 + \delta)] \tan \varphi_\infty + c_\infty l(\alpha_0), \end{aligned} \quad (23)$$

式中,  $l(\alpha_0)$  为锁固段剪切破坏面的宽度, 与剪切破坏面倾角  $\alpha_0$  相关,  $c_\infty$ ,  $\varphi_\infty$  分别为锁固段剪切面上长

期强度参数。

根据锁固段的受力特征(图5),可得锁固段的稳定性系数为

$$F_s = \frac{\{ [W_0 \cos \alpha_0 + T_0 \sin(\varphi_0 + \alpha_0 + \delta) + C_0 \cos(\alpha_0 + \delta)] \tan \varphi_\infty + c_\infty l(\alpha_0) \}}{[W_0 \sin \alpha_0 + T_0 \cos(\varphi_0 + \delta - \alpha_0) - C_0 \sin(\delta - \alpha_0)]} \quad (24)$$

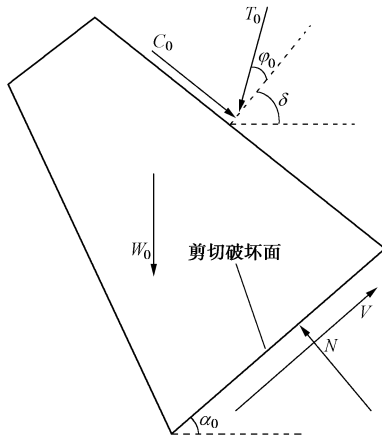


图5 锁固段受力示意图

Fig. 5 Forces acting on locked patch

四川华蓥山溪口滑坡和云南昭通头寨滑坡均表明锁固段破坏面的上部起始点为上部坡体滑面与锁固段的交点处<sup>[11, 13]</sup>(见图6):

$$l(\alpha_0) = d_0 \frac{\sin \beta}{\sin(\beta + \alpha_0)} \quad (25)$$

式中,  $d_0$  为锁固段上部破坏点处的水平宽度,  $\beta$  为锁固段下界限与水平方向的夹角。

将式(25)代入式(24),可得“挡墙溃屈”型边坡的稳定性系数为

$$F_s = \frac{\left\{ [W_0 \cos \alpha_0 + T_0 \sin(\varphi_0 + \alpha_0 + \delta) + C_0 \cos(\alpha_0 + \delta)] \tan \varphi_\infty + c_\infty d_0 \frac{\sin \beta}{\sin(\beta + \alpha_0)} \right\}}{[W_0 \sin \alpha_0 + T_0 \cos(\varphi_0 + \delta - \alpha_0) - C_0 \sin(\delta - \alpha_0)]} \quad (26)$$

表1 各条块的力学及物理参数

Table 1 Mechanical and physical parameters of slices

条块编号 $i$	滑面黏聚力 $c_i/\text{MPa}$	滑面内摩擦角 $\varphi_i/(\circ)$	界面黏聚力 $c_i'/\text{MPa}$	界面内摩擦角 $\varphi_i'/(\circ)$	滑面坡角 $\alpha_i/(\circ)$	滑面速度系数 $k_i$	界面速度系数 $k_i'$	滑面面面积 $A_i/\text{m}^2$	界面面面面积 $A_i'/\text{m}^2$	立面面积 $A_i''/\text{m}^2$	条块重度 $\gamma_i/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
0	4.0	48	0.016	18	36	—	—	—	22.10	—	26.5
1	0.021	20	0.065	19	42	1.000	0.028	29.95	18.97	617.8	20.2
2	0.027	21	0.070	20	42	0.978	0.001	27.65	16.16	484.8	21.3
3	0.032	23	0.076	21	42	0.959	$3.6 \times 10^{-5}$	37.81	12.33	1022	22.4
4	0.040	25	0.080	23	42	0.925	$-1.8 \times 10^{-6}$	26.84	9.58	299.3	23.6
5	0.035	24	0.016	—	37	0.958	—	24.71	—	160.1	24.4

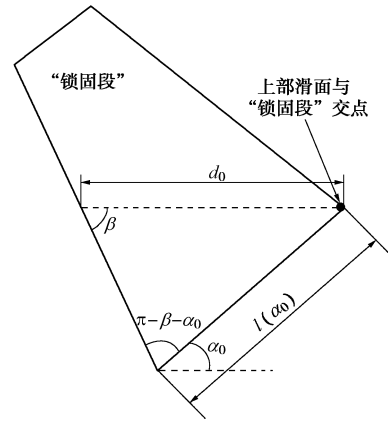


图6 锁固段剪切面的宽度与倾角的关系

Fig. 6 Relationship between width and dip angle of shear plane in locked patch

## 2 工程实例分析

1989年的四川华蓥山溪口滑坡<sup>[15, 17]</sup>是“挡墙溃屈”滑坡机理的典型代表,其剖面见图7,岩层由上而下依次为:层状块裂结构(强风化白云岩)→厚层状结构(强风化白云岩)→层状结构(强风化白云岩)→层状碎裂结构(强风化白云岩)→碎裂结构(强风化白云岩)→角砾状结构(角砾岩,为锁固段)→软弱基座(坡积物)。需要指出的是:下部的角砾状结构岩体,实际为断层破碎带经重新胶结后形成的角砾岩,其胶结物成分以钙质为主,胶结致密坚硬、完整程度高,形成边坡锁固段(见图7)。

本文以该典型滑坡为实例进行稳定性分析。根据锁固段上部坡体的结构形式可将其分成5个条块(见图7),各岩条的力学及物理参数如表1所示<sup>[18]</sup>,根据式(26),取 $d_0=3.5\text{ m}$ ,可得到稳定性系数 $F_s$ 与锁固段剪切面倾角 $\alpha_0$ 之间的关系,如图8所示;根据式(24),取 $\alpha_0=36^\circ$ ,可得到稳定性系数 $F_s$ 与锁固段剪切面宽度 $l$ 的关系,如图9所示。

由图8可以看出,当 $\alpha_0$ 在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 范围内时,稳定性系数 $F_s$ 的变化很小;从 $\alpha_0 \geq 70^\circ$ 开始, $F_s$ 随



着  $\alpha_0$  的增大快速增大; 当  $\alpha_0$  在  $40^\circ$  左右时,  $F_s$  的值最小, 即锁固段在该剪切面最薄弱, 这与实际工程中的  $\alpha_0=36^\circ$  基本吻合。

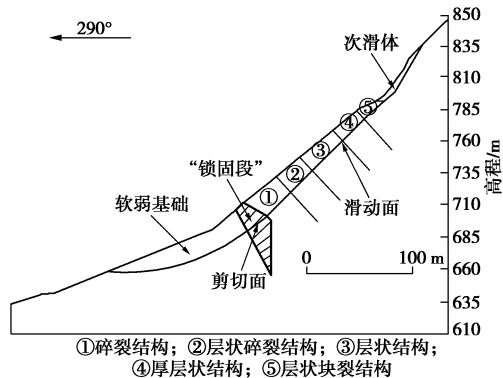


图 7 溪口滑坡滑原区斜坡结构地质示意图<sup>[15]</sup>

Fig. 7 Geological sketch of slope structures in original sliding zone of Xikou<sup>[15]</sup>

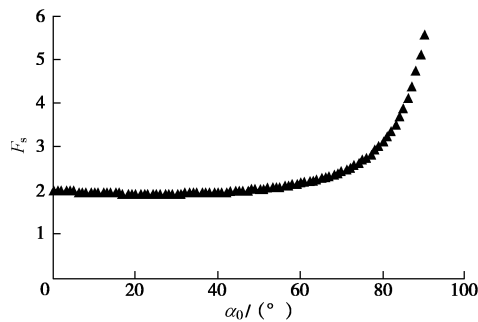


图 8 稳定性系数与锁固段剪切面倾角的关系

Fig. 8 Relationship between safety factor and dip angle of shear plane in locked patch

由图 9 可以看出, 当锁固段潜在剪切面完整 ( $l=25$  m) 时, 锁固段的稳定性系数达到 3.7, 为稳定状态。然而在风化、地下水等地质作用及长期荷载等作用下, 锁固段内部必然会产生裂纹或裂隙等缺陷, 尤其是在其薄弱截面上, 导致锁固段剪切面的宽度不断缩小。锁固段的稳定性状态随剪切面宽度  $l$  的变化有以下关系<sup>[19]</sup>: ①当  $l \geq 3.42$  m 时,  $F_s \geq 1.30$ ,

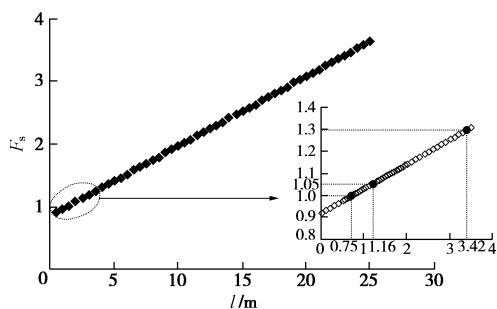


图 9 稳定性系数与锁固段剪切面宽度的关系

Fig. 9 Relationship between safety factor and width of shear plane in locked patch

为稳定状态; ②当  $1.16 \text{ m} \leq l < 3.42 \text{ m}$  时,  $1.05 \leq F_s < 1.30$ , 为基本稳定状态; ③当  $0.75 \text{ m} \leq l < 1.16 \text{ m}$  时,  $1.00 \leq F_s < 1.05$ , 为欠稳定状态; ④当  $l < 0.75 \text{ m}$  时,  $F_s < 1.00$ , 为不稳定状态。

### 3 结 论

(1) 上部坡体传递给锁固段的巨大推力可根据式 (21) 求出, 结合锁固段自身的静力平衡条件, 可得到如式 (26) 的稳定性系数计算公式, 由于锁固段对该类边坡的稳定性具有控制作用, 可用该稳定性系数来评价整个边坡的稳定性。

(2) 根据式 (26) 可得到稳定性系数与锁固段剪切面倾角的关系曲线, 曲线的最低点的横坐标即为锁固段危险截面倾角, 如此, 可针对性的对该危险截面进行加固而增加该类边坡的稳定性。

(3) 根据式 (24) 可得到稳定性系数与锁固段危险截面宽度之间的关系, 通过对锁固段上该截面宽度的监测, 可很好地对该类边坡的稳定性进行评价。

### 参考文献:

[1] HUDSON J A, HARRISON J P. Engineering rock mechanics: an introduction to the principles[M]. New York: Pergamon Press, 1997.

[2] 岑夺丰, 黄 达, 黄润秋. 岩质边坡断续裂隙阶梯状滑移模式及稳定性计算[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 695 - 706. (CEN Duo-feng, HUANG Da, HUANG Run-qiu. Step-path failure mode and stability calculation of jointed rock slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(4): 695 - 706. (in Chinese))

[3] HOEK E, BRAY J. Rock slope engineering[M]. 3rd ed. London: E and FN Spon, 1981.

[4] CAMONES L A M, VARGAS Jr E A, DE FIGUEIREDO R P, et al. Application of the discrete element method for modeling of rock crack propagation and coalescence in the step-path failure mechanism[J]. Engineering Geology, 2013, 153(2): 80 - 94.

[5] 秦四清, 徐锡伟, 胡 平, 等. 孕震断层的多锁固段脆性破裂机制与地震预测新方法的探索[J]. 地球物理学报, 2010, 53(4): 1001 - 1014. (QIN Si-qing, XU Xi-wei, HU Ping, et al. Brittle failure mechanism of multiple locked patches in seismogenic fault system and exploration on a new way for earthquake prediction[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(4): 1001 - 1014. (in Chinese))

[6] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J].

- 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1524 - 1544. (HUANG Run-qiu. Geodynamical process and stability control of high rock slope development[J]. Chinese Journal of Rock mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1524 - 1544. (in Chinese))
- [7] 黄润秋. 中国西部地区典型岩质滑坡机理研究[J]. 地球科学进展, 2004, 19(3): 443 - 449. (HUANG Run-qiu. Mechanism of large scale landslides in western China[J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19(3): 443 - 449. (in Chinese))
- [8] 黄润秋, 许强, 陶连金, 等. 地质灾害过程模拟和过程控制研究[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (HUANG Run-qiu, XU Qiang, TAO Lian-jin, et al. Studies of process simulation and its control of geohazards[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [9] 黄润秋, 王士天, 张倬元, 等. 中国西南地壳浅表层动力学过程与工程环境效应研究[M]. 成都: 四川大学出版社, 2002. (HUANG Run-qiu, WANG Shi-tian, ZHANG Zhuo-yuan, et al. Shallow earth crust dynamics process and engineering environment research in Western China[M]. Chengdu: Sichuan University Press, 2002. (in Chinese))
- [10] 黄润秋, 邓荣贵. 高边坡物质运动全过程模拟[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1993. (HUANG Run-qiu, DENG Rong-gui. Full simulation process for high slope substance moving[M]. Chengdu: Chengdu University of Technology Press, 1993. (in Chinese))
- [11] HUANG Run-qiu. Studies on the geological model and formation mechanism of Xikou landslide[C]// Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides. Rotterdam: A A Balkema, 1996: 1671 - 1678.
- [12] 黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433 - 454. (HUANG Run-qiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433 - 454. (in Chinese))
- [13] 徐则民, 黄润秋, 唐正光. 头寨滑坡的工程地质特征及其发生机制[J]. 地质论评, 2007, 53(5): 691 - 698. (XU Ze-min, HUANG Run-qiu, TANG Zheng-guang. Engineering geological characteristics of the Touzhai landslide and its occurrence mechanisms[J]. Geological Review, 2007, 53(5): 691 - 698. (in Chinese))
- [14] HUANG Run-qiu. Full-course numerical simulation of hazardous landslides and falls[C]// Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides. Rotterdam: A A Balkema, 1996: 1134 - 1140.
- [15] 黄润秋, 许强. 中国典型灾害性滑坡[M]. 北京: 科学出版社, 2008. (HUANG Run-qiu, XU Qiang. Catastrophic landslides in China[M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese))
- [16] 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: 中国水利出版社, 2005. (CHEN Zu-yu, WANG Xiao-gang, YANG Jian, et al. Rock slope stability analysis-theory, methods and programs[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2005. (in Chinese))
- [17] CHEN W F. Limit analysis and soil plasticity[M]. Amsterdam: Elsevier, 1975.
- [18] 沈军明. 四川华蓥山溪口镇马鞍坪斜坡稳定性评价及加固处理措施研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2007. (SHEN Ming-jun. Research on the stability and reinforcement measures of Maanping Slope of Huayingshan in Sichuan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [19] GB50330—2013 建筑边坡工程技术规范[S]. 2013. (GB50330—2013 Technical code for building slope engineering[S]. 2013. (in Chinese))