# 水下岩质边坡稳定性计算模式的探讨

刘　涛,沈明荣,陈建峰,宗军良
(同济大学地下建筑与工程系,上海　200092)

**摘要**:论文讨论了水下岩质边坡稳定性分析中平面型滑动及其边坡后缘出现拉张裂缝等两种计算模式,着重分析了水下岩质边坡的受力机理,推导了考虑动水的水流速度及不同的滑动面倾角等水下岩质边坡稳定性评价公式,得到了岩质边坡稳定系数与水流速度的关系曲线和岩质边坡稳定系数与滑动面夹角的关系曲线。通过实例计算,讨论了水下岩质边坡后缘出现拉张裂缝后稳定性评价的主要影响因素及其变化规律。当考虑水流速度对边坡的作用时,边坡的稳定性明显下降。

**关键词**:水下岩质边坡;水流速度;边坡稳定;计算模式
**中图分类号**:TU457　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-3665(2006)04-0005-04

## 1　概述

随着大型水利枢纽的建设、蓄水,大量原本位于水面以上可能已趋于稳定的自然或人工岩质边坡将被淹没。由于水的压力、水波的冲击和水的渗流等综合作用,将对岩质边坡的稳定性带来大量的不确定性,原先处在极限平衡状态的边坡就更趋危险。因此,水下岩质边坡的稳定性分析在工程实践中具有十分重要的现实意义。

近年来,科研人员在岩质边坡稳定性分析方面做了大量的研究工作[1~4],但目前国内外的研究主要是针对水上岩质边坡的稳定性研究,对水下边坡的稳定性研究还较少。本文着重从水下岩质边坡的受力机理方面进行分析,并考虑了动水的渗流对水下岩质边坡稳定性影响,通过实例对计算模式进行了验证。

## 2　极限平衡法在水下岩质边坡分析中的应用

### 2.1　岩质边坡平面型滑动破坏

平面型滑动指是一部分岩体沿着贯通于边坡体的地质软弱面,如层面、断层、裂隙或节理面而产生滑动,其特点是块体运动沿着平面滑移。这种滑移往往发生在结构面的产状往坡外倾斜的顺坡向边坡。这类边坡由于坡脚开挖或者其他某种原因(如风化、水的冲刷等)降低了软弱面的内聚力和内摩擦角,这就使得软弱面以上部分岩体沿此平面而下滑,造成边坡破坏。

### 2.2　静水场中水下岩质边坡稳定性分析

要研究动水场中水下岩质边坡的稳定性,有必要首先对静水场中水下岩质边坡的稳定性进行分析。静水场中水下岩质边坡的稳定性分析一般有两种考虑方法:一种是采用岩体的有效容重(浮容重)、岩体在水中的力学指标,按普通地面边坡进行计算;另一种是将静水压力作为荷载作用于边坡边界上,然后采用水下岩体物理力学指标,按普通地面边坡进行计算。因为水下岩质边坡滑动面上的抗滑力主要是由岩体的有效应力提供,而岩体的有效应力的大小与水深无关。因此,根据已有研究成果,本文按第一种方法计算。

### 2.3　动水场中水下边坡稳定性分析

根据岩质边坡平面型滑动破坏的破坏机理,本文也以此作为水下岩质边坡的破坏模式,按平移滑面进行分析。与水上岩质边坡或静水场中水下岩质边坡不同的是,动水场中水下岩质边坡稳定性分析时应考虑动水压力。为分析与理解上的方便,本文首先考虑坡体后缘无拉张裂隙的情况,然后再考虑坡体后缘存在拉张裂隙时的稳定性分析。

#### 2.3.1　坡体后缘无张拉裂隙时稳定性分析

不考虑坡体后缘有张拉裂隙时,水下岩质边坡滑动岩体上的有关作用力与极限平衡方程稳定性分析力学模式见图 1。

滑动岩体 ABC 的有效重量力 $W_b$ 可表达为:

$$W_b = \frac{\gamma_b' H^2}{2} \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin\alpha \sin\beta} \quad (1)$$

式中:$\gamma_b'$——水下岩质边坡岩体的有效重度,即浮重度(kN/m$^3$);

**收稿日期**:2005-10-19;**修订日期**:2006-02-23
**作者简介**:刘涛(1978-),男,博士研究生,主要从事隧道及地下工程研究工作。
E-mail:liutao-1978@126.com。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

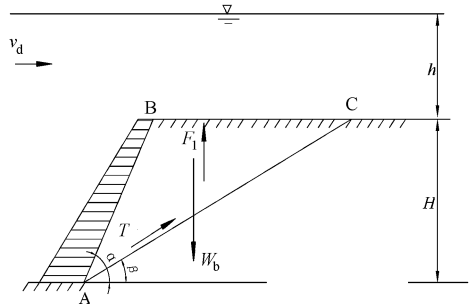



**图 1 坡体后缘无张拉裂隙时水下岩质边坡稳定性分析的计算模式图**

**Fig. 1 Calculation model of stability analysis on underwater rock slope without rear tension crack**

$H$ ——边坡高度(m);

$\alpha$、$\beta$——边坡坡角及滑动面与水平线的夹角(°)。

动水流速引起的岩体升力(浮托力) $F_1$ 可表达为[5~6]:

$$F_1 = C_L A_x v_d^2 \gamma_w / 2g \tag{2}$$

式中: $C_L$ ——浮托力系数,根据爱因斯坦和埃尔萨姆尼实验室对单面水下边坡的实验成果数据,可取 $C_L = 0.178$;

$A_x$ ——平行水流方向的单位宽度投影面积($m^2$);

$\gamma_w$ ——水的重度(kN/$m^3$);

$g$ ——重力加速度(m/$s^2$);

$v_d$ ——滑动岩体表面上的水流速度(m/s),可近似取河流的水流速度($v$)。

则 $F_1$ 又可表达为:

$$F_1 = 0.178 H \mathrm{ctg}\beta v_d^2 \gamma_w / 2g \tag{3}$$

应该说,按上式计算动水流速引起的岩体升力($F_1$)是相当近似的,可能还存在着一定的误差。但是,从目前的研究现状看,水流速度所产生的对边坡的浮托力的大小还未有一种更好的定量评价方法。采用式(3)计算岩体升力,应用简单方便,避免了复杂的流场分析,因而还是具有较为明显的实际意义。

由库仑方程可得岩体滑动面 AC 上的抗滑力 $T$ 为:

$$T = \frac{C \cdot H}{\sin\beta} + [(W_b - F_1)\cos\beta + \gamma_w(\frac{2}{3}H + h)\sin\beta]\mathrm{tg}\varphi \tag{4}$$

式中: $C$ ——滑面 AC 上岩体的粘聚力;

$\varphi$ ——滑面 AC 上岩体的内摩擦角;

$h$ ——边坡顶面在水下的深度(m)。

将上述各式进行整理后,可得滑动面 AC 上力的极限平衡方程为:

$$T + \gamma_w(\frac{2}{3}H + h)\cos\beta - (W_b - F_1)\sin\beta = 0 \tag{5}$$

稳定系数 $K$ 可表达为:

$$K = \frac{\frac{C \cdot H}{\sin\beta} + [(W_b - F_1)\cos\beta + \gamma_w(\frac{2}{3}H + h)\sin\beta]\mathrm{tg}\varphi}{(W_b - F_1)\sin\beta - \gamma_w(\frac{2}{3}H + h)\cos\beta} \tag{6}$$

式中 $K$ 的安全值可按工程重要性和经济性进行选择。对于水面以上边坡,其安全值一般为 1.2~1.5;考虑到动水的作用,以及计算表达式中某些单项的计算误差可能较大,建议取 1.3。

### 2.3.2 坡体后缘有拉张裂隙时的稳定性分析

在实际的观测中,顺层滑动的滑体一般都不是 ABC 楔体,而是 ABDE 楔体(图 2)。DEC 楔体则仍保留在原处不动。这说明了当滑面上楔体滑动时,靠近滑体的后缘产生了张应力,使滑体后缘与岩体脱开,产生了许多张裂缝(如图 2 中的 DE)。从理论上推得,张裂缝 DE 的深度 $z$ 为:

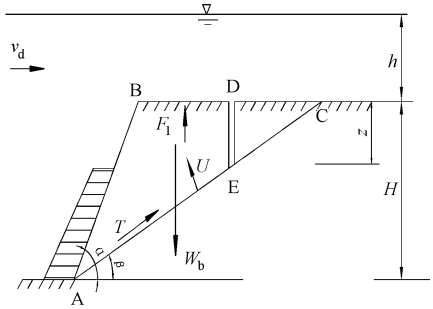



**图 2 坡体后缘有拉张裂隙时水下岩质边坡稳定性分析的计算模式图**

**Fig. 2 Calculation model of stability analysis on underwater rock slope with rear tension crack**

$$z = \frac{2C}{\gamma_b'}\mathrm{tg}(45° + \frac{\varphi}{2}) \tag{7}$$

滑动岩体 ABDE 的有效重量力 $W$ 可表达为:

$$W = \frac{1}{2}\gamma_b' H^2\left\{\left[1 - \left(\frac{z}{H}\right)^2\right]\mathrm{ctg}\beta - \mathrm{ctg}\alpha\right\} \tag{8}$$

动水流速引起的岩体升力(浮托力) $F_1$ 可近似地用式(3)进行计算[5~6]。

由库仑方程可得作用于岩体滑动面 AE 上的抗滑力 $T$ 为:

$$T = C(H - z)\csc\beta + \{(W - F_1)\cos\beta +$$

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\gamma_w\left[\frac{2}{3}(H-z)+h\right]\sin\beta\Big\}\,\mathrm{tg}\phi \tag{9}$$

将上述各式进行整理后,可得滑动面 AE 上力的极限平衡方程为:

$$T+\gamma_w\left[\frac{2}{3}(H-z)+h\right]\cos\beta-(W-F_1)\sin\beta=0 \tag{10}$$

则:

$$K=\frac{C(H-z)\cos\beta+\left\{(W-F_1)\cos\beta+\gamma_w\left[\frac{2}{3}(H-z)+h\right]\sin\beta\right\}\mathrm{tg}\phi}{(W-F_1)\sin\beta-\gamma_w\left[\frac{2}{3}(H-z)+h\right]\cos\beta} \tag{11}$$

式中 $K$ 的安全值可按工程重要性和经济性进行选择,对于水面以上边坡,其安全值一般为 1.2～1.5;考虑到动水的作用,本模式与实际较接近且考虑了坡体后缘拉张裂隙的影响,因此建议取 1.2。

## 3　实例计算及影响因素分析

### 3.1　实例计算

以坡体后缘有拉张裂隙的情况为例,计算的主要参数如表 1 所示,计算结果见图 3、图 4。其中,图 4 是取水流速度为 3m/s、7m/s、12m/s 的计算结果。

表 1　主要参数取值表

Table 1　Main parameters

| 参数名称 | 岩体浮重度 | 岩体粘聚力 | 内摩擦角 | 坡高 | 坡角 | 水深 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 数值 | 15kN/m³ | 5kN/m³ | 45° | 5m | 50° | 0.5m |

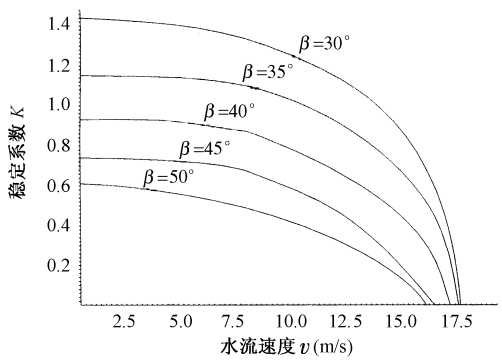



图 3　岩质边坡稳定系数与水流速度的关系曲线

Fig. 3　Relationship curve between the stability factor of underwater rock slope and flow velocity

### 3.2　稳定性影响因素分析

由图 3 可知,稳定系数随水流速度的增加而降低,同时还随滑动面倾角的增大而减小。在不同的倾角下,稳定系数与水流速度之间的关系曲线形态基本相同,大致可划分成 3 个区间。第一区间的范围在水流速度为 0～5m/s 之间(此时的速度对应于长江三峡中的低水流速度)[3],此时的稳定系数呈线性变化且稳定系数的下降不是很大(表 2);第二区间的范围在水流速度为 5～8m/s 之间(此时的速度对应于长江三峡中

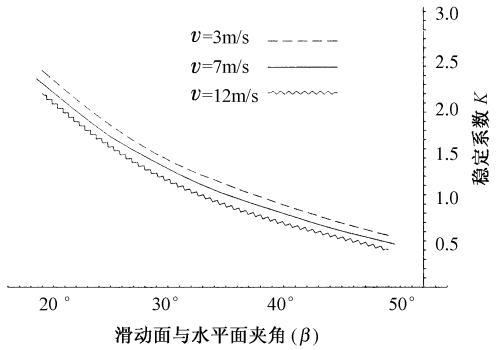



图 4　岩质边坡稳定系数与滑动面夹角的关系曲线

Fig. 4　Relationship curve between the stability factor of underwater rock slope and sliding-plane angles

的较快的水流速度)[3],此时的稳定系数下降比较快,其下降的速率是第一区间的 5 倍。在这两个区间内,稳定系数随滑动面的变化比较有规律,且下降的数值也基本相等;第三区间属急剧下降区,当水流速度为 17m/s 时稳定系数将趋近于 0,这个水流速度主要发生在洪水期。从表 2 中也可明显地看出,稳定系数随滑动面的倾角的增大而下降的比率(相对于未考虑水流速度对边坡的影响)。在第一区间,滑动面的倾角每增加 5°,下降率为 0.2～0.5;而在第二区间,该下降率已达到 0.7～1.6;第三区间更大,这在实际工程中是不应该发生的。

表 2　水流速度 v 和滑动面倾角 $\beta$ 为特定值时的稳定系数 K 值

Table 2　Value of stability factor K when flow velocity v and failure plane 'angle $\beta$ keeping constant

| $\beta$ (°) | 0m/s | 5m/s | | 8m/s | | 17m/s | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | K | 下降率(%) | K | 下降率(%) | K | 下降率(%) |
| 30 | 1.430 | 1.422 | 1.3 | 1.388 | 3.7 | 0.710 | 52.6 |
| 35 | 1.149 | 1.152 | 1.5 | 1.123 | 4.0 | 0.471 | 65.8 |
| 40 | 0.925 | 0.928 | 1.8 | 0.880 | 5.9 | 0.287 | 70.20 |
| 45 | 0.741 | 0.744 | 2.4 | 0.710 | 6.9 | 0.016 | 98.7 |
| 49 | 0.610 | 0.602 | 3.0 | 0.565 | 9.0 | 0 | 100.0 |

图 4 是在上述相同的计算条件下,水流速度分别为 3m/s、7m/s、12m/s 时(3 个参数取值于 3 个区间的中间值)稳定系数与滑动面倾角之间的变化关系。3 个

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

特定的水流速度下的曲线,几乎是 3 条平行线。表 3 列出了当 $K=1$ 时所对应的滑动面的倾角。可见,当水流速度变大时,满足极限平衡条件的滑动面倾角将随之减小。应该足够重视的是 $K=1$ 的条件下,稳定系数随滑动面倾角的增大呈直线降低的趋势。

表 3 K=1 条件下特定水流速度所对应的滑面的倾角

Table 3 Value of $\beta$ under limiting equilibrium ( K=1) and constant water velocity

| 流速 $v$(m/s) | 0 | 3 | 7 | 12 |
|---|---|---|---|---|
| $\beta$(°) | 0 | 37.8 | 36.6 | 35.4 |

从上述分析可知,由于受到水流速度的影响,水下的岩质边坡的稳定性相对水上的边坡要差得多。因此,水下岩质边坡的稳定性必须给予足够的重视。

## 4 结论

(1) 考虑水流速度对边坡的作用,边坡的稳定系数计算值则明显地下降。其变化曲线可分成 3 个区间:第一区间稳定系数随水流速度平稳下降;第二区间下降幅度增大;第三区间下降速率急剧增大。

(2) 在特定的 3 个水流速度下,边坡的稳定系数随滑动面倾角的增大而减小,且 3 条曲线基本平行。当 $K=1$ 时,保持极限平衡的滑动面的倾角将随水流速度的增大而减小。对于处在水下的岩质边坡而言,给出了一个警示,应该重新评价水下岩质边坡的稳定性,并给予足够重视。

(3) 上述仅是本研究课题初步的研究成果。水下岩质边坡的破坏机理和稳定性评价等的研究还处在刚刚起步的阶段,它与水上岩质边坡的研究成果存在着多少差别?水流速度的影响和水流中夹带着泥砂的磨蚀等对边坡的影响究竟有多大?这一切还得通过下一步实际的监测和模型试验等研究工作,加以发现和证实,并探索将这些成果应用于适合水下岩质边坡的稳定性评价方法之中。

**参考文献**:


[1] 沈明荣. 岩体力学[M]. 上海:同济大学出版社, 1999.

[2] 刘建国, 周顺华,宫全美. 水下边坡稳定性计算模式的探讨[J]. 上海铁道大学学报,2000,21(2):35-38.

[3] 张年学,盛祝平,王效宁,等. 长江三峡工程库区顺层岸坡研究[M]. 北京:地震出版社,1993.

[4] Erik Eberhardt. Rock Slope Stability Analysis Utilization of Advanced Numerical Techniques [J]. Engineering Geology,2002, 79(3-4): 230-250.

[5] 肖明清. 长江沉管隧道水下基槽边坡的稳定性与合理坡率[J]. 现代隧道技术,2001,38(1):42-46.

[6] 邱驹. 港工建筑物[M]. 天津:天津大学出版社, 2002.


# Calculating mode for the stability of underwater rock slope


LIU Tao, SHEN Ming-rong, CHEN Jian-feng, ZONG Jun-liang

(*Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai* 200092, *China*)



**Abstract**: This paper discusses on the two calculating modes about the stability of underwater rock slope including sliding-plane type and tensile crack type at rear of the rock slope, studies on the load mechanism of underwater rock slope and deduces two calculating formulas for the stability evaluation of the rock slope considering the moving water velocity and different sliding-plane angles. Relationship curve between the stability of underwater rock slope and water current velocity and relationship curve between the stability of underwater rock slope and sliding-plane angles are obtained. Through validation part of calculating mode by the analysis of the typical example, we found some main influence factors and changing pattern. The conclusion, which the stability of underwater rock slope is obviously decreasing when considering velocity, is obtained.



**Key words**: underwater rock slope; flow velocity; slope stability; calculating mode

**编辑**:张明霞


© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net