

# 浅析山区高等级公路中的边坡工程岩体

晏鄂川<sup>1,2</sup>, 王晋<sup>3</sup>, 何森<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074; 2. 成都理工大学工程地质研究所, 四川成都 610059; 3. 交通部第二航务工程勘察设计院, 湖北武汉 430071)

**摘要:** 随着山区高等级公路建设的飞速发展, 各类边坡工程岩体问题也日益增多. 从卸荷岩体力学的基本观点入手, 探讨了边坡工程岩体的变形破坏特性、稳定性评价方法以及开挖设计理论. 研究表明, 边坡工程岩体的变形破坏特性完全符合卸荷岩体力学行为, 不同于常规的加载岩体行为; 边坡工程岩体的稳定性分析计算中必须重视水力学因素和卸荷作用的影响, 并得到了有意义的表达式; 边坡工程岩体的开挖设计应在充分认识其工程力学性状的基础上, 针对边坡岩体地质特性, 结合已有各类稳定边坡的资料, 进行既经济又可靠的优化设计.

**关键词:** 山区高等级公路; 边坡工程岩体; 卸荷岩体力学; 岩体稳定性评价; 开挖设计.

**中图分类号:** TU45 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-2383(2001)04-0347-05

**作者简介:** 晏鄂川(1969—), 男, 副教授, 1998年毕业于成都理工大学, 获博士学位, 目前为中国地质大学地质工程专业博士后研究人员.

公路在现代化的中短途运输中一直居于主导地位. 目前全国公路通车里程已达  $130 \times 10^4$  km. 自1984年中国第一条高速公路通车以来, 截至2000年, 全国高速公路通车里程已达  $1 \times 10^4$  km 有余, 而在建高速公路项目总里程为  $126 \times 10^4$  km. 尽管如此, 我国高速公路建设与发达国家相比仍有很大差距, 形成高效的公路运输网络体系仍需时日. 总体特点是数量少、未成网、等级不高.

21世纪已迎来公路建设的新高潮, 笔者认为不仅仅是数量的增加, 更应是质量的提高. 众所周知, 交通工程是一种线(带)状的构筑物, 均是修建在地表及近地表的岩土工程环境之中. 无论是何等级、采用何形式都必然对地质环境产生扰动, 而环境必然对此做出响应, 其响应形式就是通常所说的工程病害或水毁事件. 对已投入运营的交通工程明线路段的主要病害形式为边坡病害(包括滑坡、泥石流、崩塌落石等)和基床病害(包括翻浆、沉陷变形、道渣陷槽等)两大类, 这比隧道工程病害普遍得多, 也更为严重. 降低工程对环境的扰动影响程度是人们追求的目标, 一则可以减轻运营后的病害程度, 二则可以有效降低工程造价. 但对于山区高等级公路, 因山岭

重丘绵延不断, 为了达到线形要求的平、纵断面标准, 施工中的深开挖、高填方是不可避免的, 这就要求深刻认识这类工程岩体问题的变形机制, 并采取合理的线路设计和有效的防治措施. 本文主要对边坡工程岩体的几个基本问题进行了初步研究.

## 1 边坡工程岩体特性研究

天然岩体是赋存于地应力场中经历了多次构造运动的复杂地质体, 其主要特点是未受到工程人为扰动, 是工程前期岩石力学研究工作的内容与对象. 而工程岩体是指施工开挖与建造后力学性状发生变化的岩体, 是施工期岩石力学研究工作的内容与对象. 天然岩体性状研究包括三方面内容: 岩体的物理力学特性、初始应力状态和地下水赋存状态. 天然岩体受人为扰动后成为工程岩体, 其物理力学性质发生了很大变化, 应力状态和地下水渗透性质也发生了明显改变.

开挖形成的边坡工程岩体, 原有平衡体系遭到破坏, 原始地应力场所受扰动影响大, 岩体应力产生重分布, 即在临空面(或自由面)附近的应力场包括主应力的方向、大小以及主应力差等发生较大变化, 形成卸荷应力场, 尤其是深切高陡边坡更是如此. 由

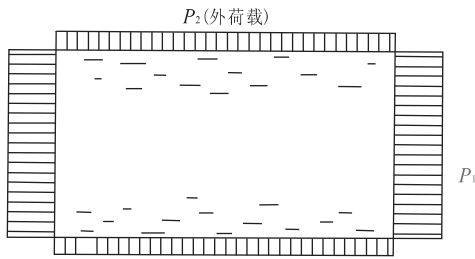


图 1 试样应力及微裂纹分布示意

Fig. 1 Sketch map of stress and micro-crackle distributing on the sample

于边坡无侧向约束或侧向约束作用较小,这种卸荷作用由边坡自身岩体来承担,从而形成量级和范围较大的二次应力场,使得开挖面出现新的裂纹或原有裂纹的扩展现象,在宏观上表现为工程岩体向自由面的扩容现象,且变形特性参数和强度特性参数降低。从形成机制上讲(图 1),卸荷应力状态实质上相当于在原有应力状态下叠加了一个侧向的拉应力<sup>[1]</sup>,使得工程岩体自由面极易产生平行于 $\sigma_1$ 方向的张裂纹,并逐步向岩体内部调整转移,在宏观上即表现为明显的侧向扩容。

在开挖爆破动力作用下,边坡工程岩体内将形成卸荷松弛带和塑性屈服区,这对边坡的稳定与变形发展不利。开挖后岩体变形可分为开挖瞬间的弹性变形、分步开挖累积的时效变形以及开挖完成后的后期流变。岩体流变包括蠕变、应力松弛及其长期强度衰减,岩体开挖卸荷后的时间效应、温度场的改变以及爆破损伤、渗流损伤、地震损伤的积累等,使工程岩体中的结构面和岩石具有复杂的流变特性。

由于岩体中发育大小不等、方位不同的多组结构面,致使岩体各向异性明显,同时,结构面因卸荷作用极易张裂、扩展、贯通,最终导致岩体的拉坏,部分区域的岩体产生拉应力区,岩体质量劣化,造成边坡变形过大,给工程建设带来难度,甚至制约着工程的进度与造价。

边坡工程岩体作为卸荷岩体体力学<sup>[2]</sup>的研究对象之一,其力学特性研究应不同于一般的加载条件下的岩体力学研究。其工程地质特性、岩体参数、计算方法、试验方法、加固等方面均有特殊性,只有根据系统工程的原理和方法,充分地认识岩体、保护岩体、利用岩体、运用卸荷非线性岩体力学理论才能取得良好的成果。这就要求在边坡工程岩体力学的计算分析中,不仅应考虑计算荷载为卸载,而且应运用相应的卸荷力学状态下的岩体力学参数、本构关系

及其分析计算方法。

## 2 边坡工程岩体的稳定性评价

边坡稳定性评价已有相当长的历史。对于散体介质斜坡有瑞典圆弧法、条分法、Bishop 法、不平衡推力法、简布普遍条分法等;对于岩质斜坡的评价方法有:单一滑面极限平衡法、双滑面的等 K 法和刚体平衡法、滑体内存在结构面的分块极限平衡法及不平衡推力法等。此外,还有近年广泛采用的既适用于岩质边坡又适用于土坡的 Sarma 法。

本文仅就边坡工程岩体稳定性分析中的水力学因素和卸荷条件下的稳定性计算原理进行讨论。

### 2.1 水力学因素分析

在边坡岩体稳定性评价中,如何考虑水力学因素早已引起人们的关注<sup>[3,4]</sup>,但仍有许多难点与重点问题亟待解决。在某种程度上制约了边坡稳定性评价的发展。

晏同珍等<sup>[5]</sup>提出了图 2 所示的分析模型。图中  $W$ 、 $U$ 、 $V$  分别为单宽滑体的重量、滑面承受的扬压力和滑体承受的静水压力。由于概化的滑体为不透水岩体,该分析模型不能用于自然界广泛分布的裂隙发育的节理化岩质边坡。此外,模型假定,由于后缘拉裂缝充水而对坡体施加一个侧向静水压力。据观测,在通常情况下,由于降雨强度及汇水面积的限制,后缘拉裂缝中的水柱高度是很难达到较高水平的。因此图中所示模型的适用范围是有限的。

周志芳<sup>[6]</sup>提出用下列数学模型来模拟边坡地下水的浸润曲面动态

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \epsilon = \mu \frac{\partial h}{\partial t}, \\ h(x, y, t) \Big|_{\Gamma_1} = h_1(x, y, t), (x, y) \in \Gamma_1, t > 0, \\ h(x, y, t) \Big|_{t=0} = h_0(x, y), (x, y) \in \Omega, t = 0, \\ T_x \frac{\partial h}{\partial x} \cos(n, x) + T_y \frac{\partial h}{\partial y} \cos(n, y) = \\ -q(x, y, t), (x, y) \in \Gamma_2, t > 0. \end{aligned} \right\} (1)$$

将滑体分解成若干小柱体,柱体分割与模型(1)求解时的三角形平面单元相吻合,单元 3 个节点的平均水头作为柱体水头。分别计算每个小柱体的抗剪力( $S_c^k$ )和剪应力( $\tau^k$ ):

$$S_c^k = c_k + (W_k - \bar{h}_k \gamma_w A_k) \cos^2 \alpha \tan \varphi_k / A_k, (2)$$

$$\tau^k = (W_k - \bar{h}_k \gamma_w A_k) \cos \alpha \sin \alpha / A_k + \bar{h}_k \gamma_w \cos \alpha \sin \alpha, (3)$$

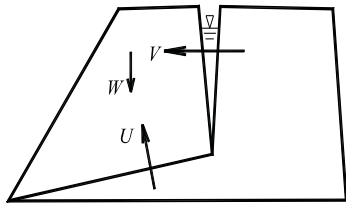


图 2 边坡受力分析

Fig. 2 Analysis of load on a rock slope

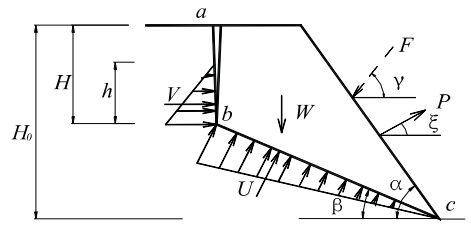


图 3 卸荷作用下边坡受力简图

Fig. 3 Sketch map of load on an unloading rock slope

式中:  $c_k, \varphi_k, W_k, A_k$  分别为  $k$  单元滑面的内聚力、内摩擦角、岩块重量、水平投影面积;  $\alpha, \gamma_w$  分别为滑面倾角和水的容重。

整个边坡体的稳定性系数为

$$F_s = \frac{\sum [(W_k/A_k - \bar{h}_k \gamma_w) \cot^2 \alpha \tan \varphi_k + 2c_k / \sin 2\alpha]}{\sum [(W_k/A_k - \bar{h}_k \gamma_w) + \bar{h}_k \gamma_w]} \quad (4)$$

由(1)式求得不同时刻的浸润曲线后,利用(4)式就可以进行边坡稳定性的评价。

上述算法的优点在于把渗流场有限元分析和边坡稳定性计算中的条分法进行了结合,并注意到浸润曲面波动引起的边坡稳定性的变化。但也存在不足之处,它忽略了边坡地下水的三维渗流特征,没有考虑动水压力效应,这对于一些地下水动态变化剧烈的高陡边坡是不合适的。

地下水影响边坡稳定性的另一重要方式——潜在滑面因饱水引起的强度衰减,有过不少研究。试验资料表明,滑带土的强度分量  $C$  随含水量的增加而降低,而  $\varphi$  值变化不大。一般情况下,  $C$  与含水量  $w$  之间具有以下关系:  $C = c_0 e^{-\beta w}$ , 式中:  $\beta$  为强度衰减系数;  $c_0$  为含水量变化前的粘聚力。

由上可知,边坡岩体稳定性评价中,水力学因素考虑还不系统,其中最重要的两个方面应是动水压力计算和潜在滑面的强度衰减估算。这值得进一步研究。

### 2.2 卸荷作用分析

在天然岩体和工程岩体的力学性质研究的基础上,建立地质概化与施工模型,进行施工全过程的模拟计算。研究岩体的变形与应力变化过程特别是塑性区的发展过程,而不仅仅是静态地分析开挖完成后边坡的应力与安全系数。其次应在施工前进行详细地质调查,动态地运用块体理论进行分析,确定不稳定或潜在不稳定块体的状况,并采用极限平衡方法对塑性区岩体的稳定性进行分析,由此结合具体的工程确定加固措施、规模和布置方式。

由于卸荷岩体的力学特性与加荷岩体力学特性有着本质区别。因此,在开挖而成的边坡稳定性分析中需要考虑这种卸荷作用。假定开挖部分岩体对边坡开挖边界所产生的压力合力为  $P$ , 此力反向作用于边坡边界上,如图 3 所示。在  $P$  的作用下岩体形成了裂缝  $ab$ , 并在  $bc$  面形成滑动面,此时滑动力和抗滑力(当不考虑锚固力  $F$  时)如下:

- (1) 滑动力。① 重力  $W$  沿  $bc$  面的分力  $T_1 = W \sin \beta$ ; ② 裂缝中的水压力合力  $bc$  面的分力  $T_2 = V \cos \beta$ ; ③ 卸荷力  $P$  在  $bc$  面产生的平行分力  $T_3 = P \cos(\beta + \xi)$ 。
- (2) 抗滑力。① 重力  $W$  的分力在  $bc$  面产生的摩擦力(考虑浮力影响):  $N_1 = \mu(W \cos \beta - U - V \sin \beta)$ ; ② 粘聚力在  $bc$  上的合力  $N_2 = cL$ , 其中  $L$  为  $bc$  段长度,  $c$  为内聚力; ③ 卸荷力  $P$  的垂直分力在  $bc$  面上产生的负摩擦力  $N_3 = -\mu P \sin(\beta + \xi)$ 。

因此,稳定性系数计算公式如下:

$$F_s = \{cL + \mu[W \cos \beta - U - V \sin \beta - P \sin(\beta + \xi)]\} / [W \sin \beta + V \cos \beta + P \cos(\beta + \xi)] \quad (5)$$

分析式(5)可知,在岩体的卸荷作用下不仅增加了岩体的滑动力,而且还降低了岩体的抗滑力。

当考虑锚固力  $F$  时(如图 3 所示虚线),稳定性系数的计算公式如下:

$$F_s = \{cL + F \cos(\beta + \gamma) + \mu[W \cos \beta + F \sin(\beta + \gamma) - P \sin(\beta + \xi) - U - V \sin \beta]\} / [W \sin \beta + V \cos \beta + P \cos(\beta + \xi)] \quad (6)$$

与常规表达式比较可知,卸荷岩体的抗滑稳定性系数明显降低。因此,常规的抗滑稳定分析方法须改进,应考虑岩体开挖卸荷的影响。

## 3 边坡设计及优化

### 3.1 开挖设计及优化

工程设计的一般原则是既保证工程安全可靠,

又经济合理. 从经济的原则出发, 设计中应当尽量减少开挖量, 然而, 从工程本身而言, 就应当进行满足要求的开挖. 因此, 边坡开挖设计中应当贯彻优化设计原则, 充分利用岩体的自稳能力和承载能力.

设计中的一个重要指标就是选取开挖坡度. 当边坡工程岩体中存在软弱、破碎或不稳定性块体时, 通常是采用减小开挖坡度的办法来增加边坡稳定性. 这对于岩质边坡是不尽合理的. 不加区别地放缓坡度, 不仅增大开挖量, 而且更多地破坏了地表植被生态平衡. 因此, 对于含有上述弱化边坡稳定性的因素时, 只需针对这些局部问题进行加固处理, 而边坡的坡度仍然可以保持较陡. 同时, 设计开挖边界时, 不应拐角太多, 否则, 人工造成的几何边界和临空面增多, 开挖产生的塑性区就比较大, 关键块体也会增多, 对工程岩体的稳定性极为不利. 并且给开挖爆破增加很多困难, 难以成型.

### 3.2 边坡设计统计分析

目前, 还不能对边坡工程岩体稳定性和所需支护作精确计算和设计, 因此, 统计分析已有矿山、铁路和水利水电工程领域内的高边坡, 对高速公路的边坡评价和设计具有借鉴意义.

**3.2.1 矿山边坡设计的统计分析** 依据《边坡工程手册》<sup>[8]</sup> 提供的大量冶金矿山边坡工程调查资料, 可归纳为图 4. 其含义是路堑边坡坡度小于某值时, 边坡工程岩体整体是稳定的; 大于此值时, 边坡将失稳. 不过, 在用于设计公路边坡时, 应充分考虑坡体结构、岩体结构面状况以及岩体强度. 同时, 若考虑安全系数时, 设计的坡比值应小于图中统计值.

**3.2.2 铁路边坡设计的统计分析** 目前, 铁路部门依据稳定边坡统计数据, 建立了边坡坡度与影响其稳定的主要因素如岩体结构、岩石强度、地下水和边坡高度之间的关系:

$$\alpha = \arctan[r_H \tan(-40 + 38 \lg(r_w \cdot RQ))].$$

式中:  $\alpha$ . 边坡开挖设计坡角;  $r_H$ . 坡高折减系数. 当坡高  $H \leq 20$  m 时,  $r_H = 1.0$ ; 当  $20 \text{ m} < H \leq 30$  m 时,  $r_H = 0.7$ ; 当  $H > 30$  m 时,  $r_H = 0.6$ .  $r_w$ . 水的折减系数, 与岩体风化强度、含水程度和节理充填物、充填程度有关.  $RQ$ . 岩体质量, 反映岩体力学性质与风化程度. 计算公式为  $RQ = R \cdot I_c$ , 其中  $R$  为岩体回弹值表示的岩体强度;  $I_c$  为岩体完整程度指数, 反映岩体节理发育程度、张开度与充填特征.

**3.2.3 水电高边坡设计统计分析** 截至目前, 尚未见高速公路中大于 50 m 的中桩深挖路堑的设计资

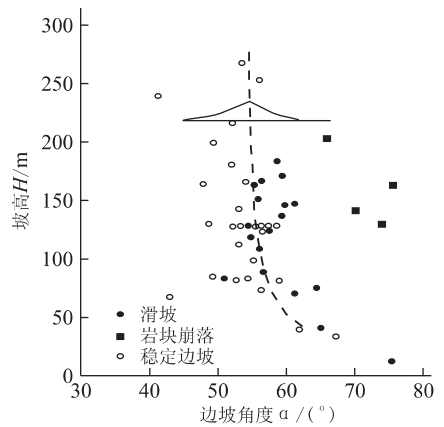


图 4 稳定边坡角与坡高的关系

Fig. 4 Relation between slope angle and height

料及成果, 而水电工程中, 早已成功实施超过 50 m 深的边坡开挖. 因此, 这对高速公路深挖高陡边坡设计具有重要参考价值.

据工程实践调查资料, 对于 120 m 高的岩质边坡, 总体坡角缓于  $55^\circ$  可以稳定; 对于 160 m 高的岩质边坡, 总体边坡角应缓于  $53^\circ$ . 当然, 上述边坡角度应是极限值, 在借鉴运用时, 应考虑工程设计安全系数和工程岩体状况, 以利于岩体稳定.

## 4 结论

在高速公路建设中, 尤其是西部山区高等级公路的建设, 不可避免地要面对边坡工程岩体问题. 因此, 如何在修建工程兴利的同时, 最大限度地减少因岩体大量开挖对环境和生态造成的影响, 这是每一个岩体力学工作者都必须正视的问题, 同时, 也是一个亟待解决的岩体力学新课题. 只有这样, 才能推进岩体力学的发展, 从而服务于工程建设.

### 参考文献:

- [1] 李天斌, 王兰生. 卸荷应力状态下玄武岩变形破坏特征的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(4): 321-327.
- [2] 哈秋龄, 李建林, 张永兴, 等. 节理岩体卸荷非线性岩体力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. 208-315.
- [3] Reid M E. Hydraulic factors triggering a shallow hill-slope failure[J]. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 1998, 25: 349-361.
- [4] Shpiro A. Statistical analysis of jointed rock data[A]. Sci and Geomech Abstr[C]. Int J Rock Mech Min, 1991, 28: 375-382.

- [5] 晏同珍,杨顺安,方云. 滑坡学[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2000. 204—208.
- [6] 周志芳. 地下水对边坡稳定性作用的动态效应[J]. 勘察科学技术,1990, (4): 14—19.
- [7] 仵彦卿,张倬元. 岩体力学导论[M]. 成都:西南交通大学出版社,1995. 1—15.
- [8] 加拿大矿物和能源技术中心. 边坡工程手册[M]. 祝玉学,邢修祥,译. 北京:冶金工业出版社,1984. 384—406.

## STUDY ON SLOPE ENGINEERING ROCK MASS OF HIGHWAY IN MOUNTAINOUS AREA

Yan E'chuan<sup>1,2</sup>, Wang Jin<sup>3</sup>, He Miao<sup>1</sup>

(1. *Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*; 2. *Engineering Geology Institute, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China*; 3. *Second Institute of Navigation Exploration and Design of MC, Wuhan 430071, China*)

**Abstract:** With the development of the highway in mountainous areas, the problem of slope engineering rock mass is increasingly manifold in many different ways. For the sake of recognizing the characters of excavation engineering rock mass in nature, the authors, who, based on the unloading rock mass mechanics, discuss the deformation and destruction characters, the methods of stability analysis and the design theories of the slope engineering rock mass. The research results indicate that the characters of deformation and destruction of the slope are not the same as those of the regular loading rock activities, but conforms with those of unloading rock mass mechanical activities. While the stability analysis of slope rock mass emphasizes hydraulics and unloading effect, and some essential expressions are obtained. It is assumed that the excavation design of the slope engineering rock mass will acquire cost efficiency and optimization only if it is worked out based on sufficient recognition of the engineering mechanics with the consideration of the geological characters and all kinds of data available for the stable slopes.

**Key words:** highway in mountainous area; slope engineering rock mass; unloading rock mass mechanics; stability evaluation of rock mass; excavation design.