

# 三峡工程永久船闸高边坡岩体力学特性研究

8  
64-~~67~~70

张永兴 哈秋舫

(重庆建筑大学建筑工程学院 630045)

TU457

**A 摘要** 针对三峡工程永久船闸高边坡的特点,提出了随边坡开挖形成边坡岩体的质量指标、变形模量、强度等的劣化规律及估算方法。指出了通常人们研究岩石边坡时,采用不变的岩体参数进行数值分析、工程设计等,是不能反映这种情况的。采用本文研究成果对三峡工程永久船闸高边坡岩体进行非线性力学分析表明,边坡周边开挖位移与其他单位研究成果有数量级的差别(这些研究成果的最大边坡开挖位移在3 cm左右)。

**关键词** 船闸高边坡, 岩体力学特性, 开挖卸荷, 动态效应

**中图法分类号** TU457

三峡工程永久船闸位于长江左岸,有关部门先后对连续梯级船闸和分散三级船闸两种方案多条线路进行了地质比较工作,并进行了多方面的研究,最后选定双线连续五级船闸IV线船闸方案。线路上起祠堂包,下迄坝河口,总长6 442 m,其中上游引航道长2 113 m,主体段长1 607 m,下游引航道长2 722 m,总水头113 m,设计年单向通航能力5 000万t,是三峡工程主要的通航建筑物。

船闸主体段位于坛子岭以北约200 m的山体中,单级闸室有效尺寸280 m·34 m·5 m(长×宽×水深)。两线船闸之间为60 m宽的岩体中隔墩,整个闸室段均在山体内开挖形成,开挖后形成长1 617 m的左线船闸北坡和右线船闸南坡(简称北坡、南坡)两大高边坡,闸室段最大深度达174.5 m,开挖后北坡最大高度137.8 m,南坡最大高度157.8 m。中隔墩两侧坡高一般50 m左右,最高处达70 m。第一级至第五级闸室段底板开挖高程依次为122.6 m、112.95 m、92.20 m、71.45 m、50.70 m。

永久船闸高边坡作为深挖岩质边坡,在国内外罕见,是世界上最大的通航建筑物之一。它除集长度、高度、重要程度等四大要素于一身外,边坡设计不仅要考虑稳定安全问题,同时必须考虑边坡岩体变形对船闸正常运行的影响。目前边坡设计初步方案已经确定,且已在进行大规模开挖,故永久船闸能否顺利完工并付置运行的关键在于是否对边坡岩体有充分的认识及加固方案的优劣。本文在前人研究成果的基础上,结合三峡工程永久船闸高边坡的特点,对

收稿日期:1995-09-12

张永兴,男,1961年生,工学博士,教授

国家“八五”重点科技攻关课题(85-16-03-05)成果之一

边坡岩体的力学特性作了比较详细的研究。

## 1 三峡工程永久船闸高边坡的特点及要求

1) 三峡工程永久船闸高边坡是从自然岩体中经深切开挖而形成的长、陡、高边坡。由于当地地质自然条件十分复杂,地应力水平高(达 10 MPa),故开挖后初始应力释放范围很大,形成的二次应力场由新的岩石边坡承担,这是一个平面受力条件,与岩石圈的受力条件相比,结构条件要差得多,岩体的变形量值也相对较高。

2) 在大面积开挖条件下形成的陡高边坡,由于没有侧限条件,岩体的稳定及变形问题十分突出。在该边坡下,常有大型船队通过及人类工程活动,因此不允许有任何大的定位块体和小的随机块体的失稳发生。根据船闸金属结构专家组提出的要求,闸门安装后的闸室岩体的时效变形应不超过 5 mm,对岩体的变形要求很高。

3) 鉴于上述两点,需要对该边坡开挖进行较为全面的岩体应力应变再分布规律及稳定性的研究。作这样的研究,需要与此边坡岩体应力应变分布范围和条件相适应的岩体宏观力学参数,这些参数的取得必须充分注意边坡岩体的卸荷特性、各向异性特性、地下水渗透特征等重要因素。

由于该边坡岩体初始地应力值很高,应力释放条件好,又无侧向约束,应力释放范围很大,并有较大的拉应力区,新的卸荷裂隙将有一定数量的发展,地下水渗流场也将相继发生变化,因此,该边坡的稳定问题是十分复杂的。

## 2 边坡开挖卸荷岩体力学特性研究

### 2.1 工程岩强度及变形特性简述

由于船闸区岩体历史悠久,历史上曾经受多次地质构造作用,而多次构造作用的特征不同,从而形成了多组节理裂隙,故岩体的强度远远小于岩石块体的强度。就岩体现状而言,当试验原位岩体变形性状或承载能力时,或是对岩体开挖卸荷时,岩体将追踪一条应力应变曲线,此曲线即是地质构造加、卸载曲线的继续。如图 1 所示。在岩体应力应变曲线中,由于多次地质构造作用,若岩体目前应力状态处于  $a$  点,当岩体卸荷时,将追踪卸荷曲线  $abc$  直至拉应力区。当岩体加载时,将追踪曲线  $ab'c'$ ,直至此时岩体的强度  $c'$ 。由图可见,通常加载的初始模量大于卸荷,岩体的强度  $c'$  点可以说是岩体的残余强度。

在进行原位试验时,通常是采用加载形式,故实际上由此获得的应力应变曲线是加载曲线。因此,以往计算中采用加载曲线的力学参数计算边坡岩体应力应变分布规律是不能反映边坡卸荷特性的。

### 2.2 边坡岩体卸荷试验成果及卸荷参数

为弄清船闸区边坡岩体(花岗岩)的卸荷应力应变关系,重庆建筑大学及葛州坝水电学院等单位均进行了相似模型模拟试验。试验采用混凝土或重晶石粉材料按相似原理分别模拟了船闸区的主要工程岩体(微新花岗岩)的地应力作用过程及开挖卸荷过程,试验结果表明,岩体的卸荷模量比加载情况小。图 2 为典型的试验曲线形式。当卸荷至地应力值  $\sigma_0$  后,将沿  $ab$

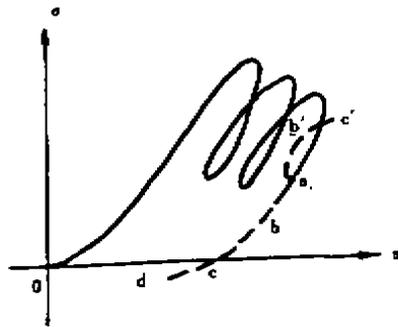


图 1 岩体应力应变曲线示意图

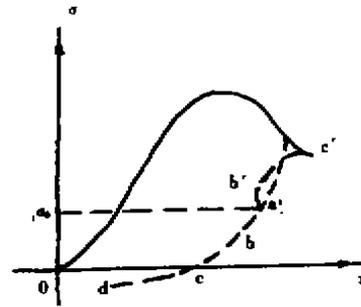


图 2 典型试验曲线图

曲线直至拉力区中。已知加载模量在  $E_0 = 40 \text{ GPa}$  左右 ( $a b' c'$  在  $a$  点切线模量)、卸荷模量 ( $a b c d$  曲线上某点的切线模量) 将减小, 且总体上低于加载模量。经分析, 船闸区微新花岗岩体的卸荷变形模量如表 1。当岩体卸荷比较充分时 (即岩体应力水平为 0 时), 所用试验条件表明岩体的变形模量为加载时的  $1/4$ , 而进入拉应力区时, 则仅为百分之几 ( $0.0126 \sim 0.0627$ )。因此, 作数值计算或稳定分析时, 统一取加载模量  $40 \text{ GPa}$  是不可能反映边坡岩体实际情况的。

表 1 微新花岗岩体卸荷模量  $E_1$  ( $E_0 = 40 \text{ GPa}$ )

岩体应力水平	10 MPa	0	-1 MPa	-3 MPa	-5 MPa
$E_1$	20 GPa	10 GPa	2.50 GPa	1.20 GPa	0.504 GPa
$E_1 / E_0$	0.5	0.25	0.0627	0.0255	0.0126

### 2.3 岩体卸荷的动态效应

岩体开挖卸荷过程中, 由于侧压力的释放, 其变形恢复具动态特征。上述试验成果仅反映了静态卸荷特性。由于岩体变形通常是由结构面控制, 其大部分不可恢复, 因此动态变形将比静态大得多, 岩体开挖卸荷的这种效应称动态效应, 即实际上边坡开挖的卸荷变形模量比表 1 还要小。

本文通过对弹塑性动力效应的求解, 得到了岩体卸荷量级与开挖产生位移的相互关系 (成果将另文介绍)。并对三峡船闸高边坡微新岩体的开挖变形参数进行了研究。

三峡工程永久船闸高边坡的微新岩体, 若地应力  $\sigma_0 = 10 \text{ MPa}$ , 水平变形模量  $E_1 = 25 \text{ GPa}$ , 进入拉应区后, 设岩体达抗拉强度前变形模量为  $E_2 = 2.5 \text{ GPa}$ , 则当考虑开挖动态效应时, 因卸荷开挖引起的最大应变与卸荷量级  $\sigma$  的相互关系如图 3 所示。由图可见在计算条件下, 当卸荷量为  $10 \text{ MPa}$  (地应力量级) 时,  $E$  减小到  $6 \text{ GPa}$ , 是  $E_1$  的  $1/4.6$ 。根据表 1 的试验结果, 由于  $E_2$  远小于所设的  $2.5 \text{ GPa}$ , 故考虑动态效应时,  $E$  的实际量值也将远小于  $6 \text{ GPa}$ , 如考虑反复卸荷及爆破破坏等引起的质量劣化等, 减小量将更大, 上述结果只是卸荷

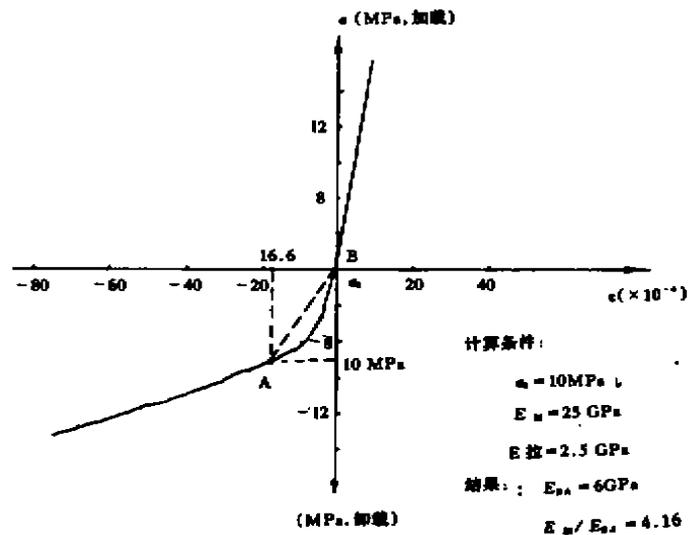


图3 考虑动态效应微新岩体卸荷应力应变曲线

劣化的最保守估计。

### 2.4 卸荷岩体质量指标及其强度参数研究

#### 2.4.1 岩体质量指标 RMR 及其与 Hoek - Brown 强度指标的关系

Bieniowski 建立了考虑岩体五个基本参数的岩体分类系统，并由此确定岩体质量指标 RMR。

Hoek - Brown 根据其在岩石性态方面的理论和实践经验，用试错法导出了岩石破坏时的主应力之间的下列关系式：

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \text{SQRT}(m\sigma_1\sigma_3 + s \cdot \sigma_c^2) \quad (1)$$

式中  $\sigma_1$ ——破坏时最大主应力；

$\sigma_3$ ——作用在试件上的最小主应力；

$\sigma_c$ ——试样中完整岩石的单轴抗压强度；

$m, s$ ——常数，取决于岩石性质，以及达到应力  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  之前岩石的强度。

该公式对于解决岩体工程问题的理论意义和实用价值，已得到了人们普遍的共识。理论上  $m, s$  由三轴实验确定，实际上进行庞大的岩体的三轴现场试验是十分困难的。为了把现场测量或观察结果同准则联系起来，Hoek、Brown 提出用岩体的分类指数来估算岩体材料常数  $m, s$ 。

对于扰动岩体：

$$m / m_0 = \exp[(\text{RMR} - 100) / 14] \quad (2)$$

$$s = \exp[(RMR - 100)/6] \quad (3)$$

对于未扰动岩体

$$m/m_0 = \exp[(RMR - 100)/28] \quad (4)$$

$$s = \exp[(RMR - 100)/9] \quad (5)$$

其中  $m_0$  完整岩石的  $m$  值, 可由三轴试验的结果决定。当无试验数据时,  $m_0$  之值可查表进行估算。

$m$ 、 $s$  确定后, 即可以用式(1)确定岩体的强度。特别地:

1) 当  $\sigma_3 = 0$ , 得到岩体的单轴抗压强度,

$$\sigma_{c, \max} = \sqrt{s} \sigma_c \quad (6)$$

2) 当  $\sigma_2 = 0$ , 得到岩体单轴抗拉强度,

$$\sigma_{t, \max} = \sigma_c / 2 (m - \sqrt{m^2 + 4s}) \quad (7)$$

在岩石边坡稳定性分析中, 为了简化计算, 首先应估计滑面上的正应力  $\sigma_n$  的变化范围, 再根据 Hoek - Brown 准则定义的主应力圆的包络线的切线来确定莫尔——库仑准则的岩体内摩擦角  $\Phi$  和内聚力  $C$ , 如式(8)。

$$\left. \begin{aligned} h &= 1 + 16(m\sigma_c + s\sigma_c) / (3m^2\sigma_c) \\ \theta &= [90 + \arctan(1/\sqrt{h^3 - 1})] / 3 \\ \psi &= \arctan[1/\sqrt{4h \cos^2\theta - 1}] \\ \tau &= (\operatorname{ctg}\psi - \cos\psi)m\sigma_c / 8 \\ C &= \tau - \sigma_n \operatorname{tg}\psi \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Hoek(1980) 根据 Bieniowski(1978) 提供的数据建立了岩体变形模量与 RMR 的关系式为

$$E_m = 2 \cdot RMR - 100 \quad (\text{GPa}) \quad (9)$$

Serafin 和 Pereira(1983) 提供了新的数据并建议采用新的关系式为

$$E_m = 10^{(RMR - 10)/40} \quad (\text{GPa}) \quad (10)$$

这些关系式已被工程界广泛应用及验证。使用现场调查数据及实验室试验数据得知三峡微新花岗岩岩体在现存环境条件下的质量指标 RMR 为 72 左右, 由现场原位试验知该类岩体此时的变形模量约为 35 MPa(据长江水利委员会资料), 此值与式(10)的计算结果比较一致, 因此, 上述关系式可以使用于三峡花岗岩岩体。

#### 2.4.2 利用变形模量反算岩体强度

根据 2.2 及 2.3 对边坡开挖卸荷岩体变形参数的研究, 我们可以对卸荷岩体的变形模量  $E_m$  做出较为切合实际的估计, 则可依式(10)得岩体质量指标 RMR 为

$$RMR = 40 \lg E_m + 10 \quad (11)$$

将 RMR 代入式(2)~式(8)即可得到卸荷岩体的各个强度参数。由于在卸荷过程中  $E_m$  是不断减小的, 因此, RMR 也将不断减小, 反映了岩体质量不断劣化的过程。Hoek - Brown 提出的对边坡岩体质量应根据结构面对边坡的不利程度分别减小 5~60 分, 实际上应按卸荷程度来判断该减小多少。表 2 为  $E_m$  取某些数值时的岩体质量指标 RMR、岩体的强度参数  $m$ 、 $s$  及单轴抗压、抗拉强度。

表2 不同  $E_n$  时的岩体质量及强度参数

$E_n$	RMR	$m$	$s$	$R_c$	$R_t$
2.000 000 00	22.041 200 64	0.095 406 38	0.000 002 28	0.271 549 79	-0.004 292 80
4.000 000 00	34.082 401 28	0.225 479 95	0.000 016 93	0.740 687 55	-0.013 512 79
8.000 000 00	46.123 600 01	0.532 890 98	0.000 125 98	2.020 321 85	-0.042 534 15
16.000 000 00	58.164 798 74	1.259 414 79	0.000 937 28	5.510 691 17	-0.133 879 62
32.000 000 00	70.206 001 28	2.976 455 21	0.006 973 30	15.031 133 65	-0.421 376 38
64.000 000 00	82.247 200 01	7.034 444 33	0.051 881 14	40.999 378 20	-1.326 165 08

### 3 结束语

如上所述,边坡岩体质量是随边坡开挖形成不断劣化的,其显现即为边坡周边产生拉裂缝、周边位移的不断加大、岩体失稳等形式,其实质为岩体质量指标的不断减小、岩体变形模量的降低、岩体强度的丧失等。通常人们研究岩石边坡时,采用不变的岩体参数(例如花岗岩做新岩体的变形模量取 40 GPa)进行数值分析、工程设计等,是不能反映这种情况的。采用本文研究成果对三峡工程永久船闸高边坡岩体进行了非线性力学分析,得到的边坡周边开挖位移与其他单位研究成果有数量级的差别(这些研究成果的最大边坡开挖位移在 3 cm 左右)。有关试验成果、数值分析成果等笔者将另文报道。

### 参考文献

- 1 哈秋岩,张永兴. 岩石边坡工程,重庆大学出版社,1995.6
- 2 张永兴. 岩石高陡边坡的岩体模型及其参数研究. 岩土工程学报,1995,(4)
- 3 P. E. Hoek. When is a design in rock engineering acceptable? 7th international congress on Rock Mechanics, Aachen, Germany - 16 to 20 September, 1991

(编辑:王秀玲)

## Mechanical Properties of Rock Mass in the High Slope of the Permanent Sluiceways of the Three Gorge Dam

*Zhang Yongxing Ha Qiuling*

(The Research Institute of Rock Engineering, Chongqing Jianshu University)

**Abstract** This paper presents degradation rules and evaluation methods of mass index, deformation elasticity of modulus and strength, with the excavation of slopes and the formation of slope rock, on the basis of characteristics of the high slope of the permanent sluiceways of the Three Gorge Dam. It is pointed out that the usual way to carry out numerical analysis and engineering design of the rock slope using constant rock parameters can not account for such variations. Nonlinear mechanical analysis show that the difference between the peripheral excavation displacement and other results (the maximum is about 3 cm) is in magnitude.

**Key Words** high slope of sluiceways, mechanical properties of rock, excavation unloading, dynamic effect