

三峡船闸高边坡岩体的细观损伤 及长期稳定性研究*

孙 钧 凌建明

(同济大学 上海 200092)

摘要 通过扫描电镜下的一系列加载试验,对三峡船闸高边坡的闪云斜长花岗岩的细观损伤特性进行了研究;在此基础上,依据脆弹性岩体的细观损伤理论,进一步分析了岩石细观时效损伤对高边坡岩体稳定性的影响。

关键词 三峡工程, 船闸边坡, 岩体, 细观损伤, 长期稳定性

1 引言

永久船闸是三峡水利枢纽的一个重要组成部分。由于三峡工程特殊的重要性以及船闸建成以后极高的安全要求,不仅需要保证船闸高边坡的整体稳定,不允许施工期内出现大的滑坡、塌方或崩塌,运行期间发生过量的变形或任何的松动、掉块与开裂,而且要求保证工程建成以后具有长期的稳定性。

组成三峡船闸高边坡的岩体,岩石坚硬,结构完整,结构面数量少,产状相对船闸轴线非常有利,因而其整体稳定性应该是好的。但是,对边坡岩体的局部变形和破坏仍需要作更加全面、深入的探讨,其力学机理除边坡坡面与原有结构面组合产生随机块体或半定位块体以外,主要有两种:

(1) 高陡边坡在开挖形成过程中,一定范围内的岩体发生卸荷效应,产生二次应力场,导致岩体中的细观损伤不断累积和发展,形成宏观的卸荷裂隙,并逐步与原有的节理裂隙相连接,在某些部位出现新的非稳定块体,影响边坡的局部稳定性;

(2) 岩体受地应力场及外载长期作用,尤其当应力相对其强度达到较高水平时,这种脆弹性岩石仍可表现出相当的时效损伤和变形,进而对边坡的长期稳定产生不利影响。

因此,深入研究闪云斜长花岗岩的细观时效损伤行为及其对边坡稳定性的影响是十分重要的。本文通过扫描电镜下的一系列加载试验,对三峡船闸高边坡的闪云斜长花岗岩的细观损伤特性进行了研究;在此基础上,依据脆弹性岩体的细观损伤理论,进一步分析了岩石细观时效损伤对高边坡岩体稳定性的影响。

1996年11月18日收到初稿,1996年12月22日收到修改稿。

* 国家自然科学基金委员会和中国长江三峡工程开发总公司联合资助的国家自然科学基金重大项目

2 船闸边坡岩体细观损伤特性

2.1 试验方法与内容

试验所用的主要设备是 Cam Scan 400-DV 扫描电子显微镜, 其最大放大倍数为 20 多万倍。该设备除具有大的样品空间外, 最大的特点是配备有相当精度的拉压加载装置。通过这一装置, 可以在镜下对试样在各种加载(单轴压缩、单轴拉伸、恒定荷载、恒定位移等)过程中所出现的情况进行详尽的观测研究。在镜下, 可对加载实验过程中的荷载和位移作出实时、精确的量测或显示; 并可对加载台的工作状态(位移量和荷载大小)进行准确控制。

本次试验选取船闸区弱风化下带的镶嵌结构闪云斜长花岗岩作为试样。由于电镜加载台最大压缩荷载和承载支架最大间距的限制, 将试样精密加工成 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ (近似)的方柱体。

试验内容包括细观组构测试与分析、单调压缩加载破坏试验、单调拉伸加载破坏试验、时效(蠕变)加载试验以及破坏形态分析等。

2.2 试验结果

2.2.1 岩石组构及初始细观损伤特征

镜下观察表明, 船闸区的闪云斜长花岗岩的初始细观损伤主要表现为矿物晶体之间的界面裂纹、结晶界面、各种形式的微裂纹以及少量的孔隙和空洞。为了对岩石的初始细观损伤作定量评价, 并便于应用细观裂纹损伤模型分析边坡岩体的有关性态, 作者选取 8 个试样, 并采用扫描窗的方法, 在观察面上测定了岩石的细观裂纹密度 Q_a 。各试样的细观裂纹密度 Q_d 如表 1 所列。表中, Q_d 直接由公式 $Q_d = Q_a^{3/2}$ 求得。

表 1 岩石的细观裂纹密度

Table 1 Density of meso cracks in the rock

试样编号	细观裂纹(平面)密度 Q_a	细观裂纹体积密度 Q_d
G3	0.075 6	0.020 8
G14	0.061 4	0.015 2
G5	0.071 0	0.018 9
G7	0.057 8	0.013 9
G8	0.073 9	0.020 1
G17	0.069 7	0.018 4
G20	0.078 0	0.021 8
G24	0.056 1	0.013 3
平均值	0.067 9	0.017 8

表 2 岩石的单轴抗压强度和弹性模量

Table 2 Uniaxial compressive strength and elastic modulus of the rock		
岩样编号	单轴抗压强度 σ_c /MPa	弹性模量 E_s /GPa
G1	88.72	10.20
G2	93.55	9.07
G5	82.86	9.38
G12	104.38	8.01
G15	83.03	9.69
G19	114.30	9.61
G21	89.86	9.33
G23	90.23	9.71
平均值	93.37	9.38

2.2.2 单调加载条件下岩石的强度变形及破坏特征

大多数岩石试件的单轴抗压强度和弹性模量都很高, 如表 2 及图 1 所示。这些岩样破坏时表现出典型的脆-弹性。破坏形态以纵向开裂为主, 并沿晶体颗粒逐步发展; 破坏前夕, 分支交叉裂纹比较发育; 宏观主裂纹贯通后, 则出现沿主裂纹的剪切错移, 但剪错位移量较小。这说明, 在远场的单轴压应力条件下, 闪云斜长花岗岩的初始损伤演化机制主要是拉张开裂, 当损伤累积到相当程度时, 这一情况逐渐向压剪机制转化。但也有个别试件的 σ_c 和 E_s 都明显低于表 2 所列的数据, 分别仅为 58.90 MPa 和 7.74 GPa。观察表明,

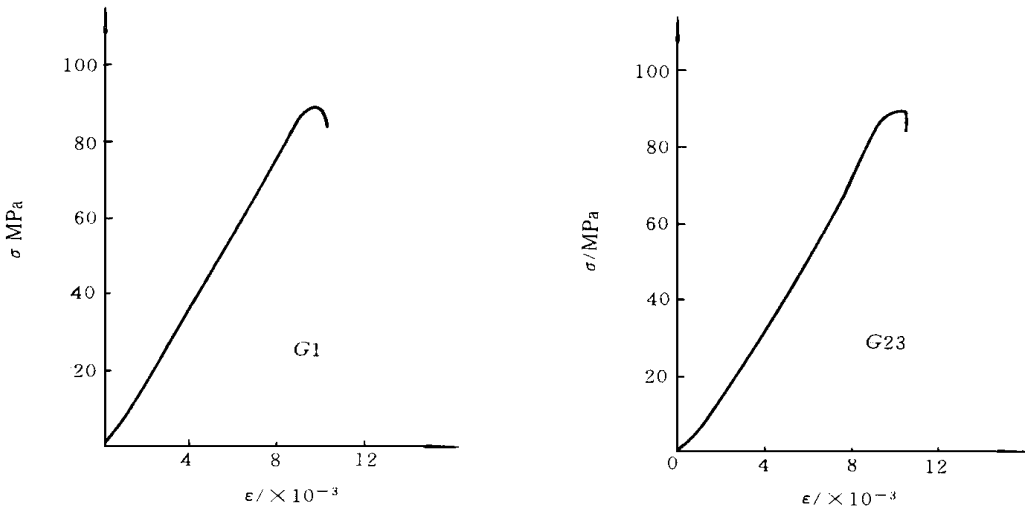


图 1 岩石的应力—应变关系曲线

Fig. 1 Stress-strain relationship curves of the rock

出现上述情况的根本原因在于这几个试验的强度和破坏受到了岩石不均匀分布的云母矿物的控制, 其破坏在细观形态上表现为沿云母片的剪切错移, 但剪错的位移量并不大, 如图 2 所示。

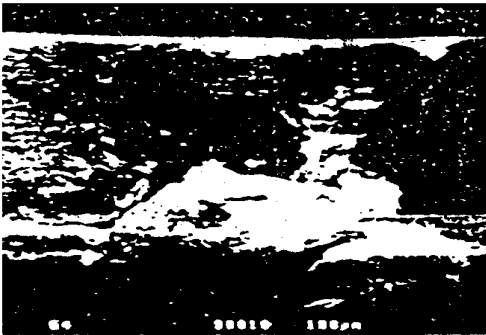


图 2 G4 的细观破坏形态
Fig 2 Failure characteristics of the sample G4 on meso scope

本次还进行了 8 个试样的单轴拉伸试验, 其中, 一块因夹具原因而失败, 其余 7 个试样的单轴抗拉强度 σ 平均为 6.28MPa, 可见, 岩石的单轴抗拉强度大约为单轴抗压强度的 1/15。岩石拉伸破坏的细观形态主要是横向沿晶体颗粒的拉张断裂, 断面形态呈锯齿状。

2.2.3 细观条件下岩石的时效损伤及蠕变特征

作者在总结以往试验体会的基础上, 本次选取 12 个试样进行电镜加载条件下的细观蠕变损伤试验。虽然电镜的加载时间比较有限, 但设备的先进性保证了 12 个试样中的 5 个实现了预定的蠕变试验目的。图 3、图 4 分别为试件 G3 和 G22 的蠕变曲线。由此可见, 尽管组成三峡船闸高边坡的闪云斜长花岗岩坚硬致密, 为典型的脆-弹性岩石, 但当应力水平较高时, 仍然可以表现出相当显著的蠕变时效特征。因此, 在进行船闸高边坡稳定性分析时, 除考虑结构面及其软弱充填物力学特性的时效性外, 还应充分重视岩石材料本身的蠕变行为。

作者在总结以往试验体会的基础上, 本次选取 12 个试样进行电镜加载条件下的细观蠕变损伤试验。虽然电镜的加载时间比较有限, 但设备的先进性保证了 12 个试样中的 5 个实现了预定的蠕变试验目的。图 3、图 4 分别为试件 G3 和 G22 的蠕变曲线。

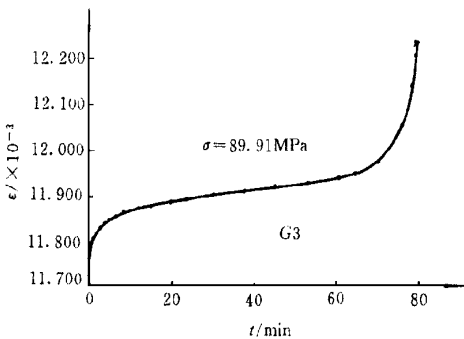


图 3 G3 岩样的细观蠕变试验曲线
Fig 3 Creep test curve of the sample G3 obtained with SEM

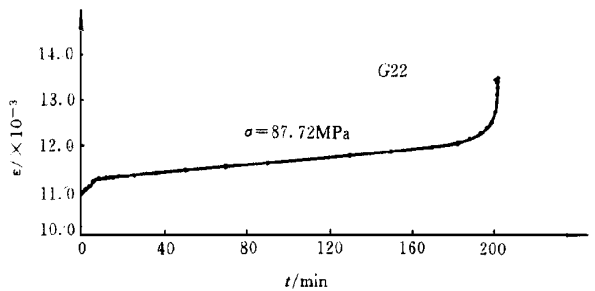


图 4 G22 岩样的细观蠕变试验曲线
Fig 4 Creep test curve of the sample G22 obtained with SEM

与一般的脆-弹性岩石相类似, 三峡工程的闪云斜长花岗岩在蠕变条件下的细观损伤主要表现为:

- (1) 在低应力水平时, 除介质挤压密实、少数原始裂纹张开或压闭等局部结构调整外, 仅有少量新的细观损伤随时间增长而产生。

(2) 在较高应力水平的持续作用下, 岩石的组构随时间不断变化, 不仅表现在蠕变变形过程中大量细观分布裂纹的产生和发展, 而且可以逐渐形成细观主裂纹, 并继续扩展。

(3) 细观主裂纹出现以后, 多数试件保持较平缓的蠕变速率, 在电镜加载允许的时间尺度范围内无法进入蠕变 III 阶段; 而少部分试件因应力水平很高, 与试件本身的抗压强度比较接近, 所以在较短的时间内进入蠕变 III 阶段, 细观主裂纹也迅速发展为贯通性裂面, 从而使试样发生蠕变断裂。

本次试验中, 岩石发生蠕变破坏的应力水平平均为单调加载单轴抗压强度平均值的 86.0%。

3 岩体稳定性的细观时效损伤分析

3.1 三峡船闸高边坡岩体稳定性分析的细观裂纹损伤模型

对脆-弹性岩石及其所组成的岩体的损伤机理的研究^[2]表明, 脆-弹性岩石损伤最重要的内容就是细观裂纹损伤。岩石损伤发展过程中, 其“细观裂纹(体积)密度” Q_d 是单调增加的, 而且损伤率与 Q_d 的变化率成正比。所以, Q_d 可以较好地反映脆-弹性岩石细观损伤的状态特征, 故选取 Q_d 作为与细观裂纹损伤相关的内状态变量。另一方面, 细观裂纹的发展必然导致岩石的“即时泊松比” ν_t 连续单调增大。

根据作者的研究^[3], 损伤变量 D 的定义式及 Q_d 可表述为

$$D = 1 - \bar{E}/E = [(2 - \nu_t)/(1 - \nu_t)] Q_d \quad (1)$$

$$Q_d = [1/(12\nu)] [(\nu_t - \nu)/(3 - \nu_t)] \quad (2)$$

式中, \bar{E} 、 ν ——岩石无损状态(或原始状态)时的变形模量和泊松比;

\bar{E} 、 ν_t ——岩石受细观裂纹损伤状态下的有效变形模量和即时泊松比。

由岩石细观裂纹的几何特征及体积比的概念, 并应用线弹性断裂力学的有关研究结果, Q_d 可进一步表达为

$$Q_d = k_d B [A_s K_{Ic}^2 / (\pi E^2)]^3 \epsilon^{\xi} \quad (3)$$

式中, k_d 、 B 、 ξ ——材料常数;

A_s ——与裂纹形态和材料泊松比相关的系数;

K_{Ic} ——平面应变断裂韧度;

ϵ ——轴向应变。

将式(3)代入式(1)后便可得到损伤演化方程并写成

$$D = C_d \epsilon^{\xi} \quad (4)$$

式中, C_d 是反映细观裂纹损伤与应变间相关关系的综合常数。于是

$$Q_d = [(1 - \nu_t)/(2 - \nu_t)] C_d \epsilon^{\xi} \quad (5)$$

由应变等效假定, 可得到脆性岩石的细观裂纹损伤本构模型

$$\sigma = E \epsilon - E C_d \epsilon^{\xi} \quad (6)$$

系数 C_d 、 ξ 可由单轴压缩 $\sigma-\epsilon$ 全过程曲线的峰值点 (σ_p, ϵ_p) 求定。即

$$\xi = (6E \epsilon_p - 5\sigma_p) / (E \epsilon_p - \sigma_p) \quad (7)$$

$$C_d = \epsilon_p^{(\xi-5)} (\epsilon_p - \sigma_p/E) \quad (8)$$

联立式(1)和式(2), 可得到如下求算即时泊松比 ν_1 的方程式

$$(12D\nu + 1)\dot{\nu}_1^2 - (48D\nu + \nu + 2)\dot{\nu}_1 + (36D + 2)\nu = 0 \tag{9}$$

对三峡船闸边坡而言, 宏观试验测得无损完整闪云斜长花岗岩的泊松比 $\nu = 0.23$ 。于是, 根据细观组构测试所得的初始细观裂纹体积密度 Q_d , 由式(1)求得岩石的初始损伤值 D_a (平均值) 为 0.0409。从单调加载条件下 G1, G5, G19 和 G23 等四个岩石试件的细观损伤破坏试验所得到的 σ_p 和 ϵ_p , 可求得岩石细观裂纹损伤模型中的两个参数, 其平均值分别为 $\xi = 15.297$, $C_d = 2.099 \times 10^{17}$ 。

将有关参数代入式(6), (4), 可分别得到三峡船闸高边坡岩体稳定性分析的细观裂纹损伤模型及损伤演化方程:

$$\sigma = 9.38\epsilon - 1.97 \times 10^{18} \epsilon^{10.297} \text{ (GPa)} \tag{10}$$

$$D = 2.099 \times 10^{17} \epsilon^{9.297} \tag{11}$$

将 $\nu = 0.23$ 和岩石破坏时的损伤张量 $D_f = 0.0972$ (各试件的平均值) 代入式(9), 即可求得岩石破坏时的即时泊松比 $\nu_{1f} = 0.47$ 。可见, 岩石的初始损伤值为 0.0409, 而破坏时的损伤值也仅为 0.0972, 说明这种脆-弹性岩石在整个变形破坏过程中, 损伤仅局限在主裂纹附近的较小范围内, 且破坏形态为强脆性; 然而, 岩石破坏时的泊松比已由无损时的 0.23 增大到 0.47, 表明破坏前夕的扩容现象十分显著。

3.2 边坡岩体稳定的细观时效损伤分析

作者从大量岩石蠕变试验和理论分析, 提出以下率相关蠕变本构关系[4]

$$\dot{\epsilon}_1 = \alpha_1 \epsilon_1^{\gamma} (\sigma_1/\sigma_0)^{\delta} \tag{12}$$

式中, α_1, γ, δ —材料常数, 由试验确定;

σ_0 —参考应力, 可取岩石单轴抗压强度 σ_c 。

利用初始条件: $\epsilon_1|_{t=t_0} = \epsilon_0$ 以及蠕变时间

$$t_0 = \alpha_1^{-1} (\gamma + 1)^{-1} \epsilon_0^{\gamma+1} (\sigma_1/\sigma_0)^{\delta} \tag{13}$$

积分式(12)。可得

$$\epsilon_1 = \epsilon_0 [(t - t_0)/t_c + 1]^{1/(\gamma+1)} \tag{14}$$

由于式(4)将损伤变量直接与全应变联系在一起, 因此该模型不仅可用于岩石的脆-弹性损伤或“弹塑性”损伤, 而且还适用于与时间相关的细观裂纹损伤分析。将式(14)代入式(4), 有

$$D = D_a [(t - t_0)/t_c + 1]^{(\xi-6)/(\gamma+1)} \tag{15}$$

式中, $D_a = D|_{t=t_0} = C_d \epsilon_0^{\xi-6}$ (或由试验得到)。

对于三峡船闸边坡, $D_a = 0.0409$, $D_f = 0.0972$, $\xi = 15.297$ 。因 $t = t_0$ 时, $D = D_f$, 代入式(15), 可求得 $\gamma = 6.444$ 。

取 $\sigma_c = \sigma_c$, 并 G3 和 G22 的 t_c, ϵ_0 和 σ_1 (由图 3、图 4 得到) 分别代入式(13), 建立一方程组, 可求得 $\alpha_1 = 9.43 \times 10^{-19}$, $\delta = 56.953$ 。代入式(12), 得到三峡船闸高边坡岩石考虑细观损伤效应的蠕变本构方程

$$\dot{\epsilon}_1 = 9.43 \times 10^{-19} \epsilon_1^{6.444} (\sigma_1/93.37)^{56.953} \tag{16}$$

对于三峡船闸高边坡, 其地应力水平取高限 $\sigma_1 = 10 \text{ MPa}$, 初始应变变量取 $\epsilon_0 = 10^{-5}$, 由



其蠕变断裂时间可由式(13)求得, 为 4.066×10^{29} 年。这就是说, 仅从岩石材料的蠕变断裂时间看, 边坡的长期稳定性相当好。

4 结论

(1) 本文采用扫描电镜直接加载的方法, 成功地对三峡船闸区闪云斜长花岗岩进行了细观时效损伤试验, 不仅取得了项目进一步研究所需的若干重要数据, 而且为岩石力学研究提供了一条崭新的途径。

(2) 组成船闸高边坡的岩体一方面具有极强的脆-弹性特征, 作者应用脆-弹性岩体的细观损伤理论, 建立了三峡船闸高边坡岩体稳定性分析的细观裂纹损伤模型; 另一方面, 这种岩石在应力水平很高时, 可以表现出十分显著的时效损伤行为, 但是根据当前地应力水平, 且仅从岩石材料的蠕变断裂时间看, 三峡船闸高边坡的长期稳定性是相当好的。

参 考 文 献

- 1 董学晟 三峡工程船闸高边坡研究 长江科学院院报, 1994, 11(3): 20- 26
- 2 凌建明 压缩荷载条件下岩石细观损伤特征的研究 上海: 同济大学学报, 1993, 21(2): 219- 226
- 3 凌建明, 孙钧 脆性岩石的细观裂纹损伤及其时效特征 岩石力学与工程学报, 1993, 12(4): 304- 312
- 4 凌建明 岩体蠕变裂纹起裂与扩展的损伤力学分析方法 上海: 同济大学学报, 1995, 23(2): 141- 146

ON MESO DAMAGE BEHAVIOUR AND LONG-TERM STABILITY OF HIGH SLOPE ROCK OF THE THREE GORGES SHIPLOCKS

Sun Jun Ling Jianming
(Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract With a scanning electron microscope, the authors carried out a series of tests on the amphibole-plagioclase granite, taken from the weakly-weathered zone of the high slope of the Three Gorges shiplocks, and investigated the meso time-dependent damage behaviour of the rock. Then, on the basis of the meso damage theory for brittle-elastic rock mass, which was established by the authors, this paper analysed the influences of meso time-dependent damage of the rock on the stability of the shiplocks slope. It is shown that the long-term stability of the slope will be very good if only from the point of view of the creep rupture time of the rock material.

Key words Three Gorges, slope of shiplocks, rock mass, meso damage, long-term stability