

损伤流变模型在三峡船闸高边坡稳定分析的初步应用*

朱维申 邱祥波 李术才 张玉军

(中国科学院武汉岩土力学研究所 武汉 430071)

摘要 将损伤力学理论应用于岩石力学, 建立节理岩体的损伤力学模型, 并采用粘弹-粘塑性理论和有限元法, 编制了平面有限元计算通用程序对三峡船闸高边坡稳定性进行了模拟边坡开挖过程的损伤流变分析。

关键词 三峡船闸, 高边坡, 稳定性, 损伤流变

1 前言

由于节理岩体内存在的大量节理和裂隙, 采用弹塑性力学的均质、连续等假定, 已不能满足实际工程需要。近年来发展起来的损伤力学理论为节理岩体的研究提供了新的思路。同时, 考虑到岩体的流变属性, 采用适当的流变模型来模拟其流变力学特性, 也是十分重要的。近年来损伤力学与流变力学理论的发展及其工程中的应用已开始得到重视, 如文献[1]提出的岩体损伤断裂模型以及文献[2]中叙述的蠕变理论模型。但是目前大多往往只考虑其损伤特性或只考虑流变特性, 少有同时考虑二者的工程应用。

本文作者采用所建立的损伤力学模型和粘弹-粘塑性流变模型, 编写了通用有限元计算程序, 并针对三峡船闸20号剖面进行了模拟边坡开挖过程的损伤流变分析。在相同支护情况下, 给出了粘聚力 c 取不同值时分别考虑损伤流变与不考虑损伤流变的计算结果, 并对计算结果进行了比较分析。

2 损伤模型^[1]

对于存在成组节理的岩体, 如岩体中存在 N 条节理, 第 K 条节理面积为 $a^{(k)}$, 单位法向矢量为 $n^{(k)}$, 得岩体的损伤张量为

$$\bar{\Omega} = \frac{1}{S} \sum_{k=1}^N a^{(k)} n^{(k)} \otimes n^{(k)} = \frac{L}{V} \sum_{k=1}^V a^{(k)} n^{(k)} \otimes n^{(k)} \quad (1)$$

有效应力为

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(I - \bar{\Omega})^{-1}$$

1997年4月21日收到初稿, 1997年6月10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

考虑节理面可以传递应力, 应对有效应力进行修正, 引入传压、传剪系数 C_n, C_s , 有

$$\bar{\sigma}^* = \bar{S} (I - C_s \bar{\Omega})^{-1} + H \bar{\sigma} \bar{\sigma} (I - \bar{\Omega})^{-1} + H - \bar{\sigma} \bar{\sigma} (I - C_n \bar{\Omega})^{-1} \quad (2)$$

式中: $\bar{\sigma} = \frac{1}{3} tr(\sigma)$ 为体应力; $\bar{\sigma} = \sigma I$ 为体应力张量; $\bar{S} = \sigma - \bar{\sigma} I$ 为偏应力张量;

$$H X = \begin{cases} 1, & X > 0 \\ 0, & X \leq 0 \end{cases}$$

有限元法解析参见文献[3]。

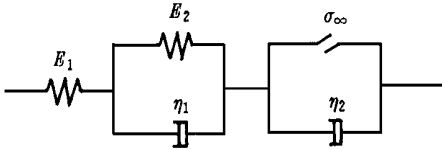


图 1 流变模型

Fig 1 Rheology model

3 流变模型

考虑岩体具有的粘弹、粘塑性, 选取西原流变模型。并引用Ducker-Prager 屈服准则和相关联的流动法则, 见图 1。

(1) 当屈服函数 $F < 0$ 时, $t + \Delta t$ 时刻的粘弹性应变为

$$\{\epsilon_e\}_{t+\Delta t} = \{\epsilon_e\}_t \exp\left[-\frac{q_0}{q_1} \Delta t\right] + \frac{[A]\{\sigma\}}{q_2} \left[1 - \exp\left[-\frac{q_0}{q_1} \Delta t\right]\right]$$

假设时步 Δt 内, $\{\sigma\}_{i-1}$ 保持不变, 可求出该时步内的 $\{\Delta \epsilon_e\}_i$, 从而有

$$\{\Delta F_{ve}\}_i = \int_{\Omega} [B]^T [D] \{\Delta \epsilon_e\}_i d\Omega$$

式中: $\{\Delta F_{ve}\}_i$ 为 Δt 时步内粘弹性应变引起的附加结点力; $[B]$ 为几何矩阵; $[D]$ 为弹性矩阵。于是

$$[k] \{\Delta \delta\}_i = \{\Delta F_{ve}\}_i$$

从而有

$$\{\Delta \epsilon\}_i = [B] \{\Delta \delta\}_i$$

$$\{\Delta \sigma\}_i = [D] (\{\Delta \epsilon\}_i - \{\Delta \epsilon_e\}_i)$$

$$\{\sigma\}_i = \{\sigma\}_{i-1} + \{\Delta \sigma\}_i \quad (3)$$

(2) 当屈服函数 $F = 0$ 时, 表明单元已进入粘塑性阶段, 粘塑性应变率为

$$\dot{\epsilon}_p = \frac{F}{\eta_l F_0} \left[\frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} + \frac{[P]}{9 a_n} + \frac{\sqrt{3} [Q]}{2 \sigma} \right] \{\sigma\}$$

式中: F_0 ——为使系数无量纲化, 对屈服函数 F 取用的任意参考值, 可取为 1;

η_l ——粘性系数。

对平面问题, 有

$$[P] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad [Q] = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & 0 \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

假设 Δt 时步内 $\{\dot{\epsilon}_{vp}\}_{j-1}$ 为常值不变, 则 t_j 时刻的粘塑性应变增量为

$$\{\Delta\epsilon_{vp}\}_j = \{\dot{\epsilon}_{vp}\}_{j-1}\Delta t$$

于是 $\{\Delta F_{vp}\}_j = \int_{\Omega} [B]^T [D] \{\Delta\epsilon_{vp}\}_j d\Omega$

式中: $\{\Delta F_{vp}\}_j$ ——在 t_j 时刻粘塑性应变引起的附加节点力。

有限元解析同公式(3), 采用 Drucker-Prager 屈服准则时, 时步增量的限制已由柯墨 (Comeau) 从一阶非线性微分方程数值解的稳定条件推得

$$\Delta t \leq \frac{4\sqrt{3}(1+\mu)\eta\sigma F_0}{3EF}$$

和
$$\Delta t \leq \frac{(1+\mu)(1-2\mu)\eta F_0}{E} \frac{(3-\sin\varphi)^2}{\frac{3}{4}(1-2\mu)(3-\sin\varphi)^2 + 6(1+\mu)\sin^2\varphi}$$

式中: E 为弹性模量; η 为粘性系数。 Δt 取上式计算结果较小者。

4 计算条件

岩体力学参数、初始地应力场及锚杆(索)参数与文[5]相同, 此处略。

4.1 岩体损伤力学参数

三峡船闸区岩体节理分布的几何参数统计见表 1。

根据式(1), 对平面有限元分析, 取二维损伤张量

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.08 \\ 0.08 & 0.1 \end{bmatrix}$$

根据节理面的性质, 闭合节理可以传递压应力, $C_n = 0$, 取 $C_s = 0.8$ 。

表 1 岩体节理参数统计表

Table 1 Rock joint parameters

节理组	边线长度/m		间距/m	倾角
	平均值	方差	平均值	平均值
A	2.94	1.08	1.85	SE 70°
B	3.82	0.52	1.20	SW 71°

表 2 流变计算参数

Table 2 Rheology analysis parameters

岩体名称		粘滞系数 η
闪云 斜长花 岗岩	全风化	650
	强风化	6 000
	弱风化	55 000
	微新	100 000
断层		10 000

4.2 岩体流变参数

根据文献[4], 给出流变参数如表 2。

计算中取 $\eta = \eta_1 = \eta_2$, $E_1 = E_2 =$ 岩石弹性模量, 根据实际工程进度, 确定每年挖步流变时间为 100 d。

4.3 有限元网格及开挖、支护步骤

本次计算船闸区 20 号剖面离散为 1959

个结点和 2 119 个单元,以四边形等参元为主,含部分三角形单元和节理单元,锚杆处理为杆单元。预应力锚杆(素)的作用简化为杆(素)端部分的两个集中力。共分 7 个步骤开挖,计算域见图 2,有限元网格同文[5],此处略。

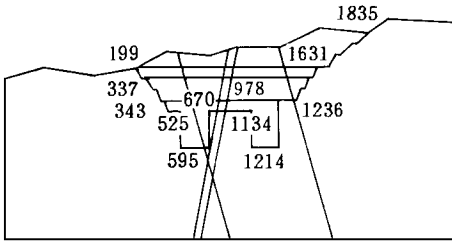


图 2 计算区域边界若干点位置分布图
Fig 2 Distribution of some points on boundary of analysis area

5 计算结果与分析

计算中为了分析 c 值变化与损伤流变对于三峡开挖边坡的影响,共进行了 4 种工况的计算分析:

- 工况 1: c 取低值时,不考虑损伤流变的影响
- 工况 2: c 取低值时,考虑损伤流变的影响
- 工况 3: c 取高值时,不考虑损伤流变的影响
- 工况 4: c 取高值时,考虑损伤流变的影响

5.1 边坡开挖后的位移

考虑流变的两种工况时每一步开挖后岩体的变形均在约 20 d 以前变化较大,经历 20 d 左右变形呈平稳变化,约 90 d 左右变形基本稳定。

开挖边界上若干点的位置见图 2。

工况 1 与工况 2 时最终开挖的边界上若干点的位移值见表 3。

表 3 第七步开挖后边界上若干点位移

Table 3 D displacement of some points on boundary after the 17th excavation cm										
节 点	199	337	525	595	670	1134	1214	1238	1631	1835
工况 1	2 115	0 871	1 005	1 048	3 074	3 259	2 434	3 018	1 517	1 266
工况 2	4 03	1 006	1 894	1 332	4 852	5 475	3 155	5 595	1 939	1 306
工况 3	2 115	0 871	1 005	1 048	3 077	3 261	2 439	3 034	1 515	1 266
工况 4	2 537	0 922	1 280	1 156	3 418	3 323	2 795	3 892	1 567	1 298

从最终位移矢量图上来看,总体位移趋势呈回弹型,边坡上部的位移矢量接近于水平,不考虑损伤流变时水平位移值为 1.954 7cm,考虑损伤流变时为 3.434 cm。最大竖向位移出现在中隔墩右上角,分别为 3.2 cm (工况 1)和 4.59 cm (工况 2)。此外,右闸室边墙顶部的位移值也较大。对于左侧闸室,边墙顶部的水平位移值很小,只有 0.037 cm,主要由于此处布置了较强的预应力锚素。

由计算结果可看出,考虑损伤流变时,边坡总体位移值均有所增加,在坡顶部,位移值增加了约 1.4 cm,个别点达到 1.9 cm,主要以 x 方向的位移增加为主,左闸室直墙顶部增加了 0.89 cm,右闸室边墙顶部位移值变化达到了 0.577 cm (c 取低值)和 0.985 8cm (c 取高值)。中隔墩的位移矢量在工况 1 时有整体向上、左侧略向左闸室方向倾斜的位移趋势。考虑损伤流变后,中隔墩左侧的位移值最大增加了 1.78 cm (c 取低值)和 0.34 cm (c 取高值)。中隔墩中线及其右侧的位移矢量方向变化较大,整体向右闸室倾斜,这主要是由于受斜穿过

中隔墩的两条断层的影响。水平位移增量最大为 3.6 cm, 竖向位移增量最大为 1.4 cm。

5.2 岩体中塑性区与受拉区分析

船闸区开挖最终的塑性区分布见图 3、图 4, 工况 1 时, 塑性单元有 911 个, 工况 2 时有 1 000 个单元, 工况 3 的塑性区单元有 289 个, 工况 4 时有 375 个单元。

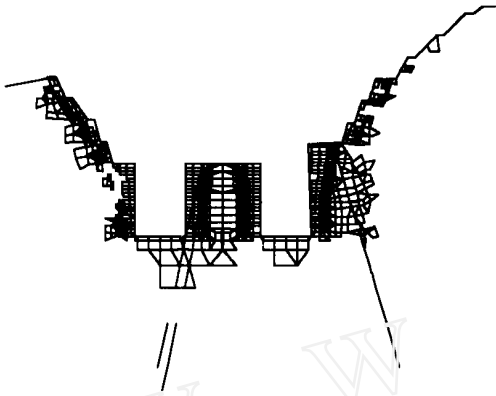


图 3 塑性区分布图 (工况 1)

Fig. 3 Distribution of plasticity area (case 1)

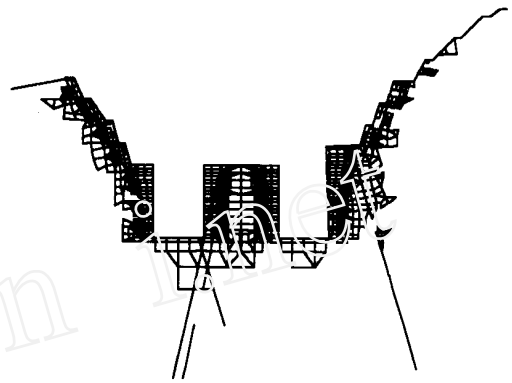


图 4 塑性区分布图 (工况 2)

Fig. 4 Distribution of plasticity area (case 2)

工况 1 时受拉区单元有 207 个, 工况 2 时受拉区单元有 241 个, 受拉区单元主要分布于开挖表面与结构面附近。(此处略)

5.3 岩体中锚杆轴力

工况 1 时, 锚杆轴力大多数在 2~7 kN 范围, 少数在 20~70 kN 之间。工况 2 时, 锚杆轴力多数在 3~11 kN 之间, 少数在 15~80 kN 之间。总体来说, 考虑损伤流变后多数锚杆轴力有所增加, 增量在 1~4 kN 范围内。

5.4 计算值与观测值的对比

根据 1985 年底前长江科学院提供的现场监测结果, 将船闸南坡 $\nabla 230$ 点与 $\nabla 245$ 点在第一期开挖工作结束时观测的水平位移与计算所得相应点水平位移比较后说明, 计算所得位移趋势接近观测结果, 后期量值稍小于观测结果。由于目前的力学模型尚未能充分考虑节理裂隙损伤演化的影响, 因此计算所得位移量值要比真实结果偏小一些。但总的来说, 本次计算的结果是较为可信的。

6 结论

对于三峡船闸区 20 号剖面, 根据计算结果, 可以得到如下结论:

(1) 考虑损伤流变属性时, 船闸开挖区由于开挖卸荷产生的回弹变形有所增大, 变化最大处在北坡顶部以及中隔墩顶面。与以前的弹塑性分析对比最大值约增大了 36%。

(2) 塑性区较大处的位移量值变化较大, 说明岩体材料屈服后, 其损伤流变性也将明显

增强。对于三峡船闸开挖边界附近,由于塑性区较大,必须考虑其损伤流变性的影响。

(3) 考虑损伤流变属性,主应力值大多有所降低。

(4) 船闸区内存在的大型结构面对于边坡变形影响较为明显,其附近边坡变形较大,塑性区单元较多。

参 考 文 献

- 1 周维垣,杨延毅 节理岩体的损伤断裂模型及验证. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(1): 43~ 54
- 2 夏熙伦,徐 平,丁秀丽 岩石流变特性及高边坡稳定性流变分析. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(4): 312~ 322
- 3 周维垣 高等岩石力学 北京: 水利电力出版社, 1992, 377~ 384
- 4 丁秀丽,徐 平,夏熙伦 三峡船闸高边坡岩体开挖卸荷变形及流变分析. 长江科学院院报, 1995, 12(4): 37~ 43
- 5 张玉军,朱维申 三峡工程船闸高边坡锚杆(索)加固有限元计算. 岩土力学, 1997, 18(1): 1~ 6

PRELIMINARY STABILITY ANALYSIS OF HIGH SLOPE OF THE THREE GORGES SHIP LOCK BY DAMAGE-RHEOLOGY MODEL

Zhu Weishen Qiu Xiangbo Li Sucal Zhang Yujun

(Institute of Rock and Soil Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071)

Abstract The damage mechanics theory is applied to rock mechanics. A damage mechanics model is established for jointed rock mass. Viscoelasticity-viscoplasticity theory and FEM are adopted to analyse the stability of the excavated high slope of the Three Gorges ship lock with damage-rheology model.

Key words Three Gorges ship lock, high slope, stability, damage-rheology