

# 岩体高边坡流变学性状有限元分析\*

Finite element analysis for rheological behavior of rock highslope

章根德

(中国科学院力学研究所, 北京, 100080)

剡公瑞

(斯伦贝谢北京技术开发中心, 北京, 100004)

**文 摘** 提出了一个描述开挖后岩体高边坡时效特性的流变学模型, 该模型在有限元程序中执行。研究了三峡工程中船闸高边坡的流变学性状, 将数值结果与弹塑性分析的瞬态响应资料进行了比较。

**关键词** 岩体, 流变学模型, 边坡稳定性, 有限元方法, 粘弹性, 粘塑性

**中图法分类号** TU 457

**作者简介** 章根德, 男, 1942 年生, 研究员, 任中国岩石力学与工程学会岩体物理及数学模拟专业委员会委员, 在中国科学院力学研究所从事岩土力学、海洋工程、石油工程等方面的科研工作。

Zhang Gende

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080)

Yan Gongrui

(Sohlumberger Beijing Product Site, Beijing, 100004)

**Abstract** A rheological model was presented for describing a time dependent behavior of excavated highslope of rock mass. This model is implemented in a finite element program. As an actual example, the rheological behavior for highslope of shiplock in Three Gorges Project was studied and the numerical results were compared with instantaneous response data of elastoplastic analysis.

**Key words** rock mass, rheological model, slope stability, finite element method, viscoelasticity, viscoplasticity

## 1 前 言

关于边坡稳定性分析已有了相当广泛的研究, 但用来预测开挖后的高边坡蠕变运动的资料却很少。岩石的蠕变是高边坡变形的一个非常重要的因素。边坡的蠕变可以理解为一个没有明显滑移面的长期地质运动。这种蠕变是岩体的各种微小运动过程的结果。虽然每年只发生几毫米的位移, 但是在较长的时间内这种位移累加在一起, 则就表现为可以量测出来的边坡运动。如果运动超出了临界加速度值, 则蠕变就转化为滑移和流动。程度不同的边坡运动总会导致岩石工程的损坏。所以, 岩体力学在解决许多工程技术问题时, 再也不能无视流变学的知识了。考虑蠕变现象的计算方法(特别是以有限元为基础的方法)可以评价高边坡的稳定性问题。最近流变学和岩石力学的历史清楚地表明, 虽然今天还谈不上对这两门分支学科做卓有成效的综合, 但目前已经有了一些有趣的、令人兴奋的开端。

U. Zischinsky<sup>[1]</sup>用流变学模型描述了高边坡的变形并指出岩石的蠕变在高边坡变形中起了重要作用。C. D. Broudbent 和 K. C. Ko<sup>[2]</sup>发展了实验流变学。实验流变学成功地描述了实际流变效应并能用来控制边坡的自行破坏。G. Goda<sup>[3]</sup>给出了岩石蠕变问题的非线性有限元解。Zhang Gende<sup>[4]</sup>建立了蠕变与缓慢裂纹

扩展相互作用的模型, 并指出岩石边坡破坏时总的蠕变应变是由原先存在的裂纹扩展运动所决定的。测量距原生裂隙区域较远处的蠕变应变可用来预报岩石边坡的破坏时间。N. Samtani 等<sup>[5]</sup>提出了一个预测自然边坡蠕变运动的弹-粘塑性模型, 并用有限元程序进行了计算。

最近, Zhang Gende<sup>[6]</sup>提出了 1 个裂隙岩体中蠕变裂纹扩展的模型。根据这个模型能估算裂纹扩展前的孕育时间和随后裂纹扩展到最大的可容许值的时间, 这些计算结果对预言有缺陷的结构物的寿命是很有用的。

本文给出了对开挖后的高边坡进行流变学分析的模型。并用它计算了三峡岩体高边坡开挖后实际的流变学性状。采用弹-粘弹/粘塑性模型来描述岩石介质的时效特性。本构模型的常数是用三峡有代表性的岩体的实验室试验确定的, 通过有限元程序进行了计算, 并将计算结果与弹-塑性分析的瞬态响应作了比较。

## 2 岩体流变学模型

岩石是由矿物晶粒、孔隙和孔隙水所构成。天然

\* 国家自然科学基金委员会资助项目(No. 59479015)。

到稿日期: 1998-03-23



材料参量列于表 1, 决定弹塑性参量的静态试验结果参见文献[8], 而决定粘弹参量的蠕变试验结果参见文献[9]。

表 1 流变学模型参量

Table 1 Summary of rheological model parameters

岩石 状况	凝聚力 c/GPa	摩擦 系数	弹性模 量/GPa	粘弹性 模量/GPa	粘弹性系数 $\mu_1$ /(MPa·d)	粘塑性系数 $\mu_2$ /(MPa·d)
完好 岩石	1.8	1.8	35	210	420	400
弱风 化岩	1.0	1.3	10	50	100	80
风化岩	0.1	0.7	2.5	10	20	15

$$\left. \begin{aligned} x &= 4.715 + 0.0121 H \\ y &= 4.398 + 0.0117 H \\ z &= 1.663 + 0.0304 H \\ xy &= -0.405 - 0.00005 H \\ yz &= -0.0472 + 0.00001 H \\ xz &= -0.747 - 0.00046 H \end{aligned} \right\}$$

### 3 有限元分析

流变学分析中所用的最有力的数值近似方法是有限元方法。这也许是因为早在 70 年代科学家对流变学问题开始感兴趣的那时候, 有限元方法已经成为应力分析中高度发展的有效工具。本文对开挖后高边坡作流变学分析所用的弹-粘弹/粘塑性模型是通过二维平面应变有限元程序进行计算的。被计算的岩体高边坡位于西陵峡中段的三斗坪。被分析计算的区域宽 600 m, 深 240 m。有限元分析的网格包括了 1 770 个节点和 1 695 个单元。采用变时间积分流程, 为保证解的稳定性使用了较小时间步长。

有限元分析所用的流变学模型如前所述, 材料参量如表 1。岩体中地应力是由三峡船闸区域 8 个深孔、5 个水平浅孔的 62 个测量点, 从 1984 年到 1994 年, 观察所取得的资料通过反分析计算得到的。反分析计算中同时考虑了三峡船闸地区的地形、地势和地质状况。计算区域为长 2 400 m, 宽 1 400 m, 深 1 450 m。三闸首地应力分量随深度变化拟合成线性方程如下<sup>[10]</sup>：

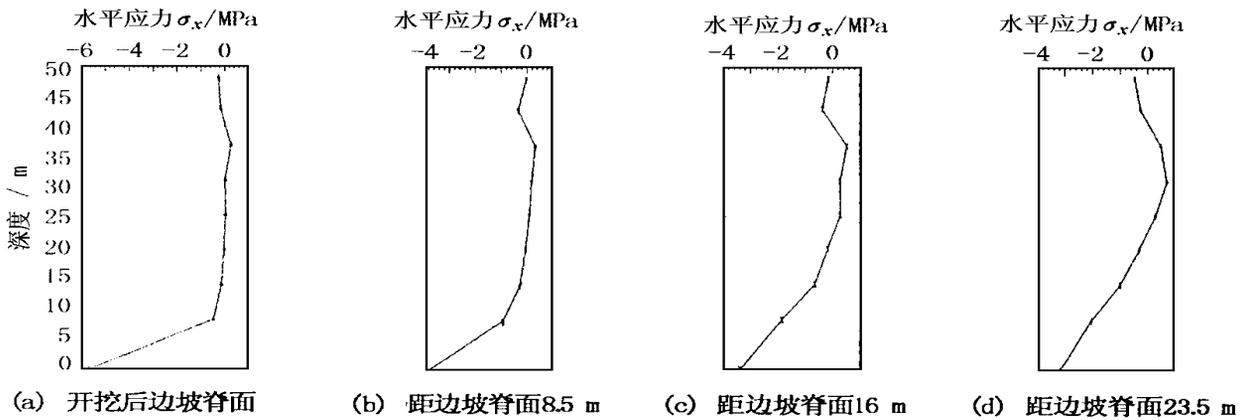


图 3 三峡船闸中墩开挖一年后岩体中的水平应力(  $\sigma_x$ ) 分布

Fig. 3 Horizontal stress (  $\sigma_x$ ) distribution for rock mass of middle pier in Three Gorges Project after one year of excavation

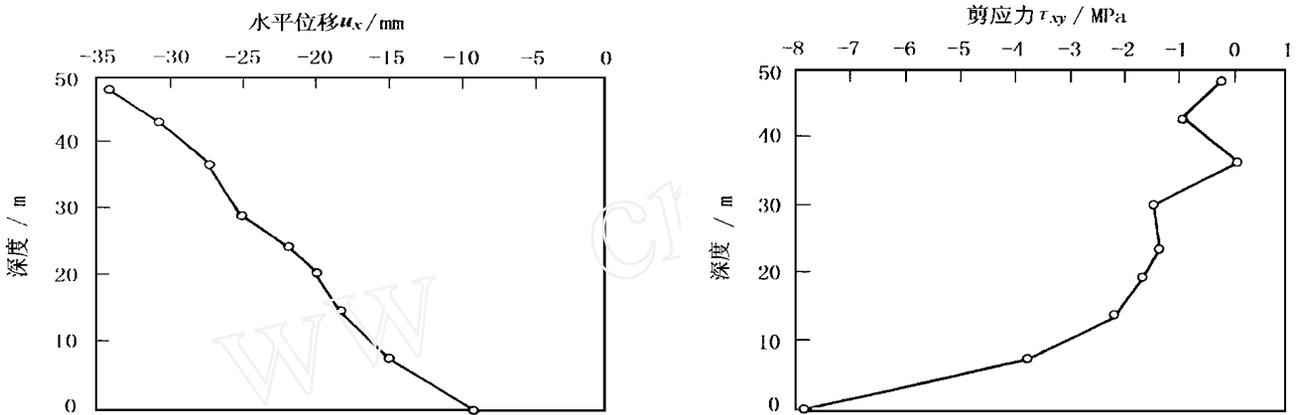


图 4 右岸边坡开挖一年后边坡面的水平位移(  $u_x$ ) 随深度变化

Fig. 4 Variation of horizontal displacement (  $u_x$ ) with depth at the crest of slope of right bank after one year of excavation

图 6 右岸边坡开挖一年后边坡面的剪应力(  $\tau_{xy}$ ) 随深度变化

Fig. 6 Variation of shearing stress (  $\tau_{xy}$ ) with depth at the crest of slope of right bank after one year of excavation

水平应力分布如图 3 所示。结果表明,除了坡趾由于拐角几何条件引起的高度应力集中外,右侧壁近似于应力自由面。中墩中心线附近最大拉伸应力为 0.75 MPa。由于开挖后自由面的流动,此拉应力比瞬态响应大。除拉伸区外,水平应力为压应力。在所有的位 置,压应力随深度的分布几乎是线性的。

图 4 ~ 图 6 分别是右岸的水平位移、水平应力和剪应力的分布。最大的水平位移约为 34 mm,由于拐角几何条件引起的高度应力集中,最大剪应力约为 7.8 MPa。

图 7 是中墩右侧壁在开挖后一年水平位移随高度分布与弹-塑性分析的瞬态响应曲线的比较。开挖后第一年由于蠕变引起的位移的增加约为 1 mm。图 8 是右岸坡直立墙在开挖后一年水平位移随高度分布与弹-塑性分析的瞬态响应曲线的比较。开挖后第一年由于蠕变引起水平位移增加约为 6 mm。由于蠕变引起的最大水平位移增加右岸是中墩的 6 倍。

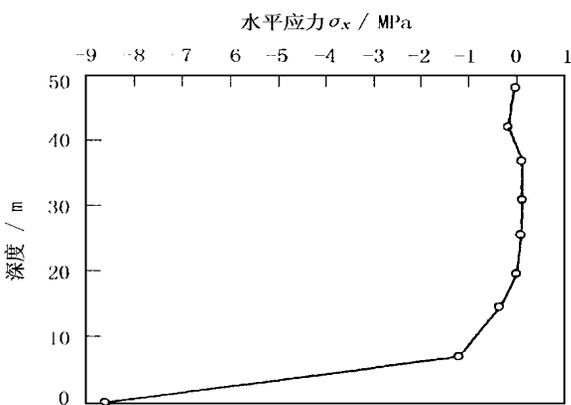


图 5 右岸边坡开挖一年后边坡面的水平应力(  $\sigma_x$ ) 随深度变化

Fig. 5 Variation of horizontal stress (  $\sigma_x$ ) with depth at the crest of slope of right bank after one year of excavation

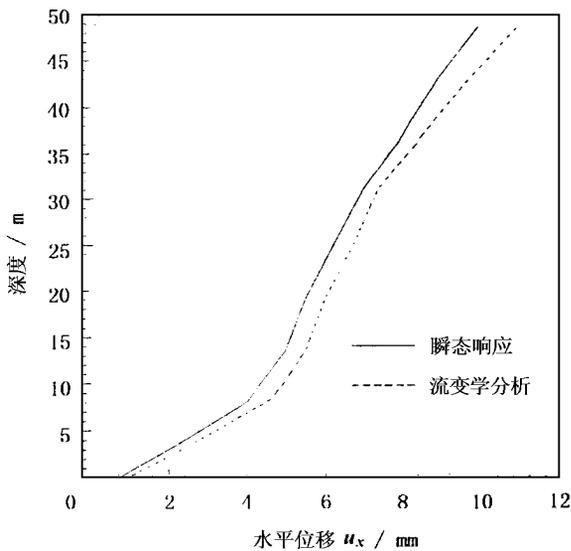


图7 中墩边坡面的水平位移随深度变化的比较

Fig.7 Comparison of variation of horizontal displacement with depth along the crest of slope in middle pier

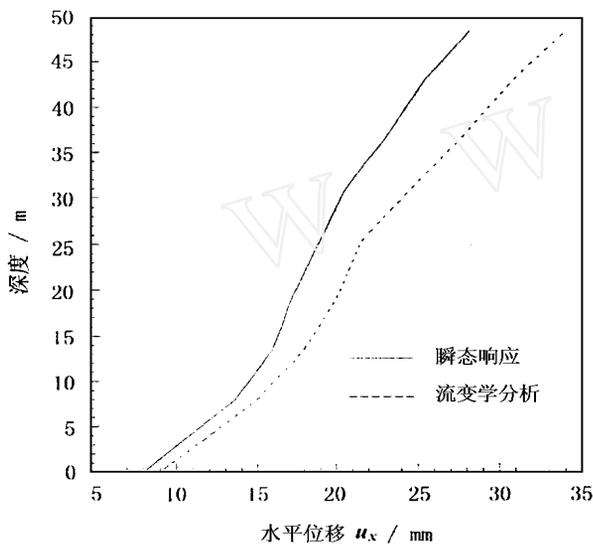


图8 右岸边坡面的水平位移随深度变化的比较

Fig.8 Comparison of variation of horizontal displacement with depth along the vertical slope line of right bank

## 5 结 语

对开挖后高边坡的时间依赖性模拟的一般方法,包括适当的岩体流变模型、实验室试验和有限元方法。本项研究表明了这些方法能用来预测开挖后高边坡蠕变引起的位移和应力,并用二维平面应变有限元程序对三峡工程中船闸高边坡开挖进行了流变学分析。计算结果表明中墩右侧壁顶端水平开挖位移考虑流变学影响为 11 mm,稍大于瞬态响应。这是因为高边坡开挖后,中墩有左右两边两个自由面。由于对称性,在蠕变的影响下两个自由面都要向外流变,结果主

要是增加了中心线附近的拉应力,而自由面的水平位移并不增加很多。右岸只有一个自由面,开挖后第一年由于蠕变引起水平位移增加约为 6 mm,使右岸直墙顶最大水平位移在开挖后一年达到 34 mm,由于流变引起了剪应力的增加,最大剪应力达到了 7.8 MPa,高于瞬态响应。随着时间的推移,流变所引起的位移还会进一步增加。由于目前实验所测的流变学参数很难外推到几十年后的长时期,所以很难估算长时期的流变位移值,只能说流变的发展趋势,左右两岸的水平位移将会随着时间推移而不断增大。点安全因子计算的结果表明流变学分析结果接近于弹塑性分析。根据流变学分析,除了那些点安全因子值接近于 1.0 的地方外岩体高边坡整体是稳定的,而在其他地方为了阻止滑坡和边坡破坏有必要进行支护和加固。

## 参 考 文 献

- 1 Zischinsky U. On the deformation of high slopes. Proc First Int Congr Rock Mech. Lissobon: 1966
- 2 Broadbent C D, Ko K C. Rheologic aspects of rock slope failures. In: Cording E J. Stability of Rock Slopes. 1971. 573~593
- 3 Goda G. A finite element solution of nonlinear creep problem in rock. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr. 1981, 18: 35~46
- 4 Zhang Gende. Nonlinear analysis of the stability of slopes. In: Proc Int Symposium on Application of Computer Methods in Rock Mechanics and Engineering. 1993. 851~858
- 5 Samtani N C, Desai C S, Vulliet L. A viscoplastic model for creep natural slopes. In: Siriwardane Zaman. Compute Methods and Advances in Geomechanic. 1994. 2483~2488
- 6 Zhang Gende. Creep rupture of fissured rock mass. Proc. of Third Asian-Pacific Conference on Computational Mechanics, Seoul. Korea: 1996
- 7 Greus G J. Viscoelasticity-Basic theory and applications to concrete structures. Springer-Verlay Berlin, Heidelberg: 1986
- 8 Sheng Gan, Ren Fang. Analog computation of excavation and reinforcement for the highslope of shiplock of the Three Gorges Project. J of yangtze River Scientific Research Institute, 1992, 9(1): 28~35
- 9 Xu Ping, Xiu Xilun. Study on creep characteristic of granite in lock zone of Three Gorges Project. J of Yantze River Scientific Research Institute. 1995, 12(2): 23~29
- 10 Gong Bixin, Zhong Zuowu, Luo Chaowen, et al. Initial analysis on geostress field in lock area of Three Gorges Project. J of Yantze River Scientific Research Institute. 1995, 12(2): 62~68
- 11 Hock E, Bray J W. Rock slope engineering. London: Institution of Mining and Metallurgy. 1981. 358
- 12 Zhang Gende. The stability analysis for highslope excavation of rock mass. The Ninth International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics. Wuhan, China. 1997