

FLAC-3D 进行三峡船闸高边坡稳定分析*

寇晓东 周维垣 杨若琼

(清华大学水利水电工程系 北京 100084)

摘要 首先介绍了FLAC-3D的基本原理及其特点,然后将其应用于三峡船闸高边坡开挖过程的应力变形分析和稳定分析。结果说明船闸结构是稳定的。

关键词 FLAC-3D, 显式有限差分法, 大变形, 三峡船闸高边坡

分类号 O 242, TV 691, TD 824 7

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2001)01-0006-05

1 概述

长江三峡水利枢纽永久船闸位于长江的左岸,总长为6442m,其中闸室段长1607m,上游引航道2113m,下游引航道2772m。总水头113m。为双线连续五级船闸,船闸位于坛子岭以北约200m的山体中,系在山体中深切开挖而成,船闸基岩为花岗岩,开挖后两侧形成岩质高边坡,最大开挖深度达170m。开挖引起的岩体卸荷,将导致边坡的变形和应力重分布,对岩坡的稳定和安全性产生影响。由于三峡永久船闸的重要性和很高的运行要求,对其进行开挖稳定与变形分析是非常重要的一个环节。

FLAC-3D^[1] (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions)是由美国Itasca Consulting Group Inc开发的三维显式有限差分法程序,它可以模拟岩土或其他材料的三维力学行为^[2]。FLAC-3D将计算区域划分为若干六面体单元,每个单元在给定的边界条件下遵循指定的线性或非线性的本构关系,如果单元应力使得材料屈服或产生塑性流动,则单元网格及结构可以随着材料的变形而变形,这就是所谓的拉格朗日算法,这种算法非常适合于模拟大变形问题。FLAC-3D采用了显式有限差分格式来求解场的控制微分方程,并应用了混合单元离散模型,可以准确地模拟材料的屈服、塑性流动、软化直至大变形,尤其在材料的弹塑性分析、大变形分析以及模拟施工过程等领域有其独到的优点。鉴于此,本文将用FLAC-3D对三峡船闸开挖过程中的应力与变形进行分析,并应用参数敏感分析以求得

结构的稳定分析。

2 FLAC-3D的基本原理

FLAC-3D的求解使用了如下3种计算方法:

(1) 离散模型方法。连续介质被离散为若干互相连接的六面体单元,作用力均被集中在节点上。

(2) 有限差分方法。变量关于空间和时间的二阶导数均用有限差分来近似。

(3) 动态松弛方法。应用质点运动方程求解,通过阻尼使系统运动衰减至平衡状态。

2.1 空间导数的有限差分近似

在FLAC-3D中采用了混合离散方法,区域被划分为常应变六面体单元的集合体,而在计算过程中,程序内部又将每个六面体分为以六面体角点为角点的常应变四面体的集合体,变量均在四面体上进行计算,六面体单元的应力、应变取值为其内四面体的体积加权平均。

如图1所示一四面体,节点编号为1~4,第*n*面表示与节点*n*相对的面,设其内任一点的速率分量为*v_i*,则可由高斯公式得

$$\int_V v_{i,j} dV = \int_S v_i n_j dS \quad (1)$$

式中:*V*为四面体的体积,*S*为四面体的外表面,*n_j*为外表面的单位法向向量分量。

对于常应变单元,*v_i*为线性分布,*n_j*在每个面上为常量,由式(1)可得

$$v_{ij} = - \frac{1}{3V} \sum_{l=1}^4 v_l^l n_j^{(l)} S^{(l)} \quad (2)$$

1999年5月27日收到初稿,1999年9月14日收到修改稿。

* 国家自然科学基金(59919390)资助项目。

作者 寇晓东 简介:男,29岁,博士,1993年毕业于清华大学水利系水工专业,现任讲师,主要从事水工高坝及岩土工程方面的研究工作。

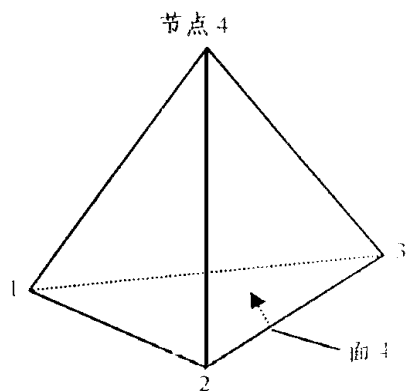


图 1 四面体
Fig 1 Tetrahedron

式中: 上标 l 表示节点 l 的变量, (l) 表示面 l 的变量.

2.2 运动方程

FLAC-3D 以节点为计算对象, 将力和质量均集中在节点上, 然后通过运动方程在时域内进行求解. 节点运动方程可表示为如下形式:

$$\frac{\partial v_i^l}{\partial t} = \frac{F_i^l(t)}{m^l} \quad (3)$$

式中: $F_i^l(t)$ 为在 t 时刻 l 节点的在 i 方向的不平衡力分量, 可由虚功原理导出; m^l 为 l 节点的集中质量, 在分析静态问题时, 采用虚拟质量以保证数值稳定, 而在分析动态问题时则采用实际的集中质量.

将式(3)左端用中心差分来近似, 则可得到

$$v_i^l \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) = v_i^l \left(t - \frac{\Delta t}{2} \right) + \frac{F_i^l(t)}{m^l} \Delta t \quad (4)$$

2.3 应变、应力及节点不平衡力

FLAC-3D 由速率来求某一时步的单元应变增量, 如下式:

$$\Delta e_{ij} = \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i}) \Delta t \quad (5)$$

式中速率可由式(2)近似.

有了应变增量, 即可由本构方程求出应力增量, 各时步的应力增量叠加即可得到总应力, 在大变形情况下, 还需根据本时步单元的转角对本时步前的总应力进行旋转修正. 然后即可由虚功原理求出下一时步的节点不平衡力, 进入下一时步的计算, 其具体公式这里不在赘述.

2.4 阻尼力

对于静态问题, FLAC-3D 在式(3)的不平衡力中加入了非粘性阻尼, 以使系统的振动逐渐衰减直至达到平衡状态(即不平衡力接近零). 此时式(3)变为

$$\frac{\partial v_i^l}{\partial t} = \frac{F_i^l(t) + f_i^l(t)}{m^l} \quad (6)$$

阻尼力 $f_i^l(t)$ 为

$$f_i^l(t) = -\alpha |F_i^l(t)| \text{sign}(v_i^l) \quad (7)$$

式中: α 为阻尼系数, 其默认值为 0.8; 而

$$\text{sign}(y) = \begin{cases} +1 & (y > 0) \\ -1 & (y < 0) \\ 0 & (y = 0) \end{cases} \quad (8)$$

2.5 计算循环

由以上可以看出 FLAC-3D 的计算循环如图 2 所示.

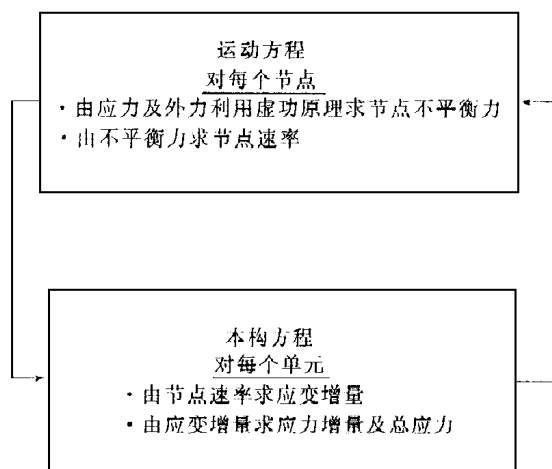


图 2 计算循环

Fig 2 Calculation cycle

3 FLAC-3D 的特点

由以上原理可以看出, 无论是动态问题, 还是静态问题, FLAC-3D 均由运动方程用显式方法进行求解, 这使得 FLAC-3D 很容易模拟动态问题, 如振动、失稳、大变形等. 对显式法来说非线性本构关系与线性本构关系并无算法上的差别, 对于已知的应变增量, 可很方便地求出应力增量, 并得到不平衡力, 就同实际中的物理过程一样, 可以跟踪系统的演化过程. 此外, 显式法不形成刚度矩阵, 每一步计算所需计算机内存很小, 使用较少的计算机内存就可以模拟大量的单元, 特别适于在微机上操作. 在求解大变形过程中, 因每一时步变形很小, 可采用小变形本构关系, 只需将各时步的变形叠加, 即得到了大变形. 这就避免了通常大变形问题中推导大变形本构关系及其应用中所遇到的麻烦, 也使它的求解过程与小变形问题一样.

根据前述原理, 美国 Itasca Consulting Group Inc 开发了三维快速拉格朗日分析程序 FLAC-3D, 该程序能较好地模拟地质材料在达到强度极限或屈服极限时发生的破坏或塑性流动的力学行为, 特别适用于分析渐进破坏和失稳以及模拟大变形. 它主要有如下一些特点.

(1) 应用范围广泛, 可以模拟复杂的岩土工程或力学问题。FLAC-3D 包含了 10 种弹塑性材料本构模型, 有静力、动力、蠕变、渗流、温度 5 种计算模式, 各种模式间可以互相耦合, 以模拟各种复杂的工程力学行为。FLAC-3D 可以模拟多种结构形式, 如岩体、土体或其他材料实体, 梁、锚元、桩、壳以及人工结构如支护、衬砌、锚索、岩栓、土工织物、摩擦桩、板桩等。另外, FLAC-3D 设有界面单元, 可以模拟节理、断层或虚拟的物理边界等。

(2) FLAC-3D 具有强大的内嵌程序语言 FISH, 使得用户可以定义新的变量或函数, 以适应用户的特殊需要, 例如, 利用 FISH, 用户自己设计 FLAC-3D 内部没有的特殊单元形态; 用户可以在数值试验中进行伺服控制; 可以指定特殊的边界条件; 自动进行参数分析; 可以获得计算过程中节点、单元参数, 如坐标、位移、速度、材料参数、应力、应变、不平衡力等。

(3) FLAC-3D 具有强大的前后处理功能。

FLAC-3D 具有强大的自动三维网格生成器, 内部定义了多种基本单元形态, 可以生成非常复杂的三维网格。在计算过程中用户可以用高分辨率的彩色或灰度图或数据文件输出结果, 以对结果进行实时分析, 图形可以表示网格、结构以及有关变量的等值线图、矢量图、曲线图等, 可以绘出计算域的任意截面上的变量等值线图或矢量图。

4 三峡船闸的计算范围及参数

为了与本课题组的有限元分析成果^[3]进行对比, 计算采用与有限元分析一致的范围。将对三峡船闸高边坡 12-12 剖面到 20-20 剖面之间的区域进行分析。主要是二、三闸室交接部分的地质区域, 进行分析的整个范围为 600 m × 330 m × 240 m。在船闸坐标系中: 横向 X 坐标范围为 15+534~15+864, 纵向 Y 坐标范围为: 7700~8300, 计算高程从▽20 到▽255。在计算范围内, 主要的断层和岩脉有 f₂₉₉, f₂₀₃, f₂₀₄, f₂₁₅, β, e_x; 其中包括了三峡坝区性状最差的断层 f₂₁₅。计算所用的参数见表 1。

其中, 强风化带分布在地表 30~40 m 深度范围内, 强卸荷带的厚度为 5~10 m, 弱卸荷带的厚度为 10~20 m。完全开挖时各材料分区参见图 3。

计算所采用的地应力场公式如下表 2, 表中单位: 应力 σ_{ij}/MPa, 深度 H/m。

计算采用 FLAC-3D 的内嵌语言 FISH 读入有限元的网格, 并输入单元参数, 计算本构模型用 Drucker-Prager 准则。断层采用 FLAC-3D 的 Interface 来模拟。为了模拟船闸开挖的逐步进行,

表 1 岩体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock masses

岩体名称	γ /t · m ⁻³	E /GPa	μ	f	c /MPa
强风化	2.65	0.3	0.35	0.8	0.20
微新岩体	2.70	30.0	0.20	1.7	2.00
f ₂₉₉	2.50	2.50	0.30	0.7	0.10
f ₂₀₃	2.50	2.50	0.30	0.7	0.10
f ₂₀₄	2.50	2.50	0.30	0.7	0.10
f ₂₁₅	2.50	2.50	0.30	0.7	0.10
β _μ	2.70	7.0	0.25	1.0	0.50
e _x	2.70	30.0	0.25	1.0	0.20
强卸荷带	2.65	5.0	0.30	0.3	0.10
弱卸荷带	2.68	20.0	0.24	1.4	1.00

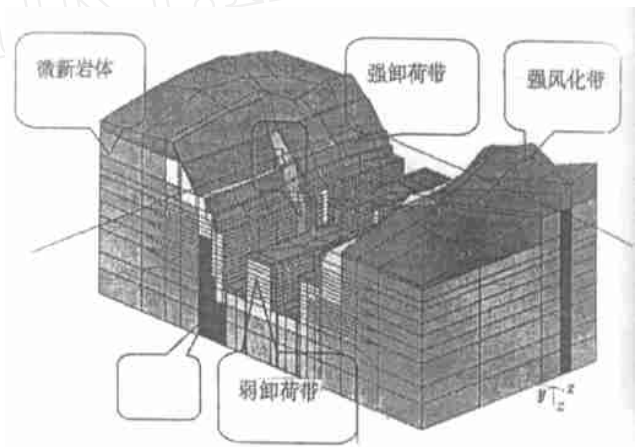


图 3 完全开挖工况下材料分区示意图

Fig. 3 Sketch of material regions in the case of complete excavation

表 2 地应力公式

Table 2 Formulas of in-situ stresses

二闸室	$\sigma_{xx} = 5.7029 + 0.01176H$
	$\sigma_{yy} = 5.1885 + 0.01093H$
	$\sigma_{zz} = 0.3478 + 0.02995H$
	$\sigma_{xy} = -0.4485 + 0.00017H$
	$\sigma_{yz} = -0.0746 - 0.00028H$
	$\sigma_{zx} = 0.03610 - 0.00008H$
三闸首	$\sigma_{xx} = 5.7029 + 0.01176H$
	$\sigma_{yy} = 5.1885 + 0.01093H$
	$\sigma_{zz} = 0.3478 + 0.02995H$
	$\sigma_{xy} = -0.4485 + 0.00017H$
	$\sigma_{yz} = -0.0746 - 0.00028H$
	$\sigma_{zx} = 0.03610 - 0.00008H$
三闸室	$\sigma_{xx} = 5.7029 + 0.01176H$
	$\sigma_{yy} = 5.1885 + 0.01093H$
	$\sigma_{zz} = 0.3478 + 0.02995H$
	$\sigma_{xy} = -0.4485 + 0.00017H$
	$\sigma_{yz} = -0.0746 - 0.00028H$
	$\sigma_{zx} = 0.03610 - 0.00008H$

进行了分步开挖计算。具体的计算方法考虑回归出的初始地应力场，在未开挖的情况下让 FLAC-3D 计算至平衡状态，然后将位移置零，并将开挖单元置空单元，继续计算，得到新的地应力场及回弹位移，并接着进行下一步的开挖计算。

5 计算结果

5.1 位移计算结果

图 4 为 $y = 0$ 处一垂直截面的示意图，其中列出了 6 个特征点。图 5 为 5 级开挖全部完成后船闸横向的中截面上的位移矢量图，表 3 列出了图 4 中所示的六个特征点在全部开挖完后的向闸室位移或反弹位移。计算值和有限元结果及实测值都比较接近，比实测值稍大一些，变形趋势一致。

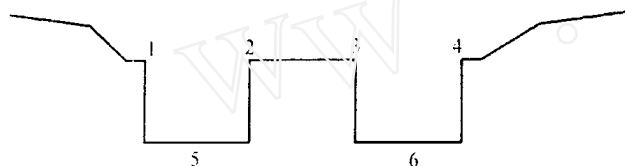


图 4 特征点示意图

Fig 4 Sketch of characteristic points

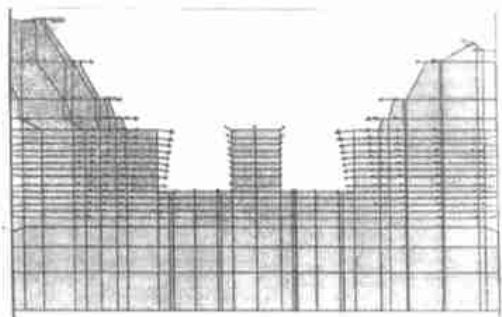


图 5 5 级开挖后垂直于船闸走向的中截面上的位移矢量图

Fig 5 Displacement vectors on the mid-plane perpendicular to the ship lock axis after the fifth excavation stage

表 3 特征点位移

Table 3 Displacements of characteristic points

位移类型	向闸室位移/mm				底部反弹位移/mm	
点号	1	2	3	4	5	6
计算位移	43	15	17	40	7.0	6.0

5.2 安全度等值线

图 6 为 5 级开挖后的安全度灰色图，安全度大小由深而浅。在边墙及中墩部位出现了大片安全度小于 2.0 的区域。局部区域安全度小于 1.0，即已经屈服。如何提高这些区域的安全度需要进一步研究。

5.3 参数敏感分析

为了研究岩体参数对船闸稳定性的影响，进行

了参数敏感分析，即将 f, c 值按比例降低，然后计算位移及安全度，并进行分析。为了计算方便，此分析没有考虑分步开挖，而是 5 级一次开挖成功。

图 7 为 f, c 值分别降至原来的 30% 时开挖后船闸的安全度灰色图。当参数降至 30% 后，边墙及中墩处出现了大片安全度小于 1.0 的区域。图 8 为参数为 10% 时船闸横向的中截面网格及位移矢量图，其网格为在原来网格基础上加入了反弹位移后的结果，从其扭曲形态可看出船闸整体屈服，产生了大变形，这正是 FLAC-3D 的特长的演示，而非真实结果。

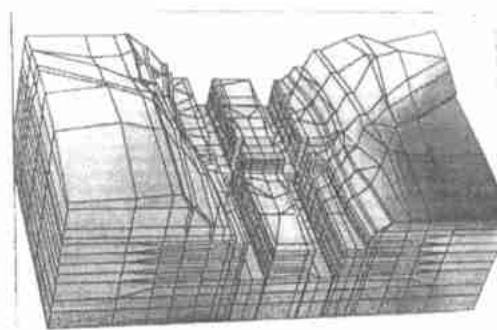


图 6 5 级开挖后的安全度等值线图

Fig 6 Contours of safety factor after the fifth excavation stage

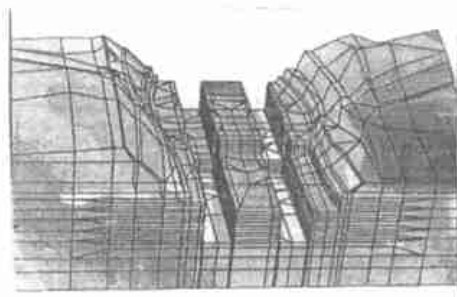


图 7 参数降低至 30% 时的安全度等值线图

Fig 7 Contours of safety factor for the parameters reduced to 30%

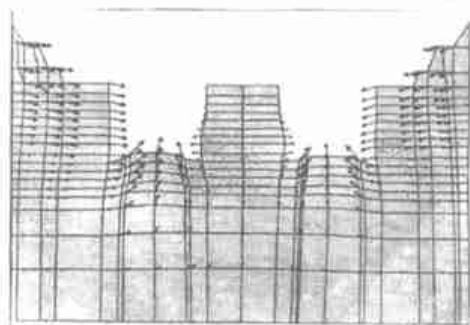


图 8 参数降低至 10% 时垂直于轴线的中截面位移矢量图

Fig 8 Displacement vectors on the mid-plane perpendicular to the ship lock axis for the parameters reduced to 10%

6 结 论

从本次分析的结果来看, 全部开挖后在有些地区会出现安全度小于 2.0 的区域, 但安全度小于 1.0 的区域较少, 整个结构还可以承受开挖产生的释放荷载。另外, 由参数敏感分析可得出, 船闸的参数安全储备大致为 3 倍左右。

三维快速拉格朗日分析由于采用了基于显式有限差分法的拉格朗日算法, 使得它在分析岩土工程结构的弹塑性力学行为、模拟施工过程等方面有其独到的优点, 尤其在发生塑性流动或失稳的情况下, 三维快速拉格朗日分析可以很方便地模拟结构从弹

性到塑性屈服、失稳破坏直至大变形的全过程, 这是其他一些连续介质方法无法比拟的。

参 考 文 献

- 1 FLAC-3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions), Version 2.0, User's Manual [S]. USA: Itasca Consulting Group, Inc., 1997
- 2 谢和平, 周宏伟, 王金安等. FLAC 在煤矿开采沉降预测中的应用及对比分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 397~401
- 3 周维垣, 肖洪天, 剡公瑞. 三峡船闸高边坡岩体渗流及稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(增): 818~822

STABILITY ANALYSIS ON THE HIGH SLOPES OF THREE-GORGES SHIPLOCK USING FLAC-3D

Kou Xiaodong, Zhou Weiyuan, Yang Ruojiong

(Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084 China)

Abstract The theory background of FLAC-3D and its features are introduced firstly and then the analysis on the stresses, deformation and parameter sensitivity of the high slope of Three-Gorges shiplock are presented.

Key words FLAC-3D, explicit finite difference method, large deformation, high slope of Three-Gorges shiplock

第 7 届全国岩石动力学学术会议 征文通知(第 1 号)

中国岩石力学与工程学会岩石动力学专业委员会拟定于 2001 年 8 月在东北地区召开“第 7 届全国岩石动力学学术会议”, 欢迎全国相关学科的专家、学者、科技工作者与工程技术人员踊跃向会议投稿。本次会议的征文内容为: (1) 岩石动力学学科发展回顾与展望, (2) 岩石动态力学性质与本构关系, (3) 岩石和岩体中应力波的传播与衰减规律, (4) 岩石动态断裂机理与数值模拟, (5) 岩石动力学与防护工程, (6) 岩石爆破与控爆技术, (7) 岩爆与冲击地压机理研究, (8) 岩石动力参数的测试技术与方法研究, (9) 应力波理论在桩基工程中的应用, (10) 其他与岩石动力学相关问题的研究。

提交会议论文请于 2001 年 4 月底以前将论文全文(一式两份)寄会议筹备组。

本次会议论文集仍将正式出版, 因此要求文字简洁, 图表清晰, 字数控制在 8000 字以内。撰稿的形式同《岩石力学与工程学报》发表的文章。

来稿请寄: 430071 中国科学院武汉岩土力学研究所 黄理兴收,

联系电话: 027-87869263, 传真电话: 027-87863386,

Email: lxhuang@dellwhrsm.ac.cn,

具体开会时间与地点等事项详见第二号通知

(中国岩石力学与工程学会岩石动力学专业委员会)