

天荒坪抽水蓄能电站地下洞室群合理开挖顺序研究

邓昌铁

魏庭光

(河海大学水利水电工程学院 南京 210098) (张家港市政设计院 张家港 215600)

摘 要 首先根据地下结构问题的特点,简要介绍对地下结构工程进行三维弹塑性有限元分析应注意的几个问题.在此基础上,独立编制了相应的三维弹塑性有限元程序.应用该程序对天荒坪抽水蓄能电站地下洞室群进行了数值计算.计算中模拟了地下洞室的几种开挖顺序,考虑洞室间的相互影响及工作性态,从而确定出最合理的开挖顺序.

关键词 抽水蓄能电站 地下洞室群 三维弹塑性有限元分析

中图分类号 TU973.23

1 工程概况

天荒坪抽水蓄能电站是我国开工较早、规模较大的抽水蓄能电站.其地下洞室群包括厂房洞、主变洞、母线洞等.主副厂房洞长 200 m,宽 21 m,高 48 m.主变洞位于厂房下游且与厂房平行.主变洞与厂房洞间有 6 条母线洞和 1 条主变运输洞相连(图 1).目前,天荒坪电站地下厂房的各洞室内仅作锚喷支护,局部加钢筋网.施工开挖过程中较真实地了解地下洞室的地质构造、岩石的物理力学参数,对于地下厂房洞室群的三维弹塑性有限元分析来说,可以使计算结果较符合实际,有助于设计者加深对地下洞支护参数的认识.

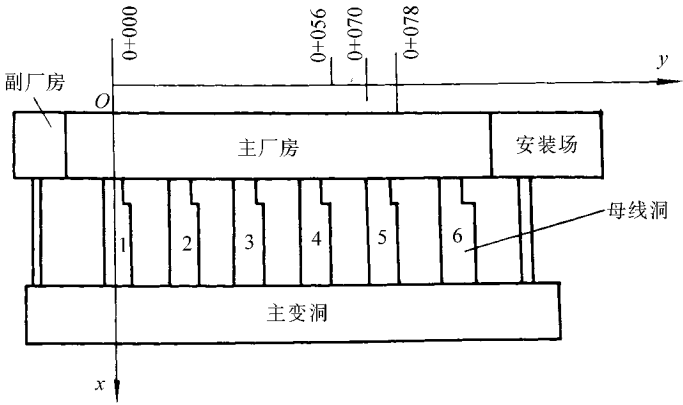


图 1 地下厂房洞群平面布置

Fig.1 Layout of caverns of underground powerhouse

2 岩土工程三维弹性有限元分析方法

在计算中,岩体采用“低抗拉弹塑性模型”,软弱夹层则采用“不抗拉弹塑性模型”,建立相应的非线性本构关系.运用增量法解非线性问题时,采用兼取常刚度法和变刚度法之长的收敛法和稳定性较好的“增量迭代法”.

2.1 岩石的力学模型及其本构关系

岩石的剪切试验说明,岩石具有脆性破坏的特点.通过简化,可得到如图 2 所表示的应力位移曲线.由此可以看出,岩石是具有应变强化阶段和应变软化阶段的弹塑性材料.(a)在 OA 线弹性阶段,应力应符合 Hooke 定律.(b)材料进入塑性状态(包括强化阶段和软化阶段),本构关系为:①应力分量满足屈服准则时,材料进入塑性状态.对于土、石一类材料,常采用 Drucker-Prager 屈服准则;具有强化特性的弹塑性材料进入塑性状态后的应力分量还应满足加工强化规律.②进入塑性状态后的形变增量包括弹性和塑性两部分,而塑性形变增量应满足流动法则(或正交定律).③材料塑性后的应力应变关系为

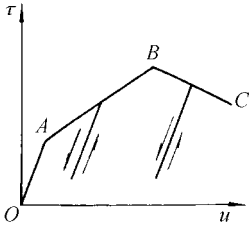


图 2 岩石剪切试验应力位移曲线

Fig.2 Stress-displacement curve for rock shear test

$$d\sigma = D_{ep} d\epsilon \quad D_{ep} = D - D_p$$

其中 D_{ep} ——弹塑性矩阵 ; D ——弹性矩阵 ; D_p ——塑性矩阵.

$$D_p = \frac{D \frac{\partial F}{\partial \sigma} \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T D}{A + \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}^T D \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}}$$

其中

$$A = \frac{-1}{d\lambda} \frac{\partial F}{\partial k} dk$$

k 为强化参数.由以上表达式可以看出 D_p 与以下因素有关:材料处于弹性状态时的材料特性参数 E, μ , 即与 D 有关;材料的加工硬化特性;材料所处的应力水平,即与 σ_i 有关.(c)卸载时,材料的应力应变呈线性关系,但在不同阶段卸载时,其弹性常数是不同的.

2.2 加工硬化规律和流动法则

进入塑性变形后的应变增量包括弹性应变增量和塑性应变增量两部分,塑性应变增量应满足流动法则,即 $d\epsilon^p = d\lambda \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\}$,其中 $d\lambda$ 为待定量.对于具有强化特性的弹塑性材料,进入塑性变形后的应力分量应满足加工硬化规律,即 $P(\sigma, H') = 0$.这里称 P 为加载函数; H' 表示材料的加工硬化特性, $H' = d\sigma_i / d\epsilon_i^p$.由此可以看出, H' 是等效应力相对于塑性等效应变的变化率.

2.3 屈服准则

岩土材料常用的屈服准则有莫尔-库仑(Mohr-Coulomb)屈服准则和德鲁克-普拉格(Drucker-Prager)屈服准则.岩土材料中最古老而迄今仍广泛采用的抗剪强度表达式是库仑破坏准则: $\tau_f = C + \sigma_f \tan \varphi$.其中 C 为凝聚力, σ_f 为破坏面上的法向应力(应力以压为正), φ 为内摩擦角.以应力不变量 I_1 及偏应力不变量 J_2, J_3 表示的莫尔-库仑屈服准则为: $F = \frac{1}{3} I_1 \sin \varphi - \sqrt{J_2} (\cos \theta_\sigma + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta_\sigma \sin \varphi) + C \cos \varphi$.其中 I_1 为应力张量的第一不变量, $I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$; θ_σ 为罗台应力角.

2.4 塑性矩阵的显式推导

屈服函数 F 的通式为 $F = F(I_1, \sqrt{J_2}, \theta_\sigma) = 0$.其中 θ_σ 为罗台应力角,其范围是: $-\frac{\pi}{6} \leq \theta = \frac{1}{3} \arcsin \left(\frac{-3\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{J_3}{J_2^{3/2}} \right) \leq \frac{\pi}{6}$.又因为 $J_3 = -\frac{2\sin 3\theta_\sigma}{3\sqrt{3}} J_2^{3/2}$,所以 $\frac{\partial F}{\partial \sigma} = C_1 a_1 + C_2 a_2 + C_3 a_3$.其中 $a_1 = \frac{\partial I_1}{\partial \sigma} = [1, 1, 1, 0, 0, 0]^T$; $a_2 = \frac{\partial \sqrt{J_2}}{\partial \sigma} = \frac{1}{2\sqrt{J_2}} [S_x, S_y, S_z, 2\tau_{xy}, 2\tau_{yz}, 2\tau_{zx}]^T$; $a_3 = \frac{\partial \theta_\sigma}{\partial \sigma} = \left[\left(S_y S_z - \tau_{yz}^2 + \frac{J_2}{3} \right) \left(S_x S_z - \tau_{xz}^2 + \frac{J_2}{3} \right) \left(S_x S_y - \tau_{xy}^2 + \frac{J_2}{3} \right) \right. \\ \left. \wedge \left(\tau_{yz} \tau_{zx} - S_z \tau_{xy} \right) \wedge \left(\tau_{zx} \tau_{xy} - S_x \tau_{yz} \right) \wedge \left(\tau_{xy} \tau_{yz} - S_y \tau_{zx} \right) \right]^T$; $C_1 = \frac{\partial F}{\partial I_1}$; $C_2 = \frac{\partial F}{\partial \sqrt{J_2}} - \frac{\tan 3\theta_\sigma}{\sqrt{J_2}} \frac{\partial F}{\partial \theta_\sigma}$; $C_3 = -\frac{\sqrt{3}}{2\cos 3\theta_\sigma} \cdot J_2^{-3/2} \frac{\partial F}{\partial \theta_\sigma} \cdot \frac{\partial F}{\partial \sigma}$ 的显式求出后,代入 D_p 公式中,很容易求出 D_p 的显式.

2.5 增量迭代法的应用

采用增量迭代法进行弹塑性应力分析,能够较好地反映加载历史,模拟实际情况,同时在一定程度上克服了单纯用迭代法计算存在的收敛性问题.增量迭代法的基本思路是,按照实际的加载路线分级加载,每级荷载增量不要太大,以保证本级荷载中应力应变关系接近线性变化,在本增量段内进行迭代计算.这样就可以把一个非线性问题用若干个线性问题来近似.这个过程可用以下步骤来表示.

- $R = \sum_1^m \Delta R_i$.其中 R 为荷载全量列阵, ΔR_m 为荷载增量列阵; m 为加载级数.
- 在第 n 级荷载增量中进行下列运算: $K_n \Delta \delta_n = \Delta R_n$.其中 $\Delta \delta_n$ 为结构在第 n 级荷载增量作用下的结点位移增量,由它可求出本级的应力增量 $\Delta \sigma_n$; K_n 为结构在第 n 级荷载增量作用下的整体刚度矩阵; ΔR_n 为本级荷载增量.此时,至本级总的荷载为 $P_{R_n} = \sum_1^n \Delta R_i$.
- 累加计算应力和位移值,即: $\sigma_i = \sigma_{i-1} + \Delta \sigma_i$, $\delta_i = \delta_{i-1} + \Delta \delta_i$.

d. 计算相应于 σ_i 的等效节点荷载列矩阵 P_{σ_i} 将 P_{σ_i} 与 P_{R_i} 相比较,取 $\Delta R'_i = P_{R_i} - P_{\sigma_i}$ 作为失衡力,当 $\Delta R'_i$ 满足一定的收敛条件时,本级增量段计算终止, $\Delta R'_i$ 累加入下一增量段 ΔR_{i+1} 中进行下一增量段的计算. 否则返回步骤 (b), 进行本增量段的迭代计算. 迭代时 K 不变, $\Delta R'_i$ 作为荷载增量.

3 成果分析

利用三维弹塑性有限元数值分析方法来数值描述天荒坪抽水蓄能电站地下厂房洞室群围岩的工作状态. 围岩采用莫尔-库仑 (Mohr-Coulomb) 屈服模型, 非线性有限元方程的求解用增量迭代法进行.

3.1 计算范围及约束条件

天荒坪电站地下厂房洞室群平面布置见图 1. 按右手螺旋法则, 取 X 轴垂直于主厂房的走向, 指向主变洞的方向为其正向; 取 Y 轴平行于主厂房的走向, 指向安装场的方向为其正向; 取铅直向上为 Z 轴的正向.

3.1.1 计算范围

X 向在主厂房远离主变洞一侧向外延 80 m, 在主变洞远离主厂房一侧向外延 54 m, 加上主厂房和主变洞间的距离为 71 m, 即 X 向的长度为 205 m; Y 向从副厂房和安装场各外延 60 m, 即 Y 向的长度为 320 m; Z 向从 $\nabla 140$ m 至 $\nabla 335$ m (主厂房顶部和底部高程分别为 214.2 m 和 216.93 m), 即 Z 向的高度为 195 m.

3.1.2 单元形成和约束条件

围岩采用八结点六面体等参单元, 单元总数为 8533 个, 结点总数为 9360 个. 边界上所有结点取为固定约束.

3.2 材料力学参数

整个计算范围内的岩体为均质各向同性. 其力学参数如下: 重度 $\gamma = 26.1 \text{ kN/m}^3$, 弹模 $E = 68.0 \text{ GPa}$, 泊松比 $\mu = 0.22$, 凝聚力 $C = 0.30 \text{ MPa}$, 摩擦系数 $f = 1.19$.

3.3 地应力场的确定

文献 [1] 对天荒坪工程的地应力资料进行回归分析, 得出地应力与岩体厚度 (H) 的关系为: $\sigma_x = 7.1431 + 0.00714H$; $\sigma_z = 3.1426 + 0.03143H$. 本次计算采用该成果, 并认为水平向的地应力相等.

3.4 地下洞室群的开挖顺序及计算方案

工程实际中, 洞室群不是一次成洞的, 不同的开挖顺序其应力和位移结果是不同的. 所以, 数值分析中应

模拟洞室群的开挖顺序, 将前期开挖后的最终应力状态取为后开挖期的初始应力场. 通过模拟不同的开挖过程并计算它们的应力和位移结果, 找出洞室群开挖过程中的相互影响, 最终确定较合理的开挖顺序. 共拟定了图 3 中的 4 个计算方案.

a. 方案 1: 模拟实际开挖顺序, 即主厂房顺序开挖, 主变洞隔层且间断开挖, 称之为隔层开挖方案. 即: ①主厂房第 I 层; ②主厂房第 II 层; 主变洞第 I 层及第 III 层靠主厂房半边; ③主厂房第 III 层; ④主厂房第 IV 层 6 个母线洞, 主变洞第 II 层靠主厂房半边; ⑤主厂房第 V 层; ⑥主厂房第 VI 层; ⑦主变洞剩余部分.

b. 方案 2: 模拟只开挖主

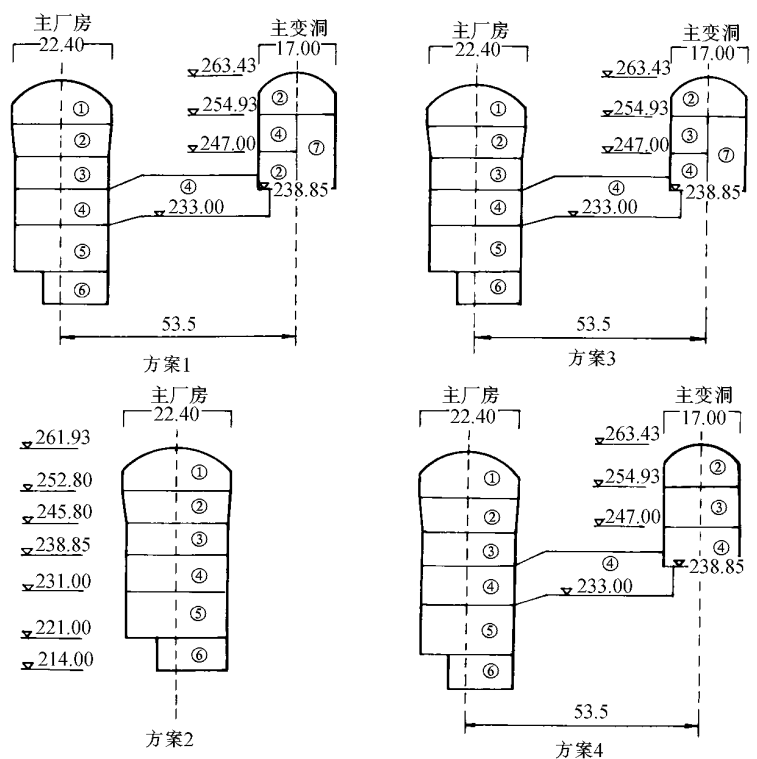


图 3 地下洞室群的开挖顺序

Fig.3 Excavation procedure of underground caverns

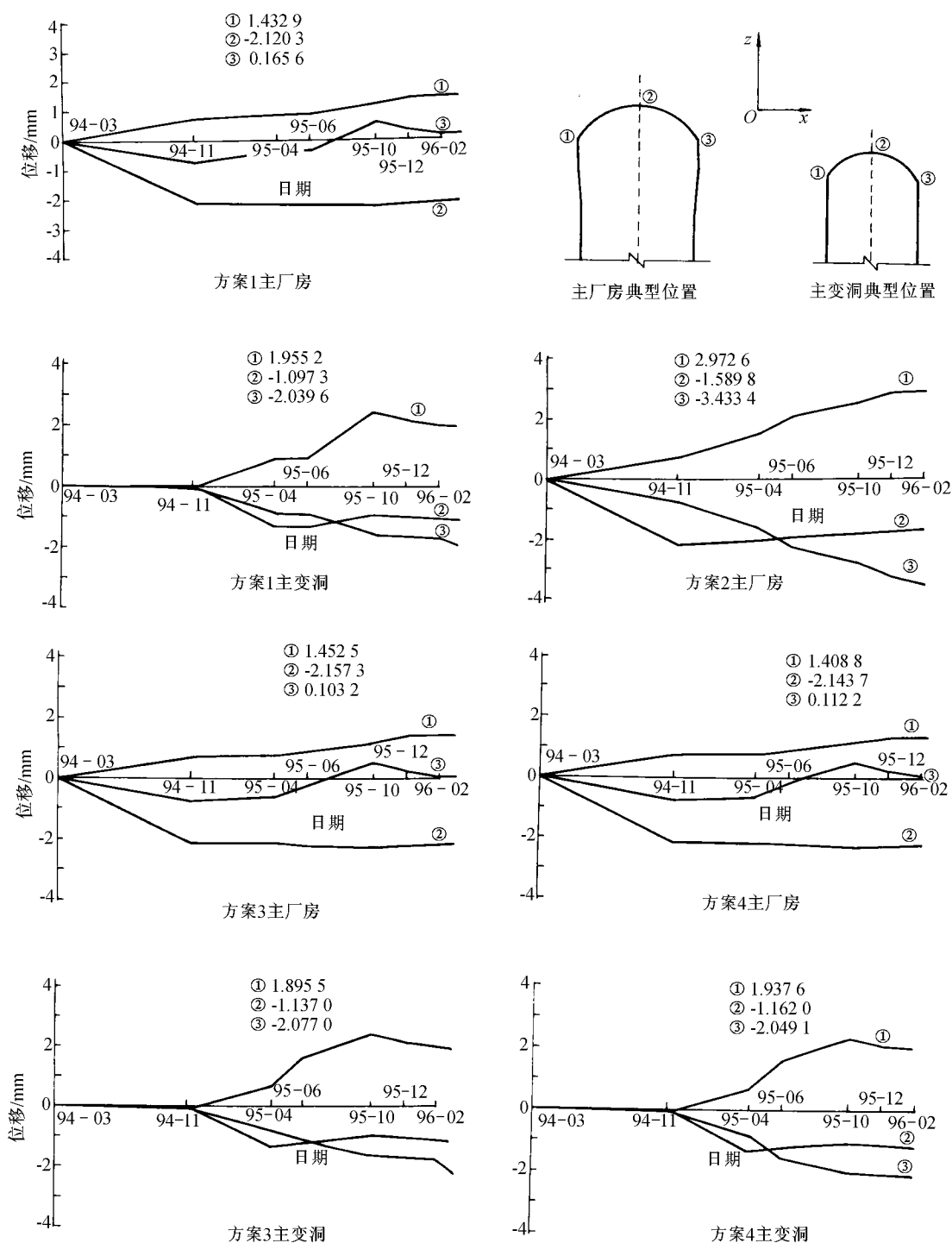


图 4 各方案各施工期主厂房主变洞拱顶拱肩位移变化图

Fig.4 Displacement variation at arch crown and springer of main power house and transformer hall in each construction period for each excavation scheme

厂房,不挖主变洞和母线洞,称之为单主厂房开挖方案,即主厂房Ⅰ~Ⅵ层顺序开挖。

c. 方案3 模拟主变洞不隔层连续开挖,但主变洞Ⅱ、Ⅲ层只挖靠主厂房半边,称之为半连续开挖方案。即:①主厂房第Ⅰ层;②主厂房第Ⅱ层;主变洞第Ⅰ层;③主厂房第Ⅲ层;主变洞第Ⅱ层靠主厂房半边;④主厂房第Ⅳ层;6个母线洞;主变洞第Ⅲ层靠主厂房半边;⑤主厂房第Ⅴ层;⑥主厂房第Ⅵ层;⑦主变洞剩余部分。

d. 方案4 模拟主变洞不隔层连续开挖,且主变洞Ⅱ、Ⅲ层全部挖去,称之为连续开挖方案。即:①主厂房

第Ⅰ层 ;②主厂房第Ⅱ层 ,主变洞第Ⅰ层 ;③主厂房第Ⅲ层 ,主变洞第Ⅱ层 ;④主厂房第Ⅳ层 ,6个母线洞 ,主变洞第Ⅲ层 ;⑤主厂房第Ⅴ层 ;⑥主厂房第Ⅵ层.

通过对4种方案计算结果的分析 ,可以达到以下目的 (a)方案1与方案2的比较 ,可说明主变洞和母线洞的开挖对主厂房的影响 (b)方案1与方案3的比较 ,可说明间隔施工和连续施工的差别 (c)方案3与方案4的比较 ,可说明半连续施工和连续施工的差别.

3.5 计算成果分析

对4种方案各开挖期末的结构进行三维有限元数值计算 ,得出各开挖期末地下洞室群围岩的位移以及屈服范围.对于同一计算方案 ,同一施工期末 ,各横剖面上对应点(即 X, Z 坐标相同, Y 坐标不同的点)的位移、应力状态差别不大.因此 ,以下仅取桩号0+092处横剖面作为典型断面进行分析.同时选取主厂房和主变洞拱顶②点和左右拱肩①、③点的位移作为考察对象(图4中主厂房和主变洞典型位置).

比较图4中的位移成果可得以下结论 (a)各方案第一期施工是相同的 ,即只有主厂房第1层的开挖.开挖后主厂房顶拱②点 Z 向位移向下 ,两拱肩①、③点 X 向位移指向洞内.(b)对于方案2 ,即只开挖主厂房方案 ,第2期及以后各期的开挖 ,引起两拱肩①、③点 X 向位移持续指向洞内 ,而顶拱②点 Z 向位移则转而向上.前5期开挖时结构是对称的 ,故两拱肩①、③点 X 向位移基本对称 ,第6期开挖后结构不再是对称的 ,故位移亦不对称.(c)方案1、3、4中 ,尽管开挖程序不同 ,但主厂房和主变洞位移的变化规律十分相似 ,可见施工顺序对主厂房和主变洞位移的变化规律影响不大.全部开挖结束后的结构相同 ,3种方案的最终位移值基本相同.(d)比较方案1、3的位移成果 ,可以认为 ,主变洞的间隔开挖并不影响位移的变化规律和终值.(e)方案1、3、4中 ,主变洞和母线洞的开挖 ,使得主厂房和主变洞之间岩体的水平约束减小 ,以致主厂房拱肩③点发生较大的指向主变洞方向的位移.

综上所述 ,天荒坪抽水蓄能电站地下洞室群采取如方案1的开挖顺序是合理的.另外 ,洞室群按方案1全部开挖完毕后 ,最大屈服范围出现在桩号0+070~0+122之间的主厂房洞壁且高程245.80m以下的岩体 ,屈服深度3~7m ,故锚杆长度取5~7m是合适的.

参 考 文 献

- 1 张春生 ,刘素琴.天荒坪输水系统二维初始地应力场回归分析.华东水电 ,1993(2):36~40

Study on Reasonable Excavation Procedure of Underground Cavities of Tianhuangping Pumped Storage Power Station

Deng Changtie

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering ,Hohai Univ. ,Nanjing 210098)

Wei Tingguang

(Municipal Design Institute of Zhangjiagang ,Zhangjiagang 215600)

Abstract The investigation of the behavior of underground structures shows that it is significant to make elasto-plastic numerical analysis of underground structures. In this paper key problems are introduced of the numerical analysis by 3-D elasto-plastic FEM for underground structures. The elasto-plastic numerical analysis for the underground cavities of Tianhuangping Pumped Storage Power Station is performed by the computer code of 3-D FEM programmed by the authors. Several excavation procedures of underground cavities are simulated in the calculation. Finally ,the reasonable excavation procedure is determined.

Key words pumped storage power station ;underground cavities ;3-D elasto-plastic FEM analysis