

文章编号: 1000-7598 (2009) 10-3115-08

# 改进的遍布节理模型及其在层状岩体地下工程中的应用

朱泽奇<sup>1</sup>, 盛 谦<sup>1</sup>, 梅松华<sup>2</sup>, 张占荣<sup>1</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;

2. 中国水电顾问集团中南勘测设计研究院, 长沙 410014)

**摘 要:** 基于显式有限差分程序 FLAC<sup>3D</sup>, 针对层状岩体建立了可以考虑其横观各向同性变形特性的遍布节理模型。通过 FLAC<sup>3D</sup> 程序的预留接口导入程序, 将该改进的遍布节理模型中植入 FLAC<sup>3D</sup> 动态链接库。在此基础上进行了层状岩体变形与强度各向异性特性的研究, 最后将该模型应用于龙滩水电站巨型地下洞室群的层状岩体围岩变形及破裂特征分析。研究表明, 围岩变形主要表现为岩层同性面内的变形, 其左右边墙变形不对称性主要受断层切割控制; 围岩破坏型式以剪切破坏为主, 其中岩体整体破坏受断层控制, 表现为中低应力条件下的拉剪或压剪破坏; 而开挖引起的岩层破坏受制于陡倾角层状岩体结构, 表现为层间错动引起的剪切破坏。

**关 键 词:** 遍布节理模型, 层状岩体, 各向异性, 围岩稳定性, FLAC<sup>3D</sup>

**中图分类号:** TB 115; TU 45

**文献标识码:** A

## Improved ubiquitous-joint model and its application to underground engineering in layered rock masses

ZHU Ze-qi<sup>1</sup>, SHENG Qian<sup>1</sup>, MEI Song-hua<sup>2</sup>, ZHANG Zhan-rong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Mid-South Design &amp; Research Institute, CHECC, Changsha 410014, China)

**Abstract:** An improved ubiquitous-joint model, which can take into account of the transversely isotropic deformation characteristic of the layered rock masses, is established. By using the program's reserves connection, this new model is implanted into the explicit finite-difference program FLAC<sup>3D</sup>, and the anisotropy of deformation and strength of the layered rock masses are studied. Then, the deformation and fracture characteristics of the layered rock masses of the Longtan hydropower station underground caverns are studied based on the improved model. The results show that the dominating deformation occurs in the isotropic plane of the rock masses, and the asymmetric deformation of the side wall are controlled by the faults. The main failure of the surrounding rock masses is shear failure which is also controlled by the faults and primarily presents the tensile-shear failure and the compression-shear failure under the moderate and low stress. The joint failure that caused by the excavation process are controlled by the steep dip layered rock mass structure, which primarily presents the shear failure caused by intercalated sliding.

**Key words:** ubiquitous-joint model; layered rock masses; anisotropy; stability of surrounding rock; FLAC<sup>3D</sup>

## 1 引 言

层状岩体是指分布有一组优势原生结构面的沉积岩、喷出岩以及副变质岩, 广泛分布于自然界。

其结构特点就是层面的存在及其定向排列, 是一种非均质、非连续、各向异性的力学介质, 具有明显的各向异性的变形和强度特性。

在层状岩体地下工程中, 岩层变形和强度的各

收稿日期: 2009-02-18

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划重点项目 (No. 90715042); 国家自然科学基金面上项目 (No. 50579071); 国家科技支撑计划 (No. 2006BAB04A06) 资助。

第一作者简介: 朱泽奇, 男, 1980 年生, 博士, 助理研究员, 从事数值岩石力学与工程和隧洞围岩稳定性方面研究。E-mail: zhuzeqi2005@tom.com

向异性及结构面的低强度特点使得围岩的变形和稳定性问题十分复杂，国内外学者对此开展了广泛的研究<sup>[1-6]</sup>。但总的来说，目前对岩体各向异性屈服准则和本构关系的研究主要还处于理论研究阶段，实际岩体工程中应用较少。其主要原因在于：各向异性屈服准则及其本构关系十分复杂，参数多，且取值十分困难；各向异性本构关系往往无法用显式的数学公式来表示，计算过程复杂，计算量巨大。

层状岩体在平行于层理方向上力学性质比较相近，而在平行和垂直层理方向上的物理力学性质则差异较大。因此，在研究其受力引起的力学响应时，常将其简化为横观各向同性介质<sup>[7]</sup>。关于层状岩体屈服准则的建立，常用两种方法来实现：一是引入表示材料各向异性的参数，将各向同性体的屈服条件加以扩展，如 Hill、Hoffman 和 Smith 等提出的准则<sup>[7-8]</sup>。二是借用传统的 Mohr-Coulomb 等准则的形式，引入了由材料主方向上的抗剪强度（或抗拉强度）组成的张量，在一定的应力条件下寻找最可能的破坏面<sup>[9-10]</sup>，遍布节理模型（Ubiquitous-joint model）正是基于这一思想建立层状岩体的各向异性屈服准则。但是，其本构关系仍然是各向同性的，显然无法真实反映层状岩体的横观各向同性变形特性。

本文基于显式有限差分程序 FLAC<sup>3D</sup>，建立可以考虑横观各向同性变形特性的遍布节理模型，通过 FLAC<sup>3D</sup> 程序的预留接口导入程序，将此改进的遍布节理模型植入 FLAC<sup>3D</sup> 动态链接库。在此基础上进行层状岩体变形与强度各向异性特性的研究，最后将该模型应用于龙滩水电站巨型地下洞室群的开挖过程模拟，研究分析了层状岩体围岩变形及破裂特征，并与实际监测成果进行了对比，得到了一些有益的结论。

## 2 改进的遍布节理模型

目前针对遍布节理模型的工程应用较少<sup>[11-12]</sup>，主要集中在层状岩质边坡的失稳机制与稳定性分析上。本文将横观各向同性本构关系引入遍布节理模型，使改进后的遍布节理模型可以更好地反映层状岩体的变形与强度特性。现对改进的遍布节理模型介绍如下。

### 2.1 本构关系

对图 1 所示横观各向同性岩体，通常以层面为  $x'-y'$  平面，法向为  $z'$  轴，则在局部坐标系  $x'y'z'$  中其应力-应变关系<sup>[13]</sup>可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_{xx} &= S_1(\varepsilon_{ij}) = M \left[ (1-n\mu_2^2)\varepsilon'_{xx} + (\mu_1+n\mu_2^2)\varepsilon'_{yy} + \mu_2(1+\mu_1)\varepsilon'_{zz} \right] \\ \sigma'_{yy} &= S_2(\varepsilon_{ij}) = M \left[ (\mu_1+n\mu_2^2)\varepsilon'_{xx} + (1-n\mu_2^2)\varepsilon'_{yy} + \mu_2(1+\mu_1)\varepsilon'_{zz} \right] \\ \sigma'_{zz} &= S_3(\varepsilon_{ij}) = M \left[ \mu_2(1+\mu_1)\varepsilon'_{xx} + \mu_2(1+\mu_1)\varepsilon'_{yy} + (1-\mu_1^2)\varepsilon'_{zz}/n \right] \\ \sigma'_{xy} &= S_4(\varepsilon_{ij}) = G_1\gamma'_{xy}; \quad \sigma'_{yz} = S_5(\varepsilon_{ij}) = G_2\gamma'_{yz} \\ \sigma'_{zx} &= S_6(\varepsilon_{ij}) = G_2\gamma'_{zx} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： $M = E_1 / (1 - \mu_1 - 2n\mu_2^2)(1 + \mu_1)$ ； $n = E_2 / E_1$ ； $G_1 = E_1 / 2(1 + \mu_1)$ ； $E_1$ 、 $\mu_1$  分别为层面内的弹性模量及泊松比； $E_2$ 、 $G_2$ 、 $\mu_2$  分别为垂直层面方向的弹性模量、剪切模量及泊松比。

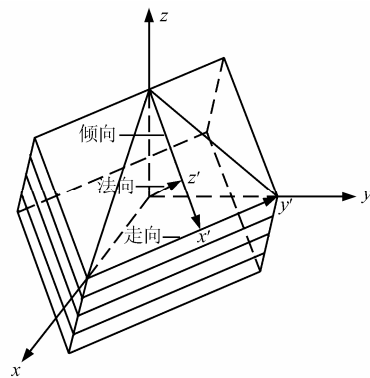


图 1 横观各向同性体整体坐标与节理面局部坐标  
Fig.1 Local and global coordinate systems

局部坐标系  $x'y'z'$  和整体坐标系  $xyz$  下的应力关系可由式 (2) 表示，即

$$[\sigma'] = [C]^T [\sigma] [C] \quad (2)$$

$$\text{式中：} [C] = \begin{bmatrix} \cos(x',x) & \cos(x',y) & \cos(x',z) \\ \cos(y',x) & \cos(y',y) & \cos(y',z) \\ \cos(z',x) & \cos(z',y) & \cos(z',z) \end{bmatrix}; \quad (x',x)$$

为局部坐标轴  $x'$  与广义坐标轴  $x$  之间的夹角； $[C]^T$  为  $[C]$  的转换矩阵。

### 2.2 屈服准则

改进的遍布节理模型仍然沿用 Ubiquitous-Joint 模型的各向异性屈服准则，它包含 Mohr-Coulomb 体内特殊方向上的弱面。根据应力状态、弱面产状以及模型体和弱面的材料特性的不同，屈服可能发生在岩体内，或者发生在弱面上，或者在两个部分都发生<sup>[11]</sup>。与 Ubiquitous-Joint 模型不同的是，改进

的遍布节理模型引入了横观各向同性本构关系，并且当岩体达到屈服状态时，其“塑性应力修正”过程也将发生变化，介绍如下。

FLAC<sup>3D</sup> 中的 Mohr-Coulomb 屈服准则是 Mohr-Coulomb 剪屈服准则与拉屈服准则的复合，见图 2。

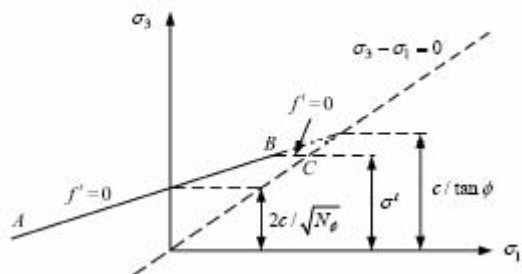


图 2 FLAC<sup>3D</sup> 的 Mohr-Coulomb 屈服准则  
Fig.2 Mohr-Coulomb failure criterion in FLAC<sup>3D</sup>

屈服包络线  $f(\sigma_1, \sigma_3) = 0$ ，从 A 到 B 段由剪屈服准则  $f^s = 0$  定义，从 B 到 C 段由拉伸屈服准则  $f^t = 0$  定义，其形式为

$$\left. \begin{aligned} f^s &= \sigma_1 + \sigma_3 N_\phi + 2c\sqrt{N_\phi}; \\ f^t &= \sigma_3 - \sigma^t; N_\phi = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中： $c$ 、 $\phi$  分别为岩体的等效凝聚力与内摩擦角； $\sigma^t$  为岩体抗拉强度。

当岩体应力状态处于稳定区域时，岩体呈弹性状态，不需要进行塑性修正。进入屈服区域时，根据关联（非关联）流动法则，需进行“塑性应力修正”。所谓“塑性应力修正”是给定  $t$  时刻的应力状态和  $\Delta t$  时间步的应变增量，确定  $t + \Delta t$  时刻的应力增量和应力状态。在 FLAC<sup>3D</sup> 中每步计算前都假设发生的变形全部是弹性变形，这样应力增量可由其弹性本构关系直接得出。但如果发生塑性应变，应力增量仅由总应变增量的弹性部分确定，因此必须对假设得到的应力增量进行修正，从而得出新的应力增量和应力状态<sup>[14]</sup>。

在 FLAC<sup>3D</sup> 中，对于剪塑性流动和拉塑性流动分别进行定义，并且分别对应不同的流动法则。岩体的剪塑性流动对应非关联流动法则，其剪塑性势函数为

$$g^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\psi \quad (4)$$

式中： $N_\psi = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi}$ ， $\psi$  为岩体的剪胀角。

岩体的拉塑性流动对应相关联流动法则，其拉塑性势函数为

$$g^t = \sigma_3 \quad (5)$$

对于剪切屈服流动情况（AB 段）， $t$  时刻应力  $\sigma_i^t$  和  $t + \Delta t$  时刻应力  $\sigma_i^N$  有如下关系：

$$\sigma_i^N = \sigma_i^t - \lambda^s S_i \left( \frac{\partial g}{\partial \sigma_n} \right) \quad (6)$$

考虑到岩体的各向异性，且修正后应力应满足  $f^s(\sigma_1^N, \sigma_3^N) = 0$ ，修正后的应力增量关系可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \Delta \sigma_1 &= M \lambda^s \left[ (1 - n \mu_2^2) - N_\psi \mu_2 (1 + \mu_1) \right] \\ \Delta \sigma_2 &= M \lambda^s \left[ (\mu_1 + n \mu_2^2) - N_\psi \mu_2 (1 + \mu_1) \right] \\ \Delta \sigma_3 &= M \lambda^s \left[ \mu_2 (1 + \mu_1) - N_\psi (1 - \mu_1^2) / n \right] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中

$$\lambda^s = f^s(\sigma_1^t, \sigma_3^t) / \left( M \left[ (1 - n \mu_2^2) - N_\psi \mu_2 (1 + \mu_1) - N_\psi (\mu_2 (1 + \mu_1) - N_\psi (1 - \mu_1^2) / n) \right] \right) \quad (8)$$

对于拉伸屈服流动情况（BC 段），同理考虑到  $f^t(\sigma_1^N, \sigma_3^N) = 0$ ，其修正后的应力增量关系可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \Delta \sigma_1 &= M \lambda^t \mu_2 (1 + \mu_1) \\ \Delta \sigma_2 &= M \lambda^t \mu_2 (1 + \mu_1) \\ \Delta \sigma_3 &= M \lambda^t (1 - \mu_1^2) / n \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中： $\lambda^t = \frac{nf^t(\sigma_1^t, \sigma_3^t)}{M(1 - \mu_1^2)}$ 。

层状岩体的节理弱面的产状和应力状态可由局部坐标表示（图 1），用来描述弱面的应力变量有 4 个，分别为  $\Delta \sigma'_{11}$ 、 $\Delta \sigma'_{22}$ 、 $\Delta \sigma'_{33}$  和  $\Delta \tau$ ，其中  $\Delta \tau = \sqrt{\Delta \sigma'_{13}{}^2 + \Delta \sigma'_{23}{}^2}$ ； $\Delta \sigma'_{11}$  为节理弱面在局部坐标系下的最大主应力增量。在  $(\sigma'_{33}, \tau)$  坐标系中表示的是节理弱面屈服准则<sup>[14]</sup>，如图 3 所示。

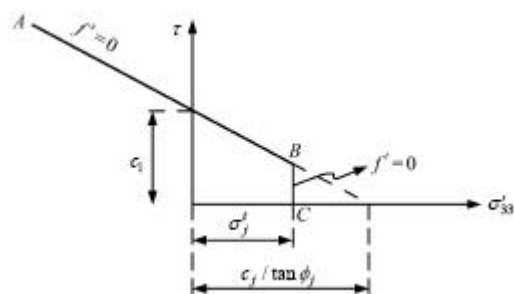


图 3 节理弱面屈服准则  
Fig.3 Joint weak-plane failure criterion

根据 Mohr-Coulomb 屈服准则，局部坐标系下剪屈服包络线  $AB$  可表示为  $f^s = 0$ ，拉伸破坏包络线  $BC$  可表示为  $f^t = 0$ ，其形式为

$$\left. \begin{aligned} f^s &= \tau + \sigma'_3 \tan \Phi_j - c_j \\ f^t &= \sigma'_3 - \sigma'_j; \sigma'_{j\max} = c_j / \tan \Phi_j \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中： $\Phi_j$ 、 $c_j$ 、 $\sigma'_j$  分别为节理弱面的内摩擦角、凝聚力和抗拉强度。

用隐函数  $g^s$  和  $g^t$  表征节理面的剪切和拉伸塑性流动规律，其中函数  $g^s$  对应非关联流动法则，其形式为

$$g^s = \tau + \sigma'_3 \tan \psi_j \quad (11)$$

式中： $\psi_j$  为节理弱面的膨胀角。

函数  $g^t$  为相关联的流动法则，其形式为

$$g^t = \sigma'_3 \quad (12)$$

同样，当节理面进入屈服状态时，根据关联（非关联）流动法则，需进行“塑性应力修正”，这里不再赘述。需要注意的是，这里进行的是局部坐标下应力修正，最后应将修正后的应力增量转换到整体坐标系下。

在 FLAC<sup>3D</sup> 的计算循环中，对于每个单元，本构方程的运算只需由应变增量求得应力增量，不需要象有限元那样形成单元刚度矩阵和总刚度矩阵。所以本模型在计算弹性应力增量及总应力时，将层状岩体等效为横观各向同性体，其应力增量按式 (1)、(2) 计算，进行塑性计算时则将层状岩体中的节理独立出来进行。基于式 (1) 计算得到的应力状态，首先基于 Mohr-Coulomb 复合屈服准则（见式 (3)）判断假设内部不存在节理的岩体的整体破坏与否，如果破坏，则按式 (7) 或式 (8) 进行“塑性应力修正”。然后，根据式 (9) 判断节理破坏与否，如果破坏，同理进行“塑性应力修正”。在 FLAC<sup>3D</sup> 中所有的本构模型基本上遵从同样的算法。

### 2.3 单轴压缩试验模拟

FLAC<sup>3D</sup>Vesion2.1 版本提供了程序接口，方便用户进行二次开发，添加自己所需的本构模型<sup>[14]</sup>。本文通过 FLAC<sup>3D</sup> 程序接口，应用 VC.net 平台，编制 DLL 动态链接库文件，使上述改进的遍布节理本构模型在 FLAC<sup>3D</sup> 程序中得到实现，为了研究层状岩体变形及强度的各向异性特性，以龙滩水电站的砂岩、泥板岩互层组层状岩体为例，针对该层状岩体的圆柱形试样，进行了单轴压缩计算机模拟试验，相关计算参数见表 1，计算模型如图 4 所示。

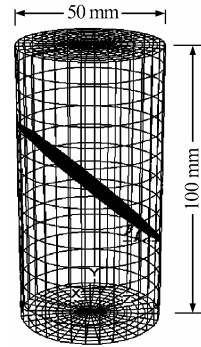


图 4 计算网格  
Fig.4 Mesh of model

由改进的遍布节理模型单轴压缩计算机模拟试验得到的层状岩体弹性模量、单轴抗压强度与节理倾角  $\beta$  的关系曲线如图 5 所示。由图可以看出，层状岩体的弹性模量在平行于层面方向最大，在垂直层面方向最小，其最小值出现在层面倾角  $50^\circ \sim 60^\circ$  之间，将最小值处层面倾角作为临界值。从图还可以看出，当层面倾角小于该临界值，则层状岩体弹性模量随  $\beta$  增大几乎保持不变；当大于该临界值，则随  $\beta$  增大而增大。图 5 中单轴抗压强度与层面倾角的关系曲线说明，在缓倾角阶段岩体的强度较高，破坏一般不受层面倾角的影响，随着倾角的加大岩体强度越来越低，并在  $50^\circ \sim 70^\circ$  之间出现最低值。这些计算机模拟试验得到的结论验证了前人的试验及理论推导<sup>[15-18]</sup>，亦说明本文建立的改进的遍布节理模型，可以很好的反映层状岩体的变形及强度各向异性。

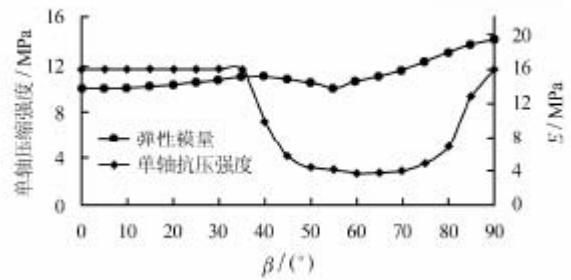


图 5 单轴抗压强度、弹性模量与层面倾角的关系  
Fig.5 The relationship between uniaxial compressive strength, Young's modulus and stratification plane dip

## 3 工程背景及数值模型

龙滩水电站是红水河上的“龙头”电站，以发电为主、兼顾防洪和航运的关键工程。地下厂房区地层为三叠系中统板纳组 (T<sub>2b</sub>)，由厚层钙质砂岩、粉砂岩和泥板岩互层夹少量薄层凝灰岩、硅泥质灰岩组成。厂房区位于近 SN 向的八奈背斜东翼

和龙滩向斜西翼，为一单斜构造，正常岩层产状为  $345^{\circ} \sim 355^{\circ} / NE \angle / 57^{\circ} \sim 62^{\circ}$ 。由于洞室纵横交错，跨度大，围岩为陡倾角层状结构岩体，且层间错动较发育，因此，洞室围岩的稳定性分析成为工程建设的关键技术问题。

三维模型计算范围取为  $500 \text{ m} \times 640 \text{ m} \times 600 \text{ m}$ 。计算坐标系  $X$  轴正方向与主厂房轴线方向垂直 ( $NE40^{\circ}$ )， $Y$  轴正方向取为垂直向上， $Z$  轴正方向与机组中心线方向一致 ( $SE50^{\circ}$ )。计算模型主要考虑了断层 F1、F5、F12、F18、F63 等 5 条主要断层，断层采用薄层实体单元模拟；而层状岩体中的层间节理及次要断层作为遍布节理模型的一组优势节理弱面来考虑。为了简化计算，将强、弱风化层视为各向同性弹塑性材料。地下厂房的网格图见图 6，开挖部分网格图如图 7 所示。数值模型共划分网格数：节点为 54 890 个，单元为 248 092 个。模型四周采用法向约束，底部三向约束，地表自由。

采用 FLAC<sup>3D</sup> 程序，基于改进的遍布节理模型进行了地下厂房洞室群开挖过程模拟，并与 Mohr-Coulomb 弹塑性计算结果进行了比较，分析了龙滩水电站地下厂房洞室群的稳定性。参数见表 1。

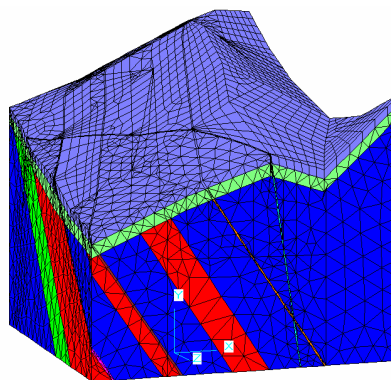


图 6 地下厂房的计算网格  
Fig.6 Mesh of underground plant

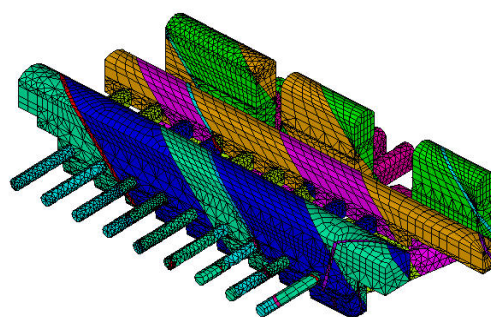


图 7 开挖部分的网格  
Fig.7 Mesh of excavation

表 1 三维整体计算岩体横观各向同性参数表<sup>[18]</sup>  
Table 1 Parameters of rock masses

岩层	重度 / (kN/m <sup>3</sup> )	$E_1$ / GPa	$E_2$ / GPa	$\mu_1$	$\mu_2$	$G_2$ / GPa	$C$ / MPa	$C_f$ / MPa	$\Phi$ / (°)	$\Phi_f$ / (°)	$\sigma^t$ / MPa	$\sigma_f^t$ / MPa
砂岩组	27.3	22.0	16.5	0.24	0.27	9.0	2.45	0.2	56.3	33.0	1.2	0.48
互层组	27.3	20.0	14.0	0.25	0.28	8.0	1.96	0.2	53.5	33.0	0.9	0.40
泥板岩组	27.0	16.0	10.4	0.26	0.29	6.0	1.48	0.2	47.7	33.0	0.7	0.20
弱风化层	26.5	6.0		0.28		0.8		42.0				
强风化层	25.5	1.0		0.34		0.4		35.0				
断层	21.0	0.1		0.34		0.05		19.3				

注：岩层倾角  $56.2^{\circ}$ ，倾向为  $56.6^{\circ}$

## 4 计算结果分析

### 4.1 变形分析

以下主要给出了龙滩水电站地下厂房 II-II 监测断面（桩号 HL0+000.25）的数值计算结果。图 8 为基于改进的遍布节理模型得到的地下厂房各主要监测孔口点计算位移值与监测值的比较，说明数值计算获得的洞室群开挖围岩的变形在量值上与监测位移相当，变化规律基本一致。图 9 为开挖完成后 II-II 计算剖面的位移等色区及矢量图。洞室群开挖完成后，围岩变形以主厂房围岩的变形最大，调压井次之，主变室围岩变形最小，变形量为  $20 \sim$

$30 \text{ mm}$ 。主要洞室的变形特征是：顶拱下沉，底板回弹，主厂房上游边墙的变形特征是围岩顺结构面滑移，调压井下游边墙则表现为倾倒变形，变形以水平变形为主。

采用改进型遍布节理模型计算得到的变形比 Mohr-Coulomb 模型的计算位移大（图 10 和图 11），与监测结果更接近。采用 Mohr-Coulomb 模型计算得到的最大位移值出现在调压井下游边墙，而采用改进的遍布节理模型得到的最大变形均出现在厂房上游边墙，与监测结果非常吻合，最大监测位移发生在 II-II 监测断面厂房上游边墙  $234.3 \text{ m}$  高程，变形量为  $88.99 \text{ mm}$ ，见图 8 和图 9。

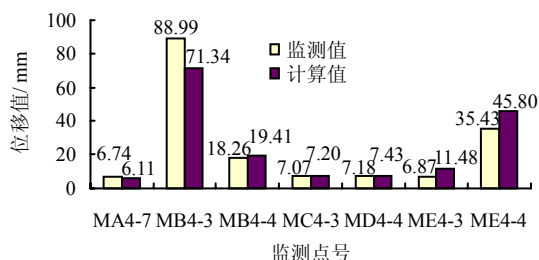


图8 主厂房各监测孔孔口点监测位移与计算位移对比图(单位: mm)

Fig.8 Contrast diagram of the observation and calculated displacement in the monitoring bore of the main powerhouse(unit: mm)

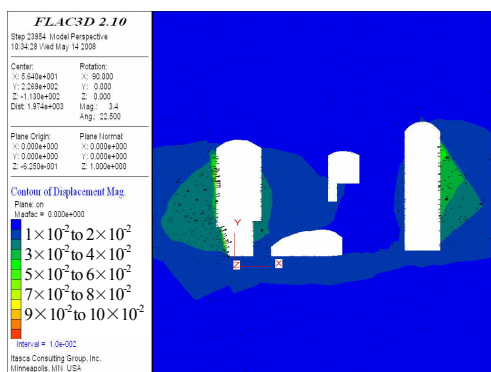


图9 开挖完成后II-II剖面位移等色区及矢量图(单位: m)

Fig.9 Displacement nephogram and vectorgraph of the section II-II (Improved ubiquitous model) (unit: m)

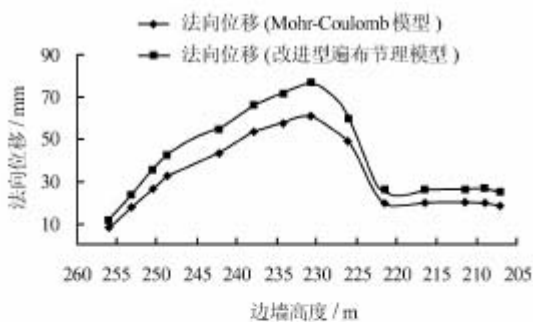


图10 II-II剖面主厂房左边墙法向位移随高程变化曲线(单位: mm)

Fig.10 Variation X-direction displacement curves along the left wall of the section II-II (unit: mm)

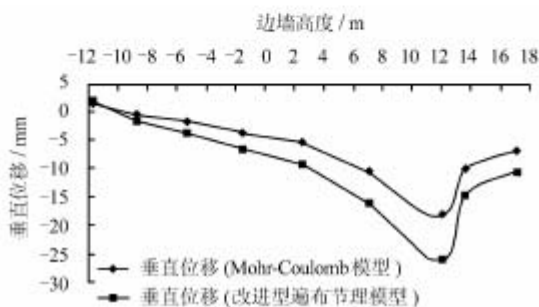


图11 II-II剖面主厂房顶拱沉降随厂房跨度变化曲线(单位: mm)

Fig.11 Variation Y-direction displacement curves along crown of the section II-II (unit: mm)

图 10、11 给出的 II-II 计算剖面主厂房边墙和顶拱的法向位移变化曲线显示两种模型得到的围岩变形规律一致，这是因为厂房轴线与岩层走向斜交，改进的遍布节理模型虽然可以考虑岩体的变形各向异性，但围岩的卸荷回弹变形主要表现为平行节理弱面方向的变形，导致其法向变形 (X-Y 面内) 虽有所增加，增幅约为 10%~40%，但位移形态却不会发生太大变化。另外，通过两种计算方案的对比分析，还说明了洞室左右边墙变形的不对称主要是由于围岩受断层切割所致。

### 4.2 应力及破坏分析

洞室开挖引起的二次应力场有两个显著特点：

- ①顶拱、边墙与顶拱的交接部位以及边墙与底板的交接处均出现一定程度的应力集中，特别是顶拱部位；随着埋深的增加，顶拱围岩开挖引起的应力集中范围扩大，应力集中程度有所增加，最大主应力达到 20~35 MPa，应力集中系数为 2.3~3.5。
- ②开挖引起应力释放使岩墙的主应力方向发生显著变化，竖直方向应力增加，水平应力减小，局部位置甚至出现拉应力。拉应力区主要出现在边墙部位，量值为 0.7~1.0 MPa，局部最大拉应力达 1.4 MPa (图 12)。应力场的这种调整对边墙的稳定不利，特别是在边墙部位存在不利结构面的组合时，可能导致边墙局部出现失稳。

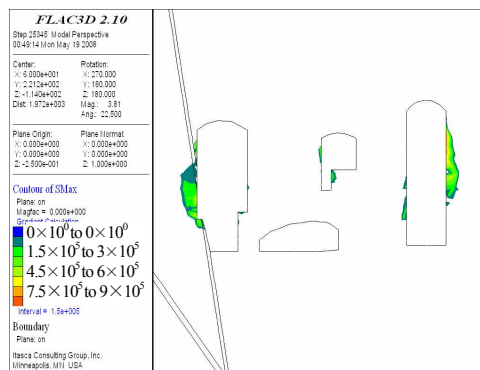


图12 II-II剖面拉应力等色区图(单位: MPa)

Fig.12 Tension stress nephogram of the section II-II (Improved ubiquitous model) (unit: MPa)

洞室群围岩破坏的型式基本上以剪切破坏为主。基于改进的遍布节理模型可以分别得到岩体的剪切破坏区 (图 13) 和岩层的剪切破坏区 (图 14)。由图 13、14 可以看出，岩体剪切破坏区主要出现在围岩受断层切割处，其余部位较少出现，整体稳定性较好，岩体剪切破坏区的分布范围较小，未超出锚杆的加固范围；岩层的剪切破坏主要出现在各洞室边墙处，破坏区宽度一般小于洞宽的 1/2，其分

布几乎不受断层影响。

综上所述, 断层的切割导致围岩变形和破坏范围扩大, 围岩破坏区的形成和发展受断层控制。断层通过部位往往既是较大变形区, 又是拉应力区和剪切破坏区, 即洞室围岩破坏型式为中低应力条件下的拉剪或压剪破坏。而开挖引起的岩层破坏受制于陡倾角层状岩体结构, 表现为层间错动引起的剪切破坏。这些特点对洞室群围岩支护与加固设计有指导意义, 可以采用系统锚杆和局部锚索加固的支护方式改善围岩的应力状态, 提高岩体及岩层强度及抗变形的能力。

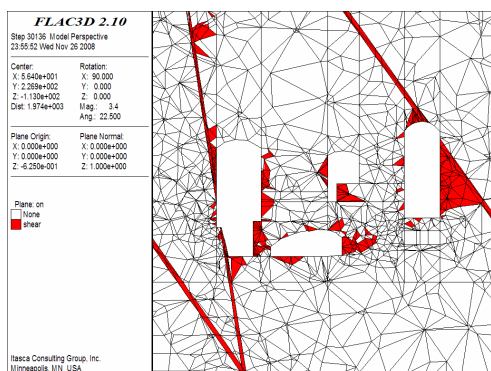


图 13 II-II 剖面岩体剪切破坏区

Fig.13 Shear failure area of rock masses of the section II-II (Improved ubiquitous model)

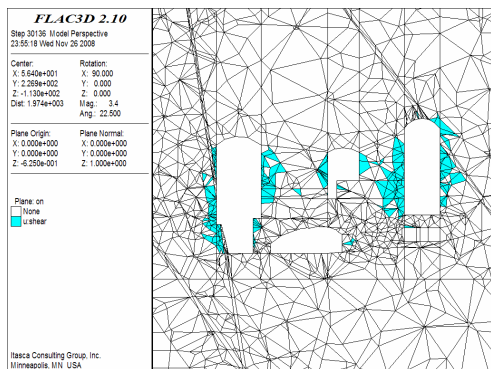


图 14 II-II 剖面岩层剪切破坏区

Fig.14 Shear failure area of joint weak-plane of the section II-II (Improved ubiquitous model)

## 5 结论

通过对改进型遍布节理弱面模型的分析, 并运用 FLAC<sup>3D</sup> 程序, 对龙滩水电站地下洞室群开挖过程进行了三维数值仿真, 针对不同计算方案的比较分析, 得到如下主要结论:

(1) 将层状岩体视为横观各向同性体, 考虑 Mohr-Coulomb 屈服准则某一特殊方向“隐含”的节理弱面, 建立了可以反映层状岩体变形及强度各

向异性特性的改进型遍布节理模型, 该模型有参数简单, 且在有限差分程序中方便实现的优点。

(2) 基于改进的遍布节理模型得到的洞室群开挖围岩变形在量值上与监测位移相当, 变化规律基本一致, 说明针对龙滩水电站地下厂房的开挖计算应该考虑层状岩体的变形各向异性。

(3) 采用改进型遍布节理模型计算得到的围岩开挖变形比 Mohr-Coulomb 模型大, 增幅约为 10%~40%, 但围岩变形规律一致, 这是由于洞室布置与岩层斜交, 围岩变形主要表现为岩层同性面内的变形, 其左右边墙变形不对称性主要受断层切割控制。

(4) 洞室群围岩破坏的型式基本上以剪切破坏为主, 围岩整体稳定性较好, 其中岩体整体破坏受断层控制, 表现为中低应力条件下的拉剪或压剪破坏; 而开挖引起的岩层破坏受制于陡倾角层状岩体结构, 表现为层间错动引起的剪切破坏。

## 参考文献

- [1] 陆海昌. 岩体各向异性与巷道围岩应力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1989, 8(2): 141-150.  
LU Hai-chang. Rock anisotropy and stress analysis of underground openings[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1989, 8(2): 141-150.
- [2] 谢谟文, 杨淑清, 廖野澜. 互层状岩体中群洞开挖稳定性研究和实践[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(2): 131-137.  
XIE Mo-wen, YANG Shu-qing, LIAO Ye-lan. Study and practice of stability for tunnel group in alternative stratified rocks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1995, 14(2): 131-137.
- [3] 肖明, 龚玉锋, 俞裕泰. 西龙池抽水蓄能电站地下厂房围岩稳定三维非线性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 557-561.  
XIAO Ming, GONG Yu-feng, YU Yu-tai. Three dimensional stability analysis on surrounding rock of underground houses of Xilongchi Pumped Storage Hydro Power Station[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(5): 557-561.
- [4] 张晓春, 缪协兴. 层状岩体中洞室围岩层裂及破坏的数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11): 1645-1650.  
ZHANG Xiao-chun, MIAO Xie-xing. Numerical simulation on layer-crack and failure of laminated rock masses[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(11): 1645-1650.
- [5] 赵海斌, 李学政, 张孝松. 龙滩水电站地下厂房洞室群围岩稳定性研究[J]. 水力发电, 2004, 30(6): 37-40.  
ZHAO Hai-bin, LI Xue-zheng, ZHANG Xiao-song. Stability study of surrounding rockmass excavations for the underground powerhouse in Longtan Hydropower Station[J]. *Water Power*, 2004, 30(6): 37-40.

- [4] YAGIZ S. Development of rock fracture and brittleness indices to quantify the effects of rock mass features and toughness in the CSM model basic penetration for hard rock tunneling machines[D]. Golden, Colorado, USA: Colorado School of Mines, 2002.
- [5] 龚秋明, 赵坚, 张喜虎. 岩石隧道掘进机的施工预测模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增刊2): 4709—4714. GONG Qiu-ming, ZHAO Jian, ZHANG Xi-hu. Performance prediction of hard rock TBM tunneling[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(Supp.): 4709—4714.
- [6] BARTON N. TBM tunneling in jointed and faulted rock[M]. Rotterdam: A. A. Balkema, 2000.
- [7] SAPIGNI M, BERTI M, BETHAZ E, et al. TBM performance estimation using rock mass classifications[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2002, 39: 771—788.
- [8] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [9] ALVAREZ GRIMA M, BRUINES P A, VERHOEF P N W. Modelling tunnel boring machine performance by Neuro-Fuzzy methods[J]. **Tunneling and Underground Space Technology**, 2000, 15(3): 259—269.
- [10] OKUBO S, KFUKUI K, CHEN W. Expert system for applicability of tunnel boring machines in Japan[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2003, 36(4): 305—322.
- [11] BENARDOS A G, KALIAMPAKOS D C. Modeling TBM performance with artificial neural networks[J]. **Tunneling and Underground Space Technology**, 2004, 19: 597—605.
- [12] 郝丽娜, 王伟, 吴光宇, 等. 粗糙集-神经网络故障诊断方法研究[J]. 东北大学学报, 2003, 24(3): 252—255. HAO Li-na, WANG Wei, WU Guang-yu, et al. Research on rough set-neural network fault diagnosis method[J]. **Journal of Northeastern University**, 2003, 24(3): 252—255.
- [13] 史开泉, 崔玉泉. S-粗集与粗决策[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [14] 夏克文, 沈钧毅, 李昌彪. 样本信息处理中一种属性约简方法的研究[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(6): 558—561. XIA Ke-wen, SHEN Jun-yi, LI Chang-biao. Study on attribute reduction method in sample information processing[J]. **Journal of Xi'an JiaoTong University**, 2005, 39(6): 558—561.
- [15] 刘勇健. 基于遗传-神经网络的单桩竖向极限承载力预测方法研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(1): 59—63. LIU Yong-jian. Study of prediction method of vertical ultimate bearing capacity of single pile based on genetic algorithm and neural network[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(1): 59—63.
- [16] 徐钟济. 蒙特卡罗方法[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985.

#### 上接第 3121 页

- [6] 王启耀, 杨林德, 赵法锁. 陡倾角层状岩体中地下洞室围岩的变形[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2006, 26(5): 69—73. WANG Qi-yao, YANG Lin-de, ZHAO Fa-suo. Deformation of huge underground opening excavated in layered rock mass with steep dip angle[J]. **Journal of Chang'an University(Natural Science Edition)**, 2006, 26(5): 69—73.
- [7] 罗祖道, 李思简. 各项异性材料力学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1994: 11—15.
- [8] SMITH B, CEHATHAM J R B. Anisotropic compacting yield condition applied to porous limestone[J]. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, 1980, 17(3): 159—165.
- [9] NOVA R. The failure of transversely isotropic rocks in triaxial compression[J]. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, 1980, 17(6): 325—332.
- [10] NOVA R, ZANINETTI A. An investigation into the tensile behaviour of a schistose rock[J]. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, 1998, 35(3): 301—324.
- [11] 吴顺川, 金爱兵, 高永涛. 基于遍布节理模型的边坡稳定性强度折减法分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 537—542. WU Shun-chuan, JIN Ai-bing, GAO Yong-tao. Slope stability analysis by strength reduction method based on ubiquitous-joint model[J]. **Rock and Solid Mechanics**, 2006, 27(4): 537—542.
- [12] 王曰国, 王星华, 林杭. 基于 Ubiquitous-Joint 模型的层状岩坡稳定性分析[J]. 灾害学, 2007, 22(4): 46—50. WANG Yue-guo, WANG Xing-hua, LIN Hang. Stability analysis of stratified rock slope based on Ubiquitous-Joint Model[J]. **Journal of Catastrophology**, 2007, 22(4): 46—50.
- [13] 张玉军, 刘谊平. 层状岩体的三维弹塑性有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11): 1615—1619. ZHANG Yu-jun, LIU Yi-ping. 3D elasto-plastic FEM analysis on layered rockmass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(11): 1615—1619.
- [14] Itasca Consulting Group. FLAC3D users manual[M] (Version 2.1). USA: Itasca Consulting Group, 2003.
- [15] 曾纪全, 邵小曼, 胡卸文. 岩体力学各向异性试验研究[J]. 水电工程研究, 2001, (2): 8—20.
- [16] Abbas Aifan Al-Harhi. Effect of planar structures on the anisotropy of ranyah sandstone[J]. **Saudi Arabia. Engineering Geology**, 1998, 50: 49—57.
- [17] NASSERI M H B, RAO K S, RAMAMURTHY T. Anisotropic strength and deformational behavior of Himalayan schists[J]. **Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2003, 40: 3—23.
- [18] 水利电力部中南勘测设计研究院. 红水河龙滩水电站岩石力学试验汇编报告(初步设计阶段)[R]. 长沙: 水利电力部中南勘测设计研究院, 1989.