

溪洛渡地下厂房施工开挖的弹塑性损伤 及岩锚支护计算

Computation of elasto-plastic damage and rock-bolt supporting for
Xiluodu underground power house under construction

张强勇

朱维申

(深圳市地质局岩土工程设计研究所, 深圳, 518031) (中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉, 430071)

文 摘 根据建立的弹塑性损伤本构模型及岩锚支护模型对溪洛渡地下厂房洞室群施工开挖稳定性进行了三维非线性有限元计算, 获得了一些有益的工程结论。

关键词 裂隙岩体, 弹塑性损伤, 岩锚支护, 三维有限元

中图法分类号 TU 457

作者简介 张强勇, 男, 1967 年生, 工程师, 1998 年中科院武汉岩土力学研究所获工学博士学位, 现在深圳市地质局从事岩土工程设计研究工作。

Zhang Qiangyong

(Design and Research Institute of Geotechnical Engineering, Shenzhen Geological Bureau, Shenzhen, 518031)

Zhu Weishen

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

Abstract A 3-D elastoplastic damage constitutive model and a cylindrical rock-bolt element model are proposed in this paper. The proposed models have been applied to the stability analysis of Xiluodu underground power house under construction. The 3-D non-linear FEM analysis of surrounding rockmass gives satisfactory results.

Key words jointed rockmass, elastoplastic damage, rock-bolt supporting, 3-D FEM

1 前 言*

本文应用断裂力学和损伤力学理论, 建立了弹塑性损伤本构模型来反映裂隙岩体的损伤变形特性, 并根据断裂裂隙岩体和锚杆支护联合作用机理, 考虑岩体的各向异性损伤力学特性, 建立了损伤锚柱单元模型来模拟锚杆的支护效果, 最后将建立的模型应用于溪洛渡水电站地下厂房洞室群施工开挖稳定性计算, 获得了一些有益的工程结论。

2 裂隙岩体弹塑性损伤本构模型

根据图 1 所示三维节理裂纹扩展的机理^[1], 并考虑裂隙扩展过程中的能量变化及岩体损伤与塑性变形的耦合效应, 可推导出裂隙岩体在初始损伤、损伤演化和塑性损伤变形状态下的三维弹塑性损伤本构关系^[2,3]如下:

$$\dot{\sigma}_{kl} = K_{klrs} \dot{\epsilon}_{rs} \quad (1)$$

式中 K_{klrs} 是裂隙岩体的弹塑性损伤模量张量, 其值为

$$K_{klrs} = E_{klrs}^e - \frac{\left| E_{ijkl}^e \frac{\partial C_{abcd}^{ad}}{\partial \sigma_{ij}} E_{cdpq}^e \sigma_{pq} + C_{abcd}^e E_{cdpq}^e \right| \left| \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ab}} \right|}{\left| \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} E_{ijkl}^e \right| \left| \frac{\partial C_{abcd}^{ad}}{\partial \sigma_{kl}} E_{pqmn}^e \sigma_{mn} + C_{abcd}^e E_{pqmn}^e \right| \left| \frac{\partial f}{\partial \sigma_{rs}} \right| + A} \times$$

$$\frac{\left| \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} E_{ijkl}^e \right| \left| \frac{\partial C_{abcd}^{ad}}{\partial \sigma_{kl}} E_{pqmn}^e \sigma_{mn} + C_{abcd}^e E_{pqmn}^e \right| \left| \frac{\partial f}{\partial \sigma_{rs}} \right|}{\left| \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} E_{ijkl}^e \right| \left| \frac{\partial C_{abcd}^{ad}}{\partial \sigma_{kl}} E_{pqmn}^e \sigma_{mn} + C_{abcd}^e E_{pqmn}^e \right| \left| \frac{\partial f}{\partial \sigma_{rs}} \right| + A} \quad (2)$$

式中各项符号意义可参见文献[2, 3]。

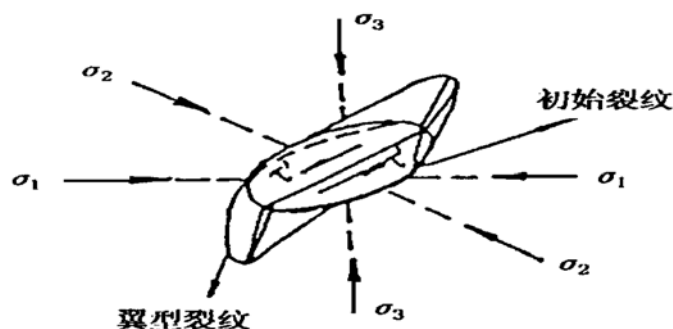


图 1 三维节理裂纹扩展模型

Fig. 1 3-D crack propagation model

3 损伤锚柱单元模型

根据图 2、图 3 所示锚杆与围岩的相互作用及裂隙岩体的各向异性损伤特性, 利用有限元插值理论和虚功方程可求得锚柱单元对裂隙岩体刚度矩阵的“贡

献” $[K_e]_{附}^{[3]}$:

$$[K_e]_{附} = [N]^T [K_e]_b [N] \tag{3}$$

式中 $[N]$ 是锚柱单元的形函数矩阵; $[K_e]_b$ 是锚柱单元的单元刚度矩阵, 其计算表达式可参见文献[3]。

将附加刚度矩阵 $[K_e]_{附}$ 迭加到相应裂隙岩体单元的刚度矩阵中去, 即可有效反映锚杆对围岩变形的约束作用。

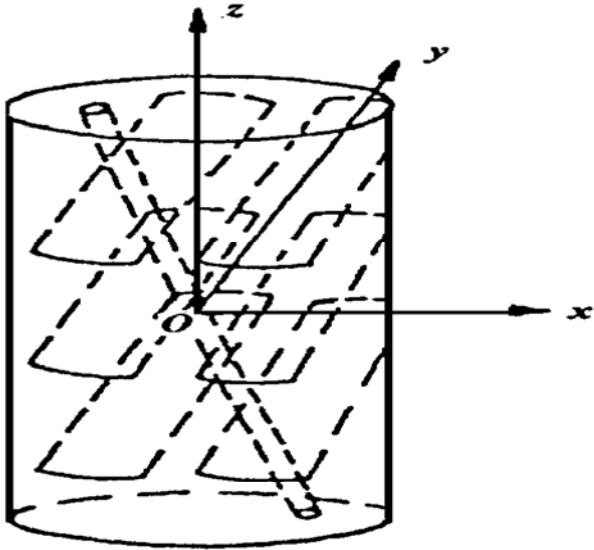


图2 损伤岩锚柱单元
Fig. 2 Cylindrical rock-bolt element

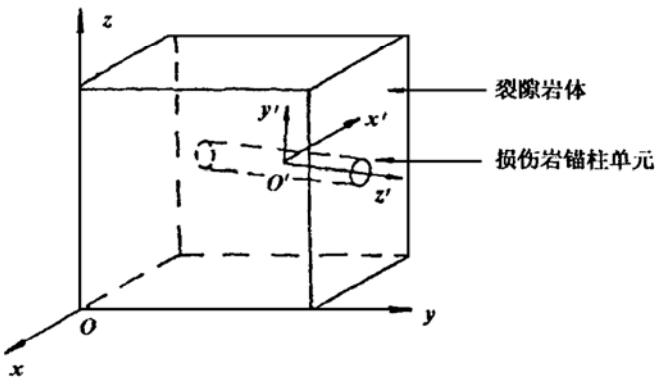


图3 加锚损伤岩体单元
Fig. 3 Damage rockmass element with cylindrical bar

4 工程应用

溪洛渡水电站是以发电为主, 兼有拦砂、防洪、漂木等综合利用效益的特大型水利水电枢纽工程, 本文将裂隙岩体三维弹塑性损伤本构模型及岩锚支护模型应用于溪洛渡水电站大型地下厂房洞室群施工开挖稳定性计算, 获得了一些具有工程指导意义的结论。

4.1 计算条件

地下厂房洞区围岩的力学参数见表 1, 初始地应力场经反演得到, 并知洞区地应力场是一个受地质构造影响较大, 由自重和构造联合作用的中等偏高的地

应力场, 洞室锚杆支护采用螺纹钢筋, 杆长 $L = 6.5\text{ m}$, 间距为 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$, 厂房区裂隙分布主要有以下 5 组: ①N10~ 35°E/NW(SE) $\angle 70 \sim 90^\circ$; ②N50~ 80°E/ SE (NW) $\angle 70 \sim 90^\circ$; ③N0~ 30°W/NE $\angle 10 \sim 30^\circ$; ④N10~ 30°E/NW(SE) $\angle 4 \sim 20^\circ$; ⑤N70~ 90°E/NW $\angle 8 \sim 30^\circ$ 。裂隙一般延伸长 1~ 3 m, 间距多大于 50 cm, 裂隙面较新鲜, 微起伏粗糙, 一般无充填闭合, 无地下水活动。

表 1 地下厂房围岩力学参数
Table 1 Mechanical parameters for rock surrounding underground power house

岩 性	容 重 γ / (kN·m ⁻³)	抗拉 强度 σ_t / MPa	泊松 比 μ	弹性 模量 E / GPa	抗剪断强度		抗剪强度	
					f'	c' / MPa	f	c / MPa
微新、完整、 较完整玄武岩	28.5	1.5	0.20	25	1.35	2.5	1.08	0.0

计算范围: 长(垂直厂房轴线方向)900 m, 宽(沿厂房轴线方向)取两个机组段的长度, 高(沿高程向) - 200 m至地表面。共剖分了 4 976 个单元, 节点总数 5 427 个, 有限元网格剖分见图 4, 根据施工开挖方案, 计算模拟了 5 期分步开挖施工过程。

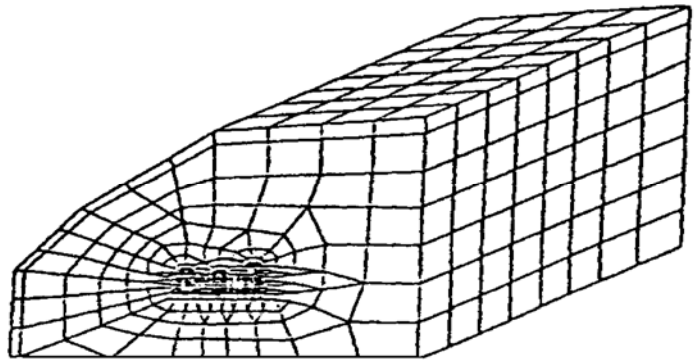


图4 有限元网格图
Fig. 4 Diagram of FEM mesh

4.2 计算结果分析

(1) 位移场变化规律

由图 5 及计算结果知道, 开挖后, 由于应力释放, 洞周变形朝向洞内, 且弹塑性损伤无锚计算位移值比弹塑性无锚计算位移值增大大约 47% ~ 55%, 这说明节理裂隙造成了岩体力学性质的显著“弱化”和强烈各向异性, 从而增大了围岩开挖卸荷作用下的变形量; 另知加锚后, 洞周变形得以减小, 减小幅度约 11% ~ 27%, 这说明锚杆与围岩联合作用, 增大了裂隙岩体的变形刚度, 从而减小了洞周围岩的变形。

(2) 塑性区和损伤演化区分布规律

图 6、图 7 分别是弹塑性损伤无锚计算和加锚计算洞周塑性区分布。由图 6 分析知, 开挖后主厂房、主变室、调压井拱顶部位、侧墙部位以及母线洞与尾水管之间的岩柱体部位出现一定范围的塑性区。加锚后这

些部位的塑性区分布范围减小了大约 32% (见图 7)。

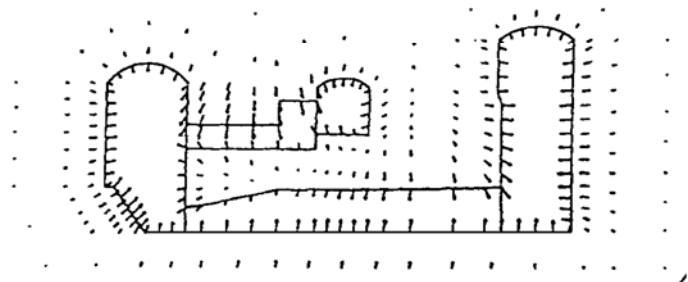


图 5 位移矢量图

Fig. 5 Diagram of displacement vector

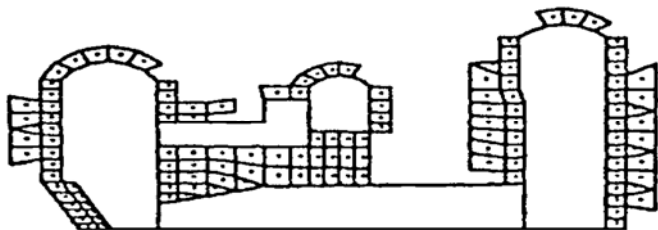


图 6 无锚计算塑性区

Fig. 6 Plastic zone without anchor bars



图 7 加锚计算塑性区

Fig. 7 Plastic zone with anchor bars

图 8 是弹塑性损伤无锚计算损伤演化区分布。由图 8 分析知, 开挖后在洞室侧墙以及母线管与尾水管之间的岩柱体部位因裂隙扩展出现了一定范围的损伤演化区, 加锚后这些部位的损伤演化区范围减小了大约 40% (见图 9)。以上分析说明锚杆与围岩联合作用, 提高了裂隙岩体的摩擦力和断裂韧度, 增加了围岩的抗剪能力和抗断裂能力, 从而减小了裂隙岩体的塑性区范围和损伤演化区范围。

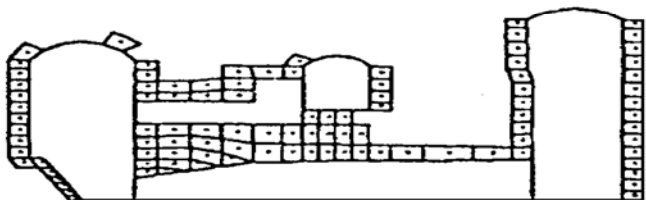


图 8 无锚计算损伤演化区

Fig. 8 Damage evolution zone without anchor bars

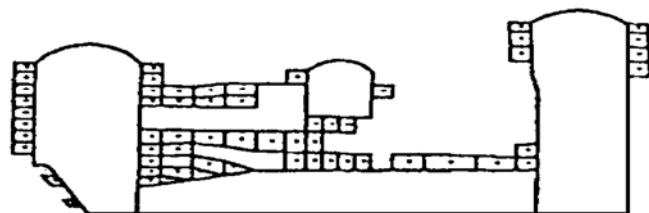


图 9 加锚计算损伤演化区

Fig. 9 Damage evolution zone with anchor bars

5 计算结论

(1) 本文发展的弹塑性损伤本构模型和岩锚支护模型, 较好地反映了多裂隙岩体的各向异性损伤力学响应和裂隙岩体的岩锚支护效应。

(2) 弹塑性损伤无锚计算位移值比弹塑性无锚计算位移值要大, 这说明节理裂隙造成了岩体力学性质的显著“弱化”和强烈各向异性, 从而增大了围岩开挖卸荷作用下的变形量, 因此采用三维弹塑性损伤本构模型反映地下厂房洞室群的开挖卸荷稳定是十分重要的。

(3) 弹塑性损伤计算结果表明, 开挖后洞周变形朝向洞内, 另外, 在主厂房、主变室、调压井拱顶部位、侧墙部位以及母线洞与尾水管之间的岩柱体部位出现一定范围的塑性区和损伤演化区, 因此在施工过程中应特别注意监测这些部位的变形发展, 尽量减少对洞区岩柱体的干扰, 保持岩柱体的完整性, 并对拱顶、侧墙、洞区岩柱体部位进行系统锚固和预应力锚固。

(4) 对洞室开挖的岩锚支护计算结果表明, 锚杆提高了围岩的变形刚度, 限制了岩体的变形, 改善了围岩的应力状态; 同时岩锚支护有效提高了岩体的抗剪强度和断裂韧度, 减少了洞区岩体的塑性区范围和损伤演化区范围, 增大了围岩抗弯、抗剪和抗断裂的能力。

参 考 文 献

- 1 Germanovich L N, et al. Mechanics of 3-D crack growth under compressive loading. In: Aubertin, Hassani & Mitri (eds). Rock Mechanics. Rotterdam: Balkema, 1996. 1151~ 1160
- 2 张强勇, 朱维申, 陈卫忠. 三峡船闸高边坡开挖卸荷弹塑性损伤分析. 水利学报, 1998(8): 19~ 22
- 3 张强勇. 多裂隙岩体三维加锚损伤断裂模型及其数值模拟与工程应用研究: [博士学位论文]. 武汉: 中科院武汉岩土力学研究所, 1998