

文章编号:1672-3961(2008)01-0080-04

# 岩锚吊车梁轮压作用下的三维稳定性分析

隋斌, 朱维申, 李树忱

(山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

**摘要:**应用 FLAC<sup>3D</sup> 软件, 结合实际工程, 考虑混凝土、围岩和锚杆三者变形对岩锚吊车梁受力状况的影响, 计算分析了岩锚吊车梁及附近围岩在运行期轮压作用下的工作性态和稳定性, 分析了岩锚吊车梁锚杆的受力情况以及吊车梁与岩壁接触面的稳定性, 论证了三维有限差分方法用于研究水电站地下厂房岩锚吊车梁的合理性。

**关键词:**岩锚吊车梁; 轮压; 接触面; 锚杆; 稳定性分析

**中图分类号:**TU457      **文献标志码:**A

## Three dimensional stability analysis of the effect caused by wheel load of a rock bolt crane girder

SUI Bin, ZHU Wei-shen, LI Shu-chen

(Institute of Geotechnical and Structure Engineering Research Center, School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** Combined with the extended project practice of the underground powerhouse at some hydropower stations, the effect caused by deformation of concrete, rock mass and bolt on a rock bolt crane girder was considered, and the FLAC<sup>3D</sup> code was applied to simulate and analyze the wheel load stress state of a rock bolt crane girder on the chamber during the operational phase. The stress distribution of bolts on a crane girder and the stability of the interface between rock and crane girder were also investigated. The numerical results suggest that this can be a powerful approach to the stability analysis of a rock bolt crane girder.

**Key words:** rock bolt crane girder; wheel load; interface; bolt; stability analysis

## 0 引言

岩锚吊车梁因可以节省开挖, 有效减小地下厂房跨度以及为后期施工提供极大方便等显著特点, 在水电站地下厂房中已被广泛采用。20世纪80年代, 挪威首先成功采用了这种结构, 国内的鲁布革、东风、小浪底、大朝山等水电站地下厂房均采用了岩锚吊车梁<sup>[1-5]</sup>。目前, 大多采用刚体极限平衡理论对岩锚吊车梁受力及其安全性进行分析计算, 而该理论没能考虑到混凝土、围岩和锚杆的变形影响, 由此

带来的问题是所设计的岩锚吊车梁过于安全, 造成不必要的浪费。原因主要是在设计时假定吊车梁侧面和岩壁间没有粘结力, 不能受拉, 只能承受压应力和摩擦阻力<sup>[6]</sup>。而现场实测资料表明, 吊车梁混凝土与围岩具有较好的粘结强度, 刚体极限平衡方法不能确切反映岩锚吊车梁的实际受力状态, 必需采用其他方法作进一步的研究。

本文采用弹塑性有限差分方法, 利用 FLAC<sup>3D</sup> 软件中的 interface 单元来模拟岩锚吊车梁与岩壁的接触面, 分析接触面的应力分布规律、受拉锚杆中应力的分布规律以及岩锚吊车梁在荷载作用下的应力和

收稿日期: 2007-06-27

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412705); 国家自然科学基金资助项目(59939190, 50579033, 90510019)

作者简介: 隋斌(1981-), 男, 山东滨州人, 博士研究生, 主要从事岩土力学计算方面的研究。

E-mail: suibin666@163.com

变形分布特征,客观准确地全面评价地下厂房岩锚吊车梁的工作性态和稳定性.

## 1 工程概况

某地下厂房由主厂房、主变室、尾水调压室3大地下洞室组成.垂直埋深390~520 m,水平埋深310~530 m,厂房总长226.58 m,围岩为灰白色、微红色中粒黑云2长花岗岩,局部穿插辉绿岩脉.厂区岩体新鲜较完整,呈块状-次块状结构,岩块嵌合紧密,较大规模的软弱结构面有f57, f58, f59和f60等断层穿过厂房洞群区.根据围岩分类,主厂房、主变室、尾水调压室以II、III类围岩为主,洞室围岩整体较稳定.陡、缓倾角裂隙密集带及辉绿岩脉破碎带局部发育,为IV、V类围岩.

岩锚吊车梁采用420 t+420 t双小车桥机,大车轮子24个,每侧12个,设计最大轮压800 kN,最小轮压420 kN.运行期作用在岩锚吊车梁上的荷载主要有垂直轮压和水平制动力.考虑动载系数1.1后的垂直轮压为880 kN,水平制动力为90 kN.岩锚吊车梁结构断面示意图1.

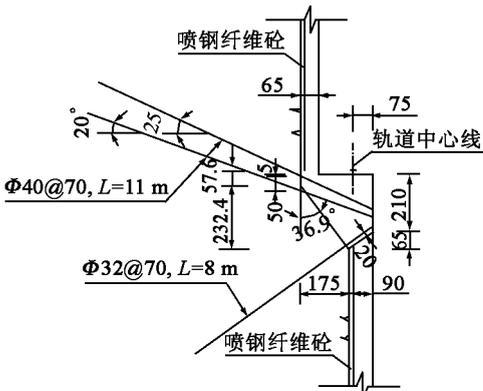


图1 岩锚吊车梁结构端面示意图

Fig.1 Cross section of the rock bolt crane girder

## 2 计算模型

### 2.1 岩锚吊车梁与岩壁接触面的模拟

岩锚吊车梁是通过沙浆和锚杆锚固在岩体上形成的钢筋混凝土、锚杆和围岩共同受力的变形体.梁体混凝土与围岩的接触面是吊车梁的薄弱部位,接触面的形状影响吊车梁内部的应力分布状态,需通过模拟研究混凝土与岩壁接触面有无粘结来重点分析研究接触面的应力状态、有无裂缝及锚杆应力.随着吊车轮压的作用混凝土、锚杆和围岩3者在接触面上都可能会产生应力集中.

美国 Itasca 公司的 FLAC<sup>3D</sup> 软件在岩土工程中

有着广泛的应用,它能够处理一般的大变形问题和模拟岩体沿某一弱面产生的滑动变形,并可以考虑锚杆等支护结构与围岩的相互作用.FLAC<sup>3D</sup> 提供了一种 interface 接触单元,可以用来模拟接触面滑动和开裂问题,其本构模型如图2所示.

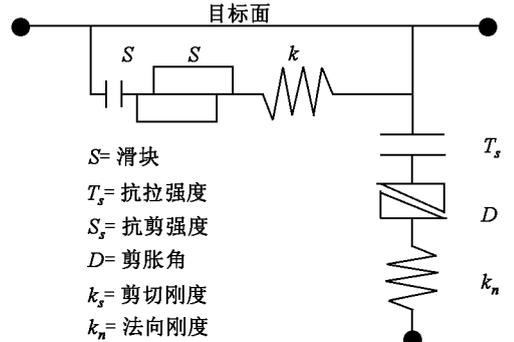


图2 interface 单元的本构模型

Fig.2 Components of the interface constitutive model

$t + \Delta t$  时刻剪切力和法向力有如下关系.

$$F_n^{(t+\Delta t)} = k_n u_n A + \sigma_n A, \quad (1)$$

$$F_{si}^{(t+\Delta t)} = F_{si}^{(t)} + k_s \Delta u_{si}^{(t+(1/2)\Delta t)} A + \sigma_{si} A. \quad (2)$$

式中变量含量如下.

$F_n^{(t+\Delta t)}$ ,  $F_{si}^{(t+\Delta t)}$  为  $t + \Delta t$  时刻单元的法向力和剪切力;  $u_n$  为 interface 节点与目标面之间的法向位移;  $\Delta u_{si}$  为 interface 节点与目标面之间的相对剪切位移增量;  $\sigma_n$ ,  $\sigma_{si}$  为附加法向应力和附加剪切应力;  $k_n$ ,  $k_s$  为弹簧的法向刚度和剪切刚度;  $A$  为 interface 节点的代表面积.

库仑剪切强度准则满足下式.

$$F_{s, \max} = cA + \tan \phi F_n. \quad (3)$$

式中  $c$  为接触面的粘聚力;  $\phi$  为接触面的摩擦角;  $F_{s, \max}$  为最大剪切力;  $F_n$  为法向力.

如果  $|F_s| \geq F_{s, \max}$  则发生剪切滑动,同时剪切位移引起接触面有效法向应力的增加,有如下表示.

$$\sigma_n = \sigma_n + \frac{|F_s| - F_{s, \max}}{Ak_s} \tan \Psi k_n. \quad (4)$$

其中  $\Psi$  为剪胀角,  $|F_s|$  为剪切力.

当 interface 面上的拉应力超过 interface 单元的抗拉强度时, interface 单元将会发生破坏,即该处的接触面将会发生开裂,接触面上的剪切力和法向力都变为零.

### 2.2 计算区域和边界条件

为了获得较高的局部计算精度,在充分考虑地质条件、结构布置及轮压分布的基础上,取岩锚吊车梁15 m作为纵向计算长度,梁体端面不考虑厂房洞室开挖中围岩变形对岩锚吊车梁的影响,因此为自由位移边界.计算区域平面尺寸如图3所示,在模型

上下界面及非临空面边界施加固定铰约束.围岩和吊车梁采用 Mohr-Coulomb 模型,锚杆采用 2 节点的杆单元.物理力学参数见表 1.

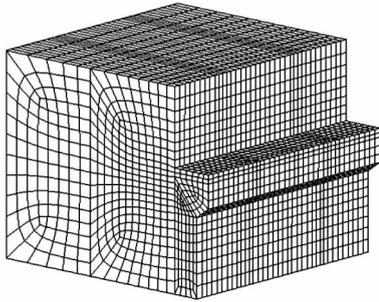


图 3 岩锚吊车梁三维网格图 Fig.3 3D mesh of rock bolt crane girder

表 1 材料力学参数

Table 1 Mechanical parameters of materials

	弹性模量/GPa	泊松比	摩擦角/(°)	粘聚力 /MPa	抗拉强度 /MPa
围岩	11	0.3	50	1.5	5
岩锚梁	30	0.15	60	1.5	1.5
接触面			40	1.0	1.5
			40	1.0	0

梁壁接触面直立面抗拉强度取  $T = 1.5 \text{ MPa}$  和零两种工况,前者表示接触缝完好,后者表示接触缝拉开或屈服,但岩壁处于弹性状态.

### 3 数值分析

#### 3.1 接触面应力分析

设计岩锚吊车梁时,围岩与吊车梁接触面的应力分布是重要的因素.图 4 接触面正应力力分布图,拉、压应力的转折点位于自梁顶起至接触面长约 1 m 处,而从梁顶到接触面倾斜端的长度是 0.5 m,因此竖直接触面上完全处于受拉状态.压应力沿着接触面倾斜端逐渐增大,在梁底达到最大约 1.1 MPa 左右.工况 1 和工况 2 剪切应力的分布在竖直接触面底部附近有所不同,如图 5 所示,工况 2 在该处的剪切应力约为 0.7 MPa,远远大于工况 1 该处的剪切应

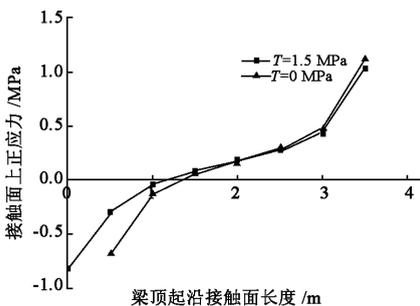


图 4 接触面正应力图 Fig.4 Normal stress on the interface

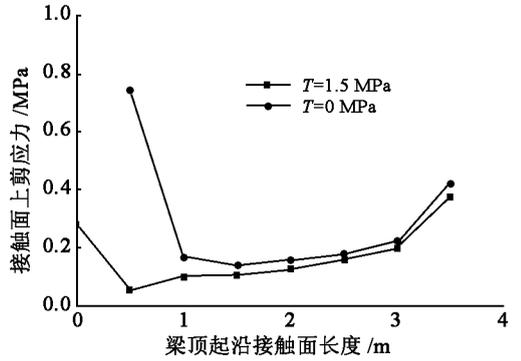


图 5 接触面剪切应力图 Fig.5 Shear stress on the interface

力.沿着接触面倾斜段两种工况的剪切应力分布规律逐渐相同,工况 2 的应力值略大于工况 1.

#### 3.2 悬吊锚杆应力分析

考虑轮压载荷和自重作用计算所得锚杆应力沿杆长的分布如图 6 所示,而岩体内靠近吊车梁与岩壁接触面处应变较大,故锚杆的拉应力水平较高,最大应力出现在梁壁接触面处的跨介质单元.上排受拉锚杆的应力大于第二排锚杆,上排锚杆的最大拉应力约为下排部锚杆的 3~4 倍,这表明在吊车轮压作用下,当上排锚杆的应力达到一定程度后,下排的受拉锚杆才开始承受轮压荷载.总的来说,运行期锚杆的拉力不大.

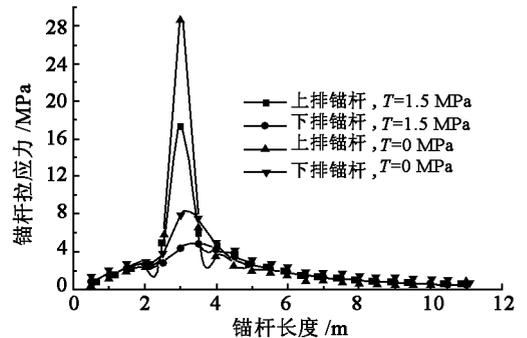


图 6 悬吊锚杆应力沿杆长的分布图 Fig.6 Stress curves of the tensile bolts

锚杆应力沿厂房纵向分布如图 7 所示,其应力

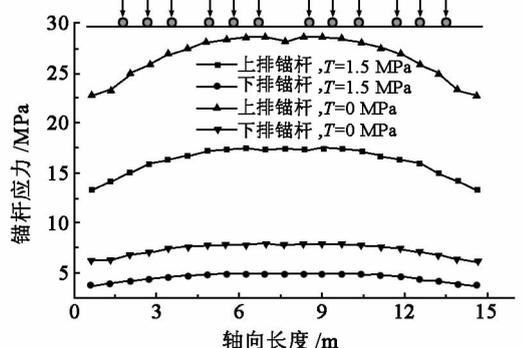


图 7 悬吊锚杆最大应力沿厂房纵向分布图 Fig.7 Maximum stress of the tensile bolts along longitudinal direction

在接近中间轮压的作用面处最大,在轮压两侧位置处最小,上排锚杆的应力变化幅度较大,下排锚杆产生的应力较小,而且变化幅度较缓。

### 3.3 围岩变形与应力分析

在运行期的吊车荷载作用下,吊车梁附近围岩产生的应力不大,只是梁表面靠近围岩部分的局部拉应力较大.由于吊车梁与岩壁接触面的模拟未考虑断裂效应,而仍按理想的弹塑性来模拟,在运行期内岩壁吊车梁的位移和应力均在允许范围内,故无破损发生。

### 3.4 梁身应力和位移分析

在轮压作用下,岩壁吊车梁结构处于弹性范围内,在上排锚杆以上局部区域产生的拉应力较大,梁顶部素混凝土的最大拉应力约为0.3 MPa,直立面最大拉应力约为0.45 MPa.离开上排锚杆向下,拉应力开始减小,梁壁接触面的下部倾斜面大部分处于受压状态,最大压应力出现在梁顶轮压作用处,为1.6 MPa左右.梁身主应力分布等值线如图8所示。

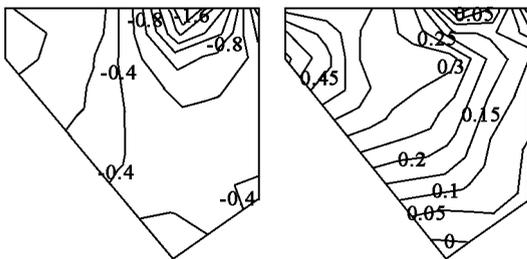


图8 吊车梁主应力分布(单位:MPa)

Fig.8 Distribution of the principal stress of crane girder

吊车梁在整体上产生上部外倾下沉、下部内倾下沉的变形趋势.轮压作用下吊车梁的位移等值线如图9所示.在梁顶面轮压作用点附近最大位移0.3 mm,沿纵向变化较小,在轮压分布的对称位置处最小,在直立面底部为0.12 mm。

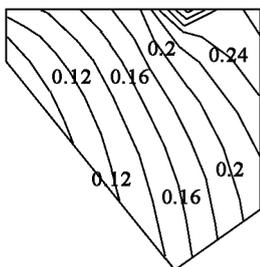


图9 轮压作用产生的位移分布(单位:mm)

Fig.9 Distribution of displacements caused by wheel load

### 3.5 吊车梁整体稳定性分析

吊车梁与围岩接触面之间的整体抗滑安全系数是吊车梁设计中一个重要的指标.由于在计算中采用 interface 单元模拟接触面,可以很方便地获得接

触面上的正应力  $\sigma_n$  和剪应力  $\tau_n$ ,进而可以计算出接触面上总的滑动力与抗滑力.由于抗滑稳定安全系数是一个标量,在求阻滑力和滑动力的比值时,必须取它们在同一个方向分量的比值.由公式可以求得沿该接触面的整体抗滑安全系数有如下表示<sup>[7]</sup>.

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n (c + \sigma_n \tan \phi) A_i}{\sum_{i=1}^n \tau_n A_i} \quad (5)$$

经过计算可以看出,当接触面  $T = 1.5$  MPa,稳定系数可以达到 11.1;即使取  $T = 0$ ,稳定系数也可以达到 6.3,反映出该接触面整体抗滑稳定性具有足够的安全储备。

## 4 结论

本文基于 FLAC<sup>3D</sup> 软件建立了岩壁吊车梁的三维计算模型,分析了运行期吊车荷载下吊车梁、围岩的变形及应力,以及锚杆应力沿杆长的变化;根据岩壁吊车梁整体抗滑稳定安全系数的计算式,得到吊车梁的抗滑稳定安全系数.但计算模型受开挖过程的影响仍需进一步研究。

围岩与岩锚吊车梁粘结层的力学性能对岩锚吊车梁整体抗滑稳定性和系统锚杆的轴向应力有着重要的影响.因此,在地下厂房岩锚吊车梁施工中,如何提高混凝土与围岩的粘结强度具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] 曹普发,刘颖,彭守拙.东风水电站地下厂房岩锚吊车梁的二维分析及其检验[J].岩石力学与工程学报,1996,15(4):360-369.  
CAO Pu-fa, LIU Ying, PENG Shou-zhuo. 2D-analysis for rock-bolt crane girder in underground power house of Dongfeng plant and its verification[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(4):360-369.
- [2] 刘颖,曹普发.轮压作用下岩壁吊车梁的三维应力实测与对比[J].水力发电学报,1996,53(1):51-61.  
LIU Ying, CAO Pu-fa. The wheel load stress of rock bolt crane girder and its comparison with the test in-situ[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1996, 53(1):51-61.
- [3] 吴新邦.岩锚吊车梁设计和施工中几个问题的探讨[J].水力发电,1998(5):16-18.  
WU Xin-bang. Discussion on some problems of design and construction of rock-bolt crane girder[J]. Water Power, 1998(5):16-18.
- [4] 吴鹤鹤.关于岩壁吊车梁设计方法的探讨[J].水利水电技术,2000,31(8):13-15.

(上接第 83 页)

- WU He-he. Discussion on the design method of rock-bolt crane girder [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2000, 31(8):13-15.
- [5] 付敬,刘艳超,盛谦.三峡地下厂房岩壁吊车梁的稳定分析[J].岩石力学与工程学报,2001,20(增刊):1710-1713.  
FU Jing, LIU Yan-chao, SHENG Qian. Stability research on the crane beam on the palisades in the three gorges project underground powerhouse[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(Supplement):1710-1713.
- [6] 李守巨,刘迎曦,刘进宝.岩锚吊车梁破坏机制的计算模拟分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(10):1730-1734.
- LI Shou-ju, LIU Ying-xi, LIU Jin-bao. Computational simulation and analysis on fracturing mechanism of crane girder bolted to rock wall of chamber[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10):1730-1734.
- [7] 杨静,何江达,王开云.水电站地下厂房岩锚吊车梁三维非线性有限元分析[J].四川大学学报,2003,35(2):31-35.  
YANG Jing, HE Jiang-da, WANG Kai-yun. Three dimensional non-linear analysis on rock-anchored beam of underground house of hydro-power station[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2003, 35(2):31-35.

(编辑:孙广增)