

地下厂房岩壁吊车梁的力学分析及设计

陆晓敏, 刘春霞

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 针对刚体极限平衡法的不足, 利用非线性有限元方法, 分析了岩壁吊车梁与围岩的相互作用, 研究了锚杆的受力机理, 并利用超载和强度储备法研究了岩壁吊车梁的安全裕度. 结果表明, 按刚体极限平衡法假设所设计的锚杆偏保守, 与实际受力状况有很大差别, 接触面不发生破坏时锚杆中的应力不大, 即锚杆承受的载荷很小, 接触面单元接近全部破坏时锚杆中的应力才会迅速提高.

关键词 岩壁吊车梁; 刚体极限平衡法; 有限元法; 安全系数

中图分类号 TV311 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2007)01-0030-05

20 多年来, 我国的地下工程设计施工技术取得了较大进步, 地下厂房的吊车支承结构亦由常规的梁柱结构发展成多种结构形式, 如岩台和岩壁吊车梁. 尤其是岩壁吊车梁, 结构简单, 无柱, 不仅可以增加厂房内部的布置空间, 减小厂房跨度, 降低开挖量, 而且厂房中部挖空后即可进行岩壁吊车梁的施工, 可提前安装吊车, 早日形成生产能力, 为厂房下部开挖出渣和浇筑混凝土以及吊装设备等创造有利条件, 加快施工进度. 因此, 近年来我国水电站(如东风、广州抽水蓄能、天荒坪、百色、索风营、瀑布沟等水电站) 地下厂房大多采用岩壁吊车梁结构形式.

岩壁式吊车梁是由混凝土或钢筋混凝土梁, 用锚杆锚固在厂房两侧边墙上的, 安装梁处的墙面可以垂直开挖, 也可以开挖成斜面. 吊车的负荷通过吊车梁传给边墙岩体. 岩壁吊车梁的工作与牛腿工作相似. 为提高梁的稳定性, 梁与岩体的接触面下部常开挖成斜面(称为基座, 见图 1). 梁的平衡及承载力主要取决于锚固力和接触面的强度, 锚杆数量的确定是设计过程中的一项主要工作. 目前, 锚杆受力和梁的抗滑稳定安全系数的计算主要采用刚体极限平衡法^[1-4]. 这些方法由于过于简化, 很难反映梁和锚杆的受力机理, 所计算的锚杆受力与实际情况相差较大. 近年来, 有关文献^[5-7]采用有限单元法分析梁和锚杆的受力, 但没有专门模拟接触面的力学性质. 本文利用非线性有限元法分析了岩壁吊车梁与围岩的相互作用以及锚杆的受力, 并利用超载和强度储备法研究了岩壁吊车梁的安全裕度.

1 岩壁吊车梁力学分析的刚体极限平衡法

目前岩壁吊车梁设计中锚杆应力的计算方法主要有 2 类: (a) 基于刚性梁、刚性岩基、弹性锚杆假设的刚体极限平衡法; (b) 基于刚性梁、弹性岩基、弹性锚杆假设的刚体极限平衡法.

如图 1 所示, 第 1 类方法^[1-2]利用梁对 O 点的极限力矩平衡方程求出上部锚杆中的拉力. 位于 O 点附近的下部锚杆处于受压状态, 一般不考虑. 上部锚杆一般设 2 排, 假设上下 2 排锚杆的拉力与它们到 O 点的距离成正比:

$$F_1 : e_2 = F_2 : e_3 \tag{1}$$

侧边 AD 接触面上的约束力不计, 基座 OD 上的约束力作用在 O 处, 则对 O 点的力矩平衡方程为

$$F_1 e_2 + F_2 e_3 = P_x h + P_y e_1 + G e_4 \tag{2}$$

式中: P_x, P_y ——作用在梁上的水平和铅直载荷(一般都转化到梁单位长度

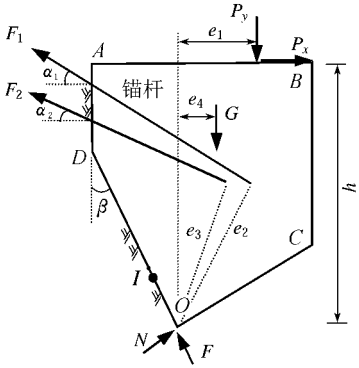


图 1 岩壁吊车梁示意图

Fig.1 Sketch of crane beam on rock wall

上); G ——梁的重量.由式(1)(2)可以求出锚杆中的拉力 F_1 和 F_2 .再用平衡方程可以求出梁基座 OD 接触面上的法向和切向作用力 N 和 F :

$$\begin{aligned} N &= (P_y + G) \sin \beta - P_x \cos \beta + F_1 \cos(\alpha_1 + \beta) + F_2 \cos(\alpha_2 + \beta) \\ F &= (P_y + G) \cos \beta - P_x \sin \beta - F_1 \sin(\alpha_1 + \beta) - F_2 \sin(\alpha_2 + \beta) \end{aligned} \tag{3}$$

设锚杆直径为 ϕ ,容许应力为 $[\sigma]$,安全系数为 k_1 ,则每米长度上所需的锚杆根数为

$$n_1 = \frac{4F_1 k_1}{\pi \phi [\sigma]}, \quad n_2 = \frac{4F_2 k_1}{\pi \phi [\sigma]} \tag{4}$$

最后校核基座上的抗滑稳定性(纯摩).设摩擦因数为 f ,抗滑稳定安全系数为 k_2 ,则应满足

$$\frac{Nf}{F} \geq k_2 \tag{5}$$

式(5)可用来确定梁底座 OD 的倾角 β .

在刚性梁和刚性岩基的假设下,梁绕 O 点转动和沿底座 OD 滑移是 2 种可能出现的失稳形式,其中转动是最有可能出现的一种形式.本方法考虑的是一种极限状态,其结果与实际的差别是由刚性假设及忽略接触面的强度所致,这与实际情况可能有很大差异.

第 2 类方法^[3]认为岩体是变形的,基座上的约束力将是分布力(不考虑铅直接触面上的约束力),常见的假设是法向力为线性分布(图 2),此分布力的合力通过 I 点.设梁对 I 点的转动(矩)处于极限平衡状态,平衡方程形式与式(2)相同,只是各力的力臂有所改变,再结合式(1)可以求出锚杆内力 F_1 和 F_2 ,最后利用式(4)(5)确定单位长度上锚杆的根数及校核基座上的抗滑稳定性.本方法求得的锚杆内力要比第 1 种方法大得多,设计锚杆的根数也多.基于刚性梁,变形岩基的计算方法还有一些^[4],如转动点取基座上锚杆的部位或角点 D ,认为此位置为梁转动的中心.这些方法力学概念不清楚,假设不合理,其极限平衡的转动不可能在 I 点或 D 点,计算结果与实际情况相差很大.

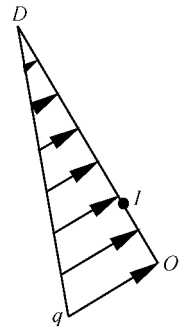


图 2 基座上的法向约束力
Fig.2 Normal restraining force on bed rock

2 有限单元法

通过有限元方法,能较精确分析锚梁岩体系统的变形和受力情况,为设计提供可靠的依据.尤其是有限元方法能模拟梁与岩基接触面之间的力学性质以及模拟施工过程.事实上,梁和锚杆是在洞室开挖过程中完成施工的,在洞室随后的开挖施工中,梁及锚杆的受力都将发生变化.锚杆中的受力是由梁上载荷所引起的,往往只占总量的一小部分(很多地下厂房的实测数据都能说明^[7-8]).这些情况刚体极限平衡法都无法模拟.

岩体和混凝土材料采用弹塑性模型,屈服准则采用 D-P 准则.为模拟梁与边墙接触面的力学性质,在接触面引入薄层单元,其破坏形式主要是剪切屈服和法向开裂.剪切屈服采用 M-C 准则判别,开裂由法向拉应力判别.

如果法向应力 $\sigma_z > \sigma_c$ (接触面的抗拉强度),接触面单元开裂,认为其刚度丧失,如果

$$F = \sqrt{\tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2} - C + \sigma_z f > 0 \tag{6}$$

则单元发生剪切屈服.根据相关联的流动法则可导出其塑性矩阵

$$D_p = \frac{1}{G + f^2 G \lambda} \begin{bmatrix} \frac{G^2 \tau_{xz}^2}{B^2} & \frac{G^2 \tau_{xz} \tau_{yz}}{B^2} & \frac{f \lambda G^2 \tau_{xz}}{B} \\ \frac{G^2 \tau_{xz} \tau_{yz}}{B^2} & \frac{G^2 \tau_{yz}^2}{B^2} & \frac{f \lambda G^2 \tau_{yz}}{B} \\ \frac{f \lambda G^2 \tau_{xz}}{B} & \frac{f \lambda G^2 \tau_{yz}}{B} & G^2 \lambda^2 f^2 \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中: $B = \sqrt{\tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2}$; C ——接触面材料的黏结力; f ——摩擦因数; G, λ ——材料的剪切弹性模量和拉梅常数; τ_{xz}, τ_{yz} ——接触面内的切应力.

考虑材料非线性后,支配方程是非线性的,求解时用增量常刚度迭代法.

3 算例分析

图1是某水电站地下厂房岩壁吊车梁的初步设计方案.梁单位长度上的铅直载荷约为 724 kN/m (P_y),水平刹车制动力为 50 kN/m (P_x).参考其他工程,假设有关参数,见表1.

表1 设计参数

Table 1 Design parameters of rock crane

参数	$P_x/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	$P_y/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	$\alpha_1/(\circ)$	$\alpha_2/(\circ)$	$\beta/(\circ)$	ϕ/cm	$[\sigma]/\text{MPa}$	k_1	f
值	724	50	25	20	27	4.0	210	2.5	1.2/1.0

混凝土密度取 $2.5\times 10^3\text{ kg/m}^3$.上部锚杆设为2排,其位置假设与岩壁相交处到梁顶面的距离分别为20 cm和40 cm,基座的受压锚杆距O点为20 cm.

3.1 刚体极限法的计算结果

第1种方法的计算结果为: $F_1=224.4337\text{ kN}$, $F_2=220.6103\text{ kN}$,上排锚杆根数 $n_1=2.12$ 根/m,下排锚杆根数 $n_2=2.08$ 根/m,基座抗滑稳定安全系数 $k_2=1.92(f=1.2)$, $k_2=1.61(f=1.0)$.锚杆的间距约为50 cm,基座的抗滑稳定安全系数是足够的,其倾角是合适的.

第2种方法的计算结果为: $F_1=379.6296\text{ kN}$, $F_2=359.7976\text{ kN}$,上排锚杆根数 $n_1=3.59$ 根/m,下排锚杆根数 $n_2=3.40$ 根/m,基座抗滑稳定安全系数 $k_2=5.86(f=1.2)$, $k_2=4.91(f=1.0)$.可见,此结果比第1种方法的结果大得多.锚杆的间距约为30 cm.

考虑到以上算法及载荷作用范围的简化偏保守,上部锚杆按 $\varnothing 40@65\text{ cm}$ 设计;下部底座处的锚杆处于受压状态,为了增加基座的抗滑能力,按有关钢筋混凝土规范布置,设定为 $\varnothing 32@65\text{ cm}$.下面用有限元方法对此设计的可行性进行分析.

3.2 有限元法计算结果

为与刚体极限平衡法的结果进行比较,取单位长度(1 m)的梁和岩体进行有限元分析.有限元网格见图3.载荷与上述相同.材料力学参数根据已有试验和经验取值,见表2.

用杆单元模拟锚杆,锚杆弹性模量取为210 GPa.为了使作用于锚杆的力能传入岩体深部,以保护岩壁,假设从岩壁开始40 cm后锚杆才与岩体有握裹力(施工时在锚杆上涂裹沥青可达到此效果).计算时不考虑基座处锚杆.

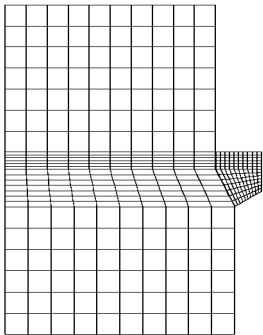


图3 有限元网格
Fig.3 FEM mesh

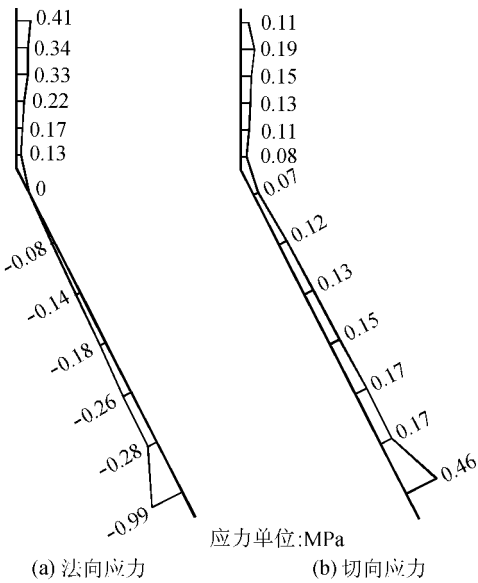


图4 接触面上的法向应力和切向应力分布
Fig.4 Normal and tangential stresses on interface

表2 岩体物理力学性质指标建议值

Table 2 Recommended values of physical-mechanical parameters of rock mass

材料	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	变形模量/ GPa	泊松比	f	c/MPa	σ_t/MPa
岩体	2.61	24.3	0.25	1.4	1.8	1.6
混凝土	2.58	22.5	0.17	1.2	1.2	1.3
岩体/混凝土	21.0	0.20	1.2	1.2	1.2	1.0

计算结果表明,梁的变形很小,最大向下铅直位移约为0.21 mm,其变形不会影响大车运行.图4为梁与围岩接触面上的法向应力和切向应力分布.由图4可见,梁顶部与岩壁接触处出现少许破坏区,高度约30 cm;破坏区应力有所减小,最大拉应力为0.41 MPa;最大压应力和切应力发生在底部,其值分别达0.99 MPa和0.46 MPa.上排锚杆的应力为5.0 MPa,下排锚杆的应力为2.82 MPa,可见梁上载荷引起的锚杆应力较小.梁处于稳定状态,在破坏区很小的情况下,由

于变形很小,锚杆受力不大,其加固作用无法充分发挥.

与刚体极限平衡法结果相比,梁的实际工作状况与刚体极限平衡法的假设相差很大,锚杆的应力远小于其容许应力.可见刚体极限平衡法是相当保守的.另外,设计参数对计算结果会有一定的影响.例如:基座倾角 β 越小,长度越大,梁的稳定性越好,但会增加岩体的开挖量,接触面强度参数越大,稳定性也越好.

3.3 梁的超载和强度储备安全系数

为了进一步研究梁的稳定性和破坏形式,现考虑超载和强度储备 2 种假设状态来分析. 超载是指增大作用在梁上的载荷,增大的倍数即超载安全系数 (k_p). 计算结果表明: $k_p \approx 4$ 时,锚杆应力有加速发展的趋势; $k_p = 7$ 时,梁不再稳定,接触面的破坏形式为开裂破坏,梁的失稳形式为梁绕底部 O 点的转动. 锚杆中放大应力与 k_p 的关系如图 5 所示.

强度储备是指降低接触面的力学参数 (c, f, σ_i 同比例降低),降低的倍数即强度储备安全系数 (k_c). 计算结果表明: $k_c \approx 10$ 时,梁不再稳定,接触面单元全部破坏,梁的失稳形式为梁沿基座剪切屈服的滑移破坏. 锚杆中最大应力与 k_c 的关系如图 6 所示.

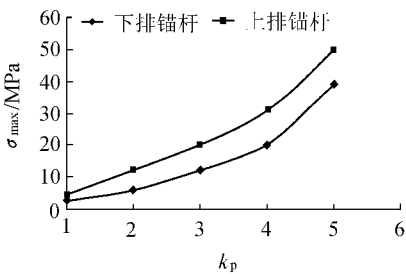


图 5 锚杆中最大应力 σ_{max} 与超载安全系数 k_p 的关系

Fig.5 Relationship between maximum stress and overload safety factor of anchor rod

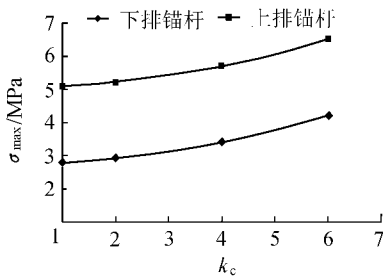


图 6 锚杆中最大应力 σ_{max} 与 k_c 的关系

Fig.6 Relationship between maximum stress of anchor rod and safety factor of strength reserve

由图 5 和图 6 可见,正常情况下,梁上载荷引起的锚杆应力不大,只有当接触面单元接近全部破坏时锚杆中的应力才会迅速提高.

4 结语和建议

据刚体极限平衡法假设所设计的锚杆偏保守,与实际受力状况有很大差别.实际工作时是不允许接触面发生全部破坏的.

接触面不发生破坏时,锚杆中的应力不大,即锚杆承受的载荷很小,只有当接触面单元接近全部破坏时,锚杆中的应力才会迅速提高.从超载和强度储备安全系数来看,梁有足够的安全裕度.可见,在岩壁吊车梁设计中,一种很重要的技术是要处理好梁与岩体的接触问题,保证在正常工作情况下接触面尽可能不发生任何形式的破坏.要充分发挥锚杆的作用,在梁施工完后施加预应力是一种比较好的措施.

计算表明,在接触面顶部都有少许开裂破坏区.要解决此问题,可采用预应力锚杆.从应力来看,接触面的上下部位是应力的最大区域,破坏也从此开始,故在梁的下部也应设置锚固件.

要特别指出的是,以上分析过程并没有考虑洞室开挖过程对锚梁锚杆产生的影响.从上述计算结果来看,正常载荷所引起的锚杆应力很小,远小于其容许应力.考虑到施工过程,锚梁锚杆是在其下部岩体开挖之前安装的,随着下部岩体的开挖,边墙变形继续发生,锚杆应力随之增加.计算结果表明,在厂房下部岩体全部开挖完后,锚杆应力值能达到 150 MPa 左右.可见,锚杆中的应力主要是由于厂房下部岩体开挖而产生的,梁上载荷所引起的只占一小部分,锚杆中的应力应是这 2 部分之和.所以,为了保证岩锚梁锚杆的安全性,此锚杆与系统锚杆在施工和安装时间上可有所不同,先系统锚杆,后锚梁锚杆.尽管刚体极限平衡法计算的锚杆应力大于有限元法的计算值,似乎要接近于实际情况,但并不说明此法较好,它们之间有概念上的区别.实际上,刚体极限平衡法是用于模拟接触面破坏后,荷载作用下锚杆应力的计算.在正常荷载作用下,锚杆的受力及安全裕度宜用有限元法分析.锚杆的最大应力应是下部岩体开挖引起的锚杆应力和由于接触面破坏,用刚体极限平衡法计算出的荷载作用下锚杆的应力之和.

参考文献：

[1] 黎东晓.百色水利枢纽地下厂房岩壁吊车梁设计综述[J].广西水利水电,1999(2):24-26.
[2] 洪振伟.小湾水电站地下厂房吊车梁设计[J].云南水力发电,1996(3):71-77.
[3] 刘秀珍.关于岩壁吊车梁的锚固计算方法问题[J].水利水电技术,1998(4):11-14.
[4] 丁佩章.对岩壁吊车梁设计的讨论[J].红水河,1994,13(1):20-24.
[5] 付敬等,刘艳超,盛谦.三峡工程地下厂房岩壁吊车梁的稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2001,20(增刊):1710-1713.
[6] 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(8):13-15.
[7] 戚兰,熊开智.地下厂房岩壁吊车梁结构研究[J].水利水电技术,2001,33(7):5-6.
[8] 刘颖,曹普发.轮压作用下岩壁吊车梁三维应力与实测对比[J].水力发电学报,1996(2):51-61.

Mechanical analysis and design of crane beam on
rock wall for underground power house

LU Xiao-min , LIU Chun-xia

(College of Civil Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract :The nonlinear finite element method was combined with the rigid body limit equilibrium method for analysis of the interaction between the crane beam and surrounding rock . The mechanism of anchor rod stress was investigated , and the safety factor of crane beam on rock wall was studied by use of the overload and strength reserve method . The results show that the anchor rod designed according to the rigid body limit equilibrium method has too high strength reserve and its stress state is not consistent with the reality , and that , by FEM analysis , the anchor rod stress is low in normal case with no failure occurring in the interface of crane beam and surrounding rock , but it increases rapidly as the elements of interface are nearly in the complete failure state .

Key words :crane beam on rock wall ; rigid body limit equilibrium method ; finite element method ; safety factor

全国中文核心期刊 中国科技核心期刊
全国水利系统优秀期刊 华东地区优秀期刊 江苏省优秀期刊
《水利水电科技进展》征订启事

(邮发代号 28-244 ,CN32-1439/TV ,ISSN1006-7647 ,双月刊)

《水利水电科技进展》由河海大学主办 ,主要刊登与水科学、水工程、水资源、水环境等学科有关的科技论文 ,设有研究探讨、工程技术、水管理、专题综述、国外动态、科技简讯等栏目 ,适合与水科学、水工程、水资源、水环境等有关的科学研究人员、工程技术人员、科技管理人员以及大专院校师生阅读 .
《水利水电科技进展》由邮局发行 ,邮发代号 :28-244 ,2007 年每期定价 8 元 ,全年 6 期共计 48 元 .读者亦可直接向编辑部订阅 .欢迎个人和单位直接汇款订阅或函索订单 .编辑部地址 :210098 南京市西康路 1 号河海大学《水利水电科技进展》编辑部 .联系电话 :025-83786335 , E-mail :jz@hhu.edu.cn ,http ://kkb.hhu.edu.cn .汇款时务请注明“订水利水电科技进展” .