

地下厂房岩壁吊车梁施工与运行期全过程数值仿真分析

曾 静¹, 盛 谦¹, 杨昌定²

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 安徽省水利水电勘测设计院, 安徽 合肥 230022)

摘要:以佛子岭抽水蓄能电站地下主厂房为背景,采用数值仿真分析软件 Phase2 对地下厂房岩壁吊车梁建造与运行期全过程进行数值仿真分析,探讨轮压荷载施加时机、地应力场、围岩力学特性对地下厂房与岩壁吊车梁受力特征的影响。分析结果表明:(1) 吊车梁结构合理,支护参数可行,只要围岩自身的稳定性得到保证,则岩壁吊车梁是稳定的;(2) 厂房开挖过程中,施加轮压荷载可以使岩壁吊车梁提前进入运行期,加快施工进度;(3) 构造应力对吊车梁内锚杆应力影响显著,使锚杆应力大大增加,但是考虑构造应力可以适当减小吊车梁内最大拉应力量值;(4) 吊车梁变形及其锚杆应力主要受围岩性质的影响。

关键词:岩石力学; 吊车梁; 侧压力系数; 材料参数; 锚杆应力; 变形

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)增 1 - 3051 - 06

NUMERICAL EMULATION ANALYSIS OF ROCK BOLT CRANE IN UNDERGROUND POWERHOUSE BEAM DURING CONSTRUCTION AND RUNNING PERIODS

ZENG Jing¹, SHENG Qian¹, YANG Changding²

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;

2. Anhui Survey and Design Institute of Water Conservancy and Hydropower, Hefei, Anhui 230022, China)

Abstract: Numerical emulation analysis of rock bolt crane beam in the underground powerhouse in Foziling Power Station during the construction and running periods is carried out by using elasto plastic finite element program Phase2. The influences of some factors on the underground powerhouse and the rock bolt crane beam are discussed, such as the time when the wheel loading is applied the in-situ stress field, and the mechanical characteristics of surrounding rock. Analytical results show that: (1) the crane beam has rational structure and feasible supporting parameters. The rock bolt crane beam will be stable so long as the surrounding rock is steady by itself; (2) the rock bolt crane beam can be in running period in advance and the construction schedule can be quicken when the wheel loading is applied during the construction of the powerhouse; (3) the tectonic stresses has prominent influences on bolt stresses of the crane beam, which can be greatly increased, while the maximum tension stresses in crane beam can be decreased relevantly considering the tectonic stresses; and (4) the deformation of the crane beam and the stresses of the bolt are mainly controlled by the mechanical parameters of surrounding rock.

收稿日期: 2005 - 10 - 31; **修回日期:** 2005 - 12 - 25

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412708); 中国科学院武汉岩土力学研究所前沿领域基金项目(Q220304)

作者简介: 曾 静(1975 -), 女, 博士, 1996 年毕业于华中理工大学土木工程系工业与民用建筑专业, 现任助理研究员, 主要从事岩土工程数值模拟方面的研究工作。E-mail: jzeng@whrsm.ac.cn

Key words: rock mechanics; crane beam; lateral pressure coefficient; material properties; bolt stresses; deformation

1 引言

岩壁吊车梁是一种既经济又安全的新型支撑结构，其原理是利用一定长度的注浆长锚杆，把钢筋梁固定在岩壁上。吊车的全部荷载通过长锚杆和钢筋混凝土梁与岩石接触面上的摩擦力传到岩体上，可充分利用围岩承载力。岩壁吊车梁有利于减小地下厂房的跨度，具有可提前施工和加快地下厂房施工进度的优点，所以，在地下厂房中被广泛采用^[1~7]。如肖明等^[1]根据岩壁吊车梁与围岩联合工作原理，提出了岩壁吊车梁与围岩联合受力的分析方法；李守巨等^[2]采用非线性有限元方法研究了钢筋混凝土岩壁吊车梁与围岩的力学特性，结合某水电站工程，采用三维有限元方法模拟了岩壁吊车梁的破坏机制；刘颖等^[3]在二维分析的基础上，对东风水电站地下厂房岩壁吊车梁的轮压应力进行了计算，并与现场吊车承载试验的实测值进行了对比，两者符合较好；孙洋波等^[4]根据层状各向异性岩体中岩壁吊车梁的受力特点，并根据锚杆的“承拱悬吊”机制和三维有限元计算特点，采用隐式杆单元对吊车梁的悬吊锚杆进行分析计算，为各向异性岩体中岩壁吊车梁的计算提供了一种有效分析方法。

佛子岭抽水蓄能电站地下主厂房洞室开挖尺寸 80.3 m×25.3 m×56.286 m(长×宽×高)，采用岩锚吊车梁结构，地下厂房洞室群围岩属中厚层，强度高。穿过主厂房有一条规模较大的断层 F1。工程地质调查与岩石力学研究表明，佛子岭蓄能电站地下洞室群岩石虽坚硬性脆，力学强度很高，但由于其为大跨度、高边墙大型洞室，且发育有 F1 断层等不利地质结构，地下洞室群的岩体稳定性，特别是岩壁吊车梁荷载对稳定性的影响，成为设计与施工中非常关心的问题。

2 地下厂房岩壁吊车梁以及数值仿真分析方法

2.1 计算方案

地下厂房地质断面如图 1 所示，厂房分 7 步开挖，在第 2 步开挖过程中，同时建造岩壁吊车梁。岩壁吊车梁加载前的初始应力场为 0，围岩应力场

采用地下厂房开挖后的应力场，岩体与吊车梁主要物理力学参数如表 1 所示，其中，“/”两边数值分别为低值与高值。

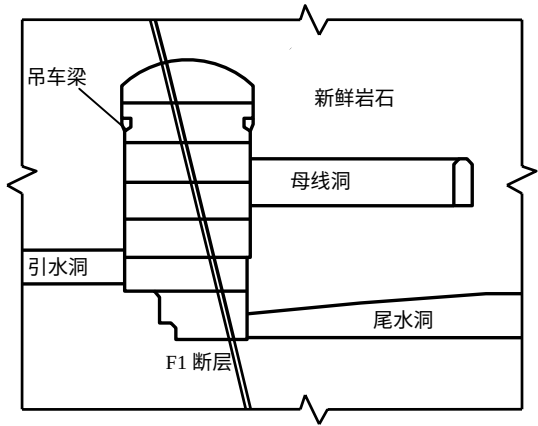


图 1 地下厂房地质断面图
Fig.1 Geological section of underground powerhouse

表 1 岩体与吊车梁主要物理力学参数值
Table 1 Physico-mechanical parameters of rock mass and crane beam

材料	饱和重度 γ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	摩擦 因数 f	黏聚力 c/MPa	变形模量 E/GPa	抗拉强度 R_t/MPa	泊松 比 ν
新鲜片麻岩	26.8	1.2/1.4	1.4/1.6	20/25	4	0.20/0.25
吊车梁	24.5	1.6	1.8	26		0.167
F1 断层	24.0	0.45/0.6	0.1	7/8	0	0.350

为研究吊车梁能否在厂房开挖过程中就进入运行期，本文探讨了在不同开挖步下施加轮压荷载对厂房以及吊车梁稳定性的影响，也研究了围岩力学参数对地下厂房开挖变形以及吊车梁变形及锚杆应力的影响规律。另外，由于地应力场中侧压力系数在地下工程稳定性分析中是一个与塑性区大小直接相关的重要参数^[8]，本文详细分析了侧压力系数对厂房特别是对吊车梁稳定性的影响。针对上述研究目标，本文设计了 3 种计算方案。

方案 1：为探讨吊车梁荷载的不同施加时机，计算了两种工况下地下厂房及岩壁吊车梁的稳定性：(1) 工况 1：主厂房分步开挖，喷锚支护，全部开挖完成后加吊车梁荷载；(2) 工况 2：主厂房分步开挖，喷锚支护，第 2 层开挖完成后，加吊车梁荷载。在本方案的计算中，岩体力学参数均取低值。

方案 2：在自重场下，考虑岩性特别是与吊车

梁接触的围岩力学参数对吊车梁变形与锚杆应力以及整个围岩稳定性的影响,主厂房全部开挖完成后加吊车梁荷载,岩体力学参数分别取表 1 中的高、低值,计算了另外 1 种工况,如表 2 所示。

表 2 不同力学参数计算工况
Table 2 Calculation cases with different mechanical parameters

工况	围岩取值
1	高值
2(即方案 1 中工况 1)	低值

方案 3: 与方案 1 仅考虑自重场不同,本方案考虑了不同构造应力条件下吊车梁变形与应力以及整个围岩稳定性,针对不同侧压力系数的组合方式,计算了 3 种工况,如表 3 所示,其中 λ_x , λ_z 分别为垂直地下厂房轴线方向和地下厂房轴线方向的侧压力系数。

表 3 不同构造应力计算工况
Table 3 Calculation cases with different tectonic stresses

工况	λ_x	λ_z
1	1.0	1.3
2	1.1	1.4
3	1.2	1.5

2.2 岩壁吊车梁的结构

岩壁吊车梁的断面如图 2 所示,主要有钢筋混凝土梁座,采用强度等级 C25 混凝土浇筑,上部 2 排斜拉锚杆和下部的受压锚杆。受拉锚杆 2 排,均为 $\phi 36@750\text{ mm}$,入岩深度 8.0 m,倾角分别为 $\beta_1=25^\circ$, $\beta_2=20^\circ$,受压锚杆 $\phi 32@750\text{ mm}$,入岩深度 6.0 m。吊车轮压及轮距分布见图 3,吊车荷载(铅直向轮压和水平刹车力)换算作用在每米岩壁吊车梁上的线荷载,即铅直向下荷载约 0.561 MN/m,水平向荷载约 0.049 MN/m)。

2.3 数值仿真技术

数值仿真技术是数学、力学与物理等学科的融合,主要研究数值仿真的数学模型和计算方法,以及工程问题的力学分析方法,环境和生产过程的物理量的动态变化过程的仿真技术。数值仿真技术的核心是物理、力学和数学建模、计算方法和借助于计算机的结果形象表示。目前,它已成为解决技术问题的重要分析手段和方法,与各种试验和测量手

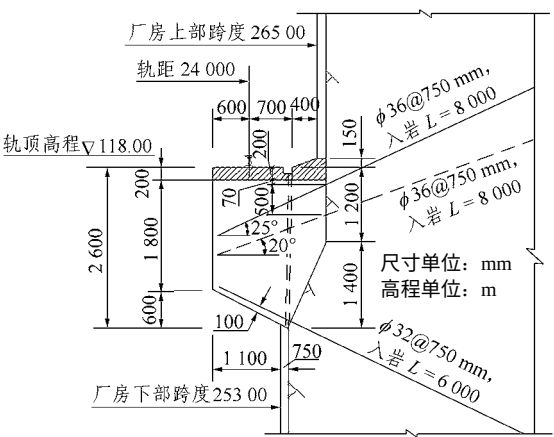


图 2 岩壁吊车梁断面图

Fig.2 Cross section of rock bolt crane beam

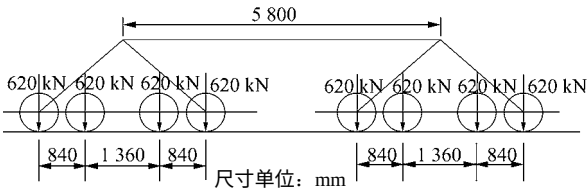


图 3 轮压荷载及轮距分布图

Fig.3 Distribution of wheel loading and distance between wheels

段一样重要,而且能揭示试验不能得到的结果和现象,并且有成本低、节约时间和经费的优势。

Phase2 是 Rocscience 公司开发的二维弹塑性有限元软件,主要计算地下开挖结构的应力和变形,可以用来分析渐进式破坏,以及支护的相互作用等各种工程问题。软件提供了可视化的数据图形交互输入环境,自动网格生成允许对网格参数进行研究,图形数据的输出为显示分析结果提供了一系列的工具。该软件可以计算 50 个开挖步,可定义 20 种材料参数,可以考虑地下水、节理性质、各种地应力场、不同边界条件、衬砌及不同锚固型式的影响,具有强大的前、后处理功能,使计算过程中的应力、位移等值线、拉应力区以及塑性区随开挖步的渐进变化一目了然地显示出来。本文研究地下厂房岩壁吊车梁施工与运行期的计算方案比较多,工作量大。与其他有限元分析软件比较起来,Phase2 的上述优点比较适合对岩壁吊车梁施工与运行期的全过程进行数值仿真分析。

3 吊车梁变形与受力特征

本节描述的地下厂房吊车梁变形与受力特征是基

浇注吊车梁,全部开挖完成后,施加轮压。所有计算结果取拉应力为负,压应力为正。边墙的开挖变形指水平向变形,顶拱与底板的变形指垂直变形。

3.1 施加轮压前后厂房的变形

厂房全部开挖完成后、施加轮压前,顶拱下沉 7.1 mm,底板回弹 5.0 mm,上、下游吊车梁附近的边墙最大位移分别为 4.1 和 4.5 mm;施加轮压后顶拱、底板变形稳定,上、下游吊车梁附近的边墙最大位移分别为 4.2 和 4.6 mm,可见围岩的位移场主要是由开挖应力的释放和调整引起的,而轮压对其影响不大。

3.2 吊车梁变形与应力

施加轮压后的吊车梁向下且向洞室变形,位移增量矢量图见图 4。上游吊车梁最大水平位移增量为 0.051 mm,最大垂直位移增量为 0.175 mm;下游吊车梁最大水平位移增量为 0.062 mm,垂直位移增量为 0.195 mm。施加轮压前后吊车梁中拉应力区分布如图 5 所示,最大拉应力发生在吊车梁下部和中部与岩壁交界处,随着轮压荷载的施加,最大拉应力明显地向吊车梁上部岩壁交接处转移,施加轮压前、后吊车梁最大拉应力约增加 0.35 MPa,且吊车梁上部与岩壁交接处的拉应力区范围也显著增加,水平向及竖直向拉应力均增加约 0.74~0.76 MPa;最大压应力约增加 0.50 MPa,发生在吊车梁下部与岩壁交接处;施加轮压前后塑性区几乎没有变化。

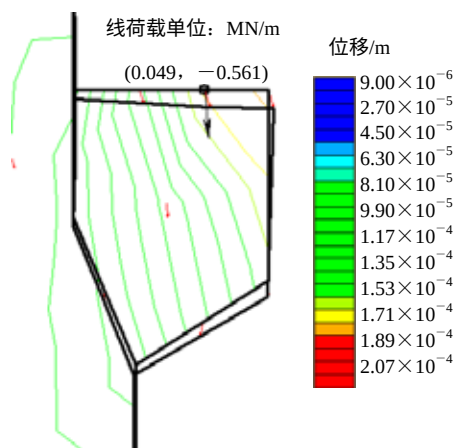


图 4 施加轮压后的位移增量矢量图

Fig.4 Displacement increment vectors after wheel loading

3.3 锚杆应力特征

吊车梁的锚杆应力分为开挖释放应力和轮压应力,开挖释放应力是吊车承载前,因厂房开挖,地应力释放而引起的应力;轮压应力是因吊车荷载而引起的应力^[3]。

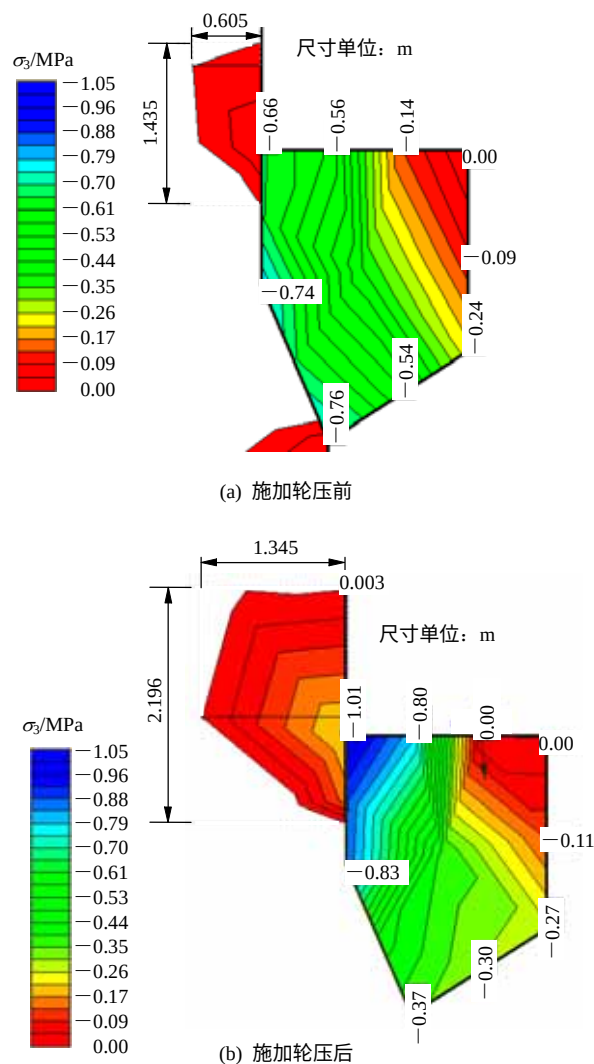


图 5 施加轮压前、后拉应力区分布图

Fig.5 Distribution of tension stress before and after wheel loading

吊车梁浇注完成后的斜拉锚杆轴向拉应力为 0.32~0.35 MPa,受压锚杆压应力为 0.30~0.38 MPa;由于开挖应力释放,开挖完成后,吊车梁斜拉锚杆轴向拉应力与受压锚杆压应力较吊车梁浇注完成时有大幅度增加,具体见表 4。施加轮压后,吊车梁斜拉锚杆轴向拉应力与受压锚杆压应力较开挖完成后再次有了大幅度增加,但增加幅度小于由应力释放造成的增加幅度。由此可见,吊车梁的锚杆应力主要是由开挖释放应力引起的,而轮压应力只占锚杆应力的一小部分。岩壁吊车梁施加轮压后的锚杆轴向应力分布见图 6。由图可见,其最大轴向应力均分布在吊车梁与岩壁交接处。

4 影响因素分析

4.1 轮压荷载施加时机的影响分析

表 4 岩壁吊车梁锚杆施工期和运行期的应力

Fig.4 Stresses of rock bolt crane beam during construction and operation periods

方案	工况		上游吊	上游吊	上游吊	下游吊	下游吊	下游吊
			车梁上 排斜拉 锚杆	车梁下 排斜拉 锚杆	车梁受 压锚杆	车梁上 排斜拉 锚杆	车梁下 排斜拉 锚杆	
方案1	工况1	浇注完成后	-0.34	-0.32	0.30	-0.35	-0.33	0.376
		开挖完成后	-13.07	-11.65	6.86	-7.02	-5.79	3.236
		开挖完成后	-19.84	-17.80	8.09	-14.91	-13.60	4.652
		施加轮压						
方案1	工况2	浇注完成后	-0.34	-0.32	0.29	-0.35	-0.33	0.376
		第二步开挖						
		结束后施加	-3.58	-3.49	2.70	-3.63	-3.55	3.440
		轮压						
方案2	工况1	开挖完成后	-26.33	-24.57	8.19	-16.70	-15.40	4.843
		浇注完成后	-0.34	-0.32	0.30	-0.35	-0.33	0.373
		开挖完成后	-10.49	-9.36	5.53	-5.42	-4.55	2.477
		开挖完成后	-16.26	-15.01	6.51	-12.37	-11.32	3.644
方案3	工况1	施加轮压						
		浇注完成后	-18.87	-18.96	-19.29	-19.27	-19.19	-19.813
		开挖完成后	-23.22	-19.91	12.30	-18.77	-18.53	7.332
		开挖完成后	-28.96	-28.43	13.52	-20.24	-20.43	8.618
		施加轮压						

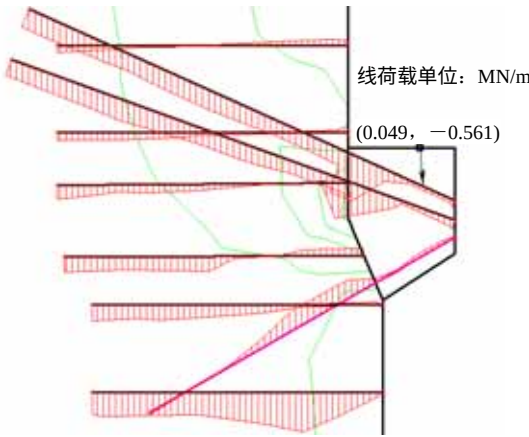


图 6 岩壁吊车梁施加轮压后的锚杆轴向应力分布

Fig.6 Bolt axial stress of crane beam after wheel loading

方案 1 中计算工况 2 与 1 不同的是, 吊车梁浇注完成后直接施加轮压。施加轮压后的吊车梁向下且向洞室变形, 其最大水平位移增量为 0.046 mm, 最大垂直位移增量为 0.155 mm; 施加轮压后吊车梁最大拉应力发生在吊车梁上部与岩壁交接处, 比轮压施加前约增加 0.65 MPa; 最大压应力增加约为 0.60 MPa, 发生在吊车梁下部与岩壁交接处; 施加轮压前后吊车梁附近的拉应力区、塑性区几乎都没有变化。厂房全部开挖完成后, 顶拱、底板及吊车梁附近边墙变形与工况 1 差别不大, 吊车梁附近拉应力区与工况 1 的拉应力区也没有什么变化, 只是

塑性区比工况 1 略有增加。

通过对比分析可知, 两种工况下吊车梁轮压施加的时间无论对围岩的位移场还是吊车梁本身的变形都影响不大, 只是工况 2 吊车梁附近最大拉应力增加量比工况 1 高 0.23 MPa, 而最大压应力以及拉应力区、塑性区则基本一致。

方案 1 中的两种计算工况以及方案 2, 3 中的计算工况 1 的岩壁吊车梁锚杆施工期和运行期的应力值见表 4。由表 4 可知, 吊车梁上排斜拉锚杆拉应力普遍大于吊车梁下排斜拉锚杆拉应力, 这与其他工程岩壁吊车梁模型试验中锚杆应力观测规律一致^[9]。比较方案 1 中计算工况 1 与 2, 锚杆应力变化规律基本相同, 但工况 2 的锚杆拉应力值高于工况 1 近 7 MPa, 锚杆压应力值与工况 1 接近。因此, 从锚杆应力状态来看, 工况 1 优于工况 2。

4.2 围岩力学参数取值的影响分析

方案 2 的计算工况 1 岩体主要力学参数取高值, 吊车梁材料参数不变。与工况 2 比较, 开挖完成后顶拱下沉 6.3 mm, 底板回弹 4.1 mm, 上、下游吊车梁附近的边墙最大位移分别为 3.9 和 4.3 mm, 施加轮压后洞室整体变形与施加轮压前变化不大。由于整个地下洞室的围岩力学参数提高了, 所以洞室围岩变形整体都明显小于工况 2 围岩力学参数取低值时的变形。施加轮压后的吊车梁向下、向洞室变形, 上游吊车梁最大水平位移增量为 0.045 mm, 最大垂直位移增量为 0.151 mm; 下游吊车梁最大水平位移增量为 0.051 mm, 垂直位移增量为 0.166 mm。由于围岩的力学参数提高后与吊车梁的材料参数值比较接近, 所以施加轮压前后吊车梁的位移增量也明显小于工况 2 的位移增量, 且吊车梁内无论是斜拉锚杆轴向应力还是受压锚杆应力值都普遍降低, 斜拉锚杆最大拉应力降低 3.6 MPa, 约降低 18.1%, 受压锚杆最大压应力降低 1.5 MPa, 约降低 20.0%。由此可见, 锚杆应力受围岩材料参数影响较大。

4.3 地应力场的影响分析

方案 3 计算工况 1 考虑的构造应力侧压力系数为 $\lambda_x = 1.0$, $\lambda_z = 1.3$, 与方案 1 中仅考虑自重应力的计算工况 1 比较, 开挖完成后顶拱下沉 1.6 mm、底板回弹 4.6 mm, 上、下游吊车梁附近的边墙最大位移分别为 7.2 和 7.6 mm, 施加轮压后洞室整体变形与施加轮压前变化不大, 由于考虑了构造应力对围岩变形的影响, 所以围岩顶拱下沉量比仅考虑自重时明显减少, 底板回弹量变化不大, 但是吊车梁附近上、下游边墙的最大位移明显增加, 而构造应力对施加轮压前、后吊车梁的位移增量变化影响不

大。施加轮压后,吊车梁最大拉应力值比考虑自重应力的最大拉应力减少约 0.22 MPa,但是拉应力范围变化不大。

对于吊车梁锚杆应力的对比如表 4 所示。由表可见,考虑构造应力时,吊车梁浇注完成后锚杆应力比仅考虑自重应力时大得多,且此时受压锚杆受构造应力的作用也受拉,可见此时锚杆开挖释放应力主要是由构造应力引起的,而不是自重应力引起的。随着开挖的继续,吊车梁内受压锚杆开始承受一定的压应力,施加轮压后,吊车梁内斜拉锚杆最大拉应力比仅考虑自重应力时增加约 10.6 MPa,受压锚杆最大压应力增加约 5.5 MPa。由此可见,构造应力对吊车梁内锚杆应力具有显著的影响。

4.4 F1 断层的影响

本文还计算了不考虑 F1 断层以及考虑 F1 断层且其力学参数分别取高、低值情况下,吊车梁变形与锚杆应力。计算分析可知,F1 断层的存在及其岩性对吊车梁变形与锚杆应力均没有明显影响,在这里不多叙述。

5 结 语

(1) 吊车梁结构合理,支护参数可行,且吊车梁荷载何时施加对围岩的位移场、应力场影响不大,只要围岩自身的稳定性得到保证,则岩壁吊车梁是稳定的。

(2) 虽然方案 1 中厂房开挖完成后施加吊车荷载时,吊车梁内锚杆应力状态优于开挖过程中施加吊车荷载时应力状态,但是两种情况下锚杆应力远未达到应力许可值,且开挖过程中施加吊车荷载可以使岩壁吊车梁提前进入运行期,加快了施工进度,所以,可根据实际施工要求选择合适的方案。

(3) 吊车梁锚杆应力及吊车梁变形主要受围岩力学参数的影响,随着厂房围岩岩性的提高,吊车梁变形及其锚杆应力显著减小。

(4) 构造应力对吊车梁内锚杆应力影响显著,可使锚杆应力大大增加,但是考虑构造应力的影响,可以适当减小吊车梁内最大拉应力量值。

参考文献(References):

[1] 肖 明,陈俊涛,袁金亮.复杂地质条件下岩锚吊车梁结构三维数值分析[J].岩石力学与工程学报,2003,22(增1):2 294-2 298.(Xiao

Ming, Chen Juntao, Yuan Jinliang. Three-dimensional numerical analysis of crane beam with rock bolt under complex geological condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Supp.1): 2 294-2 298.(in Chinese))

- [2] 李守巨,刘迎曦,刘进宝,等.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):1 730-1 734.(Li Shouju, Liu Yingxi, Liu Jinbao, et al. Computational simulation and analysis of fracturing mechanism of crane girder bolted to rock bolt wall of chamber[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10): 1 730-1 734.(in Chinese))
- [3] 刘 颖,曹普发,彭守拙.轮压作用下岩壁吊车梁的三维应力和实测对比[J].水力发电学报,1996,15(2):51-61.(Liu Ying, Cao Pufa, Peng Shouzhuo. The wheel load stress of rock bolt crane girder and its comparison with the in-situ test[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1996, 15(2): 51-61.(in Chinese))
- [4] 孙洋波,肖 明,郑明燕.各向异性岩体中岩锚吊车梁分析[J].长江科学院院报,2003,20(4):29-31.(Sun Yangbo, Xiao Ming, Zheng Mingyan. Analysis of anchor concrete beam buried in stratified anisotropic surrounding rock[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2003, 20(4): 29-31.(in Chinese))
- [5] 付 敬,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1):1 710-1 713.(Fu Jing, Liu Yanchao, 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(Supp.1): 1 710-1 713.(in Chinese))
- [6] 洪振伟.小湾水电站地下厂房吊车梁设计[J].云南水力发电,1996,12(1):71-75.(Hong Zhenwei. Design of crane beam in the underground powerhouse of Xiaowan Hydropower Station[J]. Yunnan Water Power, 1996, 12(1): 71-75.(in Chinese)).
- [7] 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.(Li Dongxiao. Summary of the design of rock wall crane beam in underground powerhouse of the Baise WR pivotal project[J]. Guangxi Water Resources and Hydropower Engineering, 1999, (2): 24-26.(in Chinese))
- [8] 朱以文,黄克戡,李 伟.地应力对地下洞室开挖的塑性区影响研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(8):1 344-1 348.(Zhu Yiwen, Huang Kejian, Li Wei. Study on effect of in-situ stresses on plastic region induced by excavations of underground openings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(8): 1 344-1 348.(in Chinese))
- [9] 贡保臣.大朝山水电站岩壁吊车梁模型试验研究[J].云南水力发电,2002,18(4):25-28,64.(Gong Baochen. Model test and study on the rock ledge crane beam in the Dachaoshan Hydropower Plant[J]. Yunnan Water Power, 2002, 18(4): 25-28, 64.(in Chinese))