

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221643

高地应力地下厂房岩壁吊车梁结构安全性分析

蒋明欢, 岑威钧, 王 辉, 曹艺凡

(河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 对于高地应力区地下厂房, 岩壁吊车梁浇筑完成后下部厂房洞室开挖可能会对吊车梁产生不利影响。对此, 采用三维弹塑性有限元法分析了某地下厂房岩壁吊车梁施工期和运行期应力变形、梁体锚杆受力及梁体的稳定性。结果表明, 在高地应力场中, 岩壁吊车梁会产生较大变形, 梁体和岩壁结合面会出现较大的拉应力, 在吊车梁浇筑完成后的3期内梁体应力变形增大, 随着开挖部分远离梁体, 梁体应力变形变化趋于平缓, 梁壁结合面安全系数增大, 为类似工程中吊车梁浇筑和洞室施工提供了参考依据。

关键词: 高地应力; 地下厂房; 岩壁吊车梁; 锚杆应力; 有限元; 安全系数

中图分类号: TV731.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)02-0145-05

1 工程概况

某水电站为大渡河干流水电规划的“3库28级”大型水利水电枢纽工程之一, 电站总装机容量746 MW。主厂房上游连接压力管道下平段, 下游主变洞、尾水调压室依次排列, 洞室间净距分别为45.00、40.00 m。主、副厂房开挖尺寸为142.04 m×25.00 m×61.20 m(长×宽×高), 主变洞开挖尺寸为25.02 m×18.10 m×30.66 m(长×宽×高)。该水电站厂址区Ⅲ类围岩约占洞室围岩的95%, 其变形模量为7 GPa, 泊松比为0.25, 抗剪断摩擦系数为0.9, 抗剪断粘聚力为1.0 MPa。主厂房附近大主应力为21.23~24.49 MPa, 方向N51°~71°W, 倾角约20°, 近水平, 表明该地区属高地应力区。根据《地下厂房岩壁吊车梁设计规范》(NB/T 35079-2016)^[1], 主厂房岩壁吊车梁初选上、下排斜拉锚杆36@75 mm, 长度12 m; 下排受压锚杆36@75 mm, 长度12 m。岩锚梁作为地下厂房的重要组成结构, 其设计计算方法常采用刚体极限平衡法, 但局限于未考虑岩壁、梁体和锚杆相互作用, 难以描述吊车梁在浇筑和后续开挖时的非线性力学行为^[2,3]。刘春霞^[4]采用刚体极限平衡法和有限单元法研究了岩锚梁受力和稳定性, 发现按刚体极限平衡法设计的锚杆偏保守; 王安亭等^[3]研究了不同时机浇筑岩锚梁的变形和锚

杆应力状态, 发现延后浇筑岩锚梁可以改善吊车梁和围岩应力变形, 有利于稳定; 李良权等^[5]采用非连续力学方法研究了不同岩壁结合面下吊车梁锚杆受力、梁体与结合面的应力与变形, 发现混凝土修补岩锚梁基座合适, 岩锚梁应力变形计算值与实测值较吻合。鉴此, 本文针对该水电站地下厂房岩壁吊车梁施工方案, 采用三维弹塑性有限元法计算分析了吊车梁在施工期下部洞室开挖和运行期受轮压荷载后的应力变形、梁体锚杆受力及梁体和岩壁结合面稳定系数, 找出了岩壁吊车梁在浇筑初期应力和变形增量大的原因, 并预测评价了运行期吊车梁与岩壁结合面的稳定性, 旨在为类似工程提供借鉴。

2 计算条件

计算域包含厂房和主变洞等主要洞室, 0点为#1母线洞轴线与主厂房轴线的交点, 正x向为主厂房指向主变室方向, 正y向为主厂房指向安装间方向, z向为高程方向。有限元计算模型见图1(a), 其中节点数141 538个, 单元数146 331个。图1(b)为厂房和主变洞等主要洞室的开挖体网格, 图1(c)为厂房内部岩壁吊车梁局部网格。吊车梁与岩壁之间从上至下布设4排锚杆(图2), 有限元网格中锚杆采用ADINA自带的Rebar单元进行模拟, 共计3 294根。

收稿日期: 2022-08-10, 修回日期: 2022-09-07

作者简介: 蒋明欢(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为地下工程结构安全, E-mail: www.jmhcs127@qq.com

通讯作者: 岑威钧(1977-), 男, 博士、教授、博导, 研究方向为土石坝抗震、水工结构安全分析, E-mail: hhucwj@163.com

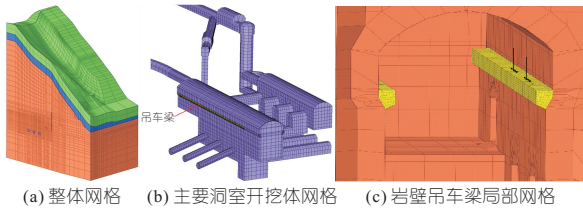


图1 地下厂房有限元计算网格

Fig. 1 Finite element calculation grid of underground powerhouse

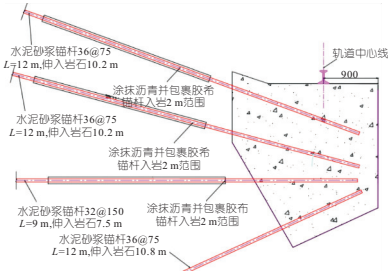


图2 岩壁吊车梁结构型式示意图

Fig. 2 Structure schematic diagram of rock-anchored crane beam

施工期和运行期两种主要工况为：①施工期工况 1-1。主厂房 I、II 层开挖及浇筑吊车梁；②施工期工况 1-2。整个洞室全部开挖完成；③运行期工况 2。吊车梁施加轮压荷载，大车最大轮压 780 kN，最大水平侧向力 105 kN，小车刹车制动力 40 kN，大车刹车制动力 70 kN。

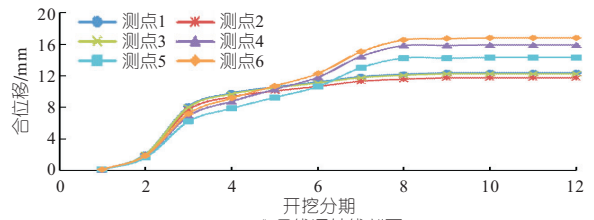
3 岩壁吊车梁的变形与应力分析

3.1 施工期

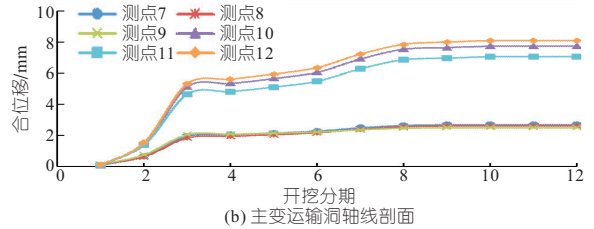
3.1.1 吊车梁位移

岩壁吊车梁变形易受母线洞开挖影响，因此本次岩壁吊车梁选取沿#2 母线洞轴线($y = -25$ m)横剖面和上游最大纵剖面($x = -8.8$ m)、下游最大纵剖面($x = 13.8$ m)进行工况 1-1 计算，选取沿#2 母线洞轴线($y = -25$ m)横剖面和沿主变运输洞轴线($y = 30.12$ m)横剖面进行工况 1-2 计算(图 3 中测点 1~12 分别为这 2 个剖面图 4(a)中①~⑥位置的测点结果)。由于主厂房 I、II 层开挖完时尚未浇筑吊车梁，所以将吊车梁浇筑完成时刻的统计结果作为曲线图中第 1 期的结果。

图 4 为吊车梁浇筑完成时#2 母线洞轴线剖面的水平和竖向位移云图，图 5 为吊车梁浇筑完成时上下游最大纵剖面的合位移云图。此时，吊车梁主要受自重荷载的作用，变形分布均匀，垂直厂房轴线方向水平位移成层分布，竖向位移成条带分布，且竖向位移在与岩壁连接处小，为 -0.07 mm，在临空侧大，为 -0.13 mm；沿厂房轴线方



(a) #2 母线洞轴线剖面



(b) 主变运输洞轴线剖面

图3 工况 1-2 施工期岩壁吊车梁合位移曲线图(单位: mm)

Fig. 3 Total displacement curve of rock-anchored crane beam during construction in working condition 1-2

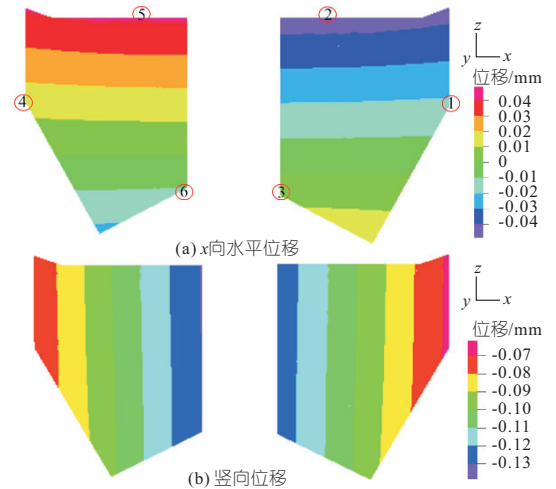


图4 工况 1-1 吊车梁沿#2 母线洞轴线剖面位移云图

Fig. 4 Profile displacement cloud image of crane beam along axis of #2 bus hole in working condition 1-1

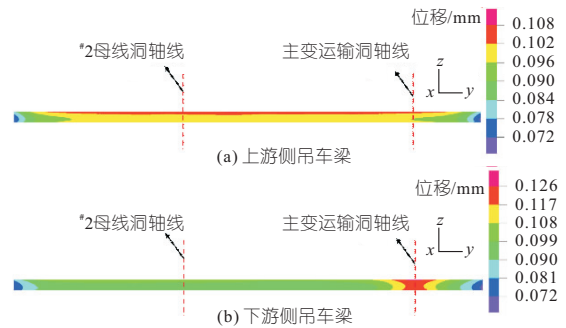


图5 工况 1-1 吊车梁最大纵剖面合位移云图

Fig. 5 Cloud diagram of maximum longitudinal profile total displacement of crane beam in working condition 1-1

向上游侧吊车梁中部变形大，两端变形小，下游侧吊车梁由于主变运输洞开挖应力释放，在主变运输洞轴线附近变形最大，但变形量极值很小，其值(合位移)为 0.14 mm。

图 3 为施工期吊车梁在#2 母线洞轴线剖面

和主变运输洞轴线剖面 12 个测点的合位移曲线图。由图 3 可知,岩壁吊车梁浇筑完成后,随着洞室继续向下开挖,变形量值不断增大。由于岩壁吊车梁浇筑完成初期(第 2、3 期)受临近岩体开挖扰动影响大,吊车梁变形增量较大,合位移增加了 9.70 mm;随着开挖岩体远离吊车梁(第 4 期以后),吊车梁变形趋于平缓。主厂房洞室开挖完毕后,上游侧吊车梁变形大于下游侧,最大合位移达到 16.97 mm,上、下游侧吊车梁水平位移极值分别为 16.08、-10.20 mm,上、下游侧吊车梁竖向位移极值分别为 -5.71、-7.99 mm。总体上,受施工期下部洞室开挖应力释放的影响,上下游吊车梁向洞内变形,且水平变形大于竖向,因此在吊车梁轨道安装过程中应留有一定余地,以一定程度上减弱或抵消围岩开挖释放应力对吊车梁变形的影响。

3.1.2 吊车梁应力

图 6(a)、(b)为施工期吊车梁在#2 母线洞轴线剖面和主变运输洞轴线剖面测点的大主应力变化曲线。岩壁吊车梁浇筑完成后,主应力极值较小,其中大主应力极值为 0.12 MPa(压应力),小主应力极值为 -0.12 MPa(拉应力)。主厂房洞室开挖完毕后,下游侧吊车梁远离岩壁处大主应

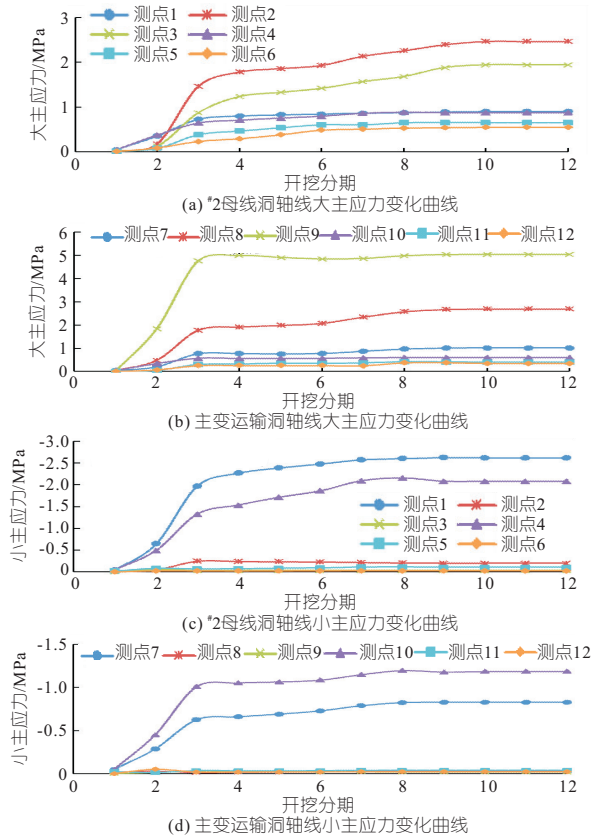


图 6 工况 1-2 岩壁吊车梁主应力变化曲线图(单位:MPa)

Fig. 6 Principal stress variation curve of rock-anchored crane beam in working condition 1-2

力增大明显(测点 2、3、8、9),其他部位大主应力小幅增加,均在第 3 期后逐渐趋于稳定。#2 母线洞轴线剖面的上游侧吊车梁大主应力增加至 1.25 MPa,下游侧增加至 2.47 MPa;主变运输洞轴线剖面的上游侧增加至 0.59 MPa,下游侧增加至 5.05 MPa。图 6(c)、(d)为施工期吊车梁在#2 母线洞轴线剖面和主变运输洞轴线剖面测点的小主应力变化曲线。由图 6(c)、(d)可知,上、下游侧吊车梁与岩壁结合处小主应力增大最为明显(测点 1、4、7、10)。#2 母线洞轴线剖面的上游侧吊车梁小主应力增加至 -2.08 MPa,下游侧增加至 -2.62 MPa;主变运输洞轴线剖面的上游侧增加至 -1.19 MPa,下游侧增加至 -0.83 MPa。上、下游小主应力极值均位于吊车梁与岩壁接触面直立段附近。施工期(第 4 期以后)吊车梁拉应力极值超过了混凝土允许抗拉强度(2.1 MPa),局部可能出现裂缝。由于岩壁吊车梁浇筑完成初期受临近的岩体开挖扰动影响大(第 2、3 期),吊车梁大、小主应力增量较大,其中间大、小主应力分别增加了 1.96、-2.27 MPa;随着开挖岩体远离吊车梁(第 4 期以后),吊车梁应力变化趋于平缓。施工过程中边墙往洞内变形,上、下游侧吊车梁有向洞内翻转的趋势,导致吊车梁应力分布不均,吊车梁与围岩接触的斜面部分出现拉应力;受母线洞开挖的影响,上游侧吊车梁的受力状态整体上优于下游侧吊车梁(上游侧吊车梁拉应力极值小)。

3.1.3 吊车梁锚杆应力

图 7 为施工期岩壁吊车梁锚杆应力分布云图。由图 7 可知,吊车梁浇筑完成后,上游侧吊车梁第 1、2 排锚杆受拉,第 3、4 排锚杆受压,应力极值分别为 -1.75、-0.90、0.41、1.38 MPa。下游侧第 1、2 排锚杆受拉,第 3、4 排锚杆受压,应力极值分别为 -1.14、-0.56、0.31、0.92 MPa。整体上,上游侧锚杆应力极值大于下游侧锚杆。主厂

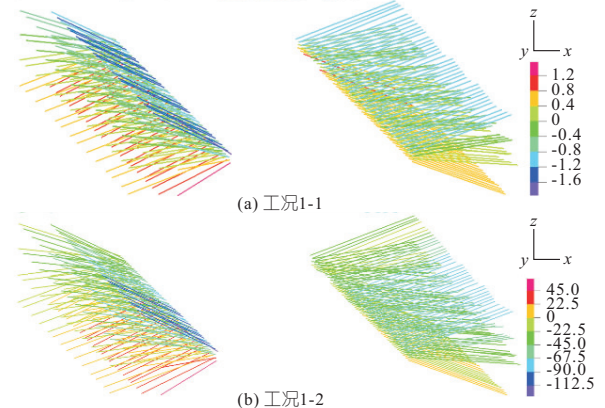


图 7 施工期锚杆应力云图(单位:MPa)

Fig. 7 Cloud map of anchor stress during construction period

房洞室开挖完毕后,受下部洞室开挖应力释放的影响,上、下游侧锚杆应力极值明显增大。上游侧 4 排锚杆应力极值分别增至 -115.59、-50.35、36.86、61.86 MPa。下游侧 4 排锚杆全部受拉,应力极值分别为 -86.28、-60.10、-46.15、-24.85 MPa。总体上,上、下游侧吊车梁锚杆拉应力极值均在锚杆抗拉强度范围内且留有较大安全裕度。

3.2 运行期

运行期工况 2 相比施工期工况 1-2 仅增加了轮压荷载,因此吊车梁的变形和应力分布规律未发现明显变化,仅极值有所差别。

岩壁吊车梁运行期受载后,吊车梁最大变形值(合位移)相比于洞室开挖完成时仅增加 0.07 mm,为 17.04 mm。可见吊车梁变形主要受地质条件及开挖爆破控制,轮压荷载影响十分有限。上、下游吊车梁应力极值均略有增加,上游侧吊车梁大主应力相比于洞室开挖完成时增加了 0.01 MPa;小主应力增加了一 0.07 MPa;下游侧吊车梁大主应力增加了 0.01 MPa;小主应力增加了一 0.22 MPa。轮压荷载运行期加载布置在模型 $y = -17.3 \sim -26.51$ m 之间(2 号母线洞轴线附近),岩壁吊车梁的小主应力在此区间出现小范围的压应力,大主应力几乎无变化,离开轮压作用位置,应力影响迅速减小。此外,受载后吊车梁拉应力极值超过了混凝土允许抗拉强度(2.1 MPa),运行期吊车梁局部可能出现裂缝。另外,由于运行期施加了轮压荷载,岩壁吊车梁的锚杆应力略有增加,上游侧 4 排锚杆应力分别增至 -115.60、-50.35、36.86、61.86 MPa。下游侧 4 排锚杆分别增至 -87.15、-61.11、-46.15、-24.86 MPa。上、下游侧吊车梁锚杆拉应力符合锚杆的受力特点,极值均在锚杆抗拉强度范围内且有较大安全裕度。

4 岩壁吊车梁与岩壁结合面稳定性分析

考虑到岩壁结合面可能是个薄弱面,因此按照《地下厂房岩壁吊车梁设计规范》(NB/T 35079-2016)^[1],对岩壁吊车梁与岩壁结合面的抗滑安全性能进行计算。其安全系数 K 计算公式为:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n (f_{ik}\sigma_{i,av} + c_{ik})A_i}{\sum_{i=1}^n \tau_{i,av}A_i} \quad (1)$$

式中, $\sigma_{i,av}$ 、 $\tau_{i,av}$ 分别为结合面上第 i 个单元的平均正应力、平均剪应力; f_{ik} 为结合面上第 i 个单元的抗剪摩擦系数; c_{ik} 为结合面上第 i 个单元的抗剪断粘聚力; A_i 为第 i 个单元沿潜在滑动面的面积; n 为结合面上的单元个数。

由于无结合面试验资料,因此参考《混凝土重力坝设计规范》(SL 319-2018)^[6],选取厂房围岩(Ⅲ类岩体)与混凝土接触面的抗剪断强度计算参数 $f = 1.1 \sim 0.9$, $c = 1.1 \sim 0.7$ MPa。计算时选择 $f = 0.9$, $c = 0.7$ MPa 作为基础值。考虑岩壁吊车梁在运行期要反复受到轮压荷载、刹车荷载等不利因素的影响, c 值会产生变化,分别按 1.00、0.70、0.30、0 MPa 四种情况进行敏感性分析。图 8 为运行期岩壁吊车梁安全系数变化曲线。由图 8 可知,运行期轮压荷载作用下,上下游岩壁吊车梁抗滑稳定安全系数较大,超过 4.5,吊车梁不会发生失稳。粘聚力 c 的敏感性分析表明,上下游岩壁吊车梁抗滑稳定安全系数随着接触面粘聚力的减小而减小,呈线性关系。若接触面粘聚力完全失效($c = 0$ MPa),则上下游岩壁吊车梁抗滑稳定安全系数分别为 0.36、0.32,吊车梁会失稳破坏。

图 8 为运行期岩壁吊车梁安全系数变化曲线。由图 8 可知,运行期轮压荷载作用下,上下游岩壁吊车梁抗滑稳定安全系数较大,超过 4.5,吊车梁不会发生失稳。粘聚力 c 的敏感性分析表明,上下游岩壁吊车梁抗滑稳定安全系数随着接触面粘聚力的减小而减小,呈线性关系。若接触面粘聚力完全失效($c = 0$ MPa),则上下游岩壁吊车梁抗滑稳定安全系数分别为 0.36、0.32,吊车梁会失稳破坏。

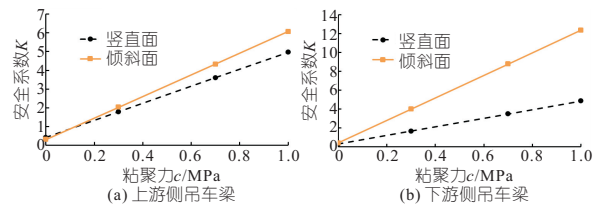


图 8 运行期岩壁吊车梁安全系数
Fig. 8 Safety factor of rock-anchored crane beam during operation

5 结论

a. 岩壁吊车梁浇筑时,吊车梁的自重荷载引起的变形和应力很小。施工期厂房后续开挖引起的地应力释放,导致吊车梁的变形和应力逐渐增加,随着开挖远离梁体,吊车梁变形和应力变化趋于平缓。主厂房洞室开挖完毕后,吊车梁大、小主应力分别增加至 5.05、-2.62 MPa,最大变形值达到 16.97 mm,且下游侧吊车梁局部拉应力极值超过混凝土允许抗拉强度(2.1 MPa),吊车梁局部可能出现裂缝。

b. 运行期轮压荷载对吊车梁及围岩的变形应力影响有限,吊车梁最大变形值仅增加了 0.07 mm,吊车梁大、小主应力分别增加了 0.01、-0.22 MPa。

c. 吊车梁施工期和运行期,上下游侧吊车梁锚杆拉应力极值均在锚杆抗拉强度范围内且留有较大安全裕度,并且结合面稳定安全系数较大,当

前设计的支护条件能满足岩壁吊车梁现状和后续开挖的稳定。

参考文献:

[1] 国家能源局. 地下厂房岩壁吊车梁设计规范:NB/T 35079-2016[S]. 北京:中国电力出版社,2016.

[2] 金丰年,翁杰,许宏发. 岩锚吊车梁设计计算方法研究[J]. 岩土力学,2005,26(增刊1):175-179.

[3] 王安亭,肖明,朱奎旭. 高地应力下岩锚吊车梁浇

筑时机优化分析[J]. 水力发电,2019,45(9):109-113,134.

[4] 刘春霞. 地下厂房中岩壁式吊车梁的结构分析与稳定性计算[D]. 南京:河海大学,2006.

[5] 李良权,万祥兵,陈建林,等. 白鹤滩水电站地下厂房岩壁吊车梁稳定性分析[J]. 水利水电技术,2019,50(5):124-135.

[6] 中华人民共和国水利部. 混凝土重力坝设计规范:SL 319-2018[S]. 北京:中国水利水电出版社,2018.

Structural Safety Analysis of Rock-anchored Crane Beam of Underground Powerhouse with High Geostress

JIANG Ming-huan,CEN Wei-jun,WANG Hui,CAO Yi-fan

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: For underground powerhouse in high geostress area, the excavation of the lower powerhouse cavern after the completion of the pouring of the rock-anchored crane beam may have an adverse impact on the crane beam. Aiming at this problem, three-dimensional elastoplastic finite element method was used to analyze the stress and deformation, the stress of the anchor and the stability of the crane beam of an underground powerhouse during construction and operation period. The results show that in the high geostress field, the rock-anchored crane beam will have large deformation, and the joint surface between the beam and the surrounding rock will have large tensile stress. After the crane beam is poured, the stress and deformation of the beam will increase greatly in three stages. As the excavated part is far away from the beam, the stress and deformation of the beam will become gentle, and the safety factor of the joint surface between the beam and the wall will be large, which can provide a reference for the crane beam pouring and cavern construction in similar projects.

Key words: high geostress; underground powerhouse; rock-anchored crane beam; anchor stress; FEM; safety factor

(上接第 85 页)

Stress Analysis of Asphalt Concrete Core Wall and Diaphragm of Dam Foundation Based on Finite Element Method

CUI Xi-can¹,WANG Da-yong²,ZHANG Ling-kai^{1,3a},ZHANG Xing-xing^{3a,3b}

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Heilongjiang Sanjiang Construction Management Co., Ltd, Harbin 150036, China; 3a. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin; 3b. Key Laboratory on Construction and Security of Water Projects of Ministry of Water Resources,China Institute of Water Resources and Hydropower Research,Beijing 100038, China)

Abstract: In the design scheme of asphalt concrete core rockfill dam, the axis of diaphragm of dam foundation and asphalt concrete core wall is overlapped. However, due to construction errors and other reasons, the axis of diaphragm of dam foundation and asphalt concrete core wall may not be completely overlapped. Based on the finite element analysis method, the stress behavior of diaphragm of dam foundation and asphalt concrete core wall under different offsets was studied. The results show that under the superposition of axes, the local tensile stress of the diaphragm of dam foundation is in a state of no or small in the construction period and operation period, which has little influence on the whole. The minor offset of the axis of the diaphragm of dam foundation to the downstream will have a certain adverse effect on the stress of the diaphragm of dam foundation during operation. The main performance is that the local tensile stress of the downstream face of the diaphragm of dam foundation increases, and there is stress concentration. The local tensile stress increases by 3.6 times compared with that without offset. The concrete base of the asphalt concrete core wall can be slightly extended to the downstream according to the offset of the diaphragm of dam foundation, which can reduce the local tensile stress of the downstream surface of the diaphragm of dam foundation by 59.3 % and weaken the stress concentration, so as to improve the stress state of the diaphragm of dam foundation. The finite element simulation analysis can provide support for safety evaluation and selection of engineering treatment measures under eccentric condition of diaphragm of dam foundation.

Key words: asphalt concrete core dam; diaphragm of dam foundation; stress; finite element modeling