

地下厂房岩锚梁裂缝成因分析

王侁凯, 彭琦, 汤荣, 邓建辉, 曲宏略

(四川大学水利水电学院 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要: 针对水电站地下厂房开挖过程中出现的岩锚梁与围岩结合部位的纵向裂缝, 结合地质资料、监测成果和施工过程, 对岩锚梁裂缝产生的原因进行较为详细的分析, 认为裂缝形成的时间在2006年10月底至11月初, 即地下厂房进行第V层开挖施工期间; 裂缝段围岩的差异变形是裂缝产生的主要原因; 导致围岩差异变形的地质原因是存在岩脉断层, 施工原因是支护措施不能有效地节制围岩变形。因此, 考虑岩体的非连续性, 加强施工期地质工作, 及时预测侧墙可能出现的差异变形, 并采取有力的支护措施对确保岩锚梁安全十分重要。

关键词: 水工结构工程; 地下厂房; 岩锚梁; 裂缝; 安全监测

中图分类号: TV 131

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2007)10-2125-05

CAUSES ANALYSIS OF CRACKING OF ROCK-BOLTED CRANE GIRDER IN AN UNDERGROUND POWERHOUSE

WANG Dikai, PENG Qi, TANG Rong, DENG Jianhui, QU Honglue

(State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract: Rock-bolted crane girder is a widely used structure in underground powerhouse nowadays. In hydropower projects longitudinal crack between rock-bolted crane girder and surrounding rock masses can hardly be found. Aiming at the cracking phenomenon in an underground powerhouse, detailed analysis of the cracking mechanism is made based on geology, monitored data and construction process. It is concluded that the cracking initiates between late October and early November, 2006; differential deformation caused by vein faults in the surrounding rock and excavation is the major cause leading to the cracking while the development of the differential deformation cannot be effectively controlled by support measures. So considering the discontinuous characteristics of rock masses, it is important to make detailed geological investigation and to forecast possible differential deformation on the sidewalls during construction period, so as to take effective support measures and assure the safety of the girder.

Key words: hydraulic structure engineering; underground powerhouse; rock-bolted crane girder; crack; safety monitoring

1 引言

岩锚梁首先于20世纪在挪威使用, 其优点表现

为: 减小主厂房跨度; 提前安装施工临时桥吊, 便于混凝土浇注; 提前安装永久性桥吊; 提前安装机组^[1]。因此, 自1986年我国首次在鲁布革水电站地下厂房中成功应用后, 岩锚梁已经成为现代水电站

收稿日期: 2007-04-28; **修回日期:** 2007-07-12

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412705); 国家自然科学基金重点项目(50639100); 国家自然科学基金面上项目(50579042)

作者简介: 王侁凯(1983-), 男, 2005年毕业于四川大学水利水电学院水利水电工程专业, 现为硕士研究生, 主要从事岩石工程监测与反馈分析方面的研究工作。E-mail: wangdikai2006@sina.com

地下厂房中普遍采用的一种结构型式。

岩锚梁又称岩壁吊车梁，是利用一定数量的深孔锚杆和岩壁台座把混凝土梁体牢牢地锚固在岩石上，由锚杆和钢筋混凝土联合构成壁式受力结构。梁体承受的全部荷载及其自重通过锚杆及岩壁台座传递到岩体内。岩锚梁的结构特点及其在地下厂房施工期和运行期的重要作用使得其设计和施工备受重视^[2~9]。但是，由于岩锚梁是在地下厂房前期开挖施工期间形成的，后期的爆破开挖施工引起的侧墙变形对其工作性态存在较大影响，合理的开挖工艺和施工技术是岩锚梁安全运行和岩台较好成型的保证^[10~12]。本文将结合水电站地下厂房岩锚梁裂缝实例，从地质条件、施工过程和监测资料等多个角度分析裂缝的成因机制，探讨可行的解决方案，以资同类工程借鉴参考。

2 地下厂房简介

地下厂房洞室群位于坝轴线下游左岸花岗岩山体中，主要由主副厂房、主变室、尾水闸门室、2条尾水隧洞和6条引水隧洞组成。主副厂房、主变室平行布置，主副厂房与主变室相距44.9m。其中主副厂房尺寸294.1m×26.8m(30.7m)×70.175m(长×宽×高)；主变室249.1m×18.3m×25.975m。

地下厂房水平埋深240~540m，垂直埋深200~360m。厂址区岩体地应力场以构造应力为主，最大主应力为21.1~27.3MPa，自重应力与垂直应力之比小于50%。厂房纵轴线与主结构面有较大夹角，一般大于50°，与最大主应力方向夹角一般为26.7°~36.7°。围岩由微风化~新鲜中粗粒花岗岩组成，以II类为主，局部辉绿岩脉、裂隙密集带、小断层带及影响破碎带为IV，V类。

根据地质条件及施工设备、工期等因素，地下厂房共分9层进行开挖，主变室共分3层进行开挖(见图1)。支护方案以砂浆系统锚杆、随机锚杆和挂网喷微纤维混凝土为主，结合使用预应力锚索和锚筋桩。

为及时掌握地下厂房施工期围岩的变形和稳定情况，安全监测设计以围岩变形与支护应力监测为主，辅以一定的结合部监测。共布置了13个监测断面，变形监测仪器与支护应力监测仪器相对布置，利于相互印证。其中，变形监测仪器为四点式多点位移计，支护应力监测仪器包括锚杆应力计、锚索测力计和钢筋计。另外，在岩锚梁与围岩的结合部位布置了测缝计。

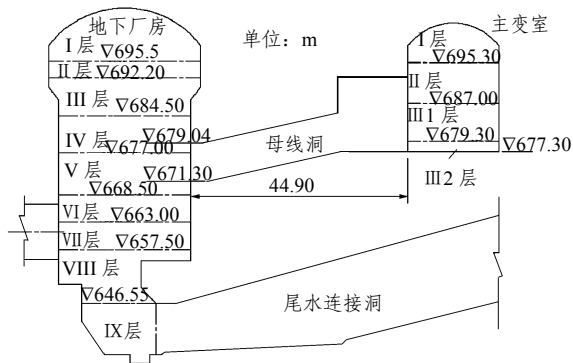


图1 主厂房与主变室分层开挖示意图

Fig.1 Schematic view of staged excavations of the powerhouse and transformer chamber

3 裂缝部位地质条件

裂缝段岩性为花岗岩，微新岩体，次块状~块状结构，围岩大多为II类，但小断层发育，包括 $f_{(1)}$ ， $f_9(\beta\mu)$ ， $f_{14}(\beta\mu)$ 和 $f_{18}(\beta\mu)$ 等，其中带 $\beta\mu$ 符号的为辉绿岩脉断层。断层产状见图2，宽度分别为3~5cm，30~45cm，0.15~6.0m和4.5m。

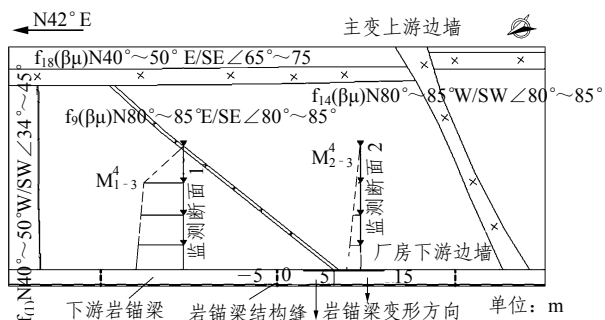


图2 688m高程地质平切面

Fig.2 Geology of the downstream wall at elevation 688 m

裂缝出现于地下厂房下游岩锚梁和围岩的结合部位(见图2)，跨越岩脉断层 $f_9(\beta\mu)$ ，长度约为15m，其中起始的0~5m裂缝段宽度较大，宽约2cm，而5~15m裂缝段宽度较小，宽约1cm，裂缝发展在“5m”两侧存在明显的差异，发展至15m处逐渐尖灭，钢丝垂直可探深度45~60cm。-5m处的岩锚梁结构缝有轻微错台现象(约2mm)，但梁体未出现裂缝。

4 裂缝成因分析

裂缝段辉绿岩脉断层 $f_9(\beta\mu)$ 上、下盘各布置有一个监测断面(见图2)。监测断面的仪器布置参见图3

和 4。仪器编号约定如下：M 代表多点位移计，上标 4 表示四点式多点位移计，4 个测点的深度为 24.5, 17.5, 11.0 和 5.0 m；R^r 代表锚杆应力计，PR 代表锚索测力计，R 代表钢筋计，J 代表测缝计；下标的第 1 位数表示剖面号，第 2 和 3 位数表示监测仪器编号。

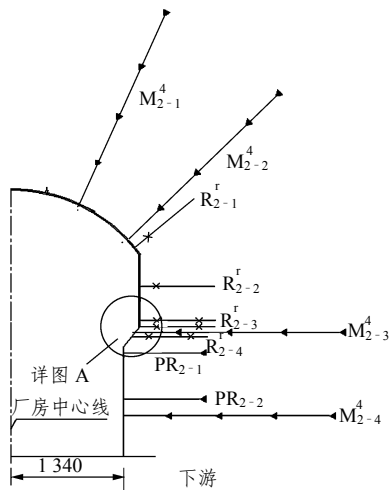


图 3 下游边墙监测仪器布置图(监测断面 2)

Fig.3 Layout of monitoring instruments in the downstream wall (monitoring section No.2)

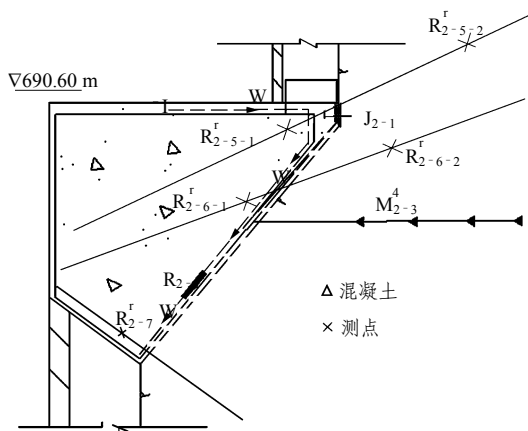


图 4 岩锚梁监测仪器详图 A(监测断面 2)

Fig.4 Detailed layout A of monitoring instruments in rock-bolt crane girder (monitoring section No.2)

4.1 变形监测成果分析

$f_9(\beta\mu)$ 断层上盘监测断面 2 的多点位移计监测成果示于图 5 和 6。M₂₋₃⁴ 和 M₂₋₄⁴ 的测点变形发展趋势相同，同一测孔的测点变形分异现象(位移差值)也不显著，说明该部位围岩不存在控制性结构面。2006 年 11 月 25 日~2007 年 3 月 22 日期间，M₂₋₃⁴，M₂₋₄⁴ 的孔口位移增量分别为 5.174 和 6.279 mm，即位移增量存在“高小低大”现象(见图 7)。 $f_9(\beta\mu)$ 断层

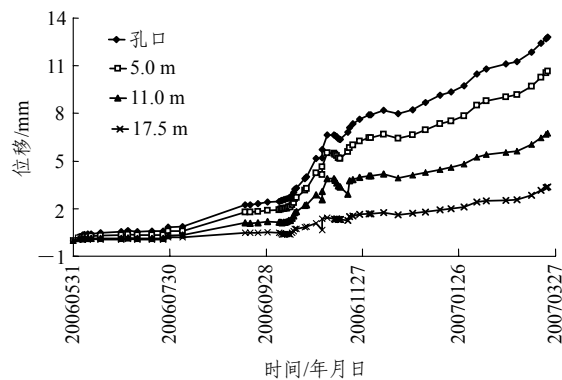


图 5 多点位移计 M₂₋₃⁴ 位移变化曲线

Fig.5 Deformation curves of multipoint extensometers M₂₋₃⁴

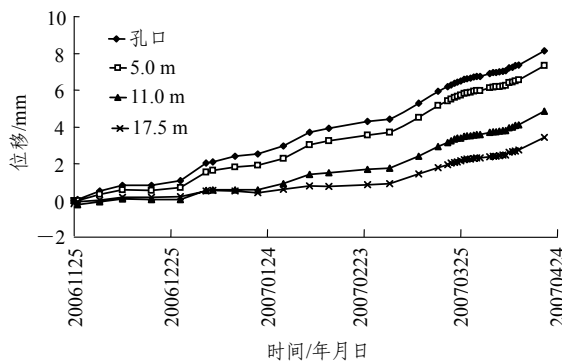


图 6 多点位移计 M₂₋₄⁴ 位移变化曲线

Fig.6 Deformation curves of multipoint extensometers M₂₋₄⁴

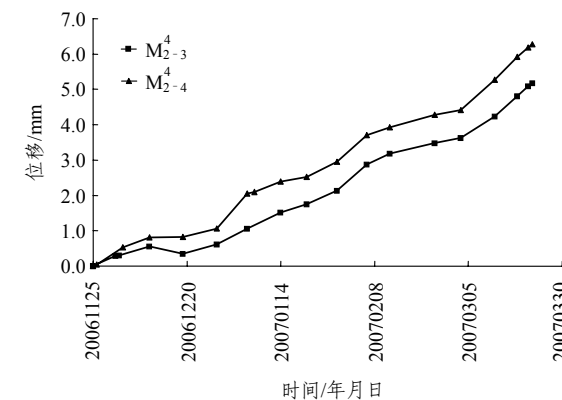


图 7 多点位移计孔口位移变化曲线

Fig.7 Deformation curves of multipoint extensometers

下盘的多点位移计变形却明显受断层控制，围岩的变形在断层两侧分异显著(见图 2, 8)。

图 9 比较了高程 688 m 时的 2 支多点位移计孔口测值与测缝计开度测值。M₁₋₃⁴ 的测值大于 M₂₋₃⁴ 的值，即 $f_9(\beta\mu)$ 断层上下盘围岩变形不同步。测缝计的测值变化趋势正好与多点位移计相反，J₁₋₁ 的测值小，J₂₋₁ 的测值大。J₂₋₁ 的开度发展存在两个快速阶段，第一次是 2006 年 10 月 29 日~11 月 25 日，

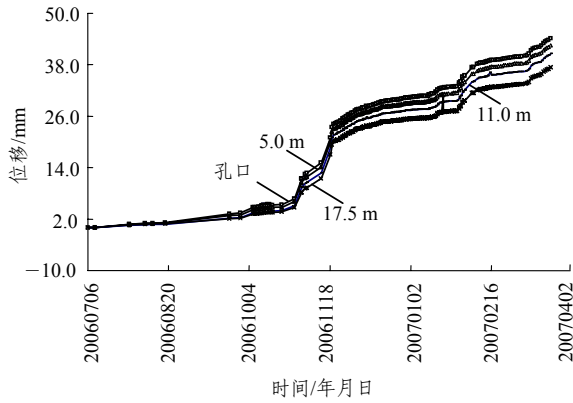


图8 多点位移计 M_{1-3}^4 位移变化曲线

Fig.8 Deformation curves of multipoint extensometers M_{1-3}^4

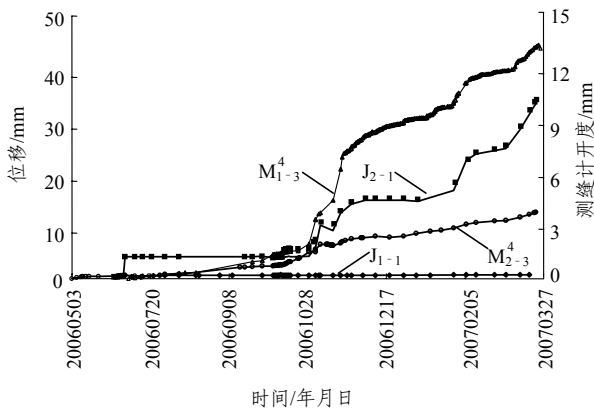


图9 688 m 高程处多点位移计孔口位移与测缝计变形关系
Fig.9 Relationship between portal deformation of multipoint extensometers and joint opening at elevation 688 m

其测值由 1.203 mm 增加到 4.217 mm；第 2 次是 2007 年 1 月 6 日~2007 年 3 月 22 日，其测值由 4.373 mm 增加到 10.006 mm。 J_{2-1} 的测值发展与 M_{1-3} 完全同步。

4.2 支护应力监测成果分析

考虑围岩与岩锚梁的相互作用问题，即支护应力的变化情况。图 10 和 11 给出了监测断面 2 岩锚梁部位锚索测力计、锚杆应力计、钢筋计和测缝计(见图 4)的监测值时间曲线。其发展过程分析如下：

(1) 岩锚梁下部的锚杆应力(R_{2-7}^r)和锚索吨位(PR_{2-1} 和 PR_{2-2})发展最早，量级最大，印证了前述的位移增量“高小低大”现象。 R_{2-7}^r 的应力自 2006 年 10 月 17 日开始快速发展，10 月 29 日达到 252.51 MPa(平均 25.1 MPa/d)，11 月 2 日达到 420.04 MPa(平均 53.8 MPa/d)。此后应力窄幅波动，推断锚杆已经达到极限抗拉强度。锚索测力计 PR_{2-1} 的吨位也由 2006 年 10 月 17 日的 2 100 kN 增加至峰值

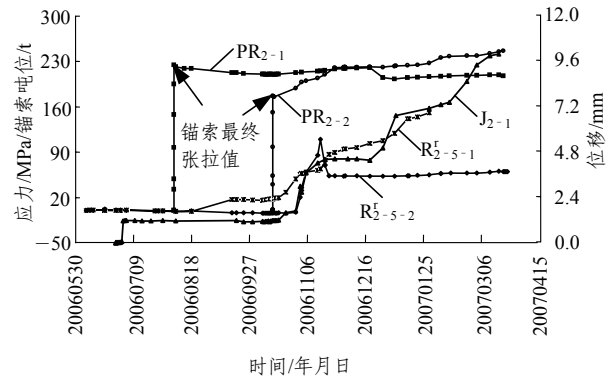


图10 下游岩锚梁应力与测缝计变形关系曲线(I)

Fig.10 Relationship between stress and joint opening in the downstream rock-bolt crane girder(I)

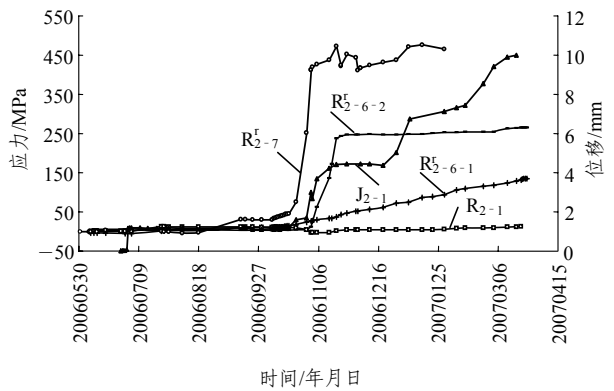


图11 下游岩锚梁应力与测缝计变形关系曲线(II)

Fig.11 Relationship between stress and joint opening in the downstream rock-bolt crane girder(II)

2 206 kN(12 月 19 日)，此后下降至 2 050 kN，并维持窄幅波动，推测已经达到极限抗拉能力。锚索测力计 PR_{2-2} 在 2006 年 10 月 14 日至 2007 年 3 月 21 日，测力计由 1 750 kN 持续增长至 2 466 kN，严重超量程运行。

(2) 下部锚杆应力(R_{2-7}^r)在 2006 年 10 月 29 日接近极限抗拉强度后，上部的锚杆才开始发挥作用。 R_{2-5-2} 自 10 月 29 日到 11 月 15 日，应力自 -2.66 MPa 增加至 109.78 MPa，然后跌落至 53.36 MPa(11 月 21 日)，并维持基本不变； R_{2-6-2}^r 自 10 月 29 日~11 月 18 日，应力自 3.94 MPa 增加到 237.50 MPa，并维持基本不变。考虑上向锚杆的注浆质量难以保障，上述现象说明 2 根锚杆此时已经达到极限抗拉强度。

(3) 测缝计 J_{2-1} 的开度变化也出现在 2006 年 10 月 29 日(第 V 层开挖)，初期与锚杆应力(锚索吨位)的增长同步，后期锚杆(锚索)达到极限荷载后裂缝

扩展也没有终止。由此可见, 由于变形不协调现象过于显著, 锚杆不足以阻止裂缝的扩展。

(4) 岩锚梁中的钢筋计(R_{2-1})和锚杆应力计(R_{2-5-1} 和 R_{2-6-1})的应力值一直在持续稳定增长, 没有出现趋稳或跌落现象, 说明岩锚梁的整体质量良好。

5 结 论

岩锚梁是地下厂房的关键结构。基于厂房开挖揭示的地质资料、监测成果和施工过程, 对岩锚梁裂缝产生的原因做了较为详细的分析。初步结论如下:

(1) 基于监测成果, 推断裂缝形成的时间在 2006 年 10 月底至 11 月初, 即地下厂房进行第 V 层开挖施工期间。

(2) 裂缝段围岩的差异变形是裂缝产生的主要原因。

(3) 导致围岩差异变形的地质原因是存在岩脉断层, 施工原因是支护措施不能有效地节制围岩变形。

地下厂房进入第 IV 层开挖后, 侧墙的水平变形将逐步进入快速发展阶段, 考虑岩体的非连续性, 加强施工期地质工作, 及时预测侧墙可能出现的差异变形现象, 并采取有力的支护措施对确保岩锚梁安全十分重要。

参考文献(References):

[1] 谷兆祺, 彭守拙, 李仲奎. 地下洞室工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994: 87 - 89.(GU Zhaoqi, PENG Shouzhuo, LI Zhongkui. Underground cavity project[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994: 87 - 89.(in Chinese))

[2] 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): 40 - 41, 54.(WU Xinbang. Some problematic discussion in the design and structure of rock-bolt crane girder[J]. Water Power, 1998, (5): 40 - 41, 54.(in Chinese))

[3] 丁佩章. 对岩锚梁设计的讨论[J]. 红水河, 1994, 13(1): 20 - 24.(DING Peizhang. The discussion of rock-bolt crane girder design[J]. Hongshui River, 1994, 13(1): 20 - 24.(in Chinese))

[4] 曹普发, 萧传豹. 东风水电站地下厂房岩锚吊车梁的设计及其承载试验[J]. 水力发电, 1994, (12): 19 - 22.(CAO Pufa, XIAO Chuanbao. The design and bearing trial of rock-bolt crane girder in the

underground powerhouse of the Dongfeng hydroelectric station[J]. Water Power, 1994, (12): 19 - 22.(in Chinese))

[5] 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, 29(4): 11 - 14.(LIU Xiuzhen. The method to the anchorage of rock-bolt crane girder[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1998, 29(4): 11 - 14.(in Chinese))

[6] 喻伟明. 江垭电站地下厂房岩锚吊车梁的设计[J]. 湖南水利水电, 1998, (3): 3 - 5.(YU Weiming. The design of rock-bolt crane girder of underground powerhouse in the Jiangya electric power station[J]. Hunan Hydro and Power, 1998, (3): 3 - 5.(in Chinese))

[7] 史济民, 掌于昶, 高金花, 等. 江口水电站岩锚吊车梁设计[J]. 东北水利水电, 2002, 20(1): 4 - 5, 15.(SHI Jimin, ZHANG Yuchang, GAO Jinhua, et al. Design of rock anchor rod crane beam in Jiangkou hydropower station[J]. Water Resources and Hydropower of Northeast China, 2002, 20(1): 4 - 5, 15.(in Chinese))

[8] 赵震英, 曾亚武. 岩锚梁承载机制模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 150 - 153.(ZHAO Zhenying, ZENG Yawu. The bearing mechanism model experiment research of rock-bolt crane girder[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2): 150 - 153.(in Chinese))

[9] 郭云强. 常用方法设计岩锚梁探讨[J]. 中南水力发电, 2002, (2): 18 - 21.(GUO Yunqiang. The commonly used method discuss of rock-bolt crane girder[J]. Central South Water Power, 2002, (2): 18 - 21.(in Chinese))

[10] 陈 明, 卢文波, 易长平, 等. 大型地下厂房岩锚梁爆破安全控制标准研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 499 - 504.(CHEN Ming, LU Wenbo, YI Changping, et al. Reseach on safety standard for rock anchor beam under blasting vibration in large underground powerhouse[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 499 - 504.(in Chinese))

[11] 张 黔, 李宝成, 李建英. 江口水电站地下厂房岩锚梁台座开挖施工技术[J]. 四川水力发电, 2003, 22(1): 36 - 38.(ZHANG Qian, LI Baocheng, LI Jianying. The excavation construction technology of rock-bolt crane girder in the underground powerhouse of Jiangkou electric power station[J]. Sichuan Water Power, 2003, 22(1): 36 - 38.(in Chinese))

[12] 周建平, 张孝松, 戴谦训. 大朝山水电站地下厂房岩锚梁施工技术[J]. 水电站设计, 2000, 16(4): 18 - 22.(ZHOU Jianping, ZHANG Xiaosong, DAI Qianxun. Rock anchor beam construction technology of Dachaoshan hydroelectric plant[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2000, 16(4): 18 - 22.(in Chinese))