

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.06.013

Q系统在那苏瓦水电站围岩分类及支护中的应用

何燕云

(上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434)

摘要: 海外水电项目地下隧洞及洞室围岩支护设计多采用Q系统,其围岩分类方法及支护参数不同于国内勘察规范、水工隧洞设计规范和锚喷支护设计规范所述。为应对海外工程项目技术需求,在对最新版的Q系统支护图进行了详细的说明的基础上,对Q值与围岩分类的对应关系进行了探讨,对应用Q系统进行围岩支护参数确定的过程进行了详细的说明。并成功应用于尼泊尔那苏瓦水电站地下洞室围岩分类和支护设计,设计成果获得国外咨询方的认可,可为海外项目类似工程提供经验参考。

关键词: Q系统;地下洞室;围岩分类;围岩支护

中图分类号: TV732+.3;U452.1+2 文献标识码: A 文章编号: 1672-1144(2018)06-0067-05

Application of Q-system in Rock Mass Classification and Surrounding Rock Support in Rasuwagadhi Hydropower Project

HE Yanyun

(Shanghai Investigation, Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200434, China)

Abstract: Q-system has been widely used for classification of the rock mass around an underground opening and support design in overseas hydropower projects. The rock mass classification and support design of Q-system are different from those methods described in the Chinese Code for Investigation of Geotechnical Engineering, Specification for design of hydraulic tunnel and Specification for bolt-shotcrete support. In order to meet the technical requirements of overseas projects, on the basis of explaining the latest Q-system support diagram, the corresponding relationship between Q-value and surrounding rock classification is discussed, and the process of determining rock support parameters by Q-system is explained in detail. It has been successfully applied to the rock mass classification and support design of the underground opening in Nepal Rasuwagadhi Hydropower Project. The design results have been approved by foreign consultants and can provide reference for similar overseas projects.

Keywords: Q-system; underground openings; rock mass classification; surrounding rock support

尼泊尔那苏瓦卡里水电站工程由首部枢纽、进水口、沉砂池、冲砂系统、引水隧洞、调压井、电站厂房、尾水渠以及配套交通设施组成,除首部枢纽、隧洞进水口以及交通配套设施外,其余均为地下工程。工程区位于喜马拉雅山脉的峡谷地带,属高山峡谷地貌。地下洞室、引水和尾水隧洞全长约5 000 m,隧洞围岩为片麻岩、石英岩以及片岩。参照中国《水力发电工程地质勘察规范》^[1](GB 50287—2016),引水系统洞室围岩主要以Ⅱ、Ⅲ类为主,部分为Ⅳ或Ⅴ类。海外水电项目中Q系统多被指定为围岩分类

支护标准,美国EM1110-2-2901岩石隧洞和竖井技术标准^[2]中,Q系统作为支护设计的方法之一。地下洞室围岩分类采用Q系统。根据Q值确定的围岩类别从异常好到异常差共分为9类,工程实践的围岩分类和相应支护方案一般将围岩划分为五个等级,如何划分与Q值对应的五个围岩等级,是设计中遇到的一个难题。本文基于那苏瓦卡里水电站工程项目,对Q系统应用于围岩分类和支护的理论和工程应用问题进行了探讨,研究成果可为类似项目提供参考。

1 Q 围岩分类系统

Q 系统是挪威岩土工程研究所(NGI)在 1971 年至 1974 年^[3-4]提出的岩体分类及支护体系理论。自 1974 年以来, Q 法围岩分类及支护图表经过了两次修订^[5-6],最近发布于其官网的手册更新于 2015 年。不同于国内岩体常用的工程分类方法^[7], Q 系统将岩体由极好到极差划分为九个等级。

Q 值给出了节理地下洞室围岩稳定性的描述。高 Q 值表示良好的稳定性,低的 Q 值意味着稳定性差。Q 指标的数值在对数坐标上从 0.001 到最大值 1 000。基于 6 个参数, Q 值计算式表示如下:

$$Q = \frac{R_{\text{rd}}}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{S_{\text{srf}}} \quad (1)$$

其中: R_{rd} = 岩石质量指标; J_n = 节理组数; J_r = 节

理粗糙系数; J_a = 节理蚀变系数; J_w = 节理水折减系数; S_{srf} = 应力折减系数。

除了岩体质量(Q 值)外,还有两个因素对地下洞室支护设计起决定性作用:一是安全要求,另一个是洞室尺寸,即地下洞室的跨度或高度。一般来说,随着洞室跨度的增大和墙壁的增高,对支护的要求也将增加。安全要求则取决于洞室的用途,比如公路隧洞或地下厂房比水工隧洞或临时巷道有更高的安全要求。为表达安全要求,引入了开挖支护比 r_{es} 。

按照洞室建造目的不同,将开挖支护比 r_{es} 分为如表 1 所示 A—G 7 个不同的等级。低 r_{es} 值表明需要高安全性,较高的 r_{es} 值表征可以接受较低的安全水平。每个国家的要求和施工传统可能会导致不同于表 1 给出的 r_{es} 值。

表 1 开挖支护比建议值

开挖等级	开挖类型	r_{es}
A	临时采矿巷道	3.0~5.0
B	竖井 * :① 圆形断面 ② 矩形/方形断面 * 取决于目的,可以低于给定值。	2.5 2.0
C	永久采矿巷道、水电输水隧洞(不包括高压管道)、供水隧洞、导洞、大型开挖的导洞	1.6
D	次要道路和铁路隧洞、调压室、交通洞、污水洞等	1.3
E	地下厂房、储藏室、水处理厂、主要道路和铁路隧道、人防洞、进出口段、交叉部位等	1.0
F	地下核电站、火车站、体育与公共设施等	0.8
G	非常重要的洞室和地下空间,要求使用期限约 100 年或者无需维护	0.5

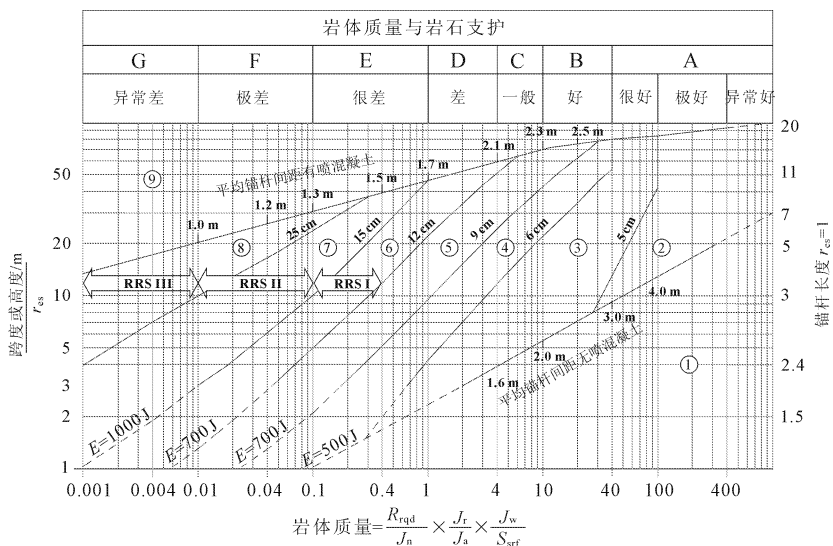
当 $Q \leq 0.1$ 时,对于 B、C 和 D 等级的洞室开挖,建议 r_{es} 值取 1.0。因为如此低的 Q 值,洞室可能有塌陷的风险,面临的稳定性问题可能比较严重。根据 Q 值确定的岩体类别及相应支护参数如图 1 所示。

图 1 所示支护建议图适用于一般情况,并没有对支护类型进行明确的区分,而是基于连续的变化。支护图给出了相应于支护形式所采用的锚杆中心对中心间距和喷混凝土厚度。标注了钢纤维喷混凝土的能量吸收,以及锚杆长度和钢支撑加固的喷混凝土设计。对于特殊情况,可适当增加相应的支护形式和支护结构数量。钢纤维的参量设计及其力学性能国内亦有诸多研究^[8-9],可与 Q 系统能量吸收参照。

在支护图中可以看到指示喷混凝土厚度的斜线,喷混凝土的厚度随着 Q 值的减小和洞室尺度的增大而增加。线与线之间的位置,可以进行插值确定。如果有变形发生,比如有高应力引起,加筋混凝土应当应用于所有的支护类别。

有时可以选择支护的替代方案。支护图中高 Q 值区喷混凝土可选择使用,锚杆的间距则取决于是否用喷混凝土,因此支护图被划分为两个区域。定义为“有钢纤维喷混凝土的锚杆间距”区指的是锚杆和喷混凝土的组合支护;定义为“无喷混凝土的锚杆间距”区是没有喷混凝土时锚杆的间距。建议的锚杆间距是一个必要的锚杆数量的表达方式,而不是精确的锚杆间距建议值。每个锚杆的位置和方向应该基于对节理产状和几何信息的评估,这一点在锚杆间距较大时尤为重要。在没有喷混凝土的区域,系统锚杆是不相关的,应该对每一根锚杆的位置进行评估。

锚杆的长度取决于地下洞室的跨度和边墙的高度,在一定程度上取决于岩体质量。推荐的锚杆长度在支护图的右侧给出,应用前需要进行评估。在不利节理条件下,锚杆长度应比推荐值更长,而当 Q 值减小时锚杆长度也需加长。



支护类别

- ① 不需支护或点锚支护
- ② 点锚支护, SB
- ③ 系统锚杆, 纤维加强喷混凝土, 5~6 cm, B+Sfr
- ④ 纤维加强喷混凝土和锚杆, 6~9 cm, Sfr (E500)+B
- ⑤ 纤维加强喷混凝土和锚杆, 9~12 cm, Sfr (E700)+B
- ⑥ 纤维加强喷混凝土和锚杆, 2~15cm+钢肋加固喷混凝土和锚杆, Sfr (E700)+RRS I+B
- ⑦ 纤维加强喷混凝土>15 cm+钢肋加固喷混凝土和锚杆, Sfr (E1000)+RRS II+B
- ⑧ 浇筑混凝土衬砌CCA 或 Sfr (E1000)+RRS III+B
- ⑨ 特殊评估




锚杆间距主要基于直径Φ20 mm锚杆

E=喷混凝土的能量吸收

r_{es}=开挖支护比

虚线区域无经验数据

RR-与Q值相关的间距

-  Si30/6Φ16~20 (跨度10 m)
D40/6+2Φ16~20 (跨度20 m)
-  Si35/6Φ16~20 (跨度5 m)
D45/6+2Φ16~20 (跨度10 m)
D55/6+4Φ20 (跨度20 m)
-  D40/6+4Φ16~20 (跨度5 m)
D55/6+4Φ20 (跨度10 m)
- 特殊评估(跨度20 m)

Si30/6 = 单层六根钢筋, 30 cm 厚喷混凝土

D = 双层钢筋

Φ16 = 钢筋直径 16 mm

c/c = RSS 间距, 中心-中心

图 1 基于 Q 值和等效洞径的永久支护建议图

支护图主要适用于地下空间或洞室拱顶和起拱线位置,对于高 Q 值区和中等 Q 值区(Q > 0.1),边墙支护水平通常会降低。当 Q 支护图用于边墙支护时,边墙的高度替代跨度, Q 值需要调整如表 2 所示。

表 2 应用于边墙支护设计的 Q 值调整

在质量好的岩体中	Q > 10	Q 值乘以系数 5
在中等质量的岩体中	0.1 < Q < 10	Q 值乘以系数 2.5,在 岩体应力的情况下,采 用实际的 Q 值
在质量差的岩体中	Q < 0.1	用实际的 Q 值

调整后的 Q 值用于图 1 来确定合适的边墙支护参数。加筋喷混的厚度、间距和钢筋的数量和直径都必须根据地下洞室的尺寸和岩体质量而变化。

2 Q 系统的工程应用

2.1 Q 值划分围岩分类的分歧

那苏瓦卡里水电站外方的两份不同的合同文件中(Volume 1, Price Schedule 5, Table 1 和 Volume 5, Part II. Table 8.8) Q 值与五类围岩的对应关系出现两种不同表述,如表 3 所示,两种不同的围岩类别与 Q 值对应表述给应用带来了混乱,表 4 和表 5 分别给出外方根据 Q 系统支护图给出的建议支护参数以及初步设计的支护参数,可以看出,表 4 较表 5 的划分方式节省了支护的工程量,比如 Q 值 5 在表 4 中划为 2 类围岩,在表 5 中划为 3 类围岩。根据初步设计的支护参数,3 类围岩比 2 类围岩喷混凝土加厚 20 mm,锚杆间距减小 0.3 m。假设 Q 值是 3,则表 4 将围岩类别定为 2 类围岩,表 5 将围岩类别

定为 4 类围岩, 支护参数的差异会更大。

从技术角度讲两种支护都在 Q 值对应的支护参数范围, 似乎没有冲突, 而现场对围岩 Q 值打分后, 依据表 4 划定的围岩类别与中方地质工程师依照国内水工隧洞设计规范^[10]和锚喷支护设计规范^[11], 结合经验判定的围岩类别有较大差异, 一方面源于分类方法考虑因素及量化指标权重的不同, 一方面中方地质工程师缺乏 Q 系统应用经验。

表 4 Q 值围岩等级划分及相应支护建议 1

等级	Q 值	Q 系统支护	初步设计支护	
			Volume 1, Price Schedule 5, Table 1	Volume 5, Part II, Table 8.8
I	100.00 ~ 10.00	随机锚杆, $L = 2.7$ m	50 mm 喷混凝土, 随机锚杆, $L = 2$ m ~ 3 m	
II	10.00 ~ 1.00	50 mm 喷混凝土, 注浆岩石锚杆 $L = 2.7$ m @ 2.5 m c/c	100 mm 喷混凝土, 注浆岩石锚杆, $L = 3$ m @ 2.5 m c/c	
III	1.00 ~ 0.40	50 mm ~ 90 mm 喷混凝土, 注浆岩石锚杆, $L = 2.7$ m @ 2.5 m c/c	120 mm 喷混凝土, 注浆岩石锚杆, $L = 3$ m @ 2.5 m × 1.7 m	
IV	0.40 ~ 0.10	90 mm ~ 120 mm 喷混凝土, 注浆岩石锚杆, $L = 2.7$ m @ 2.0 m c/c	120 mm 喷混凝土, 注浆岩石锚杆 s, $L = 4$ m @ 1.5 m × 1.3 m, (如有需要超前支护, 施加钢支撑)	
V	0.10 ~ 0.01	120 mm ~ 200 mm 喷混凝土, 注浆岩石锚杆, $L = 2.7$ m @ 1.5 m c/c	150 mm 喷混凝土, 注浆岩石锚杆, $L = 4.5$ m @ 1.5 m × 1.0 m (如有需要超前支护, 施加钢支撑)	

表 5 Q 值围岩等级划分及相应支护建议 2

等级	Q 值	Q 系统支护	初步设计支护	
			Volume 1, Price Schedule 5, Table 1	Volume 5, Part II, Table 8.8
I	> 40	随机锚杆, $L = 2.7$ m	50 mm 喷混凝土, 随机锚杆, $L = 2$ m ~ 3 m	
II	40 ~ 10	随机锚杆, $L = 2.7$ m	100 mm 喷混凝土, 注浆岩石锚杆, $L = 3$ m @ 2.5 m c/c	
III	10 ~ 4	40 mm 喷混凝土, 注浆岩石锚杆, $L = 2.7$ m @ 2.2 m c/c	120 mm 喷混凝土, 注浆岩石锚杆, $L = 3$ m @ 2.5 m × 1.7 m	
IV	4 ~ 1	40 mm ~ 50 mm 喷混凝土, 注浆岩石锚杆, $L = 2.7$ m @ 1.9 m c/c	120 mm 喷混凝土, 注浆岩石锚杆 s, $L = 4$ m @ 1.5 m × 1.3 m, (如有需要超前支护, 施加钢支撑)	
V	< 1	50 mm ~ 250 mm 喷混凝土, 注浆岩石锚杆, $L = 2.7$ m @ 1.9 m c/c to < 0.9 m c/c	150 mm 喷混凝土, 注浆岩石锚杆, $L = 4.5$ m @ 1.5 m × 1.0 m, (如有需要超前支护, 施加钢支撑)	

中方设计人员亦参考了其它涉外项目的计算报告, 其中参照马来西亚某水电站的 Q 系统围岩分类如表 6 所示, 参考国内文献康小兵等^[12]表 7 所示的基于 Q 值的围岩分类, 王广德等^[13]引用 Barton 研究成果 Q 值与 R_m 之间的关系^[14]为 $R_m \approx 20.7 \lg Q + 44$, 据此得出 R_m 与 Q 系统分类围岩类别对应关系, 如表 8 所示, 1993 年, 在对地应力影响系数 SRF 修正后, Barton 提出了新的 R_m 与 Q 值的关系 $R_m \approx 15 \lg Q + 50$, 据此与 R_m 分类相对应, 岩体质量分为如表 9 所示五类。

综上所述可以看出基于 Q 值的五级围岩分类各不相同, 并没有统一的标准。

表 6 马来西亚某水电项目 Q 系统围岩分类

Q 值	100 ~ 50	50 ~ 10	10 ~ 1	2 ~ 0.2	0.2 ~ 0.02
围岩类别	I	II	III	IV	V

表 3 五个等级的围岩对应不同的 Q 值范围

围岩等级 (类别)	Q 值	
	Volume 1, Price Schedule 5, Table 1	Volume 5, Part II, Table 8.8
I	100.00 ~ 10.00	> 40
II	10.00 ~ 1.00	40 ~ 10
III	1.00 ~ 0.40	10 ~ 4
IV	0.40 ~ 0.10	4 ~ 1
V	0.10 ~ 0.01	< 1

表 7 康小兵等 Q 系统围岩分类

Q 值	> 40	40 ~ 10	10 ~ 1	1 ~ 0.1	< 0.1
围岩类别	I	II	III	IV	V

表 8 Q 系统修正前 Q 值与 R_m 岩体质量类别对应关系

Q 值	> 40	40 ~ 10	10 ~ 4	4 ~ 1	1 ~ 0.001
围岩类别	I	II	III	IV	V

表 9 Q 系统修正后 Q 值与 R_m 岩体质量类别对应关系

Q 值	> 100	100 ~ 4	4 ~ 0.1	0.1 ~ 0.01	0.01 ~ 0.001
围岩类别	I	II	III	IV	V

可以看出表 5 与表 8 对应关系相似。最终, 中方现场地质工程师与咨询工程师根据现场实际情况反复研究, 确定采用表 5 所示的划分方式是合理的: 一方面符合 Q 系统围岩定性判定的岩体质量说明,

另一方面现场测定的 Q 值与围岩的对应关系符合国内地质工程师经验判定的围岩类别。

2.2 Q 系统在那苏瓦水电站的应用

那苏瓦水电站引水隧洞设计为马蹄形断面,开挖洞径约为 7.3 m,引水隧洞开挖支护比(r_{es})取值 1.6,等效洞径近似为 4.6。

根据 Q 系统支护图,自左侧等效洞径值 4.6 处做水平直线与右侧相交于大约 2.5 数值($r_{es} = 1$ 的锚杆长度)。可知 I 类、II 类围岩无需系统支护,可采用随机锚杆加固不稳定块体,III 类—V 类围岩采用锚喷系统支护,锚杆的长度对应图右侧数值约为 2.5 m,同时根据 Barton 关于锚杆长度的经验公式^[15]计算可得锚杆设计长度约为 2.7 m。III 类围岩锚杆间距可取 2.1 m,IV 类围岩锚杆间距可取 1.7 m,V 类围岩锚杆间距可取 1.3 m,锚杆间距取值都取范围值的下限值偏保守设计。

Barton 锚杆长度经验公式

$$L = 2 + \frac{0.15B}{r_{es}} \quad (2)$$

表 10 那苏瓦引水隧洞支护设计参数

围岩类别	锚杆	喷混凝土	钢拱架	超前支护情况
I	随机锚杆	50 mm	—	—
II	Φ25 mm,长 3 m 间距@2.5 m×2.5 m	80 mm 挂网喷混凝土 100 mm×100 mm×4 mm 或钢纤维混凝土	—	—
III	Φ25 mm,长 3 m 间距@2.0 m×2.0 m	100 mm 挂网喷混凝土 100 mm×100 mm×4 mm 或钢纤维混凝土	—	—
IV	Φ25 mm,长 4 m 间距@1.6 m×1.6 m	100 mm 挂网喷混凝土 100 mm×100 mm×4 mm 或钢纤维混凝土	视情况需要设置 150 mm 钢拱架间距 1.2 m	视情况需要超前注浆锚杆加固,间距@0.3 m~0.5 m
V	Φ25 mm,长 4.5 m 间距@1.3 m×1.3 m	150 mm 挂网喷混凝土 100 mm×100 mm×4 mm 或钢纤维混凝土	150 mm 钢拱架间距 0.9 m	视情况需要超前注浆锚杆加固,间距@0.3 m~0.5 m
断层带	Φ25 mm,长 4.5 m 间距@1.0 m×1.0 m	250 mm 喷混凝土挂网两层 100 mm×100 mm×4 mm 或钢纤维混凝土	150 mm 钢拱架间距 0.6 m	超前管棚支护@0.5 m

3 结 论

(1) 海外水电项目地下隧洞及洞室围岩分类多采用 Q 系统分类标准,国内有自己成熟的围岩分类以及锚喷支护设计规范,而 Q 系统与国内规范对围岩的分类判据有不同的考虑因素和判定标准,不存在直接的对应关系,因此需加强 Q 系统的学习和实践,以应对海外工程项目技术需求。

(2) 尽管 Q 系统支护图表中,对不同质量围岩支护参数的考虑是有连续性的,但考虑实际应用的简化,不可能对所有的 Q 值设计针对性的支护参数,通常的做法是将围岩划分为五个支护等级,五个等级如何划分并不存在统一的标准,本文的划分方

式中: B 为隧洞洞径; r_{es} 为开挖支护比。

喷混凝土厚度 III 类围岩可取 5 cm,IV 类围岩可取 6 cm,V 类围岩可取 9 cm~12 cm。

根据 Q 系统支护图,I 类—IV 类围岩不需要钢筋或钢拱架,V 类围岩需要钢筋或钢拱架,因 V 类围岩覆盖的 Q 值范围较大,如果依据 $Q < 0.1$ 进行支护设计,可能会造成过度支护,因此 V 类围岩设计以 $Q = 0.1$ 为基准,如果实际开挖 Q 值出现低于 0.1 的情况则重新制定相应的支护方案, $Q < 0.1$ 时,围岩在锚喷支护的基础上再增加钢筋或钢拱架加强。钢拱架的间距可采用 1.3 m。

其中 I 类、II 类、III 类围岩锚喷支护即为永久支护,IV 类、V 类围岩还设计了混凝土衬砌作为永久支护。

根据 Q 系统支护图给出的支护建议如上所述,在具体拟定支护参数过程中参考了初步设计、同时咨询在审核阶段出于保守设计的考虑又在此基础上增强了加固措施,最终引水隧洞支护参数如表 10 所示。

式可作为一种参考。

(3) 实践中, Q 系统支护图表是基于经验类比的拟定支护参数建议值,最终应用于实际工程中的参数可以做适当的调整,调整通常倾向于保守的考虑。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.水力发电工程地质勘察规范:GB 50287—2016[S].北京:中国计划出版社,2016:113-119.
- [2] Department of the Army U. S. Army Corps of Engineers. EM1110-2-2901 Tunnel and Shaft in Rock[S]. Washington DC 1997:7-5~7-9.

(下转第 93 页)

6 结 论

(1) 坝基廊道埋藏于坝体与基础内部,地震作用下动力反应较小,应力分布规律和静力工况下基本一致。高土石坝由于承受水头高,坝体变形大,廊道应力状况更为复杂。

(2) 长河坝工程动静叠加后廊道横河向最大拉应力为 28.6 MPa,较静力条件下提高了 8%,在廊道上游面两端,下游面河床中部有横河向较大易开裂区域。创造性地将廊道深入两岸基岩 1 m,廊道与岸坡平硐的接缝变形相对已建类似工程得到有效减小,左岸接缝最大张开 4.0 cm,较静力工况增大 11.4%。地震后,高塑性黏土最大沉降变形值为 26 cm。

(3) 地震条件下廊道的应力状况仍由静力工况控制,可借鉴深厚覆盖层地基上的马尼克 3 号坝经验,设置向上游拱起的廊道的轴线型式,使上游面预拉,下游面预压,从而降低横河向拉应力;由于两岸基岩面处约束较强,可将该部位廊道用钢板进行包裹。廊道与岸坡平硐接缝,建议采用伸缩节为双“U”形结构的止水并预留二期混凝土。

(4) 本文计算中将混凝土视为线弹性进行分析,计算所得基岩面处廊道上游侧底部的最大拉应力为 28.6 MPa,有相当区域已远远超过混凝土的抗拉强度,因此下一步拟采用非线性模型模拟混凝土开裂破坏行为,以更加真实地反映深厚覆盖层高土石坝坝基廊道的实际工作性态。

参考文献:

[1] 刘杰. 混凝土防渗墙渗流控制几个问题实例分析[J]. 大坝观测与土工测试, 1992, 16(5): 39-43.
 [2] 杨德玮, 张土辰, 王昭升. 土石坝震损程度快速评估方法研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(1): 107-111, 154.

[3] 王平, 李浩伟. 碓磬水电站砾石土心墙堆石坝基础处理设计[C]//堆石坝国际研讨会. 现代堆石坝技术进展: 2009—第一届堆石坝国际研讨会论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 226-232.
 [4] 祁月, 崔会东, 熊春发. 碓磬坝基廊道 0+168.12m 结构缝变形及渗漏分析与评价[C]//现代堆石坝技术进展: 2009—第一届堆石坝国际研讨会论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 638-642.
 [5] 熊堃, 何蕴龙, 伍小玉, 等. 长河坝坝基廊道应力变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11): 1767-1774.
 [6] 周小溪, 何蕴龙, 赵容. 深厚覆盖层上堆石坝坝基廊道抗震安全性评价[J]. 武汉大学学报(工学版), 2012, 45(4): 447-453.
 [7] 姚福海. 深厚覆盖层上土石坝基础廊道的结构形式探讨[J]. 水力发电, 2010, 36(6): 54-55, 59.
 [8] 吴秋军, 傅少君. 子模型方法研究瀑布沟土石坝防渗结构[J]. 武汉大学学报(工学版), 2006, 39(3): 55-59.
 [9] 刘晓青, 李同春, 闫园园, 等. 地震作用下混凝土坝孔口应力分析的动力子模型法[J]. 水力发电学报, 2009, 28(5): 88-91.
 [10] 曹学兴. 深厚覆盖层地基高土石质心墙堆石坝抗震安全性研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
 [11] 曹学兴, 何蕴龙, 熊堃, 等. 考虑围压效应的高土石坝动力响应分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2014, 47(2): 116-123.
 [12] Cao Xuexing, He Yunlong, Xiong Kun. Confining pressure effect on dynamic response of high rockfill dam[J]. Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China, 2010, 4(1): 116-126.
 [13] 房恩泽. 堆石料的模量阻尼试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(1): 173-176.
 [14] 卢廷浩, 鲍伏波. 接触面薄层单元耦合本构模型[J]. 水利学报, 2000, 31(2): 71-75.
 [15] 万彪, 何蕴龙, 熊堃. 有厚度节理单元开发与应用[J]. 水电能源科学, 2008, 26(4): 63-66.

(上接第 71 页)

[3] NGI Using the Q - system Rock mass classification and support design[EB/OL]. Norway 2015 www.ngi.no.
 [4] Lfset F. Engineering Geology - Practical use of the Q - method. NGI report 592046 - 4. 1997.
 [5] Bieniawski Z T. Engineering Rock Mass Classifications[M]. New York: John Wiley, 1989.
 [6] Hoek E. Practical Rock Engineering[M]. Canada: North Vancouver, B. C. 2006.
 [7] 刘佑荣, 唐辉明. 岩体力学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 22-31.
 [8] 任崇财. 钢纤维喷射混凝土力学性能研究及应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(6): 189-193.
 [9] 杨芳芳, 庄一舟, 张彬彬. 基于欧洲规范的钢纤维陶粒混凝土力学性能试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(6): 57-63.

[10] 水工隧洞设计规范: DL/T 5195—2004[S]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 40-43.
 [11] 岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范: GB 50086—2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015: 46-53.
 [12] 康小兵, 许模, 陈旭. 岩体质量 Q 系统分类法及其应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(4): 91-95.
 [13] 王广德, 石豫川, 刘汉超, 等. 水利水电地下洞室围岩分类[J]. 水力发电学报, 2006, 25(2): 125-129.
 [14] Barton N. Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2002, 39(2): 185-216.
 [15] Barton N R, Lien R, Lunde J. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support[M]. Rock Mech, 1974, 6(4): 189-239.