

水布垭面板堆石坝基础灌浆试验

李吉林

(山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250100)

摘要: 为了提高水布垭面板堆石坝基础防渗帷幕的抗渗能力和耐久性,进行了现场固结灌浆和帷幕灌浆试验以及耐久性和破坏性压水试验,分析了抬动变形、灌浆压力和灌浆流量与时间的关系。试验结果表明:灌浆试验采取的“均布固结灌浆孔+帷幕灌浆孔”的布孔形式具有明显的优越性,趾板基础帷幕灌浆最大压力达到1.5 MPa;抬动变形与灌浆压力有直接关系,但与灌浆流量的关系更为密切,为有效减小抬动变形,需对灌浆流量进行控制;分级稳压也是抑制产生抬动变形的有效措施之一。
关键词: 帷幕灌浆;固结灌浆;抬动变形;混凝土面板坝;水布垭水利枢纽

中图分类号:TV543

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2012)05-0067-04

Foundation grouting tests on Shuibuya face rockfill dam // LI Jilin (Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan 250100, China)

Abstract: To enhance impermeability and durability of foundation anti-seepage curtain of Shuibuya face rockfill dam, field testing of consolidation grouting, curtain grouting, durability and destructing permeability were carried out to study the relationships between time and lifting deformation, grouting pressure, and grouting flow. The test results showed that grouting tests with uniform distributed consolidation grouting holes and curtain grouting holes got the best grouting effect, and the maximum grouting pressure increased to 1.5 MPa; compared to grouting pressure, grouting flow was more related to lifting deformation; grouting flow should be controlled to decrease lifting deformation; increasing grouting pressure in stages is considered as one of the best method of repressing lifting deformation.

Key words: curtain grouting; consolidation grouting; lifting deformation; concrete faced rockfill dam; Shuibuya Hydroproject

面板堆石坝在我国的应用与发展已进入了崭新阶段,坝体高度在不断地增加。为了使基础防渗帷幕的抗渗能力和耐久性与坝高的升级相适应,提高灌浆压力是最直接有效的办法。

水布垭面板堆石坝的基础灌浆施工在趾板上进行,趾板厚1.20 m,盖重很小,岩层产状平缓,层间剪切带剪切破坏强烈,结构松散,加之岩溶构造发育,灌浆时极易产生不利的抬动变形,如何保证在趾板不产生抬动破坏的前提下,尽可能提高灌浆压力,以增强防渗帷幕的抗渗能力,使其在高水头作用下能安全运行,是灌浆试验需要解决的重大难题^[1]。

灌浆试验将固结灌浆和帷幕灌浆放在同一组试验区,分析研究不同固结灌浆孔布置形式对防渗帷幕灌浆压力的影响。

通过本次灌浆试验,可以验证和探索合理的、可行的、可靠的灌浆设计参数和最优的施工方法、施工工艺,为帷幕灌浆和固结灌浆的结构优化和顺利实

施创造条件^[2]。

1 试验区地质条件

1.1 地层岩性

试验场地位于一缓坡上,其上堆积有大量的碎石弃渣,厚度1~3 m,试验前进行了清理。从上至下试验地层由栖霞组第9、8、7、6、5段组成,岩层倾角15°。第9段为微细晶灰岩夹少量薄层状含泥炭质生物碎屑灰岩,厚12.70~12.90 m;第8段为薄层状泥炭质生物碎屑灰岩夹中厚层深灰色灰岩,性软,层间剪切带发育,厚9.90~10.09 m;第7段为微细晶灰岩夹少量薄层状含泥炭质生物碎屑灰岩,厚8.60~8.75 m;第6段为瘤体泥灰岩,厚3.25~3.50 m;第5段为隐至细晶灰岩夹少量薄层状含泥炭质生物碎屑灰岩,厚16.90~16.94 m。试验将趾板建基面置于栖霞组第9段。

1.2 地质构造

主要构造有裂隙和层间剪切带等。裂隙以卸荷裂隙为主,一般呈张开状,局部充填黏土。建基面实测裂隙 60 条,平均裂隙面密度为 0.8 条/m²,层间剪切带呈条带状分布,连续且稳定,剪切破坏非常强烈,结构很松散。

2 灌浆试验孔位布置

2.1 趾板布置

试验场地长 27.0 m,宽 9.5 m,沿长度方向成 1:3.52 的斜坡。趾板为 C30 混凝土,长 20.50 m,宽 8.50 m,厚 1.20 m。趾板从下部到上部分成 A1 和 A2 两个试块,长度分别为 10 m 和 10.5 m,如图 1 所示。采用普通砂浆锚杆将趾板与岩石进行锚固,锚杆孔排距 1.5 m,孔距 2 m,深 5 m,锚杆采用直径为 32 mm 的螺纹钢筋,锚杆顶端与趾板钢筋相连,孔内浇筑 M25 水泥砂浆与基岩锚固,依靠锚杆的抗拔力锁住趾板和浅层岩体,弥补盖重不足,提高灌浆压力,增强灌浆效果^[3]。

为了防止在进行破坏性压水试验时出现趾板破坏,在试验孔周边布置 6 个 200 t 级的锚索孔,对趾板进行预压,模拟实际运行时趾板所承受的水压力。

2.2 灌浆孔布置

为提高防渗帷幕灌浆压力,现场灌浆试验比较研究了固结灌浆孔的布置形式。

A1 试块采用的是“上、下游固结灌浆孔+中间帷幕灌浆孔”的布孔形式。共布设 5 排孔,第 1,5 排为浅固结灌浆孔,孔深 7 m;第 2 排为深固结灌浆孔,孔深 17 m;第 3,4 排为帷幕灌浆孔,孔深分别为 60 m

和 40 m;固结灌浆孔和帷幕灌浆孔的孔距均为 2 m,排距 1.4 m。

A2 试块采用的是“均布固结灌浆孔+帷幕灌浆孔”的布孔形式。固结灌浆孔均匀布置 5 排,排距 1.6 m,孔距 2 m,第 1,3,5 排为浅固结灌浆孔,深 7 m;第 2,4 排为深固结灌浆孔,深 17 m;帷幕灌浆孔布置 2 排,分别在第 3 排浅固结灌浆孔的上、下游,孔深 32 m,排距 1.6 m,孔距 2.5 m。

固结灌浆分 2 序施工,帷幕灌浆分 3 序施工。

2.3 抬动观测孔和物探试验孔布置

布置 8 个抬动观测孔,在帷幕灌浆范围和固结灌浆范围各布置 4 个;布置 8 个物探测试孔。

2.4 检查孔布置

布置 11 个常规压水检查孔,其中帷幕灌浆范围 6 个,固结灌浆范围 5 个。帷幕的耐久性压水试验和破坏性压水试验利用 2 个常规压水检查孔进行。孔位布置见图 1。

3 灌浆试验

3.1 施工顺序

先进行物探孔钻孔和测试,然后进行抬动观测孔钻孔及抬动装置安装,再进行固结灌浆和帷幕灌浆,对灌浆孔进行逐序加密,最后进行灌后物探测试、检查孔及耐久性和破坏性压水试验施工。

3.2 钻孔及压水试验

钻孔采用金刚石钻进方法,裂隙冲洗和压水试验采用常规方法。帷幕灌浆孔孔口段灌浆结束后,下设直径 89 mm 的孔口管。帷幕灌浆孔压水压力以抬动值不超过设计要求为前提,在压水压力小或漏

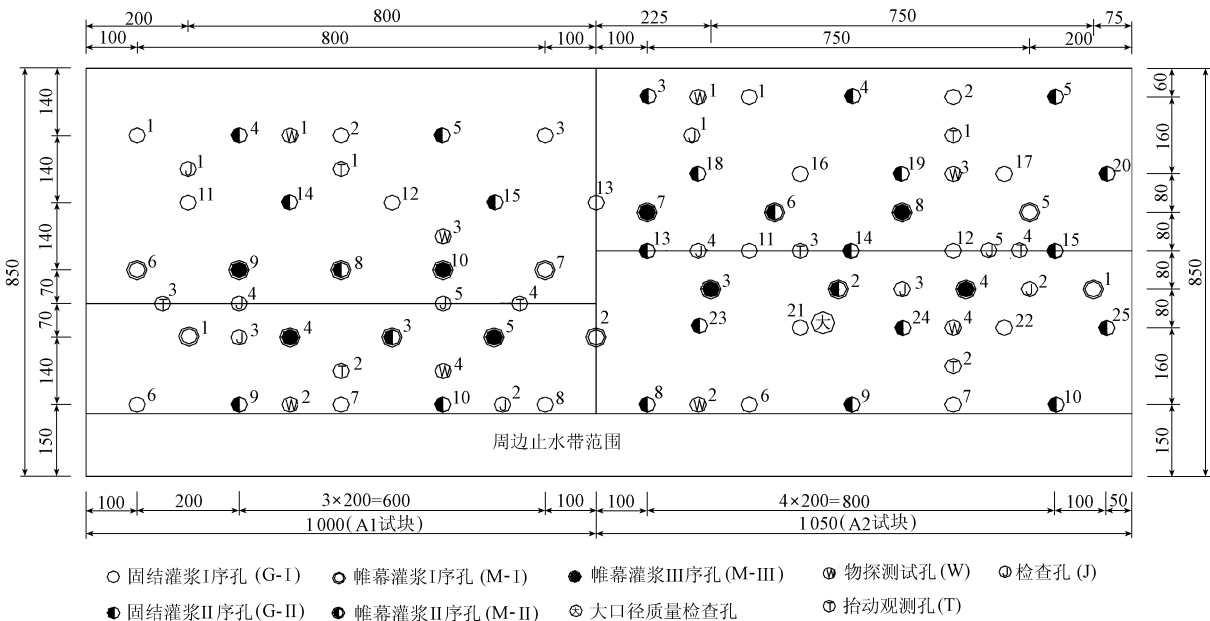


图 1 灌浆试验孔位布置(单位:m)

水量大时,控制抬动值按不大于 0.1 mm;若抬动值已达到 0.1 mm,而流量和压力均正常时,则抬动值允许放宽到极限值 0.15 mm^[4]。

3.3 灌浆和升压试验

a. 固结灌浆采用自上而下分段卡塞、孔内循环式灌浆方法施工;帷幕灌浆采用孔口封闭法自上而下分段进行灌浆。

b. 固结灌浆和帷幕灌浆分别采用 32.5 级和 42.5 级普通硅酸盐水泥,水泥浆采用2:1,1:1,0.8:1,0.6:1,0.5:1共 5 个比级。

c. 灌浆压力。固结灌浆Ⅰ序孔起灌压力为 0.2 ~ 0.3 MPa,Ⅱ序孔起灌压力为 0.3 ~0.4 MPa,目标压力为 0.5 ~ 0.6 MPa,分 4 级进行升压试验,每级 0.05 MPa,稳定时间 10 min,当抬动变形未超允许值时,则进行升压;帷幕灌浆按试块、排序、孔序分别进行升压试验,每级 0.05 MPa,稳定时间 10 min,当确认抬动变形未超允许值时,压力逐级提高。升压时一般控制吸浆量小于或等于 15 L/min,当抬动变形接近极限值或抬动值上升速度加快时,则降低 1 级压力。

4 灌浆效果分析

4.1 物探测试分析

物探测试成果见表 1。

表 1 跨孔岩体声波波速分段统计对比

灌浆前 v_p 值区间/ ($m \cdot s^{-1}$)	v_p 平均值/($m \cdot s^{-1}$)		v_p 平均值 提高 百分比/%
	灌浆前	灌浆后	
<3 000	2 810	3 767	34.05
3 000 ~3 500	3 320	4 028	21.30
3 500 ~4 000	3 809	4 170	9.46
4 000 ~4 500	4 249	4 452	4.78
4 500 ~5 000	4 715	4 817	2.17
>5 000	5 194	5 247	1.03

注: v_p 为岩体声波波速。

物探测试结果表明,低波速段的灌浆效果比高波速段的好,岩体声波波速不仅可以全部提高到 3 500 m/s

表 3 帷幕灌浆检查孔压水试验成果

孔号	各段次透水率/Lu												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
A1-J-1	0.87	0.85	0.30	0.77	0.36	0.51	0.78	0.54	0.53				
A1-J-2	0.11	0.62	0.43	0.67	0.32	0.45	0.42	1.04	0.85	0.62	0.58	0.30	0.64
A1-J-3	0.47	0.02	0.31	0.47	0.60	0.64	0.55	0.57	0.53	0.45	0.43	0.51	0.63
A2-J-1	0.58	0.77	0.14	0.25	0.26	0.55	0.40	0.03					
A2-J-2	0.08	0.35	0.11	0.31	0.55	0.64	0.44	0.48					
A2-J-3	0.33	0.70	0.22	0.59	0.49	0.42	0.49	0.34					

表 4 耐久性压水试验成果

孔号	段长/m	平均压力/MPa	压水时间/h	最终流量/ ($L \cdot min^{-1}$)	透水率/Lu	流量变化范围/ ($L \cdot min^{-1}$)	最大抬动值/mm
A2-J-2	2	1.03	72	0.21	0.11	0.15 ~0.28	0.09
A2-J-3	32	1.05	72	6.68	0.21	3.11 ~6.98	0.07

以上,且频态分布向高波速方向移动并且更为集中,岩体强度趋强,岩体完整性和均匀性也明显提高。

4.2 检查孔压水试验分析

a. 固结灌浆后共进行压水试验 18 段,有 17 段透水率满足小于 3 Lu 的防渗标准,合格率为 94.4%。A1-J-2 第一段透水率 6.44 Lu,大于防渗标准,是因该孔位于开挖揭示的断层构造上,且为边排位置。固结灌浆检查孔压水试验成果见表 2。

表 2 固结灌浆检查孔压水试验成果

孔号	段次	段长/m	压力/MPa	透水率/Lu	岩芯 采取率/%
A1-J-1	1	2.0	0.38	0.95	92.33
	2	2.0	0.44	0.37	
	3	3.0	0.45	0.34	
	4	4.9	0.46	0.31	
A1-J-2	1	2.0	0.42	6.44	90.75
	2	2.0	0.44	1.13	
	3	3.0	0.38	2.73	
	4	5.0	0.53	0.25	
A1-J-3	1	2.0	0.40	2.48	90.67
	2	2.0	0.41	2.58	
	3	3.0	0.42	0.40	
	4	5.0	0.50	0.77	
A2-J-1	1	2.0	0.41	1.07	95.23
	2	2.0	0.41	2.21	
	3	3.0	0.40	2.18	
A2-J-2	1	2.0	0.41	2.61	94.99
	2	2.0	0.44	2.29	
	3	3.2	0.39	0.41	

b. 帷幕灌浆后共进行压水试验 59 段,浅层 17 m(第 1 ~5 段)范围内透水率全部小于 1 Lu,最大值为 0.87 Lu;深度 17 m 以下透水率也全部小于 3 Lu,最大值仅为 1.04 Lu,满足防渗标准要求。帷幕灌浆检查孔压水试验成果见表 3。

4.3 耐久性和破坏性压水试验

a. 耐久性压水试验。在完成常规压水试验后进行耐久性压水试验,压水压力为 1.0 MPa,压水持续时间为 72 h,耐久性压水试验成果见表 4。

b. 破坏性压水试验。破坏性压水试验是在耐久性压水试验压力 1.0 MPa 的基础上,继续逐级提高,按每级增加 0.5 MPa、每级持续 10 min 进行控制。在 A2-J-2 孔第 1 段(接触段)进行破坏性压水试验。压水开始 17 min 后,压力升至 1.46 MPa 时,流量达 2.93 L/min,透水率为 1.11 Lu,最大抬动值为 0.08 mm,此时个别锚索孔开始渗水,压力仍可持续上升;当压力升至 1.54 MPa 时,流量达 10.3 L/min,最大抬动值为 0.29 mm,此时趾板出现不同程度的冒水,但压力仍可持续上升;当压力升至 1.77 MPa 时,流量达 56.6 L/min,最大抬动值达 0.52 mm,趾板开裂。从试验结果看,因升压幅度较大,压力变化较快,抬动反应灵敏,导致趾板较早产生抬动破坏^[5]。

4.4 钻孔取芯、大口径直观检查

a. 钻孔取芯和大口径检查孔揭露,在上部地层中水泥结石充填居多,从上至下逐渐减少。

b. 裂隙被水泥浆充填多呈致密状,夹泥裂隙被水泥浆穿透挤压,水泥浆渗入或包裹裂隙中的黏土和黄土充填物。

4.5 升压试验成果分析

a. 固结灌浆Ⅱ序孔进行升压试验,起始压力 0.3~0.4 MPa,目标压力 0.5~0.6 MPa,试验结果压力全部达到目标压力值。

b. 帷幕灌浆升压试验重点在 A2 试块的浅层部位(第 5 段以上)进行。试验的目标压力前 5 段分别为 1.0 MPa,1.2 MPa,1.5 MPa,1.7 MPa,2.5 MPa,由于抬动变形较小,目标压力全部达到,最终试验压力前 5 段分别为 1.5 MPa,1.7 MPa,2.2 MPa,2.5 MPa,3.0 MPa。

从灌浆试验升压成果分析,趾板基础内均匀设置的锚杆,对抬动量的限制和浅层防渗帷幕灌浆压力的提升发挥了重要作用。

4.6 灌浆孔布孔形式对灌浆效果的影响

a. 固结灌浆后压水检查。A1 试块合格率为 91.70%,A2 试块合格率为 100%。

b. 物探测试。A2 试块的单孔声波测试、跨孔声波测试以及静弹性模量的测试结果均明显好于 A1 试块。

c. 固结灌浆抬动变形。A1 试块共 70 段,产生抬动变形 53 段,占总段数的 75.71%;A2 试块共 95 段,产生抬动变形 43 段,占总数的 45.30%。

d. 帷幕灌浆压力。A1 试块帷幕灌浆第 1 段最大压力达到 1.0 MPa;A2 试块帷幕灌浆第 1 段最大压力达到 1.5 MPa。

通过以上灌浆效果的差别分析,证明了 A2 试

块的“均布固结灌浆孔+帷幕灌浆孔”的布孔形式具有明显的优越性。

4.7 抬动变形、灌浆压力和灌浆流量与时间的关系

通过对抬动变形值 E 、灌浆压力 P 、灌浆流量 Q 与时间的关系曲线的分析,在抬动值大于 0.1 mm 的段次中,有部分段次抬动值随灌浆压力的增加而增加,而大部分段次随流量的增加而增加,说明抬动变形与灌浆压力有直接关系,但与灌浆流量的关系更为密切。典型段次的抬动变形、灌浆压力和灌浆流量与时间的关系曲线见图 2^[6]。

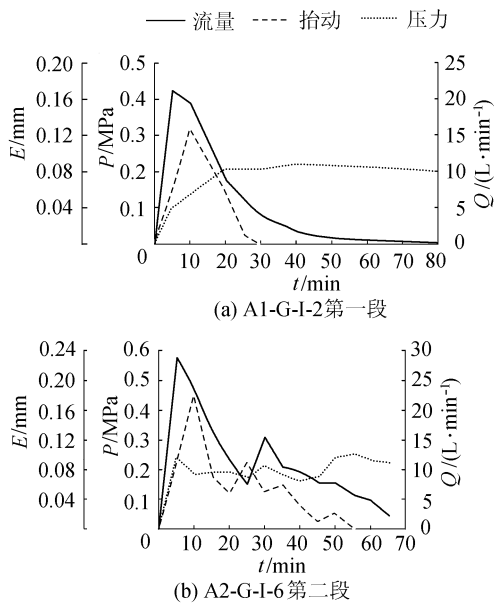


图 2 抬动变形、灌浆压力和灌浆流量与时间的关系

5 结 论

a. 通过现场灌浆试验,将趾板浅层岩体灌浆压力提高到 1.0~1.5 MPa,对保证帷幕灌浆质量和提高防渗帷幕的抗渗性能起到了良好效果。

b. 通过 A1 和 A2 试块固结灌浆孔布孔形式的对比分析,证明 A2 试块的“均布固结灌浆孔+帷幕灌浆孔”布孔形式具有明显的优越性。

c. 通过对抬动变形、灌浆压力和灌浆流量与时间关系的分析得出抬动变形与灌浆压力有直接关系,但与灌浆流量的关系更为密切;为了减小引起抬动的能量,需对灌浆流量进行控制。

d. 本次灌浆试验中固结灌浆施工顺序遵循“先排序、后孔序”,这样施工可以达到“上、下游封闭、中间密实”的效果,对提高防渗帷幕灌浆压力产生明显作用。灌浆试验证明分级稳压也是抑制产生抬动变形的有效措施之一。分级稳压是指设置起始压力、目标压力、升压步长和稳压时间,逐段灌浆时从起始压力至目标压力采取分级稳压,当抬动变形在允许范围内,才能逐级提高压力。(下转第 85 页)

发生事故,应尽快恢复。复喷前先用钻机扫孔至中断位置以下 50 cm,再将喷管下放至孔底复喷,以确保墙体的连续性。

c. 高压喷射灌浆后质量检测方便,可采用开挖检查、钻孔检测及取样试验等检测。水库大坝工程高压喷射防渗墙的检测,因坝顶窄,不宜做围井检查,宜采用钻孔注水检查。

d. 高压喷射灌防渗墙具有较好的防渗加固性能,施工简便、灵活,机具振动小、噪音低。

参考文献:

[1] 牛运光. 病险水库加固实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社,2002.

[2] 王明森,王洪恩,查振衡. 高压喷射灌浆防渗加固技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.

[3] 彭万军,刘晓波,曾鹏九. 振孔高压旋喷施工技术[J]. 水利水电科技进展,2008,28(1) :74-75.

(上接第 70 页)

参考文献:

[1] 李茂芳,孙钊. 大坝基础灌浆[M]. 2 版. 北京:水利电力出版社,1987.

[2] DL/T5148—2001 水工建筑物水泥灌浆施工技术规范[S].

[3] 胡伟华,冷元宝,赵志华,等. 抬动监测在工程固结灌浆过程中的应用[J]. 水利水电科技进展,2011,31(5) :

(上接第 81 页)

采用石笼网、抛石混凝土等技术进行防护。②闸上冲刷是工程建设期及运行期最容易忽视的问题,对于深厚覆盖层基础上的水闸,往往影响枢纽防渗墙等主体建筑物的安全及工程效益的发挥,因此,防渗墙上游最好设置上游护底及防冲槽结构。

参考文献:

[1] 赖勇,施林祥,郑旭明. 山区河道生态防洪堤关键问题及对策[J]. 中国农村水利水电,2011(9) :142-144.

[2] 李扬,黄荣卫,张婷. 五里亭水利枢纽施工导流期间若干问题的数值分析研究[J]. 水利与建筑工程学报,2011,9(5) :113-117.

[3] 文恒,智宏,牟献友. 水闸消能防冲设计条件的确定[J]. 水利水电科技进展,2005,25(6) :17-20.

[4] 陈朝阳,陈振华,高大水,等. 三峡水库开县调节坝工程泄水闸下游消能工设计优化[J]. 水利水电快报,2011,32(3) :22-24.

[5] 曾新民. 低水头大流量水利枢纽特性与设计优化[J]. 中国水利,2010(20) :75-77.

[4] 任红云,刘海军,彭国强. 双板振动沉模防渗墙的质量分析与控制[J]. 水利水电科技进展,2009,29(2) :52-53.

[5] 白永年. 中国堤坝防渗加固新技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2001.

[6] 杨立洪. 高压喷射灌浆技术在下石陂水库除险加固中的应用[J]. 江西水利科技,2008,34(4) :4-5.

[7] 黄家权. 高喷技术在长江邱家湾段防渗工程中的应用[J]. 人民长江,2002,33(8) :17-18.

[8] BOWLES J E. Physical and properties of soils[M]. 2nd ed. New York; McGraw-Hill Book Co. ,1984.

[9] SCOTT C R. An introduction to soil mechanics[M]. 3th ed. Crown House; Applied Science Publishers,1980.

[10] 陈士亮,宋杰,吴存锡,等. 高压喷射灌浆防渗技术探讨[J]. 中国科技信息,2007(17) :37-37.

[11] 刘振飞. 水利水电工程设计与施工新技术全书[M]. 北京:海潮出版社,2001.

(收稿日期:2012 - 02 - 14 编辑:周红梅)

79-81.

[4] 曾凡杜. 坝面帷幕灌浆技术在竹银水库主坝坝基处理中的应用[J]. 水利水电科技进展,2011,31(6) :55-58.

[5] 彭第,王伟. 中梁一级电站库区防渗帷幕灌浆试验效果分析[J]. 水利水电科技进展,2011,31(5) :73-78.

[6] 于习军,程少荣. 水布垭大坝趾板基础防渗灌浆升压研究与实践[J]. 人民长江,2007,30(7) :62-64.

(收稿日期:2011 - 12 - 26 编辑:周红梅)

[6] 韩昌海,杨宇,骆少泽. 青草沙水库下游水闸冲刷及辅助消能研究[J]. 水利水电技术,2011,42(3) :49-51.

[7] 冯达恩. 东江水利枢纽工程拦河水闸消能防冲设计[J]. 甘肃水利水电技术,2006,42(1) :70-71.

[8] 欧健,陶雪辉,艾克明,等. 水利水电枢纽工程水力设计系统研究[J]. 水利规划与设计,2004(1) :60-61.

[9] 左光栋,杨雪峰,张绪进. 钻根水利枢纽工程消能防冲试验研究[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版,2009,28(2) :310-314.

[10] 周翠玲,张耀军,张代辉. 钢纤维混凝土在水电工程加固补强中的应用[J]. 山东农业大学学报:自然科学版,2008,39(1) :80-84.

[11] 朱冠美,杨松玲. 三峡工程聚丙烯纤维混凝土的试验研究[J]. 人民长江,2002,33(10) :39-41.

[12] 陈忠兰,古宝和. 生态格网在河道整治工程中的应用[J]. 上海水务,2007(2) :28-30.

[13] 王学森. 抛石混凝土的性能改进[J]. 混凝土,2003(3) :63-64.

[14] 杨德钦,严伟平,李福恩. 大体积筏板基础抛石混凝土施工技术[J]. 施工技术,2010,39(6) :41-43.

(收稿日期:2012 - 02 - 15 编辑:骆超)