

DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2008.04.017

回填砂卵石层固结灌浆

缪绪樟^{1 2}, 曾鹏九³, 鄢泰宁²

(1. 中国地质大学研究生院 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学工程学院 湖北 武汉 430074;
3. 黄河勘测规划设计有限公司地质勘探院 河南 洛阳 471002)

摘要 通过工程实践,在回填砂卵石层的固结灌浆中使用了新的灌浆方法和工艺,如:跟管钻进成孔、花管充砂、孔口封闭分段灌浆,SM 植物胶护壁、金刚石钻具钻进成孔、孔口卡塞分段灌浆,斜孔潜孔锤跟管钻进成孔、花管充砂、孔口封闭分段灌浆等。满足了设计对回填砂卵石层固结灌浆的要求,使导流墙得到稳定。

关键词 砂卵石;固结灌浆;花管充砂;分段灌浆;SM 植物胶

中图分类号 TV543+.4 **文献标识码** B **文章编号** 1006-7647(2008)04-0060-05

Consolidation grouting technology for backfilled sand-cobble stratum//MIAO Xu-zhang^{1 2}, CENG Pong-jiu³, YUAN Tai-ning² (1. Graduate School, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. Institute of Geological Survey, Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Luoyang 471002, China)

Abstract : In order to improve the bearing capacity of foundations, some new grouting methods and techniques have been employed in the consolidation grouting of backfilled sand-cobble stratum, including casing drilling, filling sand in a perforated pipe, protecting the wall with SM plant glue, forming a hole by diamond drilling and grouting in stages. The construction practice shows that consolidation grouting in backfilled sand-cobble stratum can meet the requirements of design and enable the diversion wall to remain stable.

Key words : sand and cobble; consolidation grouting; filling sand in perforated pipe; grouting in stages; SM plant glue

某水利枢纽工程,大坝长 3050 m,连接两岸为土石坝段,土石坝长 2 600 m,大坝中部为混凝土坝,发电厂房、排砂、泄洪等建筑物均布置在此段,最大坝高 47 m。混凝土坝段左右两侧设计有导流墙(图 1)。左导流墙与坝体相连位置在左库门处,但经过较长时间的雨水浸泡与渗透,发现左导流墙与坝体连接部位的左侧距坝体 16 m 的范围出现导流墙底部与地基脱空,其间隙为 0.05 ~ 0.2 m 不等;并发现左导流墙出现不均匀沉陷,导流墙与坝体连接部位出现细微裂纹。为防止事态进一步恶化,决定对这一部位进行固结灌浆处理。

坝体与导流墙的地基基础为回填砂卵石层与原生砂卵石层,层厚一般为 20 ~ 25 m,局部达 45 m,内含砂层透镜体,地层结构欠均匀。下部基岩以泥质粉砂岩与黏土岩为主,互层分布,较软弱。

砂卵石层物理性能如下:

a. 回填砂砾(卵)石:杂色,岩性主要为砂岩、石英砂岩,其次为火成岩类,亚圆形为主,弱~微风化;

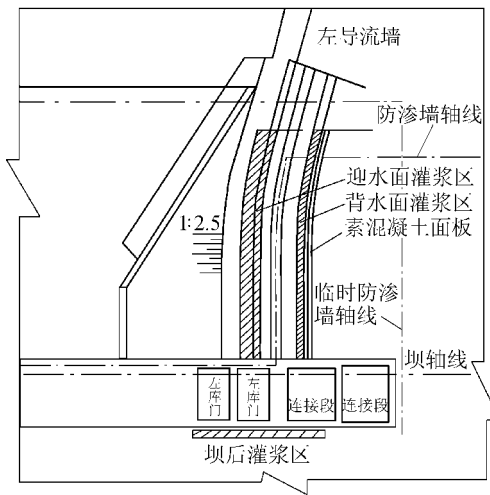


图 1 上游左导流墙左库门连接段地基固结灌浆平面布置
粒径小于 0.1 mm 的颗粒质量分数小于 8%,粒径 5 ~ 10 mm 的颗粒质量分数在 10% ~ 35% 之间,最大粒径小于 500 mm,填隙物主要为砂及少量的黏性土。

b. 原生砂卵石:杂色,岩性主要为砂岩、石英砂

作者简介 缪绪樟(1966—)男,江西新建人,高级工程师,博士研究生,从事水利水电勘察与岩土工程研究。E-mail: miaoxzh@yrec.cn

岩,其次为火成岩类,次棱角形为主,微风化,粒径2~60 mm的颗粒质量分数约为15%,粒径大于60 mm的颗粒质量分数约为55%,填隙物主要为黏性土及少量砂。

通过先导孔注水试验,地层平均透水率达120.1 Lu,为强透水层。

由于该固结灌浆工程与其他工程施工的关联性,以及整体工程对截流时间的安排,使得该地基处理工程存在时间紧、任务重的特点。

灌浆设计要求达到雨水侵蚀前的地基承载能力,并使地基的整体性得到提高。灌浆效果以灌浆前后的声波检测为主,检查孔取心、压水试验为辅,通过变形观测的变化来判别。

1 砂卵石固结灌浆机理

以水泥为散体,采用渗入式压力灌浆对砂卵石层的加固效果,与砂卵石地基的渗透性、颗粒级配、孔隙大小及连通性、目的层的埋深、地下水埋藏条件(水流向和流速等)都有着密切的关系。

在砂卵石灌浆过程中不仅要求水泥浆液能够充填孔隙与架空层,而且还要保证在灌浆的过程中使地层的结构得到改善,并控制抬动量。水泥浆液通过孔隙向外渗流扩散,颗粒表面及结合部位的浆液流速会随着扩散半径的扩大而越来越低,最终引起浆液的滞留。当终止压浆时,孔隙中的浆液会依靠重力向下渗透,并沿途离析、沉淀^[1]。水泥浆液在地下水位以下时,由于地下水的稀释与渗移的影响,使砂卵石中的孔隙得不到完全充填,导致砂卵石的固结强度降低,或者固结范围达不到要求。因而,只有用充分的灌浆量才能达到预期的灌浆效果。所以,要求达到灌浆设计压力,同时注浆量小于2 L/m时,灌浆延续时间不少于30 min。

只有当注入砂卵石的浆液充填饱和时,才会使砂卵石的原始结构发生质的变化。水泥浆液对卵石颗粒进行胶结包裹后,其不断固化可形成一种完全新型的刚性支撑体,这种砂卵石固结体的力学性质就取决于水泥浆液固结后所产生的结构特征。而这种特征又依赖于水泥的质量与灌浆的参数和方法。

2 砂卵石层固结灌浆的设计

由于灌浆地层主要是回填砂卵石,根据回填颗粒设计的级配资料,其可灌比值 M 为62.5^[2],地层孔隙率大,可灌性好,注浆量一定很大。由于灌浆是在现有水工建筑物基础上进行的,灌浆压力的选择与导流墙的变形观测、地层的抬动观测都要同时进行。所以,设计了3组导流墙变形观测点、6组抬动

观测孔。

为避免参数选择的失误,先进行1组试验。试验孔选坝下第9排固结灌浆孔中的2孔,孔距4 m,孔深分别为20.1 m和18.15 m。主抬动孔布置在2个试验孔之间,距主抬动孔0.7 m处布置1个副观测孔。

灌注浆液为纯水泥浆液,配比采取1:1,0.8:1,0.6:1,0.5:1共4个比级。试验灌浆压力采用0.2 MPa。先导孔与检查孔的简易注水试验压力采用0.1~0.2 MPa,并做工程探测CT弹性波测试。

2.1 施工平面布置

左导流墙迎水面设计固结灌浆孔5排,孔距为2 m,梅花形布置;1~4排排距为2 m,4与5排排距为0.5 m;1~4排为垂直孔,第5排为倾向导流墙与铅直线夹角15°的斜孔(图1、图2),这样可以使迎水面的灌浆与背水面的灌浆都能搭接到导流墙底部。

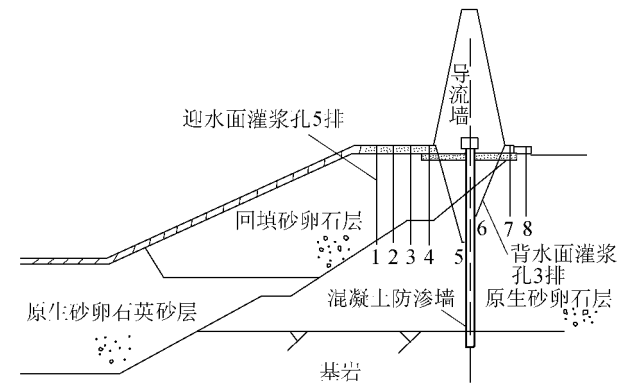


图2 导流墙灌浆布置剖面

背水面设计3排灌浆孔,第7排与第8排排距为2 m,第7排与第6排排距为0.5 m,按梅花形布置,孔距2 m,第7排和第8排为垂直孔,第6排为倾向导流墙与铅直线夹角30°的斜孔。

左库门外坝下游第9排固结灌浆孔位于坝后灌浆区,灌浆孔均为垂直孔,孔距为2 m,沿坝体走向布置,距坝体边缘1 m,分序施工。

左库门内灌浆孔因地制宜采取梅花形或三角形布置,孔距与排距可根据实际情况而定,但一般为2 m左右,均为垂直孔。

灌浆孔深度要求到达原始砂卵石层以下2 m,一般孔深为20 m左右。

2.2 灌浆工艺设计

固结灌浆施工按分序加密的原则进行,结合砂砾石帷幕灌浆和岩石固结灌浆的施工经验,灌浆施工采取先边排、后中排,先外后内的顺序进行。

左导流墙两侧及左库门外固结灌浆采用预埋花管孔口封闭灌浆法,左库门内固结灌浆采用孔口卡塞封闭(有混凝土盖板)自上而下分段灌浆方法。

2.3 灌浆压力

该工程由于回填砂卵石孔隙率大,可灌比值高,地面又有 17 m 高的水工建筑物,既要防止浆液过远运输而流失,又要严防地面抬动。在没有相应规范参考的情况下,通过试验决定采用 0.2 MPa 的灌浆压力,且不因深度与位置的变更而变更。吃浆量很大时,还可适当降低灌浆压力。

2.4 水灰比

采用纯水泥浆灌注。砂卵石层灌浆不可套用基岩灌浆规范,基岩灌浆的水灰比一般比较大。砂卵石层由于孔隙率大,空隙大都又相互连通,稀浆会使浆液的扩散范围变得很大,消耗大量水泥。所以水灰比应选用 0.8:1、0.6:1 和 0.5:1。只在少数情况下(中间排孔、灌浆吃浆量较小时),采用 1:1 的水灰比。一般情况下不加速凝剂,特殊情况可加入 5%~8%(按体积比)的水玻璃。

2.5 灌段长度

砂卵石层渗透性很强,孔壁稳定性差。一般采用预埋花管法灌浆时,灌浆段长仅为 0.5~1 m;采用其他方法灌浆时段长仅为 2~3 m。此次施工由于整个施工计划的关联性,时间紧迫,在保证质量的前提下要求尽量缩短工期,所以将灌浆段长度定为 5 m,甚至还可略增加一点。此灌注长度在试验过程中进行了确认,只要保证机械设备与供浆能力,并按标准操作,是可以满足设计要求的。

3 施工方法

在进行固结灌浆前先对导流墙底部与地基脱空部位进行了 0.5:1 水泥浆的无压充填灌浆,并制作 0.5 m 厚的素混凝土盖板。

该工程有 3 种类型的灌浆孔,增加了成孔的复杂性。第 1 种是导流墙两侧与坝下左库门附近第 9 排灌浆孔均为露天垂直灌浆孔,第 2 种为有斜度的灌浆孔,第 3 种为左库门室内垂直灌浆孔。根据不同情况分别采用了 3 种形式的工艺流程。

一般砂卵石灌浆是采用成孔后预埋袖阀管进行分段灌浆,但该方法具有塑性混凝土待凝、下塞分段灌浆等特点,施工时间长,难以满足工程的需要;该工程灌浆采用孔口封闭、下花管护孔壁、充填砂分段灌浆等方法。

3.1 先导孔施工

先导孔也是灌浆孔,先导的目的是在灌浆前查清场地的工程地质与水文地质情况,以便确定灌浆的参数。所以,先导孔要求取芯、做简易注水试验。

3.2 成孔与灌浆花管的安装

砂卵石层灌浆最困难的是成孔,尤其是回填砂

卵石,孔隙率大,孔壁很不稳定。泥浆护壁也很难成孔,即使泥浆成孔,孔壁形成的泥皮也很难清洗,会对灌浆质量造成影响。

露天垂直灌浆孔采用 XY-2 岩芯钻机打取芯跟管钻,即用钢砂钻进,厚壁套管跟进护孔。混凝土盖板的开孔直径为 $\varnothing 150$ mm,用 $\varnothing 127$ mm 厚壁套管护壁跟进,钻到设计孔深时,套管即跟到设计孔深,然后下入花管。花管设计参数如下:直径 $\varnothing 89$ mm,沿管壁周打 6 排孔距为 50 mm、孔径 $\varnothing 15$ mm 的孔。厚壁套管起出后,在花管内投入中细砂,每冲捞一段砂即灌浆一段,直至结束。灌浆方式采用孔口封闭、自上而下重复灌浆法(图 3)。

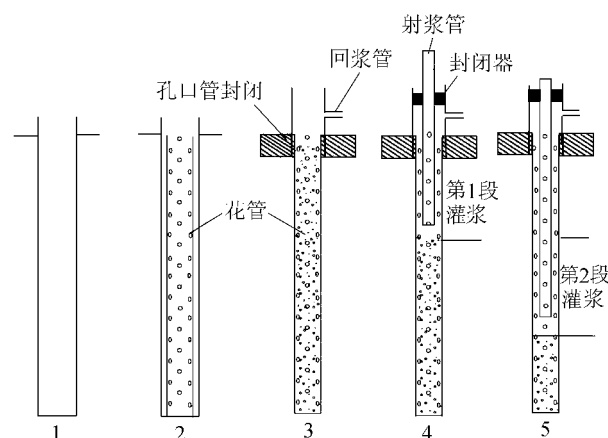


图 3 预埋花管灌浆工序

导流墙两侧灌浆斜孔采用 MDJ-50 潜孔钻机潜孔锤偏心跟管钻进,跟进 $\varnothing 108$ mm 的薄壁套管,达到设计孔深后,同样下入 $\varnothing 89$ mm 花管,投入中细砂。其灌浆形式与导流墙垂直孔相同。

砂卵石斜孔灌浆,钻孔虽浅,但由于成孔困难,存在一定的施工难度。孔口管的安设固定是最重要的一环。要采用满眼钻进,利用潜孔锤钻压不高的优势,确保钻孔的斜度在控制范围内,以满足设计要求。

左库门室内灌浆施工空间有限,只能用 XY-2 油压钻机金刚石回转钻进成孔,用 SM 植物胶冲洗液护壁,由于有混凝土盖板,可不下套管或花管。SM 植物胶冲洗液是一种高分子聚合物材料,具有黏弹性、黏度高、失水量小等特点,对砂卵石层有良好的护壁作用。同时左库门内灌浆孔是最后的序孔,钻孔稳定性有所增加,所以采用孔口封闭、自上而下的方式灌浆。灌浆工序如下:①浇注孔口;②钻第 1 段灌浆孔;③第 1 段灌浆;④钻第 2 段灌浆孔;⑤第 2 段灌浆(图 4)。

金刚石 SM 植物胶钻进成孔灌浆可以说是一种新的施工方法,它没有孔内安装。SM 植物胶冲洗液对砂卵石层有很好的护壁作用,由于堵浆胶塞安装全在孔口混凝土段,不需下花管护壁,减少了孔内事

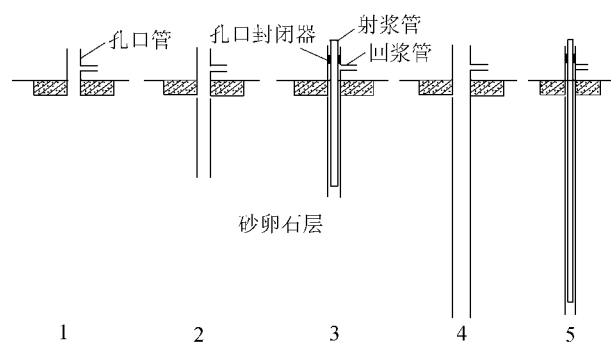


图4 金刚石 SM 植物胶成孔灌浆工序

故的发生,而且钻进效率较高。SM 植物胶的胶膜对灌浆并没有造成影响,从灌浆资料可以看出,它比导流墙两侧的耗浆量要大 223%~402%。

回填砂卵石孔隙率大,渗漏严重,钻孔均不返水,洗孔没有实际意义。所以,笔者主张砂卵石层的任何灌浆均不必洗孔。

3.3 灌浆过程的控制

3.3.1 压力的控制

虽然通过试验确定采用 0.2 MPa 的灌浆压力,但由于地层的差异性,在灌浆过程中要注意抬动观测与导流墙变形观测。

对一些灌段出现无回浆的现象,并且灌浆压力也达不到 0.2 MPa 时,应立即改为浓浆灌注,并设法加大泵量,使灌浆过程尽量保持有 15 L/min 的回浆,同时不停地低速回转射浆管,并定时上下提动射浆管,或者采用纯压式灌浆法进行灌浆,待压力建立起来后再改循环式灌浆,否则射浆管容易“固管”,使灌浆无法正常进行。

3.3.2 注浆量的控制

回填砂卵石存在较大的空隙,雨水侵蚀后,很多小颗粒被雨水带走,可灌性好,相应的注浆量大,消耗水泥多,尤其是第 1 排灌浆孔。如 K1 号孔第 1 段灌浆,耗水泥量达 3 432.09 kg/m, K5 号孔耗水泥量达 3 415.49 kg/m,在大灌浆量的情况下,均采用了间歇灌浆与待凝复灌,并加入 5% 的水玻璃。

吃浆量小时采用大水灰比,在压力达到 0.2 MPa 时,一次性灌浆结束。

3.3.3 水灰比的控制

设计给出 5 个水灰配比,实际只用了 1~2 个,透水率在 100 Lu 以上,开灌用水灰比为 1:1 的浆,灌注 1 500 L 后,改成水灰比为 0.5:1 的浆。透水率在 40~100 Lu 的地段直接采用 0.8:1 的浆,同样灌注 1 500 L 后,改为 0.5:1 的浓浆。中间排灌浆孔基本上采用水灰比为 1:1 的浆灌,吃浆量大时采用水灰比为 0.8:1~0.5:1 的浆。

3.4 灌浆结束标准

在规定压力下,注入率不大于 2 L/min,继续

30 min 后灌浆可结束。

4 灌浆效果

在灌浆过程中,导流墙变形观测点呈不均匀变形,南侧(左侧)变形观测点未出现明显变化,导流墙顶部变形观测点曾出现向南(左)倾斜,最大倾斜值为 11 mm;北侧(右侧)变形观测点发生沉陷,沉陷值为 10 mm。原因是因施工干扰,先施工背水面 3 排灌浆孔,然后进行迎水面的施工,由于迎水面是 5 排灌浆孔,所以形成了上述情况。在灌浆结束 7 d 以后,上述观测点均稳定无变化。

4.1 灌浆资料分析

此次固结灌浆工程共完成灌浆段 2 739.55 m,消耗水泥 3 381 t。从按序灌浆孔的单位注入量来看,均符合随着灌浆孔的加密单位灌浆量递减的规律。表 1 是 3 个不同区域的灌浆注入量统计,从表 1 可以看出每一序孔的灌注都是有效的。

表 1 地基灌浆平均单位注入量成果比较

灌浆部位	灌浆孔 个数/个	平均单位注入量/(kg·m ⁻¹)			I、II 比较 递减率/%
		I 序孔	II 序孔	平均	
背水面地基	86	1 872.80	422.60	1 175.50	77.43
迎水面地基	145	990.73	292.50	653.60	70.48
左库门	35	3 371.10	791.00	2 626.37	76.54

4.2 检查孔资料分析

检查孔采用金刚石回转钻进取芯,通过取出的岩芯和简易注水试验资料,可以分析出灌浆效果是显著的。

通常回填砂卵石钻孔的岩芯采取率是很低的,但经过固结灌浆处理后,检查孔岩芯采取率平均在 90% 以上,大部分芯样为柱状,共发现水泥结石 86 处(7 个检查孔)。从充填胶结情况看,充填于砾卵石间隙之间的水泥胶结较好,强度高,但在砂层中水泥是静压壁裂充填的,水泥结石呈脉状充填于砂层中,在低压下没有形成网络包裹体,所以砂层整体强度相对较低。

从注水试验资料看(表 2),检查孔的平均透水率为 16.8 Lu,比先导孔与 I 序孔的透水率减少 86%,效果是显著的。

表 2 先导孔和检查孔透水率对比

孔的类别	孔数/个	段数/段	平均透水率/Lu
先导孔	79	143	120.1
检查孔	15	20	16.8

4.3 CT 资料分析

事先在 5 个先导孔进行了工程探测 CT 弹性波测试,灌浆结束后 7~10 d 又通过 7 个检查孔的工程探测 CT 弹性波测试,利用弹性波在被测物体中的传播速度、不同物体弹性波与物体的构成成分、密实

度等性能判断灌浆效果。波速高的区域地层密实 , 密度大 , 弹性模量值也大 , 波速低的区域地层松散 , 密度小 , 弹性模量值也小。灌浆前后的 CT 测试结果见表 3。因此可以得出以下结论 :

- a. 灌浆后 , 回填砂卵石层地基弹性波速、弹性模量明显提高。
- b. 弹性波在被测物体中传播的低速区域波速提高 30% 以上 , 高速区域波速提高 10% 以上。
- c. 导流墙回填砂卵石层 , 弹性波在被测物体中传播的波速平均提高 25% 左右 , 弹性模量大都在 $1.0 \times 10^3 \sim 3.0 \times 10^3$ MPa 之间。

经过固结灌浆处理后 , 回填地基一体性得到增强 , 灌浆效果明显。

表 3 灌浆前后 CT 测检对比

区域	剖面	弹性波速平均值(m·s ⁻¹)
导流墙背水面	N1 ,N2(灌前)	1 150
	N3(灌后)	1 430
导流墙迎水面	S1 ,S2(灌前)	1 275
	S3 ,S4 ,S5(灌后)	1 613.3
左库门	Z1(灌前)	1 320
	Z2 ,Z3 ,Z4(灌后)	1 613

5 结 语

对于砂卵石固结灌浆 , 具体的灌浆方法已较成

(上接第 22 页)

抗拉强度和材料屈服以及诱导缝作用 , 应力有所调整 , 坝踵拉应力减少而坝址压应力增大 , 因而导致坝址压应力较大的 965 ~ 1 010 m 高程坝基浅层首先出现塑性贯通。随着超载倍数增大 , 应力进一步分散 , 稳定性较好的岩体承担了大部分荷载 , 1 050 m 高程以上坝基未出现大范围的屈服现象。

2.5 坝基局部屈服对整体稳定影响分析

由上述分析可知 , 坝基岩体屈服区在 1 倍水载时已经接近帷幕线 , 2 倍水载时屈服区已经超过帷幕线 , 但坝后岩基仍然处于弹性工作阶段 , 坝后基岩会对已经屈服的岩体发展起到抑制作用 , 从整体来看 2 倍水载时大坝不会产生整体滑动 , 且屈服也只发生在坝基一定范围内 , 而 3 倍和 3.5 倍水载时屈服面已经贯通至下游 , 上下游坝基的贯通可能会导致坝基岩体出现一定的滑移路径 , 此时可认为大坝整体有出现严重破坏的可能性。因而从坝基超载屈服角度出发 , 可以认为坝基局部安全度较低 , 需要采取适当的加固措施 , 而大坝整体仍具有 3 ~ 3.5 的安全储备。

熟 , 灌浆的难点主要在成孔与灌浆工艺的控制上。

该工程不用泥浆护壁成孔 , 成孔方法与花管的安装形式为 : 用厚壁套管跟进 , 钢砂钻进 , 尽管效率低一些 , 但成本不高 ; 潜孔锤偏心跟管钻进 , 效率适中 , 但成本高 , 金刚石 SM 植物胶钻进 , 效率高 , 成本适中。

灌浆工艺包括新式的孔口封闭器 , 花管用砂充填 , 水冲露出试段进行灌浆等 , 有一定创新。

砂卵石层灌浆由于地层差异性太大 , 灌浆控制必须根据地层情况、注浆量与压力的变化、地层是否抬动、地表是否漏浆等随时调整各种参数。

当然 , 此次灌浆还存在不少问题 , 如段长的选择是否短些为好 , 是否选择稳定浆液对灌浆效果会更好些 , 等等。

参考文献 :

[1] 赵勇 , 段玉洁 . 渗入式压力灌浆对卵石地基土层加固机理的初步研究 [J]. 四川地质学报 , 1998 , 18 (4) : 285-286.

[2] 石金良 . 砂砾石地基工程地质 [M]. 北京 : 水利电力出版社 , 1991 : 285-286.

(收稿日期 2007-06-20 编辑 : 方宇彤)

3 结 语

- a. 对存在较强浅层卸荷松弛现象的坝基 , 除研究坝肩整体稳定性之外 , 坝基浅层的屈服及稳定性也应是重点考虑的因素之一。
- b. 对小湾坝基超载破坏特性的研究表明 , 坝基的局部安全储备较低 , 但整体安全度较高。说明小湾河床坝基屈服为局部问题 , 小湾高拱坝坝基超载安全度可达 3 ~ 3.5。
- c. 为确保大坝蓄水后拱坝和地基都可靠 , 应采取一定的工程措施提高中下部高程坝基浅表面的安全储备。

参考文献 :

[1] 任青文 , 钱向东 , 赵引 , 等 . 高拱坝沿建基面的破坏和安全度研究 [J]. 水力发电 , 2002 (12) : 10-14.

[2] 钱向东 , 赵引 , 任青文 . 建基面强度对拱坝应力、变形的影响 [J]. 河海大学学报 : 自然科学版 , 2001 , 29 (3) : 95-98.

[3] 陈在铁 , 任青文 . 数值方法在大坝破坏分析中的应用 [J]. 河海大学学报 : 自然科学版 , 2005 , 33 (3) : 296-300.

[4] 张建海 , 范景伟 . 小湾高拱坝坝肩 (基) 动力稳定分析 [J]. 云南水力发电 , 1999 , 16 (1) : 58-61.

(收稿日期 2007-07-02 编辑 : 方宇彤)