

# 三峡坝基灌浆施工主要技术问题及解决措施

李 焰<sup>1</sup> 余常茂<sup>2</sup>

(1. 中国葛洲坝集团公司三峡指挥部 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学土木水电学院 湖北 宜昌 443002)

**摘要** 三峡坝基灌浆施工因地质条件和技术要求等原因有多个技术问题需要解决,其中有 6 个问题较为突出,即基岩微细裂隙的灌浆、断层加固、帷幕钻孔涌水灌浆、帷幕孔口段灌浆压力的提高、浅层化学灌浆和找平混凝土封闭法固结灌浆等,通过试验研究,分别采用了湿磨细水泥浆材灌浆、复合灌浆、浓浆+稀浆方式待凝、提高孔口段灌浆压力到幕前水头的 2 倍、采用丙烯酸盐灌浆和改进阻塞方式、加强抬动观测防止抬动等措施,并以三峡二、三期工程的大坝基础固结灌浆和帷幕灌浆施工技术为例,介绍了具体措施和施工效果。

**关键词** 灌浆施工 基础处理 三峡水利枢纽

中图分类号 TV543

文献标识码 A

文章编号 1006-7647(2007)01-0031-05

**Main technical problems in dam foundation grouting construction of Three-Gorges Project and measures for their treatment** //LI Yan<sup>1</sup>, YU Chang-mao<sup>2</sup>(1. Three-Gorges Project Headquarters, China Gezhouba Group Corporation, Yichang 443002, China; 2. College of Civil & Hydroelectric Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** Owing to the complicated geological conditions and high requirement of techniques in dam foundation grouting construction of the Three-Gorges Project, there are some technical problems needed to be solved, mainly including minute fissure grouting in foundation rock, fault reinforcement, curtain grouting method suitable for water rushing during boring, enhancement of curtain grouting pressure at orifices, shallow layer chemical grouting, closed consolidation grouting of concrete, and so on. Based on experimental study, some measures were taken, such as wet milling cement grouting, composite grouting, dense grouting and thin grouting combined mode for concrete coagulation, enhancement of curtain grouting pressure twice at orifices, adoption of chemical curtain, improvement of blocking mode, strengthening of raising observation, etc.. With the application of the solidification grouting and curtain grouting techniques to dam foundation construction at the second and third stages of the Three-Gorges Project taken as an example, the effects of above techniques were introduced.

**Key words:** grouting construction; foundation treatment; Three-Gorges Project

三峡坝基灌浆施工主要技术问题有:①基岩微细裂隙的灌浆;②断层加固;③帷幕钻孔涌水灌浆;④帷幕孔口段灌浆压力的提高;⑤浅层化学灌浆;⑥找平混凝土封闭法固结灌浆。其中,前 3 个是由于三峡工程特定固有的坝地质条件和施工条件;第 4、5 两个则是为了落实国务院质量专家组的意见,第 6 个源于三峡工程重要结构部位混凝土(如基础约束区混凝土)技术要求,必须在设计规定的间歇期内连续均匀上升,不得出现薄层长间歇的情况。

针对这 6 个技术问题,三峡工程通过研究、试验和实践,取得了可借鉴的成功经验。

## 1 灌浆施工技术要求

### 1.1 灌浆布置

根据坝踵、坝趾的应力分布和坝地质条件,设

计在坝基上、下游各 1/4 左右范围内布置固结灌浆对坝基进行加固处理。由于基础灌浆可灌性差,地下水疏排困难等,坝基渗控布置设计采取常规抽排和封闭抽排两个基本方案。

### 1.2 施工技术标准

a. 固结灌浆。灌浆压力按规定公式逐段计算,最大 0.8 MPa,灌后合格标准为基岩透水率  $q \leq 3 \text{ Lu}$ 。物探测试检查合格标准为:每组物探测试孔的灌后物探平均波速一般应大于 5 000 m/s,95% 的测点波速不小于 4 000 m/s。

b. 帷幕灌浆。孔口段灌浆压力二期设计 1.0 ~ 1.5 MPa,后修改为 2.5 ~ 4.0 MPa;三期 1.5 ~ 2.5 MPa,孔口段以下原设计 4.0 ~ 6.0 MPa,后修改为 3.0 ~ 5.0 MPa,灌后合格标准为基岩透水率  $q \leq 1 \text{ Lu}$ 。

c. 复合灌浆。临船 1 号坝段—升船机坝段孔

口段灌浆压力 2.0~4.5 MPa ,第 4 段以下各段 4.5~6.0 MPa ,升船机上闸首孔口段灌浆压力 1.0~2.0 MPa ,第 3 段及以下各段 4.0 MPa ,灌后合格标准为岩体变形模量  $E \geq 8 \text{ GPa}$  ,基岩透水性  $q \leq 1 \text{ Lu}$ 。

2 主要技术问题及解决措施

2.1 微细裂隙的灌浆

三峡坝址基岩主要为前震旦系结晶岩 ,岩性以闪云斜长花岗岩为主 ,基岩坚硬、完整、强度较高 ,属优良坝基。但坝基岩体微细裂隙发育 ,可灌性差 ,采用何种材料和灌浆措施解决好三峡坝基岩体微细裂隙的可灌性问题 ,是三峡灌浆工程的主要技术问题之一。

早在 1958 年长江水利委员会就开始进行现场灌浆试验研究 ,但因当时灌浆设备、材料和技术等限制 ,试验区检查结果不合格。试验结论为 :三峡坝基采用普通水泥浆液灌浆效果不明显 ,应研究新的适合三峡坝基岩体的灌浆材料<sup>[1]</sup>。

在随后漫长的科学研究和工程建设实践中 ,材料方面先后进行了非颗粒材料(化学浆材)和水泥类浆材(干磨及湿磨细水泥浆材)的研究、开发 ,灌浆工艺方面随着高压灌浆技术的出现 ,三峡工程微细裂隙灌浆有了解决问题的新途径。经反复论证和现场灌浆试验论证 ,采用湿磨细水泥浆材解决三峡坝基微细裂隙的灌浆问题 ,已成为可靠的基本措施。

2.1.1 固结灌浆(常规固结灌浆、固结兼辅助帷幕灌浆)

1998 年 11 月二期工程固结灌浆开始施工后 ,为简化施工、加快施工进度和降低生产成本 ,论证“基本措施”的必要性 ,就固结灌浆浆材问题 ,先在泄洪 19 号坝段下块直接采用 P.O 42.5 水泥浆材(不湿磨)进行灌浆生产性试验 ,目的是检查采用不湿磨浆材灌浆其质量究竟如何。试验历时 7 d ,完成 73 孔、79 段共 967.30 m。试验资料分析见表 1 和表 2。

表 1 固结灌浆试验孔不同透水性率平均值区间段数分序统计

| 灌浆类别        | 孔序 | 孔数/个 | 总段数/段 | 不同透水性率平均值区间段数/段 |        |        |         |          | 透水性率平均值/Lu |
|-------------|----|------|-------|-----------------|--------|--------|---------|----------|------------|
|             |    |      |       | < 1 Lu          | 1~3 Lu | 3~5 Lu | 5~10 Lu | 10~50 Lu |            |
| 常规固结        | I  | 33   | 33    | 5               | 14     | 11     | 2       | 1        | 3.02       |
|             | II | 34   | 34    | 21              | 11     | 2      |         |          | 0.87       |
| 固结兼<br>辅助帷幕 | I  | 3    | 6     | 2               | 1      |        | 2       | 1        | 2.91       |
|             | II | 3    | 6     | 4               | 1      |        |         | 1        | 1.16       |

表 2 固结灌浆试验孔不同单位注灰量区间段数分序统计

| 灌浆类别        | 孔序 | 孔数/个 | 灌浆总长度/m | 总注灰量/kg | 单位注灰量/(kg·m <sup>-1</sup> ) | 总段数 | 不同单位注灰量区间段数/段 |           |            |
|-------------|----|------|---------|---------|-----------------------------|-----|---------------|-----------|------------|
|             |    |      |         |         |                             |     | < 1 kg/m      | 1~10 kg/m | 10~50 kg/m |
| 常规固结        | I  | 33   | 177.21  | 496.86  | 2.80                        | 33  | 13            | 18        | 2          |
|             | II | 34   | 180.68  | 357.39  | 1.98                        | 34  | 21            | 11        | 2          |
| 固结兼<br>辅助帷幕 | I  | 3    | 29.90   | 57.05   | 1.91                        | 6   | 2             | 4         |            |
|             | II | 3    | 30.00   | 56.00   | 1.87                        | 6   | 2             | 4         |            |

从表 1 可以看出 :常规固结灌浆不同透水性率平均值区间段数随孔序的递进 ,小平均值( $q < 1 \text{ Lu}$ )段数增加 ,大平均值( $1 \text{ Lu} < q < 3 \text{ Lu}$  等)段数减少 ;固结兼辅助帷幕灌浆不同透水性率平均值区间段数随孔序递进 ,小平均值段数增加 ,大平均值总段数较少 ,无可比性。

从表 2 可以看出 :常规固结灌浆单位注灰量区间段数随孔序的递进 ,小注灰量( $< 1 \text{ kg/m}$ )段数增加 ,大注灰量( $1 \sim 10 \text{ kg/m}$  等)段数减少 ;固结兼辅助帷幕灌浆单位注灰量区间段数随孔序的递进 ,大注灰量和小注灰量段数的减少、增加均不明显 ,说明受陡倾角裂隙影响 ,深孔灌浆扩散半径有限。

综上试验成果发现 ,固结灌浆采用 P.O 42.5 水泥浆材技术可行 ,可继续扩大生产性试验再验证。试验部位选在泄 18~23 号坝段 ,完成 553 孔、818 灌浆段 ,灌浆总长 4 369.44 m。结论意见是 :质量满足设计要求。

因此 ,从降低成本、方便施工、加快施工进度 ,以及因浆液细度检测频繁、仪器灵敏度高不适应现场环境使用等方面考虑 ,确定一般固结灌浆孔采用 P.O 42.5 纯水泥浆液灌注 ,固结兼辅助帷幕灌浆由于其作用的重要性 ,仍需采用湿磨细水泥浆液灌注。

湿磨细水泥浆液制备工艺流程见图 1 ,即采用 0.5:1 水泥原浆通过 3 台串联的湿磨机(工艺)制备 ,搅拌时间大于或等于 30 s。为改善浆液的流动性 ,按水泥质量的 0.7% 掺入 UNF-5 高效减水剂。细度检测合格标准为 :95% 以上的水泥颗粒最大粒径小于 40  $\mu\text{m}$ 。灌浆工艺为分序加密、孔内循环。

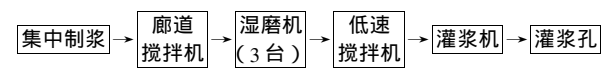


图 1 湿磨细水泥浆液制备工艺流程

2.1.2 坝基帷幕灌浆

与固结兼辅助帷幕灌浆一样 ,二、三期工程坝基帷幕灌浆也有微细裂隙灌浆材料和灌浆工艺问题。

但在上述试验基础上,帷幕施工时直接规定以湿磨细水泥浆液灌注为主。基本方法为:当灌注孔段压水试验漏水率大于  $40\text{ L/min}$  以及采用湿磨细水泥浆连续灌注  $10\text{ min}$  仍大于  $30\text{ L/min}$ 、磨制湿磨细水泥浆液供浆困难时,可优先灌注普通水泥浆,待普通水泥浆注入率小于  $10\text{ L/min}$  后,再改用湿磨细水泥浆灌注。

灌浆工艺为“分序加密、自上而下分段、小口径钻孔、孔口封闭、孔内循环、高压灌浆”。灌浆成果经分析比较(略),各次序孔透水率及单位注灰量符合灌浆分序递减规律,灌浆效果明显。

## 2.2 断层加固

三峡坝基局部存在不同规模的断层、破碎带、裂隙密集带和断裂构造交切带,以及因基坑爆破、卸荷影响带来的浅层裂隙发育等地质缺陷,均将影响建坝基础的整体质量。例如永久船闸、升船机和大坝基础一定范围内,尚存  $F_{215}$ 、 $F_{548}$ 、 $F_{1050}$ 、 $F_{1096}$  等 NEE 组断层,断层构造岩主要为角砾岩、糜棱岩及断层泥,性状差,变形模量仅为  $0.2 \sim 0.5\text{ GPa}$ ,对建筑物某些部位基础应力传递不利,不能满足大坝及建筑物对基础所要求的力学指标。对此类问题采用高压水泥灌浆+化学灌浆的复合灌浆法处理。复合灌浆是三峡灌浆工程的关键技术问题之二。

以  $F_{1096}$  断层为例<sup>[2]</sup>,该断层斜穿永久船闸南坡第五级阀门井,主要出露于南北两侧,在底板上穿过南侧积水井。主断层带上断面波状起伏,沿面附有少量碎裂岩,上断面延伸平直,沿断面分布  $0.1 \sim 0.3\text{ m}$  厚的碎斑岩。上下断面见  $0.5 \sim 1\text{ cm}$  厚的糜棱岩,局部厚约  $3\text{ cm}$ 。两断面之间为主断层带,构造岩一般为黄绿色,均呈半疏松~疏松状,胶结差,风化剧烈。主断层带两侧分布有宽  $0.8 \sim 3\text{ m}$  不等的裂隙密集带,与上断面相接的为闪云斜长花岗岩裂隙密集带,下盘为辉绿岩脉。由于该断层规模较大、性状差,地下活动剧烈,鉴于结构受力及阀门井安全运行的要求,采用了高压旋喷加固+深孔化学灌浆、应变跟踪监测等施工技术进行处理。处理结果:断层岩体整体强度及各项物理力学指标均得到提高,达到了变形模量  $E \geq 8\text{ GPa}$ (测点占总测点百分比不大于  $85\%$ )、灌后压水透水率  $q \leq 1\text{ Lu}$  等多方面整体综合评定的设计技术要求,改善了阀门井的结构受力。

又如临船 1 号坝段—升船机坝段的  $F_{23}$  与  $F_{215}$  断层交界处及升船机上闸首  $F_{548}$  断层处,设计为提高断层及断层影响带帷幕幕体的防渗性能和坝基岩石的强度,增加布置帷幕化学灌浆孔,采用湿磨细水泥浆+CW 型环氧树脂浆液复合灌浆加固,段长  $5\text{ m}$ ,分两序施工。CW 配比为 A 组分与 B 组分之比为

6:1。灌后布置检查孔 8 个,检查压水 71 段,透水率最大  $0.29\text{ Lu}$ ,芯样物理力学试验,平均抗压强度在  $25.4 \sim 85.2\text{ MPa}$  之间,静态变形模量测试变形模量在  $2.4 \sim 58.8\text{ GPa}$  之间,弹性模量在  $3.8 \sim 70.2\text{ GPa}$  之间,满足设计要求,岩体声波波速灌后较灌前提高  $5.8\% \sim 8.2\%$ ,灌浆效果明显。

## 2.3 帷幕钻孔涌水灌浆

二期工程帷幕灌浆施工时,右纵坝段和泄 4 坝段—左导墙坝段均出现钻孔涌水现象,据测量,主帷幕涌水频率  $80\% \sim 100\%$ ,涌水压力  $0.01 \sim 0.03\text{ MPa}$  的占  $85\%$ ,涌水量为  $0.8 \sim 12\text{ L/min}$ ;封闭帷幕及其他涌水频率  $30\% \sim 80\%$ ,涌水压力  $0.01 \sim 0.08\text{ MPa}$  的占  $90\%$ ,涌水量为  $0.3 \sim 0.8\text{ L/min}$ 。

经分析,涌水原因首先是三峡二期大坝与电站工程是在高围堰保护下的葛洲坝水库中施工,堰外江水位高程  $66\text{ m}$  以上,几乎四面环水。再从岩体构造与渗透条件看,岩体构造与渗透条件控制着地下水的运移。主帷幕泄 1~10 号坝段位于坝基最大的 LW6 深厚透水带,封闭帷幕右端涌水区则与 LW4 透水带有关。各涌水区通常与断层及其影响带、岩脉及长大裂隙系统有关。

如何灌好涌水孔是三峡灌浆工程的主要技术问题之三。为此二期工程主要采取了两个措施。

a. 待凝措施。2001 年 1 月前以单位注灰量大小为标准(单控)判定是否待凝,若待凝则采取全孔浓浆待凝方式,最长  $48\text{ h}$ 。其效果较好但出现的问题是:有的孔往往多段涌水需多段待凝、反复重复扫孔,严重影响施工进度。为此,2001 年 4 月经专题研究改为:①单位注灰量小于  $3\text{ kg/m}$  的孔段不待凝,大于或等于  $3\text{ kg/m}$  的待凝;②待凝由  $24\text{ h}$  或  $48\text{ h}$  一律减为大于或等于  $12\text{ h}$ ;③不待凝灌浆段不得连续超过 3 段,即连续出现 2 段不需待凝时,紧接的第 3 段必须待凝;④待凝由全孔浓浆方式改为浓浆+稀浆方式,即孔底向上  $10\text{ m}$  为浓浆, $10\text{ m}$  至孔口为稀浆;⑤待凝后扫孔至灌浆段底,观测若仍涌水,则再测涌水量和压力后进行复灌,若无涌水,钻灌下一段。此方法经实施后其灌浆效果不仅比修改前好而且还减小了扫孔事故频率,大大提高了工效。

b. 加排、加深措施。在涌水孔段频繁出现的坝段全面改为 2 排孔布置,再根据先导孔加深钻孔补充勘探资料,将帷幕孔加深至规定的高程。

三期工程帷幕灌浆施工时,仍在高水头下进行,仍有涌水孔段,在总结二期工程经验基础上,待凝方式同二期,采取浓浆+稀浆方式待凝,待凝标准则改为涌水压力+注灰量(双控)判定。具体为:①涌水压力小于  $0.05\text{ MPa}$  或单位注灰量小于  $3\text{ kg/m}$  时,可

不待凝 ,但在此条件下不待凝孔段连续达到 3 段时 ,则第 3 段必须待凝 ;②涌水压力在 0.05 ~ 0.1 MPa 或单位注灰量在 3 ~ 20 kg/m 范围时 ,待凝 12 h ;③涌水压力大于 0.1 MPa 或单位注灰量大于 20 kg/m 时 ,待凝 24 h ;④涌水孔段经上述措施处理后 ,重新扫孔至该段孔底 ,观测涌水情况。如无涌水 ,可直接进行下段钻灌 ,如仍有涌水 ,再次测量涌水流量、涌水压力 ,并进行复灌。复灌时 90 min 前使用湿磨细水泥浆液灌注 ,90 min 后使用湿磨细水泥掺加水玻璃浆液灌注 ,浆液胶凝时间按不小于 30 min 控制 ,其掺量通过现场试验确定。

涌水孔段灌浆成果分析以三期主帷幕部分涌水孔段为例 ,见表 3 ,从表中可看出 ,随孔序增加 ,涌水量、透水率、平均单位注灰量等均逐序递减 ,说明灌浆效果良好 ,待凝方式可行。

2.4 提高孔口段压力灌浆

根据渗流场计算 ,三峡工程帷幕灌浆压力与所挡水头不匹配 ,又据灌浆资料统计 ,孔口段单位注灰量偏小 ,平均只有 2.44 kg/m。三峡工程帷幕大部分为单排 ,帷幕的防渗性能令人担忧 ,为此三峡高坝帷幕孔口段灌浆压力提高到幕前水头的 1.5 ~ 2 倍的问题被提出。为慎重起见 ,按质量专家组意见决定先进行孔口段灌浆压力升压试验 ,据试验成果情况再应用于生产中。如何做好升压试验施工 ,获得真实、准确的数据 ,是灌浆工程的主要技术问题之四。

试验分 3 个部位共 10 个孔 ,上部混凝土压盖约 75 ~ 90 m。基岩内段长设计要求采用 3 段制和 5 段制两种 ,段长与压力对应关系见表 4。试验施工程序如下 :钻抬动观测孔、埋观测装置→钻灌试验孔第 1 段→埋孔口管(待凝 3 ~ 5 d)→钻灌试验孔第 2、3(4、5)段。

试验成果 :10 个孔共钻灌 34 段 ,水泥平均单位注灰量为 4.68 kg/m ,与已施工完成的帷幕情况相比略有增加 ,但无明显区别。抬动观测 :压水或灌浆时抬动观测抬动最大值 42 μm ,102 μm ,19 μm 均小于设

计值 200 μm。  
结论意见 :三峡工程在 80 m 混凝土压重条件下 ,帷幕灌浆首段最大压力可以慎重地提高到 3.5 MPa。但压力的递增速度不宜太快 ,宜控制在每 10 min 0.5 MPa 以内较为合适。

根据试验成果 ,设计将所有尚未施工的帷幕孔孔口段灌浆压力提高到表 4 所示的压力水平 ,对已灌浆部位孔口段压力不足 2 倍水头的 ,增加布置了一排浅层升压灌浆直孔(压力 3.5 ~ 4.0 MPa) ,孔深 8 m ,不装孔口管 ,分 3 段钻孔、压水和灌浆 ,段长分别为 2 m ,1 m ,5 m ,对应压力为 3.5 MPa ,4.0 MPa ,4.0 MPa。

2.5 帷幕浅层化学灌浆

根据三峡工程具体情况 ,二期工程凡灌前压水透水率 1 ~ 3 Lu、单位注灰量不大于 1 kg/m 者和透水率 3 ~ 5 Lu、单位注灰量不大于 5 kg/m 者以及透水率不小于 5 Lu、单位注灰量不大于 10 kg/m 者 ,均被认为是“大耗水、小单位注灰量”问题。据统计 ,存在上述情况的共有 165 段 ,其中孔口段(指每孔第 1 ~ 3 段 ,共 5 m 厚岩体)占 149 段 ,为总数的 90%。为此 ,采用了化学浆材丙烯酸盐灌浆处理。如何灌好三峡帷幕的化学灌浆 ,是三峡灌浆工程的主要技术问题之五。

具体措施为 :在帷幕轴线上布置丙烯酸盐化学灌浆孔 ,且重点在挡水水头大于 100 m 的帷幕异常孔两侧和建基面突变部位上弯处和顺河向断层发育部位 ,以及封闭帷幕集中发生部位。施工方法 :钻孔一律采用入岩 5 m 直孔 ,分 2 序施工 ,分 2 段检查压水 ,全孔 1 段纯压式灌浆。

丙烯酸盐灌浆完成后 ,共布置 7 个检查孔检测灌浆效果 ,透水率为 0.01 ~ 0.02 Lu ,均满足设计要求 ;从可灌性看 ,各次序孔灌浆起始吸浆率均达同孔段吸水率的 70% 以上 ,说明丙烯酸盐浆材黏度低 ,在微细裂隙岩体中可灌性好 ;扬压力观测在泄洪 18 坝段 2003 年 5 月至 2004 年 2 月间 ,幕前扬压力为 0.64 ~ 0.86 MPa ,幕后扬压力为 0.01 ~ 0.021 MPa ,表

表 3 涌水孔段压水、灌浆成果统计

| 孔序  | 灌浆总段数/段 | 涌水段数/段 | 总涌水量/<br>(L·min <sup>-1</sup> ) | 涌水段平均<br>透水率/Lu | 涌水段<br>总注灰量/kg | 涌水段平均单位<br>注灰量/(kg·m <sup>-1</sup> ) | 最大涌水<br>压力/MPa | 最大涌水量/<br>(L·min <sup>-1</sup> ) |
|-----|---------|--------|---------------------------------|-----------------|----------------|--------------------------------------|----------------|----------------------------------|
| I   | 113     | 16     | 285.70                          | 0.35            | 1033.15        | 3.32                                 | 0.01           | 0.8                              |
| II  | 91      | 16     | 12.31                           | 0.31            | 432.81         | 2.74                                 | 0.01           | 1.5                              |
| III | 167     | 34     | 10.53                           | 0.25            | 540.21         | 2.08                                 | 0.01           | 0.6                              |

表 4 升压试验孔段长及压力

| 试验部位      | 段长/m  |       |       |       |       | 压力/MPa    |           |           |           |           |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|           | 第 1 段 | 第 2 段 | 第 3 段 | 第 4 段 | 第 5 段 | 第 1 段     | 第 2 段     | 第 3 段     | 第 4 段     | 第 5 段     |
| 左非坝段      | 0.5   | 0.5   | 1.0   | 1.0   | 2.0   | 2.5 ~ 4.0 | 2.5 ~ 4.0 | 2.5 ~ 4.0 | 3.0 ~ 4.5 | 4.5 ~ 5.0 |
| 泄洪坝段左导墙坝段 | 2.0   | 1.0   | 2.0   |       |       | 2.5 ~ 4.0 | 3.0 ~ 4.5 | 4.5 ~ 5.0 |           |           |
| 左厂坝段泄洪段   | 2.0   | 1.0   | 2.0   |       |       | 2.5 ~ 4.0 | 3.0 ~ 4.5 | 4.5 ~ 5.0 |           |           |

明扬压力大幅下降。

2.6 找平混凝土封闭法固结灌浆

三峡工程混凝土浇筑与固结灌浆工期矛盾突出,重要结构部位的混凝土在规定间歇期内连续均匀上升、不出现薄层长间歇要求严格,根据主体工程固结灌浆试验成果,对岩体完整、变形模量较高的基岩以及重要结构部位的固结灌浆,要求采用无盖重灌浆方式,对岩体不完整、变形模量较低的基岩和建基面较陡的部位的固结灌浆,要求采用有盖重灌浆方式。有盖重为传统的成熟工艺,无盖重则在找平混凝土封闭条件下进行。

找平混凝土的作用主要是嵌缝堵漏,约束地层表面裂隙,阻止其张开,防止灌浆污染基面,避免第二次清理岩面。考虑到建基面开挖后有起伏差,找平混凝土浇筑原则上填平低凹的坑槽,凸起的基岩外露将混凝土分割成不连续、大小不等的块状(图2),防止出现长、薄、尖的混凝土板。找平混凝土标号一般为C<sub>90</sub>200、二或三级配的基础混凝土。如何改进传统的阻塞方式,在找平混凝土封闭面阻塞灌好、防止灌浆过程中基岩抬动,是三峡灌浆工程的主要技术问题之六。



图2 找平混凝土浇筑示意图

经摸索阻塞方式改进措施为 ①当混凝土厚度较大(超过50 cm)时,第1段阻塞器的中点在混凝土与基岩分界面处。②混凝土厚度较薄(不超过50 cm)及裸露基岩部位的孔段,第1段自基岩面处开始阻塞,阻塞不住时,可逐渐下移(不可上移),直至能阻塞封闭灌浆段止。射浆管距孔底不超过50 cm。③第2段及以下各段均阻塞在上段段底以上50 cm,阻塞不住时,上移(不得下移)阻塞器直至能封闭灌浆段止,并保证射浆管距孔底不超过50 cm。

防止基岩抬动措施为每个坝块均布置2或3个抬动观测孔加强观测。

找平混凝土封闭法固结灌浆成果分析以三期工程1B标为例,见表5。从表5可以看出:压水试验透水率符合“随着灌浆次序的增加而逐序减小”的

表5 常规固结孔和辅助帷幕孔压水、灌浆成果统计

| 类别   | 孔序 | 孔数/个 | 透水率平均值/Lu | 单位注灰量/(kg·m <sup>-1</sup> ) |
|------|----|------|-----------|-----------------------------|
| 常规固结 | I  | 944  | 15.19     | 11.63                       |
|      | II | 904  | 0.63      | 6.07                        |
| 辅助帷幕 | I  | 69   | 42.86     | 9.20                        |
|      | II | 61   | 0.16      | 8.59                        |

递减规律,灌浆单位注灰量符合“随着灌浆次序的增加,单位注灰量逐序减小”的递减规律。

灌后质量检查以检查孔压水为主,共布置77个检查孔,压水80段,透水率小于或等于3 Lu的有79段,占总段数的99%,透水率大于3 Lu的为1段,占总段数的1%,说明灌浆效果良好。

3 结 语

a. 三峡坝基岩体采用湿磨细水泥浆材解决微细裂隙的可灌性问题是成功的,并取得了宝贵的施工经验,后续工程需注意的问题是,湿磨浆材实际仅用在防渗灌浆项目上,一般固结灌浆未使用,断层加固处理的方法有多种,复合灌浆是其中一种,虽技术复杂但值得推广,其灌浆材料及工艺具体工程应具体研究,涌水孔段的浓浆+稀浆待凝方式和单、双控判定标准在三峡工程是合适、成功的,其中单、双控判定标准各有利弊,其他工程应根据自己的要求具体确定。

b. 解决帷幕孔口段渗流水力梯度最大但灌浆压力最小的问题,通常的办法是在建基面以下做固结灌浆和设置辅助帷幕,以增加防渗层的厚度。三峡工程在此基础上又提高孔口段灌浆压力并应用到三期工程中,无疑是一尝试,该尝试为灌浆帷幕的设计提供了新的思路。

c. 帷幕孔口段5 m厚岩体的丙烯酸盐化学灌浆,在三峡工程微细裂细发育的地层,而且在水泥灌浆之后仍有较好的可灌性,说明材料可灌性好。据观测资料显示扬压力大幅度下降,说明灌浆效果显著。

d. 传统的无盖重灌浆是在完全裸露的岩面上进行,三峡工程则在此基础上浇筑了找平混凝土进行封闭,不仅起到嵌、堵、防污染等作用,而且解决了与混凝土浇筑工期间的矛盾,避免了混凝土长间歇,是成功的范例,相应的阻塞和防抬动措施,为确保灌浆质量满足设计要求提供了可靠的保证条件,值得借鉴。

参考文献:

[1] 林文亮. 长江三峡水利枢纽坝基防渗灌浆工程关键技术问题探讨[C]/夏可风. 2004 水利水电地基与基础工程技术 2004 水利水电地基与基础工程学术会议论文集. 呼和浩特: 内蒙古科学技术出版社, 2004: 1-12.

[2] 祝红, 陈琪新. 三峡永久船闸 F<sub>1096</sub> 断层处理设计与施工的主要特点[C]/夏可风. 2004 水利水电地基与基础工程技术 2004 水利水电地基与基础工程学术会议论文集. 呼和浩特: 内蒙古科学技术出版社, 2004: 41-44.

(收稿日期 2006-06-29 编辑 熊水斌)