

灌浆技术在小浪底主坝工程中的应用

14

李立刚

TV543

50-52

(小浪底水力发电厂, 河南 济源 454681)

TV64

摘要:小浪底水利枢纽工程采用许多国际先进的施工设备和施工技术,在主坝基础灌浆方面,采用了自动记录仪和稳定浆液,调整结束标准,改变计量单位,固结灌浆采用新的检查方法,并成功地进行了GIN灌浆法生产性试验,推动了国内灌浆技术的发展。

关键词:灌浆技术;稳定浆液;GIN法;小浪底工程

中图分类号:TV543

文献标识码:B

文章编号:1006-7647(2000)05-0050-03

黄河小浪底水利枢纽主坝为154m高的壤土斜心墙堆石坝,轴线长度1667m,填筑方量5184万 m^3 。坝址区地质条件复杂,右岸岩层主要为二叠纪上统和三叠纪下统砂岩和粘土岩互层,左岸山体主要为二叠纪砂岩夹软弱薄层,受F1, F236, F238等大断层及多处小断层的切割破坏,坝基岩石破碎,裂隙发育,渗透系数普遍较大。在整个壤土心墙区按3m×3m的网格状、孔深5m垂直于基岩面布置固结灌浆,帷幕灌浆为单排孔,孔距2m,在地质条件较差地段和断层区增加帷幕排数,排距2m,实施最大施工深度108m。该项工作于1995年10月开始,至1999年11月完工,完成固结灌浆6.7万m、帷幕灌浆7.2万m。

小浪底工程为世界银行贷款,采用国际招标,由国际承包商承建的大型水利工程,其中主坝基础灌浆由法国地基建筑公司和中国水电基础局联营体分包施工。国际承包商的引入,带来了先进的施工管理方法和施工技术,推动了国内施工技术与施工管理水平的提高,对国内灌浆技术起到一定的指导作用。

1 灌浆自动记录仪的使用

国内灌浆采用自动记录仪始于90年代初,但推广进展较慢。小浪底主坝基础灌浆全部采用自动记录仪,型号为J31。自动记录仪与压力传感器和流量传感器配套使用,其主要性能指标如下:压力范围0~9.99MPa;流量范围0~99.9L/min;数据采集频率4次/s;打印时间间隔2min, 5min, 10min;记录存储容量36~180h;工作电压220V(50Hz);主机外形尺寸550mm×450mm×200mm。

自动记录仪在灌浆过程中完成数据采集与处

理,在屏幕上显示灌浆压力、流量、水灰比及注入水泥总量,按设定时间间隔打印出时间、平均压力、最大压力、流量和水灰比。当灌浆结束时,自动计算并打印注入水泥总量、浆液总量和单耗水泥量,还打印出灌浆压力和流量随时间变化的过程曲线。在压水过程中,记录压力和流量,计算出最后一点的吕容值并打印出来。

采用自动记录仪有以下优点:①提高精确度。自动记录仪每秒采取4个数据,比压力表读数和用直尺测量浆液体积的精确度大大提高;②自动记录仪把平均压力作为有效压力,更合理地反映了灌浆压力;③使用自动记录仪避免了许多人为因素,对保证资料的真实性和确保工程质量起到了很大作用。

2 稳定浆液的使用

就水泥灌浆而言,稳定浆液是指在水泥浆液中掺加一定量的膨润土和外加剂的中等浓度的浆液,其主要特性是2h析水率小于5%。国外一些专家认为,中等浓度的稳定浆液在流动时属于宾汉流体(指不稳定的悬浮液,可发生沉淀),其特性用粘滞度和凝聚力(屈服强度)两个参数来描述。粘滞度制约流动速率,而凝聚力则制约最大扩散距离。实际工程中使用的稳定浆液是一种较小析水率、较低粘度的中等浓度的浆体。

小浪底基础灌浆采用稳定浆液主要是由于地质条件较差确定的。技术规范规定由水灰比5:1的纯水泥浆液开始,逐级变浓,结束标准与规范^[1]要求基本一致。但实施时因地质条件较差,串冒浆严重,不但造成极大的浪费,且严重影响灌浆效果。根据这种

情况,受GIN灌浆方法的启示,决定使用水灰比为0.7:1,掺加一定量膨润土和缓凝型减水剂的稳定浆液,其配合比及性能指标如表1所示。

表1 稳定浆液配合比及性能指标

编号	配合比/(kg·m ⁻³)				性能指标			
	水泥	水	膨润土	减水剂	碱	密度	粘度	2h析水率/%
				Sika-R4	NaHCO ₃	/(g·cm ⁻³)	/s	/Pa
BC05	965	675	21.5	11.4	0	1.67	34.7	3.2
GM001	978	669	19.54	11.72	0.29	1.67	36.2	1.1

注:1. BC05 配比为 R525 铁门水泥, GM001 配比为 R525 涌池水泥;2. 粘度为马氏漏斗计所测值。

我们认为采用中等浓度单一配比的稳定浆液具有以下优点:①稳定浆液凝聚力小,水泥颗粒在流动中不易沉淀,不致于过早堵塞裂隙,具有良好的可灌性;②浆液水泥含量高,与岩石胶结紧密,水泥结石强度高,帷幕耐久性好;③浆液在裂隙中流动时压力降低较快,减少了发生水力劈裂和岩层抬动的风险;④稳定浆液由制浆站集中配制,简化了制浆工艺,加快了施工进度,减少了浆液变换人为因素的影响,有利于浆液质量控制。

小浪底工程首次大范围成功地使用稳定浆液,说明稳定浆液在基础灌浆中有很好的发展前景,但不能说稳定浆液也适用于其它工程。事实上,在小浪底工程的其它灌浆中(如隧洞围岩灌浆)仍然采用了常规的纯水泥浆液和较稀(水灰比1:1)的稳定浆液。基础灌浆选择何种浆液,一定要结合本工程的地质特性,并结合室内和现场灌浆试验才能确定。

3 结束标准的调整

由于使用中等浓度的稳定浆液,长时间灌浆极易发生铸管等孔内事故,又由于小浪底基础岩石破碎、构造裂隙发育,浆液扩散距离较远,极易发生水力劈裂和岩层抬动。为限制浆液扩散距离,结合GIN灌浆法的原理,确定了不同于技术规范要求的灌浆结束标准:①在规定压力下,注入率小于1L/min,继续灌注30min,灌浆可以结束;②当注入量在200~1000L/m之间,如果灌浆压力达到规定值,继续灌注30min,灌浆可以结束;③当注入量在1000~2000L/m之间,要求间歇灌浆,当达到规定压力或注入量超过2000L/m时,灌浆可以结束。

实际施工结果表明,使用稳定浆液并调整结束标准,给施工创造了有利条件,加快了施工进度,降低了水泥消耗,同时施工质量完全达到技术规范要求。帷幕灌浆压水试验合格率(小于5Lu)为94.16%,工程质量优良。

4 计量单位的改变

在国内以往的灌浆工程中,以钻孔和灌浆的每

米单价作为计量单位,而材料消耗包含在每米钻灌单价之中。小浪底主坝基础灌浆采用工程量和材料消耗量分别计量的方法,共计16项,主要内容如表2所示。

表2 主坝基础灌浆计量单位

名称	单位
固结灌浆孔	m
帷幕灌浆孔	m
检查孔和勘探孔	m
压水试验	时间
	卡塞
灌浆	浆量
	水泥量
	膨润土
	外加剂
	砂
	卡塞
孔口管安装	个
基础抬动观测孔	个

小浪底主坝基础灌浆采用以上计量单位,合理地反映了灌浆工作发生的工程量和材料的消耗量,对承包商的施工大大降低了风险,同时,承包商在遇到较大吃浆量时,也会按规定的结束标准施工,有效地保证了工程质量。

5 固结灌浆检查方法

按照技术规范要求,固结灌浆完成后,布置检查孔单点法压水试验检验灌浆效果(小于5Lu为合格)。在施工开始阶段,出现了检查孔和加密孔反复施工的情况,严重影响施工进度。为了避免这种情况,加快施工进度,除采取相关的措施外,根据世界银行特别咨询检查团的建议,确定采用水泥消耗量作为评价固结灌浆效果的标准和Ⅲ序孔的布置原则:如果4个相邻Ⅰ、Ⅱ序孔的平均水泥消耗量小于50kg/m,则认为该处的固结灌浆已合格;如果大于50kg/m,则在该4个孔中间布设一个Ⅲ序孔,不再进行检查孔和Ⅳ序孔的施工。

为了验证上述施工方法是否满足技术规范要求,在左岸山体固结灌浆Ⅲ序孔完成后,有9个区域共布置了24个检查孔,压水试验合格率(小于5Lu)为100%,其中吕容值为0的有17个,占70.83%,最大吕容值为3.35Lu。由此看来,固结灌浆检查方法是可行的,完全满足技术规范要求,且大大加快了施工进度。

6 GIN灌浆技术的应用

GIN灌浆法由瑞士专家隆巴迪(Lombardi)提出,GIN(grouting intensity number)即灌浆强度值,其含义为单位孔段上消耗的灌浆能量,可以用灌浆压力p

(MPa)和单位注入量 $V(\text{L}/\text{m})$ 的乘积来表示:

$$\text{GIN} = p \cdot V \quad (1)$$

也可以表示为

$$\text{GIN} = p \cdot C$$

式中 C 为单位灌浆长度的注入水泥量。

GIN 灌浆方法的要点是:在整个灌浆过程中,以中低速注入单一配比、具有宾汉流体特性的中等稠度的稳定浆液,根据 GIN 曲线,随时监视灌浆压力和注入量,监视 $p \sim C$ 灌浆过程曲线在选定的 GIN 曲线图上的运作趋势,根据 $p \sim C$ 曲线和 $(F/p) \sim C$ 可灌性曲线(F 为浆液流量),判断灌浆工作的完成情况,随着注入量的增加,压力缓慢上升,当注入量达到预定的限值,或压力达到预定的限值,或单位注入量与压力的乘积达到预定的限值(GIN 值),即可结束灌浆。

小浪底 GIN 灌浆法生产性试验在主坝右岸 2 号灌浆洞内,2 号灌浆洞帷幕轴线长 110 m,将其中的轴线长 42.5 m,共 28 个帷幕孔进行 GIN 法灌浆试验,计进尺 1564 m。在灌浆过程中,微机屏幕显示时间、压力、流量、注入总量、水泥单耗量、GIN 值等参数,同时显示灌浆压力和时间($p \sim t$)、流量和时间($F \sim t$)、累计注入量和时间($C \sim t$)、可灌性和时间($(F/p) \sim t$)、可灌性和注入水泥量($(F/p) \sim C$)、灌浆压力和注入水泥量($\text{GIN} = p \cdot C$)共 6 种过程曲线,在灌浆结束后,将这些参数和曲线打印出来。

本次试验采用的最大灌浆压力、GIN 值和最大注入量如表 3 所示,灌浆结束标准为达到 GIN 值时,流量小于 $2 \text{ L}/\text{min}$,持续 10 min 结束。

表 3 GIN 法试验强度指标

段次	孔深 /m	最大压力 /MPa	GIN 值/ (MPa·L·m ⁻¹)	GIN 值/ (MPa·kg·m ⁻¹)	单位注入量 (L·m ⁻¹)
1	0~2	0.7	80~120	78~117	185
2	2~5	1.0	80~120	78~117	185
3	5~10	1.5	80~120	78~117	185
4	10~15	2.0	80~120	78~117	185
5	15~20	2.5	80~120	78~117	185
6	20~25	3.0	150~200	146~194	200
7	25~30	3.5	150~200	146~194	200
8	30~35	3.5	150~200	146~194	200
9	35~40	3.5	150~200	146~194	200
10	40~45	3.5	200~250	194~243	250
11 以下	>45	3.5	200~250	194~243	250

在灌浆结束后,GIN 法试验区共布置 6 个检查孔,进行压水试验 64 段,合格率(小于 5 Lu)为 100%,最大吕容值为 2.96 Lu 。GIN 法平均水泥单耗量为 $149 \text{ kg}/\text{m}$,是常规段灌浆法(水泥单耗量为 $275 \text{ kg}/\text{m}$)的 54.4%;每孔段平均纯灌浆时间为 92 min,是常规段灌浆法(纯灌浆时间为 127 min)^[2] 的 72.4%。由此可以得出:本次 GIN 法采用的参数是合

适的,工程质量满足规范要求,且在节省材料和工期上有巨大的经济效益,是值得推广应用的。

参考文献:

- [1] SL62-94 水工建筑物水泥灌浆施工技术规范[S].
- [2] 赵存厚,韩伟.小浪底水利枢纽 2 号灌浆洞 GIN 法帷幕灌浆试验[A].见:孙国伟,黄河小浪底建设工程技术论文集[C].北京:中国水利水电出版社,1997.114~121.

(收稿日期:2000-02-29 编辑:张志琴)

(上接第 12 页)

3.5 推进水土保持生态环境建设

甘肃省水土流失面积 38.9 km^2 占全省土地总面积的 85.6%,水土保持为甘肃省治理了水土流失,生态环境明显改善,初步形成“山顶林草带帽,山坡梯田缠腰,沟底坝库穿靴”的治理方式,拦水效率达 86%,拦泥效率达 97%。土地产出率有了大的提高,使跑水、跑肥、跑土的“三跑田”,变为“三保田”,改善了农业生产条件。

甘肃今后实施以建设秀美山川为目标,以治理水土流失为中心,以退耕还林(草)为重点,以基本农田建设为基础,以小流域为单元,实行山水田林路统一规划,综合治理的战略,工程措施、生物措施和耕作措施合理配置,实施分区防治战略,依靠科技进步加强管理,突出保护,努力为西部大开发和全国经济社会的可持续发展创造良好的生态环境。

(收稿日期:2000-07-14 编辑:马敏峰)

(上接第 43 页)

区域性特殊类土,具有天然含水量高、孔隙比大、透水性低、中压缩性、高灵敏度、抗剪强度低、承载力低,饱水状态下还具有触变、流变等特性,对工程的地质条件有着特殊影响,一般工程上仅根据颗粒分析或塑性图定名为粉质壤土或粉质粘土,而缺乏深入细致的工程特性研究,对该土对工程造成危害重视不够,在施工中和工程运行中发生较大危害和破坏,甚至无法施工或采取防治处理措施不够经济合理。随着大量的工程实践和试验,总结该类土的鉴定方法、形成成因、工程特性和防治措施等,加强这方面的研究对未来的工程建设有着积极的意义。

(收稿日期:1999-03-22 编辑:张荣安)

