

文章编号: 1672-3031 (2004) 03-0221-05

## 某电站坝基固结灌浆效果评价与分析

符平<sup>1</sup>, 赵卫全<sup>1</sup>, 杨晓东<sup>2</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院 工程安全监测中心, 北京 100044; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044)

摘要: 大坝基础经固结灌浆处理后岩体的变形模量会有相当程度的提高, 其值通常采用孔壁变模仪进行测试, 并通过孔壁声波波速进行验证, 但其测试值受到地质条件、裂隙发育、孔壁质量、测试方法等因素的影响, 与岩体真实变模值存在一定的误差。本文从测试方法、灌浆过程等方面分析了某工程钻孔变模测试值偏低的原因, 通过类比推证了在陡倾裂隙发育地层对穿声波波速和平板载荷模量相关性较好, 更能反映地层岩体的整体变形模量, 分析论证了在大规模灌浆处理后岩体的变模值将比灌浆试验时有相当程度的提高。

关键词: 固结灌浆; 效果分析; 变形模量

中图分类号: TV543

文献标识码: A

对大坝基础进行固结灌浆, 能有效提高和改善坝基岩体的完整性、均质性、强度和不透水性, 而且施工方便、造价低, 因此, 几乎每一座大坝的基础都进行过灌浆处理。灌浆效果检查通常采用压水试验、声波测试(孔壁声波和对穿声波)、钻孔变形模量、大型平板载荷试验(变形模量)等方法进行分析、评价。钻孔声波测试由于其测试方便、仪器简单, 在工程中得到大量应用, 但将其转换成变形模量值时存在一定的误差; 钻孔变形模量值仅反映孔壁附近的变形能力, 且容易受孔壁质量、裂隙发育方向等因素的影响; 大型平板载荷试验能反映岩体某点的现场变形能力, 是检查灌浆效果最直接的方法, 但其施工复杂, 造价较高, 且只能反映某点附近的变形能力。

本文从测试方法、灌浆过程等方面分析了本次灌浆试验工程中钻孔变模值偏低的原因, 类比推证了在陡倾裂隙发育的地层中, 对穿声波和平板载荷试验数值更能反映岩体实际的变形模量值。

### 1 固结灌浆试验

某水电站的坝址位于轴向 $310^{\circ} \sim 335^{\circ}$ 的立煤湾倾伏背斜的下游倾伏端部位, 岩层呈膝状挠曲, 节理裂隙发育, 岩体完整性相对较差。研究表明, 在河床右侧坝段, 坝基存在一定范围的III~IV类岩体, 对坝基的不均匀沉降及深、浅层抗滑稳定将产生一定的不利影响。为此, 决定在坝区附近选择相似场地进行现场高压固结灌浆试验。

试验共布置了两个试验区, 其中一试验区为水泥灌浆区, 二试验区为水泥加化学材料综合灌浆区。孔位布置采用正方形布置。一试验区灌浆孔距: I序孔孔距7.00m, II序孔孔距3.50m, III序孔孔距2.47m。二试验区灌浆孔距: I序孔孔距7.00m, II序孔孔距3.50m, III序孔孔距2.47m, IV序孔(化学灌浆孔)孔距1.75m。

灌浆采用逐序加密、自上而下分段、孔口封闭灌浆法施工。分序加密灌浆方式可充分发挥固结灌浆“围、堵、挤、压”的特点, 获得良好的灌浆效果。自上而下分段灌浆方式先行灌注上部岩体有利于减少地表冒浆, 减小浆液过多的浪费, 两者结合, 岩体裂隙承压面积小, 可减少地表抬动的危险。试区的岩体破碎且处在陡倾带内, 采用孔口封闭灌浆法可增加上部岩体的复灌次数及减少绕塞串浆造

收稿日期: 2003-12-11

作者简介: 符平(1975-), 男, 湖南永顺人, 硕士, 主要从事地基处理方面的研究。

E-mail: fuping@iwhr.com

成的孔内堵塞事故。

高灌浆压力有利于浆液的扩散和排除浆液中的多余水份，在岩体裂隙中形成充填饱满的、强度较高的固结体，合理地利用较高的灌浆压力往往能得到良好的灌注效果，但过高的灌浆压力有可能导致地表抬动变形和浆液浪费。本次灌浆的压力按表 1 选用。

表 1 灌浆压力取值 (单位: MPa)

灌浆段次	段长/m	$V < 200L$	$V = 200 \sim 1000L$	$V > 1000L$
1	2	0.5~1.0	0.3~0.5	
2	3	1.0~2.0	0.7~1.5	适当降压, 在
3	5	2.5~4.0	2.0~3.0	适当压力下
4	5	5.0~6.0	4.0~5.0	灌浆结束
5 及以下各段	5	6.0	6.0	

注: 表中注入量 (V) 系指前期注入量的累计值。

## 2 灌浆效果检查

灌浆效果检查主要采用五点法压水、疲劳压水、劈裂压水、孔壁岩体声波测试、孔间岩体波速分布测试、孔壁地质现象及灌后浆液填充情况的电视观察、孔壁变形模量测试和原位抗剪断强度试验, 以及大口径岩芯的室内物理力学性能试验, 并直接检查灌后岩芯等方法。灌后典型岩芯如图 1、图 2 所示。



图 1 软弱夹层中的水泥结石

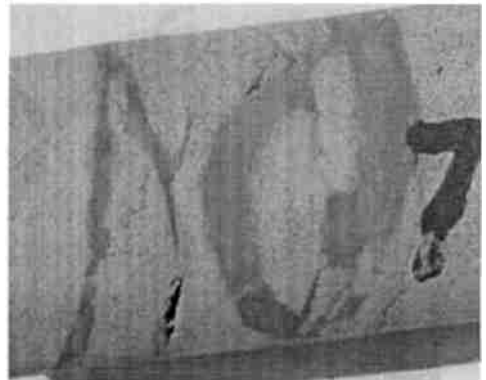


图 2 胶结良好的水泥结石

固结灌浆试验通过室内浆材、工艺技术试验研究及全面的检测, 试验成果基本达到预定目标。试区岩体代表挠曲陡倾带内呈镶嵌碎裂结构或碎裂结构的 III<sub>2</sub>~IV 类岩体, 测试成果表明经灌浆加固处理后 III<sub>2</sub>~IV 类破碎岩体的完整性、均质性、强度及不透水性均有改善与提高, 试区岩体的力学指标和渗透性能的改善情况如表 2 所示<sup>[1]</sup>。

表 2 试区岩体力学及渗透性指标均值改善情况

项目	一 试 区			二 试 区		
	灌前	灌后	提高率 (%)	灌前	灌后	提高率 (%)
钻孔声波/(m/s)	3711	3952	6.5	3537	3728	5.4
完整性系数	0.67	0.72	7.5	0.64	0.68	6.3
孔内变形模量/GPa	1.70	4.29	152.4	1.70	4.92	189.4
透水率/Lu	43.43	1.65	-96.2	32.88	0.96	-97.1

## 3 变形模量分析

由于地质条件等原因, 灌浆试验存在一些问题, 最主要的是灌后钻孔变形模量值偏小, 两个试区

灌后钻孔变形模量平均值分别是 4.29GPa 和 4.92GPa, 测试值偏小, 对此问题进行如下分析。

**3.1 钻孔变形模量测试方法分析** 灌后变形模量测试采用的是加拿大 ROCTEST 公司生产的 PROBEX-1 型膨胀仪 (钻孔变模仪), 其原理是: 由地面高压油泵通过井下探头的橡胶膜给孔壁施加一均匀的径向压力, 通过测试探测仪总容积的变化测得孔壁的径向变形, 按平面应变问题的厚壁圆筒公式计算出岩石的变形模量<sup>[2]</sup>:

$$E_0 = 2(1 + \mu)(V_0 + V_m) / (\Delta V / \Delta P_h - C) \quad (1)$$

式中:  $E_0$  为岩石的变形模量, 单位为 GPa;  $\mu$  为岩石的泊松比;  $V_0$  为初始或“剩余”收缩探头的容积, 单位为 ml, 对于 PROBEX-1 型膨胀仪,  $V_0 = 1950\text{ml}$ ;  $V_m$  为压力范围中点的总容积, 单位为 ml;  $\Delta V$  为注入膨胀腔中容积的增量, 单位为 ml;  $\Delta P_h$  为施加的压力增量, 单位为 kPa;  $C$  为膨胀仪容积修正系数, 对于 PROBEX-1 型膨胀仪,  $C = 1.103 \times 10^{-3} \text{ml/kPa}$ 。

测试值反映的是孔壁岩体的变形特性, 其值受成孔过程和测试点位置的影响较大, 测试范围也有限。采用直径为  $\Phi 50 \sim 100\text{cm}$  的平板载荷试验更能反映岩体的变形特性, 但由于受汛期影响, 本工程没有进行平板载荷试验。

由于钻孔内孔壁声波速度仅能反映孔壁的岩体特性, 利用其与钻孔变形模量关系所导出的值也仅反映孔壁岩体的变形特性。而对穿声波测试反映的是大面积岩体的特性, 利用对穿声波波速与变形模量的关系导出的变形模量值应更能反映岩体的变形特性, 可通过分析类似工程的对穿波速与变形模量的关系来类推本工程的变形模量。如表 3 所示, 本工程的承压板变形模量应在 7.2GPa 以上。

表 3 类似工程中的平板变形模量、钻孔变形模量与对穿声波波速关系

工程	岩体类别	平板变形模量/GPa	平板变形模量均值/GPa	钻孔变形模量值/GPa	钻孔变形模量均值/GPa	对穿波速/(m/s)	由对穿换算的变形模量/GPa	岩体类别
A 工程	IV1	3.60	5.0	4.10	4.10	5580	15.52	以 III1 类岩体为主, 水平裂隙发育
		6.40						
	III2	12.80	11.1	14.60	14.60			
		9.40						
B 工程	IV2	13.80	13.2	6.22	5.59	5537	11.16	以 IV2 类岩体为主, 陡倾裂隙发育
		16.80						
	III2	8.96	15.3	13.50	13.50			
		15.30						
	III1	36.20	35.5	15.28	15.30			
		34.70						
本工程	III2			4.29	4.61	> 3750	> 7.20	以 III2 类岩体为主, 陡倾裂隙发育
	III2			4.92				

注: (1) A 工程基础固结灌浆试验岩体变形模量与声波速度的相关关系式为<sup>[2]</sup>:  $E_0 = aV_p^b$ , 常数  $a = 6.134801 \times 10^{-20}$ , 常数  $b = 5.445742$ 。(2) B 工程坝基固结灌浆试验岩体变模与声波速度的相关关系式为<sup>[3]</sup>:  $E_0 = aV_p^b$ , 常数  $a = 1.027804 \times 10^{-14}$ , 常数  $b = 4.016723$ 。(3) 本工程岩体变形模量与纵波波速的相关关系式为<sup>[4]</sup>:  $\ln(E_0) = 2.45\ln(V_p) - 11.28$ 。

当地层比较破碎和岩体的陡倾裂隙发育时, 由于孔壁变形模量按厚壁圆筒公式进行计算, 它包含了附近陡倾裂隙的影响, 因此孔壁变形模量测试值的均值较小。单孔声波测试不能较好地反映岩体的陡倾裂隙, 孔壁声波波速一般相对较高, 因此单孔声波波速和钻孔变形模量的相关关系会有一定的误差。而对穿声波测试却能较好地反映岩体内的陡倾裂隙, 因此利用对穿声波波速换算岩体的变形模量更为合理。当岩体的水平裂隙占主导地位时, 单孔声波波速与钻孔变形模量的相关关系会较好, 如表 3 所示。

综上所述, 在陡倾裂隙发育的地层, 钻孔变形模量均值一般要小于与其岩体类别相似的大型平板试验的变形模量和通过对穿声波换算的变形模量值。由对穿声波换算的变形模量与其岩体类别相似的平板变形模量值都反映了岩体的裂隙发育, 具有较好的相关性, 更能反映与其岩体类别相似的变形模量。因此本工程的岩体变形模量通过类推推导可采用由对穿声波换算的变形模量, 其值应大于 7GPa。

### 3.2 灌浆过程分析

(1) 试验区的选择。灌浆试验区岩体地质条件与要处理的岩体相似, 具有良好的代表性, 但试

验区的边界条件与实际的施工条件相差甚远。试验区位于坝轴线下游约 200m 处河床右侧靠近河边的大、小礁岛之间,被灌岩体为处于强风化、卸荷较为严重的中风化上段岩体,其原始地应力条件、风化程度与坝基岩体差异较大。同时试验区岩体三面临空,浆液灌注时水平方向节理裂隙的可承压渗径较短 (< 10m),被灌岩体的边界条件与坝基岩体相比存在着一定的差异,施工受到较大的限制,这也是灌浆过程中产生较多的串、冒浆的主要原因之一。因此试区的施工条件对灌浆施工带来了较为明显的影响。

(2) 两个试验区的各序孔在灌注过程中均出现了不同程度的串、冒浆现象。根据灌浆资料的统计,一试验区完成孔段 117 段,发生串、冒浆的 64 段,占完成孔段的 54.7%,其中 I 序孔冒浆段比率为 50%,II 序孔冒浆段比率为 60%,III 序孔冒浆段次比率为 52.8%;二试验区完成的灌浆孔段 153 段,发生串、冒浆的 75 段,占完成孔段数的 49.0%,其中 I 序孔冒浆段次比率为 86.1%,II 序孔冒浆段次比率为 64.1%,III 序孔冒浆段次比率为 36.1%,IV 序孔冒浆段次比率为 5.6%。为处理串、冒浆而采取的低压循环、越级变浆、间歇、待凝等工程措施影响了灌浆过程的正常进行。

(3) 在灌浆过程中,由于试区串、冒浆等因素影响,灌浆过程多数不能按正常灌浆过程结束。主要问题有:①浆液变换不能按技术准则进行,存在开灌浆液水灰比较小、越级进行浆液变换等问题;②由于承压渗径较短,存在低压灌注的现象,且有在小于 3L/min 的低注入率时仍采用低压灌注一定时间后再进行升压的孔段;③灌浆过程中大量采用了低压循环、间歇、待凝等工程措施。这些措施有可能使浓浆在低压时大量地灌入宽大节理裂隙中,而细小裂隙由于压力较低和浆液浓度较稠(浆液的初始剪切强度高和易沉淀凝固),浆液仅能进入较短的距离,凝结后将细小裂隙的通道堵住,即使结束灌浆压力达到了设计压力,这些细小裂隙也不能继续吸入浆液。表 4 为灌浆过程的统计,从表 4 中可见,灌浆过程中能够正常结束的孔段所占比例仅为 29.6%,尤其是 I、II 序孔不能正常结束的灌浆孔段达到 76.5%,因此,I、II 序孔对细小裂隙的灌注是不充分的,也就造成了 III 序孔的吸浆量仍然很大,分别为 253.1kg/m 和 434.3kg/m。同样地,III 序孔的非正常灌浆过程也超过了 44.0%,因此灌浆效果受到了一定的影响。

(4) 经过 III~IV 序孔灌浆处理后,终孔孔距为 2.47m 和 1.75m 时,一、二试验区岩体的平均透水率 ( $q$ ) 分别为 1.65Lu 和 0.96Lu,最大值分别为 2.72Lu 和 2.18Lu,虽满足了设计防渗要求,但其透水性仍然较大,说明大量细小裂隙灌注效果不明显,尤其是 III 序孔的部分孔段灌前透水率仍然达到了 24.7Lu (一试验区) 和 19.7Lu (二试验区),灌浆效果与类似工程相比欠佳,也说明了灌浆过程不正常以及串、冒浆严重等因素对灌浆效果的影响。

表 4 灌浆过程统计

孔序	试验区	统计总	正常灌浆	异常灌浆
		段数	过程结束段	过程结束段
I	一试验区	36	6	30
	二试验区	36	9	37
II	一试验区	36	12	24
	二试验区	45	9	36
III	二试验区	36	20	16
合计		189	56	133

3.3 岩体变形模量分析 造成灌浆过程不正常的主要原因是由于试验区的可承压渗径较短和试验区岩体节理裂隙发育等。在灌浆过程中如施加较高的压力容易造成浆液的外冒,为防止和控制浆液的外冒,在灌浆过程中频繁地采用了低压循环、越级变浆或直接使用浓浆、间歇、待凝等工程措施,从而造成岩体的细小裂隙得不到良好的灌注,灌浆效果受到了一定的影响。虽然钻孔变形模量测试平均值仅为 4.61GPa,但通过类比分析,岩体的变形模量应在 7GPa 以上。而且,对于将来的大规模施工可以采取很多的工程措施提高灌浆效果,比如加盖板、严格控制地表抬动,以及自上而下进行分层分序灌浆等,基本能避免承压渗径短和串冒浆问题,灌浆过程可保证正常结束,因此实际工程的灌浆效果应该能得较大幅度的改善。综上所述,岩体的整体变形模量值应能得到较大的提高。

## 4 结论与建议

(1) 固结灌浆试验区的选择应具有代表性,试验区的岩体地质情况应该与要处理的岩体地质基本

相似,甚至稍差;施工的工艺应该与将来的施工工艺基本相当,特别是固结灌浆的重要的“围、堵、挤、压”的原则在试验工程中应能体现,尽量克服小试验区的串冒浆等问题,以减少施工条件和施工工艺对灌浆效果的影响。

(2) 灌浆效果的检查,尤其是变形模量、强度指标等测试应采取多种仪器、多种方法进行测试,包括声波、室内试验以及现场试验等,测试结果要能相互印证。

(3) 在陡倾裂隙发育的地层,由对穿声波换算的变形模量与其岩体类别相似的平板模量值反映了岩体的裂隙发育,具有较好的相关性,更能反映与其岩体类别相似的变形模量。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 中国水利水电基础工程局. 本工程灌浆试验研究总报告 [ R ]. 天津: 中国水利水电基础工程局, 2003.
- [ 2 ] 中国水利水电基础工程局. A 工程灌浆试验研究总报告 [ R ]. 天津: 中国水利水电基础工程局, 2001.
- [ 3 ] 中国水利水电基础工程局. B 工程灌浆试验研究总报告 [ R ]. 天津: 中国水利水电基础工程局, 2002.
- [ 4 ] 国电公司中南勘测设计研究院. 本工程坝基工程地质专题报告 [ R ]. 长沙: 国电公司中南勘测设计研究院, 2002.

## Analyses of consolidation grouting of foundation of a hydropower station

FU Ping, ZHAO Wei-quan, YANG Xiao-dong

( *Engineering Safety Monitor Center, IWHR, Beijing 100044, China* )

**Abstract:** The deformation modulus of dam foundation usually will increase greatly after grouting. Generally the hole deforming modulus method was used in tests and the hole acoustic velocity was used for verification. But there was difference between the real deformation modulus and the measured value because of a few influencing factors, such as geology condition, fissures, hole quality, testing method and so on. In this paper, the reason of the lower derorming modulus of drills in a project was analyzed which was caused by testing methods and grouting process. By using analogism, results were obtained, showing that the correlation between deforming modulus of plate loading test and crossing hole acoustic velocity in the stratum with steep fissure was good. They were consistent with the overall deformation modulus of rock mass. It was proved that the mechanics performance of rock mass in grouting work project would be better than that in grouting test project.

**Key words:** consolidation grouting; analyses of efficiency; deformation mouldulus

( 责任编辑: 王成丽 )