

# 锦屏一级水电站左坝肩边坡固结灌浆的数值模拟

苏立海, 曲星, 李宁  
(西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 以锦屏一级水电站左岸坝肩抗力体固结灌浆为研究背景, 在已有的裂隙岩体灌浆研究的基础上, 建立数学模型, 推导出单孔灌浆压力在岩体裂隙中的分布规律, 从而得出临近灌浆孔灌浆压力相互叠加值, 在边坡分析模型中假定灌浆压力直接作用于结构面, 得出灌浆压力对边坡的影响。

**关键词:** 固结灌浆; 裂隙; 数学模型; 灌浆压力

中图分类号: TV7

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2008)02-0118-03

## Numerical Simulation of Consolidation Grouting in Side Slope at Left Abutment of Jinping I Hydropower Station

SU Lihai, QU Xing, LI Ning

(Geotechnical Engineering Institute, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

**Abstract:** On the basis of the consolidation grouting in slope at the left abutment of Jinping I Hydropower Station under construction and based on the previous researches on grouting for fissured rock mass, a mathematical model is set up and the distribution rule of the single grouting pressure in rock fissures is arrived at, so as to obtain the mutually superposed value of the grouting pressure close to the grouting hole. Supposing that the grouting pressure acts directly on the surface of structure in the analysis of the model, the effects of the grouting pressure on the side slope are obtained.

**Keywords:** consolidation grouting; fissure; mathematical model; grouting pressure

岩体裂隙十分复杂, 浆液在裂隙内流动表现为各向异性, 不可能实现观察、测量实际或通过简单的浆液扩散半径公式来反映浆液在裂隙岩体内的流动规律。若能利用已知的地质参数、浆液性能指标和施工工艺参数建立注浆扩散模型, 用以描述浆液运动规律和预测出裂隙岩体注浆的扩散范围, 对于减小工程造价, 提高施工质量和安全等方面, 无疑具有很大的理论意义和实践价值。目前的岩体灌浆理论或试验只限于单一裂隙或裂隙均匀分布的岩体, 难以反映现场复杂的裂隙分布情况, Hassler等<sup>[1~4]</sup>对浆液在裂隙岩体内的渗透规律做了一些研究, 只局限于研究浆液在等宽裂隙网络内的流动规律, 且没有考虑裂隙变形对灌浆的影响。

高压带来的岩体某种程度的弹性变形和额外的裂隙张开是有好处的, 有助于浆液从钻孔中渗入岩石原有的裂隙系统, 扩大了灌浆的渗透范围, 使浆液在灌浆孔周围的岩体范围更加饱和。但是在坝肩抗力体灌浆中, 过高的灌浆压力又容易引起坡体发生大的变形和裂隙变形, 破坏岩体结构, 使边坡沿原裂隙面或次生滑动面滑移。本文在文献<sup>[1~4]</sup>的基础上, 以锦屏左岸坝肩抗力体固结灌浆为背景, 采用数值解的方式推导出在4 MPa初始灌浆压力、不同浆液水灰比下单孔的灌浆压力沿裂隙分布规律, 从而假定临近灌浆孔灌浆压力相互叠加, 为灌浆时边坡的稳定性计算提供合理的灌浆荷载。

### 1 数学模型

推导基本假定: 浆液为宾汉流体<sup>[5]</sup>, 在灌浆压力下做平

行于裂隙面的平面径向层流流动, 裂隙为光滑、水平的, 具体见图1<sup>[6]</sup>。

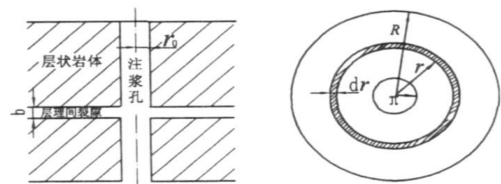


图1 浆液在裂隙中的扩散示意图

裂隙厚度为  $b$ , 考虑流核高度为  $b_0$ , 流核半径为  $h$ , 初始灌浆压力为  $p_0$ , 注浆孔半径为  $r_0$ , 浆液最大扩散半径为  $R$ 。建立浆液在裂隙中的流动模型(图2)。

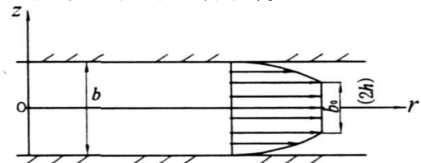


图2 浆液在裂隙中的流动模型示意图

对于不可压缩粘性流体的运动方程, 根据 Navier-Stokes 方程可知:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} = f_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

又由宾汉流体的流变方程<sup>[1]</sup>可知:

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2)$$

因  $b$  较小, 灌浆时间较长, 故  $\frac{\partial u}{\partial z} \gg \frac{\partial u}{\partial r}, \frac{\partial u}{\partial t}$  很小, 可忽略, 不考虑浆液流动时的重力及惯性力的影响, 由 (1)、(2) 化简可得:

$$\frac{dp}{dr} = \frac{d\tau}{dz} \quad (3)$$

将上式从任意  $z (z > h)$  至  $b/2$  积分, 由  $u(b/2) = 0$  条件最后可得:

$$u = -\frac{1}{\mu} \frac{dp}{dr} \left[ \frac{b^2}{8} - \frac{z^2}{2} - h \left( \frac{b}{2} - z \right) \right] \quad (4)$$

当  $z = h$  时, 可得流核区浆液流速:

$$u_b = -\frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dr} \left( \frac{b}{2} - h \right)^2 \quad (5)$$

最终可推得断面平均流速为:

$$\bar{u} = -\frac{b^2}{12\mu} \frac{dp}{dr} \left[ 1 - 3\frac{h}{b} + 4\left(\frac{h}{b}\right)^3 \right]$$

流量:

$$q = 2\pi r b \bar{u} = -\frac{\pi b^3 r}{6\mu} \left[ 1 - 3\frac{h}{b} + 4\left(\frac{h}{b}\right)^3 \right] \frac{dp}{dr}$$

对上式积分, 由  $r = r_0$  时  $p = p_0$  可得:

$$p = p_0 - \frac{6\mu q}{\pi b^3} \ln \frac{r}{r_0} \frac{1}{1 - 3\frac{h}{b} + 4\left(\frac{h}{b}\right)^3} \quad (6)$$

## 2 灌浆压力的确定

初始灌浆压力取为 4.0 MPa, 假定裂隙等宽, 煌斑岩脉宽度为 30 mm, 浆液扩散半径为 15 m, 按 (6) 式计算出灰水比为 1:0.8:1; 0.5:1 (浆液物理及力学性能指标见表 1) 时的浆液压力, 灌浆压力沿扩散半径分布规律见图 3。

表 1 浆液物理及力学性能指标

水灰比	流变参数	
	$\tau_0$ /Pa	$\mu$ /(M Pa·s)
2:1	5.26	3.84
1:1	6.30	5.13
0.8:1	12.05	5.84
0.5:1	114.83	16.41

注: 根据《雅砻江锦屏一级水电站拱坝基础弱卸荷岩体固结灌浆试验》选取。

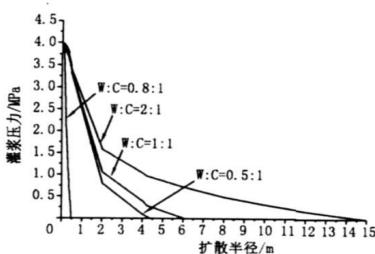


图 3 水灰比对扩散半径影响

本文分析锦屏边坡稳定性时, 灌浆压力的模拟采用以下方法: 分析中假定最常见情况即灌浆孔穿过煌斑岩脉, 压力沿岩脉方向递减 (图 4)。

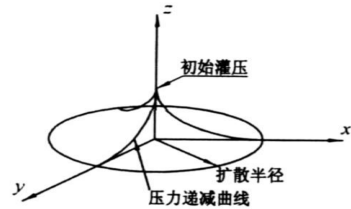


图 4 单孔灌浆荷载分布示意

## 3 工程实例

### 3.1 工程概况

锦屏一级水电站位于四川省凉山彝族自治州盐源县和木里县境内的雅砻江干流上, 电站以发电为主, 兼有防洪、拦沙等作用。坝址控制流域面积 102 560 km<sup>2</sup>, 占雅砻江全流域面积的 75.3%, 多年平均流量 1 200 m<sup>3</sup>/s。拦河大坝为混凝土双曲拱坝, 最大坝高 305 m, 大坝最低建基高程 1 580.0 m, 坝顶高程 1 885.0 m。水库正常蓄水位 1 880.0 m, 总库容 77.6 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, 调节库容 49.1 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, 为年调节水库, 电站装机容量 3 600 MW, 装机年利用小时数 4 836 h, 年发电量 174.10 × 10<sup>8</sup> kW/h。

电站地处深山峡谷地带, 其施工布置集中、施工措施困难。对于左岸坝肩开挖与基础处理区域, 由于两岸坝址区地质条件的不对称性, 为使坝体达到较好的受力性能、满足拱座的抗滑稳定与变形稳定、以及地下水位与基础的渗流控制等工程要求, 在左岸抗力体部位设计采取了大量的基础处理措施如: 由竖井与水平隧洞组成的断层混凝土置换网格、传力洞、抗剪洞、帷幕灌浆平洞、灌浆廊道等等, 这些布置密集的洞室群基本上处于坝肩的变形拉裂区, 造成锦屏一级水电站左坝肩施工开挖工作极其困难, 同时给边坡的稳定性形成不利因素。因此研究山体防冲帷幕、洞室灌浆对边坡稳定性的影响及工程的影响尤为重要。

本文利用有限元方法<sup>[7~8]</sup>对左岸坝肩边坡典型剖面灌浆荷载下的稳定性进行了分析研究, 为实际工程处理方案的确定提供依据。

### 3.2 左岸山体地质概况

左岸拱肩槽部位谷坡高陡, 绝大部分基岩裸露, 自然岸坡坡度 40°~50°, 局部覆盖有厚 1~5 m 不等的崩积块碎土石层。自然岸坡现状稳定。

岸坡岩体主要为杂谷脑组第三段 (T<sub>2-3Z</sub><sup>3</sup>) 厚~巨厚层状变质砂岩与薄层状粉砂质、泥质板岩互层, 总体产状 N15°~35°E, NW∠30°~45°。

岸坡中主要结构面包括 f<sub>5</sub>、f<sub>8</sub>、f<sub>42-9</sub> 等断层在内的不同规模的断层, 层间挤压破碎带, 深部裂隙, 煌斑岩脉 (X) 和边坡浅表部发育的各个方向的卸荷裂隙, 节理裂隙主要发育 ① N15°~35°E, NW∠30°~45°, 层面裂隙; ② N20°~40°E, SE∠60°~85°; ③ N50°~70°E, SE∠50°~80° 三组。

岸坡岩体风化卸荷作用强烈, 强卸荷、弱风化下限水平深度一般 50~90 m, 弱卸荷下限水平深度一般 100~160 m, 深卸荷下限水平深度达 250~300 m。

左岸勘探揭示和地质调查表明,对开挖后的左岸拱肩槽 1 885.0 m 高程以下的边坡整体稳定性影响起控制作用的为  $f_5$ 、 $f_{42-9}$  断层和煌斑岩脉(X)。

### 3.3 计算模型

分析中假定灌浆孔穿过煌斑岩脉,灌浆压力模拟时,根据上面推算的单孔灌浆荷载在裂隙中的分布规律,考虑临近灌浆孔灌浆压力的相互叠加作用如图 5 所示。

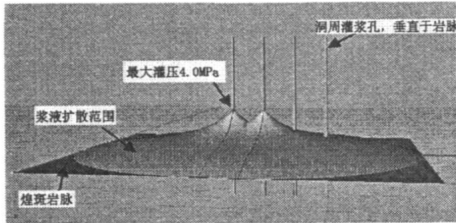


图 5 多孔灌浆荷载分布示意

在二维有限元分析中,将灌浆压力分布于单宽上,计算得不同间距灌浆孔下的灌浆压力如图 6 所示。

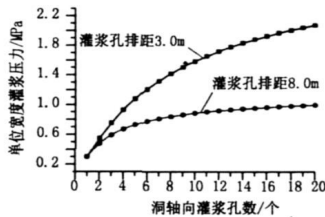


图 6 灌浆孔穿入岩脉时作用在单宽上的灌浆压力

边坡断面各主要结构面及灌浆荷载施加方案如图 7 所示。

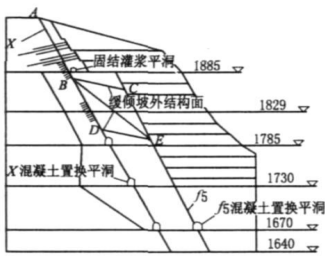


图 7 拱肩槽边坡主要结构面灌浆荷载施加示意图

### 3.4 计算结果分析

在 1 885.0 m、1 829.0 m 高程固结灌浆洞洞周灌浆时,考虑 1 885.0 m 固结灌浆洞穿过煌斑岩脉的沿洞轴方向 8 个灌浆孔、1 829.0 m 高程固结灌浆洞穿过煌斑岩脉的沿洞轴方向 4 个灌浆孔同时进行灌浆,在此条件下分析边坡的稳定性及应力、变形情况。

在 1 829.0 m 和 1 885.0 m 固结灌浆洞洞周灌浆

时,在灌浆压力的作用下,上部潜在滑动面剪出口处岩体向坡外变形不超过 1.8 mm,坡脚处岩体向坡外变形增加微小,其值不超过 1.4 mm。在此灌浆方案下,高程 1 885.0 m 滑体后缘面产生不超过 1.0 MPa 的拉应力,高程 1 829.0 m 滑体后缘面产生不超过 0.4 MPa 的拉应力。

表 2 山体固结灌浆边坡安全系数

荷载方案	潜在滑动面 ABC	潜在滑动面 ABE	潜在滑动面 ADE
锚索加固	1.64	1.68	1.88
灌浆后	1.61	1.67	1.23

由表 2 可以看出在灌浆荷载作用下,各滑动面安全系数都有所减小,其中潜在滑动面 ADE 减小明显。

## 4 结语

本文的主要目的是研究锦屏一级水电站左岸拱肩槽边坡稳定性,针对灌浆荷载对边坡稳定的影响进行分析,以保证该工程施工期的安全。不足之处在于模型只考虑了浆液做平行于裂隙面的平面径向层流流动,裂隙为光滑、水平的。

该算例中考虑单孔灌浆压力在裂隙中的递减规律,假定多孔灌浆压力的叠加效果,将其荷载等效后作用于结构面,不考虑裂隙扩展延伸。

### 参考文献:

- [1] Hassler Lars, Hakansson Ulf, Hakan Stille. Computer simulated flow of grouts in jointed rock[J]. Tunneling and Underground Space Tech, 1992, 7(4): 441-446.
- [2] 郝哲,王介强,何修仁. 岩体裂隙注浆的计算机模拟[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 727-730.
- [3] 杨米加,贺永年,陈明雄. 裂隙岩体网络注浆渗流规律[J]. 水利学报, 2001, 32(7): 41-46.
- [4] 杨晓东,刘嘉材. 水泥浆材灌入能力研究[J]. 中国水利水电科学院科学研究论文集(第 27 集)[C]. 北京: 水利电力出版社, 1987: 184-191.
- [5] Shi Caijun, Day Robert L. Acceleration of the reactivity of fly ash by chemical activation[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25: 15-21.
- [6] Hu JiCheng. 裂隙岩体中的现场注浆实验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005.
- [7] 李宁,张平,闫建文. 灌浆的数值仿真分析模型探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 326-330.
- [8] 李宁,韩巨,陈飞熊,等. 预应力群锚加固机理数值试验研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(5): 60-66.