

# 大坝基础灌浆水灰比的探讨

谭日升

(长江水利委员会长江科学院, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 关于大坝基岩灌浆开灌水灰比, 有的专家强调浓浆开灌, 有的专家不赞成浓浆开灌。通过分析国内外的经验, 认为开灌水灰比应根据基岩的透水率和灌浆试验结果来选择。灌浆前压水透水率特别大的灌浆段, 可以用较低水灰比的浓浆开灌, 节约灌浆时间和灌浆材料; 除此以外, 应该用稀浆开灌, 确保浆液在相对细的裂隙中达到要求的扩散半径, 并在灌浆过程中, 根据情况逐步加浓浆液。

**关键词:** 坝基防渗; 帷幕灌浆; 水灰比

## Discussion of Water-cement Ratio for Dam Foundation Grouting

Tan Risheng

(Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, Hubei, China)

**Abstract:** There are different opinions on the initial water-cement ratio for dam foundation grouting, in which some experts stress that the grouting should be started with thick grout, and others do not agree. By analyzing domestic and international practices, the thinking that the initial water-cement ratio should be selected based on bedrock permeability rates and grouting tests is proposed. For the sections with particular large permeability rate, the thick grout should be used for initial grouting and that can shorten grouting time and save grouting materials; and for other sections, the thin grout should be used for ensuring the grout reaching required range in fine fissures, and then the grout should be progressively thickened according to the grouting process.

**Key Words:** dam foundation seepage control; curtain grouting; water-cement ratio

中图分类号: TV543

文献标识码: A

文章编号: 0559-9342(2011)08-045-04

随着经济的发展, 生产、生活对能源需求的不断增长, 我国正处在水电建设的高潮期。大家都在为水电建设献计献策, 许多专家对大坝基岩灌浆开灌水灰比发表了不同的意见。有的专家强调浓浆开灌, 有的专家不赞成浓浆开灌。本文介绍国内外一些有关的文献资料, 同时陈述笔者的观点。

## 1 国内外的有关规定

### 1.1 国外的相关资料

#### 1.1.1 第 15 届国际大坝会议以前

(1) 美国。美国土木工程学会《土壤力学及基础学部学报》1957 年发表的“岩石水泥灌浆趋向”中, 关于水灰比谈到: “工程界对此问题意见分歧。有一部分有这方面经验的工程师认为, 如在高压下灌浆, 则水泥浆用水量无关紧要, 即使应用 1 个单位体积水泥和 20 个单位体积水的比例, 多余的水分仍会被挤出。另有一部分同样有这方面经验的工程

师则认为, 在灰浆溢出处形成不透水的饼状体之前, 只能挤出一定数量的水分; 而在形成不透水的饼状体之后, 则不论压力多大也不能挤出任何水分了。所有的人均同意水灰比对灰浆能到达的距离有重大影响。事实已一再证明, 在一定的压力情况下, 如灰浆浓度超过岩层裂隙所能吸收的程度, 则灌浆时岩基不会吸收多少灰浆, 即使灌浆孔已灌至‘不再吸浆’的地步, 而事实上岩基并未因灌浆而改善多少”。“在实际工作中采用最优水灰比。这是灌浆孔能均匀吸浆的最低水灰比, 需逐孔试验求得。开始时的水灰比是根据该孔在前述水压试验及压力冲洗时的情况选定, 一般的水灰比应选择较大的, 以免堵塞灌浆孔。在灌浆过程中逐步加浓”<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2011-02-14

作者简介: 谭日升(1935—), 男, 湖南安仁人, 教授级高工, 主要从事灌浆和混凝土修补的研究工作。

(2) 法国学者的观点<sup>[2]</sup>。法国国立格勒诺布尔高等水利学校布瓦尔 (M. Buwear) 教授, 上世纪 80 年代初在我国武汉水利电力学院讲学时提出: 根据如下规则 (见表 1), 人们换用稀释浆液来适应不同渗透系数的地层, 即适应不同介质的裂隙度。

表 1 渗透系数与水泥灰比的关系

渗透系数/Lu	水灰比	
	初期水泥浆	最终水泥浆
1~2	8:1	4:1
2~5	8:1~4:1	2:1
5~10	4:1	2:1~1:1
>10	2:1	

### 1.1.2 第 15 届国际大坝会议期间

国际大坝委员会第 15 届大会于 1985 年 6 月在瑞士洛桑召开, 大会主要讨论了 4 个技术专题, 其中的第 58 题是“基础防渗处理”。引起我们高度注意的是: ①对帷幕体的透水标准, 过去以 1 Lu 与 3 Lu 为高、低坝的标准似也要求过高, 可以放松要求; ②帷幕设计和施工, 一般趋势是采用单排垂直孔; ③灌浆材料, 很多工程趋向于控制最大水灰比在 5:1 (体积比) 以内, 以提高浆液的稳定性。有的规定水灰比更小, 即水泥浆液更浓<sup>[3]</sup>。同时也报道了有几座大坝用稀浆建成的大坝防渗帷幕失效的例子。

### 1.1.3 第 15 届国际大坝会议之后

(1) 印度的规定。1994 年, 印度标准学会第二次修订的河谷工程中岩基压力灌浆标准, 推荐的浆液水灰比 (质量比) 是 5:1~0.8:1。仅仅在异常的情况下浆液的水灰比倾向 10:1。浆液的水灰比可以根据灌浆前渗透试验的结果来选择。标准指出, 如果浆液太浓, 浆液前进的通道在短距离就可能被阻塞, 细缝不可能被填充; 如果浆液太稀, 灌浆连续时间太长, 可能导致不适当花费的增加。当采用多排帷幕时, 在外排允许用浓浆, 以阻塞较大可渗透的通道, 防止浆液扩散到要求的范围以外。在内排或中间排可以用比较稀的浆液开灌<sup>[4]</sup>。

(2) 欧洲标准。2000 年欧洲标准化委员会关于特种岩土工程施工——灌浆的标准规定, 浆液开灌混合物 (水灰比) 的设计决定于: ①浆液的消耗不要超过预期的太多; ②能达到不吸浆; ③基础不发生令人不快的位移<sup>[5]</sup>。

(3) 挪威的做法。挪威里斯尼 (Dagfinn K L) 等三位教授介绍了挪威岩石灌浆水灰比的采用: “灌浆过程中水和水泥的比例从 4:1 逐渐减少到 2:1。如果采用稀的浆液达不到要求的灌浆压力就应该改用浓的浆液。达到要求的压力后, 应该维持 15~30

min, 迫使浆液中多余水从浆液中析出”<sup>[6]</sup>。

(4) 美国的规范。2008 年《美国军事条例和规范》关于“基础钻孔和灌浆”的规定为: 在通常情况下, 如果压水试验表明是一个低渗透性的孔, 用稀浆开灌; 如果钻孔失水或冲洗时不起压, 用比较浓的浆液开灌<sup>[7]</sup>。

## 1.2 我国有关规范的规定

自 1963 年以来, 对《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》进行了 4 次修改。其起始水灰比和每级水灰比一般灌注量见表 2。

表 2 我国规范对水灰比 (质量比) 的规定

时间	起始水灰比	水灰比分级	每级一般灌注量/L
1963 年	10:1	(10,5,3,2,1.5,1,0.8,0.6,0.5,0.4):1 等 10 级	600
1983 年	8:1	(8,5,3,2,1.5,1,0.8,0.6,0.5):1 等 9 级	800
1994 年	5:1	(5,3,2,1,0.8,0.6,0.5):1 等 7 级	300
2001 年	帷幕灌浆	5:1 (5,3,2,1,0.8,0.6 或 0.5):1 等 6 级	300
	固结灌浆	3:1 (3,2,1,0.6, 或 0.5):1, 也可 (2,1,0.8, 0.6 或 0.5):1	300

## 2 浆液中多余水分的去向

水泥水化需要的水是很少的, 根据有关资料介绍, 约为 24% (质量比)。水灰比 0.24:1 的水泥浆不具有流动性, 不能用于地基基础灌浆。水泥浆液的流动性与水泥浆液的水灰比的关系见表 3。

表 3 水泥浆的流动性与水灰比的关系<sup>[8]</sup>

水灰比 (质量比)	水灰比 (体积比)	屈服强度/MPa	黏度/m·Pa·s	漏斗黏度/s
0.5:1	0.625:1	23	37	60
1:1	1.25:1	2	6	18.6
1.5:1	1.875:1	1.37	3.6	16.8
2:1	2.5:1	1	2.5	16.3
3:1	3.75:1	0.7	1.8	15.8
4:1	5:1			
5:1	6.25:1	0.53	1.4	15.4
8:1	10:1	0.45	1.3	
10:1	12.5:1	0.43	1.2	15.2
水		0	1.0	15

为了使水泥浆具有流动性, 必须加入多余的水。同时可以加些减水剂, 以降低浆液的黏度, 提高浆液的可灌性。

关于多余的水对水泥结石性质的影响问题, 笔者和同事在 1977 年做过模拟试验研究<sup>[9]</sup>。试验用湖北华新水泥厂生产的 600 号硅酸盐大坝水泥。试验方法为水泥加水后搅拌 30 min, 搅拌机的转速为 530 r/min。黏度用漏斗黏度计测得。分两种情形测

量凝结时间和抗压强度：一是让水泥浆在自然状态下(无压)析水后成型；二是让水泥浆在有压力下脱水后成型。试验结果见表 4。

表 4 600 号硅酸盐大坝水泥浆的性能

水灰比	漏斗黏度/s	析水率/%	沉淀物水灰比	初凝时间	终凝时间	结石 28d 抗压强度/MPa	
10:1	无压	15.4	91.5	0.56	11:37	14:57	15.2
	有压			0.43	3:19	3:39	49.6
4:1	无压	15.6					
	有压			0.32	5:02	6:02	60.5
1:1	无压	18.6	32	0.58	7:48	10:19	23.5
	有压			0.25	4:25	5:45	61.4

上述试验结果表明：

(1) 水泥浆在自然状态下(无压)析水时，其析水量和析水后成型的试件强度与浆液的水灰比关系很大，即使是质量比 1:1(相当于体积比 1.25:1)的水泥浆，也有 32% 的析水量。与国外文献上的数据体积比为 2:1(相当于质量比 1.6:1)的基础灌浆浆液可产生 35% 的析水量<sup>[10]</sup>相比，基本一致。

(2) 水泥浆在有压力的状态下(有压)脱水时，脱水后成型的试件强度与浆液的水灰比关系不大。本次试验是用气压脱水。后来又设计了一套设备，完全模拟现场，用水泥浆灌浆的方式制备试件，得到的试件强度与本次试验的结果基本一致。

如果多余的水不能在灌浆压力作用下被挤出灌浆范围，即便是用水灰比(质量比) 1:1 的水泥浆液灌浆，也有 1/3 左右的析水量，会留下 1/3 的空洞，而且水泥结石疏松，强度低，耐久性差。然而，已建大坝灌浆帷幕的观测资料并非完全如此。年代比较久的灌浆帷幕，绝大多数是用稀浆开灌，但灌浆帷幕失效的只是极少数。正如霍尔斯基(Houlsby A C)在“水泥灌浆耐久性的研究”一文中介绍的那样，美国垦务局以前都是用稀浆开灌，如采用水灰比 12:1 或者更稀的浆液。其中有一个用稀浆建成的大坝帷幕，由于帷幕损坏严重，渗漏使坝体部分破损，而必须进行再灌浆，另一座拱坝采用水灰比 7:1 灌浆建成的帷幕也有冲蚀迹象；但另一方面，有一些大坝用这类稀浆灌浆建成的帷幕运行状况良好<sup>[10]</sup>。因此，不能认为用稀浆灌浆建成的帷幕就一定不耐久。

### 3 最佳开灌水灰比选择

笔者认为，最佳开灌水灰比应同时满足如下两个条件：①在设计压力下，对被灌部位的大小裂隙都有能满足设计要求的扩散半径；②浆液扩散到灌浆范围以外的较少，灌浆时间和灌浆材料有效利用

率高。

不同的大坝，地质情况千差万别。有时，同一座大坝不同部位地质情况也不完全一样。参考国内外学者的观点和工程实践积累的资料，笔者认为，开灌水灰比应根据基岩的透水率和灌浆试验的结果来选择。①灌浆前压水透水率特别大的灌浆段，灌浆试验证明用较低水灰比的浓浆开灌能达到预期目的的，可以用较低水灰比的浓浆开灌，避免浆液过度扩散，造成灌浆时间和灌浆材料的浪费。②除此以外，应该用稀浆开灌，确保浆液在相对细的裂隙中有必要的扩散半径，在灌浆过程中根据情况逐步加浓浆液。不然，浆液前进的通道在短距离就可能被阻塞，细裂隙不可能被填充。③对灌前压水透水率大于防渗标准，稀浆开灌，一开始就吸水不吸浆的部位，说明基岩细微裂隙密集，水泥浆液对该部位不具有可灌性，可采用化学灌浆。

笔者阅读了一些强调浓浆开灌的论文，在实际应用时，往往还有两个条件，即降低帷幕体的透水标准和缩短帷幕灌浆孔的孔距。稳定性浆液能达到的距离总是有限度的<sup>[11]</sup>。例如，国外认为的成功实例之一的柯培通(COPELTON)坝，坝高 99.06 m，坝基为花岗岩，主要节理相对较宽且延伸很远，是一个极需要灌浆且容易灌浆的特例。它采用单排帷幕，分 5 序加密，最终孔距 1.524 m；大多数孔用 2:1(体积比，相当于质量比 1.54:1)的浆液开灌，第 5 序孔灌后渗透系数降到 5 Lu<sup>[12]</sup>。

在我国，以发电为主建设的高坝，降低帷幕体的防渗标准、缩短帷幕灌浆孔的孔距不仅不经济，而且如果坝基中有软弱夹层时，若把帷幕体的防渗标准降低到 5 Lu 就算合格，将更多地依靠排水降低扬压力，还会影响大坝安全。

### 4 丹江口大坝帷幕灌浆分析

我国的丹江口大坝，初期坝高 102.4 m，根据当时的施工规范，帷幕的开灌水灰比为 10:1(质量比)，灌浆压力 1.5~3 MPa。1967 年 11 月开始蓄水运行以来，河床坝段监测断面的坝基扬压力值均小于设计值，坝基总渗流量整体呈逐年下降的趋势。2008 年长江水利委员会为了大坝加高，对在高水头下运行 40 年的丹江口大坝基础防渗帷幕进行了全面检测。现场使用的检测手段有钻孔、取芯、涌水观测、压水试验、物探、孔内电视摄像等。室内试验重点是对结石芯样进行理化性能检测、帷幕体抗渗性能试验、溶蚀耐久性试验、丙凝凝胶体老化性能试验及水化学分析。在河床 3~32 号坝段 684 m 的帷幕线上布设了 35 个检查孔，每个坝段或 40 m 范

围内至少有1个检查孔；对存在断层构造等地质缺陷部位和原防渗帷幕检查孔压水透水率及渗流、渗压异常的坝段布置1、2个检查孔。检测结果表明：①以变质辉长辉绿岩为主的3~18号坝段，原防渗帷幕防渗效果现状良好，全部满足大坝加高工程防渗标准（渗透系数 $\leq 1 \text{ Lu}$ ）。②以变质闪长玢岩为主的19~32号坝段，有6个坝段8个检查孔的21段压水透水率超标。超标孔段均位于变质闪长玢岩区内，其中多为构造发育地段。③丙凝灌浆帷幕耐久性较好<sup>[13]</sup>。

详细分析超标孔段的部位发现，超标孔段除与地质条件有关外，还与当年的施工情况有关。3~18号坝段的水泥灌浆帷幕基本上是在蓄水前完成的，19~32号坝段的水泥灌浆帷幕有相当大一部分是在蓄水后完成的。蓄水后完成的帷幕灌浆施工时，上游水头最高达60 m，灌浆孔涌水、灌后返浆等现象突出，对防渗帷幕的质量和耐久性造成了不良影响。当年19~32号坝段防渗帷幕检查孔压水透水率有相当数量的超标孔段，不如3~18号坝段的帷幕好。检测还表明，蓄水前完成水泥帷幕灌浆施工的，水泥灌浆防渗帷幕的耐久性与稀浆开灌并没有因果关系。

在分析丹江口大坝基础防渗帷幕在高水头下运行40年的全面检测资料后还发现，在研究蓄水条件下进行基础防渗帷幕灌浆或帷幕补强时，应采用能准确控制凝胶时间的化学灌浆。丹江口大坝基础防渗帷幕的化学灌浆，除9~11号坝段是蓄水前于1967年5月开工、蓄水后于1968年5月完成的以外，其他都是在蓄水发电以后施工的，在高水头下运行40年来，一直保持了较好的灌浆效果。

我国已建成几万座不同类型的大坝，其中1983年以前建成、坝高50 m以上的有几十座。这些大坝的基础灌浆都是采用10:1或8:1（质量比）水灰比的稀浆开灌的，已经运行快30年了。通过对这些大坝帷幕有没有失效进行总结，对失效的要分析其失效的原因是开灌水灰比太大还是施工工艺不当，或是水有侵蚀性造成的。同时要全面搜集国外的相关资料，不断总结经验，为下次修订规范提供依据。

## 5 结 语

(1) 大坝基础水泥灌浆开灌水灰比应根据基岩的透水率与灌浆试验结果来选择。灌浆前压水透水率特别大的灌浆段，用较低水灰比的浓浆开灌能达到预期目的；其他应采用稀浆开灌，确保浆液在相对细的裂隙中有必要的扩散半径；吸水不吸浆的部位可采用化学灌浆。

(2) 国内外观测资料表明，水泥灌浆防渗帷幕的耐久性与稀浆开灌并没有必然的因果关系。

(3) 在蓄水条件下进行帷幕灌浆或帷幕补强，采用能准确控制凝胶时间的化学灌浆优于水泥灌浆。

## 参考文献：

- [1] Minear V L. 岩石水泥灌浆趋势[G]//赵人龙,译.水力发电编辑委员会汇编.国外水电技术(第4辑).北京:水利电力出版社,1958:76-83.
- [2] Buwear M. 法国国立格勒诺布尔高等水利学校 Buwear M 教授讲学提纲[R].武汉:武汉水利电力学院,1981.
- [3] 潘家铮.国际大坝委员会第15届大会技术专题讨论综述[J].水利水电技术,1985(11):6-15.
- [4] IS (Indian Standard). 6066-1994 Pressure grouting of rock foundation in river valley project-Recommendation (Second revision)[S].
- [5] European Standard. EN12715-2000 Execution of Special Geotechnical Work -Grouting[S].
- [6] Dagfinn K L, Anund K, Einar B, et al. 挪威水电发展(下册)[M].谷兆祺,施熙灿,彭守拙,等译.北京:中国水利水电出版社,2010:845-846.
- [7] ARMY. UFGS-31 32 23-2008 Foundation Drilling and Grouting[S].
- [8] 全国水利水电施工技术信息网组编.水利水电工程施工手册——地基与基础工程[M].北京:中国电力出版社,2004:20-24.
- [9] 陈作盘,蔡发奋,谭日升.水泥细度对浆体性能影响的试验报告[R].武汉:长江水利水电科学研究院,1977.
- [10] Houlby A C. 水泥灌浆耐久性的研究[G]//现代灌浆技术译文集编译组.现代灌浆技术译文集.北京:水利水电出版社,1991:94-98.
- [11] Lombardi G. 内聚力在岩石水泥灌浆中的作用[G]//现代灌浆技术译文集编译组.现代灌浆技术译文集.北京:水利水电出版社,1991:73.
- [12] Houlby A C. 岩石水泥灌浆的最佳水灰比[G]//现代灌浆技术译文集编译组.现代灌浆技术译文集.北京:水利水电出版社,1991:82-93.
- [13] 施华堂,徐年丰,李洪斌.丹江口大坝加高初期工程帷幕检测及耐久性研究[J].人民长江,2009(23):65-67.

(责任编辑 周晓蔚)

(上接第23页)

## 参考文献：

- [1] 齐典涛.昌马水库倾倒变形边坡特征形成机制及发育深度[J].西部探矿工程,2001,73(6):47-49.
- [2] 王士天.四川某水库大坝左坝肩边坡变形破坏机制及整治对策探讨[J].地质灾害与环境,1999,10(3):1-5.
- [3] 石豫川,冯文凯,刘汉超.某水电站高边坡变形破坏模式及机制分析[J].西南交通大学学报,2004,39(5):609-613.
- [4] 刘应龙,任光明,陈强,等.反倾层状岩体倾倒变形强烈程度研究[J].中国水运,2008,8(12):185-187.

(责任编辑 杨 健)