

国际水电项目 GIN 参数设计方法研究

宋建威

(中国水利水电第五工程局有限公司, 四川 成都 610066)

摘要:在 Lombardi 博士的 GIN 理论基础上,结合世界大坝委员会的坝基设计公报及以往国际水电站工程采用 GIN 灌浆取得的经验,依托科特迪瓦波波里水电站土石坝帷幕灌浆的实践,阐述了基于坝基岩石质量与压水试验成果的 GIN 设计值的取值方法,提出了 $P_{\max}$ 、 $V_{\max}$ 值设计时需要考虑的两种边界条件,并通过理论公式计算及实践经验提出了浆液扩散半径的安全保证系数。

关键词:国际工程;水电站;土石坝;GIN;帷幕灌浆;稳定浆液;设计方法

中图分类号:TV7;TV543;TV543+.16;TV543+.18 **文献标志码:** B

文章编号:1001-2184(2024)04-0017-05

Research on GIN Parameter Design Method for International Hydropower Projects

SONG Jianwei

(Sinohydro Bureau 5 Co., LTD., Chengdu Sichuan 610066)

Abstract:On the basis of Dr. Lombardi's GIN theory, combined with the ICOLD bulletin concerning the foundation of dam and the GIN grouting experience of previous international hydropower projects, this paper relies on the curtain grouting practice of the earth-rock fill dam of the Gribo-Poboli Hydropower project in Cote d'Ivoire, and improves the GIN value design method based on the dam foundation rock quality and Lugeon water test results. Two extreme boundary conditions which should be considered in the design of $P_{\max}$ and $V_{\max}$ values are proposed, and the research process safety guarantee factor of slurry diffusion radius is proposed based on theoretical formula calculation and practical experience.

Keywords:International projects; Hydropower project; Earth-rock fill dam; GIN; Curtain grouting; Stable slurry; Design method

1 概述

GIN (Grouting Intensity Number) 法是由瑞士 Lombardi 博士基于大量灌浆方法实践研究后提出的全新灌浆方法,其用灌浆压力值 P 与单位注浆量 V 的乘积 GIN 值作为控制标准。 GIN 法遵循高压值、单一水灰比、稳定水泥浆液等原则^[1],从上世纪 90 年代开始已在全世界多个大中型水电站工程大坝实践应用并取得了良好的推广结果,其具体公式为:

$$GIN = P \times V \quad (1)$$

式中: GIN 为灌浆强度值, $\text{MPa} \cdot \text{L/m}$; P 为灌浆压力, MPa ; V 为延米注浆量, L/m 。

截止到目前,世界范围内并未形成系统的 GIN 设计与施工规范。在国际水电工程领域内,工程师所参考的依据与以下几种文献有关:

(1) Lombardi 博士的相关学术论文;(2) 国际大坝委员会关于大坝基础处理的相关设计公报;(3) 以往类似大坝工程项目取得的实践经验。

科特迪瓦波波里水电站工程位于西非撒桑德拉河上,总装机容量为 112 MW,是该流域规划六级水电站中的第三级。枢纽工程包括土石坝(长 4.2 km)、厂房和溢洪道三部分,坝基坐落在弱风化与全强风化岩层上,沿坝轴线全线布置了帷幕灌浆以达到设计要求的防渗效果。该工程项目采用了 GIN 帷幕灌浆工艺法。根据 GIN 参数设计、现场试验与灌浆施工全过程取得的成果,笔者对国际工程项目中 GIN 帷幕灌浆设计的最新设计理论与实践进行了探讨。

2 基础数据的准备

2.1 坝基防渗指标

根据库区渗漏水价值重要性、坝型、帷幕排

数等参数,Houlsby(1990)提出了判断坝基防渗的标准并绘制出允许吕荣值判断流程图^[2]。坝基防渗设计指标判断流程见图1。该方法得到了世界大坝委员会的认可。

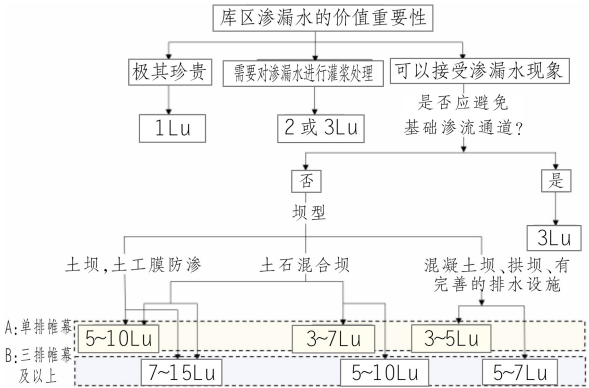


图1 坝基防渗设计指标判断流程图

从库区渗漏水的价值重要性方面进行分析:坝基处理的主要目的是确保坝体与坝基接触部位的稳定与安全,避免地下岩石裂隙带来的水侵蚀。项目部结合土石坝的坝型、单排帷幕的布置形式等信息最终将坝基防渗运行值设定为3~7Lu,并结合坝址钻芯取样及物探数据进行综合分析后,将该工程坝基处理的允许值选择为中间值,即5Lu。

2.2 坝基岩芯质量评定成果

根据原设计报告要求,河床段土石坝的坝基座落在弱风化岩层上,而岸坡段土石坝的坝基座落在强风化岩层上,但其帷幕灌浆盖重均布置在弱风化岩层上。

为了更好地确定GIN帷幕灌浆参数,在具有代表性的河床段坝基进行了补充钻孔,从而为地质条件分析、GIN值参数设计以及后续现场试验工作做好了准备。对坝基钻孔岩芯RQD进行统计取得的结果显示:地下0~2m、10~15m的RQD值偏低,呈现出两端较低、中间段落较高的规律。代表性坝基岩芯RQD值统计情况见表1。根据钻芯取样的芯柱结果进行分析得知:坝基岩石裂隙以近水平的缓倾裂隙为主,部分为近垂直的陡倾裂隙,个别为中等倾角裂隙。其水平倾斜裂隙主要集中在地下2~3m以及13~15m处。

2.3 现场压水试验成果

对于上述岩芯的孔位,依据《现场压水试验规范》ISO-22282-3-2012中所明确的试验方法开展

了现场压水试验,以进一步评估地下岩石裂隙的发育情况及渗透性。压水试验按五个阶段(P1—P2—P3—P4—P5)、三级压力、自下而上逐段进行^[3],其中第三阶段压力值为最大值,第一、第五阶段压力值为最大压力的25%,即 $P1=P5=25\% \times P3$,第二、第四阶段压力值为最大压力的50%,即 $P2=P4=50\% \times P3$ 。

表1 代表性坝基岩芯RQD值统计表

孔深 /m	1号岩芯 /%	2号岩芯 /%	3号岩芯 /%	4号岩芯 /%
0~2	61.60	66.10	65.40	71.30
2~5	90.00	50.50	82.10	63.90
5~10	85.00	81.10	74.00	61.90
10~15	67.20	77.40	58.50	65.70

根据这五个阶段的压力、五个吕荣值横道图的分布规律,将压水试验结果分为五种类型,每种类型的代表性吕荣值的取值方式亦不同:

- (1)层流型:吕荣值随水压并没有明显变化,最终代表吕荣值取各压力阶段吕荣值的平均值。
- (2)紊流型:吕荣值随着水压的增加而减小,在最大压力阶段反而出现了最小吕荣值,其代表吕荣值取最大水压阶段的吕荣值。
- (3)扩张型:吕荣值随水压的增加而变大,在最大压力阶段出现了最大吕荣值,其代表吕荣值取第一、二、四、五阶段吕荣值的平均值。
- (4)冲蚀型:吕荣值没有随水压逐增,而是随着阶段增加呈阶梯型增大,其代表吕荣值取第五阶段的吕荣值。
- (5)填充型:随着阶段增加呈阶梯型减小,其代表吕荣值取第五阶段的吕荣值。

根据《现场压水试验规范》ISO-22282-3-2012得到的代表性坝基现场压水试验结果见表2。

3 GIN帷幕灌浆参数的设计

3.1 孔深、孔距的设计

根据美国陆军兵团的推荐计算公式,坝基以下的防渗深度至少应满足大坝高度的2/3。该工程的最大坝高 H_d 为16.5m,即帷幕灌浆深度 H_s 至少应为11m。通过对岩芯进行分析发现地下10~15m的岩芯RQD值普遍偏低,在地下13~15m处出现了水平倾斜裂隙。现场压水试验结果也显示地下10~15m局部出现吕荣值偏高的情况。项目部综合以上因素进行考虑,将该工

表 2 代表性坝基现场压水试验结果表

段落	1 号孔	2 号孔	3 号孔	4 号孔
	代表值 /Lu	代表值 /Lu	代表值 /Lu	代表值 /Lu
0~2 m	紊流型	紊流	紊流	紊流
	170.5	73.7	122.6	23.1
2~5 m	紊流型	紊流型	紊流型	紊流型
	68.2	31.3	64.3	102.3
5~10 m	紊流型	紊流型	紊流型	紊流型
	4.0	13.9	37.1	44.0
10~15 m	层流型	冲蚀型	紊流型	扩展型
	0.9	4.8	52.4	0.2

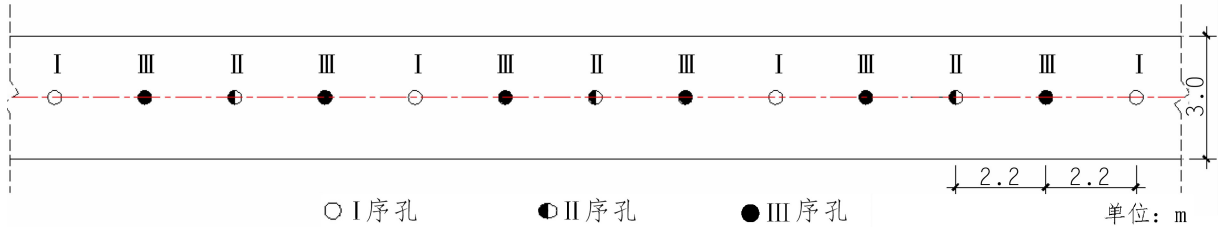


图 2 帷幕灌浆孔位布置图

3.2 GIN 值的设计

GIN 值的设计需要对坝地质条件、裂隙发育情况、大坝整体渗流设计、浆液特性、以往类似工程实践经验等多种条件进行评估考虑。由于 GIN 法是基于单一浓浆、高压力的灌浆方法,若 GIN 值选择的过大将造成盖重抬动、水泥浆消耗量过大、成本指标过高的情况出现;相反,如果 GIN 值选择的过小,将会导致浆液流动半径较小、细小裂缝灌浆效果不佳、较大裂隙填充不饱满的情况出现。经过对世界范围内多个水电站的 GIN 法帷幕灌浆理论与实践进行研究,Lombardi 博士团队根据 RMR 与 RQD 岩石质量特性提出了一套初选 GIN 值的参考范围表^[4]。GIN 值初选参照情况见表 3。

表 3 GIN 值初选参照表

强度等级	GIN 值 /(MPa·L/m)	RMR	评价	RDQ /%	评价
较高	>250	81~100	较好	91~100	较好
高	150~250	71~80	好	76~90	好
中等	100~150	41~70	一般	51~75	一般
较低	<50	<40	差	<50	差

通过对代表性岩芯 RQD 值的统计(表 1)得知:有 10 个段落处于 76~90 区间,质量评定等级为“好”,有 14 个段落处于 51~75 区间,质量评定等级为“一般”,RQD 值落入两个区间,强度等级应在“高”与“中等”之间选择。GIN 值可以选择

程的帷幕灌浆设计深度选择为 15 m。

为了避免相邻孔位出现串浆以及相互施工干扰的情况,选择“Ⅰ—Ⅲ—Ⅱ—Ⅲ—Ⅰ”的三序孔布置方式。根据岩石裂隙分布、现场压水试验结果以及以往工程取得的经验,将该工程的Ⅰ序孔间距选择为 8.8 m,相邻两孔的间距为 2.2 m。帷幕灌浆孔位的布置情况见图 2。对于初选的布孔间距,需要在后续 GIN 参数设计时进行复核校验。

150~200 MPa·L/m。此外,表层 0~2 m 岩石的 RQD 值偏低,岩石质量评定等级不如 2~15 m 的深层岩石。对此,将 0~2 m 层和 2~15 m 层分别取不同的 GIN 值更为合理。考虑到在对地表 0~2 m 岩层实施高压灌浆时比较容易出现冒浆、泄压情况,此时,应尽可能地避免盖重抬动的情况出现,因此,将地表 0~2 m 段落的 GIN 值选择为 150 MPa·L/m,而对于深层 2~15 m 段落的 GIN 值则选择为 200 MPa·L/min。

3.3 P_{max} 与 V_{max} 值的设计

3.3.1 P_{max} 与 V_{max} 值的设计原则

GIN 值初选完成后,需要根据孔间距、浆液黏聚力、灌浆半径、盖重及地表层裂隙分布情况等信息综合选择 P_{max} 和 V_{max} 值。

Lombardi 博士根据 GIN 值的大小不同提供了 5 种典型 GIN 参考曲线^[5]。GIN 典型参考曲线见图 3。根据该曲线,当 GIN=150 MPa·L/m 时,P_{max}=4 MPa,V_{max}=250 L/m;当 GIN=200 MPa·L/m 时,P_{max}=3 MPa,V_{max}=200 L/m。然而,Lombardi 博士推荐的 GIN 典型参考曲线并非是不可变的,实际工程所选择的 P_{max} 与 V_{max} 值必须根据实际情况进行调整。尤其是出于经济成本角度考虑时,P_{max} 与 V_{max} 值既要满足灌浆质量要求,又要尽量减少不必要的浪费。

因此,P_{max} 和 V_{max} 的取值需要考虑以下两种

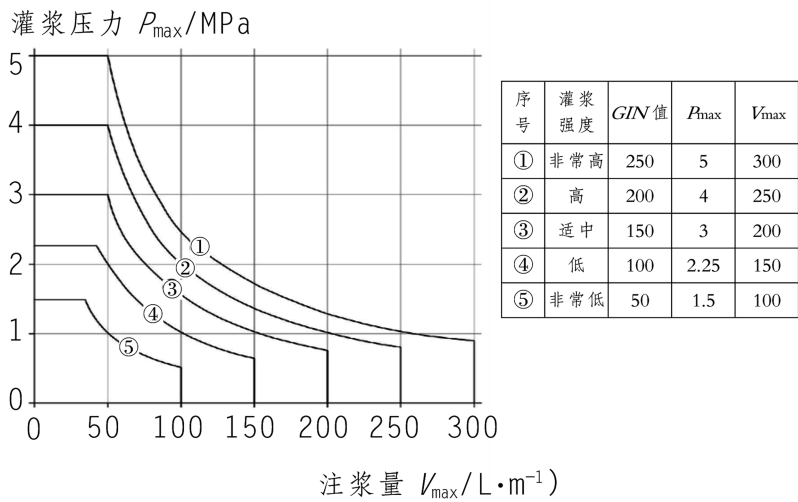


图3 GIN 典型参考曲线图

边界条件:

(1)孔内裂隙数量少、裂隙宽度较小、灌浆单耗较低、灌浆曲线接近垂直倾角时快速上升。由于单一浓浆的黏聚力较大, $P_{\max}$ 值必须满足在此压力下将单一浓浆在细小裂隙中的扩散半径大于帷幕孔间距的要求。

(2)孔内裂隙数量多、裂隙宽度较大、灌浆单耗较大且灌浆曲线接近水平走势,导致灌浆压力值一直不能升高,而其对应的即时灌浆压力却较小,因此, $V_{\max}$ 需要沿 X 轴向左移动以确保提升 $V_{\max}$ 线与 $P \cdot V$ 曲线的交点坐标对应的临界压力值 $P_{\lim}$, 以满足在此压力下将单一浓浆在细小裂隙中的灌浆半径大于帷幕孔间距的要求。

3.3.2 $P_{\max}$ 值的设计

根据流体力学原理,由于单一浓浆属于宾汉流体,灌浆半径 R 与灌浆压力 P 之间的关系如式(2)所示^[6]。

$$P = \frac{R \cdot c}{e} \tag{2}$$

将浆液在压力作用下的最大扩散半径 $R_{\max}$ 计算后代入式(3)。

$$R_{\max} = \frac{P_{\max} \cdot e}{c} \tag{3}$$

式中: c 为浆液黏聚力,可参照取值为 0.017 kN/m^2 ; e 为细小裂隙宽度,可参照取值 0.1 mm 。

浆液的最大扩散半径应满足大于孔间距的条件,如式(4)所示:

$$R_{\max} \geq k_s \cdot D_h \tag{4}$$

式中: k_s 为推荐安全保证系数,取值为 2.5 ; D_h 为灌浆孔的间距。

由式(3)计算得知:当压力 P 取值为 1 MPa 时,灌浆半径 R 可以达到 5.9 m ;当压力 P 取值为 1.5 MPa 时,灌浆半径 R 可以达到 8.9 m ,其均大于初选孔间距 2.2 m 。考虑到管道压力损失及岩石地质情况的复杂程度,为了取得较好的灌浆效果,笔者根据工程实践经验认为:实际的 $P_{\max}$ 取值应具有一定的富裕度。针对 $2 \sim 15 \text{ m}$ 段落, $P_{\max}$ 取值为 1.5 MPa ;而对于地表 $0 \sim 2 \text{ m}$ 段落,考虑到盖重抬动以及裂隙发育带来的冒浆现象,该段落的 $P_{\max}$ 取值为 1 MPa 。 $P_{\max}$ 的取值已满足上述 3.3.1 中所述边界条件(1)的要求。

3.3.3 $V_{\max}$ 值的设计

在 GIN 值、 $P_{\max}$ 值已确定的情况下,当 $V_{\max}$ 取值偏大时, $V_{\max}$ 线与 $P \cdot V$ 曲线交点对应的压力值越小,将会导致浆液单耗虽然很大、但其整体灌浆质量并不好的情况出现。相反,经过对 GIN 灌浆曲线进行设计与对比,最终确定地表 $0 \sim 2 \text{ m}$ 段落的 $V_{\max}$ 值为 150 L/m , $2 \sim 15 \text{ m}$ 段落的 $V_{\max}$ 值为 200 L/m ,此时 $V_{\max}$ 线与 $P \cdot V$ 曲线交点对应的压力值为 1 MPa 。既使在高单耗情况下,该压力亦能增大孔内细小裂隙的灌浆半径,进而满足 3.3.1 中所述边界条件(2)的要求。

3.4 GIN 控制曲线的绘制

根据上述已计算选取的 $P_{\max}$ 与 $V_{\max}$ 值,结合 $P \cdot V$ 曲线绘制 GIN 控制曲线图。鉴于地表 $0 \sim 2 \text{ m}$ 岩层的 $P_{\max}$ 与 $V_{\max}$ 数值偏小,不能绘制

出 $P \cdot V$ 曲线;此时,GIN 曲线直接由 $P_{\max}$ 、 $V_{\max}$ 相交而成。地表 0~2 m 段落 GIN 控制曲线见图 4。对于 2~15 m 岩层的最终 GIN 曲线则是由 $P_{\max}$ 、 $P \cdot V$ 、 $V_{\max}$ 三部分相交组成,其底部 2~15 m 段落 GIN 控制曲线见图 5。

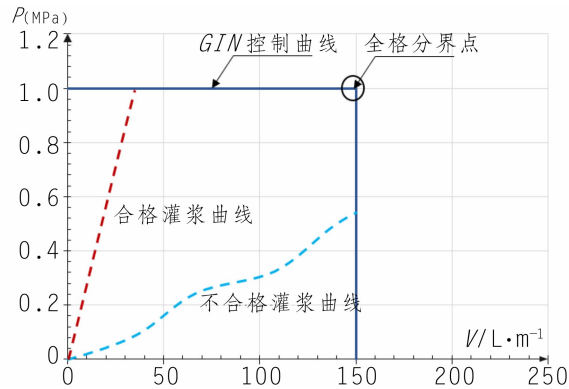


图 4 地表 0~2 m 段落 GIN 控制曲线图

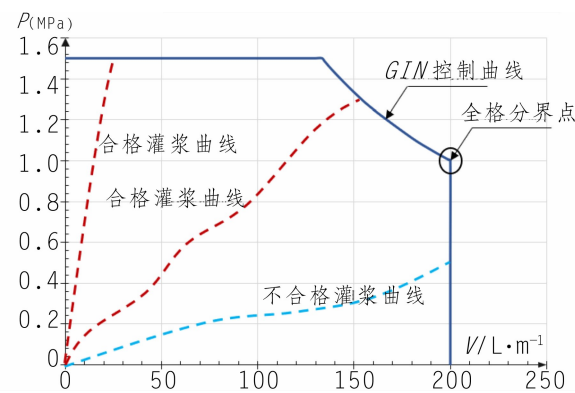


图 5 底部 2~15 m 段落 GIN 控制曲线图

最终的GIN帷幕灌浆设计参数为:

(1)0~2 m 段:GIN=150 MPa·L/m, $P_{\max}$ =1.0 MPa, $V_{\max}$ =150 L/m;

(2)2~15 m 段:GIN=300 MPa·L/m, $P_{\max}$ =1.5 MPa, $V_{\max}$ =200 L/m。

4 结 语

施工现场的GIN灌浆试验以及灌后压水试验成果证实:采用笔者所述的GIN设计参数值,其灌浆后的防渗能力可以满足5 Lu的设计要求^[7]。这一点已在该工程后续大坝帷幕灌浆施工中证明了GIN法帷幕灌浆工艺节约了整体施工成本,说明笔者文中所选取的GIN参数值的合理性。因此,笔者在文中阐述的一系列GIN帷幕灌浆参数的设计方法及实践经验在国内外类似大坝工程项目中具有一定的推广价值:

(1)“I—III—II—III—I”宽间距布孔方式适合于

高压GIN灌浆方法,其既能减少浆液串孔的情况出现,又能够通过下一孔序的P值、V值、灌浆量等实际数据分析判断上序孔的灌浆效果。

(2)通过岩石质量评价选择GIN值的设计方法可行。但因岩石质量不是唯一的设计指标,故其还要结合坝基防渗指标、现场压水试验结果、灌浆经济性等指标进行综合判断。

(3) $P_{\max}$ 值的设计不仅要满足浆液在细小裂缝中其扩散半径大于孔间距的要求,还要考虑等压力损失、裂隙内部阻力、盖重抬动的影响。在 $P_{\max}$ 压力作用下的浆液最大扩散半径相较于设计孔的间距,对于安全系数,笔者推荐其大于2.5。

(4)对于 $V_{\max}$ 值的设计并非越大越好,适当调小 $V_{\max}$ 值既能增大落在 $P \cdot V$ 曲线上的结束灌浆孔的合规率,又能减少不必要的浆液浪费。

(5)在浅层岩石灌浆段中,GIN 控制曲线不一定要包括 $P \cdot V$ 曲线,其可以是由 $P_{\max}$ 值与 $V_{\max}$ 值组成的垂直图形。对于浅层岩石灌浆段,选择较小的 $P_{\max}$ 值有利于控制地表冒浆、盖重抬动等现象的出现。

参考文献:

[1] Turcotte L, Savard B, Lombardi G, et al. The use of stable grout and GIN technique in grouting for dam rehabilitation[C]//Canadian Dam Safety Association (CDSA) Conference. 1994: 137-162.

[2] Houlsby A C. Routine interpretation of the Lugeon water-test[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 1976, 9(4):303-313.

[3] ISO 22282-3. Geotechnical investigation and testing-Geohydraulic testing-Part 3: Water pressure tests in rock[S]. 2012:13-14.

[4] Kettle C, Katterbach M. Practical application of the GIN concept (Part 1)[J]. Geotechnical News, 2015,31(1):16-26.

[5] Lombardi G. Selecting the grouting intensity[J]. Hydro-power & Dams, 1996,4(4):62-67.

[6] Lombardi G. Some theoretical considerations on cement rock grouting[J]. LOMBARDI SA, 1986,6(B):16-18.

[7] 李忠爽, 苏星, 周青. GIN 法在西非科特迪瓦波波里水电站中的试验研究[J]. 四川水力发电, 2021, 40(2):114-117.

作者简介:

宋建威(1986-),男,河南周口人,副高级工程师,硕士,从事国际工程项目技术与管理工作。

(编辑:李燕辉)