

DOI : 10.16285/j.rsm.2017.S2.043

基于裂隙充填特征的坝基岩体灌浆效果评价

伍宇腾¹, 韩增强², 王川婴², 周济芳¹, 胡 胜², 汪进超¹

(1. 雅砻江流域水电开发有限公司, 四川 成都 610051; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 灌浆是水工建筑物基础处理中最常用的技术手段, 通过灌浆封堵裂隙使基础岩体的防渗性、结构强度等达到设计要求。裂隙是透水透浆的最基本结构面, 在灌浆处理中浆液对裂隙的充填程度是灌浆效果最直观的表现, 由于灌浆工程的隐蔽性, 裂隙的充填特征难以直接获取到, 目前大多采用间接的压水试验法进行效果评价。利用钻孔摄像技术对灌浆钻孔进行成像探测, 获取钻孔 360°壁面图像, 识别灌浆后的裂隙充填特征, 考虑不同充填特征对灌浆效果的影响, 建立以充填裂隙和未充填裂隙为要素的灌浆效果评价指标——钻孔内裂隙充填指数 (borehole fracture filling integrity, BFFI), 探讨 BFFI 与常规压水试验透水率结果的相关关系, 利用三次多项式拟合两种评价指标的函数关系, 建立基于钻孔内裂隙充填指数的灌浆效果评价标准, 并将该方法应用到雅砻江桐子林水电站厂房坝区帷幕灌浆补充试验中, 结果表明, (1) 压水试验法和 BFFI 法的灌浆效果评价结果吻合度较高, 进一步说明了 BFFI 法评价灌浆效果的可行性; (2) 利用钻孔摄像技术开展灌浆效果评价, 既直观地展示浆液在裂隙中的充填特征, 又能反映灌浆效果, 为灌浆效果评价提供了新的思路和方法。

关键词: 灌浆效果评价; 钻孔摄像; 裂隙充填特征; 压水试验; 裂隙充填指数

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2017) 增 2 - 0311 - 06

Grouting effect evaluation of dam foundation rock mass based on fracture filling characteristics

WU Yu-teng¹, HAN Zeng-qiang², WANG Chuan-ying², ZHOU Ji-fang¹, HU Sheng², WANG Jin-chao¹

(1. Yalong River Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610051, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Grouting is the most commonly used method in the foundation treatment of hydraulic structures. It can block cracks or fractures of the dam foundation rock mass to meet the design requirements, such as seepage resistance, structural strength, etc. The fracture is the most basic structural surface of the water permeability and the filling degree of grout is the most direct manifestation of grouting effect. However, due to the hidden feature of the grouting project, it is difficult to obtain the filling characteristics of the cracks directly. At present, the indirect water pressure test is the most method in grouting evaluation. The 360°borehole wall image obtained by borehole camera technology is used to identify the characteristics of fracture filling. Then an evaluation index based on the characteristics of fracture filling is put forward, which is called borehole fracture filling integrity(BFFI). The relationship between BFFI and permeability is discussed and the function relation of two evaluation indexes is established using the cubic polynomial. Based on the conventional evaluation method of water pressure test, the BFFI standard for grouting effect evaluation is established. The method is applied to the Yalong River Tongzilin hydropower station test grouting workshop, verifying the reliability of the proposed evaluation method. The results show that: (1) The results of water pressure test method and the BFFI method grouting effect evaluation are consistent, so as to further illustrate the feasibility of BFFI method to evaluate grouting effect. (2) The evaluation of grouting effect can be carried out based on the technology of borehole camera, which can not only show the filling situation of the grout in the fractures, but also reflect the grouting effect. The method based on fracture filling characteristics provides a new idea for grouting effect evaluation.

Keywords: grouting effect evaluation; borehole camera; fracture filling characteristics; packer permeability test; borehole fracture filling integrity(BFFI)

1 引 言

灌浆是水电工程基础处理中常用的技术手段,

能够改良坝基岩体的品质, 形成一个结构新、强度大、防渗性高和化学稳定性好的结石体, 达到充填裂隙、封堵涌水和固结砂土的目的, 对改善施工条

收稿日期: 2017-03-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41402278, No. 41472271)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41402278, 41472271).

第一作者: 伍宇腾, 男, 1970 年生, 学士, 高级工程师, 主要从事大型水电工程建设和质量管理工作。E-mail: wuyuteng@ylhdc.com.cn

通讯作者: 韩增强, 男, 1986 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事钻孔摄像技术及岩土工程测试方面的研究。E-mail: zqhan@whrsm.ac.cn

件和确保工程安全具有重要意义。灌浆处理具有很强的隐蔽性,限制了对灌浆效果评价工作的开展,而灌浆效果的好坏又直接影响到工程的安全性,一种有效的灌浆效果评价方法对于保证工程质量十分关键^[1-2]。

灌浆效果评价通常采用针对固结效果的力学试验和针对防渗效果的压水试验两种方式,通过灌浆前后静/动弹性模量的变化反映固结效果以及通过透水率评价灌浆的防渗性效果。这些方法直接测算被改善的效果指标,具有很好的针对性,但仍存在一定的局限性,尤其是在评价指标出现异常时很难判断出异常发生的原因,缺乏一种综合评价结果的对比。已有学者开展了灌浆效果评价新方法的研究,赵明阶等^[3]使用波速层析成像技术,得出灌浆区岩体的动弹参数图像,评价灌浆效果。张文举等^[4]建立固结灌浆后岩体波速提高率与灌浆前岩体波速之间的关系,提出波速提高率与灌浆前岩体波速之间的关系可以预测对岩体固结灌浆效果。高祖纯^[5]利用岩体完整性指数评价了基岩灌浆效果。

水泥浆液对裂隙的充填程度是灌浆效果最直接的反应,浆液在裂隙中流动并充填的越充分,表明灌浆效果越好,如何识别并评价裂隙的充填程度,实现灌浆效果评价非常关键。本文利用钻孔摄像技术在孔壁裂隙探测识别上的优势^[6-9],直观地展示灌浆后孔壁裂隙的充填特征,并考虑不同充填特征的裂隙对灌浆效果的影响,提出钻孔内裂隙充填指数作为灌浆效果评价指标,探讨常规压水试验的透水率结果与钻孔内裂隙充填指数的相关性,建立基于裂隙充填特征的评价标准。通过在灌浆试验场地中应用,评价结果与常规压水试验结果吻合度较高,为灌浆效果评价提供新的思路和方法。

2 裂隙充填特征识别

灌浆前裂隙调查、灌浆处理和灌浆后效果检验均是在钻孔中进行,钻孔摄像技术是最常用的孔内检测手段之一,能够直观地反映孔壁岩体结构特征,获取钻孔360°壁面图像,识别灌浆后的裂隙充填特征。该技术基于光学原理^[10-12],能够在钻孔内部进行探测,并对孔壁进行无扰动的原位摄像记录,比钻孔岩心更能反映出钻孔内的实际情况,结果更加直观,而且能够对孔壁上存在的裂隙迹线进行识别计算,获取孔内裂隙产状、隙宽、充填程度等特征,如图1所示。

孔壁图像(平面展开图)是全景图像经变换形成的360°钻孔壁面彩色图像,由于孔壁岩体、裂隙

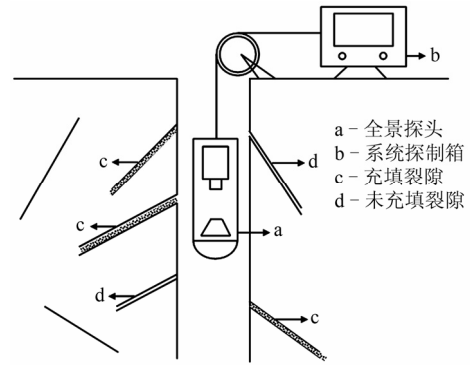


图1 钻孔摄像探测示意图
Fig.1 Sketch of borehole imaging

张开、水泥浆液充填等不同结构对光线反射的差异,在孔壁图像中也表现出明显的区别。根据水泥浆液对裂隙的充填程度,将孔壁裂隙分为充填裂隙和未充填裂隙两类。未充填裂隙由于裂隙张开、没有充填,对光照的反射较少,在孔壁图像中通常显示为颜色较深的黑色,充填裂隙由于水泥浆液的充填在孔壁图像中通常显示为灰色,见图2。



(a) 充填裂隙 (b) 未充填裂隙

图2 孔壁图像中的裂隙充填特征

Fig.2 Fracture filling characteristics in borehole wall unfolded image

由于钻孔探测范围以及孔壁图像对裂隙识别精度的限制,本次开展研究时(1)因在裂隙具备可灌性的前提下微裂隙更容易被充填,非微裂隙(隙宽大于0.1 mm)是影响灌浆效果的主要因素,故研究对象为非微裂隙,即宽度大于0.1 mm的裂隙。(2)裂隙切割钻孔在孔壁图像中形成的迹线长度有限,孔壁图像中裂隙的充填特征以充填和未充填为主,极少出现半充填的情况,在文中的分析中不考虑半充填裂隙。

3 灌浆效果评价

3.1 评价指标

灌浆效果最直接的表现是水泥浆液在裂隙中的充填,利用裂隙充填特征开展灌浆效果评价,如何判断裂隙充填程度是关键,孔壁图像可以观察并量

化裂隙的充填情况，在一定程度上反映了灌浆效果的好坏^[13-16]。

按照孔壁图像中的裂隙充填特征，以充填和未充填两种不同类型裂隙的数量作为研究对象，建立基于裂隙充填特征的灌浆效果评价指标，定义为钻孔内裂隙充填指数 (borehole fracture filling index, BFFI)。在设定研究区段内，假设充填裂隙的数量为 n_1 ，未充填裂隙的数量为 n_2 ，考虑到两种不同充填特征的裂隙对灌浆效果的影响作用不同，分别设定影响系数，设充填裂隙的影响系数为 w_1 ，未充填裂隙的影响系数为 w_2 ，建立裂隙充填指数的函数表达式为

$$BFFI = \frac{w_1 n_1 + w_2 n_2}{n_1 + n_2} \quad (1)$$

充填裂隙的数量越大，表明灌浆对裂隙的充填效果越好，假设此种情况下的裂隙充填指数值越大，则充填裂隙数与 BFFI 成正相关关系，取 $w_1 = 1$ ；在充填裂隙数一定的情况下未充填裂隙的数量越大，表明灌浆对裂隙的充填效果越差，假设此种情况下的裂隙充填指数值越小，则未充填裂隙数与 BFFI 成反相关关系，取 $w_2 = -1$ ，则函数表达式(1)化简为

$$BFFI = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (2)$$

函数具有以下特点：(1) 当钻孔内裂隙完全被充填时 ($n_2 = 0$)，裂隙充填指数 $BFFI = 1$ ，灌浆效果最好。(2) 当钻孔内裂隙均未被充填时 ($n_1 = 0$)，裂隙充填指数 $BFFI = -1$ ，灌浆效果最差。(3) 当充填裂隙数和未充填裂隙数相同时，裂隙充填指数 $BFFI = 0$ ，但灌浆效果随未充填裂隙数的不同而有所差别，在这种情况下不采用 BFFI 的计算公式进行计算，单独进行分析。(4) 在不考虑特点(3)的情况下裂隙充填指数 BFFI 的取值范围在 $-1 \sim 1$ 之间，BFFI 值越大，灌浆效果越好，BFFI 值越小，灌浆效果越差。

3.2 评价标准

岩体透水率是压水试验的测试结果，反映了岩体的透水程度，是最常用的灌浆效果评价指标。裂隙充填指数 BFFI 反映了灌浆后水泥浆液对裂隙的充填程度，BFFI 值越大，裂隙充填程度越高，灌浆效果越好，压水试验的透水率结果越小，两种评价指标应该呈现反相关关系。

在雅砻江桐子林水电站灌浆试验场地，压水试验及钻孔摄像探测获得了多个压水试验检查孔的透水率和孔壁裂隙充填特征，以压水试验段为研究单

元，计算每个研究单元的 BFFI 值，在同一坐标系下，以样本数据编号为横坐标，透水率结果和裂隙充填指数 BFFI 为纵坐标绘制变化曲线，如图 3 所示。

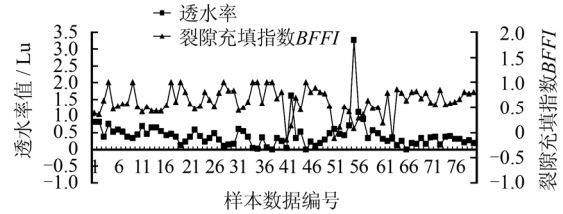


图 3 样本数据的透水率与 BFFI 对比
Fig.3 Comparison of water permeability and BFFI of sample data

从统计结果可以看出，透水率与 BFFI 之间呈现出较明显的反比关系，即在透水率出现极值的样本数据点，BFFI 往往也是极值，两种评价指标间可能存在某种函数关系。以 BFFI 值为横坐标，透水率值为纵坐标，绘制样本数据点如图 4 所示。除几个边缘区的异常点外，大部分的样本数据点符合较好的拟合曲线，剔除数据异常点后，拟合两个指标之间的关系曲线，经过多次拟合验证，得到 3 次多项式能较好的拟合二者的关系，如图 5 所示，可决系数 $R^2 = 0.9894$ ，拟合程度较好。

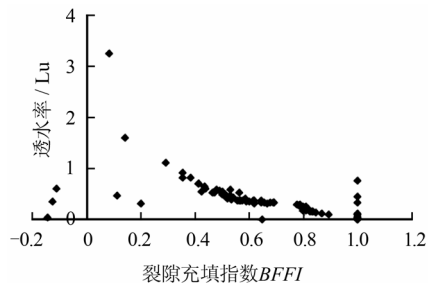


图 4 透水率与 BFFI 的变化曲线
Fig.4 Change curve of water permeability and BFFI

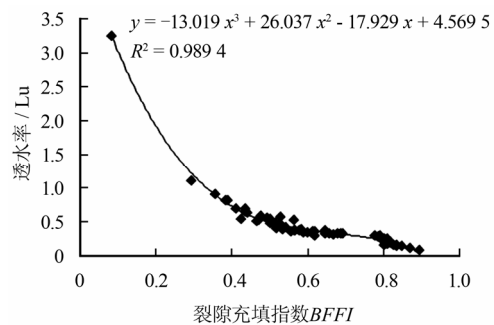


图 5 透水率与 BFFI 函数关系拟合
Fig.5 Relationship fitting of water permeability and BFFI function

通过曲线拟合得到二者的经验函数关系式：

$$y = -13.019x^3 + 26.037x^2 - 17.929x + 4.5695 \quad (3)$$

式(3)是透水率与BFFI的关系式,以常规的透水率评价标准为参考,计算出与其对应的BFFI值,通常坝基岩体的透水率设计标准为1~5 Lu。由式(3)可得,透水率设计标准为1 Lu时,对应的BFFI = 0.334,透水率设计标准为3 Lu时,对应的BFFI = 0.102,透水率设计标准为5 Lu时,对应的BFFI = -0.023。根据每个透水率设计标准计算得到的BFFI值,建立基于BFFI的灌浆效果评价标准,见表1。

表1 基于BFFI的灌浆效果评价标准
Table 1 Grouting effect evaluation standard based on BFFI

评价标准	不同透水率(Lu)设计时 BFFI 评价标准					
	5		3		1	
	-0.023	<-0.023	0.102	<0.102	0.334	<0.334
BFFI	符合设计要求	不符合设计要求	符合设计要求	不符合设计要求	符合设计要求	不符合设计要求

4 工程应用

4.1 工程概况

桐子林水电站位于四川省攀枝花市盐边县境内,距上游二滩水电站约18 km,距雅砻江与金沙江汇合口约15 km,系雅砻江下游最末一个梯级电站,工程枢纽主要由左右岸挡水坝、河床式发电厂房、泄洪闸(坝)等建筑物组成。厂房坝段建基面基岩体为微新~弱风化英云闪长质混合岩。结构面以N0~10W/SW(NE) 40°~60°、N20~30E/NW 10°~50°为主,节理、裂隙居多且多无充填,小断层、挤压破碎带、裂隙密集带相对分布随机,延伸性较差。

本次灌浆试验的设计标准为1 Lu,为了选择合适的灌浆方法、施工工艺、灌浆材料等技术参数,在厂房坝区开展帷幕灌浆试验,模拟电站典型地质条件下,基岩的灌浆特性以及灌浆指标,为下一阶段的设计及施工提供指导。

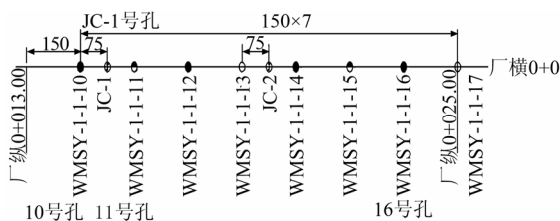


图6 灌浆钻孔位置图(单位:cm)

Fig.6 Layout of grouting borehole(unit:cm)

4.2 灌浆效果评价

灌浆结束后,选择10、12、16、JC-1号孔等4个钻孔,分别利用压水试验和钻孔成像两种技术手段开展效果评价。以压水试验段为基本研究单元,计算每个研究单元的透水率和BFFI值,根据两个指标的评价标准,开展灌浆效果评价。以BFFI为横坐标,透水率为纵坐标,将每个研究单元的计算结果以坐标点的形式绘制到坐标系中如图7所示。

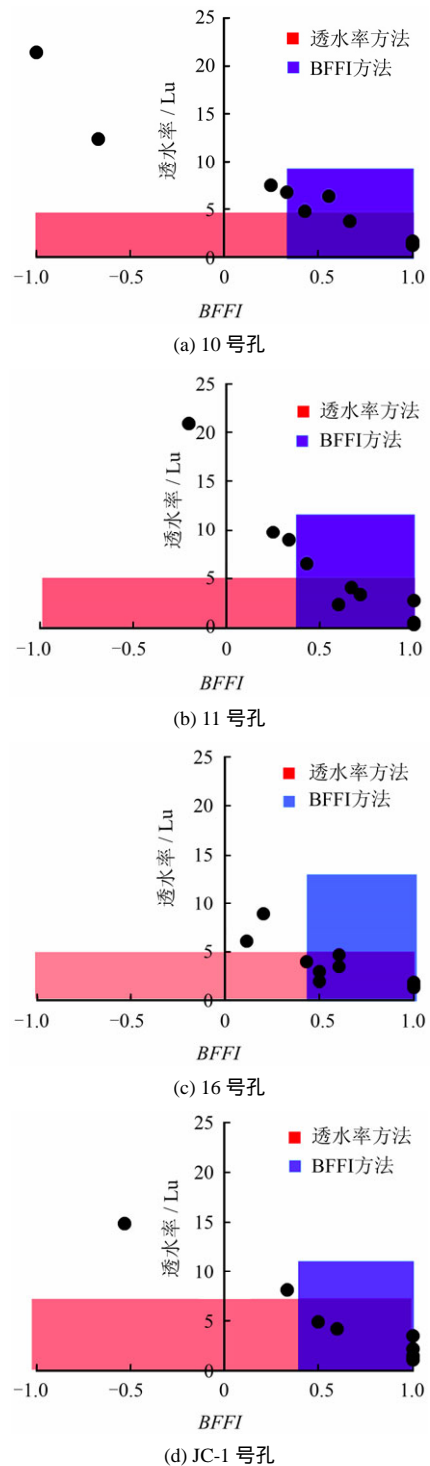


图7 两种灌浆效果评价方法的比较

Fig.7 Comparison of two grouting effect evaluation methods

图 7 中，红色区域内的坐标点表示符合基于透水率的评价标准，蓝色区域内的坐标点表示符合基于 BFFI 的评价标准。

设满足透水率评价标准（红色区域）的研究单元集合数为 A ，满足 BFFI 评价标准（蓝色区域）的研究单元集合数为 B ，达到其中任一种评价标准的坐标区域为蓝色和红色区域的并集，设落入该区域的研究单元数 $N_{A \cup B} = 24$ 。同时满足两种评价标准的坐标区域为红色和蓝色区域的交集，设落入该区域的研究单元数为 $N_{A \cap B} = 20$ 。

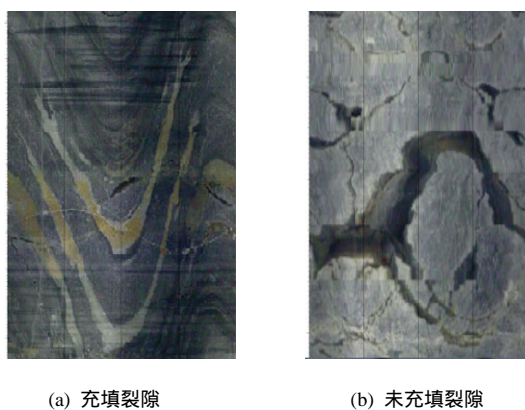
定义吻合度 R 为同时满足两种评价标准的样本点数与满足任一中评价标准的样本点数的比值，计算式为

$$R = \frac{N_{A \cap B}}{N_{A \cup B}} \quad (4)$$

可得 $R = 0.833$ 。

吻合度 R 值越高，表明两种评价方法的评价结果越吻合。结果显示，裂隙充填指数 BFFI 评价结果与透水率评价结果的吻合度高，BFFI 在一定程度上能够较准确地反映灌浆效果，进一步验证了利用该方法进行灌浆效果评价具有一定的可行性。

利用孔壁图像可以直观展示浆液在裂隙中的充填程度，既可以验证透水率结果的准确性，又可以作为透水率结果异常的分析依据。如图 8 所示，孔壁图像（见 8(a)）中裂隙基本上被完全充填， $BFFI = 0.832$ ，压水试验的透水率结果为 0.45 Lu，两种方法的评价结果一致，灌浆效果符合设计要求。孔壁图像（见 8(b)）中裂隙未被充填， $BFFI = -0.158$ ，灌浆效果较差，而压水试验的透水率结果为 0.83 Lu，符合设计要求，两种方法的评价结果不一致，考虑采用二次压水试验和裂隙未充填原因分析对评价结果进行验证。



(a) 充填裂隙

(b) 未充填裂隙

图 8 裂隙充填特征与透水率结果的比较

Fig.8 Comparison of fracture filling characteristics and permeability

5 结 论

(1) 利用钻孔摄像技术获得的高精度孔壁图像识别裂隙充填特征，能够直观反映灌浆效果。

(2) 通过裂隙不同充填程度对灌浆效果的影响，建立了基于充填特征的灌浆效果评价指标 BFFI（钻孔内裂隙充填指数）利用三次多项式拟合了透水率与 BFFI 值的相关关系，建立了 BFFI 方法的评价标准。

(3) 将该评价方法应用到雅砻江桐子林水电站帷幕灌浆试验中，两种方法的结果较为吻合。

(4) 引入钻孔摄像技术开展灌浆效果评价，突破了目前评价方法单一的局限性，为灌浆效果综合评价提供了新的思路和方法。

参 考 文 献

- [1] 马国彦, 常振华. 岩体灌浆排水锚固理论与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
MA Guo-yan, CHANG Zhen-hua. Theory and practice of grouting drainage and anchorage of rock mass[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2003.
- [2] 孙钊. 大坝基岩灌浆[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
SUN Zhao. Grouting in dam's rock foundation[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2004.
- [3] 赵明阶, 徐蓉. 坝基灌浆效果评价中的波速成像法[J]. 桂林理工大学学报, 1996, 16(2): 136 - 142.
ZHAO Ming-jie, XU Rong. Tomography of wave velocity in evaluating the grout effect of dam base[J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 1996, 16(2): 136 - 142.
- [4] 张文举, 卢文波, 陈明, 等. 基于灌浆前、后波速变化的岩体固结灌浆效果分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 469 - 478.
ZHANG Wen-ju, LU Wen-bo, CHEN Ming, et al. Analysis of consolidation grouting effect of rock mass based on comparison of wave velocity before and after grouting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 469 - 478.
- [5] 高祖纯. 利用岩体完整性指数评价基岩灌浆效果的探讨[J]. 人民长江, 2004, 35(5): 19 - 22.

- GAO Zu-chun. Discussion on grouting effect of foundation rock by using integrity index of rock mass[J]. **Yangtze River**, 2004, 35(5): 19 - 22.
- [6] 简文彬, 张登, 许旭堂. 基于波速测试的裂隙岩体固结灌浆效果分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1943 - 1949.
- JIAN Wen-bin, ZHANG Deng, XU Xu-tang. Analysis of consolidation grouting effect of fractured rock mass based on wave velocity test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(7): 1943 - 1949.
- [7] 陈开圣, 彭小平. 地震波法在岩堆灌浆效果检测中的应用[J]. 工程地质学报, 2005, 13(4): 530 - 532.
- CHEN Kai-sheng, PENG Xiao-ping. Application of seismic wave method in detecting grouting effects of daping rock pile[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2005, 13(4): 530 - 532.
- [8] 韩增强, 王川婴, 周济芳, 等. 基于钻孔图像的孔壁岩体完整性计算及在裂隙岩体灌浆效果评价中的应用[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊 2): 245 - 249.
- HAN Zeng-qiang, WANG Chuan-ying, ZHOU Ji-fang, et al. Calculation of borehole wall rock integrity based on borehole images and its application in evaluation of grouting effect in fractured rack mass[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(Supp.2): 245 - 249.
- [9] 魏立巍, 秦英译, 唐新建, 等. 数字钻孔摄像在小浪底帷幕灌浆检测孔中的应用[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 843 - 848.
- WEI Li-wei, QIN Ying-yi, TANG Xin-jian, et al. Application of digital borehole camera to quality test boreholes for grout curtain in Xiaolangdi water control project[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(4): 843 - 848.
- [10] 王川婴, 葛修润, 白世伟. 数字式全景钻孔摄像系统研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 398 - 403.
- WANG Chuan-ying, GE Xiu-run, BAI Shi-wei. Study of the digital panoramic borehole camera system[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(3): 398 - 403.
- [11] 王川婴, 胡培良, 孙卫春. 基于钻孔摄像技术的岩体完整性评价方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1326 - 1330.
- WANG Chuan-ying, HU Pei-liang, SUN Wei-chun. Method for evaluating rock mass integrity based on borehole camera technology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(4): 1326 - 1330.
- [12] HAN Z, WANG C, ZHU H. Research on deep joints and lode extension based on digital borehole camera technology[J]. **Polish Maritime Research**, 2015, 22(Supp.1): 10 - 14.
- [13] 刘涛. 桐子林水电站深厚覆盖层帷幕灌浆关键技术研究[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(6): 95 - 98.
- LIU Tao. Key technologies of curtain grouting for the deep overburden layer of Tongzilin hydropower station[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2013, 30(6): 95 - 98.
- [14] 李维朝, 梁铎, 蔡红, 等. 堤坝帷幕灌浆效果评价[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2012, 10(3): 214 - 218.
- LI Wei-chao, LIANG Duo, CAI Hong, et al. Quality evaluation of grouting curtain in a dam foundation[J]. **Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research**, 2012, 10(3): 214 - 218.
- [15] 韩磊, 陈建生, 陈亮. 帷幕灌浆扩散半径及数值模拟的研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 2235 - 2240.
- HAN Lei, CHEN Jian-sheng, CHEN Liang. Research on diffusion radius and numerical simulation in curtain grouting[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(7): 2235 - 2240.
- [16] 崔文娟, 柴军瑞, 许增光, 等. 改进遗传算法在坝基帷幕灌浆方案优化中的应用[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3349 - 3352.
- CUI Wen-juan, CHAI Jun-rui, XU Zeng-guang, et al. Application of improved genetic algorithm to optimization of grouting curtain of dam foundation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(12): 3349 - 3352.