

DOI: 10.11779/CJGE2016S2040

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

韩增强¹, 王川婴¹, 周济芳², 伍宇腾², 胡胜¹, 汪进超¹

(1. 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; 2. 雅砻江流域水电开发有限公司, 四川 成都 610051)

摘要: 灌浆是改善裂隙岩体质量最常用的技术手段。针对目前灌浆效果评价依据的单一性, 通过钻孔图像中岩体完整性的计算, 研究了灌浆前后孔壁岩体完整性指数 RMDI 的变化以及岩体质量的改善情况。详细描述了钻孔图像中裂隙参数的计算过程, 获得了裂隙产状、隙宽等参数, 通过图像识别将裂隙的充填特征分为未充填、半充填和完全充填三类。在岩体完整性指数密度函数的基础上, 建立了岩体完整性指数的计算公式, 并总结了 RMDI 与岩体完整程度的对应关系。对灌浆前后 RMDI 的变化进行了统计分析, 结果显示通过灌浆处理, 孔壁岩体完整程度有明显的改善, 灌浆效果明显。最后, 对部分典型区段的孔壁图像和透水率结果进行了综合比较, 裂隙得到了较好的填充, 进一步验证了本次灌浆处理的效果明显。研究结果表明利用钻孔图像以及孔壁完整性指数评价灌浆效果是可行的, 弥补了压水试验结果评价依据的单一和局限性。

关键词: 灌浆效果; 岩体完整性; RMDI; 钻孔图像; 裂隙岩体

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4548(2016)S2 - 0245 - 05

作者简介: 韩增强 (1986 -), 男, 助理研究员, 主要从事钻孔摄像及岩土工程测试技术方面的研究工作。E-mail: zqhan@whrsm.ac.cn。

Calculation of borehole wall rock integrity based on borehole images and its application in evaluation of grouting effect in fractured rock mass

HAN Zeng-qiang¹, WANG Chuan-ying¹, ZHOU Ji-fang², WU Yu-teng², HU Sheng¹, WANG Jin-chao¹

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

Abstract: Grouting is the most commonly used technique to improve the quality of fractured rock mass. According to the single property of grouting effect evaluation, the change of RMDI of rock mass integrity index before and after grouting is studied based on the calculation of rock mass integrity in borehole images. The calculation of fracture parameters such as occurrence, width in the borehole images is described. The characteristics of the fracture are divided into three types, which are not filling, half filling and filling by image recognition. Based on the exponential density function of the integrity of rock mass, the formula for calculating the integrity index of rock mass is established. The corresponding relationship between RMDI and rock mass integrity is summarized. Statistical analysis is made on the change of RMDI before and after grouting. The results show that the integrity of rock mass has obvious improvement through grouting, and the grouting effect is obvious. Finally, a comprehensive comparison is made on the results of the pore wall images and the water permeability of some typical sections. The fractures are well filled, and it is further verified that the effect of the grouting treatment is obvious. It is feasible to evaluate the grouting effect through borehole images and borehole wall integrity index, which can make up the single property and limitation of the evaluation basis of pressure water test results.

Key words: grouting effect; rock mass integrity; RMDI; borehole image; fractured rock mass

0 引言

随着中国水利水电建设的迅猛发展, 推动了坝基工程处理水平的提高。其中, 灌浆处理是改善坝基质量常用的技术手段, 它通过填充裂隙、断层、软弱结

构面等改良坝基岩体品质, 形成一个结构新、强度大、防渗性能高和化学稳定性好的结石体, 从而达到充填裂隙、堵住涌水和固结砂土的目的, 对改善施工条件

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，往往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。长期以来，灌浆效果评价通常采用针对力学性能改善程度的力学试验和针对防渗效果的压水试验。一方面，开展了针对静/动弹性模量的测试技术研究，研发了钻孔弹模仪、声波测试仪等相关设备，通过灌浆前后静/动弹性模量的变化，评价灌浆的固结效果；另一方面，也开展了压水试验研究，提出了透水率的概念，根据防渗性要求建立允许的透水率值，通过现场试验得到的透水率，评价灌浆的防渗性效果。纵观这些评价方法，往往忽略了所处的地质环境，特别是未能充分考虑岩体结构特征和裂隙分布规律对灌浆效果的影响，在缺乏这些信息的前提下，开展灌浆效果评价具有很大的局限性。

坝基岩体的渗透性主要是由裂隙渗透性大小来决定的，灌浆处理的主要目的是封堵不连续面，使岩体的透水性达到设计要求，因此，开展灌浆前后的裂隙调查以及裂隙分布规律的研究有助于更好地指导灌浆设计和评价灌浆效果。本文以雅砻江桐子林水电站灌浆试验场地为例，利用钻孔摄像技术，开展灌浆前裂隙调查，获取孔壁岩体结构特征，并通过计算岩体完整性指数来反映灌浆前岩体质量，对灌浆处理的设计和施工方法提供参考依据；灌浆结束后，利用钻孔摄像技术，获取裂隙充填特征，并计算灌浆后孔壁岩体完整性指数，对比灌浆前后的岩体质量，对灌浆效果作出评价。旨在解决以往评价方法存在的忽略裂隙分布特征、评价方法单一、评价依据直观性差等问题，为灌浆效果评价提供一种全新的技术和方法。

1 钻孔图像中的裂隙识别

本次测试采用中国科学院武汉岩土力学研究所研制的新一代数字式全景钻孔摄像系统（图 1），具有 360° 孔壁全景观测、数字化三维钻孔岩心、裂隙几何参数计算及统计分析等功能，本文所述的钻孔图像即利用该系统获取到的孔壁岩体图像。



图 1 数字式全景钻孔摄像系统

Fig. 1 Digital borehole panoramic camera system

1.1 裂隙参数计算

钻孔完全切割岩体裂隙后，在孔壁上形成的迹线形状为椭圆，将 360° 孔壁沿铅直方向展开后，在平面展开图中，结构面的迹线表现为正弦曲线的形式，如图 2 所示。钻孔图像正上方标记了原始孔壁的方位信息，图像左侧带有深度标尺，标记了原始孔壁的深度信息。

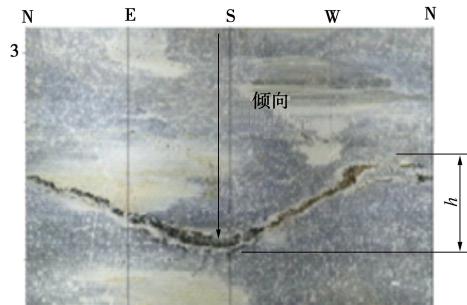


图 2 产状计算示意图

Fig. 2 Sketch of occurrence calculation

在钻孔图像中，结构面正弦曲线波谷位置所对应的方位信息即为倾向值，假设正弦曲线波谷所对应的垂直方位值为 N，则该结构面的倾向值 α 为

$$\alpha = N \quad . \quad (1)$$

结构面倾角的正切值为结构面所在正弦曲线波峰到波谷的垂直距离与钻孔直径的比值。假设正弦曲线波峰到波谷的垂直距离为 h ，钻孔直径为 D ，则该结构面的倾角值 β 为

$$\beta = \arctan \frac{h}{D} \quad . \quad (2)$$

结构面隙宽，也称为张开度，是指结构面两相邻岩壁间的垂直距离。在钻孔图像中，可以通过测量位于结构面两条边界上的两点间的垂直距离得到，下面具体介绍结构面隙宽的计算过程。

假设结构面为标准的平面，图 3 为标准平面结构面隙宽的计算示意图，弧线 $ABCD$ 和 $A'B'C'D'$ 分别对应结构面的上、下界面，从图 3 中可以看出：

$$AA' = BB' = CC' = DD' \quad . \quad (3)$$

将钻孔图像中结构面曲线上对应两点间的距离成为曲线间距，真实结构面间距 (d) 和曲线间距 (D) 满足

$$d = D \cos \theta \quad , \quad (4)$$

式中， θ 为结构面倾角。

1.2 裂隙充填特征识别

钻孔图像是基于光学成像原理获得的，不同岩性和结构特征的孔壁岩体对光的反射能力不同，从而在钻孔图像中造成差异，通过图像处理和识别技术，可以识别出不同岩性、充填特征等地质信息。灌浆施工前，裂隙基本处于无填充的状态，裂隙区域呈现为黑

色, 与周围岩体的图像颜色差异明显, 能够较容易地识别到裂隙的形态; 灌浆完成后, 大部分裂隙被水泥浆液充填, 被水泥充填后的裂隙区域呈现灰白色, 有明显的充填痕迹, 根据充填裂隙与周围岩体的颜色差别, 可以识别裂隙的充填特征。按照钻孔图像中裂隙的充填特征, 灌浆后的裂隙主要分为 3 类: 完全充填、半充填、未充填, 如图 4 所示。

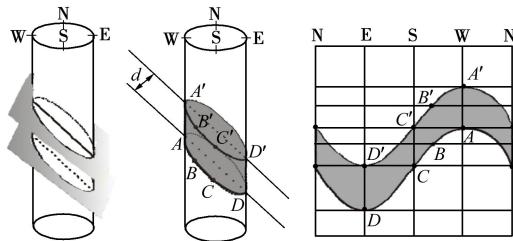


图 3 隙宽计算示意图

Fig. 3 Sketch of width calculation

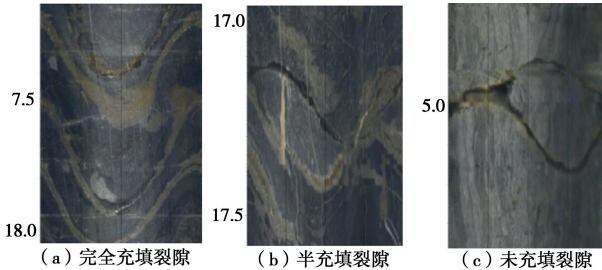


图 4 裂隙充填特征

Fig. 4 Filling characteristics of fractures

2 孔壁岩体完整性评价方法

为了实现岩体完整性的准确评价, 在钻孔图像上对结构面和岩体结构进行详细的描述和统计, 以毫米级的精度划分岩体的完整与破碎, 并以为基础建立岩体完整性指数密度函数 DIDF (integrity index density function), 实现全孔或局部孔段的岩体完整性评价。

为了建立岩体完整性指数密度函数 DIDF, 首先要在钻孔图像中定义完整与破碎的概念。破碎型岩体以张开、疏松和破碎为特征, 而完整型岩体以闭合和完整为特征, 岩体结构的张开和闭合可以通过钻孔图像中反映的孔壁岩体特征来确定。孔壁岩体中裂隙、破碎、空洞等不连续结构区域定义为破碎型结构; 孔壁岩体中无裂隙的连续结构区域定义为非破碎型结构。

完整性指数密度函数 (DIDF) 是一个沿钻孔轴向变化的单变量函数, 用 $f(z)$ 表示, 其中 z 为深度。定义为

$$f(z) = \begin{cases} 0 & \text{破碎型结构} \\ 1 & \text{非破碎型结构} \end{cases} \quad (5)$$

DIDF 反映了岩体完整性特征沿钻孔轴向的分布,

适合于评价宽大结构面及其影响范围, 在此基础上, 提出岩体完整性指数 (rock mass integrity index) 的概念, 定义为在给定范围内完整岩体块度所占的尺度, 用百分数来表示。

若给定的深度范围为 $[h_1, h_2]$, 则 RMDI 可用该范围内 DIDF 的定积分表示, 其表达式为

$$RMDI = \frac{\int_{h_1}^{h_2} f(z) dz}{\int_{h_1}^{h_2} 1 dz} \quad (6)$$

关于岩体完整性指数与岩体完整程度的对应关系, 通过大量的工程实践应用, 提出两者间的分类对应关系, 见表 1。

表 1 岩体完整性指数对照表

Table 1 Indices for rock mass integrity

岩体完整程度	优秀	良好	一般	差	极差
RQD 值/%	100~90	90~75	75~50	50~25	<25
岩体完整性指 数 RMDI	1.0~0.8	0.8~0.5	0.5~0.2	0.2~0.1	<0.1

3 灌浆效果评价

3.1 工程概况

桐子林水电站位于四川省攀枝花市盐边县境内的雅砻江干流上, 下距雅砻江与金沙江汇合口约 15 km, 距攀枝花市约 28 km, 距上游已建二滩水电站约 18 km, 是雅砻江干流下游最末一级梯级电站。工程所在场区地质复杂、地质结构多变, 需要进行防渗帷幕灌浆处理, 为了有效地实施帷幕灌浆, 引入钻孔摄像技术开展灌浆指导和效果评价, 通过分析灌浆前后水泥浆液对裂隙的充填特征变化, 评价灌浆效果, 指导后续灌浆设计和施工。以厂房坝试验区段的灌浆场地为例, 共布置灌浆钻孔 7 个, 钻孔平均深度为 50 m 左右, 如图 5 所示。

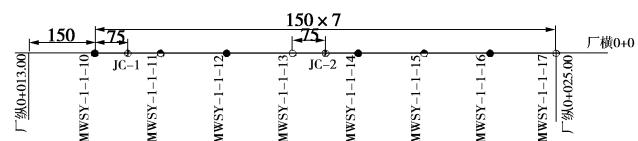


图 5 厂房坝段帷幕灌浆试验孔位布置图

Fig. 5 Sketch of borehole position

3.2 灌浆前后孔壁岩体完整性比较

灌浆处理的目的是封堵不连续面, 改善岩体质量, 而孔壁岩体完整性指数反映了岩体的完整情况, 同时间接反映出灌浆对裂隙充填情况。因此, 可以通过对比灌浆前后完整性指数的变化, 判断岩体质量的改善, 评价灌浆处理的效果。

本次灌浆采取先孔内摄像观测, 后灌浆处理的方

式,每隔5m进行一次测试。灌浆前,对孔壁岩体进行摄像测试,获取裂隙分布和岩体质量,评价灌浆区域的地质情况;灌浆后再次对孔壁岩体进行摄像测试,获取裂隙充填特征和灌后岩体质量,评价灌浆效果。以2m为计算单位,计算灌浆前后的RMDI值,分析岩体质量的变化,具体计算结果如图6所示。

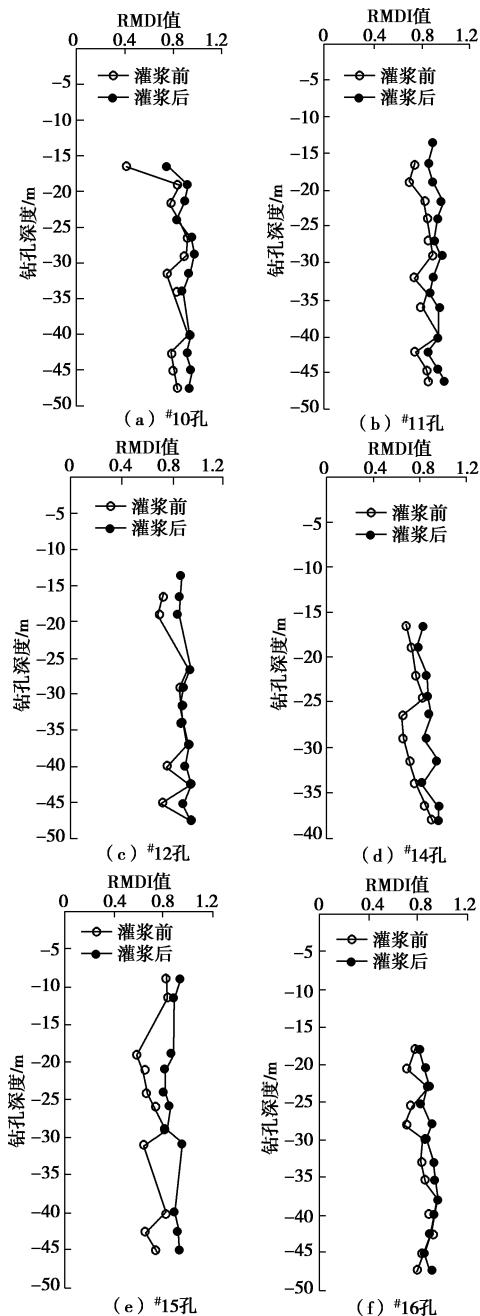


图6 灌浆前后孔壁岩体完整性指数变化情况

Fig. 6 Change of rock mass integrity index before and after grouting

从完整性指数的计算结果可以看出,灌浆前,部分区段的孔壁岩体完整性指数较小,岩体完整程度属于一般范围内($RMDI < 0.5$),通过灌浆处理,孔壁岩体的完整性指数有明显的变化,岩体完整程度基本上都属于良好以上范围内($RMDI > 0.5$)。其中,[#]10孔、[#]14孔和[#]15孔在灌浆前后,岩体完整性指数变化较大,岩体质量的改善较为明显;[#]11孔、[#]12孔和[#]16孔由于灌浆前孔壁岩体的质量较好,灌浆前后的完整性指数变化不大,灌浆处理的效果体现的不明显;通过灌浆,岩体质量有明显改善,表明本次灌浆对裂隙的充填效果较好,基本上完成了对不连续面的封堵。

针对完整性指数较低的区段,如图7所示,通过钻孔图像进一步观察孔壁岩体质量及裂隙特征,并结合这些区段的压水试验结果进行验证,对比分析结果如表2所示。

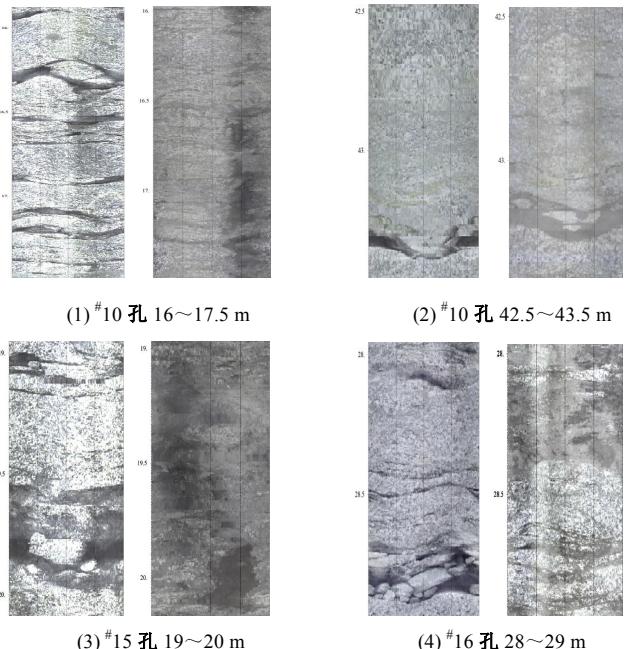


图7 灌浆前后部分区段钻孔图像的对比

Fig. 7 Comparison of borehole images in some sections before and after grouting

表2 部分区段灌浆前后分析结果对比

Table 2 Results of comprehensive analysis before and after grouting

区段范围	RMDI		透水率/Lu	
	灌浆前	灌浆后	灌浆前	灌浆后
[#] 10孔 16~17.5m	0.423	0.736	10.3	2.6
[#] 10孔 42.5~43.5m	0.783	0.906	6.8	1.7
[#] 15孔 19~20m	0.579	0.864	11.5	2.4
[#] 17孔 28~29m	0.694	0.905	8.7	3.2

从灌浆前后的分析结果对比情况可以看出,灌浆前后孔壁岩体的完整性指数RMDI有明显变化,表明岩体完整程度得到改善;从钻孔图像中也可以发现裂隙充填特征明显,水泥浆液完全充填裂隙;从压水试验的前后结果对比发现,这些区段在灌浆前的透水率普遍较大,均大于本次灌浆试验透水率的设计标准3

Lu, 灌浆后透水率基本控制在 3 Lu 左右, 达到设计标准, 进一步验证了本次灌浆试验的效果较好。同时, 本文的研究成果也反映了利用孔壁岩体完整性指数 RMDI 和孔壁图像中裂隙充填特征的变化进行效果评价是可行的。

4 结 论

钻孔图像能够直观地反映裂隙的张开状态及充填特征, 引入孔壁完整性指数 RMDI 这一定量化指标评价岩体质量, 通过灌浆前后 RMDI 的变化反映灌浆效果的好坏, 再结合钻孔图像的直观定性分析, 使得灌浆效果的评价更加准确, 解决了仅以透水率单一指标评价灌浆效果的片面性问题。本文得到的以下 3 点主要结论。

- (1) RMDI 能够定量化描述孔壁岩体质量, 根据灌浆前后的变化可反映灌浆效果。
- (2) 钻孔图像能够直观地表现浆液在裂隙中的充填特征, 便于灌浆效果的评价工作。
- (3) RMDI 和透水率都能反映灌浆效果, 二者之间的相关关系有待进一步的研究。

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: 387 - 400. (MA Guo-yan, CHANG Zhen-hua. Theory and practice of grouting drainage and anchorage of rock mass[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2003: 387 - 400. (in Chinese))
- [2] 孙 刚. 大坝基岩灌浆[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004: 102 - 126. (SUN Zhao. Grouting in dam's rock foundation[M]. Beijing: China Water&Power Press, 2004: 102 - 120. (in Chinese))
- [3] 王贵生, 董 桂. 岩体裂隙对帷幕灌浆的影响[J]. 东北水利水电, 2004, 22(238): 39 - 40. (WANG Gui-sheng, DONG Gui. Interference of rock mass crack on certain grouting[J]. Water Resoures & Hydropower of Northeast China, 2004, 22(238): 39 - 40. (in Chinese))
- [4] 曾纪全, 来结合, 全 海. 溪洛渡水电站软弱岩带固结灌浆试验效果检测[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增刊): 61 - 69. (ZENG Ji-quan, LAI Jie-he, QUAN Hai. Effect inspection of grouting test for weak batholith in Xiluodu hydroelectric power station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(S0): 61 - 69. (in Chinese))
- [5] FRANSSONA, TSANG C F, RUTQVIST J, et al. A new parameter to assess hydro-mechanical effects in single-hole hydraulic testing and grouting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(7): 1011 - 1021.
- [6] LEE J S, BANG C S, MOK Y J, et al. Numerical and experimental analysis of penetration grouting in jointed rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(7): 1027 - 1037.
- [7] 王川婴, 葛修润, 白世伟. 数字式全景钻孔摄像系统及应用 [J]. 岩土力学, 2001, 22(4): 523 - 526. (WANG Chuan-ying, GE Xiu-run, BAI Shi-wei. The digital panoramic borehole camera system and its application[J]. Rock and Soil Mechanics. 2001, 22(4): 523 - 526. (in Chinese))
- [8] HAN Zeng-qiang, WANG Chuan-ying, ZHU Heng-yin. Research on deep joints and lode extension based on digital borehole camera technology[J]. Polish Maritime Research. 2015, 22(1): 10 - 14.
- [9] 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. (in Chinese))
- [10] 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): 24 - 26. (GAO Zu-chun. Discussion on grouting effect of foundation rock by using integrity index of rock mass[J]. Yangtze River, 2004, 35(5): 24 - 26. (in Chinese))
- [11] 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. (in Chinese))
- [12] 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. (in Chinese))

(责任编辑 孙振远)