

坝基破碎岩体高压渗透变形原位试验

赵海斌^{1, 2}, 翦波², 王思敬¹, 蒋中明³

(1. 河海大学 土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国水电顾问集团 中南勘测设计研究院, 湖南 长沙 410014;
3. 长沙理工大学 岩土工程研究所, 湖南 长沙 410076)

摘要: 为获取向家坝水电站坝基挤压破碎带岩体的渗透变形特性, 针对坝基破碎岩体空间分布特点, 研究适合于渗透变形试验的现场压水试验系统和压水试验方法, 提出坝基岩体渗透变形的原位高压试验方法。本研究最大特点是采用对观测孔内的水质取样分析和钻孔电视录像进行对比分析方法研究原位渗透变形特征, 并提出确定临界水力坡降的基本判据。研究表明, 所提出的原位渗透变形高压压水试验方法可以较好地反映破碎岩体实际环境状态, 原位渗透变形试验获得的临界水力坡降较室内试验成果更真实合理。

关键词: 岩石力学; 破碎岩体; 渗透变形; 临界水力坡降; 原位渗透变形试验

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)11 - 2295 - 06

IN-SITU TEST OF FRACTURED ROCK MASS WITH HIGH PRESSURE SEEPAGE IN DAM FOUNDATION

ZHAO Haibin^{1, 2}, JIAN Bo², WANG Sijing¹, JIANG Zhongming³

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Mid-South Design and Research Institute, China Hydropower Engineering Consulting Group Co., Changsha, Hunan 410014, China; 3. Institute of Geotechnical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410076, China)

Abstract: To acquire the seepage characteristics of fractured rock mass under the dam foundation of Xiangjiaba hydropower station, high pressure seepage test system and experimental method are researched based on spatial distribution of fractured rock mass. An in-situ high pressure seepage test method for the seepage of dam foundation fractured rock mass is proposed. The focus of this study is that the in-situ seepage deformation is researched by method of comparative analysis of water quality and video in measured borehole. Basic criterion is put forward to determine critical hydraulic gradient. Study results indicate that the critical hydraulic gradient obtained from in-situ seepage test is more reasonable than that of indoor test because in-situ high pressure seepage test method can reflect the actual environment state of fractured rock mass better.

Key words: rock mechanics; fractured rock mass; seepage deformation; critical hydraulic gradient; in-situ seepage deformation test

1 引言

坝基渗透变形或渗透破坏是坝基岩土体在一定

的渗透力作用下将坝基中的细小颗粒逐步带出坝基而形成的对坝基损坏现象^[1, 2]。蔡光桃等^[3, 4]通过模型试验对土体渗透变形的机制进行了研究。一般而言, 水头较低时, 土体的渗透变形形式主要表现为

收稿日期: 2009 - 04 - 20; **修回日期:** 2009 - 06 - 16

作者简介: 赵海斌(1965 -), 男, 1985年毕业于华东水利学院工程地质及水文地质专业, 现为博士研究生、教授级高级工程师, 主要从事岩土工程方面的设计工作。E-mail: hbzhao@139.com

管涌和流土。当坝基为土体时,坝基渗透变形的临界水力坡度取值方法有较为完善的理论^[1];毛昶熙等^[5~7]对无黏土的渗透变形临界水力坡降进行了大量的研究。目前,临界水力坡降的确定主要采用理论分析方法和室内渗透变形试验方法。尽管无黏土渗透变形理论较为完备,但其能否完全适合于高水头条件下坝基岩体包含有破碎岩体夹层的情况仍有待进一步研究;赵四雄^[8]在黑河水库断层破碎带的渗透变形试验中采用在原位钻孔,然后对距离钻孔3 m处的岩体侧壁上渗水进行水质、渗水量以及带出颗粒等进行分析的方法研究了断层破碎带渗透变形的临界及破坏水力坡降;李宝全等^[9]也采用类似方法对糯扎渡电站右岸构造软弱岩带渗透变形特性进行了研究;贺如平等^[10, 11]通过现场取样制作渗透变形试件、并在现场进行渗透变形试验的方法研究了溪洛渡水电站坝基层内错动带渗透变形特性。目前,国内也有少量工程采用现场钻孔压水试验方法来研究破碎岩体的渗透变形问题^[12, 13]。所谓现场钻孔渗透变形试验研究是通过在现场主孔(压水孔)进行相对较长时间分级施压,在试验过程中记录分析主压孔和观测孔内的压力、流量、水中携带物等现象来判断试验段渗流及渗透变形特征,从而求得试验段地层的渗透破坏坡降等水文地质参数的方法。本文结合向家坝水电站坝基挤压破碎带岩体的原位渗透变形试验情况,介绍了采用钻孔高压压水与钻孔仪器观测相结合的现场渗透变形试验方法。

2 工程概况

向家坝水电站坝址区涉及的地层有三迭系上统须家河组(T_{3xj})、三迭系中统雷口坡组(T_{21})、侏罗系中下统自流井组(J_{1-2z})及第四系地层,其中在坝址区出露的基岩主要为三迭系上统须家河组(T_{3xj})的砂岩夹泥质岩石,两岸谷坡上部和左岸下游引航道边坡分布侏罗系中下统自流井组(J_{1-2z})红层。

从工程左岸坝基开挖揭示的情况来看,坝基除层间破碎夹泥层外,还有缓倾角的挤压破碎带发育。鉴于这种地质条件,坝基挤压破碎带在上、下游水位差作用下可能产生渗透破坏,从而对坝基的渗透变形稳定和坝体抗滑稳定带来不利影响。为研究在高水头作用下坝基挤压破碎带内部产生渗透变形破坏的可能性,拟定合理的渗流控制措施,以确保坝

基的稳定性和坝体安全性,有必要研究坝基破碎岩体的渗透变形破坏特性。为此,作者选择在左非⑧坝块建基面(高程为274 m)开展了2段高压钻孔渗透变形试验。

3 现场钻孔渗透变形试验设计

3.1 渗透变形试验系统的布置

渗透变形试验系统主要由加压孔与观测孔组成。加压孔为水荷载的施加部位,即模拟高水头作用的部位,同时也是压力、流量数据的采集部位。试验中布置1个加压孔。观测孔共布置4个,观测孔1位于加压孔1上游方向3 m处,观测孔2位于加压孔1水平方向5 m处,观测孔3、4位于加压孔1的下游方向,分别距离加压孔1为4、6 m。其中,观测孔1~3为常规观测孔,分别布置2个渗压观测段,主要用于测定渗水压力;渗水压力由孔内渗压计测量,渗压计位置分别安装在挤压破碎带和下盘影响带内。观测孔4为水质变化观测孔,布置钻孔电视用于观测中水流细颗粒的携带情况,同时采取水样用于化学成分分析等。图1为钻孔渗透变形试验方案平面布置示意图。

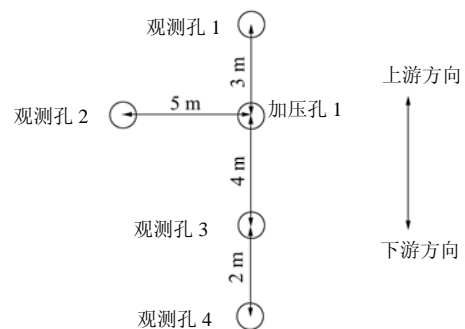


图1 钻孔渗透变形试验方案平面布置示意图
Fig.1 Layout of drilling seepage experimental plan

试验共分2段试验,研究对象分别为挤压破碎带和影响带:第一段布置于挤压破碎带(试验长度为1.0 m);第二段位于挤压破碎带下盘影响带内(试验长度为1.0 m)。试验时,加压孔先钻至挤压破碎带,结束第一段试验后再造孔至挤压破碎带影响带进行第二段试验。

3.2 试验方法

每段试验均采用常规压水和慢速法压水,各进行1个循环:

常规压水试验：加压孔压力采用 0.3, 0.6, 1.0, 0.6, 0.3 MPa 共 5 级，每级持续时间为 20 min。

慢速法压水试验：起始压力为 0.2 MPa，按级差 0.2 MPa 进行加压，每级压力持续时间不小于 180 min，直至破碎带或影响带产生明显的渗透变形或破坏。然后按级差 0.2~0.4 MPa 进行卸载，每级压力持续时间为 120~180 min。

加压系统中的流量、压力、渗压的观测：在低压段(压力≤1.5 MPa)每 3 min 观测一次，在高压阶段(压力>1.5 MPa)可加密到 1 min 一次。对于水质观测孔采用钻孔电视进行观测，水质取样数量及时间可根据现场实际情况灵活确定。

4 试验钻孔岩体性状分析

挤压破碎带的压水渗透变形试验布置在左非⑧坝块的中部，试验平台高程为 274.00 m。试验区为三迭系上统须家河组 T₃²⁻⁶⁻³ 和 T₃²⁻⁶⁻² 两层分界面附近，岩性为中细~中粗砂岩与泥质岩互层。坝基下分布有挤压带，埋深为 24.65~30.70 m，挤破碎压带主要表现为破碎夹泥，各钻孔遇挤压带深度、性状见表 1 和图 2, 3，挤压带上盘岩石呈中等风化~



图 3 GZK01 观测孔的挤压带照片
Fig.3 Photo of fracture zone of rock core in measured borehole GZK01

强风化，下盘岩石呈微风化~新鲜。该部位发育的主要节理裂隙属 NWW 向的陡倾角节理，优势产状为 280°~290°/SW∠70°~80°，一般微张开；另有少量 NEE 向陡倾角节理，优势产状 70°~80°/SE∠70°~80°，也表现出微张特性。

5 试验成果及分析

试验基本成果主要包括压力-流量曲线、渗压观测曲线、水样化学成分、水样含泥量、钻孔电视监视资料等。

5.1 加压孔常规压水试验成果分析

图 4(a)为试验孔第一试验段在常规压水条件下

表 1 压水孔和观测孔遇挤压带特征表

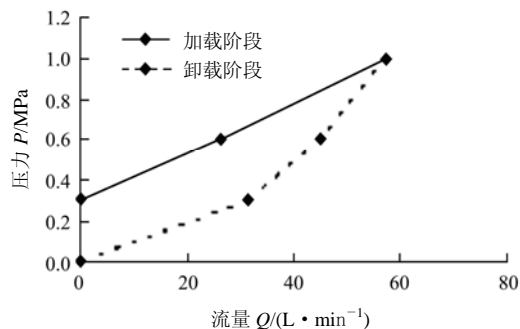
Table 1 Geological features of the boreholes

孔号	挤压带深度/m	挤压带厚度/m	挤压带组成物特性
YZK1	25.00~27.30	2.30	灰黑色泥质岩破碎形成的破碎夹泥层
GZK1	24.65~27.20	2.55	灰黑色泥质岩破碎形成的破碎夹泥层
GZK2	26.60~27.20	0.60	灰白色砂岩形成破碎夹泥层
GZK3	26.90~28.70	1.80	灰白色中粗砂岩破碎
GZK4	29.40~30.70	1.30	灰色砂岩挤压成碎块碎屑状

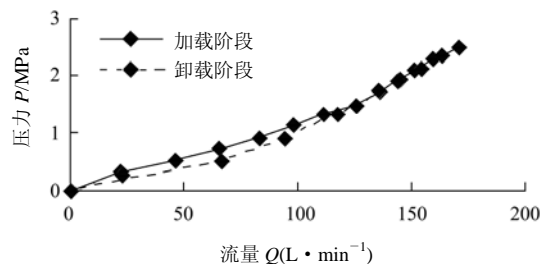


图 2 压水孔挤压带岩芯照片

Fig.2 Photo of fractured zone of rock core in water pressured borehole



(a) 常规法



(b) 慢速法

图 4 压水试验压力与流量关系曲线

Fig.4 Pressure vs. water discharge for water-pressure test

的压力与流量关系曲线。试验过程中，试验段内压力与流量关系曲线在加载阶段基本为线性关系，最大压水压力为 1.06 MPa，最大流量为 59.9 L/min。压力为 0.3 MPa 时流量很小，压力上升到 0.6 MPa 后流量显著增大。卸载阶段表现为同压力级别下的流量增大，尤其在低压阶段(0.3 MPa)更为明显。*P-Q* 曲线基本符合规程^[14]中 D 类(冲蚀型)曲线特点。

5.2 加压孔慢速法压水试验成果分析

慢速法条件下，试验段内水压力和流量实时曲线呈现同步上升的变化关系，最大压水压力为 2.4 MPa，最大流量为 175.2 L/min。平均压力与流量曲线中，加载段表现出明显的线性关系，以孔口压力为 1.4 MPa 为分界点，当压力大于 1.4 MPa 时，曲线斜率增大；卸载阶段中，当压力段为 1.4~2.4 MPa 时，与加载阶段曲线基本一致，继续卸载时，图 4(b) 所示曲线表现为显著的非线性，流量较加载阶段要大。总体看，*P-Q* 曲线与规程^[14]中 B 类(紊流型)曲线一致。

5.3 观测孔试验成果分析

当加载段水压力为 1.2 MPa 时，观测孔 4 孔口的溢出水含有小气泡夹粉状黄色颗粒；当主压力为 2.4 MPa 时的初期，孔口溢出水完全浑浊，含大量黑色细颗粒，后期颗粒含量开始变小；当卸压段主压力为 1.8 MPa 时，孔口的溢水含有少量黑色颗粒，呈现絮状；当卸载段主压力为 0.4 MPa 时，孔内水位降至孔口以下。对观测孔 4 以上几个典型情况下渗水进行了取样及描述(见表 2 和图 5)。观测孔 4 的钻孔电视监视主要成果见表 3 及图 6。

表 2 观测孔 4 各阶段水样基本特征描述

Table 2 Basic feature description of water sample in borehole No.4

压力/MPa	含泥量/(mg · L ⁻¹)	描述
1.2	2.2	含少量黄色细颗粒
2.4	2 427.8	含大量黑色细颗粒
1.8	4.6	见少量黑色细颗粒，絮状
0.4	377.4	见少量黑色细颗粒，絮状

6 渗透变形临界水力坡降研究

由于挤压破碎带成因和构造的复杂性，其物质组成较为复杂。从现场岩芯情况看，向家坝工程坝

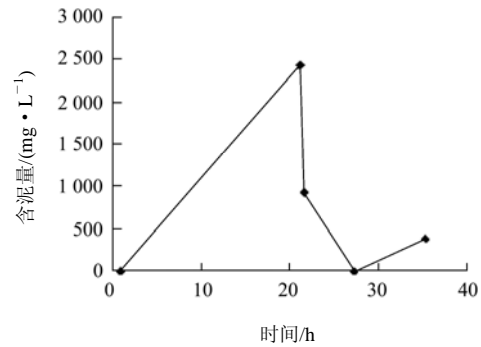


图 5 水样含泥量变化曲线

Fig.5 Variation of silt contents in water samples

表 3 观测孔 4 钻孔电视监视主要成果

Table 3 Monitored video results of in observation borehole No.4

时间/年月日(时:分)	压力/MPa	描述
20081102(15: 15)	2.2	孔内水开始变浑浊(见图 6(a))
20081102(16: 17)	2.2	内水浑浊程度稍微降低(见图 6(b))
20081102(17: 07)	2.2	孔口排出浑水(见图 6(c))
20081102(18: 48)	2.4	水逐渐变清

注：视频深度为 28.959 m(孔口地面高程为 0 m)。



(a) 观测时间 20081102(15: 15)



(b) 观测时间 20081102(16: 17)



(c) 观测时间 20081102(17: 07)

图 6 钻孔电视监视照片

Fig.6 Monitored pictures with borehole video

基挤压破碎带的主要性状是破碎夹泥，破碎带的土质既有非黏性土也有黏性土。在渗透水压力作用下，挤压破碎带渗透变形表现为细颗粒被带走而引起的管涌渗透破坏形式。图 4(a)中的压力流量关系正好可阐释本工程挤压破碎带的这一渗透变形特点。

砂土发生渗透变形的临界水力坡降可以通过对砂土的孔隙比和土粒比重分析利用解析式确定^[1], 也可以通过室内渗透变形试验来确定。但这 2 种方法存在一定的局限性。对坝基破碎岩体来讲, 解析法或室内渗透试验得到的临界水力坡降并不能完全反映其在蓄水状况下的实际应力工作状态。原位渗透变形则可较好地反映坝基碎裂岩体的实际受力状态。

在原位试验中, 渗流场局部细颗粒在一定的水力坡度作用下开始移动, 随着水力坡降的不断增大, 部分细小颗粒就会被渗流带出, 渗透变形发生的判断可以此为依据。故细小颗粒被渗流带走时的水力坡降可以看成是渗透变形的临界坡降。这种现象在 $P-Q$ 曲线上表现一般不明显, 但可根据观测孔内水质变化与电视监视照片进行综合判断。

试验结果表明, 当试验孔压力为 1.2 MPa 时, 观测孔 4 已发现有黄色细颗粒被带出, 因此, 此时的水力坡降可作为挤压破碎带渗透变形的临界坡降。由于渗压孔 3, 4 在同一渗透路径上, 假定发生渗透变形时岩体内的水力坡降呈线性分布, 则可以利用压水孔和渗压孔 3 之间的水压力差来计算临界水力坡降, 图 7 为压水孔和渗压孔压力与时间关系曲线。由图 7 可知, 当试验孔压力为 1.2 MPa 时, 渗压孔 3 压力突然发生变化, 之后保持相对稳定, 此时孔内压力为 0.5 MPa。综合试验过程中观测水质变化和压力变化, 可以认为当主压孔压力为 1.2 MPa, 观测孔压力为 0.5 MPa 时, 挤压破碎带开始发生渗透变形。根据两者之间的距离为 4.0 m, 可以计算得到临界水力坡降为 17.5。

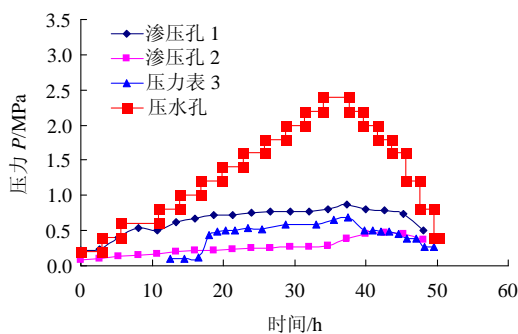


图 7 压力与时间关系曲线

Fig.7 Relation curves between pressure and time

7 结 论

坝基破碎岩体的渗透变形关系到大坝的安全稳

定性。对向家坝水电工程来说, 合理确定坝基破碎岩体渗透变形的临界水力是选择正确合理坝基渗控措施的基础。鉴于工程的重要性, 采用了原位高压渗透试验的方法对岩体渗透变形的关键参数进行了研究。通过本次试验研究, 得到以下结论:

(1) 常规压水试验条件下, 坝基破碎岩体压力 - 流量关系曲线符合 D 类(冲蚀型)曲线特点, 表明此类挤压带破碎岩体在水头作用下会产生冲蚀现象。

(2) 高压压水(慢速法)试验条件时, 相当于对破碎岩体进行重复加载, 得到的压力 - 流量关系曲线与 B 类(紊流型)曲线相一致, 表明岩体经过常规压水试验的冲蚀作用后, 重复加压情况下破碎岩体内的渗流呈现出紊流特性。

(3) 通过试验过程中不同时刻观测孔的水质取样分析和钻孔录像成果分析, 结合渗压孔中压力变化曲线, 可以综合确定破碎岩体原位渗透变形临界水力坡降。利用该方法获得了本工程临界水力坡降为 17.5。

参考文献(References):

- [1] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.(QIAN Jiahuan, YIN Zongze. Theory and calculation of soil engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 1996.(in Chinese))
- [2] 夏艳华, 白世伟, 张超. 某水利枢纽厂房基坑开挖渗透变形评估[J]. 岩土力学, 2007, 28(11): 2 435 - 2 439.(XIA Yanhua, BAI Shiwei, ZHANG Chao. Seepage deformation evaluation of foundation pit excavation of power-house of a hydroproject[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(11): 2 435 - 2 439.(in Chinese))
- [3] 蔡光桃, 隋旺华. 采煤冒裂带上覆松散土层渗透变形的模型试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(6): 66 - 69.(CAI Guangtao, SUI Wanghua. Model experimental study of seepage of overburden soil layers above fractured rockmass due to coal-mining[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2008, 35(6): 66 - 69.(in Chinese))
- [4] 刘杰, 谢定松, 崔亦昊. 江河大堤双层地基渗透破坏机制模型试验研究[J]. 水利学报, 2008, 39(11): 1 211 - 1 220.(LIU Jie, XIE Dingsong, CUI Yihao. Failure mechanism of seepage in levees with double-layer foundation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(11): 1 211 - 1 220.(in Chinese))

- [5] 毛昶熙, 段祥宝, 蔡金榜, 等. 堤基渗流无害管涌试验研究[J]. 水利学报, 2004, 35(11): 46 - 53.(MAO Changxi, DUAN Xiangbao, CAI Jinbang, et al. Experimental study of harmless seepage piping in levee foundation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(11): 46 - 53.(in Chinese))
- [6] 毛昶熙, 段祥宝, 蔡金榜, 等. 堤基渗流管涌发展的理论分析[J]. 水利学报, 2004, 35(12): 46 - 50.(MAO Changxi, DUAN Xiangbao, CAI Jinbang, et al. Theoretical analysis of piping development of levee foundation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(12): 46 - 50.(in Chinese))
- [7] 毛昶熙, 段祥宝, 蔡金榜, 等. 堤防非稳定渗流几个关键值的经验公式[J]. 水利学报, 2004, 35(1): 52 - 56.(MAO Changxi, DUAN Xiangbao, CAI Jinbang, et al. Empirical formulas for important parameters of unsteady seepage of levees[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(1): 52 - 56.(in Chinese))
- [8] 赵四雄. 黑河水库断层破碎带现场渗透变形试验与分析[J]. 陕西水利, 1989, (6): 25 - 29.(ZHAO Sixiong. In-situ seepage experiment and analysis of fault broken rock mass zone of Heihe reservoir[J]. Shaanxi Water Resources, 1989, (6): 25 - 29.(in Chinese))
- [9] 李宝全, 魏植生, 张四和. 糯扎渡电站右岸构造软弱岩带渗透变形试验研究[J]. 云南水力发电, 2004, 20(5): 64 - 68.(LI Baoquan, WEI Zhisheng, ZHANG Sihe. Test and study of seepage and deformation in structural soft rock zone on right bank of Nuozhadu hydropower project[J]. Yunnan Water Power, 2004, 20(5): 64 - 68.(in Chinese))
- [10] 贺如平. 溪洛渡水电站坝区岩体层间层内错动带现场渗透及渗透变形特性研究[J]. 水电站设计, 2003, 19(2): 90 - 92.(HE Ruping. In-situ investigation on percolation and percolation deformation characteristics of inner-bed and interbed shear zones in Xiluodu hydroelectric project dam site rock mass[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2003, 19(2): 90 - 92.(in Chinese))
- [11] 张世殊. 溪洛渡水电站坝基层内错动带现场渗透变形试验成果及分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 537 - 539.(ZHANG Shishu. Results and analysis of in-situ seepage tests in fault zones of dam foundation rockmasses in Xiluodu hydroelectric station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 537 - 539.(in Chinese))
- [12] 张志敏, 周亮, 陈全礼, 等. 现场钻孔管涌试验流程与应用[J]. 土工基础, 2004, 18(3): 11 - 13.(ZHANG Zhimin, ZHON Liang, CHEN Quanli, et al. Analysis of in-situ bore hole piping test and application[J]. Soil Engineering and Foundation, 2004, 18(3): 11 - 13.(in Chinese))
- [13] 蒋中明, 傅胜, 李尚高, 等. 高压引水隧洞陡倾角断层岩体高压水试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2318 - 2322.(JIANG Zhongming, FU Sheng, LI Shanggao, et al. High pressure permeability test on hydraulic tunnel with steep obliquity faults under high pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11): 2318 - 2322.(in Chinese))
- [14] 中华人民共和国行业标准编写组. SL 31 - 2003 水利水电工程钻孔压水试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. SL 31 - 2003 Code of water pressure test in borehole for water resources and hydropower engineering[S]. Beijing: China Water Power Press, 2003.(in Chinese))