

向家坝水电站左岸坝基破碎岩体渗透变形特性试验研究

冯树荣¹, 赵海斌¹, 蒋中明², 曾祥喜¹

(1. 中国水电顾问集团中南勘测设计研究院, 湖南 长沙 410014; 2. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南 长沙 410004)

摘要: 坝基岩体的渗透变形特性关系到大坝能否安全运行。针对向家坝水电工程坝基存在的挤压破碎带问题, 通过常规的渗透变形试验方法和改进后的渗透变形试验方法, 对左岸坝基破碎岩体渗透变形特性进行了全方位的试验, 通过综合分析 3 种不同试验方法得到的试验结果, 深入研究了坝基破碎带岩体的渗透变形特性。研究表明左岸坝基破碎岩体受扰动越严重, 其临界水力坡降值就越小; 在分析引起临界水力坡降差异的本质原因后, 提出了坝基破碎带的临界水力坡降合理取值建议。

关键词: 向家坝水电站; 破碎岩体; 原位试验; 渗透变形; 临界水力坡度

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)04-0600-06

作者简介: 冯树荣(1963-), 男, 江苏江都人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事岩土工程及水电工程设计方面的研究工作。E-mail: fengsr@msdi.cn。

Experimental study on seepage failure characteristics of broken rock mass in dam foundation at left bank of Xiangjiaba Hydropower Project

FENG Shu-rong¹, ZHAO Hai-bin¹, JIANG Zhong-ming², ZENG Xiang-xi¹

(1. HydroChina Zhongnan Engineering Corporation, Changsha 410014, China; 2. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: The seepage failure characteristics of rock mass in dam foundation relate to the safety of dam operation. There is a very serious seepage failure problem in Xiangjiaba Hydropower Project because of the existence of broken rock mass zone. Through the routine and improved methods for seepage failure, tests on seepage failure characteristics of broken rock mass in dam foundation at the left bank of Xiangjiaba Hydropower Project are conducted. The seepage failure characteristics of broken rock mass are deeply studied based on three different types of test methods. The results indicate that the value of the critical hydraulic gradient of broken rock mass in this project depends on the disturbing degree of rock mass. The larger the disturbing degree, the smaller the value of the critical hydraulic gradient. After the analysis of the reasons for the difference of the critical hydraulic gradient, the rational value of the critical hydraulic gradient for different stress states is proposed.

Key words: Xiangjiaba Hydropower Project; broken rock mass; in-situ test; seepage failure; critical hydraulic gradient

0 引 言

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。研究表明, 由于工程地质条件的复杂性, 许多水电工程在坝基开挖后才发现坝基下存在软弱破碎带。软弱破碎带因其物理力学性质比周围岩体差^[1-4], 往往成为控制坝基稳定性的重要因素^[5-6]。向家坝水电站左岸坝基开挖后揭露出较大的破碎带(F_1), 横跨 4 号、5 号、6 号、7

号等多个坝段, 该破碎带厚度 3~8 m, 影响带厚度 5~10 m, 成为左岸坝基建设的重大问题^[7]。

渗透变形试验方法主要有室内试验、现场试验、原位试验等。室内及现场试验方法相对简单, 试验代价较小, 但由于试件均为扰动样, 其试验结果不能真实反映坝基破碎岩体的实际受力状况。原位试验能较好地反映破碎岩体在高压水作用下的实际受力状态, 但其试验周期长、试验代价高。

贺如平^[8]通过现场取样, 再进行渗透变形试验的

方法研究了溪洛渡水电站坝区岩体错动带的渗透破坏水力梯度和渗透变形临界水力梯度。张志敏等^[9]在陆浑水库、江西高村水库等工程坝基断层中进行了原位钻孔管涌的尝试性试验, 初步探讨现场钻孔管涌试验方法。总的来说, 通过原位渗透破坏试验研究岩体的渗透破坏特性还处在尝试性研究阶段。

为了深入研究破碎带的存在给大坝坝基渗透稳定性带来的影响, 针对坝基不同部位破碎岩体应力状态不同的特点, 采用现场渗透变形、原位渗透变形和高压压水试验的方法全面研究破碎带岩体的渗透变形特性^[10-12]。

1 左岸挤压破碎带的分布范围及物质组成

左岸挤压带主要出露在引航道边坡坡脚、左非 6 至左非 4 正面坡和底板, 以及左非 3~1 坝段底板, 且各挤压带通过层间软弱夹层已基本连成一带。挤压带厚度变化较大, 顶底界面起伏不平, 如在 6 坝块正面坡, 从坝轴线至 0+40 桩号左右, 挤压带厚度由 40 cm 变化至 10 m 左右。破碎带在左岸各坝段平面图上的分布位置、范围见图 1。

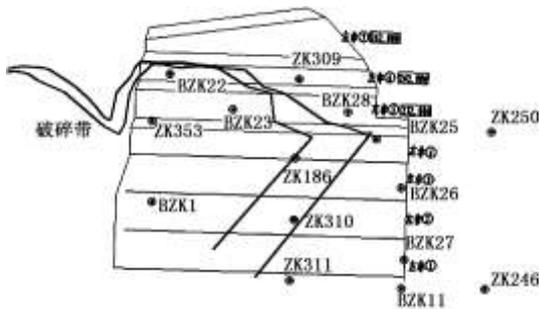


图 1 破碎带平面位置图

Fig. 1 Location of broken rock mass zone

为了获得破碎带及其影响带中破碎岩体的块度大小, 在 6 坝段边墙面上取了 11 个试样进行筛分试验, 图 2 为取样照片。试验结果表明, 极破碎部分细颗粒部分含量较高, 小于 1 mm 的粒径含量几乎都大于 10%, 大颗粒部分含量很少, 特别是粒径大于 100 mm 的颗粒几乎没有, 这种组成对坝基渗透变形的控制非常不利。



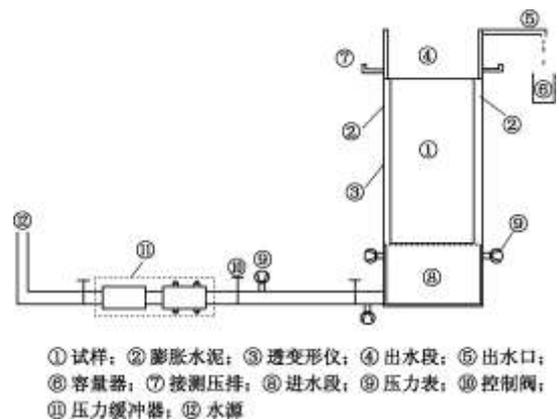
图 2 试样 6~8 照片

Fig. 2 Photo of sample 6~8

2 现场渗透变形试验

向家坝坝高达到 161 m, 因此大坝建成后将在坝基中形成较高水头的孔隙水压力。破碎带在高水头的作用下, 破碎带内部物质可能发生移动而冲蚀, 从而改变破碎岩体渗透性能。从向家坝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, 在浅部坝基中存在的地质软弱带直接对水工建筑物的结构安全带来威胁。为了准确地评价坝基挤压破碎带的渗透稳定特性、也为坝基防渗加固设计提供依据, 首先采用现场渗透变形试验方法对破碎带岩体的渗透变形特性进行研究。

现场渗透变形试验所取试样位于 T_3^2 亚组中的 T_3^{2-6-3} 岩性段, 对应于左岸 PD44 平硐上游壁出露的层间错动破碎夹层 f_{n23} , 共取 4 组。渗透试验所需的原状样经过加工后置于图 3 所示的装置中, 在现场实验室进行破碎岩体的渗透变形全过程试验。



① 试样; ② 膨胀水泥; ③ 透变形仪; ④ 出水段; ⑤ 出水口; ⑥ 容量器; ⑦ 接测压排; ⑧ 进水管; ⑨ 压力表; ⑩ 控制阀; ⑪ 压力缓冲器; ⑫ 水源

图 3 原状样现场渗透变形试验示意图

Fig. 3 Sketch of seepage failure tests

图 4 为试验过程中的 $I_{gi} - I_{gv}$ 关系图。试验起始坡降为 0.21~0.58, 出现管涌时的坡降为 3.1~6.99。管涌破坏时的坡降为 21.11~68.60, 管涌出现前的渗透系数为 $1.09 \times 10^{-4} \sim 5.78 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, 平均渗透系数为 $4.01 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。试验过程中有时出现流量减小,

这是夹层内部的空隙和微小通道被管涌发生后带动的颗粒堵塞所致，只有坡降增大到足以使水流再次带动颗粒移动时，流量才相应增大。经计算4个试样的临界坡降为2.95~6.45，破坏坡降为18.26~58.14。

3 原位渗透变形试验

现场渗透变形试验中试件基本处于应力解除状态，这与坝基中挤压破碎带中的应力状态存在较大的差异。鉴于坝基破碎岩体在渗透过程中引起渗透变形的主要因素是临界水力坡度大小，为了解坝基破碎岩体在不同应力状态作用下的渗透变形特性，采用原位渗透变形试验对左岸坝基破碎岩体的渗透变形特性加以研究。

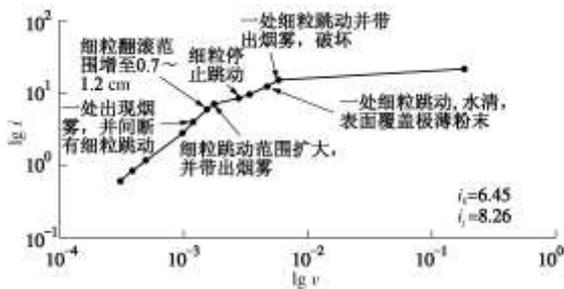


图4 试样渗透坡降与渗透流速关系曲线

Fig. 4 Relation between seepage velocity and hydraulic gradient

原位渗透变形试验模拟电站建成后的水力条件，即试验段破碎带岩体将承受160 m高的水头作用，在此条件下，确定破碎带的渗透坡降（临界坡降、破坏坡降）和破坏类型。试验位置选择在左岸试验洞PD58揭露的挤压破碎带中，分别在左、右洞壁上沿平洞进深方向依次布置4个渗透变形试验段，其中平洞左壁布置渗1试验段，平洞右壁布置渗2~4试验段。渗透水流方向与金沙江流向基本一致。供水水箱设置在384.00高程，引磨刀溪的溪水做为试验用水。水头差不低于100 m。用高压水管将水引进试验洞，通过旁通阀减压和排气，以控制水头大小。试验段的渗流入口处设置反滤装置，采用两层天然河卵石实现反滤缓冲作用，层间系数 $D_{50}^II/D_{50}^I=5\sim 10$ ，避免高压水冲击试验段上游面。

试验段顶面的上覆岩层做为天然隔水层，沿试验段渗流上下游方向(洞出口方向)分别掏槽，按一定平面尺寸(1.1 m×0.5 m×0.5 m)凿制清理出上、下游端面。将外侧面(即洞壁)进行防渗处理后再外包约10 cm厚的钢筋混凝土。外包混凝土的同时沿试验段渗流方向分排布置测压管，间距约50 cm。在布置试验段的洞底面，按照试验段长度铺设厚度10 cm，宽度1 m的混凝土防渗铺盖。试验段装置示意图见图5。

试件饱和：将制备养护好的试验段从上游面进水

开始有压水头饱和，同时打开测压管排气。

试验观测：初始渗透水头较低，当出水口出流稳定后，测读渗水量，同时记录出水口水温。每级水头测读次数不少于2次，每次间隔视渗水量大小决定。当读数基本稳定时提升至下一级水头。如此直至试验结束。试验过程中仔细观察、详细记录试验过程中出现的各种现象，渗透破坏发生时结束试验。

本次原位渗透变形试验最大程度实现了真正意义上的“原位”-试验段的4个侧周面仅有一个侧面(洞壁临空面)是经切割封闭处理的，其它3个面均与山体相连。

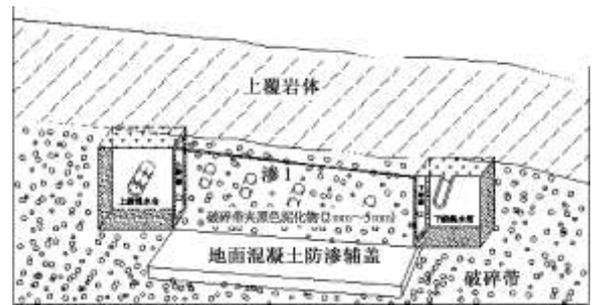


图5 试验段渗透装置示意图

Fig. 5 Sketch of in-situ seepage failure tests

图6为第一个原位试验段的 $lgi - lgv$ 关系图，表1为试验过程中观测到的各种现象，试验起始水力坡降2.2。当水力坡降为4.55时， $lgi - lgv$ 曲线斜率明显变化；当水力坡降达到5.6时，沿底板防渗铺盖与破碎带的胶结面出现渗水现象；当水力坡降为7.64时，距下游端面直线距离75 cm的地面出现一砂沸现象，此时的水力坡降为临界水力坡降；当水力坡降达到21.2时，下游面开始渗出浑水，流量突增，破碎带中有细小颗粒失稳被渗水带出，此时上游水压仍稳定；当水力坡降达到28.5时下游面大量涌出浑水，上游水压无法维持，表明破碎带产生渗透变形破坏。试验后在下游集水仓内可见直径约15 cm，高度12 cm的细泥砂堆。经凿开侧面外包混凝土后，试验段下部形成了一条长约100 cm、宽约2~5 cm的弯曲通道(图7)。试验段渗透变形破坏的类型为典型的管涌型渗透变形。

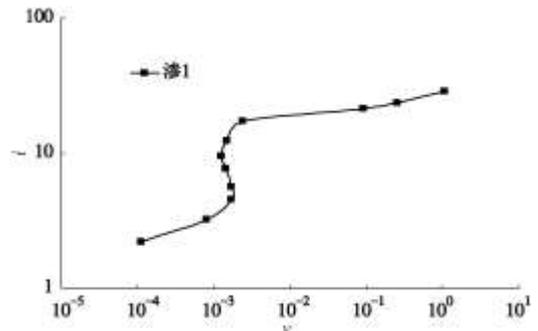


图6 渗1 $lgi - lgv$ 关系曲线图

Fig. 6 Relation curve $l_{gi} - l_{gv}$ of Test 1



图 7 渗 1 渗透破坏形成的通道

Fig. 7 Seepage failure passage of Test 1

表 1 试件 1 渗透变形过程特征值表

Table 1 Phenomenon description of sample No. 1 during seepage failure process

水头差/m	渗透坡降	渗透流量 / (mL s ⁻¹)	渗透系数 / (cm s ⁻¹)	现象描述
2.25	2.2	0.20	5.1×10^{-5}	试验开始
5.72	5.6	1.6	3.06×10^{-4}	此级水头时, 下游面附近底板铺盖边缘有一处冒水
7.80	7.6	1.3	1.91×10^{-4}	下游面附近底板铺盖边缘冒水流量 14 mL/s, 2 小时后停止。同时在距下游面直线距离约 75 cm 处出现一砂沸点, 流量 11.5 mL/s
21.63	21.2	83.3	4.27×10^{-3}	下游面出水稍浑; 上述砂沸点持续砂沸, 带出深褐色泥砂
24.13	23.7	230	1.06×10^{-2}	下游面出水变清
29.50	28.5	990	3.78×10^{-2}	下游出浑水, 下游集水箱底角堆积被水带出的土黄色杂黑色的泥砂, 渗透破坏

4 高压压水试验

尽管现场原位试验试图最大程度模拟坝基破碎带在“真实”应力状态下的渗透变形特点, 但是由于试验平硐开挖导致试验段的一个侧面应力被解除, 与破碎带的真实应力状态仍有一定的差异, 为此, 采用改进后的钻孔高压压水试验方法对破碎带的渗透变形特性进行研究。

基于高压压水试验的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, 观测孔②位于加压孔①水平方向 5 m, 观测孔③, ④位于加压孔①的下游方向, 分别距离加压孔① 4, 6 m。其中, 观测孔①~③为常规观测孔, 分别布置两个渗压观测段, 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试验过程水流中的细颗粒携带情况, 同时采取水样用于化学成分分析等。图 8 为钻孔渗透变形试验

方案平面布置示意图。

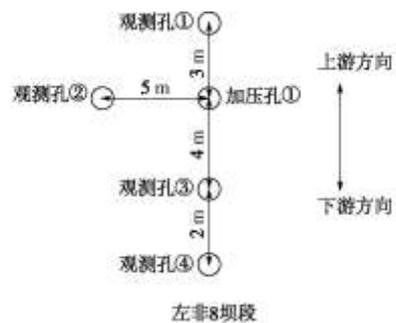


图 8 钻孔渗透变形试验方案平面布置示意图

Fig. 8 Layout of seepage plan

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 9 为试验过程水样中含泥量变化关系。

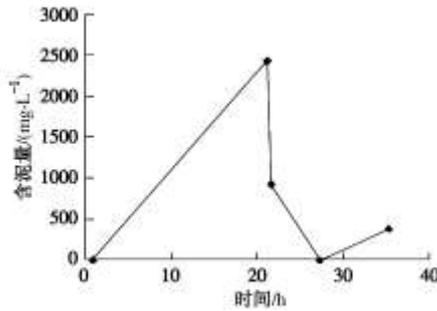


图9 水样含泥量变化曲线

Fig. 9 Variation of particles content in water samples

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和观测孔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 10 为压水孔和渗压孔压力与时间关系曲线。由图可知,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内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。

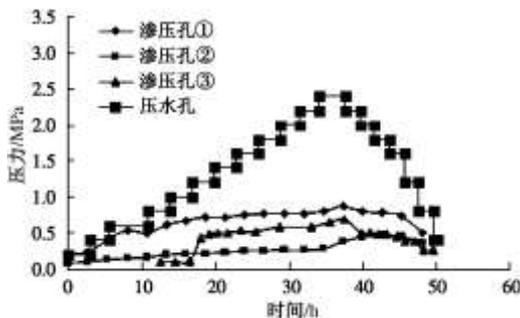


图 10 压力与时间关系曲线

Fig. 10 Relation curves between pressure and time

5 渗透变形临界水力坡降综合分析

工程建设中岩体渗透变形临界水力坡降值的合理确定是防渗设计的关键指标之一。通过上述 3 种试验方法对左岸坝基破碎带岩体分别进行渗透变形试验,得到了代表不同应力状态的破碎岩体临界水力坡降值,如表 2。试验结果表明,在不同试验环境条件下,破碎岩体临界水力坡降有较大差异。临界水力坡降出现较大差异的可能原因有二:一是尽管试验都是针对左岸破碎带岩体进行取样试验或原位试验,但试验试件颗粒组成之间不可避免地存在差异;二是 3 种试验

方法中试件的应力状态不相同:现场渗透变形试验的试件应力基本处于解除状态;原位渗透变形试验中试验区的应力也得到一定程度的释放;而钻孔高压渗透变形试验中岩体受到扰动程度最小,其应力可以认为没有得到解除。由于渗透变形的本质是当岩土体颗粒间压力为零,在渗透力作用下产生的失稳现象,因此临界水力坡降必然受到作用在颗粒间的初始应力值所影响。这可能就是高压压水试验中得到的临界水力坡降最大的主要原因之一。由此可见,向家坝左岸破碎岩体的临界水力坡降的取值与岩体承受的应力关系密切:岩体中的应力越大,产生渗透变形所需的动水压力就越大,因此临界水力坡降就越大;岩体中的应力越小,产生渗透变形所需的动水压力就越小,临界水力坡降就越小。为防止破碎坝基产生流砂渗透破坏模式,从安全角度考虑,建议采用现场渗透变形试验成果;而在设计防治坝基产生管涌渗透破坏情况下,建议采用原位渗透变形试验的成果。

表 2 临界水力坡降对比表

Table 2 Comparison of critical hydraulic gradients

试验方法	现场试验	原位试验	压水试验
临界水力坡降	2.95~6.45	7.6	17.5

6 结 论

针对向家坝水电工程左岸坝基存在质量较差的挤压破碎带岩体这一事实,为保证工程建设和运行安全可靠,采用多种试验方法对破碎岩体的渗透变形特性进行了全面系统的试验研究,得到如下结论:

(1)原位渗透变形试验和高压压水试验真实地反映了坝基破碎岩体所处的应力状态,其渗透变形试验得到的临界水力坡降反映了“试件”的应力状态对临界水力坡降有较大的影响。

(2)破碎岩体的临界水力坡降取值与破碎带所处的环境应力关系密切:岩体中的应力越大,产生渗透变形所需的动水压力就越大,其临界水力坡降越大;反之,岩体产生渗透变形所需的动水压力就越小,其临界水力坡降也越小。

(3)如何定量评价应力状态对破碎岩体渗透变形的影响需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 聂德新,张咸恭,韩文峰. 坝基岩体抗滑稳定分析中软弱层带抗剪参数偏低的主要原因分析[C]// 第三届全国工程地质大会论文选集. 成都: 成都科技大学出版社, 1988: 322 - 337. (NIE De-xin, ZHANG Xian-gong, HAN Wen-feng. Main reasons analysis of shear strength parameters

- in weak rock mass zone during stability analysis of dam foundation[C]// Proceedings Third National Conference of Engineering Geology. Chengdu: Press of Chengdu University of Science, 1988: 322 - 337. (in Chinese))
- [2] 张咸恭, 聂德新, 韩文峰. 软弱夹层围压效应和泥化可能性分析[J]. 地质论评, 1990, 6(2): 114 - 119. (ZHANG Xian-gong, NIE De-xin, HAN Wen-feng. Confining effect and possibility of mud analysis weak rock mass[J]. Geological Review, 1990, 6(2): 114 - 119. (in Chinese))
- [3] 聂德新, 张咸恭, 韩文峰. 软弱层带工程地质评价中的几个问题[C]// 第四届全国工程地质大会论文集. 北京: 海洋出版社, 1992: 603 - 609. (NIE De-xin, ZHANG Xian-gong, HAN Wen-feng. Several problem of engineering geology evaluation of weak rock mass layer[C]// Proceedings Fourth National Conference of Engineering Geology. Beijing: Ocean Press: 1992: 603 - 609. (in Chinese))
- [4] 任光明, 聂德新. 软弱层带夹泥物理力学特征的仿真研究[J]. 工程地质学报, 1999, 7(1): 65 - 67. (REN Guang-ming, NIE De-xin, MI De-cai. A simulation study of physical mechanical properties of intercalated gouge in layered weak zones[J]. Journal of Engineering Geology, 1999, 7(1): 65 - 67. (in Chinese))
- [5] 陈鹏. 向家坝水电站坝基深浅层抗滑稳定研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2007, 39(增刊): 182 - 185. (CHEN Peng. Study on the anti-sliding stability of the dam foundation of Xiangjiaba Hydropower Station[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2007, 39(S0): 182 - 185. (in Chinese))
- [6] 陈胜宏, 汪卫明, 杨志明. 筱溪水电站重力坝坝基锚筋桩加固研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1151 - 1156. (CHEN Sheng-hong, WANG Wei-ming, YANG Zhi-ming. Rock bolt reinforcement for gravity dam foundation of Xiaoxi Hydropower Project[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1151 - 1156. (in Chinese))
- [7] 聂德新. 金沙江向家坝水电站左岸破碎带专项试验报告[R]. 成都: 成都理工大学, 2008. (NIE De-xin. Experiment report of broken zone in left bank of Xiangjiaba Hydro-power Station on Jinshajiang River[R]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008. (in Chinese))
- [8] 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 Ru-ping. Study on in-situ test of permeability and seepage failure characteristics of disturbed zone in dam area of Xiluodu Hydro-electric Power Station[J]. Design of Hydro-electric Power Station, 2003, 19(2): 90 - 92. (in Chinese))
- [9] 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 Zhi-min, ZHOU Liang, CHEN Quan-li, et al. Analysis of in-situ bore hole piping test and application[J]. Soil Engineering and Foundation, 2004, 18(3): 11 - 13. (in Chinese))
- [10] 高正夏, 赵海斌. 向家坝坝基岩体软弱夹层渗透变形现场试验研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2007, 22(增刊1): 152 - 153. (GAO Zheng-xia, ZHAO Hai-bin. Study on in-situ seepage failure test of weak rock mass in Xiangjiaba dam foundation[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2007, 22(S1): 152 - 153. (in Chinese))
- [11] 王敬, 欧阳海宁, 段飞, 等. 向家坝水电站左岸坝基挤压破碎带原位渗透变形试验报告[R]. 长沙: 中国水电顾问集团中南勘测设计研究院, 2009. (WANG Jin, OUYANG Hai-ning, DUAN Fei, et al. In-situ seepage failure test report of broken zone in left bank of Xiangjiaba dam foundation[R]. Changsha: HydroChina Zhongnan Engineering Corporation, 2009. (in Chinese))
- [12] 赵海斌, 剪波. 向家坝水电站左非⑧坝段坝基挤压破碎带钻孔高压渗透变形试验研究[R]. 长沙: 中国水电顾问集团中南勘测设计研究院, 2009. (ZHAO Hai-bin, JIAN Bo. Report on seepage failure test in borehole under high water pressure condition of broken zone in left bank No.8 of Xiangjiaba dam foundation[R]. Changsha: HydroChina Zhongnan Engineering Corporation, 2009. (in Chinese))