

# 大坝心墙接触粘土工程特性试验研究

保华富<sup>1</sup>, 庞桂<sup>2</sup>, 王坤<sup>2</sup>, 王磊<sup>2</sup>, 武进云<sup>2</sup>

(1. 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院, 云南昆明 650033;  
2. 四川大唐国际甘孜水电开发有限公司 中心实验室, 四川甘孜 626001)

**摘要:** 以长河坝水电站心墙砾质土高坝接触粘土开采质量控制为例, 探讨了接触粘土不同颗粒分析方法和不同击实试验方法对检测成果的影响。通过对填土压实度及含水率的系列试验研究, 提出了临界压实度概念, 建议压实度宜控制在 98% 及以上。研究得出心墙接触粘土填筑采用宁潮勿干的原则, 可增加心墙接触粘土的塑性和粘性, 减小渗透及水库蓄水后大坝沉降、提高抗接触冲刷能力。研究成果对了解粘土工程性质、指导设计和施工具有一定工程意义。

**关键词:** 长河坝水电站; 砾质土心墙堆石坝; 接触粘土; 质量检测; 试验研究

中图分类号: TV641

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2012)06—0056—05

## Test Study for Engineering Characteristics of Contact Clay of Dam Core Wall

BAO Hua-fu<sup>1</sup>, PANG Gui<sup>2</sup>, WANG Kun<sup>2</sup>, WANG Lei<sup>2</sup>, WU Jin-yun<sup>2</sup>

(1. Kunming Investigation and Design Institute, China Hydropower Consultant Group, Kunming, Yunnan 650033, China;  
2. Central Laboratory, Sichuan Datang International Ganzi Hydropower Development Co., Ltd., Ganzi, Sichuan 626001, China)

**Abstract:** In this paper, taking the quality control for contact clay mining of the high rock-fill dam with gravelly soil core wall in Changheba Hydropower Station for example, the effects of different particle analysis and compaction test methods on inspection result are studied. By further experimental study of compaction and moisture content, the concept of critical compaction is proposed, and it is suggested that the compaction should be controlled to 98% or higher. It is also concluded here that the filling of the contact clay of core wall should use higher moisture content rather than a lower one, which could increase the plasticity and viscosity of the contact clay of core wall, decrease the infiltration and dam settlement after water storage, and increase the contact erosion resistibility. The research achievement is of a certain engineering significance for studying the engineering property of clay and guiding the design and construction.

**Keywords:** Changheba Hydropower Station; rock-fill dam with gravelly soil core wall; contact clay; quality inspection; experimental study

## 1 概述

长河坝水电站系大渡河干流水电规划“三库 22 级”的第 10 级电站, 上接猴子岩水电站, 下游为黄金坪水电站。坝址区上距丹巴县城约 85 km, 下距康定县城和泸定县城分别为 51 km 和 50 km, 距成都约 360 km。长河坝水电站是单一发电的大型水电站。电站总装机容量 2 600 MW, 本工程为一等大(1)型工程, 拦河坝为砾石土心墙堆石坝, 最大坝高 240 m, 在同类型坝中坝高均次于糯扎渡水电站大坝, 名列国内第二, 属超高型大坝。工程主要项目砾石土

心墙防渗料填筑量约  $428.32 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 接触粘土填筑量约  $22.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 反滤料填筑约  $175.08 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 过渡料填筑约  $288.96 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 堆石料填筑约  $2\,311.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

设置接触粘土的目的在于提高心墙与坝基岸坡接触部位抗冲刷能力和抗裂性能, 保证由于心墙不均匀沉降而不至于与岸坡脱裂。接触粘土必须具备良好的塑性和粘性、良好的抗渗变形能力, 一般采用高塑性粘土填筑<sup>[1-2]</sup>。接触粘土的质量好坏直接关系到整个坝体的安全运行。

由于长河坝水电站坝体超高, 位于狭窄河谷内,

坝基下冲基砂卵石层厚达70多米,心墙又是大坝防渗的主体和核心,而与边坡接触部位施工往往也是施工质量控制的薄弱区,这从各方面给心墙接触粘土提出了更高要求。

本文结合长河坝水电站大坝心墙接触粘土的开采质量控制,介绍了质量检测所取得的成果,重点对粘土的击实性能及小于0.075 mm颗粒级配的不同检测方法对成果的影响进行探讨,同时结合工程实际,研究不同压实度、不同压实含水率条件下高塑性土料的工程性质。

表1为心墙接触粘土设计技术指标<sup>[3]</sup>。要求最大粒径小于5 mm,压实度宜为92%~95%。含水率应为 $\omega_{0p} + 2\% \leq \omega \leq \omega_{0p} + 4\%$ ,即填土含水率比最优含水率大2%~4%。质量检测和试验研究严格执行相关技术规程<sup>[4-5]</sup>。

表1 心墙接触粘土设计技术指标

物理性指标		化学性指标		渗透性指标		
塑性指数 $I_p$	>5mm 颗粒含 量/%	<0.005mm 粘粒含 量/%	有机 质含 量/%	易溶 盐含 量/%	渗透 系数 $k_{20}$ /( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	破坏 坡降
$\geq 15$	$\leq 5$	$\geq 25$	$\leq 1$	$\leq 1.5$	$< 1 \times 10^{-6}$	$> 12$

## 2 粘土有关工程特性试验研究

### 2.1 粘土基本物理特性

高塑性粘土物理、化学检测结果见表2,野坝储料场高塑性粘土采取的土样天然含水率在19.8%

~26.6%之间,平均为24.4%,土料含水率不均;塑性指数在14.5~22.8之间,平均为18.0,有个别土样塑性指数有轻微超标,土样分类结果均为低液限粘土(CL)。选用592.2 kJ/m<sup>3</sup>击实功能进行击实(干法),最大干密度在1.54 g/cm<sup>3</sup>~1.70 g/cm<sup>3</sup>之间,最大干密度最大相差0.16 g/cm<sup>3</sup>,由于接触粘土上坝难以混合均匀及存在较大的压实性差异,建议宜采用干密度与压实度两项指标控制上坝土料压实质量。最优含水率在17.5%~25.0%之间,平均为22.2%,平均小于天然含水率2.2%,考虑到二次开采、运输、铺料及碾压过程含水率损失,显然土料含水率难以满足设计填筑含水率要求,建议在正式上坝填筑前须对储存料含水率进行复查,必要时进行调整。土样粒径大于5 mm颗粒含量在0~11.3%之间,平均为3.3%,有少量土样大于5 mm颗粒含量稍有超标情况,但考虑到上坝时经过碾压破碎,实际压实土体的超径含量会有明显减少;粒径小于0.005 mm粘粒含量在25.5%~43.9%之间,平均为31.4%。土样有机质含量在0.15%~0.33%之间;易溶盐含量在0~0.09%之间,化学分析结果均满足设计要求。

图1给出了样品编号HZP-T-66用不同检测方法对小于0.075 mm颗粒级配检测结果,小于0.075 mm颗粒含量分别采用风干土和烘干土两种状态加分散剂和不加分散剂进行密度计筛分对比检测,筛分试验中分散剂选用浓度为4%的六偏磷酸钠。分析得出:

表2 高塑性粘土物理、化学检测结果

检测统计	物理性试验				化学性试验			
	天然含水率 $\omega$ /%	塑性指数 $I_p$	击实试验		>5mm 颗粒含量 /%	<0.005mm 粘粒含量 /%	有机质 含量 /%	易溶盐 含量 /%
			最大干密度 $\rho_{dmax}$ /( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	最优含水率 $\omega$ /%				
组数	135	120	35	35	135	135	26	26
最大值	26.6	22.8	1.70	25.0	11.3	43.9	0.33	0.09
最小值	19.8	14.5	1.54	17.5	0.0	25.5	0.15	0.00
平均值	24.4	18.0	1.60	22.2	3.3	31.4	0.25	0.04

(1) 风干土加分散剂和不加分散剂小于0.05 mm颗粒含量之差为2.5%、小于0.01 mm颗粒含量之差为8.5%、小于0.005 mm粘粒含量之差为6.0%、小于0.002 mm胶粒含量之差为11.3%,烘干土加分散剂和不加分散剂小于0.05 mm颗粒含量之差为1.6%、小于0.01 mm颗粒含量之差为3.5%、小于0.005 mm粘粒含量之差为4.3%、小于0.002

mm胶粒含量之差为10.1%。结果表明:同种土样在两种状态下加分散剂的土样小于0.075 mm各粒级土粒含量较不加分散剂情况均有不同程度提高,且随着土料粒径的减小颗粒含量增大程度趋明显,与不加分散剂相比,两种状态的土样小于0.005 mm粘粒含量分别提高了20.7%和15.0%,小于0.002 mm胶粒含量分别提高了89.0%和80.8%。

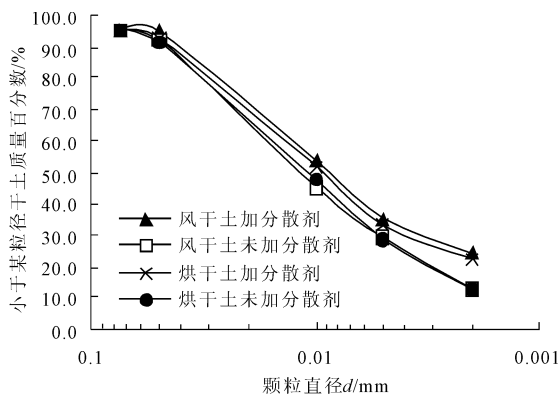


图 1 土样小于 0.075 mm 颗粒大小分布级配曲线

(2) 同一种土样风干土加分散剂与烘干土加分散剂对比检测结果: 风干土加分散剂与烘干土加分散剂小于 0.05 mm 颗粒含量之差为 1.9%、小于 0.01 mm 颗粒含量之差为 2.0%、小于 0.005 mm 粘粒含量之差为 2.0%、小于 0.002 mm 胶粒含量之差为 1.4%, 前者结果稍有提高。目前使用的规程针对小于 0.075 mm 颗粒含量进行密度计颗分试验, 规定分别采用风干土或烘干土两种说法<sup>[4-5]</sup>, 通过本次试验结果分析认为: 在颗分试验中采用风干土为佳, 也更符合土料的实际性能。

图 2、图 3 为编号 HZP-T-85、HZP-T-90 两组土样在击实功能为 592.2 kJ/m<sup>3</sup> 下击实试验成果: 干法击实(风干)最大干密度分别为 1.58 g/cm<sup>3</sup>、1.59 g/cm<sup>3</sup>, 最优含水率分别为 22.6%、22.0%; 而上述土料用湿法击实(自然含水率状态下)所得最大干密度分别为 1.54 g/cm<sup>3</sup>、1.55 g/cm<sup>3</sup>, 最优含水率均为 24.1%, 两组土样采用两种方法所得最大干密度差值均为 0.04 g/cm<sup>3</sup>, 最优含水率之差最大为 2.1%。可以看出干法击实所得最大干密度比湿法高, 而最优含水率确比湿法低。由于土料性质的不可逆性, 心墙接触粘土填筑宜采用湿法击实试验结果作为控制标准较为合理, 也符合现场实际<sup>[6-7]</sup>。

## 2.2 粘土基本力学特性

土料力学特性检测结果见表 3, 土样在控制的干密度(最大干密度)和含水率(最优含水率)条件下, 渗透系数  $k_{20}$  在  $2.85 \times 10^{-8}$  cm/s ~  $8.75 \times 10^{-7}$  cm/s 之间, 饱和固结快剪  $c$  值在 9.1 kPa ~ 96.6 kPa 之间, 内摩擦角在  $15.6^\circ$  ~  $26.7^\circ$  之间; 饱和固结试验压力加至 3.2 MPa, 其中在 0.1 MPa ~ 0.2 MPa 之间的压缩系数  $a_{v0.1-0.2}$  在  $0.17 \text{ MPa}^{-1}$  ~  $0.50 \text{ MPa}^{-1}$  之间, 均属中压缩性。渗透破坏坡降在 19 ~ 58 之间。粘土的各项力学性指标均满足设计要求。

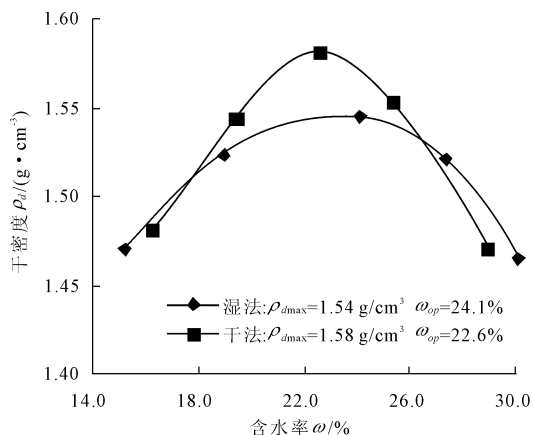


图 2 HZP-T-85 击实试验  $\omega - \rho_d$  关系曲线

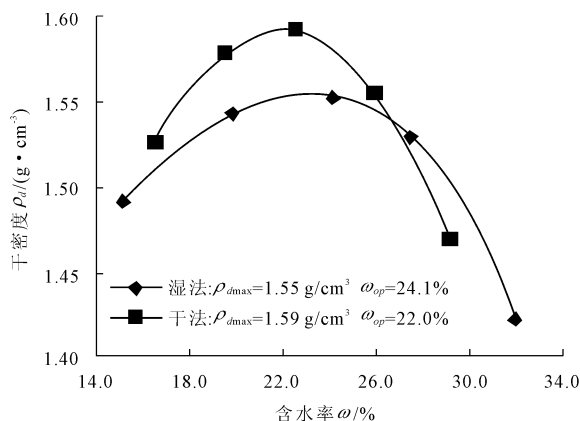


图 3 HZP-T-90 击实试验  $\omega - \rho_d$  关系曲线

表 3 高塑性粘土力学性检测结果

检测统计	渗透系数 $k_{20}$ / (cm·s <sup>-1</sup> )	渗透破坏坡降	饱和固结快剪		饱和固结试验
			$c$ / kPa	$\varphi$ / (°)	压缩系数 $a_{v0.1-0.2}$ / MPa <sup>-1</sup>
组数	35	10	35	35	35
最大值	$8.75 \times 10^{-7}$	58	96.6	26.7	0.50
最小值	$2.85 \times 10^{-8}$	19	9.1	15.6	0.17
平均值	$3.53 \times 10^{-7}$	41	29.6	22.4	0.31

### 2.2.1 粘土压缩性的进一步探讨

图 4 ~ 图 7 为编号 HZP-T-66 土样在不同压实度和不同含水率条件下饱和固结试验结果, 分析得出:

(1) 当压实度由 92% 逐级增至 101% 时, 土样单位沉降量由 221.75 mm/m 逐级降至 198.25 mm/m, 土样的压实度越大单位沉降量越小。从图 4、图 5 还可看出: 压实度 98% 左右为一个临界点, 压实度在 98% 以下时, 单位沉降量随压实度增大而减小较为明显, 压实度在 98% 及以上时, 沉降量变化趋于平缓状态。建议设计填筑压实度不宜小于 98%。

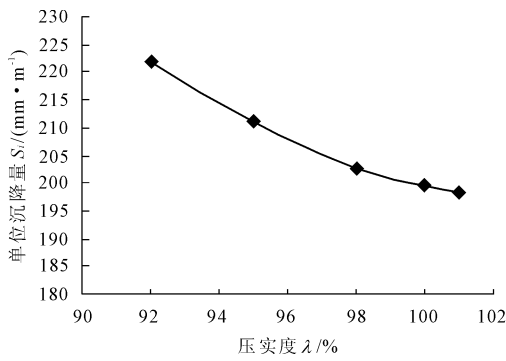


图 4 土样的 λ - S<sub>i</sub> 关系曲线

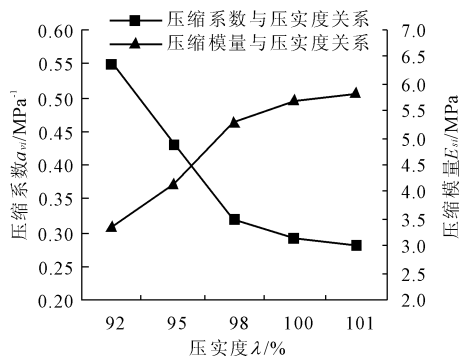


图 5 土样的 λ - a<sub>vi</sub> - E<sub>si</sub> 关系曲线

(2) 当压实度由 92% 逐级增至 101% 时, 压缩系数由 0.55 MPa<sup>-1</sup> 逐级降至 0.28 MPa<sup>-1</sup>, 压缩模量则由 3.36 MPa 逐级增至 5.83 MPa。即随着土样压实度的增大, 压缩系数随之减小, 压缩模量则随之增大。当压实度小于 98% 左右时, 这种变化较为明显, 之后压实度对压缩系数及压缩模量变化的影响程度明显减弱, 即当压实度大于 98% 左右时, 土样的压缩性明显减弱, 抗变形能力明显增强。

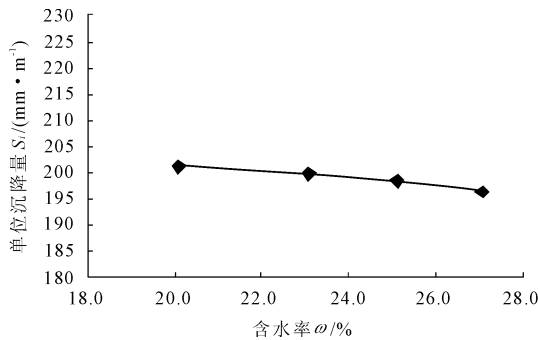


图 6 土样的 ω - S<sub>i</sub> 关系曲线

(3) 从相同压实度, 不同制样含水率下的饱和固结试验成果看: 制样含水率对土样固结试验成果有一定影响。当含水率从 20.1% (制样含水率比最优含水率偏干 3%) 逐级增至 27.1% (制样含水率比最优含水率偏湿 4%) 时, 单位沉降量从 200.98

mm/m 降至 196.61 mm/m, 压缩系数由 0.31 MPa<sup>-1</sup> 降至 0.24 MPa<sup>-1</sup>, 压缩模量则由 5.55 MPa 逐级增至 7.20 MPa。即随着含水率的增大, 单位沉降量及压缩系数随之减小, 压缩模量则随之增大。从减小水库蓄水后的坝体沉降量角度考虑, 设计技术要求天然含水率应比最优含水率大 2% ~ 4% 是合理的。

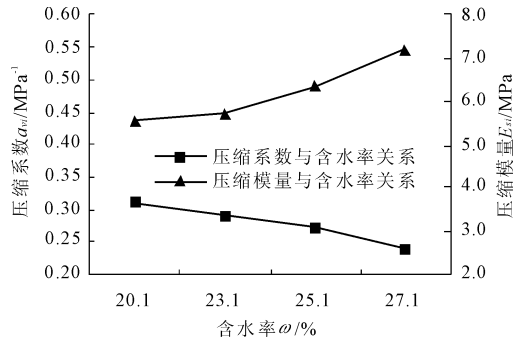


图 7 土样的 ω - a<sub>vi</sub> - E<sub>si</sub> 关系曲线

### 2.2.2 粘土渗透性的进一步探讨

图 8、图 9 给出了粘土不同压实度及不同含水率条件下土样渗透试验结果, 分析得出:

(1) 随着压实度的增大, 渗透系数随之减小。当压实度从 92% 逐级增至 101% 时, 渗透系数从 3.94 × 10<sup>-6</sup> cm/s 逐渐降至 1.66 × 10<sup>-7</sup> cm/s, 渗透系数变化近一个数量级。当压实度小于 95% 左右时, 渗透系数已不能满足设计要求。压实度在 98% 以下时渗透系数随压实度变化较为明显, 之后渗透系数变化趋于平缓。

(2) 制样含水率对土样渗透系数有一定影响, 在相同压实度下, 随着制样含水率的增大, 渗透系数随之减小。当含水率从 20.1% 增至 27.1% 时, 渗透系数从 2.79 × 10<sup>-7</sup> cm/s 降至 4.29 × 10<sup>-8</sup> cm/s。从工程角度考虑, 接触粘土上坝压实时, 设计要求土料含水率大于最优含水率 2% ~ 4%, 即宁潮勿干<sup>[2]</sup>, 这有利于增加土的塑性和粘性, 减小渗透及蓄水后大坝的沉降, 防止接触冲刷和接触流土的发生。

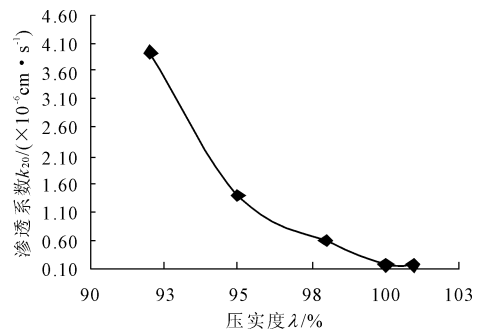
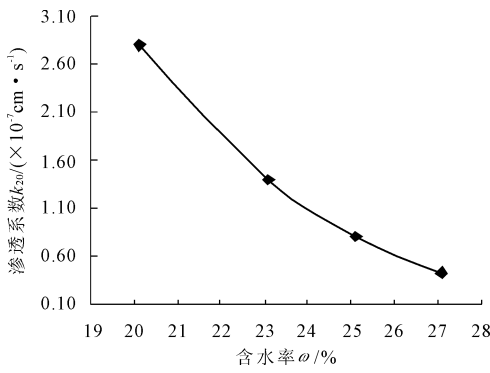


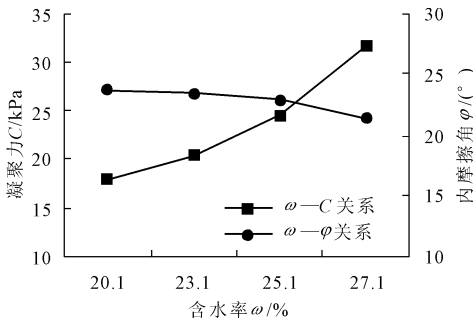
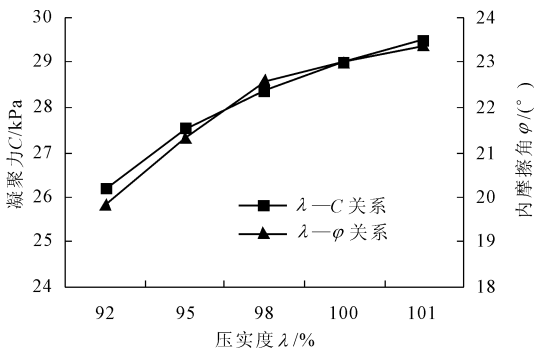
图 8 土样的 λ - k<sub>20</sub> 关系曲线

图9 土样的  $\omega - k_{20}$ 关系曲线

### 2.2.3 粘土强度特性的进一步探讨

图 10、图 11 为土样在不同含水率、不同压实度条件下饱和固结快剪试验成果,分析得出:

(1) 随着含水率的增大,凝聚力  $C$  逐渐增大,内摩擦角  $\varphi$  逐渐减小。当含水率从 20.1% 逐级增至 27.1% 时,凝聚力从 17.8 kPa 增至 31.8 kPa,内摩擦角则从 23.7° 降至 21.4°。

图 10 土样饱和固结快剪  $\omega - C(\varphi)$ 关系图 11 土样饱和固结快剪  $\lambda - C(\varphi)$ 关系

(2) 随着压实度的增大,凝聚力和内摩擦角均逐渐增大,既强度随压实度增加而提高。当压实度从 92% 逐级增至 101% 时,凝聚力从 26.2 kPa 增至 29.5 kPa、内摩擦角从 19.8° 增至 23.4°。压实度在 98% 以下时凝聚力和内摩擦角增大较为明显,压实度在 98% 及以上时凝聚力和内摩擦角增大程度趋于平缓状态。

## 3 结 语

综合分析认为,压实度 98% 是影响粘性土料工程特性的一个临界点,建议长河坝水电站大坝接触粘土现场压实度宜控制在 98% 及以上<sup>[1]</sup>、从增加土的塑性和粘性、减小渗透及水库蓄水后大坝沉降,提高粘土抗渗透变形能力角度考虑,设计含水率控制在  $\omega_{0p} + 2\% \sim \omega_{0p} + 4\%$  之间是合理的,但从施工角度还需下一步的现场碾压试验验证<sup>[8]</sup>。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. SL274 - 2001. 碾压式土石坝设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2002:15-41.
- [2] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. DL/T5129 - 2001. 碾压式土石坝施工规范[S]. 北京:中国电力出版社,2001:32-88.
- [3] 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院. 四川大渡河长河坝水电站大坝砾石土心墙和高塑性粘土料碾压试验技术要求[R]. 成都:中国水电顾问集团成都勘测设计研究院,2011:8.
- [4] 中华人民共和国水利部. SL237 - 1999. 土工试验规程[S]. 北京:中国水利水电出版社,1999:43-65.
- [5] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. DL/T5355 - 2006. 水电水利工程土工试验规程[S]. 北京:中国电力出版社,2006:31-38.
- [6] 保华富,金波,张春. 暮地河水库大坝心墙压实质量检测 and 成果分析[J]. 云南水力发电,2004,20(4):72-77.
- [7] 保华富,黄英. 户宋河电站主坝土料填筑质量控制与检测成果分析[J]. 云南水力发电,1998,14(2):27-32.
- [8] 杨荫华. 土石料压实和质量控制[M]. 北京:中国水利电力出版社,1992:165-200.