

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2014.02.003

# 大坝全级配与湿筛二级配混凝土力学性能 试验研究及统计分析

高文,董伟,吴智敏,曲秀华

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**以某大坝工程为研究对象,采用现场浇注成型的试件进行全级配和湿筛二级配混凝土强度试验。试验结果表明,在28 d、90 d、180 d三个龄期时全级配与湿筛二级配混凝土的抗压强度比值最大,劈拉强度比值次之,弹性模量比值最小。而后,结合其它大坝混凝土强度实测试验数据,统计分析了全级配与湿筛二级配混凝土的强度比值关系。分析结果表明,全级配和湿筛二级配混凝土强度比值均服从正态分布,由此分别给出了具有95%保证率的全级配与湿筛二级配混凝土抗压、劈拉强度比值,从而可通过湿筛二级配混凝土强度预测全级配混凝土强度。

**关键词:**全级配;湿筛二级配;强度比值;抗压强度;劈拉强度

中图分类号:TV642.2

文献标识码:A

文章编号:1672-1144(2014)02-0009-06

## Experimental Study and Statistic Analysis on Mechanical Properties of Fully-graded and Wet-screened Two-graded Concrete in Dams

GAO Wen, DONG Wei, WU Zhi-min, QU Xiu-hua

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

**Abstract:** Taking a dam for research object, the cast-in-situ specimens are tested to study the strength of fully-graded and wet-screened two-graded concrete. The experimental results show that on the concrete with the ages of 28, 90 and 180 days, the ratio of the compressive strength of fully-graded and wet-screened two-graded concrete is largest, and the splitting-tensile strength ratio is secondary, while the elastic modulus ratio is lowest. Furthermore, the relationship between the strength ratio values for fully-graded and wet-screened two-graded concrete is analyzed statistically. It is found that their ratio values of compressive strength and splitting-tensile strength all follow normal distribution. Based on the distribution, the compressive and splitting tensile strength ratios of fully-graded and wet-screened two-graded concrete with a 95% performance assurance can be calculated and obtained separately. Thereby, the strength of fully-graded concrete can be estimated by testing the strength of wet-screened two-graded concrete.

**Keywords:** fully-graded aggregate; wet-screened two-graded aggregate; strength ratio; compressive strength; splitting-tensile strength

### 1 引言

近年来,我国大坝工程的建设规模不断扩大,建设水平不断提高,在这些混凝土大坝建设中所用的材料均为全级配大骨料混凝土。相对于普通混凝土,

全级配混凝土具有骨料级配丰富、水泥用量少、凝结温度低、工程质量可靠度高、工程造价低等特点<sup>[1-3]</sup>。全级配混凝土抗压及抗拉强度是关系到坝体承载能力和稳定性的重要力学性能指标,准确测定全级配混凝土的强度成为水利水电科技工作者的

一项重要工作。然而,全级配混凝土骨料粒径最大为 150 mm,在实验室进行混凝土强度试验时,若要消除骨料对试验结果的影响,试件尺寸至少满足 3 倍骨料最大粒径<sup>[4-5]</sup>,所需试件尺寸较大。同时,由于立方体尺寸的增加也增大了破坏荷载,因此,对实验设备的要求较高<sup>[5-6]</sup>。为此,有必要探索和研究采用湿筛法将全级配混凝土制成小尺寸的试件进行试验,来评价全级配混凝土的力学性能<sup>[7]</sup>。

近年来,水电科技工作者对采用湿筛法测定全级配混凝土强度进行了大量研究。由于将全级配拌合物中粒径大于 40 mm 的大骨料剔除,制成 150 mm 标准立方体试件的过程中,改变了混凝土的配比,从而影响了混凝土的强度<sup>[4,8]</sup>。对此,学者们主要就全级配与湿筛二级配(下文简称湿筛)混凝土的试件尺寸、骨料级配、成型条件、试验方法等方面开展研究。杨忠义等指出,全级配混凝土试件和湿筛混凝土试件在粗骨料与砂浆界面上存在差异,并统计计算了相应工程混凝土强度的尺寸效应系数<sup>[9]</sup>;在现有混凝土尺寸效应模型基础上<sup>[10-12]</sup>,郑丹等从脆性材料微观破坏机理角度指出,随着最大骨料粒径的增加,混凝土内控制性裂纹尺寸逐渐增大会导致混凝土强度降低<sup>[13]</sup>;宋玉普等探索了尺寸效应和骨料湿筛效应对损伤变量的影响,建立了适用于不同骨料级配混凝土的内时损伤本构模型<sup>[14]</sup>。上述研

究表明,全级配混凝土强度小于湿筛混凝土强度。因此,直接使用湿筛法成型的小试件试验所测得的力学指标,不能真实反映全级配大坝混凝土的力学性能<sup>[15-17]</sup>。

为了解决这一问题,研究人员对全级配和湿筛混凝土强度之间的比值进行了研究<sup>[1,3,8,18-19]</sup>。结果显示,两者的抗压强度比值约为 0.7~0.9,劈拉强度比值约为 0.5~0.7<sup>[7,17]</sup>。目前,全级配和湿筛混凝土比值并没有一个定值,如果能准确地建立全级配和湿筛混凝土强度之间的关系,将具有重要的工程应用价值。基于此,本文对溪洛渡特高拱坝所用材料进行全级配和湿筛混凝土强度试验研究,并结合前人已获得的试验数据进行统计分析,进而确定两者间的统计规律,为大型全级配混凝土的强度试验和工程应用提供参考。

## 2 试验概述

### 2.1 试件制备

在大坝现场分别浇注了最大骨料粒径为 150 mm 的全级配试件和最大骨料粒径为 40 mm 的湿筛混凝土试件。如图 1 所示,两种试件均采用溪洛渡大坝坝体所用混凝土,在大坝施工现场通过高线 600 拌和系统的拌合楼出料制作成型。



图 1 混凝土试件浇注现场

全级配混凝土配合比见表 1。全级配混凝土通过湿筛法筛除粒径大于 40 mm 的粗骨料后为湿筛混凝土的配比。水泥为云南昭通水泥有限公司生产的新华 PMH42.5 中热硅酸盐水泥,水胶比 0.41。粉煤灰采用重庆华能珞璜电厂生产的 I 级粉煤灰,参量

为 35%。粗骨料为溪洛渡中心料场生产的斑状玄武岩碎石,细骨料为溪洛渡大戏厂灰岩生产的人工砂。混凝土设计强度等级为 C40。分别进行了龄期为 28 d、90 d、180 d 的材料试验,试件尺寸及数量见表 2。

表 1 全级配混凝土配合比

单位: kg/m<sup>3</sup>

级配	水泥	粉煤灰	人工砂	水	石子粒径		外加剂	
					≤40 mm	>40 mm	减水剂	引气剂
四级配	129	69	485	81	793	1095	1.188	0.0733

表 2 试件尺寸及数量

龄期/d	试件形状	试件尺寸/mm		抗压强度试件个数		劈拉强度试件个数	
		全级配	湿筛	全级配	湿筛	全级配	湿筛
28	立方体	450 × 450 × 450	150 × 150 × 150	4	4	4	4
90	立方体	450 × 450 × 450	150 × 150 × 150	4	4	4	4
180	立方体	450 × 450 × 450	150 × 150 × 150	4	4	4	4

## 2.2 试验装置和测定方法

试验测定了混凝土立方体抗压强度  $f_{cu}$ 、劈裂抗拉强度  $f_t$  和弹性模量  $E$  三种力学性能指标。测试均按《水工混凝土试验规程》操作,在 10 000 kN 液压伺服压力试验机上进行,示值误差满足标准值的  $\pm 2\%$  的要求,数据采集和加载均由计算机控制,试验装置如图 2 所示。在抗压强度试验过程中试验机以 0.5 MPa/s 的加载速率连续均匀加载,直至破坏,然后记录破坏荷载。



图 2 抗压强度试件和试验装置图



图 3 劈裂抗拉强度试件和试验装置

劈裂抗拉强度的测定装置如图 3 所示,将试件放置在试验机压板的中心位置,在上、下压板与试件之间放置方形垫块和垫条各一条,垫块与垫条均与试件上、下表面的中线对准。在试验过程中试验机以 0.04 MPa/s 的加载速率连续均匀加载,直至破坏,然后记录破坏荷载。

全级配混凝土试验采用减磨后的 450 mm × 450 mm × 450 mm 的混凝土立方体试件测定其弹性模

量。因混凝土骨料粒径很大,故不能采用与湿筛法相同的传统的应变片法测量试件变形。本次试验在试件的四个面内分别固定安装一个标距为 300 mm 的 LVDT(线性位移传感器),测量试件在不同加载时刻每个面内纵向中心线在标距为 300 mm 范围内的弹性变形值,进而计算其弹性模量,试验数据由 IMC(全线测试测量数据采集系统)记录。

## 3 试验结果与统计分析

### 3.1 混凝土强度

全级配和湿筛混凝土抗压强度和劈拉强度分别在龄期 28 d、90 d、180 d 进行试验。全级配和湿筛抗压和劈拉强度试验测值按照《水工混凝土试验规程》<sup>[20]</sup>(DL/T5150 - 2001)要求将其平均值作为该组试件的强度分别列于表 3、表 4。试验结果分别绘于图 4、图 5。

表 3 全级配与湿筛混凝土抗压强度和比值

龄期/d	全级配混凝土 抗压强度均值 ( $N \cdot mm^{-2}$ )	湿筛混凝土 抗压强度均值 ( $N \cdot mm^{-2}$ )	全级配与湿 筛混凝土抗 压强度比值
28	35.38	40.30	0.88
90	37.88	47.20	0.80
180	47.22	50.50	0.94

表 4 全级配与湿筛混凝土劈拉强度及比值

龄期/d	全级配劈 拉强度均值 ( $N \cdot mm^{-2}$ )	湿筛劈拉 强度均值 ( $N \cdot mm^{-2}$ )	全级配与 湿筛劈拉 强度比值
28	1.89	3.02	0.63
90	2.32	3.82	0.61
180	3.04	3.95	0.77

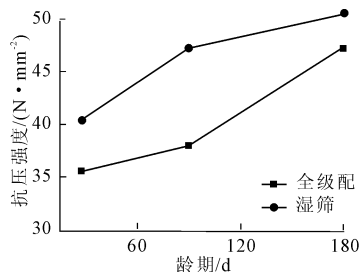


图 4 全级配和湿筛抗压强度

### 3.2 弹性模量

抗压弹性模量在 28 d、90 d、180 d 三个龄期进行试验,按照文献[20]测得的平均值见表 5,试验结果绘成曲线见图 6。

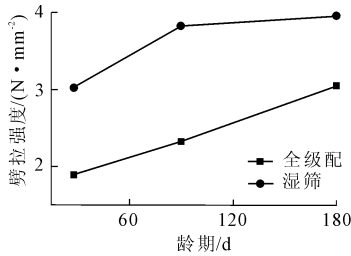


图 5 全级配和湿筛劈拉强度

表 5 全级配与湿筛混凝土试验弹性模量比值

龄期 /d	全级配弹性模量均值 /( $10^4 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ )	湿筛弹性模量均值 /( $10^4 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ )	全级配与湿筛试验弹性模量比值
28	1.896	3.526	0.54
90	2.270	3.950	0.57
180	3.090	4.548	0.68

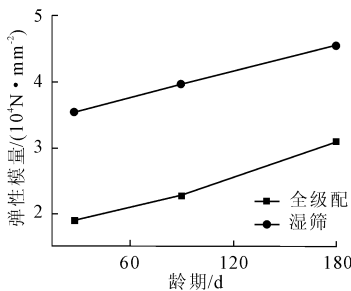


图 6 全级配与湿筛弹性模量

由表 3~表 5 及图 4~图 6 可见,全级配和湿筛混凝土的抗压强度、劈拉强度和弹性模量随龄期的增长而增加。

全级配与湿筛混凝土的抗压强度、劈拉强度、弹性模量比值见图 7。由图 7 可见,全级配与湿筛混凝土的抗压强度三个龄期比值最大,劈拉强度比值次之,弹性模量比值最小。抗压强度和劈拉强度在龄期 90 d 时较其它龄期比值最小。

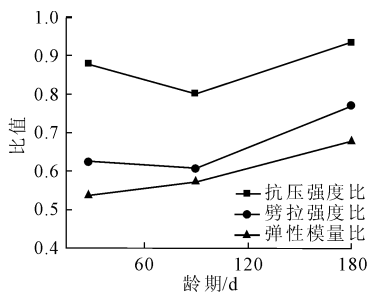


图 7 全级配与湿筛抗压、劈拉、弹性模量比值

## 4 全级配混凝土与湿筛混凝土各项力学指标的统计分析

此前,研究人员对全级配和湿筛混凝土力学指标进行了一些相关研究。本文将对这些数据进行统计分析,数据的来源见图 8 所示参考文献。抗压强度比值和劈拉强度比值分别如图 8、图 9 所示,其中两者比值大于 1 的情况未参与统计<sup>[1,9]</sup>。对两类强度比值绘制直方图并拟合概型分布曲线(图 10、图 11),可见曲线近似为正态分布。由此提出假设,抗压、劈拉强度比值数据的概率分布服从正态分布,而后对该假设采用拟合优度  $K-S$  检验方法进行非参数检验。

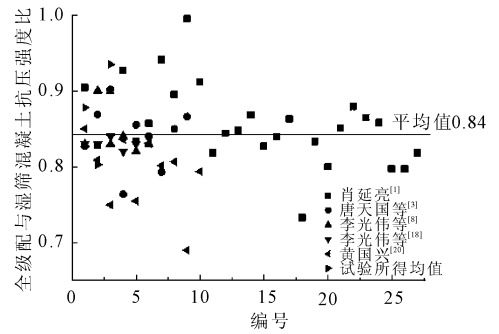


图 8 全级配与湿筛抗压强度比值数据统计

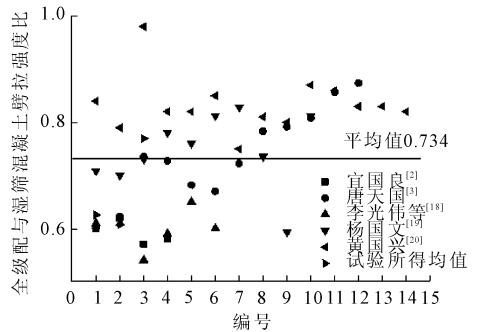


图 9 全级配与湿筛劈拉强度比值数据统计

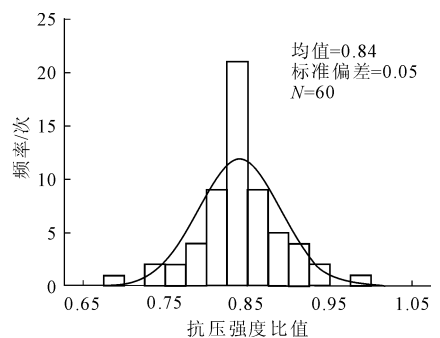


图 10 抗压强度累计频率直方图及所拟合的正态分布曲线

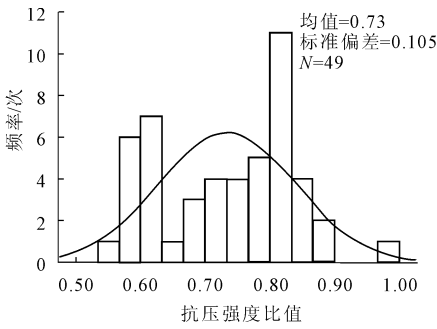


图 11 劈拉强度累计频率直方图及所拟合的正态分布曲线

设  $S_n(\beta)$  为一个容量为  $n$  的简单子样的经验分布函数(即事件  $B < \beta$  的频率),  $F(\beta)$  为所假设的总体理论分布函数。令

$$D_n = \max_{-\infty < \beta < +\infty} |F(\beta) - S_n(\beta)| \quad (1)$$

按柯莫哥洛夫定理,对于任意  $\lambda > 0$ ,有等式:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} Q_n(\lambda) = \lim_{n \rightarrow \infty} P(D_n < \frac{\lambda}{\sqrt{n}}) = Q(\lambda) \quad (2)$$

其中:

$$Q(\lambda) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} (-1)^i e^{-2i^2 \lambda^2} \quad (3)$$

提出假设  $H_0$ :在总体中变量  $\beta$  服从连续分布函数  $F(\beta)$  所定的分布。从该总体中取一个容量足够

大的简单子样并算出经验分布函数  $S_n(\beta)$  及统计量  $D_n$ 。按照显著性水平  $\alpha$  判别假设  $H_0$ ,从文献[21]表 18 根据显著性水平  $\alpha$  以及样本容量  $n$  查得  $D_{n,\alpha}$ 。如果观察到的  $D_n$  值大于或等于  $D_{n,\alpha}$ ,拒绝假设  $H_0$ ,否则没有理由拒绝它。

现以抗压强度比值数据为例,采用上述  $K-S$  检验法进行假设检验。从图 8 中所给出数据算得均值  $\mu_{cu} = 0.840$ ,方差  $\sigma_{cu} = 0.050$ 。提出假设  $H_0$ :随机变量  $\beta$  服从正态分布  $N(0.840, 0.050)$ ,并要求按显著水平  $\alpha = 0.05$  来验证这个假设。对于每一点  $\beta_i$  其经验分布函数为累计分布函数,则  $S_n(\beta_i) = \sum n_i/n$ ,根据正态分布函数计算  $F(\beta_i)$  并将  $\beta_i, S_n(\beta_i), F(\beta_i)$  及  $d_i = |S_n(\beta_i) - F(\beta_i)|$  列于表 6 中,其中  $n_i$  表示  $\beta_i$  的频数。那么  $D_n = \max(d_i) = |S_n(0.840) - F(0.840)| = 0.083$ 。以显著性水平  $\alpha = 0.05$ ,样本容量  $n = 60$ ,查文献[21]表 18 得  $D_n < D_{n,\alpha} = 0.172$ 。因此原假设不能被拒绝。那么,完全由于试验结果的随机性而使得经验分布函数  $S_n(\beta)$  与理论分布函数  $N(0.840, 0.050)$  的最大偏差  $D_n > 0.083$  的概率为:

$$P(D_n > 0.083) = P(D_n > \frac{\lambda}{\sqrt{n}}) = P(D_n \sqrt{60} > 0.643) = 1 - Q(\lambda) = 1 - Q(0.643) \quad (4)$$

表 6  $K-S$  检验相关参数

$\beta_i$	$n_i$	$S_n(\beta_i)$	$F(\beta_i)$	$d_i$	$\beta_i$	$n_i$	$S_n(\beta_i)$	$F(\beta_i)$	$d_i$
0.690	1	0.017	0.001	0.016	0.844	1	0.600	0.532	0.068
0.733	1	0.033	0.016	0.017	0.848	1	0.617	0.564	0.053
0.750	1	0.050	0.036	0.014	0.850	2	0.650	0.579	0.071
0.755	1	0.067	0.045	0.022	0.851	1	0.667	0.587	0.080
0.764	1	0.083	0.064	0.019	0.855	1	0.683	0.618	0.065
0.793	1	0.100	0.174	0.074	0.857	1	0.700	0.633	0.067
0.794	1	0.117	0.179	0.062	0.858	1	0.717	0.641	0.076
0.797	2	0.150	0.195	0.045	0.863	1	0.733	0.677	0.056
0.800	1	0.167	0.212	0.045	0.865	1	0.750	0.691	0.059
0.802	1	0.183	0.224	0.040	0.866	1	0.767	0.698	0.068
0.803	1	0.200	0.230	0.030	0.868	1	0.783	0.712	0.071
0.807	1	0.217	0.255	0.038	0.869	1	0.800	0.719	0.081
0.809	1	0.233	0.268	0.034	0.878	1	0.817	0.776	0.040
0.818	2	0.267	0.330	0.063	0.879	1	0.833	0.782	0.051
0.820	2	0.300	0.345	0.045	0.895	1	0.850	0.864	0.014
0.827	2	0.333	0.397	0.064	0.900	2	0.883	0.885	0.002
0.828	1	0.350	0.405	0.055	0.902	1	0.900	0.893	0.007
0.830	6	0.450	0.421	0.029	0.903	1	0.917	0.896	0.021
0.831	1	0.467	0.429	0.038	0.904	1	0.933	0.900	0.034
0.833	2	0.500	0.444	0.056	0.912	1	0.950	0.925	0.025
0.833	2	0.500	0.444	0.056	0.927	1	0.967	0.959	0.008
0.836	1	0.517	0.468	0.049	0.941	1	0.983	0.978	0.005
0.839	1	0.533	0.492	0.041	0.995	1	1.000	0.999	0.001
0.840	3	0.583	0.500	0.083					

由文献[21]表 19 查得  $Q(0.643) = 0.193$ , 于是  
 $P(D_n > 0.083) = 1 - Q(0.643) = 1 - 0.193$   
 $= 0.807$  (5)

此概率较大, 因此可以认为抗压强度比值是服从正态分布的。该正态分布的均值  $\mu_{cu} = 0.840$ , 标准差  $\sigma_{cu} = 0.050$ 。在此若以  $\beta_{cu}$  表示全级配与湿筛抗压强度比值, 即  $\beta_{cu} \sim N(0.840, 0.050^2)$ 。那么  $\beta_{cu} > (\mu_{cu} - 1.645\sigma_{cu})$  的概率为 95%。因此若取  $\beta_{cu,k} = \mu_{cu} - 1.645\sigma_{cu} = 0.767$ , 则  $\beta_{cu,k} = 0.767$  为具有 95% 保证率的全级配与湿筛抗压强度比值。

劈拉强度比值数据样本容量  $n = 49$ , 采用上述检验步骤, 可得其最大偏差  $D_n = 0.125$ , 临界值  $D_n < D_{n,\alpha} = 0.190$ , 从而没有理由拒绝子样劈拉强度比值所在的总体所服从正态分布的假设。同时, 计算得到完全由试验结果的随机性而使得所假设的理论分布函数  $F(\beta)$  与经验分布函数  $S_n(\beta)$  的最大偏差  $D_n > 0.125$  的概率  $P(D_n > 0.125) = 0.421$ , 可见这个概率是比较大的。若假设图 11 中拟合曲线服从 Weibull 分布, 进行  $K-S$  假设检验, 同样可计算得到完全由试验结果的随机性而使得所假设的理论分布函数与经验分布函数的最大偏差  $D_n > 0.121$  的概率  $P(D_n > 0.852) = 0.465$ , 与正态分布概率基本持平, 因此选择劈拉强度比值服从相对简单方便工程应用的正态分布。该正态分布的均值  $\mu_t = 0.734$ , 标准差  $\sigma_t = 0.105$ 。在此若以  $\beta_t$  表示全级配与湿筛抗压强度比值, 即  $\beta_t \sim N(0.734, 0.105^2)$ 。那么  $\beta_t > (\mu_t - 1.645\sigma_t)$  的概率为 95%。因此, 若取  $\beta_{k,t} = \mu_t - 1.645\sigma_t = 0.562$ , 则  $\beta_{k,t} = 0.562$  为具有 95% 保证率的全级配与湿筛劈拉强度比值。

## 5 结 论

通过大坝现场浇筑全级配混凝土的力学性能试验研究, 并结合对以往大坝混凝土力学性能指标的统计分析, 可得到以下几点结论:

(1) 全级配和湿筛混凝土的抗压强度、劈拉强度和弹性模量, 这三个参数随龄期增长而增加;

(2) 全级配和湿筛混凝土的抗压和劈裂强度比值在 28 d、90 d、180 d 三个龄期的抗压强度比值最大, 劈拉强度比值次之, 弹性模量比值最小;

(3) 全级配和湿筛混凝土的抗压强度和劈拉强度比值服从正态分布。全级配与湿筛混凝土抗压强度比值均值为 0.840, 劈拉强度比值均值为 0.734。具有 95% 保证率的全级配与湿筛抗压强度和劈拉强度比值分别为 0.767、0.562。

## 参考文献:

- [1] 肖延亮. 高拱坝混凝土真实抗压强度试验研究[J]. 水力发电, 2010, 36(1): 103-105, 109.
- [2] 宣国良. 水工混凝土抗拉强度的石子粒径效应[J]. 水利水电科技进展, 1996, 16(2): 45-47.
- [3] 唐天国, 段绍辉, 段云岭. 锦屏一级拱坝混凝土全级配与湿筛试验分析[J]. 人民黄河, 2012, 34(1): 111-112, 119.
- [4] 杨成球, 吴 政. 二滩水电站四级配砷试验研究[J]. 四川水力发电, 1993, 12(1): 63-69.
- [5] Deng Z C, Li Q B, Fu H. Comparison between mechanical properties of dam and sieved concretes[J]. Materials in Civil Engineering, 2008, 20(4): 321-326.
- [6] 朱尔玉. 大骨料混凝土多轴强度理论及本构关系的试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 1996: 3-4.
- [7] 邓宗才. 高性能大坝混凝土的强度与变形[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 52-54.
- [8] 李光伟, 杨忠义, 杨代六. 高拱坝全级配大体积混凝土力学特性试验研究[J]. 三峡大学学报, 2003, 25(6): 500-503.
- [9] 杨忠义. 全级配混凝土强度的尺寸效应研究[J]. 水电站设计, 2008, 24(3): 11-14.
- [10] Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability[J]. Journal of Applied Mechanics, 1951, 18(3): 293-297.
- [11] Bazant Z P. Scaling laws in mechanics of failure[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1993, 119(9): 1828-1844.
- [12] Carpinteri A, Chiaia B, Ferro G. A new explanation for size effects on the flexural strength of concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 1997, 49(178): 45-53.
- [13] 郑 丹, 韩巍巍, 张 寅. 水工全级配与湿筛混凝土强度关系的研究[J]. 水利与建筑工程报, 2011, 9(5): 11-14.
- [14] 宋玉普, 王怀亮. 全级配大体积混凝土的内时损伤本构模型[J]. 水利学报, 2006, 37(7): 769-777.
- [15] 许家荣, 王仁坤. 国内外拱坝强度设计准则综合评述[J]. 四川水力发电, 1992, 11(1): 42-49, 60.
- [16] Zhu B F. Stress level coefficient and safety level coefficient for arch dams[J]. Dam Engineering, 2000, 11(3): 133-142.
- [17] 王怀亮. 复杂应力状态下大骨料混凝土力学特性的试验研究和分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2007: 1-2.
- [18] 李光伟, 杨代六. 拱坝大体积混凝土力学特性的试验研究[J]. 水电站设计, 2006, 22(2): 88-92.
- [19] 黄国兴. 全级配大体积混凝土强度的试验研究[J]. 水力发电, 1992, (7): 45-48.
- [20] 南京水利科学研究所, 中国水利水电科学研究院. DL/T5150-2001. 水工混凝土试验规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 90-95.
- [21] 中国科学院数学研究所概率统计室编. 常用数理统计表[M]. 北京: 科学出版社, 1974: 30-31.