

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.04.018

全级配混凝土抗压强度尺寸效应及影响因素的统计分析

何吉^{1,2}, 徐小雪^{1,2}

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 武汉大学 水工岩石力学教育部重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 搜集了11个工程共137组试验数据,采用可靠性理论及统计学方法,研究了全级配混凝土大试件与湿筛混凝土小试件之间抗压强度比值(以下简称为“抗压强度比值”)的分布规律,分析了试件形状、龄期对抗压强度比值的影响,得到了如下结论:抗压强度的尺寸效应显著存在,混凝土立方体试件具有80%、85%、90%及95%保证率的抗压强度比值分别为0.799、0.789、0.776、0.757;试件形状对尺寸效应的影响显著,立方体试件的抗压强度比值约为0.847,圆柱体试件的抗压强度比值约为0.560,因此圆柱体试件的尺寸效应大于立方体试件;龄期对尺寸效应的影响显著,抗压强度比值在7d时最大,7d~28d下降明显,28d~180d基本稳定。基于该规律建立了相应的经验公式。

关键词: 全级配混凝土;抗压强度;尺寸效应;统计分析;试件形状;龄期

中图分类号: TV431+.9

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)04-0089-05

Statistical Analysis on Size Effect and its Factors of Full-grade Concrete Compressive Strength

HE Ji^{1,2}, XU Xiaoxue^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;

2. Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: In this paper, 137 experimental data from 11 engineering projects has been collected to analyze the distribution pattern of the Compressive Strength Ratio (CSR) between large full-grade concrete specimens and small wet-sieving specimens. This study is conducted based on reliability theory and statistical method. The impacts of both specimen shape and concrete age on the CSR are also analyzed. The conclusions are as follows: The CSR has remarkable size effect. It is 0.799, 0.789, 0.776 and 0.757 when the dependability is 80%, 85%, 90% and 95% respectively for cubic specimens. The size effect of CSR is related to the specimen shape significantly. The CSR is about 0.847 for cubic specimens and about 0.560 for cylindrical specimens. The size effect of CSR is also related to concrete age extremely. The CSR in the first 7 days remains large, decreases obviously from 7th day to 28th day, and becomes stable from 28th day to 180th day. An empirical formula is proposed for the relation between CSR and concrete age.

Keywords: full-grade concrete; compressive strength; size effect; statistical analysis; specimen shape; concrete age

工程中根据骨料的级配将混凝土分为一至四级,其中四级配混凝土的骨料粒径包含5mm~20mm、20mm~40mm、40mm~80mm、80mm~150mm四个完整等级,因此四级配混凝土也称为全级配混

凝土^[1]。全级配混凝土是重力坝、拱坝等大体积水工建筑物的核心建筑材料,其强度直接影响建筑物的稳定与安全,因此研究全级配混凝土的强度特性具有重要的科学意义和工程价值^[2-3]。

收稿日期:2018-03-04

修稿日期:2018-04-28

基金项目:国家自然科学基金项目(51509191,51579195)

作者简介:何吉(1982—),男,浙江杭州人,博士,副教授,主要从事水工结构安全性评价理论与方法的研究工作。

E-mail: jihechn@whu.edu.cn

全级配混凝土的强度一般通过物理试验测定。试验中为了减少骨料不均匀分布对结果的影响,通常将试件尺寸至少取为最大骨料粒径的 3 倍,即达到 450 mm^[4]。由于试验难度大、设备要求高,较大的试件尺寸极大地增加了试验成本,仅有少数重点工程才能进行全级配混凝土试验。因此设计中一般采用剔除拌合物中超过 40 mm 的大骨料,成型 150 mm 大小的湿筛混凝土试件进行小尺寸试验,并以此结果进行建筑物的设计和安全评价。如何采用湿筛小试件的试验结果来推测全级配混凝土的力学性能,一直是工程界和学术界普遍关心的问题^[5-6]。

但是全级配大试件与湿筛小试件的强度特性差异较大,即存在明显的尺寸效应。据统计,两者的轴拉强度比值约为 0.45 ~ 0.88,劈拉强度比值约为 0.74 ~ 0.91,抗压强度比值约为 0.70 ~ 1.09^[7-8]。美国胡佛大坝的研究表明 $\Phi 18$ 英寸 $\times$ 36 英寸(约 $\Phi 450$ mm $\times$ 900 mm)圆柱体试件的抗压强度与 $\Phi 6$ 英寸 $\times$ 12 英寸(约 $\Phi 150$ mm $\times$ 300 mm)圆柱体试件抗压强度比值约为 0.838^[1];三峡工程的研究表明 $\Phi 450$ mm $\times$ 900 mm 圆柱体试件与 $\Phi 150$ mm $\times$ 300 mm 圆柱体试件抗压强度比值为 0.90 ~ 1.02(28 d)、0.90 ~ 0.99(90 d);450 mm 立方体试件与 150 mm 立方体试件劈拉强度比值为 0.82 ~ 0.98(28 d)、0.80 ~ 0.87(90 d); $\Phi 450$ mm $\times$ 900 mm 圆柱体试件与 $\Phi 150$ mm $\times$ 300 mm 圆柱体试件劈拉强度比值为 0.75 ~ 0.85(28 d)、0.82 ~ 0.83(90 d)^[9]。显然,强度比值与荷载形式、试件形状、龄期等影响因素有关,甚至出现大于 1 的现象。国内外学者从试件缺陷、骨料尺寸、骨料比表面积、破坏模式、试验条件等方面进行了研究^[10-19]。此外,特别针对强度比值大于 1 的现象,从高频振捣对含气量的影响^[17-18]、全级配与湿筛混凝土的砂浆—骨料界面差异^[20]、试件受压面的减磨影响^[9]等方面进行了研究。然而,已有的研究成果对于强度比值的设计取值及影响条件尚未达成一致的结论,这对大体积水工建筑物的设计、施工以及安全评价产生了极大影响。

目前常用的研究方法有理论分析、数值模拟以及数学统计。

(1) 理论分析方法是基于能量、分形特性等角度分析混凝土的强度,通过实验修正,得到试件尺寸与强度比值的经验公式^[21]。主要理论有 Weibull 脆性破坏统计理论^[22]、基于能量释放理论的 Bazant 尺寸律理论^[23]以及基于分形的 Carpinteri 尺寸律理论^[24]。郑丹等^[7]结合混凝土在不同荷载下的裂纹

扩展模式,对 Bazant 断裂力学尺寸律理论进行了修正,得到了尺寸效应系数的经验公式。这些经验公式中通常假定较多,使用条件严苛,公式繁琐,难以被工程人员广泛采用。

(2) 数值模拟方法是对混凝土中砂浆、骨料及界面进行离散,建立细观尺度下的混凝土破损数值分析模型,通过数值模拟得到混凝土大试件的强度。Wang X F 等^[25]采用粘结单元方法,对大尺寸混凝土试件的破裂过程进行了模拟,建立了混凝土强度数值分析模型。但是数值模拟方法的操作复杂,建模及计算周期较长,并且如何准确标定计算参数是一个难题,不利于工程人员掌握。

(3) 数学统计方法是基于大量工程的试验数据,采用概率理论分析混凝土的强度比值,建立试件尺寸与混凝土强度之间的统计规律。杨忠义^[9]采用溪洛渡与三峡工程的试验成果,统计了抗压强度比值的变化范围。邓宗才^[1]采用三峡工程的试验数据,得到了抗压强度比值随龄期变化的经验公式。数学统计方法的本质是工程类比以及概率分析,因此概念明确、方法简单、经验丰富,容易被工程人员接受,其成果具有较好地工程应用前景。

本文将采用数学统计方法,重点针对混凝土的试件形状、龄期等影响因素,研究单轴受压荷载条件下混凝土强度的尺寸效应。

1 抗压强度比值的总体分析

将 11 个工程共 137 组全级配混凝土的试验数据汇总于图 1,数据来源见图 1 中 X 轴所示的各工程^[1,5-10,26-35]。

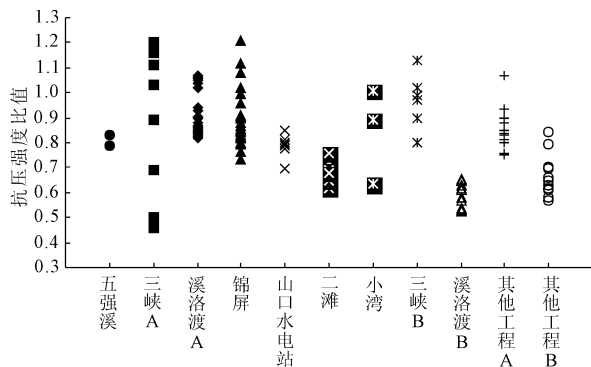


图 1 试验数据汇总

由图 1 可见,抗压强度比值最小为 0.460,最大为 1.210,平均为 0.815,方差为 0.026。当采用湿筛小试件的试验结果推测全级配混凝土的抗压强度时,如果取抗压强度比值的最小值计算,则得到的全

级配混凝土抗压强度偏低,造成安全冗余偏大,经济成本偏高;如果取最大值计算,则结果偏大,造成强度预估不足,安全性偏低;如果取平均值计算,由于图中各点的离散性较大(方差较大),则结果偏差较大。

2 抗压强度比值的可靠性取值

由于上述最小值、最大值以及平均值在工程中均应用不便,下文将采用可靠性理论^[35-39]来分析抗压强度比值。在可靠性理论中,混凝土的可靠度采用强度保证率来表示。工程中不同部位的混凝土具有不同的保证率要求,如水工大体积结构一般采用 80% 保证率,水工钢筋混凝土结构常采用 90% 保证率,薄壁结构或者重要部位宜采用 95% 保证率^[40]。本文将可靠性理论从强度引入强度比值,采用图 1 中的试验数据计算具有 80%、85%、90%、95% 保证率的抗压强度比值,计算过程如下:

(1) 选取图 1 中立方体试件对应的 72 组试验数据,绘制抗压强度比值的柱状图,并拟合成概型分布曲线见图 2。由图 2 可见,抗压强度比值具有服从正态分布的可能,平均值为 0.843,方差为 0.052²。

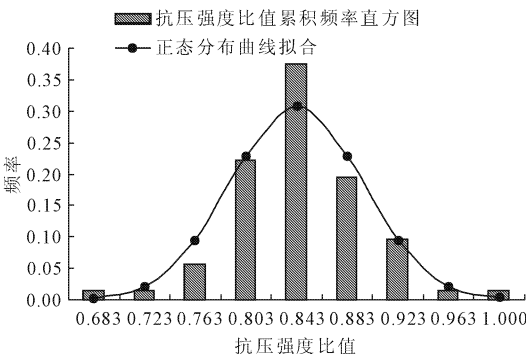


图 2 抗压强度比值的累积分布直方图及正态曲线拟合

(2) 假设随机变量 β (抗压强度比值) 服从正态分布 $N(0.843, 0.052^2)$, 并采用 K-S 检验方法按显著性水平 $\alpha = 0.05$ 进行非参数检验。

K-S 检验是基于累积分布函数检验某个经验分布是否符合某种理论分布的经典方法^[41]。该方法的基本理论为:令 $S_n(\beta)$ 是一个容量为 n 的简单子样的经验分布函数, $F(\beta)$ 为所假设的总体分布函数, 式(1)为检验统计量。基于柯尔莫哥洛夫定理^[41], 对于任意 $\lambda > 0$, 满足式(2)。假设总体中变量 β 服从连续分布函数 $F(\beta)$, 该假定记为 H_0 。根据样本计算 $S_n(\beta)$ 和统计量 D_n , 按照显著性水平 α 及样本容量 n 查阅柯尔莫哥洛夫分布的分位数表^[41]得到 $D(n, \alpha)$ 。若 $D(n, \alpha)$ 大于 D_n , 则接受

H_0 , 即假设成立, 总体变量服从假设的分布形式。

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

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

其中: $Q(\lambda) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} (-1)^i e^{-2i^2 \lambda^2}$ 。

由式(1)可得统计检验量 $D_n = 0.077$ 。以显著性水平 $\alpha = 0.05$, 样本容量为 $n = 72$, 查阅柯尔莫哥洛夫分布的分位数表^[41] 可得 $0.154 < D_{72, 0.95} < 0.160$, 则 $D_n < D(n, 1 - \alpha) = D_{72, 0.95}$ 成立。因此, 原假设不能被拒绝, 即抗压强度比值服从正态分布。

(3) 由正态分布查表^[41] 可得保证率为 80%、85%、90%、95% 对应的抗压强度比值如表 1 所示。

表 1 不同保证率的抗压强度比值

保证率/%	80	85	90	95
抗压强度比值	0.799	0.789	0.776	0.757

3 试件形状对抗压强度比值的影响

目前混凝土湿筛试验的试件形状主要有两类标准^[42]: 立方体 (150 mm × 150 mm × 150 mm)、圆柱体 (Φ150 mm × 300 mm)。这两类试件的试验结果存在显著差异, 通常认为圆柱体试件与立方体试件的抗压强度比值约为 0.7~0.8^[40], 影响因素主要有试件高径比、环箍效应、混凝土强度等^[43]。全级配混凝土同样存在圆柱体 (Φ450 mm × 900 mm) 与立方体 (450 mm × 450 mm × 450 mm) 两类试件, 两者的强度差异是否仍为 0.7~0.8, 这是一个亟待明确的问题。

表 2 列出了溪洛渡^[32] 和二滩^[29] 水电工程采用不同试件形状时全级配混凝土大试件与湿筛混凝土小试件之间的抗压强度比值。由表 2 可见, 立方体试件的平均值为 0.847, 圆柱体试件的平均值为 0.560, 说明不同的试件形状能够引起不同程度的尺寸效应, 且圆柱体的尺寸效应大于立方体。通过简单计算, 可得全级配圆柱体试件与立方体试件的强度比值约为 $(0.7 \sim 0.8) \times 0.560 / 0.847 = (0.463 \sim 0.529)$ 。由于数据有限, 上述结果无法采用可靠性理论进行分析, 无法得到基于保证率的结果, 但是足以说明试件形状对尺寸效应的影响不容忽视。此外需要说明的是: 由于图 1 中圆柱体试件的试验数据相对较少, 因此表 1 中的结果由立方体试件得到, 即该表仅适用于立方体试件; 圆柱体试件对应的结果可以通过表 1 中的数据乘以系数 (0.463~0.529) 的方式换算得到。

表 2 不同试件形状的抗压强度比值

试件形状	试件尺寸/mm	溪洛渡抗压 强度比值(28 d)	二滩抗压强度比值(28 d)			平均值
立方体试件	150	1.000	1.000	1.000	1.000	0.847
	200	0.938	—	—	—	
	450	0.828	0.830	0.830	0.900	
圆柱体试件	Φ150×300	1.000	1.000	1.000	1.000	0.560
	Φ200×400	0.569	—	—	—	
	Φ450×900	0.528	0.530	0.570	0.610	

注:表中抗压强度比值,立方体试件以 150 mm×150 mm×150 mm 的强度为基准,圆柱体试件以 Φ150 mm×300 mm 的强度为基准。

4 龄期对抗压强度比值的影响

根据现有的研究成果^[40],通常湿筛混凝土的强度在 7 d 内上升较快,之后减缓,28 d 后趋稳。全级配混凝土强度的发展规律与湿筛混凝土基本一致^[1],但是两者的抗压强度比值随龄期的变化规律则不同。

从图 1 中选取了溪洛渡^[30,32]、锦屏一级^[28]水电工程共 8 组试验数据,绘制了抗压强度比值随龄期变化图,如图 3 所示。由图 3 可见,龄期对尺寸效应的影响显著,抗压强度比值在 7 d 时最大,7 d~28 d 下降显著,28 d~180 d 基本稳定。

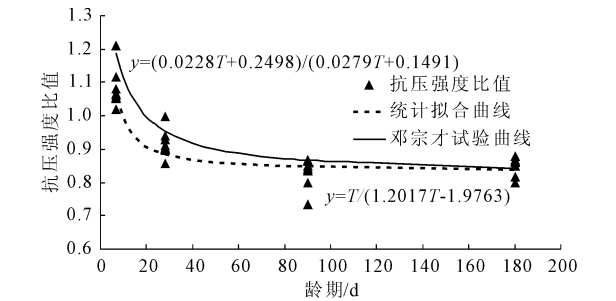


图 3 抗压强度比值随龄期变化图

邓宗才^[1]根据三峡工程天然骨料混凝土在自然养护条件下的试验结果拟合了全级配混凝土抗压强度(f'_c)与龄期(T)的关系式:

$$f'_c = \frac{T}{0.0279T + 0.1491} \tag{3}$$

同时拟合了湿筛混凝土抗压强度(f_c)与龄期(T)的关系式:

$$f_c = \frac{T}{0.0228T + 0.2498} \tag{4}$$

还将式(3)除以式(4),得到了抗压强度比值随龄期变化的表达式:

$$\frac{f'_c}{f_c} = \frac{0.0228T + 0.2498}{0.0279T + 0.1491} \tag{5}$$

图 3 中实线为式(5)对应曲线,可见该式能够反应溪洛渡、锦屏一级这 8 组试验数据的整体变化规

律,但是在 7 d~28 d 下降偏缓。借鉴式(3)、式(4)的表达形式,假定全级配混凝土抗压强度(y)与龄期(T)的关系式为 $y = T/(aT + b)$,采用最小二乘法拟合图 3 中数据,可得 $a = 1.2017$, $b = -1.9763$,即

$$y = \frac{T}{1.2017T - 1.9763} \tag{6}$$

图 3 中虚线为式(6)对应曲线,可见该式在 7 d~28 d 下降明显加快,基本接近试验数据的下限,说明更偏于安全。工程中可以采用式(6),基于湿筛混凝土的试验结果来推测不同龄期时全级配混凝土的抗压强度。

由于试验数据有限,骨料、水灰比、掺合料等因素的影响无法充分考虑,所以并不能够说明式(6)更能反应抗压强度比值随龄期的变化规律,仅仅为工程人员增加了一种参考。此外,图 3 中部分试验数据在 90 d 时明显偏小,甚至小于 180 d 的数值,其原因仍有待进一步研究。

5 结 论

本文根据 11 个工程共 137 组试验数据,运用数学统计原理分析了全级配混凝土大试件与湿筛混凝土小试件之间抗压强度比值的分布规律及影响因素,为如何采用湿筛小试件的试验结果推测全级配混凝土的抗压强度提供了量化依据,为工程的设计、施工以及安全评价提供了参考。

参考文献:

[1] 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,2006:52-54,87-88.
[2] 杨华全,李文伟.水工混凝土研究与应用[M].北京:中国水利水电出版社,2005.
[3] Neville A M. Properties of Concrete [M]. 5th edition. London: Prentice Hall, 2012.
[4] 水工混凝土试验规程:SL 352—2006[S].北京:中国水利水电出版社,2006:340.
[5] 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.
- [6] 杨成球,吴政.全级配混凝土基本力学特性试验研究[J].水利水电科技进展,2000,20(3):29-32.
- [7] 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].水利与建筑工程学报,2011,9(5):10-14.
- [8] 高文,董伟,吴智敏,等.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[J].水利与建筑工程学报,2014,12(2):9-14.
- [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] 陈文耀,郑丹.全级配与湿筛混凝土抗压强度比值问题的探讨[J].长江科学院院报,2010,27(8):58-60,65.
- [11] 李嘉进.试件尺寸和骨料粒径对混凝土强度的影响[J].水电站设计,1991,7(3):20-27.
- [12] 解伟,罗维,李树山,等.钢纤维体积率对C30混凝土立方体抗压强度尺寸效应的影响[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2015,36(2):11-14.
- [13] 张玘璐,王立成.裂纹尺寸对混凝土抗压强度的影响规律和动态断裂韧度计算方法研究[J].水利与建筑工程学报,2014,12(6):26-31.
- [14] Miled K, Liman O, Sab K. A probabilistic mechanical model for prediction of aggregates size distribution effect on concrete compressive strength[J]. Physica A, 2012, 391(12):3366-3378.
- [15] Elices M, Rocco C G. Effect of aggregate size on the fracture and mechanical properties of a simple concrete[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75(13):3839-3851.
- [16] Sim J I, Yang K H, Jeon J K. Influence of aggregate size on the compressive size effect according to different concrete types[J]. Construction and Building Materials, 2013, 44(7):716-725.
- [17] 刘孝江,花全,邵成建,等.单轴压缩下泡沫混凝土的强度特性研究[J].水利与建筑工程学报,2017,15(4):202-206.
- [18] 付昌会.搅拌方式对水泥混凝土含气量与性能影响的研究[D].西安:长安大学,2011:29-35.
- [19] 潘丽云,梁娜,胡飞佳,等.全再生粗骨料混凝土力学性能试验与评价研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2017,38(6):32-42.
- [20] 周甲佳,潘金龙,梁坚凝,等.尺寸效应对水泥净浆与粗骨料界面黏结性能的影响[J].建筑材料学报,2012,15(5):712-716.
- [21] 徐世焯,熊松波,李贺东,等.混凝土断裂参数厚度尺寸效应的定量表征与机理分析[J].土木工程学报,2017,50(5):57-71.
- [22] Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability[J]. Journal of Applied Mechanics, 1951, 13(2):293-297.
- [23] Bazant Z P. Scaling laws in mechanics of failure[J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 1993, 119(9):1828-1844.
- [24] Carpinteri A, Chiaia B, Ferro G. A new explanation for size effects on the flexural strength of concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 1997, 49:45-53.
- [25] Wang X F, Yang Z, Jivkov A P. Monte Carlo simulations of mesoscale fracture of concrete with random aggregates and pores: a size effect study[J]. Construction and Building Materials, 2015, 80:262-272.
- [26] 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.
- [27] 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):111-119.
- [28] 杨成球,李光伟,周友耕,等.二滩水电站全级配混凝土力学性能试验研究[J].水电站设计,1988(4):35-44.
- [29] 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(自然科学版),2003,25(6):500-503.
- [30] 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.
- [31] 李光伟,吴政.溪洛渡水电站人工骨料全级配混凝土性能试验研究[J].水电站设计,1999,15(2):101-107.
- [32] 杨成球,吴政.二滩水电站四级配砧试验研究[J].四川水力发电,1993(1):63-69.
- [33] 董芸,肖开涛,杨华全.天然骨料拱坝全级配混凝土特性试验研究[J].混凝土,2013(8):140-143.
- [34] 杨成球,吴政.全级配混凝土基本力学特性试验研究[J].水利水电科技进展,2000,20(3):29-32.
- [35] 邓宗才,李庆斌,傅华.人工骨料全级配大坝混凝土的拉压力学性能[J].水利学报,2005,36(2):214-218,224.
- [36] 陈厚群.论水工建筑物的可靠性设计[J].水利水电技术,2013,44(6):1-6,21.
- [37] 钟小平,金伟良.钢筋混凝土结构基于耐久性的可靠度设计方法[J].土木工程学报,2016,49(5):31-39.
- [38] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [39] 水利水电工程结构可靠度设计统一标准:GB 50199—94[S].北京:中国计划出版社,1994.
- [40] 李亚杰,方坤河.建筑材料[M].北京:中国水利水电出版社,2009:66-67.
- [41] 邵淑彩.应用数理统计[M].湖北:武汉大学出版社,2005:101-102,344-345.
- [42] 普通混凝土力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2002[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [43] 赵壮,冯博,刘刚,等.不同形状尺寸对混凝土试件抗压强度的关系[J].北方建筑,2016,1(2):39-41,79.