

水工大坝混凝土配合比试验讨论

林俊鸿¹ 武利强^{2*} 钱虹³

1 浙江钱塘江水利建筑工程有限公司, 浙江 杭州 310018

2 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020

3 浙江钱塘江海塘物业管理有限公司, 浙江 杭州 310018

[摘要] 水工大坝混凝土属于全级配混凝土, 与普通二级配混凝土有一定差异。以混凝土配合比为切入点, 讨论了配合比设计中的几个概念和注意事项。结合全级配混凝土强度尺寸效应问题, 讨论了大坝混凝土结构安全系数问题, 最后对全级配大坝混凝土配合比设计注意事项进行了建议。

[关键词] 大坝混凝土; 全级配; 配合比; 尺寸效应; 抗压强度

DOI: 10.33142/hst.v6i4.9170

中图分类号: TV431

文献标识码: A

Discussion on Concrete Mix Ratio Test for Hydraulic Dams

LIN Junhong¹, WU Liqiang², QIAN Hong³

1 Zhejiang Qiantang River Water Conservancy Construction Engineering Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310018, China

2 Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary, Hangzhou, Zhejiang, 310020, China

3 Zhejiang Qiantang River Haitang Property Management Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310018, China

Abstract: Hydraulic dam concrete belongs to fully graded concrete, which has certain differences from ordinary second graded concrete. Starting from the concrete mix ratio, several concepts and precautions in mix ratio design were discussed. Combined with the size effect of full graded concrete strength, the Factor of safety of dam concrete structure is discussed.

Keywords: dam concrete; fully graded; mix ratio; size effect; compressive strength

1 问题的提出

水工大坝混凝土是水利坝工建设中的主要材料, 在混凝土重力坝、拱坝等建筑物中使用量非常大, 其基本力学性能对大坝的安全有重要影响。同时, 大坝混凝土在配合比、施工工艺、施工环境等方面, 与普通混凝土相比, 具有独特的要求。

大坝混凝土通常采用三级配或四级配的全级配混凝土。《水工混凝土试验规程》(SL/T 352-2020)^[1]中关于全级配混凝土定义如下: 通常指骨料最大粒径为 80mm 的三级配混凝土, 及骨料最大粒径为 150(或 120)mm 的四级配混凝土。全级配混凝土中骨料粒径分为四级: 5mm-20mm(小石)、20mm-40mm(中石)、40mm-80mm(大石)、80mm-120mm(150mm)(特大石)。全级配混凝土多用于混凝土重力坝或拱坝等大体混凝土结构中, 对温控要求较高的部位。

本文主要讨论大坝混凝土配合比试验时的一些问题。

目前, 工程上大坝混凝土配合比试验基本采用湿筛法, 即将混凝土拌合物中粒径大于 40mm 的骨料筛除后, 成型各种混凝土试件, 进行相应的抗压强度、抗冻、抗渗、抗拉等力学性能试验。然而, 湿筛后的混凝土由于缺少 40mm 以上的粗骨料, 导致骨料级配发生改变, 相应的, 抗压强度等力学性能也与全级配混凝土有一定的差异^[2-7], 这种差异的存在, 使得在评价大坝混凝土实体质量时产生一定

的困惑, 本文针对这些问题进行详细的讨论。

2 配合比设计时的几个概念

2.1 大坝混凝土强度等级

《混凝土重力坝设计规范》(SL 319-2018)中关于大坝混凝土强度等级定义如下: 设计龄期 150mm 立方体试件的抗压强度 (MPa), 强度保证率为 80%, 表示符号为“C_{龄期}强度”。

《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2010)中关于混凝土强度等级定义如下: 混凝土强度等级应按立方体抗压强度标准值确定。立方体抗压强度标准值系指按标准方法制作、养护的边长为 150mm 的立方体试件, 在 28d 或设计规定龄期以标准试验方法测得的具有 95%强度保证率的抗压强度值。对比发现, 大坝混凝土强度等级与普通混凝土不同的地方主要是试验龄期和强度保证率。大坝混凝土的设计龄期一般为 90 天, 强度保证率也小于普通混凝土。主要原因是大坝混凝土为大体混凝土, 对温控要求较高, 过高的强度反而不利于温度控制。另外, 混凝土坝安全性较高, 因此, 相比普通混凝土结构, 强度保证率要求也低一些。强度保证率不同, 会直接影响配制强度, 进而影响配合比设计, 后文将进一步论述。

2.2 配制强度

配制强度为混凝土配合比试验时抗压强度目标值, 是

关键参数，具体计算见下式：

$$f_{cu,0} = f_{cu,k} + t \cdot \sigma \quad (1)$$

式中： $f_{cu,0}$ 为混凝土配制强度(MPa)； $f_{cu,k}$ 为混凝土强度等级标准值(MPa)； t 为强度保证率系数，强度保证率与概率度系数之间的关系见表1； σ 为混凝土强度标准差(MPa)。

表1 混凝土强度保证率与保证率系数之间的关系

强度保证率 %	80.0	84.1	85.0	90.0	95.0	97.7	99.9
概率度系数	0.840	1.0	1.040	1.280	1.645	2.0	3.0

由表1可知，普通混凝土强度保证率为95%，对应的保证率系数为1.65；大坝混凝土强度保证率为80%，对应的保证率系数为0.84。以C25强度等级为例， σ 取4.0MPa，则普通混凝土配制强度为31.58MPa，大坝混凝土配制强度为28.36MPa。

2.3 混凝土容许压应力

混凝土坝设计时，抗压强度等级是一个非常关键的参数，往往抗压强度、弹性模量等也与之正相关，直接影响混凝土结构承载力及变形性能。《混凝土重力坝设计规范》(SL 319-2018)和《混凝土拱坝设计规范》(SL 282-2018)中，均明确了坝体主应力或坝趾垂直应力不超过坝体混凝土容许压应力。

混凝土容许压应力值等于坝体混凝土极限强度除以安全系数。《混凝土重力坝设计规范》(SL 319-2018)中明确了坝体混凝土极限强度即设计龄期150mm立方体强度，强度保证率为80%。可见，此处的极限强度即混凝土抗压强度等级。抗压安全系数的取值：混凝土重力坝，基本组合荷载不小于4.0，特殊组合荷载(不含地震工况)不小于3.5；混凝土拱坝，基本组合荷载，1、2级拱坝为4.0，3级为3.5，特殊组合荷载(不含地震工况)，1、2级拱坝为3.5，3级为3.0。安全系数范围为3.0-4.0。

3 大坝混凝土抗压强度尺寸效应问题

3.1 尺寸效应试验研究

由于全级配混凝土试件尺寸大(抗压强度试件为450mm立方体)，试验难度高(需要1000吨以上的压力机)，试验成本高等原因，目前大坝混凝土配合比试验及质量评定时，抗压强度试件均为150mm立方体试件，混凝土拌合物为湿筛后的拌合物。这种湿筛后标准立方体试件抗压强度与全级配混凝土抗压强度之间的差异称为抗压强度尺寸效应，通常以全级配混凝土抗压强度与150mm标准立方体试块强度比值来反映尺寸效应大小。

杨忠义^[2]研究了溪洛渡拱坝和三峡重力坝全级配混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度的尺寸效应，得到以下有意义的结论：

(1)全级配大尺寸混凝土试验研究进展缓慢，原因有：①试件尺寸变化范围较大，对试模、压力试验机要求

较多；②试验结果离散型随着尺寸增大而加剧，消除离散型的样本数量难以确定；③“环箍效应”的存在。压力钢板与混凝土试件承压面之间存在摩擦力，由于钢板模量要远大于混凝土，因此，钢板对混凝土有横向约束作用，即“环箍效应”，导致强度测定值和真实值存在一定误差。

(2)强度换算系数随着龄期增长呈现降低趋势，7天龄期时45cm尺寸试件强度值甚至大于15cm尺寸试件。混凝土强度尺寸效应主要受试件尺寸缺陷和骨料-砂浆界面缺陷综合影响。界面缺陷可通过粗骨料比表面积指标近似反映。湿筛法小试件粗骨料比表面积较大，界面缺陷也较多。

(3)混凝土振捣频率对强度影响。振捣频率会影响到混凝土含气量，从而影响混凝土强度。高频振捣会强制排除混凝土拌合物内部分气泡，引起含气量降低，从而使强度升高。

(4)“环箍效应”的存在也对强度尺寸效应带来影响，尺寸不同，影响程度不同。

陈文耀，郑丹^[3]研究发现早期全级配混凝土试块抗拉强度与标准试件比值为0.5-0.7，抗压强度比值为0.7-0.9，均小于1.0。但，近年来抗压强度比值出现了大于1.0的现象，其比值出现随着龄期增大而逐渐降低的趋势，且不是个案。作者针对此现象进行了分析，认为有以下几个原因：

(1)混凝土原材料变化。高性能减水剂、优质掺合料的使用，增强了混凝土工作性和密实性，尤其加强了界面过渡区的密实度，对于大尺寸试件效果更为显著，因此，出现强度增强的情况。

(2)混凝土设计强度等级提升，水胶比降低。引气剂的掺入，增加了混凝土含气量。对于大尺寸试件，含气量损失较大，含气量较小，从而强度较高。

(3)成型条件改进。包括模具刚度增加，使得试件平整度增强；振捣频率加大；等这些因素也促进了大尺寸试件强度的提升。

文献^[5]统计了多个工程的大坝混凝土抗压强度尺寸效应，见图1。由图可见，全级配混凝土抗压强度小于湿筛后的抗压强度，平均值0.83。

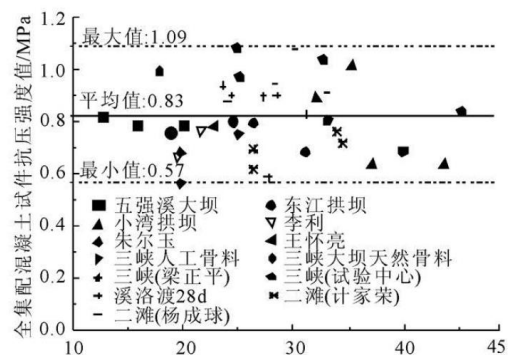


图1 四级配大坝混凝土抗压强度与150mm立方体试块抗压强度比值^[5]

对浙江省内永宁水库重力坝和潜明水库重力坝也进行了全级配抗压强度试验,抗压强度比值分别为 0.758 和 0.769。相比三峡大坝等大型水利工程,中小型水利工程在原材料品质方面要求相对较低,对抗压强度尺寸效应有一定影响,全级配混凝土抗压强度要更低。

大坝在运行过程中,实际承受荷载的为全级配混凝土结构,因此,严格意义上讲,坝体混凝土容许压应力计算时应取全级配混凝土抗压强度除以安全系数。换个角度讲,如果采取湿筛后的混凝土抗压强度作为极限抗压强度,则安全系数会打折扣,根据上述尺寸效应统计分析,折扣系数在 0.75-0.83 之间,安全系数则降为 2.25-3.32。

3.2 尺寸效应理论解释

大量的理论研究证明了混凝土尺寸效应的存在。Bazant^[8-9]从能量释放引起尺寸效应的角度进行理论研究,认为材料尺寸的改变不会导致材料破坏时表面消耗的能量所占总能量的比例发生变化,但是在材料破坏时随着材料尺寸的增大,内部释放到表面能量的比例会减小;Carpinteri^[10]从裂纹分形的角度对混凝土的尺寸效应进行理论研究,认为混凝土产生尺寸效应的主要原因是裂纹在分形上的差异造成的;徐积善和何浙浙等人^[11, 12]认为 Weibull 的尺寸效应统计理论是在应用统计角度开展的尺寸效应研究,是比较可靠的。

尺寸效应的统计理论认为大尺寸材料比小尺寸材料中存在低强度小单元的概率大,因而在宏观上材料尺寸越大强度越低。

4 结语

水工大坝混凝土为全级配混凝土,受限于试验技术和试验成本,目前在配合比试验和质量评定时,通常采用湿筛后的 150mm 立方体试块抗压强度作为判定依据,然而由于抗压强度尺寸效应的存在,全级配混凝土抗压强度低于湿筛后的试块抗压强度,一定程度上会降低大坝结构安全系数,因此,在配合比设计和试验时需引起注意,保留一定的安全裕度。

基金项目:浙江省水利厅科技计划项目(RC2059),

浙江省水利河口研究院院长基金项目(质检 A20003)。

【参考文献】

- [1] 中华人民共和国水利部. 水工混凝土试验规程(SL/T352-2020)[S]. 北京, 中国水利水电出版社, 2020.
 - [2] 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(3): 11-14.
 - [3] 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.
 - [4] 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.
 - [5] 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.
 - [6] 宋玉普, 徐秀娟, 刘浩. 冻融循环后全级配混凝土及其湿筛混凝土的力学性能比较[J]. 水利学报, 2012, 43(1): 69-75.
 - [7] 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.
 - [8] Bazant ZP, Xiang Y. Size effect in compression fracture: splitting crack band propagation[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1997, 123(2): 162-172.
 - [9] Bazant ZP, Yavari A. Is the cause of size effect on structural strength fractal or energetic-statistical[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2005, 72(1): 1-31.
 - [10] Carpinteri A, Chiaia B. Multifractal nature of concrete fracture surfaces and size effects on nominal fracture energy[J]. Materials and Structures, 1995, 28(8): 435-443.
 - [11] 徐积善, 何浙浙. 混凝土构件体积(尺寸)效应及抗裂塑性系数 μ 值的初步分析研究[J]. 力学学报, 1986, 18(4): 364-368.
 - [12] 何浙浙, 徐积善. 混凝土抗压强度尺寸效应的研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1997, 25(4): 47-53.
- 作者简介: 林俊鸿(1975.10—), 男, 西北工业大学, 土木工程, 浙江钱塘江水利建筑工程有限公司, 职员, 工程师。