

高拱坝砼拉压特性的全级配及湿筛试验

唐天国^{1a,1b}, 谢新生^{1b}, 段绍辉², 曹建兴^{1a}

(1. 四川大学 a. 建筑与环境学院; b. 水利水电学院, 成都 610065; 2. 二滩水电开发有限责任公司, 成都 610051)

摘要: 水工大坝混凝土力学特性试验迄今仍采用湿筛成型小尺寸试验试件完成, 而湿筛试验往往剔除大于 40 mm 以上大骨料, 如此造成试验结果与大坝混凝土实际全级配性能的差异, 无法真实反映实际大坝混凝土的性能指标。结合锦屏一级高拱坝混凝土强度测试要求, 开展其全级配试件力学特性及相关性能试验, 对其单轴抗压、单轴抗拉、极限拉伸及弹性模量等指标进行全面测试, 其 180 d 龄期的单拉强度和 90 d 龄期的极限拉应变与湿筛试验测试值的比值变化为: 按 C₁₈₀40、C₁₈₀35、C₁₈₀30 强度分区, 分别为 0.661、0.637、0.690 和 0.583、0.579、0.573。在大骨料作用下, 锦屏一级拱坝混凝土全级配试验测试的弹性模量则比湿筛试验测试值略高。

关键词: 拱坝; 混凝土; 抗拉强度; 极限拉伸; 锦屏一级

中图分类号: TV431

文献标志码: A

文章编号: 1674-4764(2012)S1-0186-05

Analysis of Full-Graded and Wet-screened Tests on Tension and Compression for High Arch Dam Concrete

Tang Tianguo^{1a,1b}, Xie Xinsheng^{1b}, Duan Shaohui², Cao Jianxing^{1a}

(1. a. College of Architecture and Environment; b. College of Water Resource and Hydropower,

Sichuan University, Chengdu, 610065, P. R. China;

2. Ertan Hydropower Development Company, Ltd, Chengdu, 610051, P. R. China)

Abstract: Test of mechanical performance to hydraulic mass concrete is still in the presence of wet-screened tests from small-scaled samples. But, wet-screened tests of concrete is often picked out large aggregates above 40mm. Test results from wet-screened concrete's samples must different from it's full-graded tests and not exactly reflect mechanical performance of dam's concrete. Based on demand of concrete's design strength of Jinping I Arch Dam, lots of full-graded tests from uniaxial compression, tension, limit tension and elastic modular were completed. Dam concrete's uniaxial tension strength ratio between full-graded and wet-screened tests of 180d age fluctuates to 0.661, 0.637 and 0.690 for design strength of C₁₈₀40, C₁₈₀35, C₁₈₀30. Similarly, its limit tension strains ratio of 90d age is 0.583, 0.579 and 0.573. Under the influence of large aggregates, the elastic modular from full-graded tests is above it from its wet-screened tests.

Key words: dam; concrete; tension strength; limit tension; Jinping I;

大体积混凝土结构如大坝、船坞、港口建筑、核电站压力容器和安全壳等, 为减少裂缝, 改善混凝土的性能, 降低混凝土成本费用等原因, 在混凝土配合比设计中, 往往加上大骨料, 采用三级配甚至四级配混凝土, 这类多级配大体积混凝土材料性能(如强度、体积变形等)对结构的安全性及稳定性问题, 迄今仍属研究难点。对于大坝混凝土, 其力学特性指标一般需通过试验确定。在传统的大坝混凝土材料试验研究中, 大都是采用湿筛混凝土成型小尺寸试件来进行^[1-3]。一般的大体积混凝土材料性能试验都是在骨料经过湿筛后的小试件上进行的。然而, 大坝混凝土一般采用三级配或四级配骨料, 骨料最大粒径达 80~150 mm(锦屏一级大坝混凝土特大石粒径, 属四级配), 粗骨料含量约占混凝土重量的 60%~70%, 胶凝材料仅占混凝土重量的 8%~10%。将搅拌好的大坝全级配混凝土中大于 40 mm 的骨料筛除后成型

的小试件(属二级配), 其粗骨料含量将减少 1~2 倍, 而胶凝材料含量却提高 1~2 倍。材料组成配比发生如此大的变化, 必然造成试验结果与大坝实际全级配混凝土性质的差异, 无法真实反映实际大坝混凝土的性能指标。从而使混凝土中各项材料的组成比例, 特别是水泥砂浆含量与骨料含量的比例产生了较大变化, 使得室内试验测试的各类性能指标并不能真正代表和反映大坝混凝土材料的各项性能指标, 从而给大坝设计和施工的科学性和安全性带来较大的影响^[4-6]。因此, 为真实反映大坝混凝土的强度、弹性模量等特性参数, 需考虑采用多粒组骨料的全级配混凝土来进行试验测试^[7]。锦屏一级特高拱坝属在建工程, 坝高居世界之首, 对其坝体混凝土材料的力学性能指标进行全面测试与掌握, 对拱坝的安全及稳定性分析至关重要。基于此, 文中拟结合锦屏一级特高拱坝混凝土强度测试方面的工作, 开展其全级配性能测

试的相关研究工作。

1 锦屏高坝砼全级配性能试验

锦屏一级水电站枢纽建筑物主要为高 305 m 的混凝土双曲拱坝,大坝混凝土分 A、B、C 区,设计强度等级分别为 C₁₈₀40、C₁₈₀35、C₁₈₀30,其安全性和耐久性是务必首先考虑的重要问题。经多项配合比优化试验,最终确定锦屏一级拱坝混凝土全级配(四级配)试验的粗骨料采用比例为:特大石:大石:中石、小石=35:25:20:20,水泥采用峨胜 P. MH42. 5,粉煤灰采用宣威 I 级粉煤灰,掺量为 35%,减水剂采用南京瑞迪 HLC-NAF 萘系高效缓凝减水剂(低碱型),掺量为 0.6%;引气剂采用 AEA202,掺量 2.5/万,坝体各区混凝土配合比见表 1。测试方法按水工混凝土试验规程所规定的进行,所有棱柱体试件单轴受压试验均在四柱压力试验机(30 MN)上进行,4 个变形引伸仪分别安置在试件四周,并且保证测量标距不小于骨料最大粒径的 3 倍的要求^[8]。测试试件主要根据混凝土力学性能及浇筑现场需要,并结合试验规范的要求进行尺寸考虑,锦屏一级拱坝混凝土全级配及湿筛试验试件尺寸参数见表 2。

表 1 大坝各区混凝土配合比表

坝体区域	A 区	B 区	C 区
强度等级	C ₁₈₀ 40	C ₁₈₀ 35	C ₁₈₀ 30
水胶比	0.39	0.43	0.47
砂率/%	22	23	24
混凝土材料用量/(kg·m ⁻³)			
水	82	82	81
水泥	136.7	124.0	112.0
粉煤灰	73.6	66.7	60.3
砂	477	503	530
石	1 718	1 710	1 703
减水剂/掺量	HLC-NAF 0.6%		
引气剂/(1/万)	2.5	2.5	2.5
坍落度/cm	3.5	3.5	3.2
含气量/%	3.8	4.0	4.2

表 2 测试试件尺寸参数 mm

试验项目	试件形状	试件尺寸	
		全级配	湿筛
抗压强度	立方体	450×450×450	150×150×150
劈拉强度	立方体	450×450×450	150×150×150
轴拉强度	棱柱体	450×450×1350	100×100×400
极限拉伸	棱柱体	450×450×1350	100×100×400
压缩弹模	圆柱体	Φ450×900	Φ150×130

1.1 抗压和劈拉强度

不同强度等级大坝混凝土抗压强度、劈拉强度试验龄期分别按 7、28、90、180 d 进行测试,结果见图 1、图 2 所示;并将全级配试验结果与现场拌和楼出机口的湿筛取样测试结果比较,如表 3 所示,表中数据为每组试件样品的测试数据取平均值所得。

表 3 全级配混凝土与湿筛混凝土强度比值表

全级配/湿筛	龄期/d				
	7	28	90	180	
抗压强度比值	C ₁₈₀ 40	0.879	0.827	0.764	0.793
	C ₁₈₀ 35	0.960	0.869	0.855	0.850
	C ₁₈₀ 30	1.115	0.902	0.840	0.866
平均比值		0.985	0.866	0.820	0.836
劈拉强度比值	C ₁₈₀ 40	0.601	0.727	0.722	0.808
	C ₁₈₀ 35	0.623	0.682	0.783	0.857
	C ₁₈₀ 30	0.735	0.670	0.792	0.874
平均比值		0.653	0.693	0.766	0.846

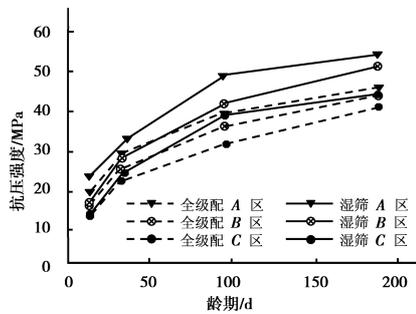


图 1 坝体混凝土抗压强度测试结果

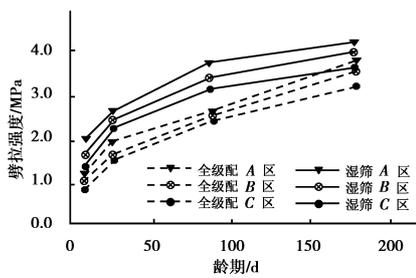


图 2 坝体混凝土劈拉强度测试结果

从图 1、2 可见,锦屏高坝全级配混凝土的 7~180 d 龄期抗压强度值随着坝体强度分区位置的不同,有所变化,A 区最高,其次是 B 区,最小的是 C 区;大坝全级配混凝土 7 d 和 28 d 龄期的劈拉强度也有明显变化,A 区比 B 区、C 区均高,C 区也最小,其规律性与抗压强度基本一致。而全级配混凝土抗压、劈拉强度与湿筛混凝土抗压、劈拉强度的对应比值变化也较明显,见表 2。另外,全级配混凝土与湿筛混凝土 7 d 和 28 d 龄期的劈拉强度比值范围 0.601~0.727,平均范围为 0.65~0.69。可见,全级配大尺寸试件测试的混凝土抗压和劈拉强度均小于湿筛小尺寸试件,具明显的尺寸效应。

1.2 轴拉强度与极限拉伸值

根据大坝全级配试验的相关要求,对湿筛取样也进行了相关的轴拉强度和极限拉伸强度测试。考虑到现场实际情况及设计需要,对轴拉试件和极限拉伸试验主要考虑为 28 d 和 90 d 龄期的取样试件,具体结果见表 4 及图 3、4 所示。可见,全级配试件测试试验在同龄期的条件下,测得轴拉强度

比湿筛试验所测得的小,而湿筛试验测得的极限拉伸值也更大。混凝土 90 d 龄期全级配试验与湿筛试验测得的轴拉强度比值平均值为 0.666,而极限拉伸值的比值平均值为 0.608。从表 4 可见,因全级配试验试件的大尺寸效应,其测试结果与湿筛试验所得相应比值均小于 1,说明尺寸效应对试验带来较大的影响。

表 4 全级配与湿筛混凝土拉伸试验表

全级配/湿筛		龄期/d		
		28	90	180
轴拉强度 比值	C ₁₈₀ 40	0.671	0.661	0.627
	C ₁₈₀ 35	0.672	0.637	0.583
	C ₁₈₀ 30	0.655	0.690	0.578
	平均比值	0.662	0.666	0.602
极限拉伸值 比值	C ₁₈₀ 40	0.619	0.583	0.582
	C ₁₈₀ 35	0.600	0.579	0.601
	C ₁₈₀ 30	0.604	0.573	0.577
	平均比值	0.663	0.578	0.592

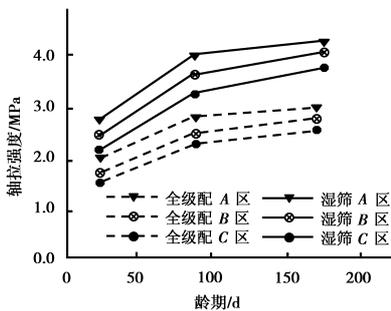


图 3 坝体混凝土轴拉强度测试结果

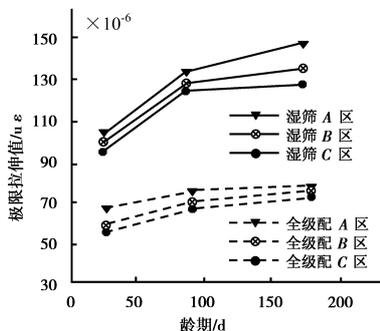


图 4 坝体混凝土极限拉伸值测试结果

1.3 压缩弹性模量性能

锦屏一级拱坝混凝土的弹性模量测试主要考虑为 28、90 及 180 龄期的压缩模量测试,其结果见表 5 及图 5 所示。可见,表中所显示的比值结果中,混凝土全级配试验测得的弹性模量比湿筛试验所得的弹性模量要高,主要因为全级配混凝土的大骨料用量起到明显作用。因为弹模主要与骨料尺寸性能相关,而全级配试验大骨料尺寸达 150 mm,因而其压缩弹模值与试件骨料尺寸紧密相关,尺寸效应也很明显。

表 5 全级配混凝土与湿筛混凝土弹性模量比值表

全级配/湿筛		龄期/d		
		28	90	180
弹性模量 比值	C ₁₈₀ 40	1.056	1.119	1.062
	C ₁₈₀ 35	1.037	1.125	1.060
	C ₁₈₀ 30	1.034	1.155	1.097
平均比值		1.042	1.133	1.073

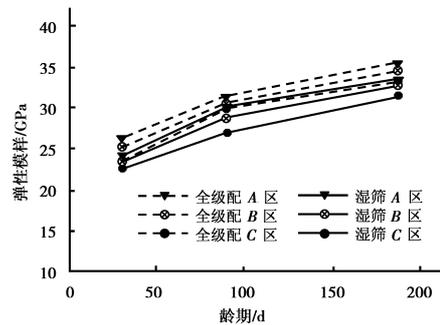


图 5 坝体混凝土弹性模量测试结果

2 测试数据分析

2.1 抗压及抗拉强度分析

根据上述的全级配及现场取样湿筛混凝土拉、压试验及相关性能测试,对试验过程中的部分试验数据中离散性过大的予以剔除,然后进行数据比拟分析,首先试件的抗拉及抗压强度参照经验公式^[10]进行,公式如下:

$$f_t = C \sqrt{f_c}, \quad (1)$$

其中: f_t 为抗拉强度, f_c 为抗压强度, C 为待定拟合系数。运用公式(1)对上述全级配和湿筛测试数据进行数据拟合分析,采用回归分析样本拟合办法,

$$\text{全级配混凝土 } f_t = 0.382 \sqrt{f_c}, \quad (2)$$

$$\text{湿筛混凝土 } f_t = 0.416 \sqrt{f_c}, \quad (3)$$

为便于对拟合结果误差分析,对式(2)及(3)进行简化处理

$$\text{全级配混凝土 } f_t = 0.382 X_{c1}, \quad (4)$$

$$\text{湿筛混凝土 } f_t = 0.416 X_{c2}, \quad (5)$$

简化后,式(4)、(5)转化为一次正比函数关系,对其进行误差拟合分析,结果见图 5 及图 6 所示。

据图 6、图 7,湿筛混凝土抗拉、抗压强度关系拟合曲线误差要小于全级配混凝土试件,这可能因为全级配混凝土含大骨料,其大骨料内部的裂缝和缺陷概率更大,大骨料界面的粘结状态较差的原因,且这些因素往往对抗拉强度等影响较大。

2.2 抗压弹性模量分析

据图 5 所示,全级配抗压弹性模量比湿筛混凝土测试的抗压弹性模量略高,从 28、90、180 龄期分别比较分析,其抗压弹性模量比值(全级配/湿筛)平均变化范围分别为 1.042、1.133、1.073。参照弹性模量的变化比较,可得经验公式为

$$E_c = C \sqrt{f_{cu}}, \quad (6)$$

其中: E_c 为弹模模量; f_{cu} 为立方体抗压强度; C 为待定拟合

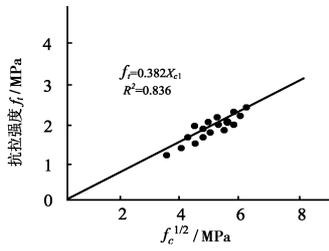


图 6 坝体全级配混凝土试件误差分析结果

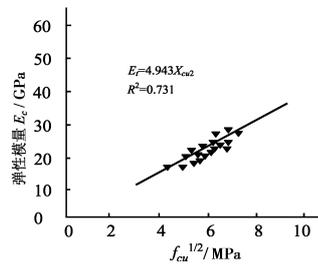


图 9 坝体湿筛混凝土试件误差分析结果

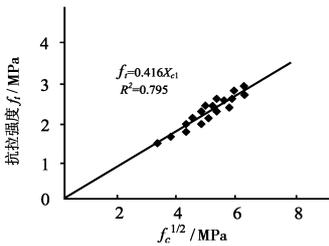


图 7 坝体湿筛混凝土试件误差分析结果

结合表 5 中所示粗骨料性能参数,均达到设计规范要求,现场试验测试均与混凝土级配性能吻合。

3 结论

1) 由于尺寸效应和骨料湿筛效应的影响,大骨料全级配混凝土试件的强度和变形均小于相应的湿筛小骨料试件,锦屏一级全级配混凝土 180 d 龄期的单拉强度和 90 d 龄期的极限拉应变与湿筛混凝土的比值变化为:按 A、B、C 分区,分别为 0.661、0.637、0.690 和 0.583、0.579、0.573。在大骨料作用下,全级配混凝土的弹性模量则比湿筛混凝土略高,其相应的比值(全级配/湿筛)均大于 1。其抗拉与抗压强度关系曲线,误差拟合公式基本反映了二者相互关系,但部分试验数据离散性较大;对压缩弹性模量误差分析时,全级配误差离散性也大于湿筛混凝土的拟合结果。

2) 拉压或者拉压状态下的不同尺寸和骨料级配的混凝土试件抗拉和抗压强度均低于相应的单轴抗拉抗压强度,并且极限拉应变值随着拉压强度比的增加而降低,2 个方向的应变在单轴受压时绝对值最大。值得注意的是,全级配混凝土在拉压状态下比起小骨料混凝土其强度和极限变形降低更多。因此,在实际工程中,处于双轴拉压或者三轴拉压应力状态的大体积混凝土结构,设计时要引起更高的重视。

总之,特高拱坝(如锦屏一级,305 m)结构往往处于复杂应力状态下,目前国内外对大坝混凝土强度理论的研究,大多数仅局限于全级配单轴受力状态,对于大试件的动态力学性能研究也刚起步,因此在以后的工作中,应继续拓展相关的试验研究。

参考文献:

[1] Zhu B F. Stress level coefficient and safety level coefficient for arch dams[J]. Dam Engineering, 2000, 11(3): 133-142.
 [2] 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.
 SONG Yupu, WANG Huailiang. Endochronic damage constitutive model for fully-graded aggregates mass concrete[J]. Shuili Xuebao, 2006, 37(7): 769-777.
 [3] 任朝军,杜成斌,戴春霞. 三级配混凝土单轴破坏的细观数值模拟[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2005, 33(2): 177-180.
 REN Chaojun, DU Chengbin, DAI Chunxia. Meso-structure numerical simulation of uniaxial failure of three-graded concrete[J]. Journal of Hohai University: Natural Science, 2005, 33(2): 177-180.

系数。类似公式(1)求解,对全级配和湿筛测试数据进行拟合回归分析,可得到如下:

$$\text{全级配混凝土 } E_c = 5.788 \sqrt{f_{cu}}, \quad (7)$$

$$\text{湿筛混凝土 } E_c = 4.943 \sqrt{f_{cu}}. \quad (8)$$

其误差分析结果见图 8、图 9 所示。

表 5 锦屏一级拱坝砼粗骨料性能参数

骨料分类	小石 5~20 mm	中石 5~20 mm	大石 5~20 mm	特大石 5~20 mm	设计 要求
表观密度/ (g · cm ⁻³)	2.68	2.70	2.70	2.70	≥2.55
堆积密度/ (g · cm ⁻³)	1.36	1.34	1.33	1.32	/
孔隙率/ %	49.5	50.6	50.8	51.3	/
饱干吸水 率/%	0.5	0.4	0.2	0.1	≤2.5
针片状/ %	10.0	4.0	8.4	4.7	≤15
坚固性/ %		0.36			≤5
压碎指标/ %		10.8			≤20

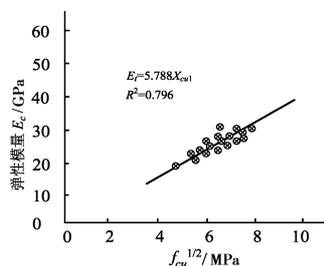


图 8 坝体全级配混凝土试件误差分析结果

- [4] SONG YU-PU, ZHAO GUO-FAN. Failure criterion of the mass concrete under combined compression-tension stress states [C]// In: Proceedings of 6th International Offshore and Polar Engineering Conference, Los Angeles, USA, 1996; 229-303.
- [5] 梁正平, 陆海荣, 黄书秦, 等. 三峡工程原级配混凝土单向拉压性能试验[J]. 河海大学学报, 1992, 20(5): 105-111.
LIANG Zhengping, LU Hairong, HUANG Shuqin, et al. Tests of unidirectional compressive and tensile behavior of Full-graded aggregate concrete for Three Gorges Project[J]. Journal of Hohai University: Natural Science, 1992, 20(5): 105-111.
- [6] ZHOU JI-KAI, WU SHENG-XING, ZHAN CHEN-HUI, et al. Experimental study on full-graded concrete aseismatic strength under different initial static loading [C]// Proceedings of the 3th International Conference on Earthquake Engineering, Nanjing, China, 2004, 10: 339-344.
- [7] WU SHENG-XING, ZHOU JI-KAI, SHEN DE-JIAN. Flexural-tensile testing of fully-graded concrete in static and dynamic states for high arch dam [C]// Proceedings of the 4th International Conference on Dam Engineering, Nanjing, China, 2004, 10: 961-968.
- [8] 邓宗才, 李庆斌, 胡华, 等. 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.
DENG Zongcai, LI Qingbin, FU Hua, et al. Tensile and compressive behaviors of full grade concrete made of crushed coarse aggregate [J]. Shuili Xuebao, 2005, 36(2): 214-218.
- [9] 张伯骥, 杨忠义, 肖延亮, 等. 锦屏一级水电站大坝全级配混凝土性能试验研究[R]. 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 2010(2): 7-14.
- [10] PHILIPS D, ZHENG B. Direct tension tests on notched and unnotched plain concrete specimens [J]. Magazine of concrete research, 1993, 145(162): 25-32.

(编辑 陈移峰)

(上接第178页)

- [5] Said I, Gennaro V D, Franka R. Axisymmetric finite element analysis of pile loading tests [J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(1/2): 6-19.
- [6] 董天文, 郑颖人, 黄连壮. 群桩基础非线性有限元强度折减法极限分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(1): 65-70.
DONG Tianwen, ZHENG Yingren, HUANG Lianzhuang. Strength reduction method of no-linear FEM limit analysis for pile group foundation [J]. Journal of civil, architectural & environmental engineering, 2011, 33(1): 65-70.
- [7] Gavin K G, O'Kelly B C. Effect of friction fatigue on pile capacity in dense sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(1): 63-71.
- [8] Unwin H, Jessep R A. Long-term pile testing in London Clay: a case study [J]. Geotechnical Engineering, 2004, 157(2): 57-63.
- [9] 冷伍明, 律文田, 谢维鑫, 等. 桩基现场静动载试验技术研究 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26(5): 619-622.
LENG Wuming, LU Wentian, XIE Weriliu, et al. Study on static and dynamic load test of pile in site [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(5): 619-622.
- [10] 谢和平. 岩石混凝土损伤力学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990: 6-19.
- [11] 余寿文, 冯西桥. 损伤力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997: 308-314.
- [12] Loland K E. Continuous damage model for load-response estimation of concrete [J]. Cement and concrete research, 1980, 10(3): 395-402.

(编辑 郑洁)