

回填微膨胀自密实混凝土配制及单轴膨胀试验

刘伟宝, 陆采荣, 王 珩, 梅国兴, 戈雪良, 杨 虎

(南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 某水电站采用平压水箱平衡蜗壳内水压力, 虽已安全运行了数十年, 但水箱内产生了严重锈蚀, 检修条件困难, 存在安全隐患。为研究回填微膨胀自密实混凝土替代水箱方案的可行性, 开展了回填微膨胀自密实混凝土的配制及其单轴膨胀模拟试验研究。根据替代方案的设计要求, 回填微膨胀自密实混凝土应具有合适的膨胀量, 无需振捣即可将水箱充填密实。采用工程当地原材料, 通过拌和物性能试验及水胶比-强度试验, 确定了水胶比、砂率等混凝土配合比参数。通过限制膨胀试验和模拟单轴膨胀试验研究了膨胀剂掺量与变形的关系。提出的微膨胀自密实混凝土流变参数在合理范围以内。提出的回填低热微膨胀自密实混凝土配合比及单轴膨胀模拟试验方法可供相关研究和工程参考。

关键词: 回填; 微膨胀; 自密实混凝土; 混凝土配制; 流变性能; 单轴膨胀

中图分类号: TU528.55

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2014)06-0016-06

某设计水头 18 m 的闸墩式电站, 在电站机组段两侧的溢流坝宽缝内设置了与上游水库相连通的平压水箱, 以抵消和平衡蜗壳的内水压力, 减少蜗壳外围钢筋混凝土结构应力。该方案使电站安全运行了数十年, 但水箱内严重的锈蚀增加了安全隐患。而且水箱内存在支撑钢架, 检修工作因空间小而实施困难, 为此提出了采用回填微膨胀自密实混凝土的替代方案。

该方案需要研究满足混凝土限制膨胀率、自生体积膨胀变形、蜗壳补加力等要求的最优配合比。同时, 混凝土须满足自密实、缓凝、可泵性好等特点。由于自密实混凝土通常含有较多胶凝材料且水胶比较低, 其自收缩和干缩也较大, 配制微膨胀自密实混凝土需要掺加适量的膨胀剂。通过三维有限元分析, 蜗壳放空, 在平压水箱的水压力作用下, 蜗壳外围混凝土向蜗壳方向产生 0.15 ~ 0.25 mm 的法向变形; 平压水箱放空, 在蜗壳充水的水压力作用下, 蜗壳外围混凝土向平压水箱方向产生 0.30 ~ 0.50 mm 的法向变形。回填混凝土水平方向长度为 1 m, 对其水平方向的变形上下限要求可认为是: 当混凝土膨胀量不大于 200×10^{-6} 、收缩量不大于 400×10^{-6} 时, 混凝土的变形在安全范围内。

通常通过限制膨胀率试验和自生体积变形试验来优选膨胀剂掺量。但在室内试验中, 混凝土的限制膨胀和收缩是在饱水条件和干燥条件下的状态, 并不能代表实际工况。实际工况下, 混凝土处于相对密闭状态, 与外界没有水气交换。因此对于平压水箱内的微膨胀混凝土, 从长期来看, 其理想状态是在模拟的相对封闭状态下, 混凝土早期膨胀且膨胀量在水平方向为 200×10^{-6} 左右(还应考虑温度变形对水平方向的影响), 后期允许有部分收缩, 但最大不能超过 400×10^{-6} 。

1 混凝土配制方案

根据对回填设计方案的技术需求分析, 该混凝土特点是微膨胀性、自密实性及低发热量, 而填充部位无

收稿日期: 2014-05-27

基金项目: 水利部公益性行业科研专项资金项目(201301052)

作者简介: 刘伟宝(1975-), 男, 宁夏中卫人, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事水工混凝土材料及耐久性研究。

E-mail: wblu@nhri.cn

配筋,因此建议该混凝土设计指标为:强度等级 C20,抗冻等级 F100,抗渗等级 W4,坍扩度(600±50) mm。

取 28 d 龄期的强度保证率为 95%,概率度系数为 1.65,强度标准差为 4.0 MPa,计算可得混凝土配制强度为 26.6 MPa^[1]。Ⅱ级粉煤灰掺量可按重力坝常态内部混凝土考虑,因此在掺用粉煤灰时,最大掺量可选 50%。自密实混凝土是可以在自身重力作用下填充密实的混凝土,因此需要足够的浆体来满足流动性需求,要达到 600 mm 左右的坍扩度。一般来说自密实混凝土的水胶比在 0.35~0.45 之间,如果骨料的粒型不够理想,就需要更多的胶材和用水量。水胶比必须同时满足混凝土强度和耐久性的要求。因此自密实混凝土的单位粉体量宜为 0.16~0.23 m³,大致相当于 450~650 kg/m³ 的胶材用量^[2]。对于自密实混凝土,用水量一般为 155~180 kg/m³,砂率一般为 50% 左右,因为在大流动性时,混凝土的稳定性非常重要,高砂率有利于混凝土的稳定。另外,自密实混凝土的骨料最大粒径一般不大于 25 mm,粗骨料体积一般为 0.28~0.33 m³,相当于粗骨料用量 750~900 kg/m³,所以,砂用量较一般常态混凝土高。混凝土含气量控制为 4% 左右,含气量与混凝土的塑性黏度呈反比关系,有一定的微小气泡可以提高混凝土的流动性。综上所述,提出主要配制参数见表 1。

表 1 混凝土的主要配制参数
Tab. 1 Main parameters of concrete preparation

混凝土类别	配制强度/ MPa	坍扩度/ mm	粉煤灰最大 用量/ %	最大 水胶比	含气量/ %	用水量/ (kg·m ⁻³)	砂率/ %	膨胀剂用量/ %
自密实微膨胀	26.6	600±50	50	0.45	4.0	155~180	45~55	5~10

2 混凝土配合比试验

试验采用 42.5 级普通硅酸盐水泥、Ⅱ级粉煤灰、水电站附近砂场的天然砂和人工碎石,细骨料的细度模数为 2.62,粗骨料粒径 5~20 mm 和 20~40 mm 共 2 个粒级。外加剂采用了低碱型膨胀剂和自密实混凝土专用的缓凝型减水剂和引气剂。

考虑到骨料碱活性抑制、28 d 抗冻等级和混凝土低热性的要求,对比 4 个水胶比(0.33,0.35,0.37 和 0.39),调整砂率找到满足工作性要求的水胶比;再选取 2 个粉煤灰掺量(30% 和 50%),2 个膨胀剂用量(5% 和 10%)进行试验,找到满足配制强度要求和限制膨胀率要求的配合比。

根据砂率试验结果,当砂率为 50% 时,混凝土的坍扩度最大,整体稳定性较好;而砂率较小时,混凝土粗骨料明显包裹不足,流动性变差;当砂率较大时,混凝土显得较干,流动性也不足。砂率为 50% 时,粗骨料用量为 803 kg/m³,体积为 297 L,此时混凝土流动性满足要求。

选择 4 个水胶比,50% 粉煤灰用量对混凝土水胶比进行试拌,配合比及工作性测试结果见表 2。粗骨料采用小石:中石=70:30。

表 2 混凝土水胶比试验配合比
Tab. 2 Concrete mix proportion of water-cementitious ratio tests

编 号	水胶比	砂率/ %	水/ (kg·m ⁻³)	水泥/ (kg·m ⁻³)	粉煤灰/ (kg·m ⁻³)	砂/ (kg·m ⁻³)	石/ (kg·m ⁻³)	减水剂/ %	引气剂/ ‰	坍扩度/ mm	含气量/ %
QBS1	0.39	51	170	218	218	826	793	1.2	0.05	500	4.5
QBS2	0.37	51	168	227	227	819	787	1.2	0.05	540	4.6
QBS3	0.35	50	165	236	236	798	798	1.2	0.05	620	4.5
QBS4	0.33	50	163	247	247	790	790	1.2	0.05	660	4.8

试验结果表明:当水胶比 0.35 时,用水量 165 kg/m³,胶材用量 472 kg/m³,坍扩度 620 mm,满足工作性要求;当水胶比大于 0.35 时,胶材用量不足,流动性不够;而当水胶比小于 0.35 时,胶材用量较高,不够经济;而在较高用水量,较大水胶比时,容易出现浆骨分离现象。因此综合分析,选择水胶比为 0.35。

对表 2 中 QBS3 组进行不同中小石比例的混凝土自密实工作性能试验,结果见表 3。表中的 T_{500} 指混凝土坍扩度试验中扩展到 500 mm 时需要的时间,此值越小,说明混凝土流动性越好,黏度越小。 H_2/H_1 是指在 L 型仪中,混凝土下落流淌后两端高度的比,此值越接近 1,表明混凝土流动性和通过性越好。振动离析率反映的是混凝土内部粗骨料的分离难易程度,此值越小说明越不容易离析,一般不允许超过 10%^[2]。试验结果表明当全部选用小石(5~20 mm)时,混凝土流动性和稳定性最好,因此骨料方案推荐全部采用小石。

表 3 混凝土初选配合比流变性

Tab.3 Rheology property of concrete mix

编 号	小石:中石	坍扩度/mm	T_{500}/s	H_2/H_1	振动离析率/%
QBS3-1	70:30	620	3.5	0.88	6.5
QBS3-2	85:15	630	3.0	0.90	4.8
QBS3-3	100:0	640	3.0	0.92	3.2

3 限制膨胀及收缩试验

选择 0.35 水胶比,50% 粉煤灰用量,5% 和 10% 两种膨胀剂掺量,按《水工混凝土试验规程》(DL/T 5150-2001)进行强度和限制膨胀及收缩试验。配合比及强度结果见表 4,限制变形试验结果见表 5 和图 1。可见,在此试验条件下参加 10% 膨胀剂的混凝土膨胀量超过了 200×10^{-6} ,可能会对蜗壳混凝土造成额外的压力,而采用 5% 膨胀剂掺量时膨胀量和收缩量都在安全范围以内。不过,此试验条件是在饱水状态下膨胀 14 d 后进入干燥环境进行,所以膨胀量和收缩量均与实际工况存在差别。

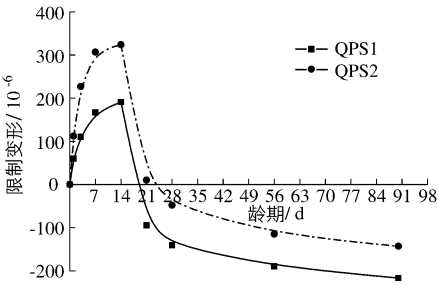


图 1 混凝土限制变形试验结果

Fig.1 Test results of concrete restrained deformation

表 4 混凝土限制变形试验配合比及强度

Tab.4 Concrete mix proportion and strength of restrained deformation tests

编 号	水胶 比	膨胀剂 用量/%	水/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	水泥/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	粉煤灰/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	膨胀剂/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	砂/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	石/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	减水剂/ %	引气剂/ ‰	坍扩度/mm	含气量/ %	抗压强度/ MPa
													7 d 28 d
QPS1	0.35	5	165	212	236	24	798	798	1.2	0.05	620	4.1	15.9 27.2
QPS2	0.35	10	165	189	236	47	797	797	1.2	0.05	630	4.0	15.2 27.0

表 5 混凝土限制变形试验结果

Tab.5 Test results of concrete restrained deformation

编 号	水中变形/ 10^{-6}				空气中变形/ 10^{-6}			
	1 d	3 d	7 d	14 d	21 d	28 d	56 d	90 d
QPS1	60	110	167	191	-95	-141	-190	-217
QPS2	112	227	307	324	10	-48	-115	-143

4 单轴膨胀模拟试验

根据设计文件,平压水箱靠溢流坝一面为固定面板,板厚 9 mm;靠电站边墙一面为活动面板,板厚 9 mm,活动面板四周为厚度 4.5 mm 的“Ω”形伸缩节与相邻四块面板连接。根据平压水箱布置和工况分析,充填到平压水箱内的膨胀混凝土形成六面体,其中五面受到较强约束,在蜗壳方向存在变形空间,因此近似认为该混凝土是单轴变形模式。根据以上分析,设计出一种膨胀力测定单轴模型,如图 2 所示。圆柱形试

模采用45#厚壁无缝钢管,形成较强环向约束,轴向采用直径12 mm的A3钢筋限制变形,顶端设置千分表测定在膨胀力作用下的钢筋变形,根据约束钢筋截面积和弹性模量,可以计算得出此条件下的膨胀力。单轴膨胀应力采用以下公式计算:

$$F_E = 1\,000 \frac{A_g}{A_c} \frac{\varepsilon}{L} E \quad (1)$$

式中: F_E 为单轴膨胀应力(MPa); A_g 为A3限制钢筋截面积(113 mm^2); A_c 为混凝土试件截面积($13\,990\text{ mm}^2$); ε 为A3限制钢筋变形(mm); L 为A3限制钢筋长度(280 mm); E 为A3限制钢筋弹性模量(200 GPa)。

模具准备好后,内部涂抹黄油,衬入一层塑料袋,然后将混凝土灌入,将塑料袋封口,以保证混凝土为绝湿状态,然后盖上顶板,将其放置在20℃恒温环境下。混凝土的膨胀作用在底部钢板和顶部活动板上,顶部活动板将此膨胀力传递到限制钢筋上产生变形。混凝土初凝后测初长,随后每隔一段时间测量中心的钢筋变形,就可以计算出混凝土在膨胀剂的作用下对钢筋施加的膨胀力。试验结果见表6和图3。

表6 膨胀应力测定试验结果

Tab. 6 Test results of expansion stress

编 号	变形/ 10^{-6}								膨胀应力/MPa							
	1 d	2 d	3 d	5 d	14 d	28 d	56 d	84 d	1 d	2 d	3 d	5 d	14 d	28 d	56 d	84 d
QPS1	21	34	41	46	47	47	47	47	0.034	0.055	0.066	0.074	0.076	0.076	0.076	0.076
QPS2	27	45	54	61	62	62	62	62	0.044	0.073	0.087	0.099	0.100	0.100	0.100	0.100

经计算,掺加5%和10%膨胀剂的自密实混凝土在模拟单轴约束条件下,14 d可产生的膨胀应力为0.076 MPa和0.100 MPa,未超出最大0.2 MPa的安全限值,且84 d的变形仍稳定。

5 流变参数

对掺用5%膨胀剂的配合比QPS1,采用流变仪进行流变参数测试,结果见表7和图4。流变参数主要为混凝土剪切屈服应力和塑性黏度,前者可衡量混凝土在流动时需要克服的阻力,后者可衡量混凝土的黏稠度及流动速度。在90 min内,该混凝土的流变参数坐标均落在O. H. Wallevik^[3]提出的自密实混凝土推荐区域(五角星围成的框内)。表明该混凝土在90 min内,即使静置,仍然能够保持良好的工作性和自密实性,有利于施工的连续性和有序性。

需要说明的是,这个工作性保持时间代表的是理论上混凝土从出机到泵送浇筑的最大时间间隔。在实际施工中,由于搅拌车会对混凝土进行持续搅拌,混凝土的工作性保持时间会更长。另外这个工作性保持时间也并非指整个混凝土浇筑一定要在90 min内完成,控制浇筑时间间隔的是混凝土

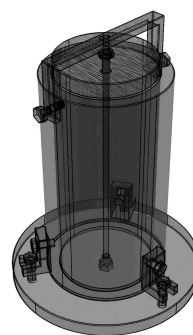


图2 膨胀应力测定单轴模型效果

Fig. 2 Renderings of uniaxial stress expansion model

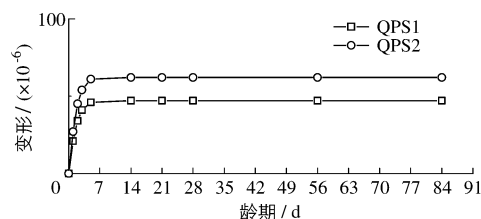


图3 混凝土配筋约束变形测试结果

Fig. 3 Reinforcement constraint deformation test results of concrete

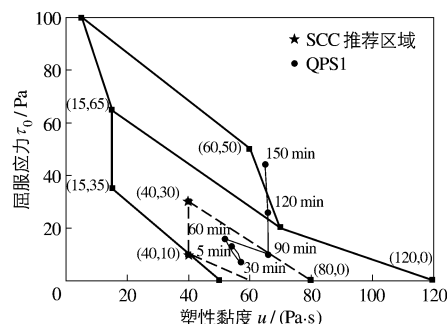


图4 混凝土流变参数试验结果

Fig. 4 Results of concrete rheological parameters test

土的初凝时间这个参数,该时间一般为几小时到十几小时,混凝土的浇筑间隔只要不大于此初凝时间即可实现混凝土的无缝对接。另外,初凝时间可通过外加剂等手段根据现场需要调整。

表 7 混凝土流变参数试验结果

Tab. 7 Results of concrete rheological parameters test

编 号	流变参数	历时/ min					
		5	30	60	90	120	150
QPS1	剪切屈服应力/ Pa	13	7	16	10	26	44
	塑性黏度/(Pa · s)	54	57	52	66	66	65

6 结 语

(1) 回填混凝土的设计指标应该考虑使用条件对力学性能、流动性、变形性能的要求,特别是膨胀或收缩的限制范围做出明确要求。

(2) 限制膨胀和收缩试验、干缩试验、自生体积变形试验均是在特定标准条件下开展的,与回填混凝土实际使用工况可能存在差异,针对实际工况开展模拟试验是必要的。

(3) 提出的单轴膨胀模拟试验符合平压水箱回填混凝土的实际工况,通过该模拟试验可以评估回填混凝土的膨胀量和收缩是否满足安全限值要求。

(4) 提出的自密实微膨胀混凝土配合比的拌合物坍扩度为 635 mm,含气量为 4.0%,流变参数中剪切屈服应力为 10 Pa,塑性黏度为 55 Pa · s。钢筋间隙通过性优良,振动离析率为 3.0%,流变参数在合理范围内。

参 考 文 献:

- [1] DL/T 5330-2005, 水工混凝土配合比设计规程[S]. (DL/T 5330-2005, Code for mix design of hydraulic concrete[S]. (in Chinese))
- [2] CECS 203: 2006, 自密实混凝土应用技术规程[S]. (CECS 203: 2006, Technical specifications for self compacting concrete application[S]. (in Chinese))
- [3] WALLEVIK O H, WALLEVIK J E. Rheology as a tool in concrete science: the use of rheographs and workability boxes[J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(12): 1279-1288.
- [4] 陈小成. 膨胀剂在高性能混凝土中的应用研究[J]. 科技信息, 2008(21): 101-103. (CHEN Xiao-cheng. Research of expanding agent application in high-performance concrete[J]. Science & Technology Information, 2008(21): 101-103. (in Chinese))
- [5] 陈春月. 试析混凝土膨胀剂的应用[J]. 水利规划与设计, 2008(6): 67-69. (CHEN Chun-yue. Attempting analysis of concrete expanding agent application[J]. Water Resources Planning and Design, 2008(6): 67-69. (in Chinese))
- [6] 陆采荣, 刘伟宝, 梅国兴, 等. 呼和浩特抽水蓄能电站水道系统钢管外回填微膨胀混凝土配合比及性能试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2008. (LU Cai-rong, LIU Wei-bao, MEI Guo-xing, et al. Experimental studies of mix proportion and performance of micro-expansion backfill concrete of outside waterway system pipe of Hohhot pumped storage power station [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2008. (in Chinese))
- [7] NEVILLE A M. 混凝土的性能[M]. 刘数华, 冷发光, 李新宇, 等, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (NEVILLE A M. Properties of concrete[M]. Translated by LIU Shu-hua, LENG Fa-guang, LI Xin-yu, et al. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese))
- [8] 李宁, 叶燕华, 杜艳静, 等. 膨胀剂掺量对自密实混凝土收缩性能的影响[J]. 建筑技术, 2011, 42(12): 1114-1117. (LI Ning, YE Yan-hua, DU Yan-jing, et al. Influence of expanding agent content on shrinkage performance of self-compacting concrete[J]. Architecture Technology, 2011, 42(12): 1114-1117. (in Chinese))

Experimental studies on preparation and uniaxial expansion simulation of back-fill micro-expansive self-compacting concrete(SCC)

LIU Wei-bao, LU Cai-rong, WANG Heng, MEI Guo-xing, GE Xue-liang, YANG Hu

(*State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: Pressure-balanced water tank is applied to balance the water pressure in concrete volute at a hydroelectric power station which has operated safely for decades. However, corrosion occurred in the tanks in these years. It is too difficult to repair and there is a safety problem in the power station. In order to study the feasibility of backfilling micro-expansion SCC as substitution for pressure water, experiments of preparation and performance have been carried out according to the design requirements. By adopting the site raw materials, mix parameters such as water-cement ratio and sand rate are determined by a series of fresh concrete tests and strength tests. The relationships between the dosage of swelling agent and deformation of concrete have been studied by restricted expansion experiments, autogenous volume deformation tests and uniaxial expansion experiments. The filling ability of this type of SCC is verified by rheological experiments and a simulative self-filling test. The mix proportion and the performance of backfilling micro-expansion SCC can provide a reference for relative researches and similar works of hydraulic engineering.

Key words: back-fill; micro-expansion; self-compacting concrete (SCC); concrete preparation; rheological properties; uniaxial expansion