DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2008.02.017

水工自密实混凝土试验

李克亮[1,2],李建平[3],王 永[3],程延川[4]

(1.河海大学材料科学与工程学院,江苏 南京 210098;2.南京水利科学研究院瑞迪高新技术公司,江苏 南京 210024;3.中国水利水电第三工程局施工研究所,陕西 安康 725011;4.克拉玛依市建筑规划设计有限公司,新疆 克拉玛依 834000)

摘要:试验研究了用于水电站压力钢管部位的自密实混凝土。配制了 3 个水胶比、2 个级配的 11 个配合比的自密实混凝土,试验分析它们的工作性能、力学性能、耐久性能和变形性能,在现场进行了 6 m^3 的生产性试验。配制的水工自密实混凝土不泌水,流动性好,初始坍落度在 250 ~ 258 mm 之间,坍扩度在 568 ~ 611 mm 之间。V 形漏斗、U 形箱试验和 J 形环试验证明:所配制的水工自密实混凝土具有较好的流动性、黏聚性、抗分离性和较强的钢筋通过能力。水工自密实混凝土抗渗等级和抗冻等级分别在 W10 和 F100 以上,极限拉伸值在 $0.83\times10^{-4}\sim1.03\times10^{-4}$之间;90 d 龄期的混凝土干缩率在 $5.10\times10^{-4}\sim8.21\times10^{-4}$之间。生产性试验中,水工自密实混凝土表面能够自动流平,具有较强的钢筋通过能力,并密实填充各个角落。推荐水胶比为 0.38、掺加 30% 粉煤灰和 20% 双掺料的二级配水工自密实混凝土用于景洪电站压力钢管部位。

关键词:自密实混凝土;力学性能;耐久性能;变形性能;生产性试验;水电站压力钢管部位;景洪电站

中图分类号:TU37 **文献标识码**:A **文章编号**:1006-7647(2008)02-0065-03

Experiments on hydraulic self-compacting concrete//LI Ke-liang[1,2], LI Jian-ping[3], WANG Yong[3], CHENG Yan-chuan[4]

(1. *College of Materials Science and Engineering*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*; 2. *R&D High Technology Co.*, *Nanjing Hydraulic Research Institute*, *Nanjing* 210024, *China*; 3. *Construction Research Department*, *Sinohydro Engineering Bureau* 3, *Ankang* 725011, *China*; 4. *Architecture planning and design Co.*, *Ltd. of Kelemayi*, *Kelemayi* 834000, *China*)

Abstract: Experimental study was performed on self-compacting concrete (SCC) near the pressure steel tube, with emphasis on its workability, durability, deformability and mechanical properties of SCC. Eleven mixing proportion specimens with 3 different water-binder ratios and 2 different gradations were included in this study. Based on laboratory tests, a productive test of 6 m^3 of SCC was carried out at the construction site. Without occurrence of any leakage, the initial slump and slump-flow of the fresh SCC vary from 250 mm to 258 mm and from 568 mm to 611 mm, respectively. V-shaped funnel test, U-shaped box test and J-shaped ring test prove that the SCC specimens are of good fluidity, cohesiveness, and anti-separation property, as well as a high ability to pass through reinforced bars. The permeation grade and freeze-thaw resistance of the SCC are W10 and above F100 respectively, while the ultimate tensile value and drying shrinkage ratio at 90 d range from 0.83×10^{-4} to 1.03×10^{-4} and 5.10×10^{-4} to 8.21×10^{-4}, respectively. In the productive test, the SCC can flow evenly and fill each corner densely. Based on a series of tests, a suitable kind of SCC, mixed with 30% fly ash and 20% double-admixture and with a water-binder ratio equaling 0.38 is recommended for the construction of Jinghong Hydropower Station.

Key words: self-compacting concrete; mechanical property; durability; deformability; productive test; the pressure steel tube site of hydropower station; Jinghong Hydropower Station

云南景洪电站是澜沧江梯级开发的水电站之一,装机容量 1 500 MW,其引水压力钢管底部有 3 层钢筋,钢筋量大且密集,如果按常规混凝土施工,难以实现密实填充,易出现"脱空"现象。在这种情形下,自密实混凝土较为适用。自密实混凝土是一种具有优良施工性能的高性能混凝土,流动性好,依靠自重在免振条件下即可自动填充钢筋密集或空间狭窄部位,实现密实性浇注。景洪电站中自密实混凝土设计强度等级为 90 d C25,抗渗等级为 W10,抗冻等级为 F100,极限拉伸值为 0.80×10^{-4}。本文通过室内试验和生产性试验,研究适用于水电站压力钢管部位的水工自密实混凝土。

1 原材料

试验采用云南普洱水泥厂生产的天壁牌 P·O42.5 级水泥,该水泥满足 GB 175—1999《硅酸盐

作者简介:李克亮(1973—),男,山东莒南人,工程师,硕士,从事混凝土新材料研究与开发工作。E-mail:klli@nhri.cn

水泥、普通硅酸盐水泥》[1]标准要求。粉煤灰由云南宣威发电粉煤灰有限责任公司生产，符合DL/T 5055—1996《水工混凝土掺用粉煤灰技术规范》[2]中Ⅰ级粉煤灰的要求，28 d活性指数为80.1%。双掺料由景洪恒信建材有限公司生产，由水淬铁矿渣粉和石灰岩粉按照1∶1(质量比)混掺，其需水量比为98.7%，28 d活性指数为76.8%。细骨料由天然砂和碾压砂复合而成，两者之间的质量比为8∶2，天然砂取自心滩料场，碾压砂则由天然砂与石灰岩粉混掺配制成。粗骨料为心滩料场生产的天然卵石，小石粒径为5～20 mm，中石粒径为20～40 mm。试验中采用南京水利科学研究院瑞迪高新技术公司生产的HLC-SWC高流态混凝土外加剂，以实现混凝土高流态化，并保持一定的塑性黏度。

2 混凝土配合比

与普通混凝土相比，自密实混凝土应具有较大的浆骨比、较大的砂率、较小的水胶比和掺用大量矿物掺合料。经过配合比设计，并经试拌，确定了11个水工自密实混凝土的配合比。水工自密实混凝土原材料用量见表1。4～6号配合比为一级配自密实混凝土，其他配合比为二级配混凝土。1号、4号、7～9号配合比的水工自密实混凝土的水胶比均为0.40，2号、5号和10号配合比的水工自密实混凝土的水胶比均为0.38，3号、6号和11号配合比的水工自密实混凝土的水胶比均为0.35。1～6号配合比的水工自密实混凝土中使用30%的粉煤灰。为了进一步降低混凝土绝热温升，7号、8号和9号配合比是在1号配合比的基础上掺加了20%，25%和15%的双掺料。10号和11号配合比分别在2号和3号配合比的基础上掺加20%的双掺料。

表1 水工自密实混凝土原材料用量 kg/m³

配合比编号	水	水泥	粉煤灰	双掺料	细骨料	中石	小石	外加剂
1	150	262	113		788	397	596	3.38
2	150	276	119		762	400	600	3.56
3	150	300	129		715	407	610	4.08
4	158	276	119		808		935	3.75
5	158	291	125		779		942	3.95
6	155	310	133		737		967	4.21
7	150	187	113	75	797	402	602	3.38
8	150	168	113	94	796	401	602	3.38
9	150	206	113	56	798	402	603	3.38
10	150	198	118	79	759	395	593	3.56
11	147	210	126	84	748	406	609	3.78

3 混凝土性能

3.1 拌和物性能

试验中测试了所配制的水工自密实混凝土的坍落度、坍扩度、泌水率、含气量，结果见表2。从表2中看出自密实混凝土拌和物的初始坍落度在250～258 mm之间，初始坍扩度在568～611 mm之间，混凝土坍落度和坍扩度2 h内的损失较小。混凝土含气量在4.9%～7.7%之间，有利于保证混凝土的流动性和抗冻性能。所配制的水工自密实混凝土的黏聚性良好，无泌水和离析现象出现。试验证明：所配制的水工自密实混凝土具有良好的流动性和合适的黏度。

表2 自密实混凝土拌和物性能指标

配合比编号	含气量/%	初始坍落度/mm	初始坍扩度/mm	2 h后坍落度/mm	2 h后坍扩度/mm
1	6.2	250	598	232	558
2	4.9	252	573	229	536
3	4.6	258	611	235	566
4	7.7	251	572	248	520
5	6.5	250	594	245	548
6	4.9	254	578	250	525
7	5.0	253	592		
8	4.8	255	588		
9	5.7	250	604		
10	5.5	250	568		
11	5.1	255	600		

注：1～11号配合比的水工自密实混凝土的泌水率均为0。

通过V形漏斗、U形箱和J形环试验，分析自密实混凝土的流动性、黏聚性、抗分离性和钢筋通过能力，试验方法参照CECS 203∶2006《自密实混凝土应用技术规程》[3]，试验结果见表3。V形漏斗出口的尺寸为120 mm，是最大卵石粒径的3倍。t_0和t_5是混凝土装满V形漏斗停留0 s和5 s后测试的流出时间，7号自密实混凝土的t_0为5.8 s、t_5为6.0 s，8号和9号自密实混凝土的t_0和t_5均为6.0 s。混凝土流出过程中没有发生堵塞现象。U形箱隔栅型障碍的钢筋间距比最大卵石粒径大10 mm，为50 mm。7号自密实混凝土的填充时间为10 s，充填高度为30 mm。J形环的钢筋间距为120 mm，是最大卵石粒径的3倍。使用J形环测试了7号、8号和9号水工自密实混凝土，坍扩度在590～626 mm之间，内外高差分别为38 mm，20 mm和25 mm，均小于最大卵石粒径(40 mm)。

表3 V形漏斗、U形箱和J形环试验结果

配合比编号	V形漏斗试验		U形箱试验		J形环试验	
	t_0/s	t_5/s	充填高度/mm	填充时间/s	内外高差/mm	坍扩度/mm
7	5.8	6.0	30	10	38	590
8	6.0	6.0			20	604
9	6.0	6.0			25	626

3.2 混凝土力学性能

标准养护至特定龄期，测试混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度、轴心抗压强度和弹性模量等力学指

标，结果见表 4。90 d 抗压强度在 29.6 ~ 62.7 MPa 之间，满足 C25 ~ C50 自密实混凝土的强度要求。90 d 劈裂抗拉强度在 2.38 ~ 4.70 MPa 之间。1 号、7 号、8 号和 9 号自密实混凝土中的总胶凝材料用量和水胶比相同，但抗压强度和劈裂抗拉强度随着双掺料的用量提高而降低。在所有二级配自密实混凝土 90 d 龄期的数据中，3 号自密实混凝土的力学性能指标值最高，8 号自密实混凝土的力学性能指标值最低；在所有一级配混凝土 90 d 龄期的数据中，6 号自密实混凝土的力学性能指标值最高，4 号自密实混凝土的力学性能指标值最低。

表 4　自密实混凝土的力学性能指标

配合比编号	抗压强度/MPa			劈裂抗拉强度/MPa		90 d 静压弹性模量/GPa	90 d 轴心抗压强度/MPa
	7 d	28 d	90 d	28 d	90 d		
1	25.3	37.2	43.2	2.60	3.27	29.1	24.4
2	26.0	37.9	48.7	2.65	4.11	33.2	32.7
3	27.5	42.5	62.7	2.89	4.70	38.6	38.0
4	20.5	34.8	48.8	2.52	3.73	26.9	25.2
5	22.4	38.1	52.3	2.92	3.91	30.3	28.0
6	26.1	42.3	59.3	3.25	4.46	33.6	29.4
7	9.5	25.4	32.7	2.11	2.66	32.8	23.5
8	9.9	20.2	29.6	1.54	2.38		
9	12.1	27.6	34.3	2.26	2.78		
10	15.5	27.5	39.9	2.14	3.12	33.2	25.6
11	21.4	34.5	47.2	2.42	3.68		

3.3　混凝土耐久性能

8 个配合比的自密实混凝土试件标准养护至 90 d，进行抗冻试验和抗渗试验。抗冻试验采用快速冻融法，混凝土质量损失率和相对动弹性模量见图1和图2。试验结果表明：100次冻融循环后，所有水工自密实混凝土的质量损失率都小于1.5%，相对动弹性模量都在 72%以上，抗冻等级都在 F100 以上。抗渗试验采用逐级加压法进行，试验结果显示所有的水工自密实混凝土的抗渗性能都较好，抗渗等级都在 W10 以上。

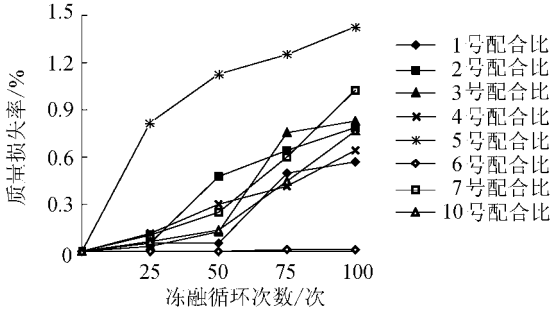

图 1　冻融试验中混凝土的质量损失率

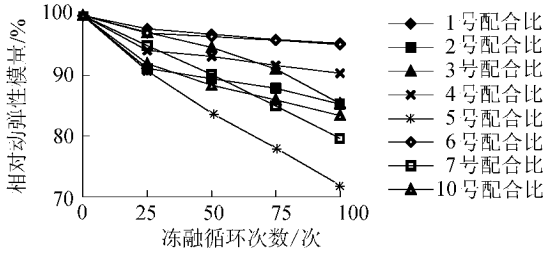

图 2　冻融试验中混凝土的相对动弹性模量

3.4　混凝土变形性能

8 个配合比的自密实混凝土试件标准养护至 90 d，进行极限拉伸试验，结果见表 5。试验结果表明：水工自密实混凝土的极限拉伸值都在 0.8×10^{-4}以上，满足设计要求。二级配水工自密实混凝土中，7 号混凝土的极限拉伸值最小，为 0.83×10^{-4}，2 号混凝土的极限拉伸值最大，为 0.99×10^{-4}；一级配水工自密实混凝土中，4 号混凝土的极限拉伸值最小，为 0.84×10^{-4}，5 号混凝土的极限拉伸值最大，为 1.03×10^{-4}。二级配水工自密实混凝土的轴心抗拉强度在 3.00 ~ 3.55 MPa 之间，一级配水工自密实混凝土的轴心抗拉强度在 2.68 ~ 3.61 MPa之间。

表 5　水工自密实混凝土的极限拉伸值和轴心抗拉强度

配合比编号	极限拉伸值/10^{-4}	轴心抗拉强度/MPa	配合比编号	极限拉伸值/10^{-4}	轴心抗拉强度/MPa
1	0.86	3.00	5	1.03	3.37
2	0.99	3.28	6	1.00	3.61
3	0.86	3.55	7	0.83	3.11
4	0.84	2.68	10	0.85	3.25

自密实混凝土成型 2 d 后拆模，送至干缩室测量初长，至规定龄期测定混凝土试件长度，计算干缩率。各龄期混凝土的干缩率见图 3。由图 3 可以看出，90 d 龄期的混凝土干缩率在 5.10×10^{-4} ~ 8.21×10^{-4}之间。自密实混凝土干缩率随着水胶比的减小而减小；二级配自密实混凝土的干缩率小于同水胶比的一级配自密实混凝土；双掺料的使用有利于降低混凝土的干缩率。7 号混凝土 90 d 龄期的自生体积变形为 -26.07×10^{-6}（是同龄期混凝土干缩率的 3.6%），线性膨胀系数为 9.436×10^{-6}℃$^{-1}$。

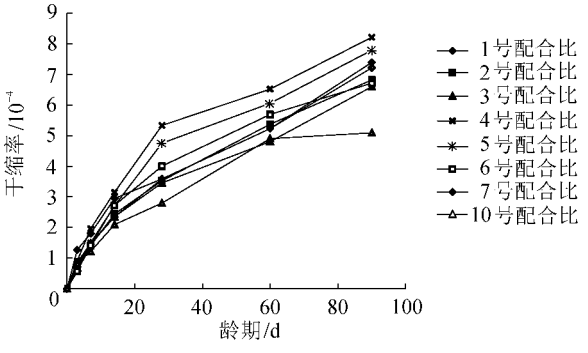

图 3　混凝土干缩率随龄期的变化

4　生产性试验概况

为验证所配制水工自密实混凝土（下转第75页）

渗渠道，以减少渗漏损失并保护渠坡的安全。

大型渠道可考虑采取防渗效果最好的混凝土防渗，断面形式采用复合梯形。小型渠道可采用 U 形混凝土防渗，因为 U 形渠近似于最佳水力断面，流速快、输水输沙能力强。

4.6 低山丘陵区

区域范围包括盱眙县的全部，以及赣榆县、东海县、新沂市、南京市郊、溧水县、高淳县、仪征市、扬州市郊、镇江市郊、句容市、金坛市、溧阳市、宜兴市等市县的部分地区。该区地貌类型比较复杂，以山、岗、丘为主，约占土地面积的 3/4。由于提引水不便，该区尚有 20% 的耕地缺少灌溉条件，是全省灌溉率最低的地区。渠道主要以土渠为主，防渗渠道长度占全部渠道的 9.3%。

实测资料分析表明，江苏省丘陵地区渠系输水损失中干支渠约占 70%，因此该区干支渠防渗应优先于田间渠系防渗。骨干渠道可考虑砌石防渗，小型渠道可采用混凝土 U 形防渗。该区属江苏省产业结构调整的重点区域，对地形较为复杂的灌区需因地制宜地发展低压管道灌溉和喷滴灌工程。

江苏省南北区域自然和经济条件差异很大，而渠系防渗技术又有一定的适宜范围，因此，要因地制宜，贯彻安全可靠、技术先进、效果持久、易于施工和方便管理的原则，科学论证，选择最适合本地区发展的防渗模式。

参考文献：

[1] 张展羽，吴玉柏. 渠系改造[M]. 北京：中国水利水电出版社，2004.

[2] 仇锦先. 关于灌区改造渠道防渗的几点思考[J]. 水利科技，2002(4)：20-22.

[3] 雷声隆，高峰. 灌区渠道防渗工程规划研究[J]. 灌溉排水学报，2003，22(4)：6-11.

[4] 李安国. 我国渠道防渗工程技术综述[J]. 防渗技术，2000，6(1)：1-5.

[5] 李学军，费良军，穆红文. U 形衬砌渠道冻胀机理与防渗技术研究[J]. 干旱地区农业研究，2006，24(3)：194-199.

[6] 戴玉凯. 论江苏省农村水利建设与发展[M]. 北京：中国水利水电出版社，1995：68.

[7] 张海燕，杜应吉，张金凯. 我国混凝土防渗渠道问题分析[J]. 水利水电科技进展，2004，24(6)：52-54.

[8] 吴玉柏，黄俊友，俞青荣，等. 几种新型防渗渠道防渗效果的测试[J]. 灌溉排水，2002，21(4)：35-39.

[9] 陶长生，蔡勇，程吉林. 基于可持续发展的江苏农村节水改造研究[J]. 灌溉排水，2001，20(2)：21-23.

[10] 郭相平，张展羽. 节水农业的潜力在哪里？[J]. 中国农村水利水电，2001(10)：13-14.

(收稿日期：2007-03-16　编辑：高建群)

(上接第 67 页)

在压力钢管部位应用的可行性，在室内试验的基础上，在景洪电站施工现场进行了 6 m^3 自密实混凝土的生产性试验。混凝土为长方体，尺寸为 3 m × 2 m × 1 m，底部有 2 层间距为 200 mm 的钢筋网。水工自密实混凝土采用 10 号配合比，水胶比为 0.38，掺加 30%粉煤灰和 20%双掺料。自密实混凝土从一个角落开始浇注，混凝土流动最远距离为 3.6 m。在没有任何振捣的情况下混凝土能够自动流平。拆模后发现离浇注口最远处的角落已被自密实混凝土密实填充。混凝土硬化一段时间后，从顶面钻芯取样，由芯样外观看，骨料在混凝土中分布均匀。测得该芯样的密度为2 300 kg/m^3，接近理论密度。生产性试验结果表明所配制的水工自密实混凝土具有优良的流动性和工作性能，适于在景洪电站压力钢管周围应用。

5 结　语

水电站压力钢管周围钢筋密集，空间狭窄，混凝土密实性浇注成为关键技术问题。自密实混凝土具有较好的流动性和黏聚性，在免振的条件下即可自动填充钢筋密集或空间狭窄的部位，适用于该类型部位进行密实性浇注。

配制的水工自密实混凝土流动性好，2 h 内的流动性损失较小；混凝土含气量在 4.8% ~ 7.7%之间，没有出现泌水和离析现象。所配制的水工自密实混凝土具有良好的流动性、黏聚性、抗离析性和较强的钢筋通过能力。混凝土抗压强度在 29.6 ~ 62.7 MPa 之间。水工自密实混凝土的抗渗等级和抗冻等级分别在 W10 和 F100 以上，极限拉伸值在 $0.83 \times 10^{-4} \sim 1.03 \times 10^{-4}$之间，满足设计要求。90 d 龄期的混凝土干缩率在 $5.10 \times 10^{-4} \sim 8.21 \times 10^{-4}$之间。

生产性试验中，在没有任何振捣情况下，水工自密实混凝土能够自动流平，狭窄角落能够填充密实。钻取的芯样密实，其骨料分布均匀。生产性试验结果证明所配制的水工自密实混凝土具有优良的工作性能，适于在景洪水电站压力钢管周围应用。

在系列试验研究的基础上，推荐水胶比为 0.38、掺加 30%粉煤灰和 20%双掺料的二级配水工自密实混凝土用于景洪电站压力钢管部位。

参考文献：

[1] GB 175—1999，硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥[S].

[2] DL/T 5055—1996，水工混凝土掺用粉煤灰技术规范[S].

[3] CECS 203：2006，自密实混凝土应用技术规程[S].

(收稿日期：2007-03-15　编辑：高建群)