

高抗冻混凝土的研究与应用

曹四伟¹,王正中¹,罗 岚²

(1 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;2 杨凌示范区开发建设有限公司,陕西 杨凌 712100)

【摘 要】 【目的】研制适用于西北寒冷地区水工高抗冻性混凝土。【方法】配制不同水灰比、外加剂(引气剂,减水剂)掺量和粉煤灰掺量的混凝土,对其进行抗压、抗拉强度和抗冻融试验,分析以上因素对混凝土抗冻性能的影响,以优化水灰比,外加剂和粉煤灰掺量。配制高抗冻混凝土并将其应用于工程实践中,测定其坍落度、含气量、抗压强度和抗冻性,验证该混凝土的实用性。【结果】在水胶比为 0.45 时,混凝土中加入 0.2 g/kg 引气剂、5.0 g/kg 减水剂和 200 g/kg 粉煤灰,其 28 d 抗压强度达到 33.8 MPa,抗冻次数 300 次。经工程实际应用验证,该混凝土实用性满足 C30F300 高抗冻混凝土要求。【结论】在水胶比为 0.45 时,向普通混凝土中加入 0.2 g/kg 引气剂、5.0 g/kg 减水剂和 200 g/kg 粉煤灰,其强度、抗冻耐久性完全能满足高抗冻混凝土要求,适用于西北寒冷地区水电工程建设。

【关键词】 抗冻混凝土;外加剂;掺量;抗冻耐久性

【中图分类号】 TV431+.9 【文献标识码】 A 【文章编号】 1671-9387(2008)03-0223-05

Research and application of high frost-resistance concrete

CAO Si-wei¹, WANG Zheng-zhong¹, LUO Lan²

(1 College of Water Resource and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2 Development and Construction Co. Ltd of Yangling Demonstration Zone, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 This study is to acquire high frost-resistance concrete used in cold northwest areas. 【Method】 This paper macroscopically analyzes the capabilities (compressive, tensile strength and frostresisting property) of concrete with different W/C ratios and admixtures. Aiming to acquire high frost-resistance concrete, the research not only optimizes the volume of admixtures and fly ash, but also provides a good mix proportion of high frost-resistance concrete. Through measuring the slump, air content, strength and frost-resistance ability of this concrete, the paper testifies its practicabilities for application in hydraulic engineering. 【Result】 The study consequence revealed that, based on the W/C ratio 0.45, added 0.2 g/kg air entraining admixture, 5.0 g/kg water reducing admixture and 200 g/kg fly ash, the concrete has good compressive strength capability 33.8 MPa, high frost-resistance ability 300 times. Through testing application of this concrete in hydraulic engineering, the practicabiliyies satisfy the demands of concrete C30F300. 【Conclusion】 With the W/C ratio 0.45, adding 0.2 g/kg air entraining admixture, 5.0 g/kg water reducing admixture and 200 g/kg fly ash into ordinary concrete, its strength and frost-resistance abilities fully satisfy the requirement of high frost-resistance concrete which is applicable in the construction of hydraulic engineering in northwest cold area.

Key words: frost-resistance concrete; admixture; volume; durability of frost-resistance

西北寒冷地区,年平均冰冻期长,昼夜温差大, 为保证水电工程质量,所用水工混凝土必须具备良

* [收稿日期] 2007-06-14
[作者简介] 曹四伟(1976—),男,河南漯河人,工程师,在读硕士,主要从事水利工程建筑材料研究。

好的抗冻性能。1985 年原水电部组织的全国性水工混凝土病害调查结果^[1]显示,水利工程混凝土冻融破坏是我国北方地区水利工程建设的突出问题之一,而西北地区的混凝土冻融破坏问题尤其严重。青海省某装机容量为 $3\times 500\text{ kW}$ 的水电站^[2]地处高原大陆气候区,多年平均气温在零度以下,最低温度 $-31.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。因为工程原设计和施工对混凝土抗冻指标考虑不足,致使电站建成后运行不到 2 年,就因多部位混凝土发生严重冻融破坏而致使整个工程陷入瘫痪,给当地造成巨大经济损失和社会负面影响。因此,在西北地区提高混凝土的抗冻性,对保证水电工程运行安全尤为重要。

目前,对高抗冻混凝土的研究大多是以高强混凝土(强度等级在 C50 或 C60 以上)为基础,通过对其进行改性来达到提高抗冻性能的目的。一般来讲,这种混凝土多采用较小水灰比(一般不大于 0.30),混凝土中不仅要掺入高效引气剂和减水剂,还需加入超细硅粉或其他优质矿物质掺料,而且对所用粉煤灰的质量要求较高,必须达到 I 级标准^[3-4]。也有人用低热、高强度且孔隙率低的第二、

三系列水泥,如铁铝水泥或贝利特低热硅酸盐水泥替代普通硅酸盐水泥配制高抗冻混凝土^[1],但由于这种高抗冻混凝土造价较高,大多还处于试验阶段,导致其实际推广应用受到限制。另外,西北地区经济落后,且待建的水电工程大多属中、小型水电工程,这类工程对混凝土强度等级的要求相对较低,但却对混凝土的抗冻等级要求很高,因此急需配制成本较低、抗冻耐久性较好的混凝土来满足工程建设要求。为此,本研究配制不同水灰比、外加剂(引气剂,减水剂)和粉煤灰掺量的混凝土进行抗压、抗拉强度和抗冻试验,分析各种因素对混凝土抗冻性能的影响,并对水灰比和外加剂、粉煤灰掺量进行了优化选择,以期为高抗冻混凝土的配制及相关工程的建设 and 安全运行提供参考和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材 料

1.1.1 水 泥 水泥为拉萨牌 42.5R 普通硅酸盐水泥,所检的各项指标满足 GB175—1999 要求,见表 1。

表 1 拉萨牌 42.5R 普通硅酸盐水泥的性能指标

凝结时间/min Setting time		抗压强度/MPa Compressive strength		抗折强度/MPa Bending strength		细度/% Fineness	安定性(沸煮法) Soundness (Boiling)
初凝 Initial setting	终凝 Final setting	3 d	28 d	3 d	28 d		
150	260	30.4	58.5	6.3	8.8		
						8.8	合格 Regular

1.1.2 骨 料 粗骨料采用粒径 5~20 mm 和 20~40 mm 2 种河卵石,比重 2.68 g/cm^3 ,试验确定 2 种粗骨料最佳掺配比例 1:1(质量比),最大堆积密度为 $1\,680\text{ kg/m}^3$,混合后粗骨料颗粒组成符合 5~40 mm 连续级配标准要求;细骨料为河砂,细度模数为 2.56,比重为 2.63 g/cm^3 ,含泥量为 1.2 g/kg 。骨料各项指标满足 DL/T 5144-2001^[5]要求。

1.1.3 外加剂和掺合料 引气剂选用咸阳安峡外加剂厂的 CRS 复合引气剂,其推荐掺量为 0.1~0.3 g/kg;减水剂选用咸阳宏达外加剂厂的 FDN 高效减水剂,推荐掺量为 5~10 g/kg;粉煤灰采用渭河热电厂的 II 级粉煤灰。

1.1.4 水 水为清洁自来水。

1.2 试验方法

由于混凝土的抗冻性与水灰比、含气量以及强度有关^[6],因此本试验主要通过在不同水灰比及掺加不同比例的引气剂、减水剂和粉煤灰情况下,分析混凝土的抗冻性和强度差异,从而筛选出高抗冻混凝土的最佳水灰比和外加剂掺量,混凝土的抗冻和强度等

试验依据现行相关规范进行。

1.2.1 水灰比的确定 有资料表明,高抗冻要求的混凝土含气量应为 $4\%\sim 6\%$ ^[7-8]。因此,本研究首先从提高混凝土的含气量入手,引气剂掺量取其推荐量的上限 0.3 g/kg ,控制坍落度在 50~70 mm,拌制水灰比分别为 0.40,0.45,0.50,0.55 的混凝土,研究不同水灰比对混凝土抗冻性和强度影响,筛选最佳水灰比。试验中混凝土配合比见表 2。

1.2.2 引气剂掺量的确定 引气剂过多不但会引起混凝土强度降低,而且会导致混凝土抗冻性减弱^[9]。因此在确定水灰比的基础上,本研究对引气剂的掺量进行了筛选,在引气剂掺量分别为 0.10,0.15,0.20,0.25,0.30 g/kg 情况下拌制混凝土,研究不同引气剂掺量对混凝土抗冻性能和强度的影响,选出最佳引气剂掺量。

1.2.3 减水剂掺量的确定 在上述试验的基础上,拌制减水剂掺量分别为 2.5,5.0,7.5,10.0 g/kg 的混凝土,研究减水剂掺量对混凝土抗冻性能和强度的影响。

表 2 引气剂掺量为 0.3 g/kg 时不同水灰比混凝土的配合比

Table 2 Different W/C ratios mix proportion of concrete based on the volume 0.3 g/kg of air entraining admixture						
水灰比 W/C ratio	砂率/% Sand rate	引气剂/(kg·m ⁻³) Air entraining admixture	水/(kg·m ⁻³) Water	水泥/(kg·m ⁻³) Cement	细骨料/(kg·m ⁻³) Fine aggregate	粗骨料/(kg·m ⁻³) Coarse aggregate
0.40	30	0.113	150	375	578	1 348
0.45	30	0.093	150	311	600	1 400
0.50	30	0.084	140	280	609	1 422
0.55	30	0.076	140	255	616	1 438

1.2.4 粉煤灰掺量的确定 通过对引气剂和减水剂掺量的研究,得到满足高抗冻要求的混凝土配合比,但由于该配比水泥用量和强度偏大,导致工程的投资增加,带来不必要的浪费;另外水工混凝土为大体积浇筑,水泥用量太大,过量的水泥水化热会引起混凝土温控裂缝,给工程质量带来负面影响。为避免以上问题,本研究进一步分析了加入 100,200,300 g/kg粉煤灰对高抗冻混凝土性能影响,筛选满足 C30F300 混凝土要求的最佳粉煤灰掺量。

2 结果与分析

2.1 水灰比对混凝土抗冻性能的影响

混凝土的抗冻性不仅与混凝土强度有关,且受到混凝土含气量的直接影响^[10],因此对于有抗冻要求的混凝土其含气量要求较高。由 3 可知,掺加 0.30 g/kg 引气剂,混凝土的含气量普遍较高;混凝土的强度(抗压强度和抗拉强度)随着水灰比的增大而逐渐降低;水灰比为 0.40 的混凝土含气量为

4.7%,最大抗冻次数仅为 225 次;水灰比为 0.50 和 0.55 的混凝土最大抗冻次数不足 225 次;而水灰比为 0.45 的混凝土抗冻次数超过 225 次(此时失重率仅为 3.4%,相对动弹模量为 87.1%)。由以上结果可知,高抗冻混凝土的最优水灰比为 0.45。

2.2 引气剂掺量对混凝土抗冻性能的影响

由表 4 可知,混凝土的含气量随着引气剂掺量的增加而增大;当引气剂掺量由 0.10 g/kg 增加到 0.20 g/kg,混凝土抗冻次数随着引气剂掺量的增加而增多,由 200 次增大到了 250 次;引气剂掺量由 0.20 g/kg 增加到 0.30 g/kg,混凝土抗冻次数随着引气剂掺量的增加而减少,由 250 次降低到 200 次。这是因为随着引气剂掺量的增加,混凝土内部不规则气泡随之增多,这些气泡对混凝土的强度尤其抗拉强度产生了负面影响,进而引起混凝土抗冻性下降。因此在不加其他外加剂情况下,水灰比为 0.45 的混凝土抗冻性能最佳的引气剂掺量为 0.20 g/kg。

表 3 引气剂掺量为 0.30 g/kg 时不同水灰比对混凝土性能的影响

Table 3 Effects of different W/C ratios on concrete capabilities based on the volume 0.30 g/kg of air entraining admixture												
水灰比 W/C ratio	坍落度/ mm Slump	含气量/% Air content	28 d 强度/MPa R ₂₈ strength		不同冻融次数的动弹模量/% Elastic module of different freezing-thawing cycles				不同冻融次数的失重率/% Mass loss rate of different freezing-thawing cycles			
			抗压强度 Compressive strength	抗拉强度 Tensile strength	50	100	200	225	50	100	200	225
0.40	70	4.7	38.8	3.7	94.3	89.8	82.2	69.7	0.8	1.5	3.9	4.7
0.45	75	5.1	36.5	3.3	95.5	92.1	90.3	87.1	0.5	1.0	2.8	3.4
0.50	65	4.5	34.3	3.0	94.4	90.8	80.3	70.4	1.8	2.6	4.8	6.1
0.55	60	4.2	31.5	2.7	93.9	88.4	76.8	—	3.2	4.7	5.8	—

表 4 不同引气剂掺量对混凝土性能的影响

Table 4 Effects of different volumes of air entraining admixture on concrete capabilities							
引气剂掺量/ (g·kg ⁻¹) Volume of air entraining admixture	坍落度/mm Slump	含气量/% Air content	28 d 强度/MPa R ₂₈ strength		最大冻融次数 Max number of freezing-thawing cycle	弹性模量/% Elastic module	失重率/% Mass loss rate
			抗压强度 Compressive strength	抗拉强度 Tensile strength			
0.10	55	3.6	44.4	4.1	200	89.6	3.9
0.15	55	4.0	41.6	3.9	225	83.7	4.1
0.20	65	4.5	38.5	3.6	250	85.1	4.6
0.25	70	4.7	37.0	3.4	225	85.4	4.4
0.30	75	5.1	36.5	3.3	225	84.1	4.5

2.3 减水剂掺量对混凝土抗冻性能的影响

混凝土的抗冻性不仅与含气量有关,而且与混凝土的强度和水灰比也有直接的关系^[11],同类混凝土水灰比越小,强度越高,混凝土的抗冻性越好。有研究表明,混凝土达到 28 d 龄期时,水泥水化用水量仅为水泥量的 20%^[12],而多余水分大多以游离状态存在于混凝土的孔隙中,给混凝土的抗冻性构成威胁。因此,降低水灰比、减少用水量可以减少混凝土空隙中游离态的水分,提高混凝土的抗冻性能。据 2.2 节的研究结果可知,水灰比为 0.45,掺入 0.20 g/kg 的引气剂后,如果要达到抗冻等级 F300 目标,可以采用降低水灰比的方法。降低水灰比有保持用水量不变加大水泥用量,或水泥用量不变减少用水量 2 种办法。前者因为水泥需水比一定,水泥用量增加,用水量也会随之增加,因此很难达到降低水灰比的目的,且会加大建设成本,一般不宜采用,后者为提高混凝土的抗冻性能的可行方法。加入减水剂是减少混凝土用水量最简单有效的措施,

其能在水泥量不变情况下减少用水量,从而达到降低水灰比的目的,起到提高混凝土抗冻性能的作用。

由表 5 可知,在水泥用量保持不变时,加入减水剂可减少用水量,混凝土实际水灰比降低;在引气剂掺量一定时,减水剂掺量对混凝土含气量的影响不大,但混凝土的强度随着减水剂掺量的增加逐渐增大。当减水剂掺量由 0 g/kg 增加到 5.0 g/kg 时,混凝土的抗压强度由 38.5 MPa 增大到 41.0 MPa,抗冻次数由 250 次提高到 300 次;之后随着减水剂掺量的增大,混凝土的强度虽然也在缓慢增大,但混凝土的最大抗冻次数却没有增加。这是因为加入减水剂后,用水量减少,混凝土的密实性增加,内部游离态的水分含量降低,从而提高了混凝土的强度和抗冻性,但因为减水剂的减水程度有限,当其掺量达到一定量时,水量减少就很困难,所以抗冻次数不再增加。由此选定减水剂的最佳掺量为 5.0 g/kg,此时混凝土强度达 41.0 MPa,已远超过设计 C30 要求。

表 5 不同减水剂掺量对混凝土性能的影响

Table 5 Effects of different volumes of water reducing admixture on concrete capabilities

减水剂掺量/ (g·kg ⁻¹) Volume of water reducing dmixture	水灰 比 W/C ratio	坍落度/mm Slump	含气量/% Air content	28 d 强度/MPa R ₂₈ strength		最大冻融次数 Max number of freezing-thawing cycle	弹性模量/% Elastic module	失重率/% Mass loss rate
				抗压强度 Compressive strength	抗拉强度 Tensile strength			
0	0.45	65	4.5	38.5	3.6	250	85.1	4.6
2.5	0.42	60	4.5	39.7	3.7	250	94.3	2.8
5.0	0.38	60	4.7	41.0	4.0	300	91.4	3.9
7.5	0.38	65	4.4	43.4	4.4	300	85.6	3.1
10.0	0.38	65	4.1	43.7	4.4	300	95.8	2.1

2.4 粉煤灰掺量对混凝土抗冻性能的影响

有抗冻要求的混凝土可以掺加质量符合 GBJ146—90 标准的Ⅰ、Ⅱ级粉煤灰,且其掺量一般

不超过胶凝材料总质量的 30%^[13]。粉煤灰的适量掺入可以改善混凝土的和易性,降低水泥水化热,保证工程质量,并可以减少工程建设投资。

表 6 不同粉煤灰掺量对混凝土性能的影响

Table 6 Effects of different volumes of fly ash on concrete capabilities

粉煤灰掺量/ (g·kg ⁻¹) Volume of fly ash	水灰比 W/C ratio	坍落度/mm Slump	含气量/% Air content	28 d 强度/MPa R ₂₈ strength		最大冻融次数 Max number of freezing-thawing cycle	弹性模量/% Elastic module	失重率/% Mass loss rate
				抗压强度 Compressive strength	抗拉强度 Tensile strength			
0	0.38	60	4.7	41.0	4.0	300	91.4	3.9
100	0.42	65	4.6	37.3	3.6	300	90.3	2.7
200	0.47	65	4.5	33.8	3.4	300	87.6	3.6
300	0.54	70	3.0	25.6	2.7	200	84.3	3.0

在保持总的胶凝材料用量不变情况下,粉煤灰替代部分水泥加入混凝土后,因为其需水量比小于水泥需水量比,所以混凝土坍落度有所增加;且因水泥用量减少,水胶比不变,实际水灰比增大。由表 6 可知,混凝土的含气量和强度均随着粉煤灰掺量的

增大而降低,这是因为粉煤灰中未燃尽的部分活性炭颗粒可吸附一定量的外加剂,从而减弱了外加剂的作用效果,但在一定的范围内粉煤灰对混凝土的抗冻性能影响不大。结果表明,当粉煤灰的掺量增加到 200 g/kg 时,水胶比保持 0.45,水灰比增大到

0.47,混凝土的抗压强度达到 33.8 MPa,最大抗冻融次数 300 次,能够满足高抗冻混凝土要求。由此可知,高抗冻混凝土粉煤灰的掺量宜为 200 g/kg。

3 工程应用

利用所选水灰比和优化后的外加剂及粉煤灰掺量,配制高抗冻混凝土用于青海某水电站工程^[2]的重建,在浇筑过程中,多次测量新拌混凝土的含气量

和坍落度,结果显示含气量平均为 4.5%,坍落度平均 65 mm,经 500 m 运输,含气量和坍落度几乎没有损失。采用现场取样法(取样方式 1)和混凝土钻芯取样法(取样方式 2)^[12]对该混凝土抗压强度及抗冻耐久性进行检测,结果见表 7。表 7 表明,在保证正常施工技术的条件下,混凝土的强度及抗冻性符合该地区工程耐久性设计的要求。

表 7 高抗冻混凝土的性能检测结果

Table 7 Capabilities of high frost-resistance concrete

取样方式 Sampling mode	28d 抗压强度/MPa R ₂₈ compressive strength	最大抗冻次数 Max number of freezing-thawing cycle	弹性模量/% Elastic module	失重率/% Mass loss rate
1	35.4	300	86.6	3.9
	36.2	300	80.3	3.7
	35.9	300	80.8	4.1
2	34.5	300	75.8	4.3
	34.9	300	78.4	4.2

4 结 论

- 1)在不掺入其他矿物质掺料条件下,掺入适量的高效减水剂和引气剂,也能配制出高抗冻混凝土。
- 2)引气剂和减水剂皆能改善和提高混凝土抗冻性能,但仅掺入一种外加剂并不能达到目的,只有对 2 种外加剂的掺量优化选择后,通过 2 种外加剂的复合作用,才能够提高混凝土的抗冻性。
- 3)C30F300 高抗冻混凝土配合比为:水胶比 0.45(水灰比 0.47),引气剂掺量 0.2 g/kg,减水剂掺量 5.0 g/kg,粉煤灰掺量 200 g/kg。此混凝土既能保证抗冻耐久性要求,又经济实惠,易于推广。

[参考文献]

[1] 李金玉,曹建国.水工混凝土耐久性研究和应用[M].北京:中国电力出版社,2004:52-150.

Li J Y,Cao J G. Research and application of concrete durability in hydraulic engineering[M]. Beijing: Electric Power Press of China,2004:52-150. (in Chinese)

[2] 曹四伟,马少军.寒冷地区水工混凝土的冻害及防治对策[J].水利与建筑工程学报,2004,8(4):56-58.

Cao S W,Ma S J. Frost and prevention of hydraulic concrete in cold zone [J]. Journal of Water Resource and Architectural Engineering,2004,8(4):56-58. (in Chinese)

[3] 朋改非,高 日.高抗冻(F300)的 C50 和 C60 混凝土试验研究[J].铁道科学与工程学报,2004,2(1):14-18.

Peng G F,Gao R. An experimental investigation of concrete characterized by high frost resistance of F300 and strength grade C50 and C60[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2004,2(1):14-18. (in Chinese)

[4] Lydon F D. Effect of coarse aggregate on relative permeability of concrete [J]. Construction and Building Materials,1994,8:

3-6.

[5] 中国国家经济贸易委员会.水工混凝土施工规范 DL/T 5144—2001[S].北京:中国电力出版社,2002.

Econorny and Tracle Council of China. Construction code for hydraulic concrete DL/T 5144-2001[S]. Beijing:Electric Power Press of China,2002. (in Chinese)

[6] Ewertson C. The influence of curing conditions on the permeability and durability of concrete,result from a field exposure test [J]. Cement and Concrete Research,1993,23:683-684.

[7] 梁文泉,骆翔宇,何金荣,等.大掺量引气剂混凝土在高寒干燥地区的抗冻性研究 [J].混凝土,2005,183:27-32.

Liang W Q,Luo X Y,He J R,et al. Frost resistance of high volume of air-entraining agents in the frosty and dry area [J]. Concrete,2005,183:27-32. (in Chinese)

[8] 熊大玉,王小红.混凝土外加剂[M].北京:化学工业出版社,2003.

Xiong D Y , Wang X H. Concrete admixture [M]. Beijing: Chemical Industry Press of China,2003. (in Chinese)

[9] 李金玉,曹建国,林 莉,等.水工混凝土耐久性研究的新进展[J].水利发电,2001,4:44-47.

Li J Y,Cao J G,Lin L,et al. New development of the study on hydraulic concrete durability [J]. Water Power,2001,4:44-47. (in Chinese)

[10] 李亚杰.建筑材料 [M].北京:中国水利水电出版社,2004.

Li Y J. Construction materials [M]. Beijing: Water Conservancy and Hydroelectric Power Press of China,2004. (in Chinese)

[11] 李金玉,彭小平,邓正刚,等.混凝土抗冻性的量化设计[J].混凝土,2000,9(134):61-65.

Li J Y,Peng X P,Deng Z G,et al. Quantitative design on the frost-resistance of concrete[J]. Concrete,2000,9(134):61-65. (in Chinese)