DOI：10.7672/sgjs2022140010

广西防城港核电站高强度混凝土配合比设计*

赵志强,刘　军,刘　康,汪宇雄,荆　锐
(中国建筑第二工程局有限公司,北京　100160)

[摘要]“华龙一号”核岛项目具有建设周期和设计使用年限长的特点,对结构混凝土抗裂性、耐久性、工作性的要求尤为严格,稳定性是核岛项目高性能混凝土研制的基石。依据混凝土核电技术要求,从原材料精品控制开始,结合耐久性要求,进行基准配合比的筛选及确定,通过实验室试配、上机搅拌、泵送试验及混凝土性能测试,最终确定和优选混凝土配合比。实践表明,采用的配合比方案完全满足设计和质量要求。

[关键词] 核电站;高强度;混凝土;配合比;试验;耐久性
[中图分类号] TM623　　[文献标识码] A　　[文章编号] 2097-0897(2022)14-0010-03

Mix Proportion Design of High Strength Concrete for Guangxi Fangcheng Port Nuclear Power Plant

ZHAO Zhiqiang, LIU Jun, LIU Kang, WANG Yuxiong, JING Rui
(*China Construction Second Engineering Bureau Co., Ltd., Beijing*　100160, *China*)

Abstract: Hualong No.1 Nuclear Island project has the characteristics of long construction period and design service life, and has particularly strict requirements on the crack resistance, durability and workability of structural concrete. Stability is the cornerstone of the development of high-performance concrete for the nuclear island project. According to the technical requirements of concrete nuclear power, starting from the quality control of raw materials and in combination with the durability requirements, the benchmark mix proportion is screened and determined, and the concrete mix proportion is finally determined and optimized through laboratory trial mixing, machine mixing, pumping test and concrete performance test. The practice shows that the scheme of mix proportion adopted meets the requirement of design and quality.

Keywords: nuclear power plant; high strength; concrete; mix proportion; testing; durability

1　工程概况

目前,在建广西防城港核电站二期 3,4 号机组采用目前最先进的具有我国自主知识产权的“华龙一号”核电技术,主要为钢筋混凝土墙板结构,基础形式为筏基,全厂混凝土用量约为 87 万 m^3。以筏基混凝土为例,强度等级为 C40,根据实际水泥选用,混凝土中掺合料总量≤40%,设计要求 CI^- 含量≤胶凝材料总量的 0.08%,SO_3 含量≤胶凝材料总量的 4%,混凝土中的碱含量≤3kg/m^3,28d 龄期抗氯离子扩散系数≤7,56d 龄期抗氯离子扩散系数≤4。

2　混凝土原材料及测试方法

通过分析技术规格书、国内相关标准提出混凝土技术指标要求,建立针对核电混凝土的质量保障体系,包括原材料质量、混凝土生产质量、混凝土施工质量。

对所用原材料进行调研、选择,以满足技术规格书(BTS)的要求,同时对原材料矿物组成技术指标要求、生产技术措施、场外储运过程中性能保障及技术措施等做好管控。

2.1　原材料

为保证研究成果具有代表性,所用原料(除拌合水外)均与现场保持一致,如表 1 所示。其中,水泥和粉煤灰化学组成如表 2 所示。

2.2　测试方法

1)混凝土试块成型　采用卧轴式 60L 混凝土

* 中国建筑股份有限公司资助项目(CSCEC-2017-Z-23);中国建筑第二工程局有限公司资助项目(CSCEC2B-2017-K-01)
[作者简介] 赵志强,助理工程师,E-mail:1045940576@qq.com
[收稿日期] 2022-05-05

表 1　试验用原材料

类别	水泥	粉煤灰	机制砂	碎石	减水剂	水化热抑制剂(TRI)
型号	P·II 42.5	F 类、II 级	中砂	5~16, 16~25mm	高效减水剂(PCA® -I)	—

表 2　水泥与粉煤灰化学组成　%

类别	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	TiO_2
水泥	20.82	7.35	3.68	58.23	4.51	0.84	0.50	2.81	0.40
粉煤灰	49.95	34.85	4.47	3.74	1.03	2.01	1.16	0.01	1.30

搅拌机拌制混凝土。混凝土拌合物出机时的坍落度为(200±20)mm。制作尺寸为 100mm×100mm×100mm,300mm×100mm×100mm,515mm×100mm×100mm 的试块,分别用于混凝土抗压强度、弹性模量和干燥收缩试验。成型后的混凝土试件立即覆盖塑料薄膜,在室温下养护 1d 后拆模,然后在温度(20±2)℃、相对湿度 95%的养护室内养护至规定龄期。

2)混凝土单轴抗压强度测试　采用济南试金 2 000kN 抗压性能试验机,试块尺寸为 100mm×100mm×100mm,加荷速度为 0.45MPa/s。

3　高强度混凝土配合比设计

项目中大体积混凝土筏基浇筑面临材料内部温度变化引发的开裂风险,同时该筏基混凝土又使用了大掺量矿物掺合料。因此,需在现场施工前进行试验研究。

3.1　混凝土配合比初选

3.1.1　正交试验设计

为给出满足施工现场要求且早期放热量较小的混凝土配合比,需将多个关键取值设置为变量,通过测试样品混凝土强度确定各变量。设置的变量包括水胶比、单方胶材用量及粉煤灰占比。为提高试验效率,引入正交试验法。为分析各因素对混凝土强度影响的显著程度,引入空白因素项,因此,在正交试验设计中,共设置 4 个因素。各因素水平取值如表 3 所示。

表 3　配合比设计正交试验中各因素水平取值

水平	水胶比(因素 A)	单方胶材用量(因素 B)/(kg·m^{-3})	粉煤灰占比(因素 C)/%
1	0.40	415	50
2	0.38	395	45
3	0.36	375	40

根据各项因素和水平的设置结果,选取 L9(34)正交试验表安排试验(见表 4),据此得到试验用混凝土配合比(见表 5)。

正交试验中需先对各变化因素给定若干取值水平。为获得各因素取值水平的大致范围,依据

表 4　正交试验设计

编号	因素水平 A	B	C	空白	组合	水胶比	单方胶材用量/(kg·m^{-3})	粉煤灰占比/%
1	1	1	1	1	$A_1B_1C_1$	0.40	415	50
2	1	2	2	2	$A_1B_2C_2$	0.40	395	45
3	1	3	3	3	$A_1B_3C_3$	0.40	375	40
4	2	1	2	3	$A_2B_1C_2$	0.38	415	45
5	2	2	3	1	$A_2B_2C_3$	0.38	395	40
6	2	3	1	2	$A_2B_3C_1$	0.38	375	50
7	3	1	3	2	$A_3B_1C_3$	0.36	415	40
8	3	2	1	3	$A_3B_2C_1$	0.36	395	50
9	3	3	2	1	$A_3B_3C_2$	0.36	375	45

表 5　各试验组配合比　kg·m^{-3}

编号	水	水泥	粉煤灰	砂	碎石	高效减水剂
1	162.0	207.5	207.5	813.2	993.9	6.23
2	154.3	217.3	177.8	825.8	1 009.3	5.93
3	146.4	225.0	150.0	838.4	1 024.7	5.63
4	153.8	228.3	186.8	816.9	998.4	6.23
5	146.3	237.0	158.0	829.3	1 013.6	5.93
6	138.9	187.5	187.5	841.7	1 028.8	5.63
7	145.4	249.0	166.0	820.6	1 003.0	6.23
8	138.4	197.5	197.5	832.9	1 017.9	5.93
9	131.5	206.3	168.8	845.1	1 032.9	5.63

JGJ 55—2011《普通混凝土配合比设计规程》(以下简称“《规程》”),结合预设的强度等级要求和大体积混凝土特性,对配合比进行预设计,并根据预设计结果确定各因素取值水平(见表 3)。需指出的是,粉煤灰占比在依据《规程》的计算基础上,依据 GB 50496—2018《大体积混凝土施工标准》进行适当增加。其目的是通过正交试验了解粉煤灰在大掺量情况下对混凝土多个性能的影响。

3.1.2　正交试验结果

依据正交试验方案进行试验,并对各试验组 3,7,28,60d 强度分别进行测试。由于试验采用的是 100mm×100mm×100mm 非标准试块,所测强度依照 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》的规定,乘以 0.95 进行折算,得到标准抗压强度值(见表 6)。

从试验结果可以看出,对于 3,7d 抗压强度,试验组 7 性能最好,对应的各因素取值为:水胶比 0.36,单方胶材用量 415kg,粉煤灰占比 40%。而对于 28,60d 抗压强度,试验组 5 性能最好,对应因素取值为:水胶比 0.38,单方胶材用量 395kg,粉煤灰占比 40%。

表 6 正交试验测试结果

编号	因素				3d 抗压强度/MPa	7d 抗压强度/MPa	28d 抗压强度/MPa	60d 抗压强度/MPa
	A	B	C	空白				
1	1	1	1	1	18.2	23.3	35.0	44.8
2	1	2	2	2	19.6	27.7	41.3	45.1
3	1	3	3	3	24.4	30.5	42.9	48.1
4	2	1	2	3	21.4	26.3	40.0	49.0
5	2	2	3	1	26.3	31.8	44.6	55.1
6	2	3	1	2	21.5	25.2	38.5	49.0
7	3	1	3	2	26.8	33.0	42.6	54.2
8	3	2	1	3	23.0	28.5	39.2	50.7
9	3	3	2	1	24.8	30.9	41.7	52.5

根据工程要求,混凝土强度等级应达 C40。以 60d 龄期为验收标准,平均抗压强度应>48.23MPa,对比表 6 中 60d 龄期强度数据,4~9 组均达到 C40 强度等级要求。各龄期下试样的各因素水平对应的 k_i 值如图 1 所示。k_i 表示某因素第 i 个水平对抗压强度的有利程度。同时,由 k_i 极差 R 可知,混凝土在 28d 龄期前,影响混凝土强度最主要的因素为粉煤灰占比,其次是水胶比;而当龄期达 60d 后,影响强度的最主要因素为水胶比,其次为粉煤灰占比,单方胶材用量 R 值小于空白项 R 值,说明单方胶材用量对强度的影响可忽略不计。

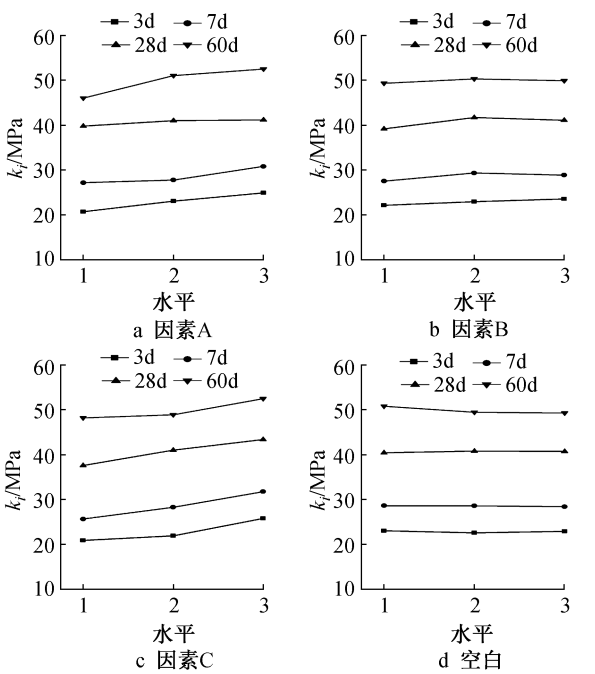

图 1 各因素不同水平对应的 k_i 值

找出各因素最大 k_i 值,便可得到对混凝土强度最有利的水平取值组合。若以混凝土后期强度为主要评估准则,强度最有利水平组合应取 A3B2C3,即水胶比 0.36,单方胶材用量 395kg,粉煤灰占比 40%。此配合比并未出现在正交试验中,但其对应的力学性能要优于直接从试验结果中选出的试验组 7,5。在后续补充的验证试验中,配合比取 A3B2C3 时,混凝土 60d 平均抗压强度达 58.1MPa,超过表 6 中的各组强度,证明此优化合理有效。

3.2 混凝土泵送试验

以现场施工条件为依据,确定试验中泵送长度、设备机械等参数,有针对性地进行对比和验证试验,更全面地了解混凝土配合比,更好地指导现场施工。

3.2.1 试验过程

1)选用 3.1 节优选出的混凝土配合比,即 A2B2C3 组合。

2)泵送试验设备机械。试验混凝土由搅拌站生产,选用搅拌站 HBT12020 进行泵送,选用 ϕ125 泵管进行布置。

3)进行可振捣、耐振捣及产出量试验。

3.2.1.1 耐振捣试验

根据方案,在现场制作 7 个木盒进行耐振捣试验,将混凝土注入木盒中,分别用不同时间进行振捣,振捣完毕后在木盒上用油漆笔标记好振捣时间。

3.2.1.2 可振捣试验

单独准备 2 个木盒,混凝土浇筑后,不进行振捣,以浇筑时间为基准,2h 后开始对其振捣,每隔 0.5h 振捣 1 次,拔出后观察振捣孔处混凝土,直至振捣孔处混凝土无法恢复原样,可结束试验。

3.2.1.3 产出量试验

准备 4 个容积为 $1m^3$ 的模具,并在高度上进行标识,便于对混凝土量进行观测。在搅拌机内搅拌 $1m^3$ 混凝土,利用搅拌车运输至试验现场,将混凝土注入模具内,采用现场所用的振捣棒按相关要求振捣密实。振捣完成后,测定混凝土容积误差,在 ±2% 之内方为合格。

3.2.2 试验结果

1)3 组混凝土(等待时间分别为 30,60,90min)泵送情况良好,无堵泵或泵送压力不足情况,泵送出的混凝土和易性良好,无分层离析现象,保证了混凝土出泵后的工作性能。

2)混凝土成型后,拆除模板,通过钻取芯样,观察截面分层和密实度,得到混凝土振捣最佳时间为 20~30s。

3)根据观察记录振捣棒插入孔洞是否可恢复原状,得到可振捣时间为 4~5h。

4)根据测定混凝土容积误差,容积误差在±2%之内,证明此种混凝土生产方式合格。

(下转第 45 页)

用手拉葫芦来调整模块位置,使模块环向限位贴紧筏基立柱。起重机继续缓慢落钩,当距离筏基表面100mm左右时停止下降(底板未接触找平层),检查并确认各环向限位是否贴紧,使用手拉葫芦进行辅助调整;检查并确认模块径向位置无误后,继续缓慢落钩,使模块逐渐与筏基上表面相接触并使之完全受力。确认模块完全落位后,起重机落钩,拆除模块吊索具与网架的连接,确认后,起重主指挥指挥起重机逆时针回转69°,将网架放至网架拼装场地,拆除网架与起重机钢丝绳,起重机收钩回转并收车。调整截锥体b段上口标高后,与下部支撑点焊。

6　结语

采用将底板+截锥体c段+截锥体b段焊接成模块,现场进行整体安装,减少了现场分块安装的工作量,释放了反应堆厂房内、外安全壳基础施工空间,保证了工程建设质量,节约了工程成本。

参考文献:

[1] 中国建筑股份有限公司,中建钢构有限公司.钢结构工程施工规范:GB 50755—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.

[2] 建筑施工手册编委会. 建筑施工手册[M].5版.北京:中国建筑工业出版社,2012.

[3] 孙传艺,邢辉."华龙一号"反应堆厂房土建施工进度优化研究[J].产业与科技论坛,2022,21(3):212-213.

[4] 李永利.华龙一号钢衬里底板安装焊接质量控制[J].核标准计量与质量,2021(1):33-37.

[5] 向世文,杨俭泗,毕晶,等.核电研发生命线:安全、经济——以提升项目效益为核心的批量化"华龙一号"模块化工艺研发管理与应用[J].中国质量,2021(9):113-117.

[6] 张大魏. 某核电站反应堆双层安全壳结构施工关键技术研究[D].南京:东南大学,2019.

[7] 王迪,熊猛,吴绍炜.核电厂安全壳底板钢衬里施工阶段平整度偏差研究[J].核动力工程,2018,39(S1):122-124.

[8] 程胜迟.浅析安全壳钢衬里模块化施工[J].武汉大学学报(工学版),2017(S1):530-533.

[9] 任阿琦,刘明辉,程振国.ACP1000核电机组钢衬里模块吊装技术研究[J].山西建筑,2017,43(10):100-101.

[10] 蔡霞."华龙一号"堆型钢衬里模块4至模块6施工优化研究[J].企业科技与发展,2022(3):128-130.

[11] 王开华.核电站钢衬里模块化制作和施工技术[J].建筑,2014(24):66,69.

[12] 鲁勤武.核电工程模块化技术研发与应用[J].中国核电,2013,6(1):17-21.

[13] 刘晓. 核岛钢衬里筒体模块化吊装结构设计及可靠性分析[D].大连:大连交通大学,2012.

(上接第12页)

4　实施效果

通过正交试验和混凝土综合性能测试,得出优化后的混凝土配合比方案,所制混凝土强度满足要求。并经过混凝土性能试验与实际工程证明,此方案得出的混凝土完全满足设计和质量要求。

5　结语

对防城港"华龙一号"核岛项目中大体积混凝土筏基所用建筑原材料进行性能测试,对混凝土配合比进行评估和优化。施工实践证明,采用此方案得出的混凝土配合比保证了施工质量,完全满足设计和质量要求,得到了业界的一致好评。

参考文献:

[1] 王燕谋,乔龄山,吴兆琦. 关于水泥混凝土材料的技术发展[C]//科技进步与学科发展——"科学技术面向新世纪"学术年会论文集,1998.

[2] 夏宁,于孝民,任青文.混凝土结构耐久性研究现状[J].水利水电科技进展,2005(4):63-66,70.

[3] 柯伟.中国腐蚀调查报告[M]. 北京:化学工业出版社, 2003.

[4] 中国建筑科学研究院.普通混凝土配合比设计规程:GJ 55—2011[J].北京:中国建筑工业出版社,2011.

[5] 中国建筑科学研究院.普通混凝土力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2002[S].北京:中国建筑工业出版社,2003.

[6] 中冶建筑研究总院有限公司,中交武汉港湾工程设计研究院有限公司.大体积混凝土施工标准:GB 50496—2018[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.

[7] 中广核工程有限公司.核电厂自密实混凝土设计与应用技术规程:NB/T 20339—2015[S].2015.

[8] 清华大学.混凝土结构耐久性设计规范:GB/T 50476—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.

[9] 中国建筑科学研究院.混凝土结构工程施工质量验收规范:GB 50204—2015[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.