



# 港珠澳大桥长寿命海工高性能混凝土配制\*

李超, 王胜年, 范志宏, 刘行

(中交四航工程研究院有限公司, 水工构造物耐久性技术交通行业重点实验室, 广东广州 510230)

**摘要:** 针对 120 a 设计使用年限要求, 阐述港珠澳大桥不同主体结构海工高性能混凝土基本性能设计的原则。在暴露试验得出的混凝土长期耐久性影响因素的基础上, 系统研究配合比参数对混凝土性能的影响, 介绍满足桥梁、隧道等不同结构工作性、强度、耐久性及体积稳定性要求的长寿命海工高性能混凝土的配制基本思路与方法。

**关键词:** 长寿命; 海工高性能混凝土; 配合比参数; 暴露试验; 耐久性

中图分类号: TU 528

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)03-0085-08

## Preparation of long-service-life marine high-performance concrete for Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge

LI Chao, WANG Sheng-nian, FAN Zhi-hong, LIU Hang

(Key Laboratory of Harbor & Marine Structure Durability Technology, Ministry of Communications,  
CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** For the 120-year design service life, we expound the principle of basic performance design of marine high-performance concrete for main structures of the Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge. Based on the influencing factors of concrete long time durability of exposure test, we study systematically the influence of parameters of mix proportion on the properties of concrete. The ideas and methods of preparation of long service life marine high-performance concrete which satisfies the requirements of workability, strength, durability and volume stability for different structures of bridges and tunnels are presented.

**Keywords:** long service life; marine high-performance concrete; parameters of mix proportion; exposure test; durability

港珠澳大桥作为跨世纪的标志性工程, 因其工程规模和建设难度大备受世人瞩目, 而国内跨海工程首次采用的 120 a 设计使用年限, 更是工程建设备受关注的焦点之一<sup>[1]</sup>。港珠澳大桥横跨伶仃洋海域, 采取了岛、桥、隧道等多种结构形式。结构上的不同要求以及不同的施工工艺, 对混凝土的强度、工作性及体积稳定性都有不同或更严格的要求; 大桥处于恶劣的海水腐蚀环境中, 要实现工程 120 a 的设计使用寿命, 作为构成工程结构主体的最重要的混凝土材料, 其本身必须具备

足够的抵御环境侵蚀的能力。配制长寿命海工高性能混凝土是确保混凝土结构使用寿命最有效、最直接且最经济的根本性技术措施<sup>[2-4]</sup>。港珠澳大桥主体结构混凝土材料的配制, 应针对具体结构对象, 在满足其结构要求的强度以及施工工艺要求的工作性前提下, 最大限度地提高其抗环境侵蚀的能力, 并控制其不出现影响使用和耐久性的危害性裂缝, 能够长期承受使用环境中各种物理、化学因素的作用, 保证混凝土的各项性能在实体结构中达到统一与和谐。

收稿日期: 2014-12-18

\*基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2011BAG07B00, 2011BAG07B04)

作者简介: 李超 (1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事建筑材料及耐久性研究。

## 1 港珠澳大桥主体结构混凝土基本性能

港珠澳大桥主体工程由长约 23 km 海上桥梁、近 6 km 的海底沉管隧道和 2 个长约 650 m 的海上人工岛构成,因海上人工岛是由钢圆筒围堰、围堰内填砂处理成岛,所以混凝土结构耐久性重点应针对海上混凝土桥梁和沉管隧道<sup>[5]</sup>。

### 1.1 桥梁结构混凝土性能

桥梁分通航孔桥和非通航孔桥,构件类型多,综合考虑结构受力、耐久性、便于施工和质量控制等因素,不同构件混凝土性能指标要求如表 1 所示。混凝土基本性能设计规定基于以下考虑。

表 1 桥梁结构混凝土性能要求

构件名称	腐蚀环境	最低强度等级	最小保护层厚度/mm	NT Build492 氯离子扩散系数/( $10^{-12} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )		坍落度/mm
				28 d	56 d	
承台	水下区	C45	65	$\leq 7.0$	$\leq 5.0$	160 ~ 220
	浪溅区	C45	80	$\leq 6.5$	$\leq 4.5$	
桥墩	浪溅区	C50	80	$\leq 6.5$	$\leq 4.5$	
	大气区	C50	50	$\leq 6.5$	$\leq 4.5$	
箱梁	浪溅区	C55	75	$\leq 6.0$	$\leq 4.0$	
	大气区	C55	45	$\leq 6.0$	$\leq 4.0$	

#### 1) 工作性。

全长约 23 km 的海上桥梁,构件数量众多,承台、桥墩等大部分混凝土构件采取工厂预制、现场拼装的方式施工,钻孔灌注桩及部分承台、墩身等构件采取现场浇筑的方式施工,对混凝土的和易性有较高的要求,要求混凝土拌合物既易于浇筑、填充密实,又不至于泌水离析,设计采用大流动性混凝土,混凝土坍落度为 160 ~ 220 mm。

#### 2) 强度。

不同构件的强度等级取值主要是按照相应的承载能力要求,通过计算得出结构受力所应具备的强度,同时应考虑耐久性要求的最低强度等级,综合两方面考虑,取满足两者要求的最低强度等级作为设计值。

#### 3) 耐久性。

区别于传统的基于经验和标准规范的设计方法,港珠澳大桥混凝土结构耐久性设计采用可靠性设计方法,即依据与港珠澳大桥具有相似环境的华南暴露试验和已建工程耐久性实测数据,基于菲克第二定律建立耐久性设计方程,对耐久性相关参数进行统计分析,最终获得与设计使用年限具有定量关系的混凝土耐久性设计指标——保护层厚度和氯离子扩散系数。

从水下到大气区等不同部位的构件,氯离子传输机理及腐蚀严重程度不同,由上述可靠度理论计算得出的耐久性设计值也各不相同;处于同一构件的不同部位,为便于施工和质量控制,统一按照最严酷的腐蚀环境考虑。

### 1.2 沉管混凝土性能

沉管隧道单节段尺寸为 37.96 m × 11.4 m × 22.5 m,采用工厂化预制,因结构受力复杂、预制安装施工难度大、耐久性及抗裂要求高,其性能规定必须综合考虑结构受力、材料及施工等综合因素影响。

#### 1) 工作性。

沉管截面及混凝土体量大、钢筋及各种预埋件密集,采用一次性全断面浇筑成型,混凝土浇筑量大、持续时间长,对混凝土的和易性和凝结时间控制极其严格。混凝土应具备足够的流动性,从搅拌出机经泵送约 100 m 至浇筑现场后,能充分填充和振捣密实,同时不会因流动性过大造成泌水、离析现象;另一方面,混凝土应保持合适的重塑时间,既要避免初凝时间过短造成的上下层混凝土之间冷缝,也要避免初凝时间过长而影响后续施工。沉管混凝土具体工作性要求如表 2 所示。

表2 沉管混凝土工作性能要求

新拌出机混凝土性能		经泵送至浇筑现场混凝土性能			
坍落度/mm	扩展度/mm	坍落度/mm	扩展度/mm	重塑时间/h	初凝时间/h
200~220	400~450	180~220	350~450	≥8	≥12

## 2) 强度。

混凝土高的强度和高的抗裂性从材料角度来看是矛盾的,考虑沉管混凝土采用的是后期强度仍有较大发展的大掺量矿物掺合料体系,通过设计优化,将28 d C45作为强度控制指标,56 d C50

作为强度验收指标,这样既满足了沉管结构的受力要求,也有利于结构控裂;此外,因工厂化预制的顶推工艺要求,混凝土3 d左右应具有一定的抗弯、抗拉能力,因此混凝土强度指标中增加了3 d的要求。具体混凝土强度规定见表3。

表3 沉管混凝土性能指标要求

强度要求			NT Build492 氯离子扩散系数设计值/( $10^{-12} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )		抗水压渗透等级	绝热温升/°C	干缩
3 d	28 d	56 d	28 d	56 d	28 d	7 d	90 d
C25	C45	C50	≤6.5	≤4.5	>P14	<43	<300 $\mu\epsilon$

## 3) 耐久性。

沉管深埋于海底,属120 a使用期内不可更换构件,耐久性必须从严设计。鉴于沉管外壁海水渗入,而空气从内壁透入,沉管外壁按腐蚀最严重的浪溅区设计;沉管壁厚超过1.5 m,内壁主要是受隧道内盐雾和汽车尾气的碳化腐蚀,故沉管内壁按海洋环境大气区考虑。具体混凝土耐久性规定见表3。

## 4) 体积稳定性。

沉管埋于深达40 m的海底,抗渗和防裂要求高,不能出现危害性裂缝。水化热与收缩是影响沉管混凝土开裂的两个主要因素,配制低热低收缩的海工高性能混凝土是提高沉管结构抗裂性能的基本措施<sup>[6]</sup>。沉管混凝土体积稳定性要求如表3所示。

## 2 混凝土原材料

优选有利于提高混凝土寿命及抗裂性能的原材料,试验采用的水泥为华润水泥(平南)P·II42.5硅酸盐水泥,粉煤灰为谏壁电厂I级粉煤灰,矿粉为唐山盾石S95级矿渣粉,粗集料为新会白水带5~20 mm连续级配无碱活性花岗岩碎石,细集料为广东西江细度模数为2.6~2.9的无

碱活性河砂,减水剂为江苏博特PCA-I型缓凝型聚羧酸高性能减水剂。

## 3 配合比参数对混凝土性能的影响

配合比参数决定了混凝土各项性能。港珠澳大桥工程建设难度大,建成后应能够满足120 a承受各种荷载和环境腐蚀的作用,除强度和耐久性基本要求外,同时还要满足工作性、抗裂性以及经济环保等要求。

## 3.1 胶凝材料体系的影响

## 1) 对耐久性的影响。

大量室内试验研究证明,掺粉煤灰、矿渣粉后的水化产物能明显改善混凝土的孔结构、提高混凝土的抗氯离子渗透性<sup>[7]</sup>。图1为不同胶凝材料体系混凝土暴露于海洋环境浪溅区5 a氯离子扩散系数,在纯硅酸盐水泥、单掺粉煤灰、单掺矿粉以及混掺粉煤灰和矿粉的混凝土中,纯硅酸盐水泥混凝土的氯离子扩散系数最大,且衰减最小;混掺粉煤灰和矿粉的混凝土氯离子扩散系数最小,且衰减最快。长期暴露试验证明,混掺大掺量粉煤灰和矿粉的混凝土显示了优异的耐久性,粉煤灰和矿渣粉混掺是配制长寿命海工高性能混凝土的首选胶凝材料体系。

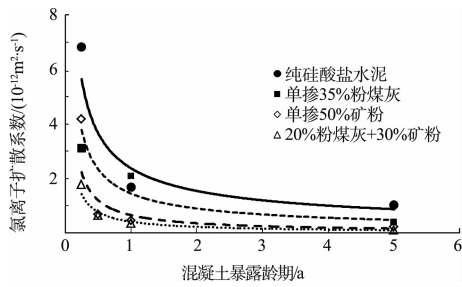


图1 长期暴露试验混凝土氯离子扩散系数

### 2) 对抗裂性能的影响。

混凝土胶凝材料体系水化放热性能以及开裂敏感性能是影响混凝土结构抗裂性能的重要因素。从图2所可以看出，掺入粉煤灰、矿粉可显著降低胶凝材料体系的水化放热量，并且水化放热量随着矿物掺合料掺量提高而降低。

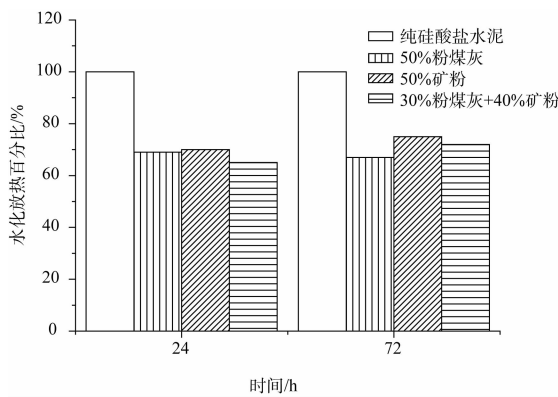


图2 胶凝材料体系水化放热

以纯硅酸盐水泥小圆环试验开裂时间为基准，各种类型胶凝材料体系开裂时间与纯硅酸盐水泥体系开裂时间之比如图3所示，可以看出掺入矿物掺合料可显著延迟胶凝材料体系开裂时间，降低开裂敏感性，提高混凝土的抗裂性能。

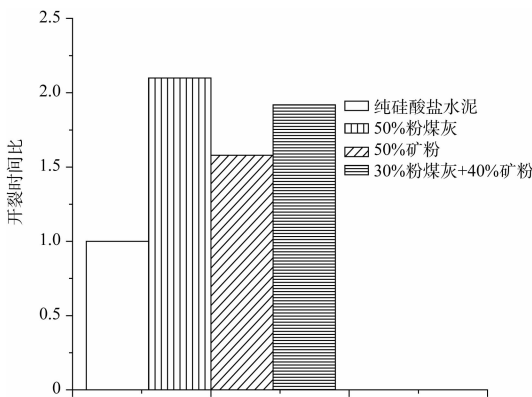


图3 胶凝材料体系开裂时间

因此，采用大掺量粉煤灰和矿渣粉的胶凝材料体系，也有利于提高混凝土的抗裂性能。

### 3) 对强度的影响。

不同胶凝材料体系对混凝土强度的影响如图4所示。相同水胶比情况下，纯硅酸盐水泥混凝土早期抗压强度远高于掺矿物掺合料的混凝土，但28 d及至1 a后，其强度与各种掺矿物掺合料混凝土的强度相差不大，在合适的掺量范围内，不同矿物掺合料对混凝土早期强度有影响，但后期强度影响不大。

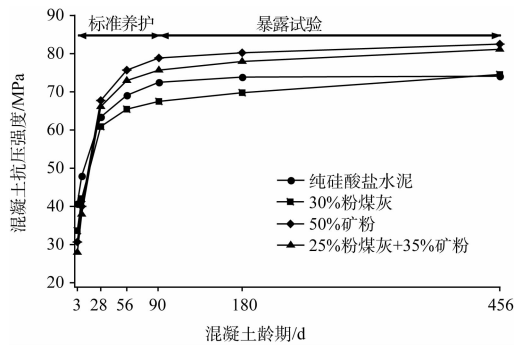


图4 不同胶凝材料体系混凝土强度

### 3.2 水胶比的影响

理论上减小水胶比对混凝土的强度和耐久性有利，但过小的水胶比对混凝土的工作性、开裂风险等方面均有不利的影响。因此，对不同胶凝材料体系的混凝土，在确定水胶比时，除满足强度和耐久性最低要求外，尚应考虑满足工程施工的工作性要求及减小混凝土材料本身的开裂风险（图5，6）。

### 3.3 浆体比例的影响

混凝土浆体比例是指单位体积混凝土中，胶凝材料、拌合水、外加剂以及空气所占体积之和的百分比。浆体决定了混凝土的工作性和体积稳定性。

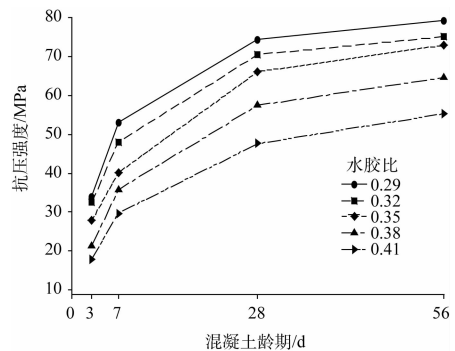


图5 混凝土强度

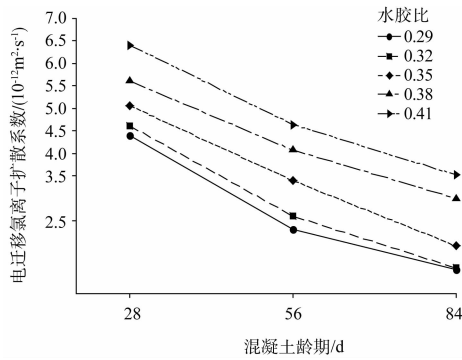


图 6 混凝土快速电迁移氯离子扩散系数

1) 对工作性的影响。

浆体在混凝土中的作用, 主要是填充集料堆积形成的空隙并充分包裹和隔离集料, 使新拌混凝土具有良好的流动。试验得出混掺大掺量粉煤灰矿粉的泵送混凝土浆体比例对工作性的影响如表 4 所示。浆体比例在 30% ~ 35% 范围内, 新拌混凝土粘聚性、流动性好, 适宜现场施工。

表 4 浆体比例对混凝土工作性影响

浆体比例	<30%	30% ~ 35%	>35%
混凝土工作性	包裹性与流动性差, 经泵送后流动性下降明显	粘聚性、流动性良好, 经泵送后流动性损失不大	流动性好, 但浆体富余多, 振捣易出现浮浆

注: 浆体比例 = (胶凝材料体积 + 拌合水体积 + 外加剂体积 + 空气体积) / 单位混凝土体积 × 100%。

2) 对抗裂性能的影响。

浆体产生水化热, 硬化后的热胀冷缩和湿胀干缩决定了混凝土的体积稳定性, 因此浆体比例是影响混凝土抗裂性能的关键因素。

试验研究的浆体比例变化对混凝土干燥收缩影响如图 7 所示。受胶凝材料用量、胶凝材料体系、水胶比以及砂率等因素影响, 浆体比例与混凝土干燥收缩之间有明显的相关性, 随浆体比例增大, 混凝土干燥收缩也增大。

采用温度应力试验测得浆体比例与抗裂安全系数之间关系如图 8 所示。温度应力试验的抗裂安全系数即为混凝土轴心抗拉强度与环境温度应力的比值, 抗裂安全系数越大, 混凝土因温度收缩原因开裂的风险越低, 混凝土抗裂性能越强。在胶凝材料组成与水胶比均不变的条件下, 浆体比例与抗裂安全系数具有良好的相关性, 随着浆

体比例的增大, 抗裂安全系数随着降低, 混凝土抗裂性能降低。

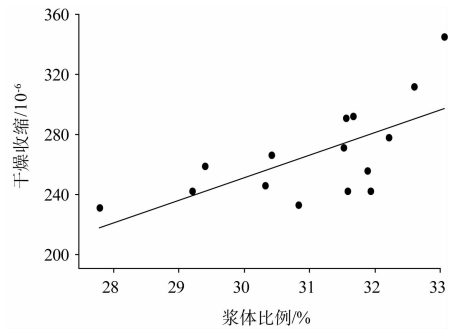


图 7 混凝土干燥收缩

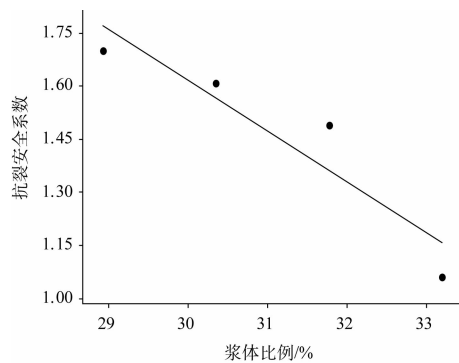
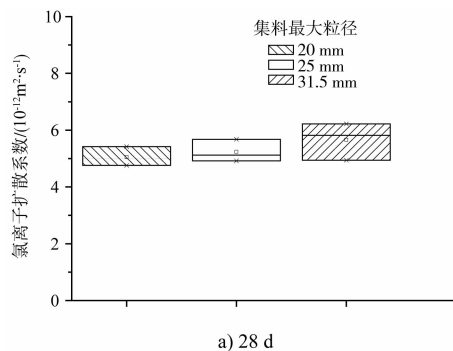


图 8 抗裂安全系数

3.4 集料粒径和级配

在硬化混凝土中, 集料粒径和级配对混凝土耐久性也有影响。图 9 显示碎石最大粒径分别为 20、25 和 31.5 mm 的连续级配碎石, 保持混凝土坍落度 (200 ± 20) mm 不变时混凝土 28 d 与 56 d 快速电迁移氯离子扩散系数。集料粒径增大, 虽然胶凝材料用量及浆体比例降低, 但混凝土氯离子扩散系数增大。这是因为集料与胶凝材料浆体之间界面过渡区是氯离子渗透的薄弱环节<sup>[8]</sup>, 集料粒径越大, 界面过渡区薄弱环节越多, 混凝土耐久性越差。



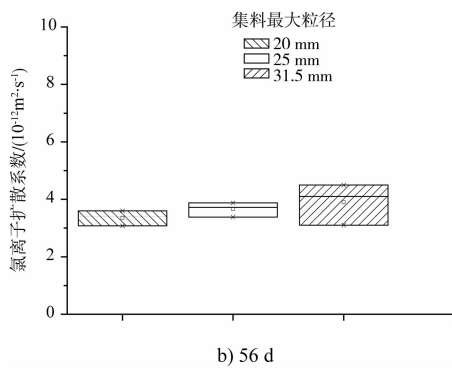


图9 集料最大粒径对混凝土氯离子扩散系数影响

#### 4 混凝土配制和配合比优化

在配合比参数对混凝土性能影响研究的基础上,针对港珠澳大桥主体结构不同混凝土构件的具体要求,通过室内试拌、现场模型试验,优选出满足具体构件性能要求,兼顾各项性能发展并实现各项性能在实体构件中达到统一与和谐的基础配合比。

准配合比。在施工过程中,可根据具体情况,对基准配合比进行调整优化,形成最终用于实际施工的工程配合比。

##### 4.1 混凝土试配制

不同构件混凝土试配制过程,就是突出具体构件混凝土关键性能的同时,通过配合比参数调整,利用最少的胶凝材料及浆体率、尽量少的水泥和尽量多的矿物掺合料,确保混凝土各种性能满足设计要求过程。

###### 1) 桥梁混凝土。

针对不同构件混凝土的性能要求,综合考虑上述各配合比参数的影响,经过大量的原材料调研、优选和配合比试拌,得出满足设计和施工要求的桥梁典型构件浪溅区混凝土初步配合比(表5),其性能见表6。

表5 桥梁典型构件混凝土初步配合比

构件	强度等级	编号	胶凝材料/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	水胶比	水泥/%	粉煤灰/%	矿粉/%	砂率/%	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	坍落度/mm
承台	C45	CT-1	390	0.36	45	20	35	40	2 370	185
		CT-2	400	0.35	40	25	35	39	2 365	190
		CT-3	410	0.34	35	25	40	39	2 365	180
桥墩	C50	D-1	430	0.33	50	20	30	41	2 400	195
		D-2	440	0.32	45	20	35	40	2 395	200
		D-3	450	0.31	40	25	35	40	2 395	205
箱梁	C55	L-1	440	0.33	55	20	25	42	2 410	220
		L-2	450	0.32	50	20	30	42	2 410	210
		L-3	460	0.31	45	20	35	43	2 410	205

表6 桥梁典型构件混凝土试拌性能

构件	强度等级	编号	抗压强度/MPa				氯离子扩散系数/( $10^{-12} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )		抗裂安全系数
			3 d	7 d	28 d	56 d	28 d	56 d	
承台	C45	CT-1	25.1	35.9	59.2	61.4	5.1	3.3	1.4
		CT-2	24.8	30.9	57.7	63.3	5.0	3.5	1.5
		CT-3	22.6	31.5	58.1	64.1	4.6	2.9	1.2
桥墩	C50	D-1	27.8	52.8	65.6	69.8	4.9	3.0	1.4
		D-2	27.9	43.4	66.7	71.7	5.2	3.3	1.3
		D-3	29.3	46.1	67.5	72.8	4.5	2.9	1.1
箱梁	C55	L-1	34.4	54.1	72.2	75.1	4.6	2.5	1.2
		L-2	32.1	51.9	74.3	77.1	4.4	2.7	1.2
		L-3	31.9	49.3	70.3	76.2	4.4	2.5	1.1

注:抗裂安全系数为温度应力试验混凝土轴心抗拉强度与环境温度应力的比值。

## 2) 沉管混凝土。

沉管是处于水下承受高压海水作用的大体积混凝土结构,对混凝土的抗氯离子渗透性、抗水压渗透性以及抗裂性能要求严格。采用工厂化长距离泵送全断面连续浇筑,一次浇筑混凝土达

3 300 m<sup>3</sup>,且结构内钢筋密集,是港珠澳大桥工程中对混凝土综合性能要求最高的构件,对原材料和配合比要求极高。沉管混凝土初步配合比及其性能如表7与表8所示。

表7 沉管混凝土初步配合比

编号	胶凝材料/(kg·m <sup>-3</sup> )	水胶比	水泥/%	粉煤灰/%	矿粉/%	砂率/%	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	含气量/%	坍落度/mm
CG-1	420	0.35	40	25	35	40	2 395	2.0	210
CG-2	420	0.35	45	25	30	40	2 395	1.7	215
CG-3	420	0.35	50	20	30	40	2 400	1.6	220

表8 沉管混凝土试拌性能

编号	抗压强度/MPa			氯离子扩散系数/(10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )		抗水压渗透等级	绝热温升/℃	干缩/10 <sup>-6</sup>		抗裂安全系数
	3 d	28 d	56 d	28 d	56 d	28 d	7d	90 d		
CG-1	26.4	57.1	61.8	5.0	2.2	>P12	39.3	242	1.4	
CG-2	28.8	59.9	65.3	4.7	2.5	>P12	41.5	240	1.5	
CG-3	33.8	55.5	62.4	4.5	2.7	>P12	43.2	265	1.0	

注:抗裂安全系数为温度应力试验混凝土轴心抗拉强度与环境温度应力的比值。

## 4.2 现场预拌和足尺模型试验

根据混凝土试配制的结果,选择各项性能满足设计要求并具有最优抗裂性能的配合比,通过现场预拌及足尺模型试验,按照构件的实际施工工艺以及施工条件,对混凝土构件生产浇筑施工全过程进行模拟,并全面检验混凝土拌合物性能和强度、耐久性、抗裂性等综合性能,在此基础上对配合比进行必要的调整、优化。

## 4.3 工程配合比

港珠澳大桥工程量大,不同施工标段采用的原材料不同,各自的施工装备、工艺及质量控制措施各有差别,在实际施工过程中,施工单位可根据各自具体情况,在满足设计和基本质量控制要求的前提下,对基准配合比进行适当调整调整。港珠澳大桥不同混凝土构件施工用配合比如表9所示。

表9 典型构件混凝土施工配合比

构件名称	配合比编号	胶凝材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )	水胶比	水泥/%	粉煤灰/%	矿粉/%	砂率/%	减水剂/%
承台	1	440	0.34	46	25	29	41	0.80
	2	450	0.32	42	29	29	41	1.00
	3	450	0.32	50	30	20	41	0.95
桥墩	1	490	0.30	47	24	29	41	0.80
	2	470	0.31	52	20	28	40	1.00
	3	475	0.29	55	25	20	38	1.10
沉管	1	420	0.35	45	25	30	43	1.00

## 5 结论

1) 港珠澳大桥结构复杂,施工难度大,服役环境恶劣,结构承受的不同荷载、所处不同的环境以及不同的施工工艺,对混凝土的强度、耐久性、工作性及体积稳定性都有不同或更严格的要求。

2) 海洋实际环境长期暴露实验证明,混掺大掺量粉煤灰和矿粉的海工高性能混凝土比单掺粉煤灰或矿粉的混凝土显示出更优异的抗氯离子渗透性能,确定混掺大掺量粉煤灰与矿粉是配制港珠澳大桥长寿命海工高性能混凝土的首选胶凝材料体系。

3) 在系统研究胶凝材料体系、水胶比、浆体比例、集料粒径和级配等参数对混凝土性能影响的基础上,提出了以强度和耐久性要求为重点,同时兼顾工作性、抗裂性和经济性的配制原则,从而达到混凝土配合比参数和各项性能的和谐统一。

4) 港珠澳大桥工程技术要求高,施工难度大,混凝土配合比的确定需要在室内试验的基础上,通过现场预拌及足尺模型试验验证,并结合工程施工实际情况进行必要的调整和优化,最终确定满足设计要求、便于质量控制且综合性能优异的施工配合比。

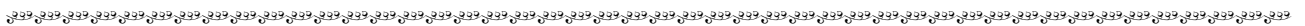
**参考文献:**

[1] 王胜年,李克非,范志宏,等.港珠澳大桥 120 a 使用寿命的混凝土结构耐久性对策研究[C].杭州:第八届全国混凝土耐久性学术交流会,2012:71-80.  
 [2] 孟凡超,刘晓东,徐国平.港珠澳大桥主体工程总体设

计[C]//第十九届全国桥梁学术会议论文集(上册).北京:人民交通出版社,2010:57-77.

[3] 刘晓东.港珠澳大桥总体设计与技术挑战[C]//第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集.北京:海洋出版社,2011:17-20.  
 [4] 李英,陈越.港珠澳大桥岛隧工程的意义及技术难点[J].工程力学,2011,28:67-77.  
 [5] 中交四航工程研究院有限公司.港珠澳大桥混凝土结构耐久性设计研究[R].广州:中交四航工程研究院有限公司,2013:61-62.  
 [6] 李超,王胜年,王云飞,等.港珠澳大桥全断面浇筑沉管裂缝控制技术[J].施工技术,2012,41(22):5-8.  
 [7] 中交四航工程研究院有限公司.抗盐污染高性能混凝土配制成套技术研究[R].广州:中交四航工程研究院有限公司,2001:16-18.  
 [8] Kumar M P, Paulo J, Monteiro M. Concrete Microstructure, Properties and Materials[M].覃维祖,王栋民,丁建形,等,译.北京:中国电力出版社,2008:80-83.

(本文编辑 郭雪珍)



(上接第 84 页)

**6 结语**

港珠澳跨海集群工程结构形式复杂,工程建设难度大,腐蚀环境严酷,120 a 设计使用寿命是一项贯穿于设计、施工和维护等各阶段的系统问题。通过基于实际环境和长期性能的可靠性设计和严格的施工质量控制,并实施科学的后期维护,可保证港珠澳大桥在全寿命成本最低的情况下实现 120 a 设计使用寿命的目标。

**参考文献:**

[1] 张宝胜,干伟忠,陈涛.杭州湾跨海大桥混凝土结构耐久性解决方案[J].土木工程学报,2006(6):72-77.  
 [2] 周长严,董锋,张修亭.青岛海湾大桥桥梁混凝土耐久性设计方案研究[J].海岸工程,2007(12):68-71.  
 [3] 四航局科研所,南京水利科学研究所,四航局第三工程

处.华南沿海部分码头调查情况介绍[J].水运工程,1982(2):1-7.

[4] 王胜年.华南海港码头混凝土腐蚀情况的调查与结构耐久性分析[J].水运工程,2000(6):8-12  
 [5] JTJ 275—2000 海港工程混凝土结构防腐技术规程[S].  
 [6] 日本土木学会.混凝土结构耐久性设计指南及算例[M].向上,译.北京:中国建筑工业出版社,2010.  
 [7] 中交四航工程研究院有限公司.海港工程混凝土结构耐久性寿命预测与健康诊断研究报告[R].广州:中交四航工程研究院有限公司,2009.  
 [8] 中交四航工程研究院有限公司.长期海洋环境条件下混凝土暴露试验研究报告[R].广州:中交四航工程研究院有限公司,2010.

(本文编辑 武亚庆)