

· 建筑材料 ·



港珠澳大桥主体混凝土结构 120 a 使用寿命耐久性对策^{*}

王胜年¹, 李克非², 范志宏¹, 苏权科³, 熊建波¹

(1. 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;
2. 清华大学, 北京 100084; 3. 港珠澳大桥管理局, 广东 珠海 519015)

摘要: 跨越伶仃洋海域的港珠澳大桥提出了 120 a 使用寿命的建设目标, 如何提高外海、高温、高湿环境下混凝土结构耐久性是工程建设面临的重大问题之一。结合港珠澳大桥工程实践, 在工程建设前期和设计施工阶段, 开展了针对混凝土结构耐久性的系列研究工作。在研究成果基础上, 从耐久性设计、施工及后期维护等方面, 提出了为确保港珠澳大桥达到 120 a 使用寿命所应采取的耐久性对策和措施。

关键词: 港珠澳大桥; 混凝土结构; 耐久性; 寿命; 设计; 质量控制; 维护

中图分类号: TU 528.33 文献标志码: A 文章编号: 1002-4972(2015)03-0078-07

Durability strategy for main concrete structure of Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge with designed service life of 120 years

WANG Sheng-nian¹, LI Ke-fei², FAN Zhi-hong¹, SU Quan-ke³, XIONG Jian-bo¹

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

2. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge Authority, Zhuhai 519015, China)

Abstract: The service life of Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge, which crosses the Pearl river estuary, is designed as 120 years. How to improve the durability of concrete structure located at the open sea with high temperature and humidity became one of the most important issues for the bridge construction. The systematical research on the concrete durability was carried out before and during the construction period based on the engineering practice. Based on the research, the strategies and measures for the durability design, construction and maintenance, which were applied to ensure the service life of 120 years, are expounded.

Keywords: Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge; concrete structure; durability; service life; design; quality control; maintenance

1 概述

港珠澳大桥是连接香港、珠海、澳门的大型跨海通道工程, 其海中主体工程跨越伶仃洋海域, 由海底沉管隧道、海中人工岛、海上桥梁等多种

结构组成, 工程设计使用年限 120 a, 是迄今中国交通建设史上技术最复杂、环保要求最严、建设标准最高的工程。

尽管国内已有杭州湾大桥、青岛海湾大桥

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: 王胜年 (1963—), 男, 硕士, 教授级高工, 从事建筑材料及耐久性研究。

等工程建设经验^[1-2]，但港珠澳大桥工程所处的伶仃洋海域，具有气温高、湿度大、海水含盐度高的特点，受海水、海风、盐雾、潮汐、干湿循环等众多因素影响，腐蚀环境尤其严酷，同时港珠澳大桥包含岛、桥、隧等多种复杂的结构，国内首次按 120 a 设计使用年限设计，因此，如何提高耐久性确保工程达到 120 a 使用寿命，是工程建设所面临的重大技术问题之一。为此，工程建设前期和设计施工阶段，分别开展了“港珠澳大桥主体工程耐久性评估及混凝土试验研究”、“大断面矩形混凝土浇筑工艺及裂缝控制关键技术研究”和国家科技支撑

计划“混凝土结构 120 a 使用寿命保障关键技术”等研究，研究工作紧密结合工程实际，针对港珠澳大桥所处环境和工程结构特点，在耐久性设计、耐久性施工质量控制和耐久性维护等方面取得了系列科研成果。本文即是在所取得成果的基础上，从工程全寿命周期考虑，提出了确保港珠澳大桥达到 120 a 使用寿命所应采取的耐久性对策和措施。

2 腐蚀环境分析

2.1 腐蚀环境类别

港珠澳大桥所处环境资料见表 1。

表 1 港珠澳大桥环境资料

温度/℃			湿度/%			离子含量/(g·L ⁻¹)			侵蚀性 CO ₂ 含量/ (mg·L ⁻¹)	pH 值
年均	最热月	最冷月	平均	最高	最低	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Mg ²⁺		
22.3 ~ 23.1	28.4 ~ 28.8	14.8 ~ 15.9	77 ~ 80	100	10	3.7 ~ 17.9	0.5 ~ 2.2	0.2 ~ 1.2	0.00 ~ 36.35	6.41 ~ 8.83

从表 1 可以看出，港珠澳大桥所处环境气温和湿度高、海水含盐量大，海水和地下水中也含有一定量的硫酸盐、镁盐等化学侵蚀性介质。此外，大气环境不可避免地存在碳化腐蚀问题，因此从腐蚀环境类别来划分，港珠澳大桥存在海水的氯离子、地下水的化学侵蚀和大气环境的碳化等 3 种腐蚀类型。大量研究结果表明，海水环境下氯离子腐蚀比化学腐蚀和碳化腐蚀严重得多，大量华南海港工程调查结果证明，氯离子侵蚀引起的腐蚀破坏是海水环境混凝土结构最严重、最普遍的耐久性破坏形式^[3-4]。因此，海水环境氯离子腐蚀是港珠澳大桥耐久性的首要考虑因素。

2.2 环境部位划分

我国水运工程行业标准针对海水潮差变化和风浪大的特点，考虑有掩护和无掩护条件，分别给出海港工程按设计水位和按天文潮位两种暴露部位划分的计算方法，按腐蚀严重程度给出了大气区、浪溅区、水位变动区和水下区 4 区划分标准^[5]。考虑到港珠澳大桥横跨伶仃洋，地处外海，主体桥梁工程按照无掩护条件的天文潮水位划分（表 2）。

表 2 港珠澳大桥桥梁结构腐蚀环境部位划分

部位	计算方法	高程/m
大气区	最高天文潮位 + 0.7H _{1/3}	> 6.26
浪溅区	大气区下界至 最高天文潮位 - H _{1/3}	6.26 ~ -0.40
水位变动区	浪溅区下界至 最低天文潮位 - 0.2H _{1/3}	< -0.40 ~ -2.10
水下区	水位变动区以下	< -2.10

除桥梁外，港珠澳大桥还包含将近 6 km 的海底沉管隧道，系 120 a 不可更换重要构件，腐蚀风险大，因氯离子随海水从沉管外侧渗透、氧气从内侧渗透，耐久性本着从严考虑的原则，沉管外侧按浪溅区、内侧按大气区划分。

3 混凝土结构耐久性设计

3.1 基于可靠度理论的混凝土结构耐久性设计

目前，国内外大多数工程还是基于工程经验，依据规范规定，按材料组成（如水胶比、胶凝材料及用量）、性能（如强度、抗氯离子渗透性）和结构参数（如构造形式、保护层厚度）等来确定耐久性控制指标，即所谓“凭经验设计”，这些耐久性控制指标与设计年限之间只是假定的符合关系；近些年国内外学者开展大量研究，试图采用

定量方法进行耐久性设计，开发了一些基于工程数据及与经验结合具有失效概率或可靠性的耐久性设计方法。港珠澳大桥耐久性设计是在华南海港工程暴露试验站 20 多年长期性能暴露试验及华南海港实体工程耐久性调查得出的大量数据基础上，由建立的数学模型分析，按照可靠度理论进行设计，从而可定量地建立设计使用年限和耐久性控制指标之间的关系。由于港珠澳大桥与设于湛江港的华南暴露试验站环境基本相同，与华南地区海港工程环境相似，因此，应用上述暴露试验和实体工程耐久性样本数据进行耐久性设计，具有较高的可信程度。

3.1.1 基本模型

采用菲克第二定律的扩散模型来表征氯离子的侵蚀过程：

$$C_{x,t} = C_0 + (C_s - C_0) \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2 \sqrt{D t}} \right] \quad (1)$$

式中： $C_{x,t}$ 为一定龄期时侵入混凝土某一深度的氯离子浓度； C_0 为混凝土初始氯离子浓度； C_s 为表面氯离子浓度； x 为氯离子侵入混凝土的深度； t 为混凝土龄期； erf 为误差函数。

港珠澳大桥主体工程结构腐蚀风险大、维修成本高，把钢筋脱钝作为耐久性极限状态，则耐久性设计方程为：

$$G = C_{cr,d} - C_{s,d} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x_d}{2 \sqrt{D_{cl,d} t_{SL}}} \right) \right] = 0 \quad (2)$$

式中： $C_{s,d}$ 和 $D_{cl,d}$ 为氯离子表面浓度和表观氯离子扩散系数设计值，设计时作为荷载变量； $C_{cr,d}$ 和 x_d 为氯离子临界浓度和保护层厚度设计值，设计时作为抗蚀变量； t_{SL} 为设计使用年限。

上述模型中的几个关键耐久性参数 C_{cr} 、 C_s 和 D_{cl} 与混凝土结构组成材料、暴露环境部位有关，且 D_{cl} 随时间衰减。华南地区近 30 多年的海洋暴露试验和海港实体工程调查数据，是统计解析模型关键参数统计分布特征的基础。

3.1.2 近似概率耐久性设计

3.1.2.1 耐久性参数统计规律

统计了近些年海港工程调查获得的保护层厚度 1 904 个，保护层厚度服从正态分布，标准差为 5.3 mm；分析了不同暴露龄期、不同部位（水下区、水位变动区、浪溅区、大气区）及不同材料组成的暴露试验耐久性参数，其中 351 个表面氯离子浓度样本数据，表面氯离子浓度与水胶比线性相关，统计特征呈对数正态分布；临界氯离子浓度样本 68 个，总体呈现 beta 分布；氯离子扩散系数 395 个数据，分析表明，氯离子扩散系数随时间呈指数衰减，且氯离子扩散系数和衰减指数均服从正态分布。

$$D_{(t)} = D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^n = D_0 \eta(t_0, t) \quad (3)$$

式中： $D_{(t)}$ 为龄期 t 时混凝土表观氯离子扩散系数； D_0 为初始龄期 t_0 时的表观氯离子扩散系数； n 为表观氯离子扩散系数随时间的衰减指数； $\eta(t_0, t)$ 为经换算的从时间 t_0 到 t 时表观氯离子扩散系数衰减系数。

3.1.2.2 耐久性设计结果

使用近似概率方法进行耐久性设计。根据上述各耐久性参数的统计分布特征，确定各参数的特征值，以 $\beta = 1.3$ 确定为本工程耐久性可靠指标，通过近似概率方法确定满足目标可靠指标各设计变量的分项系数，得到各参数特征值和分项系数（表 3）。

表 3 耐久性设计各参数特征值和分项系数

环境 条件	临界氯离子浓度/%		表面氯离子浓度/%		扩散系数衰减率		28 d 扩散系数/(10 ⁻¹² m ² ·s ⁻¹)		保护层厚度/mm	
	特征值	分项系数	特征值	分项系数	特征值	分项系数	特征值	分项系数	特征值	安全裕度
浪溅	0.75	1.7	5.76	1.1	0.061	1.1	3.0	1.1	80	10
水变	0.75	1.2	4.05	1.1	0.067	1.2	3.0	1.2	80	10
水下	2.00	2.0	4.78	1.1	0.074	1.1	3.0	1.1	60	10
大气	0.85	1.1	2.10	1.2	0.047	1.4	3.0	1.1	50	10

注：氯离子浓度指胶凝材料的百分含量。

按照荷载变量 $F^d = F^c \gamma_F$ ，抗蚀变量 $f^d = f^c / \gamma_f$ ，保护层厚度变量 $x^d = x^c - \Delta x$ ，将表 3 数据代入

式(2)，设计使用年限取 $t_{SL} = 120$ a，则可定量计算得出设计使用年限为 120 a 时，对应大气区、浪

溅区、水位变动区和水下区混凝土结构的最大氯离子扩散系数和最小保护层厚度（图 1）。对于浪溅区构件，当设计保护层厚度为 74 ~ 85 mm 时，则 56 d 氯离子扩散系数的设计最大限值为 $2.1 \times 10^{-12} \sim 2.6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 。当然，上述氯离子扩散系数设计值只是对应龄期 t_0 时的表观氯离子扩散系数，即按实际构件暴露于实际环境条件下计算得出的理论扩散系数，实际上用于工程质量控制的扩散系数——即最终工程质量控制指标是按照一定的模拟快速试验方法测试得出的，需要利用长期暴露试验和快速试验之间的关系进行相关性转换。

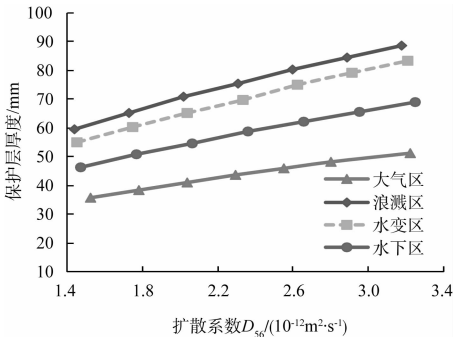


图 1 120 a 使用年限保护层厚度和理论氯离子扩散系数关系

3.2 基于全寿命成本的混凝土结构附加防腐蚀措施设计

按照上述设计，混凝土结构本身理论上可以达到 120 a 使用寿命。但是考虑实际施工的偏差、材料性能的波动、服役期环境和荷载的变化等不利因素，重要构件腐蚀严重部位存在较大的腐蚀风险，因此对重要构件、腐蚀风险大的关键部位尚需采取必要的防腐蚀措施，以提高必要的耐久性裕度。

何种构件、什么部位采用何种外加防腐蚀措施，需要考虑不同腐蚀环境混凝土构件腐蚀风险、不同防腐蚀措施的防腐效果和全寿命周期成本等因素综合考虑。

3.2.1 港珠澳大桥主体混凝土结构腐蚀风险评估

参照日本《混凝土结构耐久性设计指南及算例》^[6]，通过定量分析港珠澳大桥不同腐蚀区域的环境指数 S_p 和混凝土结构的耐久指数 T_p 来评价港珠澳大桥主体混凝土结构的腐蚀风险。环境指数

S_p 由设计使用年限和结构所处的腐蚀环境而定，腐蚀环境越严酷，该值越大；耐久指数 T_p 综合考虑设计、施工水平及材料、构造等耐久性多方面因素，通过计算后获得。 T_p - S_p 的差值越大，腐蚀风险越小，反之 T_p - S_p 的差值越小，腐蚀风险越大，则需要采取防腐蚀措施。

表 4 为混凝土构件的腐蚀风险分析结果，结果表明，除水下区的混凝土构件的 T_p - S_p 较大外，大气区、浪溅区和水变区的 T_p - S_p 值较小，需采取必要的外加防腐措施以降低腐蚀风险。

表 4 港珠澳大桥混凝土构件的腐蚀风险分析结果				
腐蚀环境	构件	耐久指数 T_p	环境指数 S_p	$T_p - S_p$
浪溅区	主塔	245.0	240	5.0
	墩身	242.4		2.4
	承台	245.0		5.0
	箱梁	240.8		0.8
	桥台	245.0		5.0
	沉管外壁	240.3		0.3
大气区	主塔	222.5	210	12.5
	墩身	219.8		9.8
	箱梁	211.3		1.3
	沉管内壁	215.7		5.7
水下区	墩身	231.2	180	51.2

3.2.2 基于全寿命成本分析的防腐蚀措施

混凝土结构附加防腐措施可分为两大类：一类通过阻止或延缓氯离子渗透进混凝土达到保护钢筋的目的，例如硅烷浸渍、混凝土涂层等；另一类通过提高钢筋的抗腐蚀性能延缓钢筋开始腐蚀时间或者降低钢筋腐蚀速率，如不锈钢钢筋、阴极保护以及环氧涂层钢筋等。具体采用何种外加防腐措施，不仅要考虑不同外加防腐措施的技术要求、特点和全寿命成本经济效益，还要兼顾不同腐蚀环境混凝土构件腐蚀风险。通过对不同外加防腐措施的技术可靠性、全寿命成本和结构腐蚀风险三者之间进行综合分析，提出港珠澳大桥主体混凝土结构附加防腐蚀措施（表 5），此外，对于浪溅区、水位变动区、大气区构件和沉管，还选择了有代表性部位埋设耐久性监测传感器，对沉管、主塔、桥墩等重要结构，还实施了钢筋电连接预设运营期阴极保护。

表 5 港珠澳大桥混凝土结构附加防腐蚀措施

构件所处部位	构件	防腐蚀措施
大气区		硅烷浸渍
浪溅区、 水位变动区	预制构件	环氧涂层钢筋 + 硅烷浸渍
	现浇构件	外层采用不锈钢钢筋
	沉管	结构自防水为主,沉管接头、浅埋段和敞开段外侧采取聚脲防腐

4 混凝土及耐久质量控制

4.1 长寿命海工高性能混凝土制备

港珠澳大桥服役环境恶劣、结构复杂，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。港珠澳大桥混凝土配制的基本原则是：在满足结构强度的前提下，以耐久性为重点，同时还要满足施工性、抗裂性和经济环保的要求，达到混凝土配合比参数和各项性能的和谐统一。

4.1.1 基于长期性能确定高耐久性混凝土胶凝材料体系

胶凝材料的组成是影响混凝土耐久性的重要因素，大量试验研究证明，掺粉煤灰、矿渣粉后的水化产物可结合氯离子，且能明显改善混凝土的孔结构而提高混凝土的抗氯离子渗透性^[7-8]。图 2 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等不同胶凝材料体系的混凝土中，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，混掺大量粉煤灰和矿粉的混凝土

显示了优异的耐久性，且粉煤灰和矿渣粉混掺可改善混凝土的工作性，大量使用还会降低混凝土的水化热，因此，确定港珠澳大桥长寿命海工高性能混凝土胶凝材料体系为粉煤灰和矿渣粉混掺。

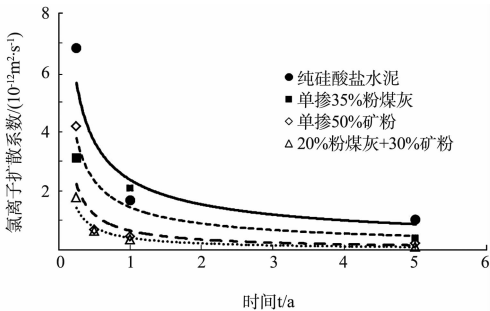


图 2 长期暴露试验混凝土氯离子扩散系数

4.1.2 针对构件的混凝土配合比设计和优化

与传统高性能混凝土配制思路和方法有所不同，港珠澳大桥海工高性能混凝土的配制方法具有以下特点：1) 除强度和耐久性外，还系统研究了胶凝材料体系、浆体体积率、水胶比、集料粒径和级配等对混凝土工作性和开裂性能的影响，更详细掌握了配合比参数对混凝土综合性能的影响。2) 针对不同构件的具体性能要求进行试配，且满足不同施工工艺要求。3) 在室内试拌的基础上，还进行了足尺模型试验，全面验证了混凝土的综合性能，配合比得到充分的优化。

研究得出港珠澳大桥基准配合比见表 6，经试验验证，各项性能均满足设计要求。工程实施后，各施工单位在上述基准配合比的基础上，结合各自情况在配制总体原则不变和满足设计及施工要求的前提下，允许对基准配合比进行适当调整。

表 6 桥梁典型构件混凝土基准配合比

构件	强度等级	编号	胶凝材料/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	水胶比	配合比/%				密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	坍落度/mm
					水泥	粉煤灰	矿粉	砂		
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
沉管	C45	CG-1	420	0.35	40	25	35	40	2 395	210
		CG-2	420	0.35	45	25	30	40	2 395	215
		CG-3	420	0.35	50	20	30	40	2 400	220

4.2 混凝土质量控制

对于混凝土施工质量控制, 国内外均有相应的标准规范。港珠澳大桥设计使用年限为 120 a, 且包含沉管隧道、人工岛与桥梁等不同结构形式, 设计标准高、技术复杂, 现行标准规范的质量控制措施很难覆盖全部内容, 需结合港珠澳大桥工程特点和技术要求, 在现有规范标准的基础上研究制定针对性强、便于操作、实用的质量控制措施, 对工程耐久性施工质量实施有效的控制。

针对港珠澳大桥工程特点, 根据研究成果制定了《港珠澳大桥混凝土耐久性质量控制技术规程》(简称《规程》), 《规程》经充分征求意见并反复修改后, 由港珠澳大桥管理局正式颁布用于指导工程施工的质量控制。

与现行标准规范的内容相比, 《规程》具备如下特点:

1) 标准制定的总体原则是: 考虑了国内和国际、水运和公路行业之间的标准差距, 兼顾了我国目前的施工和材料水平, 在能够满足要求的前提下, 尽量从严要求。

2) 针对港珠澳大桥工程的特点, 为了满足工程需要, 增加了现行国内外标准所缺失的内容。如针对沉管硬化混凝土密度的排水测定方法、为最大限度减少胶凝材料用量且不影响工作性的粗骨料粒型规定、混凝土配合比设计时需要考虑保证率的氯离子扩散系数配制目标值设定等。

3) 在充分论证的情况下, 为便于施工及有利于工程的质量控制, 允许对某些指标作适当调整。如规定了工程只能使用原状粉煤灰, 而不允许使用含有磨细成份的粉煤灰, 但允许使用Ⅱ级粉煤灰; 因耐久性由氯离子扩散系数和保护层厚度共同决定, 也考虑到实际施工情况, 允许对保护层厚度的控制标准适当放宽等。

4.3 沉管混凝土裂缝控制

港珠澳大桥包含有近 6 km 的海底隧道, 深埋于外海, 一旦渗漏, 将会危及耐久性和安全性, 要达到 120 a 的使用寿命, 则不允许出现危害性的裂缝。沉管每单位段尺寸为 22.5 m × 37.96 m × 11.4 m, 结构截面大、钢筋密集、混凝土全断面一次性浇筑体量达 3 400 m³, 对结构抗裂提出了

极高的要求。

1) 工程初步设计阶段即开展了“大断面矩形混凝土浇筑工艺及裂缝控制关键技术”课题研究, 通过必要的试验研究, 论证了采用低热低收缩高性能混凝土, 采取必要的温度控裂措施, 可控制沉管不出现危害性裂缝, 从而确定了全断面一次性浇筑沉管的施工方案。

2) 配制综合性能好的耐久性高、低热、低收缩海工高性能混凝土, 所配制的混凝土不仅满足 120 a 寿命耐久性 & 结构要求的强度, 而且水化热低、体积稳定性好, 并满足沉管全断面一次浇筑的工作性及顶推要求的早强要求等。

3) 开展混凝土温度应力试验, 建立沉管温度应力仿真计算模型, 输入沉管尺寸参数和材料性能参数, 结合现场环境和施工条件预设温度控制措施, 评估沉管开裂的风险。

4) 选取能代表裂缝控制的最不利部位, 如底板侧墙结合部、剪力键部位等进行小尺寸模型试验 (图 3), 通过模型试验测试调整混凝土配合比, 获取混凝土力学和热力学性能, 并修正温度应力计算模型。

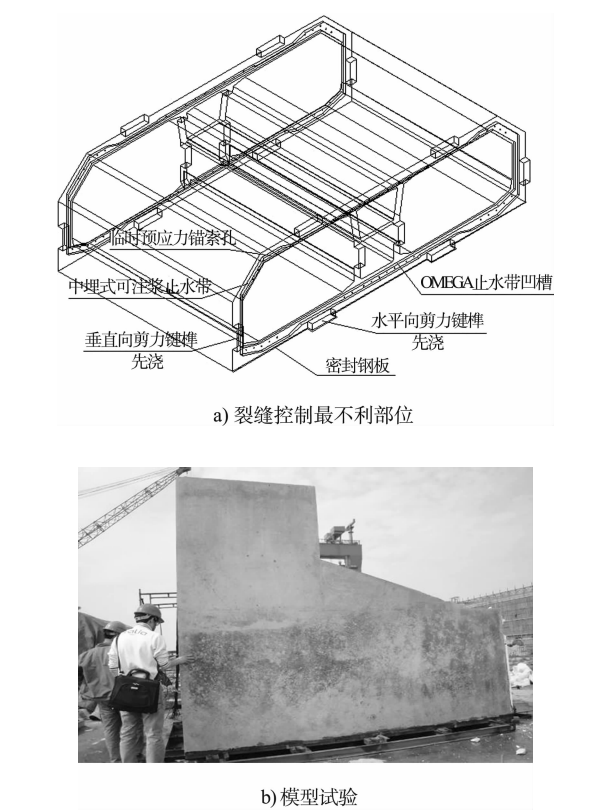


图 3 沉管小尺寸模型试验

5) 取标准管段的 1/4 进行足尺模型试验 (图 4), 完全按照现场条件和工艺进行浇筑施工, 并进行全部的性能测试, 通过足尺模型试验, 验证混凝土性能, 确定最终混凝土配合比; 验证控制仿真计算模型, 进一步完善控制措施; 验证大截面沉管全断面浇筑施工技术, 完善浇筑工艺和施工质量控制措施。

通过上述系列研究和现场试验, 制定混凝土温度控制指标 (表 7)。按照此控制指标, 施工中采取必要的温控措施如控制原材料温度、夏季拌

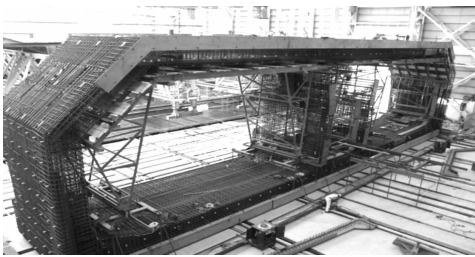


图 4 沉管足尺模型试验

合物加冰降温、采取养护棚加强养护及加强现场混凝土温度监控等, 未发现有害裂缝产生, 沉管裂缝得到了有效的控制。

表 7 沉管混凝土温度控制指标

季节	温度控制和温差/℃				降温速率/ (℃·d ⁻¹)	温差/℃	
	拌合物出机温度	混凝土入模温度	混凝土内最高温度	混凝土内外温差		表面温度和养护水温差	表面温度和环境温差
高温季节	≤23	≤25	≤70	≤22	≤3	≤15	≤15
低温季节	≤18	≤20	≤65				

5 营运期耐久性维护

尽管通过严格的质量控制, 施工建造出满足设计初期目标的建筑物, 但毕竟设计时尚存在一些不确定因素, 施工存在质量偏差、营运期环境和荷载都会发生变化、可能存在不可预见的外力作用等, 都会对工程结构耐久性产生影响。所以, 研究了港珠澳大桥营运期耐久性维护策略, 以期保证港珠澳大桥在 120 a 设计使用寿命周期内正常运行。

1) 制定贯穿整个服役周期的耐久性维护方案。

港珠澳大桥构件种类多, 所处环境部位不同的构件耐久性劣化时变过程也不同, 因此, 应针对不同的构件提出贯穿于整个服役周期的检查、监测和检测等维护方案。①结构施工完成后即进行针对构件的耐久性评估, 区别于常规的只针对材料性能和构造参数的检验评定, 而是将材料性能和构造参数结合起来进行的耐久性寿命预评估, 根据评估结果, 有针对性地采取重点维护和一般维护措施。②针对具体构件, 制定常规检查、定期检 (监) 测、专项检测的检测项目、内容、频次以及建立相应的档案管理制度, 以适时发现和掌握结构物的耐久性状态和变化情况。

2) 实行服役期工程原位暴露试验和实体构件监测相结合的动态耐久性评估。

在工程施工阶段, 在大桥西人工岛建立本工程原位暴露试验站, 采用与工程典型重要结构相同的材料制作的试件样本, 进行同环境条件暴露试验, 取样检测批次覆盖整个服役寿命周期; 同时对于主塔、桥墩及海底沉管等不可更换的主体混凝土结构构件, 在施工期埋入耐久性监测传感器, 以便及时掌握营运期氯离子侵蚀和钢筋锈蚀等耐久性状况。工程原位暴露试验和实体构件监测相结合, 一方面可以及时掌握氯离子腐蚀的实际情况; 另一方面可用于修正耐久性设计时的寿命模型, 对结构耐久性和使用寿命进行更准确的预测和评估。

3) 实施基于全寿命理论的耐久性再设计。

基于全寿命理论, 建立了与评估联动的耐久性再设计基本框架, 给出了耐久性劣化水平、维护措施与成本的对应关系, 制定不同构件的耐久性再设计预案, 如局部采取防腐蚀措施、更换涂层、启动阴极保护等, 及时对明显劣化的构件实施耐久性补强, 确保在正常使用情况下的预定服役寿命周期内不发生危及安全的耐久性损伤。