

港珠澳大桥浅水区组合梁桥防腐施工技术及 耐久性检测技术



摘要：港珠澳大桥在国内首次按 120 年使用年限设计，其结构形式复杂，工程建设规模巨大和施工难度大，腐蚀环境恶劣，对工程质量和耐久性要求更高。为满足本工程结构耐久性设计要求，针对本工程的特点，需制定系统的结构耐久性技术措施及防腐蚀附加技术措施，确保建设项目实现设计服役年限。港珠澳大桥浅水区组合梁桥各种构件不同强度等级的混凝土总量达 30 多万立方米。本文针对海工长寿命混凝土及附加多重防腐措施进行了介绍，并通过试验检测手段，分析了多种措施叠加对结构耐久性的有益影响。

关键词：桥梁防腐；施工技术；耐久性检测

1 工程概况

港珠澳大桥浅水区组合梁桥包括九洲航道桥（通航孔桥）和浅水区非通航孔桥。

港珠澳大桥位于珠江口伶仃洋上，属于外海洋环境综合工程，需要经受台风、潮汐、干湿交替、温度变化、盐雾侵蚀等作用。因此，如何有效提高严酷环境下港珠澳大桥结构耐久性工程需要解决的技术难题。环氧涂层钢筋、海工耐久性混凝土、硅烷浸渍涂装等技术措施已在我国重大土木工程中得到广泛应用，极大提高了结构的使用寿命。不锈钢钢筋、聚脲防水涂装、牺牲阳极阴极保护、耐久性监测、耐久性再设计，是在以往施工技术基础上，通过采取附加措施，达到延长混凝土结构耐久性和设计使用寿命要求。然而，这些技术在国内应用有限，缺少可借鉴资料，单一采用某种技术很难保证结构耐久性，需要根据各种材料自身特性并结合服役环境特点，开展比对研究，将多种防腐蚀附加措施相结合，确保大桥 120 年设计使用寿命要求。

2 混凝土结构耐久性设计

针对港珠澳大桥主体工程不同混凝土结构的特点，系统研究并制定了混凝土耐久性质量控制技术措施，主要包括：原材料遴选、配合比设计、混凝土耐久性指标、施工质量控制、附加防腐蚀辅助措施、耐久性监测等。

2.1 混凝土结构耐久性设计

混凝土耐久性设计包括工程结构设计使用年限组成分析及构件耐久性质量控制指标值，同一构件，按照最恶劣的环境作用等级设计混凝土的最大氯离子扩散系数，环境作用的差异通过最小保护层厚度取值来体现，详见表 1 和表 2。

表 1 港珠澳大桥工程结构设计使用年限组成分析

结构	构件	混凝土强度等级	环境作用等级	耐久性极限状态	设计使用年限（年）
非通航孔桥	组合梁桥面板	C60	III-D	(a)	120
	箱梁	C60	III-F	(a)	120
	桥墩	C50	III-C, E, F	(a)	120
	承台	C45	III-C, F	(a)	120
	桩基础（钢管复合桩）	C35	III-C	(a)	120
	桩基础（钻孔桩）	C35	III-C	(a)	120
通航孔桥	组合梁桥面板	C60	III-D	(a)	120
	箱梁	C60	III-F	(a)	120
	主塔	C60	III-D, E, F	(a)	120
	桥墩（辅助墩）	C50	III-E, F	(a)	120
	承台	C45	III-F	(a)	120
	桩基础（钢管复合桩）	C35	III-C	(a)	120
	桩基础（钻孔桩）	C35	III-C	(a)	120

注：①海洋氯化物环境，III-C 中度、III-D 严重、III-E 非常严重、III-F 极端严重；

② (a) 表示钢筋开始发生锈蚀，允许腐蚀介质侵入混凝土内部，但不允许钢筋发生锈蚀。

表 2 港珠澳大桥混凝土构件耐久性质量控制指标值

构件名称	部位/环境	混凝土强度等级	最小保护层厚度 (mm)	最大氯离子扩散系数 ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)	
				28d	56d
组合梁桥面板	大气区	C60	45	6.0	4.0
箱梁	内侧/大气区	C60	45	6.0	4.0
	外侧/浪溅区		75		
桥墩	内侧/大气区	C50	50	6.5	4.5
	外侧/大气区		50		
	浪溅区		80		
承台	浪溅区	C45	80	6.5	4.5
	水下区		65	7.0	5.0
钢管复合桩	水下区	C35	60	7.0	5.0
钻孔灌注桩	水下区	C35	65	7.0	5.0
通航孔桥主塔	大气区	C60	50	7.5	5.5
	浪溅区		80	6.5	4.5

2.2 混凝土结构耐久性施工技术

2.2.1 海工耐久性混凝土

根据《港珠澳大桥混凝土结构耐久性设计指南》、《港珠澳大桥混凝土耐久性质量控制技术规程》要求，海工混凝土采用硅酸盐水泥，混掺矿物掺和料总量占胶凝材料质量百分比可为 45-70%。在满足混凝土单位体积胶凝材料最低用量要求的前提下，尽可能降低水泥用量，使用大量粉煤灰、矿渣粉，以降低混凝土水化热温升、提高混凝土抗氯离子渗透性。根据不同结构部位，要求加入不同性能的聚羧酸系高性能减水剂；特殊工程部位，如桥面板负

弯矩区及湿接缝加入仿钢纤维、增韧剂或膨胀剂等。双掺时，I级粉煤灰掺量不大于30%，

S95 级矿渣粉掺量不大于 45%；混凝土水胶比一般不大于 0.36；混凝土拌和物的总碱含量不大于 $3.0\text{kg}/\text{m}^3$ （以 Na_2O 当量计）、氯离子含量不大于 0.06%胶凝材料总量及三氧化硫含量不大于 4%胶凝材料总量。通过掺加高性能减水剂，配制坍落度为 $200\pm 20\text{mm}$ 的可泵混凝土，用水量在 $140\text{--}150\text{kg}/\text{m}^3$ 。

2.2.2 耐久性附加技术措施

2.2.2.1 墩身不锈钢钢筋（英标 BS6744：2001+ A2：2009、牌号 1.4362）

处于浪溅区与水位变动区的混凝土构件，在构件外层采取不锈钢钢筋。从现场施工质量控制与成本分析，这种附加组合防腐措施具有最优的可操作性及经济性。

2.2.2.2 环氧涂层钢筋

港珠澳大桥浅水区组合梁桥处于海洋环境大气盐雾区，九洲航道桥钢-混组合梁桥面板、非通航孔桥 85m 钢-混组合梁桥面板，全部采用普通环氧涂层钢筋。

2.2.2.3 钢管桩防腐涂层

为保护好桩基混凝土不受氯盐腐蚀过早遭到破坏，桩基础采用的是永久性复合钢管桩，能有效保护混凝土并提高其寿命；同时，需做好复合钢管桩钢管的保护：通过附加防腐蚀措施研究比对，在钢管内、外进行防腐涂装，并将钢管桩通过导线与牺牲阳极阴极保护装置连接，即采取外加电流阴极保护，完全控制腐蚀及阻止点蚀。

2.2.2.4 牺牲阳极阴极保护

本工程混凝土结构的耐久性设计以氯离子侵入混凝土导致钢筋锈蚀的耐久性过程为主要对象，使用考虑设计变量统计规律的近似概率法进行耐久性设计，耐久性可靠指标定为 $\beta=1.3$ ；采用我国华南地区长期暴露试验数据和工程调查数据，对各耐久性设计变量进行概率统计分析；针对具体设计函数，得到耐久性设计关键参数的分布函数与分项系数，结合耐久性极限状态和设计使用年限要求，利用氯离子侵蚀过程的混凝土结构寿命预测模型计算得出满足 120 年耐久性要求的理论控制指标。再根据设计参数理论值与实验室快速试验测试值之间的相关关系，提出混凝土耐久性质量控制值。处于海水中的混凝土遭遇高浓度的氯盐侵蚀，氯离子带负电荷加速钢筋锈蚀。因此采用带正电荷的铝、锌、镉、镁、钛合金块——牺牲阳极，安装在墩身上，保证全天候浸泡于海水中，通过墩身、承台混凝土中预埋的铜芯电缆与海泥下的钢管桩连接，从而保护钢筋及复合桩钢管。

2.2.2.5 混凝土表面硅烷浸渍

为保证不可更换的主体构件在 120

年使用寿命周期内保持良好的耐久性，对处于大气区和海水区的承台、墩身混凝土构件采用硅烷浸渍防腐涂装。

2.2.2.6 结构混凝土保护层厚度设计

《港珠澳大桥混凝土结构耐久性设计指南》、《港珠澳大桥混凝土耐久性质量控制技术规程》规定，港珠澳大桥桥梁工程处于海水浪溅区的承台、墩身，其保护层厚度达到80mm，其他构件混凝土保护层厚度也达到45-75mm。荷载作用下的钢筋混凝土构件的表面裂缝最大宽度计算值：对于无干湿交替的构件应不超过0.30mm；对于处于干湿交替环境钢筋保护层应不超过0.20mm。

2.2.2.7 混凝土结构耐久性健康专项监测

为保证港珠澳大桥满足120年的设计使用寿命要求，需对大桥主体混凝土结构耐久性状况进行监测，以制定科学合理的维护方案。耐久性专项监测系统能定量监测混凝土内氯离子的浓度分布、钢筋腐蚀速率和混凝土电阻率，从而掌握影响大桥主体混凝土结构的耐久性健康状况的关键参数并定量预测其耐久性剩余使用寿命，为后期的管理维护和耐久性再设计提供数据支撑。

2.2.2.8 混凝土结构耐久性再设计

a 施工阶段耐久性评估再设计。

对于主塔及桥墩等主要混凝土结构，施工期将耐久性监测传感器布设入构件内，以及时掌握建设期钢筋混凝土的耐久性状况，对耐久性发展趋势进行预测，耐久性监测传感器具有即时测量钢筋的腐蚀动态及锈蚀速率、测量混凝土的电阻率、测试混凝土的氯离子含量或反映氯离子侵蚀过程。根据施工阶段混凝土构件的耐久性评估结果，针对耐久性质量不达标或者局部不达标的混凝土构件开展耐久性再设计工作，如增设补强方案或其他附加防腐措施。

b 运营阶段耐久性维护再设计。

工程交付使用前进行混凝土结构与构件的耐久性评估，使用耐久性设计阶段、施工阶段以及暴露试验数据对不同暴露环境中的混凝土构件进行耐久性全概率评估，得到的耐久性可靠性指标作为结构运营的耐久性起点状态。结构运营期间，针对混凝土结构和构件建立耐久性检测制度，检测制度根据不同需要分别建立验收检测、日常检测、定期检测、特殊检测以及终期检测的检测项目、频次以及相应的档案管理制度。及时采集混凝土结构耐久性监测系统数据，实时定量评估混凝土结构和构件的耐久性状态。当构件氯离子渗透深度超过预期，或钢筋提前进入脱钝状态，耐久性可靠指标评估值低于1.3，应及时增加防腐附加措施并加

强维护管理。

2.3 钢-混组合梁及钢塔除湿系统

为保证港珠澳大桥主梁钢-混组合梁及钢塔的长期使用寿命，防止钢材锈蚀及混凝土受盐雾等有害物质的侵害，确保箱室内部处于干燥状态。根据前期科研测试，箱梁内室湿度要低于 50%才能使钢-混组合梁免遭腐蚀，故通过增加除湿机进行人工干预来保证主梁及钢塔内的耐久性。

3 混凝土结构耐久性施工技术、检测及监测

3.1 混凝土组成材料及质量控制

采用优质硅酸盐水泥、I 级粉煤灰、矿渣粉、河砂、碎石及减水剂。细骨料为河砂，细度模数在 2.9，含泥量 0.5%；粗骨料为碎石，5-16mm 和 16-25mm 组合级配、5-16mm 和 10-20mm 组合级配，含泥量 0.2%，压碎值 5%，表观密度 2670kg/m³；减水剂为聚羧酸系高性能减水剂，减水率 29%，含气量在 2.7%。仿钢纤维为 TB-30 型有机合成仿钢纤维，以增加混凝土的韧性及反复荷载作用下的抗裂性能，其抗拉强度 503MPa、断裂伸长率 15.8%；增韧材料为 SBT®-ITM 原位增韧材料，掺量以胶凝材料总量计为 0.5%，主要技术指标：28d 天抗压强度比 96%、28d 断裂能耗比 179%、28d 抗冲击耗能次数比 200%；UEA 型补偿收缩膨胀剂，总碱含量不大于 0.75%，21 天限制膨胀率不小于-0.010%。

3.1.1 混凝土配合比设计及性能检测结果。负弯矩区桥面板 C60 纤维增韧混凝土配合比，经过多次比对设计，成果见表 5、表 6、表 7：

表 5C60 纤维增韧混凝土配合比数据 (kg/m³)

编号	水胶比	水泥	粉煤灰	矿渣粉	砂	碎石	水	外加剂	增韧剂	仿钢纤维	砂率
S1-02	0.30	317	73	97	695	1087	146	4.87	2.44	1.0	39%

表 6C60 纤维增韧混凝土拌和物性能指标

编号	坍落度 (mm)	扩展度 (mm)	含气量 (%)	表观密度 (kg/m ³)	泌水率 (%)	初凝时间 h: min	坍损 T1h (mm)
S1-02	200	510	2.2	2420	0.0	15: 05	10

表 7C60 纤维增韧混凝土力学及耐久性指标

3.1.2 通过对掺合料的使用结果比对：应用粉煤灰和矿渣粉双掺技术，辅以增韧材料和仿钢纤维，是配制出具有高抗压强度、高抗弯拉强度、高抗氯离子渗透、韧性好的微膨胀纤维增韧混凝土必备条件。对于桥面板组合湿接缝微膨胀纤维增韧混凝土，在设计时加入了 UEA 型膨胀剂，几组比对配合比力学和耐久性指标统计见表 8、表 9：

表 8 微膨胀纤维增韧混凝土试配比对数据 (kg/m³)

编号	强度等级	水泥 P. II 52.5	粉煤灰	矿渣粉① 膨胀剂②	砂	碎石	仿钢纤维	增韧剂	水	外加剂
S4-01	C60	297	69	89① 40②	692	1082	1.2	2.48	146	4.95
S4-02	C60	297	148	50 ②	692	1082	1.2	/	146	4.95
S4-03	C50	297	148	50 ②	692	1082	/	/	146	4.95

表 9 C60 纤维增韧混凝土性能指标测试结果

编号	28d 抗压强度 (MPa)	28d 抗折强度 (MPa)	28d 劈裂抗拉强度 (MPa)	28d 弹性模量 (GPa)	56d 氯离子扩散系数 ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)	抗裂等级	28d 弯曲韧性指数 I_{20}	21d 收缩率 ($\times 10^{-6}$)
S4-01	81.6	8.7	5.81	40.3	2.6	L-V	10.82	190
S4-02	79.1	7.8	5.64	39.7	5.0	L-IV	8.68	182
S4-03	78.5	7.6	5.49	40.1	4.8	L-IV	9.28	195

表 8、表 9 数据反映，在不掺加矿渣粉的情况下，S4-02、S4-03 混凝土实测 56 天氯离子扩散系数值均超过了设计要求 ($\leq 4.0 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)，测试过程见图 1、图 2：



图 1 混凝土氯离子扩散系数测试 图 2 混凝土抗折及弯曲韧性试验

3.1.3 混凝土生产质量控制——搅拌站质量体系认证制度

在港珠澳大桥主体工程混凝土的质量管理中，建设单位按照国际标准相关管理模式，对用于主体工程的混凝土实行产品质量认证制度，包括混凝土搅拌站质量管理体系、机械配置、组织机构及人员配备、原材料质量、混凝土拌和物性能、耐久性指标等。用于主体工程施工的混凝土搅拌站，全部需要通过澳门土木工程实验室的质量管理体系审核、型式检验、中间核查，未经认证合格不得生产主体结构混凝土。

编号	R5 抗压 (MPa)	R28 抗压 (MPa)	R28 抗折 (MPa)	R28 劈拉 (MPa)	R28 弹模 (MPa)	氯离子扩散系数 ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)	
						28d	56d
S1-02	61.2	80.6	8.8	5.86	41000	5.3	2.8

3.1.4 新拌混凝土温度控制

《港珠澳大桥混凝土耐久性质量控制技术规程》及《港珠澳大桥混凝土认证细则》规定，主体工程混凝土出机温度不得高于 28°C ，一般控制在 10°C – 28°C 之间。港珠澳大桥所处地理位置是南方潮湿闷热的海洋环境，因此，要满足温度要求，须在混凝土搅拌站配备制冰机或冷水机组。本工程选用“SNOWKEY”品牌制冰机和冷水机组，制冰机每小时可生产 2 吨冰屑，冰库还可以提前制备储存 32 吨冰屑，夏季一般每立方混凝土加入 50–60 公斤冰屑置换拌和水；冷水机组每小时可产生 1.5°C 冷水 15 吨，并带有一个可以储存 20 吨冷水箱，经计量后直接加入搅拌机；制冷机组见图 3、现场浇筑见图 4：

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/406201030010010221>