

杭州湾跨海大桥混凝土结构耐久性解决方案

杭州湾大桥工程指挥部 陈 涛

摘 要: 影响海洋环境下混凝土结构耐久性最主要因素是氯离子渗透引发的钢筋腐蚀。提高混凝土本身抗氯离子渗透的能力和设置合理的钢筋保护层厚度是提高耐久性的基本措施, 经济可行。为满足结构使用年限的要求, 在尽量降低工程造价的前提下, 对腐蚀条件恶劣和结构构造存在隐患的部位采用相应的耐久性补充措施是提高混凝土结构耐久性的有效途径。

1 工程概况

1.1 地理位置

杭州湾跨海大桥是国道主干线——沈海高速跨越杭州湾的便捷通道。大桥北起嘉兴市海盐郑家埭, 跨越宽阔的杭州湾海

域后止于宁波市慈溪水路湾, 全长36km。大桥建成后缩短宁波至上海间的陆路距离约120km。

1.2 设计概况

采用双向六车道高速公路标准, 设计时速100Km/h。

主体工程包括: 北引线、北引桥、北航道桥、中引桥、南航

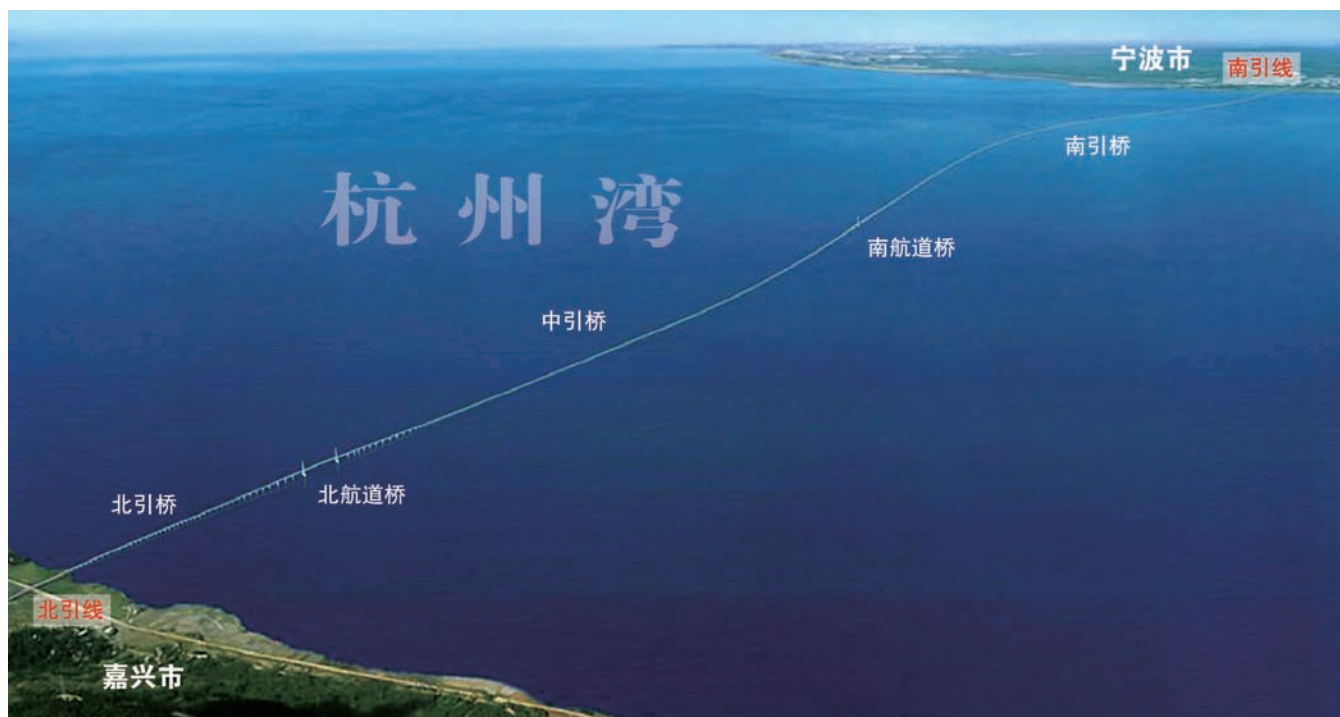


图 1 主体工程部位示意图

道桥、南引桥、南引线七大部分；其中通航孔桥长1486m，非通航孔桥长34187m，所占比例超过95%。（图1）

1.3 工程规模（表1，后为附图）

1.4 建设条件

杭州湾地处世界三大强潮海湾之一，建桥条件受气象、水

表 1 全桥主要工程数量

名称	单位	数量
混凝土	立方米	245万
各类钢材	吨	80万
钢管桩	根	5513
钻孔桩	根	3550
预制桥墩	个	474
现浇箱梁	孔	160
50m预制箱梁	片	404
70m预制箱梁	片	540



① 钢管桩5513根



② 钻孔桩3550根



③ 海上承台543个



④ 50m预制箱梁404片



⑤ 70m预制箱梁540片



⑥ 海上承台543个

文、地质、冲刷及浅层气等多种自然条件的影响, 施工条件恶劣, 主要具有以下特点:

a. 台风多: 2004年~2007年施工期间影响杭州湾地区的台风多达19个。(图2)

b. 潮差大: 最大潮差7.57m, 平均潮差4.65m。(图3)

c. 潮流急: 平均流速2.39m/s, 实测最大流速5.16 m/s。(图4)

d. 冲刷深: 呈现冬冲夏淤的演变规律, 施工期, 南岸滩涂最大冲刷为15.5米。(图5)

e. 腐蚀强: 海水实测氯离子含量在5.54 g/L~15.91 g/L之间, 对结构具有比较强的腐蚀作用。(图6)

f. 浅层气: 南岸滩涂区富含浅层气。(图7)



图 5 冲刷深



图 2 台风多



图 3 潮差大



图 4 潮流急



图 6 腐蚀性强



图 7 富含浅层气

2 混凝土结构耐久性总体方案

对浙东沿海混凝土结构工程,一共作了两次调查:分别在1994年、2000年。

调查结果:80%以上都发生了严重或较严重钢筋锈蚀破坏,出现锈蚀破坏的时间有的不到10年。

分析显示,混凝土中性化、碱骨料反应、硫酸盐侵蚀、海洋生物及海流冲刷等并不是混凝土结构劣化的主要原因,影响混凝土结构耐久性的主导因素是 Cl^- 的侵蚀。(图8)

为保障大桥满足百年设计使用寿命要求,由杭州湾大桥工程指挥部牵头组织有关高校及大桥主体设计单位进行联合攻关,前后历时5年,从混凝土结构腐蚀机理、混凝土原材料指标、

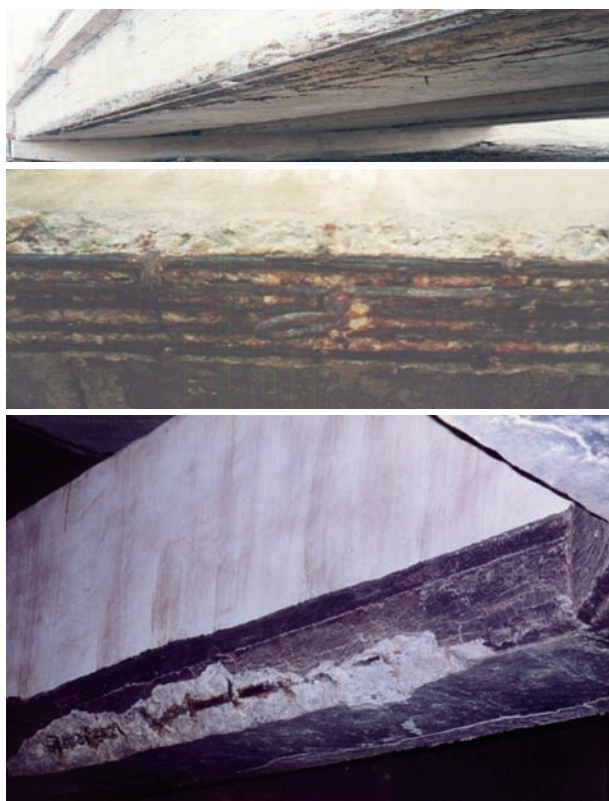


图8 Cl^- 侵蚀对混凝土的破坏(中图为仰视图)

表2 工程部位与环境分区、类别等级

环境类别等级	环境分区	工程部位
C	浸没于海水的水下区、海泥区	桩基、陆地区承台
D	接触空气中盐分,不与海水直接接触的大气区(10.21 m以上)	箱梁、陆地区桥墩、航道桥中上塔柱
E	潮差区(-4.56 m~1.88 m)	海中承台
F	浪溅区(1.88 m~10.21 m)	海中桥墩、下塔柱

混凝土配合比设计原则、耐久性设计措施及施工规程制订、耐久性监测评估及验证等方面进行研究,集成交通部重点科技项目、浙江省交通科技计划项目、国家高科技研究发展计划(863计划)、浙江省自然科学基金等项目研究成果,形成成套耐久性技术,并直接应用于大桥的混凝土结构设计与施工实践。

按照离子扩散理论FICK第二定律,混凝土结构的耐久性与混凝土本身的氯离子扩散系数和钢筋保护层厚度密切相关。混凝土氯离子扩散系数越小,结构的钢筋保护层厚度越大,混凝土结构的使用年限也越长。

因此,必须根据结构所处的位置和腐蚀环境,区分不同侵蚀作用等级,制定不同层次的混凝土结构耐久性措施。(见表2)

2.1 基本措施

采用海工耐久混凝土和设置合理的钢筋保护层厚度,作为保证大桥混凝土结构100年设计使用年限的基本措施。

采用的海工耐久混凝土,主要以氯离子扩散系数为控制参数,在原材料遴选方面,主要考虑使混凝土具备高抗氯离子扩散能力、高抗裂性能、高工作性能。

2.2 附加措施

根据不同的情况和环境采用混凝土结构表面防腐涂装、预应力筋保护、渗透性控制模板、局部使用环氧钢筋和阻锈剂以及外加电流阴极防护等附加措施。

2.3 监测措施

设置预埋式耐久性监测系统,用于长期动态获取耐久性参数,制定本工程相应的耐久性预案。

2.4 验证措施

建立耐久性暴露试验站,对上述措施进行验证和参数校核,为后续工程提供经验,也为国家规范的修订提供第一手资料。

3 混凝土结构耐久性基本措施

3.1 海工耐久混凝土

海工耐久混凝土是指采用常规原材料、常规工艺、掺加矿物掺合料及化学外加剂,经配合比优化而制作的,在海洋环境中具有高耐久性、高稳定性和良好工作性的高性能结构混凝土,它以氯离子扩散系数为核心控制指标,采用大比例掺入矿物掺合料和低水胶比降低氯离子扩散系数。

海工耐久混凝土配制原则:

1. 选用低水化热和较低含碱量的水泥;
2. 选用高效减水剂(泵送剂),取用偏低的拌合水量;
3. 限制混凝土中胶凝材料的最低和最高用量,并尽可能降低胶凝材料中的硅酸盐水泥用量;
4. 必须掺用粉煤灰、磨细矿渣等矿物掺和料;

- 5. 潮差区(E级)和浪溅区(F级)侵蚀环境的混凝土构件应适量加入掺入型钢筋阻锈剂;
- 6. 通过适当引气来提高混凝土的耐久性;
- 7. 对混凝土拌和物中各种原材料引入的氯离子总质量进行控制;
- 8. 严格控制混凝土浇筑入模时的坍落度等。(表3、表4、表5,图9)

实际的混凝土配合比设计严格按照制定的海工耐久混凝土配制原则进行,掺合料的用量均达到胶凝材料用量的50%以上;混凝土的基本性能和耐久性性能均达到了预期的目的,其中

决定混凝土耐久性的关键指标,氯离子在混凝土中的扩散系数DRCM也很理想。

另外,从试验的测试结果和实际应用来看,海工耐久混凝土的早期抗裂性能优于普通混凝土。

3.2 合理的钢筋保护层厚度

理论上,结构的保护层越厚,氯离子扩散到钢筋表面的路径越长,钢筋表面氯离子积累到临界浓度时间也越久。但是,保护层过厚会限制构件力学性能的发挥,并且不利于对裂缝宽度进行控制,因此,需要根据结构部位和受力特点,设置合理的钢筋保护层厚度。(表6)

表 3 混凝土抗氯离子渗透性

结构部位		12W氯离子扩散系数 10 ⁻¹² m ² /s
钻孔 灌注桩	陆上部分	≤ 3. 5
	滩涂、海上部分	≤ 3. 0
承台	陆上部分	≤ 3. 5
	滩涂、海上部分	≤ 3. 0
墩身	陆上部分(现浇)	≤ 3. 5
	滩涂、海上(现浇)	≤ 2. 5
	滩涂、海上(预制)	≤ 1. 5
箱梁、桥塔		≤ 1. 5

测试方法:RCM法



图 9 试验装置

表 4 海工耐久混凝土典型配合比

部位	水胶比	每方混凝土各种材料用量(Kg)							
		水泥	矿粉	粉煤灰	砂	石子	水	减水剂	阻锈剂
陆上桩基	0.36	165	124	124	754	960	149	4.13	/
海上桩基	0.31	264	/	216	753	997	150	5.76	/
陆上承台、墩身	0.36	170	85	170	742	1024	153	4.25	/
海上承台	0.33	162	81	162	779	1032	134	4.86	8.1
海上现浇墩身	0.345	126	168	126	735	1068	145	5.04	8.4
海上预制墩身	0.31	180	90	180	779	1032	139	5.4	9.0
箱梁	0.32	212	212	47	724	1041	150	1.0	/

表 5 海工耐久混凝土实测性能

部位	28d抗压强度 (MPa)	84d D _{RCM} (X10 ⁻¹² m ² /S)	坍落度 (cm)	扩展度 (cm)	抗裂性能
陆上桩基	39.3	1.37	21	43	良好
海上桩基	53.8	1.57	22	55	良好
陆上承台、墩身	39.3	1.21	21	42	良好
海上承台	57.4	0.73	18	/	良好
海上现浇墩身	56.0	0.68	18	55	良好
海上预制墩身	57.6	0.37	18	/	良好
箱梁	68.8	0.34	18	40	良好

表 6 杭州湾跨海大桥混凝土构件钢筋保护层厚度

结构部位		腐蚀环境	保护层厚度 (mm)
钻孔桩		水下区及泥下区	75
承台	海上	水位变动区	90
	陆上	大气区	75
桥墩		浪溅区及大气区	60
箱梁		大气区	40

4 混凝土结构耐久性附加措施

4.1 塑料波纹管与真空辅助压浆

对于预应力混凝土结构,孔道的不密实极易造成高应力状态下预应力筋的锈蚀。为增强预应力孔道压浆的密实性,提高预应力体系的耐久性,大桥预应力混凝土箱梁采用耐腐蚀、密封性能好的塑料波纹管,配合真空辅助压浆技术,作为预应力混凝土结构的耐久性措施之一。

斜管试验和足尺模拟试验:

采用高性能真空辅助压浆助剂配制的浆体和配套的压浆工艺进行真空压浆,孔道浆体饱满、密实,可有效提高预应力系统的耐久性。(图10、图11)

4.2 环氧涂层钢筋

美国试验与材料学会调查显示:采用环氧涂层钢筋可延长结构使用寿命20年左右。

杭州湾跨海大桥在腐蚀最为严重的浪溅区现浇墩身中采用环氧涂层钢筋。

实践表明:环氧钢筋在运输和施工过程中极易损伤涂层,易导致钢筋的点腐蚀,加速结构耐久性下降,保证膜层完整性是环氧钢筋有效性的关键。(图12)

4.3 钢筋阻锈剂

与普通混凝土相比,海工耐久混凝土:

- 1.使腐蚀介质(Cl^-)达到钢筋表面的量减少;
- 2.密实的混凝土又能长期有效地保持钢筋阻锈剂的高浓度,使阻锈剂得以长期地发挥抑制或延缓钢筋电化学腐蚀的性能。

杭州湾大桥工程水位变动区的承台和浪溅区的墩身使用了掺入型阻锈剂。(表7)

4.4 外加电流阴极防护

外加电流阴极保护原理:通过外加电流,把电源正极连接在难溶性辅助阳极上强制形成阳极区;把电源负极连接在受保护的钢筋上,强制形成阴极区。阳极与被保护的钢筋处于连续的电介质中,使被保护的钢筋接触电介质的全部表面都充分而且均匀地接受自由电子,从而受到阴极保护。



图 10 斜管试验浆体切片



图 11 试验梁压浆试验



图 12 环氧涂层钢筋

表 7 实验项目测试结果

性能	试验项目	本工程专用技术规范的指标	实测结果
防锈性	盐水浸渍试验	失重率减少40%以上	45.6%
	电化学综合试验	15min电荷跌落值不超过50mV	35mV
对混凝土性能的影响试验	抗压强度比	$\geq 90\%$	98%
	抗渗性	不降低	不降低
	初终凝时间/min	± 60 (对比基准组)	初凝+50 终凝+55

外加电流阴极保护系统组成：钛网、参比电极、连接装置、供电装置、计算机控制、遥控监控管理系统等。

大桥南、北航道桥承台、塔座及下塔柱采用了该项技术。（图13、图14、图15）

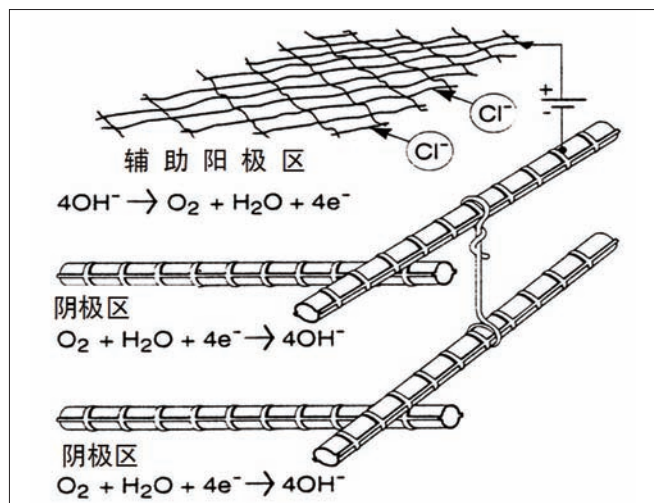


图 13 外加电流阴极保护结构示意图

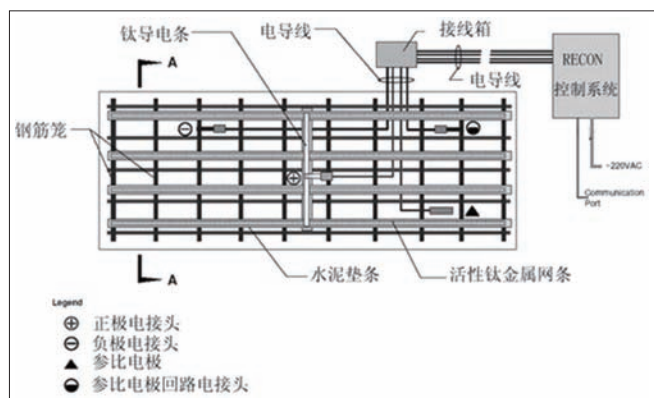


图 14 外加电流阴极保护系统示意图



图 15 阴极保护系统施工现场

4.5 渗透性控制模板

渗透性控制模板：可以把刚入模的混凝土表面多余的空气和水排出，大大降低混凝土表面水胶比，同时可确保混凝土在养护期间保持高湿度，将裂缝风险减到最低，从而可大幅提高混凝土表面的密实度和强度。

实践表明：使用渗透性控制模板可大大改善混凝土外观质量，提高混凝土表面的抗裂性、抗渗性和耐久性。（图16、图17）



图 16 没有使用渗透性控制模板（左）与使用了渗透性模板（右）的效果对比



图 17 使用渗透性控制模板施工现场

4.6 混凝土表面涂层

大桥承台以上混凝土结构均采用封闭型涂装体系进行表面涂装，涂层设计使用年限为20年。承台为表湿区，采用具有湿固化和快固结性能的涂料。梁部结构和墩身为表干区，采用耐候性、保光和保色性能良好的涂料。（图18、图19、表8、表9）



图 18 涂装后的桥墩与桥体



图 19 涂刷涂料现场

表 8 表湿区混凝土表面涂层配套

涂层名称	配套涂料名称	涂层干膜平均厚度 (μm)
底层	湿固化环氧树脂封闭漆	≤ 50
中间层	湿固化环氧树脂漆	< 310
面层	聚氨酯面漆	90
涂层总干膜平均厚度		400

表 9 表干区混凝土表面涂层配套

涂层名称	配套涂料名称	涂层干膜平均厚度 (μm)
底层	环氧树脂封闭漆	≤ 50
中间层	环氧树脂漆	< 260
面层	聚氨酯面漆	90
涂层总干膜平均厚度		350

5 混凝土结构耐久性监测措施

5.1 设置耐久性监测措施的目的

根据国际上通用的耐久性预测模型和实测的参数,上述耐久性措施已经可以保证大桥混凝土结构至少百年的使用年限。

(图20)

然而,海洋环境混凝土结构的耐久性预测的准确性问题在国内外尚无定论,为了掌握大桥混凝土结构脱钝前锋面的发展进程,确认混凝土结构耐久性防护措施的有效性,对大桥的使用性能和寿命进行可靠的预测和评估,设置了预埋式耐久性监测系统。

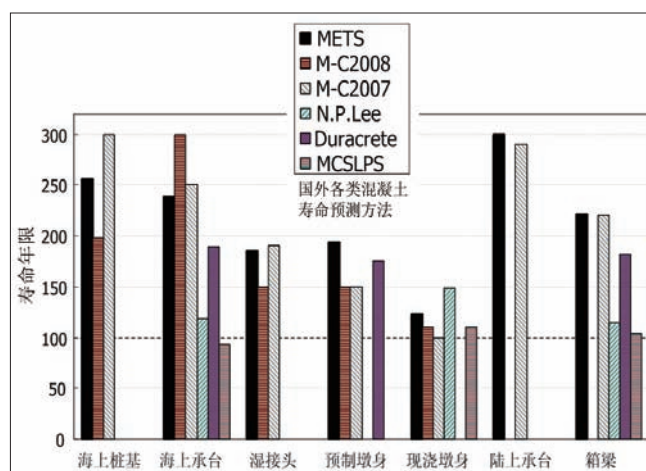


图 20 杭州湾跨海大桥混凝土结构主要构件各种寿命预测结果比较

5.2 预埋式耐久性监测系统

采用梯形阳极混凝土结构预埋式耐久性无损监测系统。

1. 使用同种原材料,模拟实际环境,利用试验室测试数据,建立可靠的考虑应力、温度、湿度影响的钢筋腐蚀电化学参数和输出光功率变化的脱钝判据。

2. 海洋环境钢筋脱钝对比传感器和电极的集成、率定和调试。

3. 编制测量数据管理、钢筋腐蚀风险评估和结构使用年限推算程序。

通过建立钢筋脱钝前锋面发展进程的数学模型,而且使这个模型能够不断得到新反馈信号的校正。然后通过拟合得到钢筋开始生锈时间(t_1),如果 t_1 小于设计使用年限,就可以对结构进行耐久性再设计,及时启动腐蚀保护预案,并继续对前锋面的进展进行监测,以确认腐蚀保护措施的效果;如果采取措施后的 t_1 仍小于设计使用年限,那么在工程进入腐蚀阶段前仍有机会采取经济的补救措施。(图21、图22)

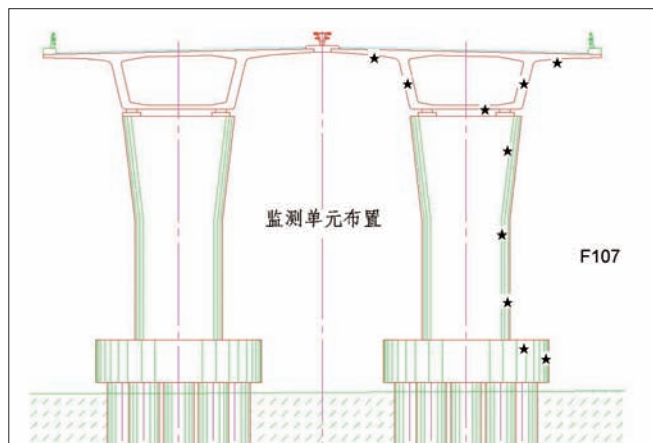


图 21 监测单元布置



图 22 监测元件预埋



图 23 暴露试验站



图 24 试验站局部

6 混凝土结构耐久性验证措施

6.1 建立暴露试验站的目的

获取大桥实际混凝土结构在海洋环境作用下的耐久性实际参数,验证各种耐久性防护措施的有效性和局限性,为其他类似后续工程提供经验,为国家规范的下一步修订提供第一手资料。

通过暴露站实际使用环境和人工模拟环境中混凝土试件的对比分析,建立两者联系,从而实现利用人工模拟快速试验的结果推测大桥实际使用性能和寿命。(图23、图24)

6.2 暴露试验研究内容

分析现有混凝土结构寿命预测模型,选择适用于杭州湾跨海大桥的模型并进行寿命预测。

暴露试验场混凝土结构的耐久性试验研究与分析。从现场暴露试验结构中取样,进行材料和结构的耐久性参数检测。预埋大桥使用的梯形阳极系统,验证混凝土结构耐久性监测系统的可靠性。

检测混凝土中的氯离子分布,实测混凝土抵抗氯离子扩散的能力,实测实际环境下钢筋锈蚀的临界氯离子含量和钢筋锈蚀速度。

7 几点体会

影响海洋环境下混凝土结构耐久性最主要因素是氯离子渗透引发的钢筋腐蚀。提高混凝土本身抗氯离子渗透的能力和设置合理的钢筋保护层厚度是提高耐久性的基本措施,经济可行。

为满足结构使用年限的要求,在尽量降低工程造价的前提下,对腐蚀条件恶劣和结构构造存在隐患的部位采用相应的耐久性补充措施是提高混凝土结构耐久性的有效途径。

建立耐久性动态无损监测和评估系统,对混凝土结构的耐久性状态进行跟踪,必要时可采取相应的措施对结构进行耐久性再设计,以确保其设计使用年限;根据测评结果,验证和修正耐久性预测理论,为理论的进一步完善提供必要的参考。

适当的施工工艺和严格的质量控制是保证混凝土结构耐久性,实现设计意图和转化科研成果的基本前提和保证。

编后:本文为杭州湾大桥工程指挥部陈涛在中国混凝土与水泥制品协会预拌混凝土分会成立暨首届预拌混凝土技术交流会上所作的学术报告整理而成。杭州湾大桥是世界最长的跨海大桥,服役条件严酷。报告中所介绍的解决混凝土结构耐久性的综合措施,一直被我国混凝土与桥梁业界同行关注和重视,现提供给业界参阅。