

文章编号: 1002-0268 (2010) 09-0001-04

青岛海湾大桥长寿命运营管理 理念与技术保证措施

周 勇¹, 姜言泉², 邵新鹏²

(1. 山东高速集团有限公司, 山东 济南 250002 2 山东高速青岛公路有限公司, 山东 青岛 266061)

摘要: 通过耐久性方案的合理设计、施工过程的精细控制、关键参数的在线监测、结构状态的科学评估和大桥管养的有效及时等过程控制, 全面提高青岛海湾大桥的运营效率, 实现大桥全寿命周期成本最优配置。通过耐久性在线监测, 动态评估结构剩余使用寿命, 确定技术可行、经济合理的防腐蚀技术措施, 最终建立基于动态数据的桥梁管养技术。

关键词: 桥梁工程; 青岛海湾大桥; 动态评估; 结构耐久性; 运营管理

中图分类号: U491; U445.7⁺3

文献标识码: A

Long Life Operation and Management thoughts and Corresponding Technologies of Qingdao Bay Bridge

ZHOU Yong¹, JIANG Yanquan², SHAO Xinpeng²

(1. Shandong Hi-Speed Group Co., Ltd., Jinan Shandong 250002 China

2 Qingdao Highway Co., Ltd., Shandong Hi-Speed Group Qingdao Shandong 266114 China)

Abstract: The operation efficiency of Qingdao Bay bridge was largely improved and the allocation of life-cycle cost was optimized through reasonable design of durability scheme, intimate control of construction process, on-line monitoring of key parameters, scientific assessment of structure condition, and implement of effective and opportune bridge maintenance measures. The effective and economic anti-corrosion measures were confirmed and the management and maintenance technology of Qingdao Bay bridge based on the dynamic data abstracted from the real structure body was established through durability on-line monitoring and residual life assessment.

Key words: bridge engineering; Qingdao Bay Bridge; dynamic assessment; structural durability; operation and management

0 前言

从国内外腐蚀情况来看, 建筑腐蚀损失占社会总腐蚀损失的比例日趋上升。有资料表明, 美国与钢筋锈蚀有关的损失可占总腐蚀损失的 40%, 仅桥梁腐蚀破坏约占腐蚀损失的 20%。技术先进国家, 每年总腐蚀损失可占国民经济总产值的 3%~5%^[1]。我国有些海港、桥梁工程, 在正常使用十几年后甚

至几年就开始修复, 远没达到设计使用年限的要求。

为了摸清海洋环境下由材料腐蚀引起的结构功能退化规律, 交通部有关单位分别于 1963 年、1965 年、1980 年针对我国沿海港口工程混凝土结构破坏状况组织了 3 次调查^[2]。调查结果显示, 1980 年前修建的港口混凝土结构由于没有针对氯离子侵入引发的钢筋锈蚀采取有效的防护措施、确定关键的技术指标如钢筋保护层厚度、混凝土水胶比等, 而导

收稿日期: 2010-08-16

基金项目: 省部联合攻关课题资助项目 (2009353337510)

作者简介: 周勇 (1962—), 男, 山东胶南人, 研究员, 研究方向为土木工程管理。(spli2007@163.com)

致结构物开裂破坏相当严重。国家分别于 1999 年和 2000 年启动了工程院咨询项目“中国工业与自然环境腐蚀问题调查与对策”和“工程结构的安全性及耐久性研究”，调查研究发现，施工与运营管理水平低下是缩短结构设计使用寿命的主要原因之一^[3]。

近海桥梁过早出现设计功能严重退化的主要原因包括：（1）设计阶段对桥梁服役环境的严酷性以及结构材料功能退化的规律认识不足、防腐蚀技术措施的选用不当；（2）施工阶段没有采取有效保障结构耐久性的施工工艺和技术措施；（3）运营阶段没有实时评估桥梁结构的耐久性状态并及时采取相应的维护措施。

根据目前国内外桥梁的服役状态，地处冰冻海域的青岛海湾大桥，不仅要延缓由氯盐侵入导致的钢筋腐蚀，还要防止混凝土在自然冻融循环条件下的过快劣化。以冰冻、高盐为主要特征的服役环境对钢筋混凝土结构和钢结构的腐蚀非常严酷。由于处于作用等级从中等程度（C 级）至非常严重程度（E 级）的氯盐腐蚀环境和北方微冻的近海或海洋环境^[4]，结合大桥的结构型式和设计使用年限、材料劣化规律、防腐措施的有效性等方面，通过系统深入研究，确定科学、合理的大桥长寿命运营管养技术方案。

1 工程简介及服役环境特点

青岛海湾大桥位于胶州湾北部，是我国北方寒冷冰冻地区的首座特大型海上桥梁集群工程，设计基准期 100 a 为双向 6 车道（主线桥宽 35 m）的高速公路，工程全长 35.4 km，分期实施，一期工程全长 28.880 km，其中海域段 27.089 km，陆上段 0.827 km，基础均采用钻孔灌注桩。大桥主要由 3 座通航孔桥、2 座海上互通立交和非通航孔桥组成，通航孔桥箱梁采用钢结构型式。

胶州湾海域的最冷月平均气温为 -0.5°C ，极端最低气温为 -14.3°C 。一般情况下，胶州湾海域年平均自然冻融循环次数为 47~52 次；胶州湾海域海水的含盐度高达 29.4‰~32.9‰，其中 Cl⁻ 浓度为 17.7‰。

2 青岛海湾大桥长寿命运营管理方案的设想

将长寿命运营管理理念贯穿于设计、施工、运营维护各个阶段（见图 1），并在各阶段开展工作。

2.1 设计阶段

针对青岛海湾大桥工程的服役环境和耐久性要

求，结合科研成果对耐久性技术措施进行比选，提出以防腐混凝土和钢筋保护层厚度作为保证混凝土结构耐久性的根本措施，透水模板布技术为防腐蚀混凝土的改善措施，表层涂装、混凝土套筒和阴极防护为混凝土结构耐久性辅助措施。一体化设计结构健康监测系统与巡检养护管理系统，以指导结构的运营管理，验证设计参数，最大限度地保证大桥安全运营，延长大桥使用寿命。

（1）确定钢筋保护层厚度

确定合理的钢筋保护层厚度是保证钢筋混凝土结构使用寿命最有效、简单且经济的方法之一，但保护层厚度并不能任意增加。当保护层厚度过大，混凝土的收缩特性和极限变形能力不协调时就会导致钢筋保护层混凝土开裂，反而削弱其对钢筋的保护作用。对于大型混凝土构件尤其是受弯拉构件而言，保护层厚度的增加会显著提高构件的自重，因此须根据工程的实际需要设置合理的保护层厚度。

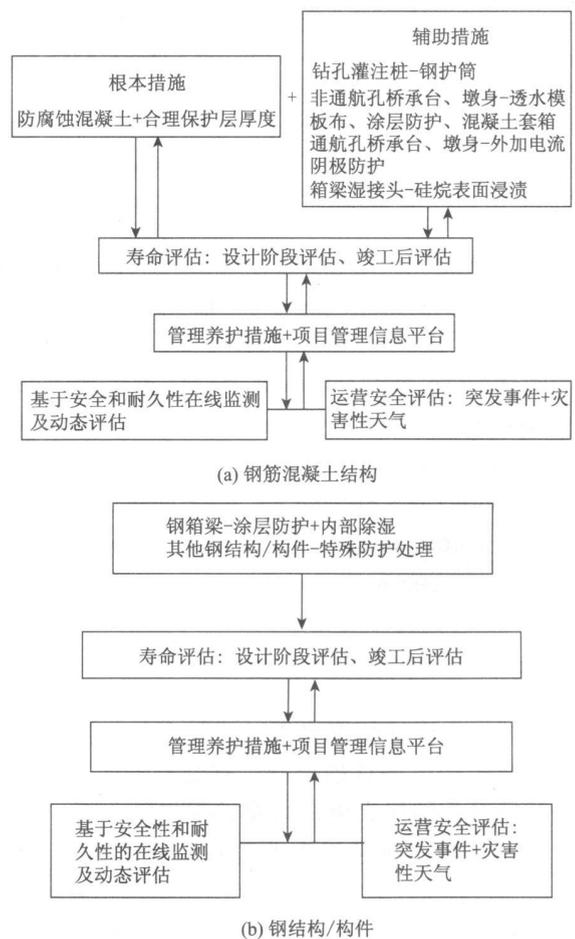


图 1 青岛海湾大桥长寿命运营管理技术路线
Fig 1 Long life operation and management technology scheme of Qingdao Bay Bridge

（2）防腐蚀混凝土技术

基于大桥所在海域的特点, 提出以体积稳定性、抗氯离子渗透性和抗冻性作为防腐蚀混凝土耐久性设计的控制参数。为确保混凝土材料的耐久性, 对海湾大桥用混凝土的各项指标进行了专项课题研究和专家论证。根据服役环境作用以及等级划分, 分别针对灌注桩、承台、墩身、箱梁、塔柱、防撞护栏等构造物制定了科学、合理、实用、经济的性能技术指标。配制出满足施工工作性、体积稳定性、力学性能以及长期耐久性的混凝土是保证青岛海湾大桥安全建设与高效运营的关键, 其中混凝土的耐久性设计尤为重要, 对此进行了专项课题研究, 并编制了专项技术规范 (《青岛海湾大桥防腐蚀混凝土设计与施工技术规范》)。

对钢筋混凝土结构物而言, 保护层范围内混凝土是外界侵蚀性介质进入结构物的第一道屏障, 很多寿命预测模型是以 Cl^- 达到钢筋表面的时间作为结构物的有效使用寿命。提高结构物保护层范围内混凝土的质量非常重要, 对大体积混凝土结构物而言, 该方案较实用、经济。针对如何提高保护层范围内混凝土的耐久性指标, 进行了专项课题研究 (“透水模板布对海工结构混凝土表层质量的影响”), 研究表明采用具有蓄水功能的透水模板布可以有效提高结构表层混凝土的外观质量、早期回弹硬度、抗渗性、抗冻性、与涂层粘附力, 降低表面缺陷率和碳化速率。

(3) 水位变动区和浪溅区结构物防腐涂装技术

涂层可有效阻隔 Cl^- 、 O_2 、 H_2O 和 CO_2 等有害介质侵入混凝土内部, 延迟钢筋表面氯离子浓度达到腐蚀临界状态的时间, 提高混凝土的电阻率, 降低钢筋腐蚀速率, 防止混凝土碳化, 美观装饰等作用。对处于水位变动区和浪溅区的承台、墩身除采用满足设计要求的防腐蚀混凝土外, 还进行了表面防腐蚀涂装, 并采取围堰、套箱等措施确保涂装及养护环境的干燥, 保证了涂层的质量。对防腐涂装材料选择、涂层体系设计、涂装工艺、质量检测验收制度等方面进行了专项研究, 根据研究成果制定了相应的专用技术规范 (《青岛海湾大桥混凝土涂层防腐蚀设计与施工技术规范》), 操作过程中严格遵照执行; 对钻孔灌注桩采用钢护筒作为辅助防腐蚀技术措施。

(4) 通航孔桥水位变动区和浪溅区结构物采用外加电流阴极防护技术

青岛海湾大桥总共有 3 座通航孔桥 (沧口航道桥、红岛航道桥、大沽河航道桥), 作为大桥重要的永久性结构物, 采取长期有效的技术措施, 保证其

结构的耐久性至关重要。经过专家比选论证, 选定对三座通航孔桥主墩、过渡墩及辅助墩自桩基顶部至浪溅区顶部范围内钢筋混凝土实施外加电流阴极防护技术。外加电流阴极防护设计由专门的设计单位承担, 并对各类电极材料的选定、腐蚀环境等级的划分、关键参数的确定、安装过程中的细节控制、土建施工过程中系统的有效性监测、安装后系统的全面检测以及与施工单位的协调配合均作了明确的规定, 确保该套防腐系统的长期有效性。

(5) 钢结构采用金属热喷涂技术和涂装防腐技术

充分利用钢铁研究总院青岛海洋腐蚀研究所的长期挂片试验结果及对胶州湾海域气候特点和不同钢材腐蚀规律的深入研究, 结合青岛海湾大桥钢结构用钢的材质分析, 确定对钢结构采用热喷涂锌铝的综合防腐技术; 钢箱梁内部空间采用除湿系统, 使空气相对湿度稳定在 45% ~ 50% 范围内, 大大提高了钢结构的耐久性。

目前钢结构的耐久性研究主要停留在钢材的腐蚀规律以及防腐蚀技术措施的有效性等方面, 室内加速试验无法真正表征服役环境下多因素协同作用的情况, 实体钢结构在加工、吊装、拼接、承载等过程中造成的局部应力集中、腐蚀电位差异等诱发金属腐蚀的关键因素在加速试验及挂片暴露试验中均无法体现。因此, 分析出钢结构的易腐蚀部位, 并在有代表性部位埋设在线监测传感器系统, 对钢结构腐蚀关键参数进行在线监测技术, 实时获悉钢结构的腐蚀状态, 并对防腐措施的有效性进行评价, 为制定科学、合理的运营维护方案提供数据支持。三角撑、防撞设施、悬索桥缆索系统、预埋件、爬梯等结构部位及构件分别提出了技术可行、经济合理的防腐蚀技术措施。

(6) 结构健康监测系统与巡检养护管理系统

对大桥实体结构实施安全和耐久性健康监测, 除了对常规的荷载参数、变位参数等进行监测外, 着重对决定大桥管理养护制度的耐久性参数进行在线监测 (包括钢筋混凝土结构和钢结构), 通过实时监测关键结构的薄弱部位和代表性部位判定防腐措施的长期有效性, 并据此制定科学、合理、实用的管理养护方案和技术措施。巡检养护给结构健康监测作补充和完善, 全面提高大桥结构巡检养护的客观性、整体性和精确度。

采用国际流行的评估手段, 对设计阶段的钢筋混凝土和钢结构耐久性方案进行耐久性预评估, 并根据结果及时调整防腐蚀技术措施。

2.2 施工阶段

根据现场施工条件差异, 主要包括材料波动、浇注工艺、结构物尺寸、养护方式、气候变化等对混凝土长期耐久性的影响, 提出不同施工条件下, 保障混凝土耐久性的技术措施, 并确定混凝土施工过程中关键参数的控制范围。针对结构耐久性方案选定的防腐涂层体系, 进行小区试验, 确定满足要求的防腐材料及配套施工工艺。

建立混凝土及碳钢的常规暴露试验站, 在钢箱梁附近建设碳钢挂片暴露试验站, 在潮差区、浪溅区和大气区分别建设混凝土常规暴露试验站。以期通过长期现场暴露试验, 获得一批有用的技术成果:

(1) 冻融循环和氯盐腐蚀协同作用下, 混凝土的长期耐久性能; (2) 大桥用碳钢在胶州湾海域的腐蚀规律和采用的防腐技术措施的长期有效性; (3) 不同应力状态下, 混凝土耐久性关键参数变化规律; (4) 防腐蚀混凝土的长期徐变特性; (5) 未来修复可用的防腐体系的长期有效性。

建立基于在线监测技术的新一代暴露试验站, 充分考虑了施工工艺对混凝土耐久性的影响, 并克服了常规暴露试验数据的不连续性和离散性等问题。在大比例混凝土构件和实体结构中埋设监测氯离子侵入深度、钢筋腐蚀的传感器系统, 并通过数据采集和传输系统实时获得混凝土结构耐久性关键参数。

基于结构施工质量, 采用科学合理的评估手段, 对实体结构进行耐久性评估, 并提出运营期大桥的维护方案。

2.3 运营管养阶段

为满足 100 a 甚至更长的设计使用寿命要求, 单凭科学的设计、精细的施工很难保证, 运营期的科学管理维护必不可少, 对于已经建成的结构更是如此。若没有科学合理的运营维护制度以及实用及时的维护技术措施, 就不可能实现结构的安全健康服役 100 a

要想制定出科学合理的维护制度, 尽早的采取实用的维修措施, 将维护成本合理化, 必须实时掌握实体结构的安全性和耐久性状态。根据常规暴露试验站、新一代暴露试验站及实体结构耐久性关键参数的在线监测数据, 确定实体结构的耐久性参数, 对实体结构的耐久性进行定期评估, 不断修正运营期大桥的管养方案, 以期通过合理的维护技术, 尽量延长大桥的正常服役年限。建立适用于长寿命结构的经济性评估模型, 综合考虑材料、技术、人工成本、货币价值变化等多因素的评估模型, 以对未来新建结构的耐久性设计提供借鉴。

3 结论

将长寿命运营管理理念贯穿主体结构设计、混凝土材料设计、施工过程控制和实体结构服役的整个过程, 使青岛海湾大桥结构耐久性技术真正覆盖了全寿命周期。深入研究了施工工艺对早龄期混凝土耐久性的影响, 明确冰冻海域跨海大桥的结构耐久性演变规律, 实现钢筋混凝土结构和钢结构耐久性关键参数的在线监测。对青岛跨海大桥的使用寿命实现动态评估和科学预测, 提出确保大桥安全耐用的管养技术, 对未来北方沿海地区长大跨海大桥的设计、建设与管养提供重要参考依据。

参考文献:

References

- [1] 邸小坛, 高小汪, 徐有邻. 我国混凝土建筑结构的耐久性与安全性问题 [C] // 陈肇元. 土建结构工程的安全性与耐久性. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 1—17.
DIXiaotan GAO Xiaowang XU Youlin Durability and Safety Problems of Concrete Building Structures [C] // CHEN Zhaoyuan Safety and Durability of Civil Engineering Structure Beijing China Architecture & Building Press 2007: 1—17.
- [2] 林宝玉, 蔡锐华. 海洋工程混凝土和钢筋混凝土耐久性技术指标的确定 [J]. 水运工程, 1982 (2): 50—54
LIN Baoyu CAI Ruihua Determination of Durability Index for Concrete and Reinforced Concrete in Marine Environment [J]. Port & Waterway Engineering 1982 (2): 50—54
- [3] 潘德强. 我国海港工程混凝土结构耐久性现状及对策 [C] // 陈肇元. 土建结构工程的安全性与耐久性. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 96—107.
PAN Deqiang Existing Condition and Countermeasure for Marine Concrete Structures [C] // CHEN Zhaoyuan Safety and Durability of Civil Engineering Structure Beijing China Architecture & Building Press 2007: 96—107.
- [4] 中国土木工程学会. CCES01-2004 混凝土结构耐久性设计与施工指南 [S]. 修订版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
China Civil Engineering Society CCES01-2004 Durability Design and Construction Guideline for Concrete Structure [S]. Rev ed Beijing China Architecture & Building Press 2005