

· 施 工 ·



表面硅烷憎水处理混凝土码头结构的 现场施工效果分析

刘永满¹, 王 眺²

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 2. 香港理工大学 深圳研究院, 广东 深圳 518057)

摘要: 港口混凝土结构常需采取一些特殊措施来提高结构的耐久性。近年来, 试验室研究结果已充分证明采用硅烷憎水表面处理技术提高混凝土结构的耐久性是可靠的, 并且该技术在实际工程中已得到越来越多的应用。在实际工程中, 由于现场条件的限制, 施工质量对上述混凝土表面防护措施的有效性会产生显著影响。因此, 科学评价现场硅烷憎水表面防护技术的施工效果是合理预测应用该技术的港口混凝土结构的耐久性和使用寿命的前提。本项目现场调查分析了某新建码头混凝土结构硅烷憎水处理的实际施工效果(包括混凝土保护层厚度、硅烷浸渍渗透深度、内部钢筋自然电位等参数的现场详细调查), 为港口环境下混凝土码头硅烷憎水处理的施工提供重要数据, 并为硅烷憎水处理混凝土结构在海洋环境下的耐久性和使用寿命设计奠定基础。

关键词: 港口工程; 混凝土结构; 防水; 硅烷; 表面处理; 施工效果

中图分类号: U 655

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)05-0149-07

Construction effect evaluation of surface treatment for concrete wharf structure with silane

LIU Yong-man¹, WANG Tiao²

(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

2. Shenzhen Research Institute, Hong Kong Polytechnic University, Shenzhen 518057, China)

Abstract: Port concrete structures usually need specific protections to improve their durability. In recent years, the silane-based water repellent agents have been used widely for the surface treatment of concrete structures and reliability of this technology has been demonstrated through extensive laboratory tests. However, in the engineering practice, the effectiveness of water repellent treatment may be significantly influenced by the construction performance due to many uncertain restraints on the construction site. Therefore, it is significant to evaluate appropriately the construction performance for the durability and service life design of port concrete structures with water repellent treatment. This paper expounds the results of a detailed investigating program on a newly built port structure, the surface of which was treated with water repellent agents from the concrete cover depth, the silane penetration depth, and the half-cell potential of the internal steel reinforcement. The observation has facilitated important information for the future construction of port concrete structures and laid a solid foundation for the durability and service life design of water repellent concrete structures exposed to marine environments.

Keywords: port engineering; concrete structure; water repellent; silane; surface treatment; construction performance

钢筋锈蚀是海洋环境下混凝土结构性能退化的主要原因之一。经验表明, 港口钢筋混凝土结

构常常在远未达到设计使用寿命之前, 钢筋锈蚀现象已经发生, 从而逐步导致钢筋和混凝土粘结

收稿日期: 2015-12-13

作者简介: 刘永满(1971—), 男, 高级工程师, 从事港口工程设计及管理工作。

性能的弱化以及钢筋断面的减少,降低结构的使用性能和安全性能。据报道,全世界海洋环境下的基础设施每年因钢材腐蚀导致的直接经济损失约为7 000亿美元^[1]。侯保荣院士曾指出,我国海洋腐蚀1年的损失占到国家GDP的3%左右。可见,预防海洋环境下混凝土结构中的钢筋腐蚀具有十分重要的意义。

在众多防腐措施中,通过提高混凝土保护层的质量及增加保护层厚度来延缓有害物质的侵蚀,一直被认为是提高混凝土结构耐久性最基本的措施之一。对此,海港工程混凝土结构设计规范中对混凝土保护层厚度都有严格的规定。近年来,由于对混凝土结构耐久性全寿命维护和设计的日益重视,通过在混凝土表面进行硅烷憎水处理而形成憎水膜来阻止外部水分和有害物质的侵入^[3-6],也成为改善混凝土结构耐久性的主动防护措施之一,并在许多实际工程中得到了应用^[7]。研究表明,硅烷防水涂料只有达到一定的浸渍深度时才能起到防护效果^[8],对此,我国行业标准《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》(简称《标准》)做出了详细规定,其中要求:对于强度等级不大于C45的混凝土,硅烷浸渍深度应达到3~4 mm;对于强度等级大于C45的混凝土,硅烷浸渍深度应达到2~3 mm^[2]。

在实际施工中,因天气状况、施工条件限制、人为失误等各种随机因素的影响,无论是混凝土保护层厚度,还是硅烷的浸渍深度,实际都是服从某种分布的随机变量,会有较大的离散性。深入理解上述参数的随机分布特征对具有硅烷憎水处理的港口混凝土结构的耐久性设计有重要意义。目前,国内外对普通混凝土码头结构的现场调查积累了一些数据,但对硅烷表面憎水处理的混凝土结构的现场性能调查还十分欠缺。因此,本项目现场调查分析了某新建码头的硅烷憎水处理混凝土结构的实际施工效果(包括混凝土保护层厚度、硅烷浸渍渗透深度、内部钢筋自然电位等参数的详细调查),为港口环境下混凝土码头的硅烷

憎水处理的施工提供重要数据,并为有硅烷憎水处理混凝土结构在海洋环境下的耐久性和使用寿命设计奠定基础。

1 工程概况与检测方法

1.1 工程概况

某新建码头设计岸线长为200 m,陆域纵深为300 m,采用高桩梁板式宽承台结构,于2012年建成。因地处亚热带,年平均气温为24.0℃,但年最高气温可达36.7℃,最低为2.7℃,属于钢筋容易腐蚀的环境。设计中为提高码头上部混凝土结构的耐久性,码头上部结构的梁及桩帽采用了C45高性能混凝土及70 mm厚的混凝土保护层,混凝土板采用了预制结构。并在混凝土养护完成后,在混凝土板底部、码头混凝土梁的底面和侧面以及桩帽四周分别涂刷硅烷浸渍防腐涂料,以增强其抵抗氯离子侵蚀的能力。所用硅烷为异辛基三乙氧基硅烷膏,用量为333 g/m²,晴天施工,采用连续涂敷施工的方式,施工时混凝土龄期为28 d,混凝土为面干状态。

1.2 检测方法

1.2.1 混凝土保护层厚度与钢筋自然电位

利用倒挂的悬梯及海上作业(图1),在码头的梁及桩帽的临海侧面及板的底部布置了40个观测点,分别测量每个观测点所在位置的梁、桩帽、板的钢筋保护层厚度与钢筋自然电位。



图1 海上作业

测量时,首先按照施工图纸,在需要检测的结构构件上初步描出如图2所示钢筋网格测点。但在实际施工中,由于混凝土振捣等原因,混凝

土结构中的钢筋往往会发生走位现象, 其实际位置往往与施工图不符, 因此在正式测量前, 还需通过钢筋定位仪确定钢筋的具体位置, 以便准确测量混凝土保护层厚度和钢筋的自然电位(图 3)。待实际钢筋位置确定后, 便可利用钢筋定位仪测量每个网点的混凝土保护层厚度。为消除测量误差, 每个网格点将测量 2 次。若 2 次测量的差值大于 4 mm, 则认为误差过大, 需要重新测量; 若差值小于等于 4 mm, 则取 2 次测量值的平均值作为此网格点对应的混凝土保护层厚度。钢筋保护层测量完成后, 便开始进行钢筋自然电位的测量。测量钢筋自然电位时, 参考 ASTM C876-09 规范^[9], 先用水沾湿混凝土表面, 待自然电位稳定后(5 min 内变化不超过 20 mV), 再用钢筋自然电位仪测量各个网格点的钢筋自然电位。

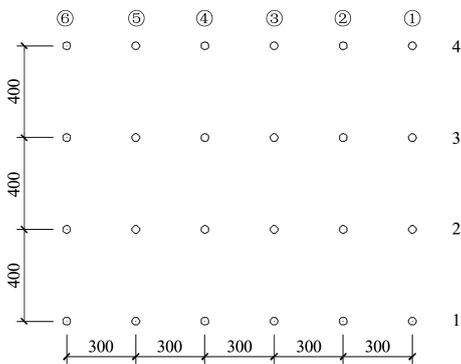


图 2 钢筋网格测点布置 (单位: mm)



图 3 钢筋网格实际测点布置

1.2.2 钻取混凝土芯样

选取构件受力较小的部位, 通过雷达钢筋定位仪避开钢筋位置, 根据图 3 所示的钢筋网格图来选择钻芯位置, 按钻芯法检测混凝土强度技术规程 (CECS03:2007)^[10], 对混凝土保护层进行钻芯取样。考虑尽量减少对码头的损伤、构件的尺

寸、受力、以及钢筋的布置情况, 芯样的直径分别取为 50, 70 和 100 mm (表 1), 而芯样高度分别取为 70, 100 和 120 mm。梁、桩帽的取样点和混凝土保护层厚度检测点位置相同。如表 1 所示, 共 144 个芯样和 90 个测点。取得的芯样劈开后可以测量施工中硅烷浸渍的实际深度。待钻芯取样完成后, 立即采用 28 d 强度不低于码头混凝土结构设计强度的高强快硬砂浆对孔洞进行修补。修补方法采用两次修补法。第 1 次修补时, 先用砂浆初步填实孔洞, 并在表面用硬胶片封堵孔洞, 以免砂浆流出。待孔洞内砂浆初凝后, 再用砂浆对孔洞表面进行修补和抹平, 以防止蜂窝、麻面等现象的出现。修补后的结构如图 4 所示, 可见修补效果良好。

表 1 现场芯样采集数量

结构形式	数目	直径/mm
桩帽	40	70
梁	40	70
板	10	50
靠船构件	54	100



注: 划圈为修补后的孔洞

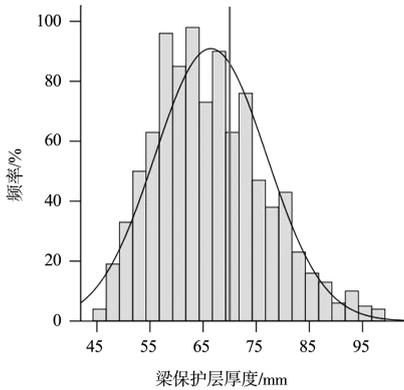
图 4 修补后的结构

为更好地分析施工过程的离散性, 且避免对码头主体结构带来更多的损伤, 特意委托施工方额外多制作了 2 个和码头混凝土相同配比的靠船构件, 并采用与码头主体结构相同的施工方法在现场对其进行硅烷憎水处理, 以便钻取更多的芯样进行分析, 获得可靠的硅烷浸渍深度的统计特征。芯样采集完成后, 再将 2 个靠船构件吊装到码头侧面的海岸防护堤上进行与码头结构同等条件下的长期暴露试验, 以便长期追踪硅烷防水处理效果。

2 检测结果及讨论

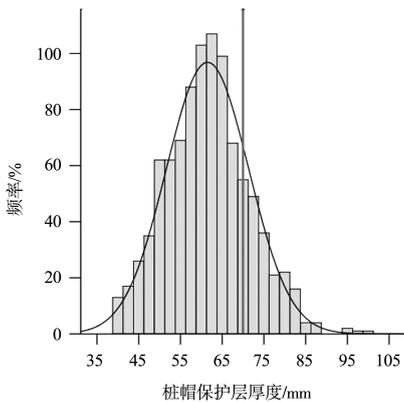
2.1 混凝土保护层厚度测量结果及分析

如 1.2.1 节所述，分别对码头结构的桩帽、梁、板的混凝土保护层厚度进行检测。图 5 为检测结果汇总后获得的保护层厚度统计频率分布。



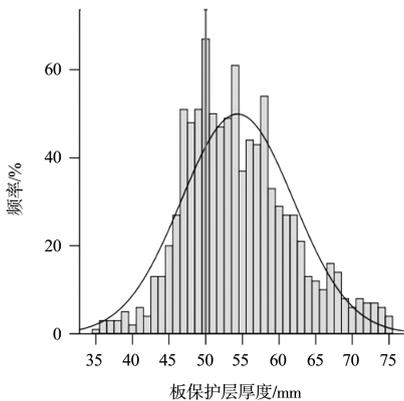
注：均值=66.44 mm，标准偏差=10.531 mm，N=960，混凝土保护层厚度设计值=70 mm。

a) 梁



注：均值=61.49 mm，标准偏差=9.887 mm，N=960，混凝土保护层厚度设计值=70 mm。

b) 桩帽



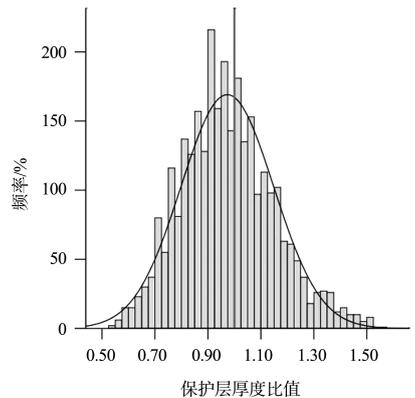
注：均值=54.33 mm，标准偏差=7.667 mm，N=960，混凝土保护层厚度设计值=50 mm。

c) 板

图 5 混凝土保护层厚度测量结果频率分布

从图 5 可见，梁、桩帽及板的混凝土保护层厚度都基本服从正态分布。其中，梁和桩帽的混凝土保护层平均值分别为 66.4 mm 和 61.5 mm，稍低于设计值（设计保护层厚度为 70 mm）；板的混凝土保护层平均值则高于设计值（板的设计保护层厚度为 50 mm），主要原因是预制构件的施工质量的控制更好。

为进一步考察码头结构混凝土保护层厚度的施工效果与概率分布模型，将所有数据标准化，并分别除以其相应的保护层厚度设计值，结果如图 6 所示。从图 6 可见，标准化后的码头梁保护层厚度的整体均值为 0.97，标准差为 0.173。



注：均值=0.97 mm，标准偏差=0.175 mm，N=2.967。

图 6 混凝土保护层厚度比值总体频率分布

2.2 硅烷防水涂料浸渍深度的测量结果及分析

测量试件的硅烷浸渍渗透深度之前，首先将试件通过劈裂试验剖开，然后将剖开后的试件放入 50 ℃ 的烘箱烘烤 3 h，待剖裂面干燥后再向剖裂面喷水，直至出现明显的颜色分界线后再测量硅烷浸渍渗透深度（硅烷浸渍后的混凝土不吸水），如图 7 所示。测量试件的硅烷浸渍深度时，沿截面宽度方向每间隔 1 cm 测试一个数据。如果某测点因粗骨料阻挡而无法测量，则跳过此点不记录。

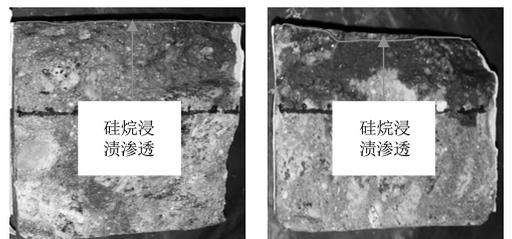


图 7 喷水后的硅烷憎水处理混凝土芯样

从图 8 可见, 全部混凝土试件的现场硅烷浸渍平均渗透深度为 2.49 mm, 偏差值为 1.788 mm, 虽然基本符合《规范》的要求, 但总体偏小。这可能是由于该码头施工中采用了高性能混凝土, 而硅烷防水涂料主要是通过毛细孔吸附到混凝土内部, 混凝土的密实程度会影响硅烷防水涂料向内部的渗透, 从而影响到硅烷的浸渍深度。

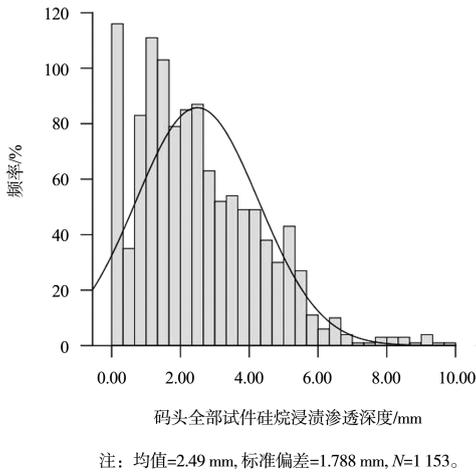
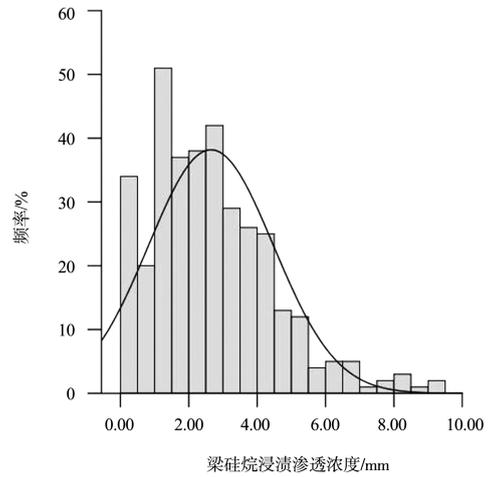


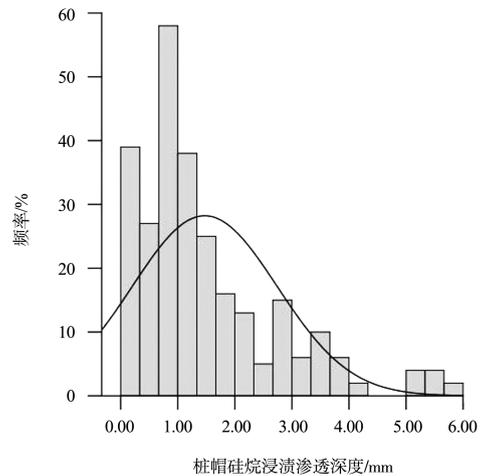
图 8 全部芯样硅烷浸渍渗透深度测量结果频率分布

对码头不同部位的硅烷渗透深度进行深入观察可以发现 (图 9), 梁和靠船构件中硅烷渗透深度平均值分别为 2.65 mm 和 3.06 mm, 基本满足《规范》的要求。而桩帽和板的硅烷渗透深度平均值却只有 1.47 mm 和 1.52 mm, 不满足《规范》的要求。桩帽因为非常接近水面, 混凝土表面的湿度可能较大, 减弱了硅烷渗透所需要的毛细吸附作用。而且由于潮汐作用, 涂敷在桩帽表面的硅烷可能在没有获得完全浸渍之前被海浪冲刷。因此, 桩帽的硅烷浸渍深度相对较小。而码头的上部板结构, 由于施工时需要仰面涂刷, 施工空间受到很大制约, 所以涂刷难度较大, 相比于梁而言, 施工质量更难获得保证。另外, 由于混凝土板是预制结构, 混凝土的致密程度可能较好, 也影响了硅烷在混凝土中的渗透。靠船构件由于是岸上施工, 硅烷浸渍效果最好。因此, 硅烷浸渍渗透深度不仅与混凝土的性质 (如材料的离散性、混凝土渗透性和表面含水率等), 还受到施工条件的约束。因此, 码头混凝土结构设计中硅烷浸渍防护采用与否, 浸

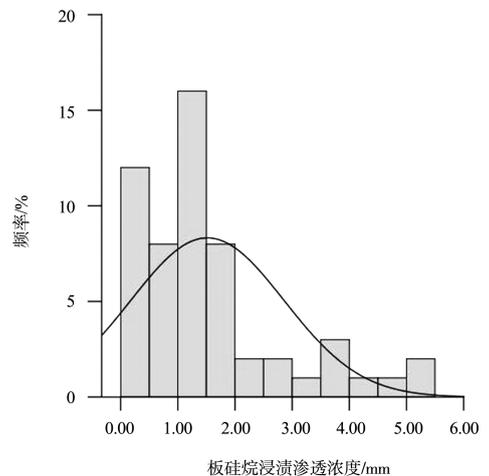
渍达标深度的确定, 需综合考虑混凝土材料性质、施工部位、施工环境等各个方面因素。



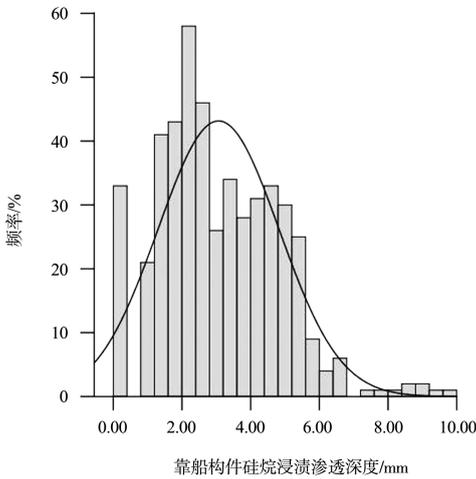
注: 均值=2.65 mm, 标准偏差=1.828 mm, N=350。
a) 混凝土梁



注: 均值=1.47 mm, 标准偏差=1.272 mm, N=270。
b) 混凝土桩帽



注: 均值=1.52 mm, 标准偏差=1.342 mm, N=560。
c) 混凝土板



注：均值=3.06 mm，标准偏差=1.764 mm，N=477。

d) 混凝土靠船构件

图9 不同构件的硅烷渗透深度测量结果频率分布

2.3 钢筋自然电位测量结果及分析

对码头各钢筋混凝土构件中的钢筋自然电位进行测量。图10是桩帽典型的钢筋自然电位等势图。它只反映了构件局部处的自然电位，并不体现码头结构的自然电位趋势。因此，在上述数据的基础上，以构件的钢筋网格点的钢筋自然电位平均值作为此构件的钢筋总体自然电位，最后按照码头结构的实际位置分别绘制码头梁和桩帽的总体钢筋自然电位图（图11）。

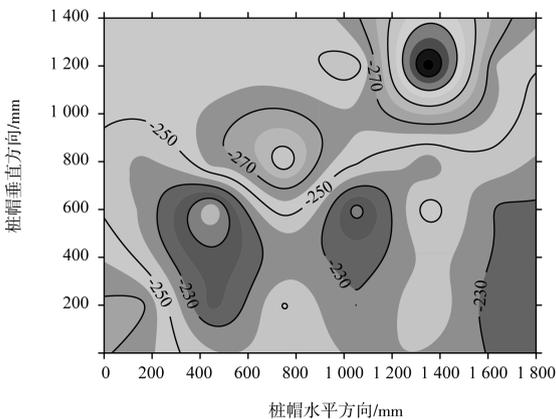
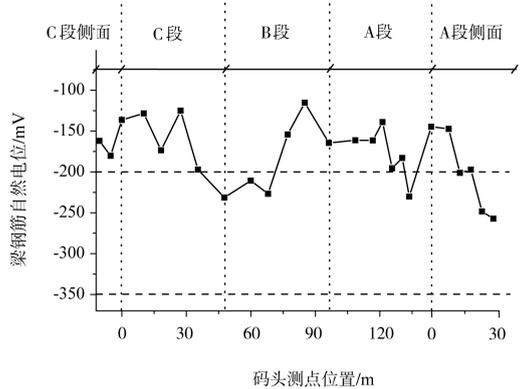


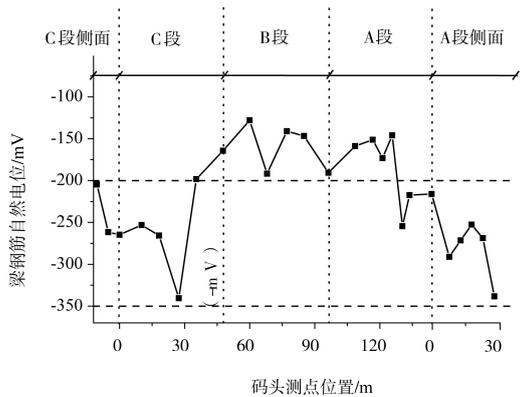
图10 构件的局部自然电位等势图（单位：mV）

依据 ASTM C876^[9]的自然电位判断标准(表2)，从图11可以看出，码头梁发生腐蚀的可能性极低，但桩帽中的钢筋自然电位普遍比梁中的钢筋自然电位低，部分测点的钢筋自然电位已经接近-350 mV，说明此处发生腐蚀的概率较大（90%）。

因此，在码头使用过程中，须加强对桩帽的检测的维护。



a) 码头梁



b) 桩帽

图11 码头结构自然电位分布

表2 腐蚀概率判断标准

腐蚀概率/%	参比电极 (CuSO ₄) / mV
10	> -200
50	-200 ~ -350
90	< -350

3 结论

1) 此码头的混凝土保护层厚度基本符合设计要求。但硅烷在码头各部位的浸渍深度有较大差异。码头上部结构梁构件及靠船构件中的硅烷渗透深度较大，而预制板和桩帽部位的渗透深度偏小。

2) 硅烷浸渍渗透深度不仅与混凝土的性质有关（如材料的离散性、混凝土渗透性和表面含水率等），还受到施工条件和施工质量的影响，因此，码头混凝土结构设计中硅烷浸渍防护采用与否，需要综合考虑混凝土材料性质、施工部位、施工难度等多方面因素，择优考虑。

3) 此码头结构的钢筋自然电位总体处于安全水平, 但桩帽中的钢筋自然电位普遍比其它部位低, 局部地方已经接近 -350 mV , 很有可能先行腐蚀, 在日后的维护保养中须充分注意。

参考文献:

- [1] Skalny J. Concrete durability, a multibillion-dollar opportunity: report of the committee on concrete durability needs and opportunity[R]. [S.l.]: National Materials Advisory, 1987.
- [2] JTJ 275—2000 海港工程混凝土结构防腐技术规程[S].
- [3] 张鹏, 戴建国, 赵铁军, 等. 带裂缝混凝土的吸水性能及防水处理的影响[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(1): 70-74.
- [4] 张鹏, 戴建国, 赵铁军, 等. 海水暴露环境下带裂缝混凝土的表面防水处理[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(2): 214-218.
- [5] 张鹏, 赵铁军, 戴建国, 等. 硅烷改性混凝土防水和抗氯离子性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(3): 72-78.

- [6] Dai J G, Akira Y, Wittmann F H, et al. Water repellent surface impregnation for extension of service life of reinforced concrete structures in marine environments: the role of cracks, cement and concrete composites[J]. Restoration of Buildings and Monuments, 2010, 32(2): 101-109.
- [7] 赵铁军. 渗透型涂料表面处理与混凝土耐久性[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [8] Schueremans L, Van Gemert D, Giessler S. Chloride penetration in RC-structures in marine environment-long term assessment of a preventive hydrophobic treatment[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(6): 1 238-1 249.
- [9] ASTM-C876-09 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete[S].
- [10] CECS 03 钻芯法检测混凝土强度技术规程[S].

(本文编辑 郭雪珍)

· 消 息 ·

天航局获 1 项发明专利

日前, 经国家知识产权局评定, 天航局申报的“基于流塑状态粘性土地基打设塑料排水板的辅助装置”科研成果取得发明专利证书。

此发明可解决以流塑状态为主的黏性土地基打设塑料排水板施工时经常出现的堵管不夹带、清理困难、耗时间长等施工难题。通过工程实际应用, 此专利可将相关工种的施工速度提高近 4 倍。

http://en.ccccltd.cn/pub/ccccltd/xwzx/zgsdt/201604/t20160425_47294.html (2016-05-10)

水规院中标湛江港东海岛港区杂货码头工程

近日, 水规院中标湛江港东海岛港区杂货码头工程 EPC 总承包项目, 中标额为 4.81 亿元。

项目位于湛江港东海岛港区, 需要新建两个 2 万吨级杂货码头, 码头岸线长为 392 m, 设计年通过能力为 250 万 t, 后方陆域面积为 $39.39 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。

http://en.ccccltd.cn/pub/ccccltd/xwzx/zgsdt/201605/t20160503_47507.html (2016-05-10)