

海港工程钢筋保护层厚度分析

涂启华¹, 唐光星¹, 翁 龙¹, 范志宏¹, 黄高峰²

(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. 中交四航局第二工程有限公司, 广东 广州 510300)

摘要: 钢筋保护层厚度在保证钢筋与混凝土之间粘结、提高结构耐久性寿命方面发挥着巨大作用。先从钢筋保护层厚度实体检测出发, 结合现行水运工程规范标准对检测结果偏差进行分析, 分别讨论了钢筋保护层厚度偏差与结构耐久性以及结构承载力的关系。达到引起工程建设各方的重视、提高海港工程钢筋保护层控制质量的目的。

关键词: 保护层厚度; 结构实体; 耐久性; 安全性

中图分类号: TU 375

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)04-0043-05

Analysis of thickness of reinforcement cover in maritime engineering

TU Qi-hua¹, TANG Guang-xing¹, WENG Long¹, FAN Zhi-hong¹, HUANG Gao-feng²

(1. Key Laboratory of Hydraulic Structures Durability Technology Ministry of Communications Engineering Technology Research, CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;
2. The Second Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510300, China)

Abstract: The thickness of reinforcement cover plays an important role to guarantee the bond between concrete and steel, and to improve the structure durability. This paper introduces the inspection at the entity structure of reinforced concrete in marine works, analyzes the bias of the inspection result with the current specifications, discusses the relationship between structure durability and the bias of reinforcement protection cover thickness, bearing capacity and the bias of cover thickness, so as to arise the attentions of construction parties, and further improve the control quality of the cover thickness in marine works.

Key words: thickness of protective cover; structural entity; durability; safety

混凝土构件中钢筋混凝土保护层的作用主要为: 1) 保证钢筋与混凝土的共同作用, 满足受力钢筋粘结锚固要求; 2) 保护钢筋免受锈蚀或延长钢筋的锈蚀进程; 3) 增强钢筋在火灾作用下的耐火能力。氯盐侵蚀环境影响下的海港工程钢筋混凝土结构, 由于保护层厚度不足导致构件中钢筋过早发生锈蚀破坏引起结构功能下降、耐久性寿命降低的现象十分普遍。如华南地区某港码头由于保护层厚度不足, 建成 5~6 a 后纵、横梁构件即出现大量锈胀开裂情况^[1]; 由于施工不当导致钢筋保护层厚度偏薄, 使用仅仅 15 a 的码头 80 根

轨道梁全部出现锈蚀裂缝^[2]。过薄的保护层大大缩短了氯离子的渗透通道, 使钢筋过早锈蚀, 严重影响了建筑物的安全使用寿命。随着海港工程建设事业的发展, 大跨度跨海大桥、深水及离岸工程越来越多, 对混凝土耐久性安全性要求越来越高。因此, 在施工过程及结构实体混凝土结构的验收中, 加强对钢筋保护层厚度的测试, 对掌握实体混凝土施工质量, 改进施工技术水平, 提高混凝土结构安全性耐久性, 具有十分重要的促进作用。本文先从钢筋保护层厚度实体检测出发, 结合现行水运工程规范标准对检测结果偏差进行

收稿日期: 2013-08-12

作者简介: 涂启华 (1980—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事港口工程研究工作。

分析,分别讨论了钢筋保护层厚度偏差与结构耐久性以及结构承载力的关系,以期达到引起工程建设各方的重视,提高海港工程钢筋保护层控制质量的目的。

1 海港工程钢筋保护层厚度检测

混凝土结构实体保护层厚度检测选取海港工程常见的预制构件沉箱、方桩、纵梁、横梁、板和现浇构件胸墙、桩帽和现场浇筑的胸墙,

各类构件垫块均由定型模板预制。其中预制构件钢筋保护层厚度检测在预制构件厂实施,现浇构件保护层厚度检测在码头工程现场进行检测。本次检测采用喜利得 PS200 钢筋扫描仪,测试精度可达 ± 1 mm,同时为减少破损并提高检测精度,钢筋保护层厚度检测采用非破损方法并用局部破损方法校准的修正量综合法进行。根据检测结果统计的最小值、最大值和标准差见表 1。

表 1 钢筋保护层厚度检测结果

构件名称	测点布置	厚度/mm				
		设计值	最小值	最大值	平均值	标准差
预制沉箱	共 6 个 120 个测点	50	46	65	54	4.6
预制方桩	共 6 根 120 个测点	50	43	63	51	3.5
预制纵梁	共 6 根 120 个测点	65	60	79	69	4.0
预制横梁	共 6 根 120 个测点	65	60	79	67	3.9
预制板	共 9 块 180 个测点	50	47	66	57	4.1
现浇胸墙	共 5 段 100 个测点	65	56	78	63	5.3
现浇桩帽	共 5 个 100 个测点	65	59	79	67	5.1

对上面检测的预制构件和现浇构件来说,保护层厚度的平均值与设计值相差不大,检测结果的合格点率均可以满足规定要求,但钢筋保护层厚度测定值具有较大的离散性。因此,在对海港工程钢筋保护层厚度进行施工质量控制时,不但要满足验收要求的合格点率;还应该在构件耐久性和安全性检测评估中,考虑钢筋保护层厚度检测结果变异性影响。

2 海港工程钢筋保护层厚度检测偏差分析

为防止海水环境中的建筑物过早地发生钢筋腐蚀破坏,在保证混凝土具有良好的密实性外,还应该有合适的钢筋保护层最小厚度值,《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》^[3](简称《规范》)根据建筑物所处地区,在能够保证锚固性能和耐久性的前提下,按照不同的海水环境部位规定海港工程钢筋混凝土保护层最小限值(表 2)。由于施工误差的影响,不是所有的钢筋都能够被准确地放到设计的位置,因此混凝土保护层厚度是一个随机变量,

海港工程钢筋保护层厚度的随机变量可近似地用正态分布规律来表示。根据保护层厚度常在设计值上下波动的特点,施工正负允差一般均取相等值且为 5 和 10 的倍数,现浇钢筋混凝土构件的保护层允差一般取 ± 10 mm^[4]。《规范》中规定浇注混凝土时,浪溅区钢筋保护层厚度尺寸允许偏差控制为 0 ~ 10 mm,其它部位为 -5 ~ 10 mm。按浪溅区 10 mm 和 0 mm 的中间值为控制平均值 ± 5 mm,其保护层垫块厚度应为 $C_{min} + 5$ mm。如某工程保护层最小厚度 $C_{min} = 65$ mm,以 $C_{min} + 5$ mm = 70 mm 为保护层厚度控制平均值,实测保护层厚度平均值若为 70 mm,不同标准差时,保护层厚度的理论计算保证率见表 3,其中标准差为 3.9 mm 时,保护层厚度的理论计算保证率为 80% (图 1)。

表 2 海洋环境钢筋混凝土最小保护层厚度

建筑物所处地区	厚度/mm			
	大气区	浪溅区	水位变动区	水下区
北方	50	50	50	30
南方	50	65	50	30

表3 钢筋保护层厚度理论保证率

标准差/mm	±5 mm 要求范围的保证率/%	-5 ~ 12 mm 要求范围的保证率/%
1	100.0	100.0
2	98.8	100.0
3	90.4	99.0
4	78.9	95.4
5	68.3	89.6
6	59.5	83.1
7	52.5	76.5
8	46.8	70.4
9	42.1	64.8

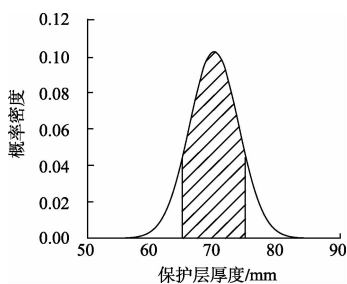


图1 满足《规范》要求的保护层厚度分布

但是按照《水运工程质量检验标准》^[5] (简称《标准》) 进行实体检验时, 对梁、板类构件的钢筋保护层厚度又允许正偏差不超过 12 mm, 负偏差不超过 5 mm, 而且要求检验合格点率要达到 80% 及以上, 同时每次抽样检测结果中不合格点的最大负偏差不应小于规定偏差值的 1.5 倍。如果实际工程浪溅区梁最小保护层厚度 $C_{\min} = 65$ mm, 保护层厚度允许偏差控制为 $-5 \sim 12$ mm, 按 ± 5 mm 为控制平均值, 其保护层垫块为 $C_{\min} + 5$ mm = 70 mm, 实测保护层厚度平均值 $u = 70$ mm, 在不同保护层厚度标准差时, 保护层厚度的理论计算保证率列于表 3, 由此可见, $\sigma \leq 6.4$ mm 时, 检验要求范围的保证率才能达到 80% 以上 (图 2)。

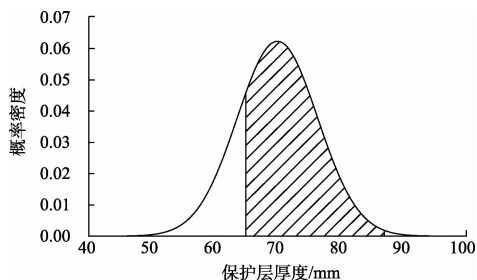


图2 满足《标准》要求的保护层厚度分布

由此可以看出, 要满足《规范》对保护层厚度控制为 $0 \sim 10$ mm 要求, 标准差需满足 $\sigma \leq 3.9$ mm; 要执行《标准》进行保护层厚度验收, 即保护层厚度偏差在 $-5 \sim 12$ mm, 其标准差需要满足 $\sigma \leq 6.4$ mm。由此可见, 设计施工规范对保护层厚度控制比验收规范要求严格。一方面, 由于钢筋保护层厚度服从正态概率分布, 《港口工程结构可靠度设计统一标准》编制组在广泛调查基础上建议港工构件保护层厚度变异系数取为 $0.16^{[6]}$, 保护层厚度平均值若为 70 mm, 计算其标准差为 11.2 mm; 另一方面, 通过对混凝土结构实体检测, 统计海港工程预制沉箱、方桩、纵梁、横梁、板和现浇胸墙、桩帽等构件钢筋保护层厚度测点的标准差在 3.5 ~ 5.3 mm。无论从标准编制组调查的平均水平还是实体结构检测看, 要使标准差 $\sigma \leq 3.9$ mm, 对一般工地, 特别是海港工程中风浪、潮汐变化较大的外海作业环境来说, 如不采取专门措施是较难达到的, 所以施工单位在施工前必须充分认识到保护层厚度的重要性, 采取切实有效措施对其进行专门的质量控制。

3 钢筋保护层厚度偏差对结构耐久性的影响分析

1) 耐久性寿命的定义。

钢筋混凝土结构的使用寿命一般可以分为 3 个阶段: 腐蚀诱导阶段、腐蚀发展阶段和腐蚀破坏阶段。为给结构的使用寿命留一定的安全裕度以及为结构的修复加固预留充足的时间, 本文定义的混凝土抗氯离子侵蚀的耐久寿命主要是指混凝土结构的腐蚀诱导阶段, 即从结构开始暴露于海水环境至氯离子渗入到钢筋周围达到引起钢筋腐蚀的临界含量所经历的时间。

2) 钢筋保护层厚度与耐久性寿命的关系。

对海洋环境下的钢筋混凝土, 氯盐污染导致钢筋锈蚀是导致结构失效的最主要因素。迄今大量的长期现场暴露试验和实际工程检测证实 Fick 第二定律能较好地描述氯离子在混凝土中的迁移行为, 通过对 Fick 第二定律为理论基础的混凝土中氯离子扩散公式进行变换, 可以得到混凝土中

钢筋开始锈蚀的时间计算公式如下^[7]:

$$t_i = \left(\frac{c}{K_{Cl}} \right)^2 \quad (1)$$

式中: t_i 为从混凝土浇注到钢筋开始锈蚀所经历的时间; c 为混凝土保护层厚度; K_{Cl} 为氯离子侵蚀系数。

从式(1)可以看出, 混凝土中钢筋开始腐蚀时间与保护层厚度的平方成正比, 与氯离子侵蚀系数成反比。如南方海港工程纵梁保护层厚度 55 mm, 氯离子侵蚀系数 $29.45 \text{ mm}/\sqrt{\text{a}}$, 计算钢筋开始锈蚀时间为 3.49 a ^[8]; 其他条件不变的前提下, 计算不同保护层厚度时构件中钢筋开始锈蚀时间曲线见图 3。从图 3 可见当保护层厚度减少至 45 mm 时, 钢筋开始锈蚀时间为 2.33 a, 比保护层厚度为 55 mm 时计算钢筋开始锈蚀时间减少 33.1%; 当钢筋保护层厚度增加至 65 mm, 钢筋开始锈蚀时间为 4.87 a, 钢筋开始锈蚀时间比保护层厚度 55 mm 时增加 39.7%。因此在结构允许的情况下适当增加钢筋保护层厚度, 可推迟氯离子到达钢筋表面的时间, 对提高混凝土结构耐久性使用寿命具有显著效果。

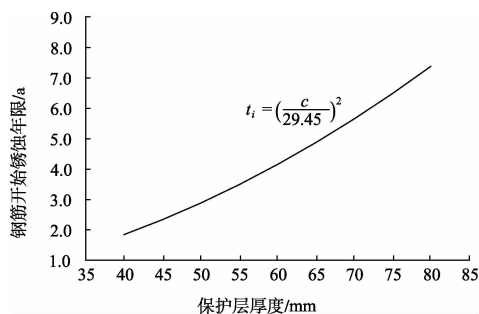


图3 不同保护层钢筋开始锈蚀时间

4 钢筋保护层厚度偏差对结构承载力的影响分析

构件中钢筋与混凝土能够协同工作, 除两者之间具有近似相同的线膨胀系数外, 另外一个重要原因是钢筋与混凝土之间具有良好的粘结力, 而一定厚度的保护层是保证两者之间具有良好粘结锚固性能的基础。但是, 过厚的钢筋保护层会对构件承载力产生削弱作用, 保护层过薄时由于钢筋与混凝土之间的粘结力不足导致钢筋与混凝土

不能协同工作, 进而影响构件承载力。

保护层厚度过大时, 一方面会使构件受力后产生的裂缝宽度过大, 影响其使用性能; 另一方面是由于混凝土的抗拉强度较小, 在结构设计中不考虑混凝土的抗拉作用, 过大的保护层厚度还会造成经济上的浪费。对单筋矩形受弯截面, 其正截面受弯承载力按(2)式计算为^[9]:

$$M = f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) = f_y A_s \left(h - a_s - \frac{f_y A_s}{2 f_c b} \right) \quad (2)$$

式中: M 为正截面受弯承载力设计值 ($\text{N} \cdot \text{mm}$); f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值 (MPa), f_y 为受拉钢筋强度设计值 (MPa); A_s 为纵向受拉钢筋的截面面积 (mm^2); a_s 为受拉区钢筋合力点至受拉区边缘的距离 (mm); x 为受压区高度 (mm); h_0 为截面有效高度 (mm), $h_0 = h - a_s$; h 为截面高度 (mm); b 为截面宽度 (mm)。由于构件截面尺寸的变异性较小, 即假设在截面尺寸不变的情况下, 当构件中钢筋保护层厚度出现正偏差 Δ 时, 截面的有效高度 h_0 将减小为 $h_0 = h - a_s - \Delta$, 构件正截面受弯承载力计算为

$$M = f_y A_s \left(h - a_s - \frac{f_y A_s}{2 f_c b} \right) - f_y A_s \Delta \quad (3)$$

将降低 $f_y A_s \Delta$ 。同理, 在构件中钢筋保护层厚度出现负偏差时, 理论计算构件承载力将增加 $f_y A_s \Delta$ 。例如尺寸为 $200 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 的矩形单筋截面梁, 受拉区配置 $3\phi 20$ 热轧带肋钢筋, 受拉钢筋的截面面积 A_s 为 942 mm^2 , 混凝土强度等级为 C30, 保护层厚度设计值为 30 mm , $f_c = 14.3 \text{ N/mm}^2$, $f_y = 300 \text{ N/mm}^2$, 计算得到构件正截面受弯承载力为 $87.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。如果施工过程中保护层控制不当, 正偏差 Δ 为 10 mm , 即钢筋保护层厚度提高至 40 mm , 则梁正截面抗弯承载力将减小 $f_y A_s \Delta$ 为 $2.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 承载力降低近 3.2% 。当保护层厚度出现负偏差 Δ 为 10 mm , 即钢筋保护层厚度减少至 20 mm 时, 理论计算梁正截面抗弯承载力将提高 3.2% , 但从式(1)可见, 构件中钢筋开始腐蚀时间与保护层厚度的平方成正比关系, 当保护层

厚度减少10 mm时,钢筋表面氯离子浓度达到临界浓度致使其开始锈蚀时间缩短近33.1%,耐久性使用寿命大大降低;另外,由于钢筋保护层厚度是满足构件中钢筋与混凝土粘结锚固共同作用的基础,过薄的保护层将降低混凝土与钢筋之间粘结锚固性能,降低构件的承载能力。

5 结语

保护层变小时,会削弱混凝土层对钢筋的握裹力,影响结构抗力;同时,过薄的保护层会缩短氯离子的渗透通道、加快钢筋脱钝锈蚀进程,影响结构耐久性及使用年限。钢筋保护层过大,则意味着截面有效高度减小,影响构件的承载力,使构件受力后裂缝开展过宽,影响其使用性能。适当的保护层厚度,可以有效地延长氯离子达到钢筋表面的时间,并可相应提高对锈胀所产生内力的抵抗能力而延缓保护层的开裂。钢筋保护层厚度偏差过大已成为我国混凝土结构施工质量控制中最薄弱的环节之一,为保证工程质量和结构安全性耐久性应坚持实体检验,工程建设的设计、施工、监理等各方应引起高度重视,共同努力提高钢筋保护层的质量,以确保实际工程的安全性和耐久性。

我国海域辽阔,海岸线漫长,作为重要交通基础设施的港口工程正在发生着巨大的变化,大型离岸深水码头、跨海大桥建设不断涌现,混凝土结构耐久性寿命由20世纪80年代以前的不到20 a,发展到现在可以达到50 a以上甚至100 a和更长时间,这必然对混凝土的长期性能特别是耐

久性提出了更高的要求,而作为影响混凝土结构耐久性关键因素之一的钢筋保护层厚度控制愈显得重要。《标准》附录D增加了混凝土实体检验的内容,并明确规定了结构实体中钢筋保护层厚度检验的方法,这说明钢筋保护层厚度对结构耐久性和安全性的重要程度已得到广泛认可并越来越得到重视。工程建设各方加强责任意识,采取专项构造控制措施,层层落实,严格把关,加强钢筋保护层厚度实体检验工作,切实提高水运工程钢筋保护层的质量。

参考文献:

- [1] 王胜年,黄君哲,张举连,等. 华南海港码头混凝土腐蚀情况的调查与结构耐久性分析[J]. 水运工程,2000(6): 53-57.
- [2] 毛明珍,李佳润,马长江. 某煤码头钢筋混凝土腐蚀破坏检测及修复建议[J]. 全面腐蚀控制,2012(7): 28-31.
- [3] JTJ 275—2000 海港工程混凝土结构防腐技术规程[S].
- [4] 陈肇元. 钢筋的混凝土保护层设计要求急待改善[J]. 建筑结构,2007(6): 108-114.
- [5] JTS 257—2008 水运工程质量检验标准[S].
- [6] 《港口工程结构可靠度设计统一标准》编制组. 港口工程结构可靠度[M]. 北京: 人民交通出版社,1992.
- [7] JTJ 302—2006 港口水工建筑物检测与评估技术规范[S].
- [8] 涂启华,王胜年,潘德强,等. 基于耐久性寿命预测的海工混凝土结构检测评估[J]. 水运工程,2008(12): 64-69.
- [9] JTS 151—2011 水运工程混凝土结构设计规范[S].

(本文编辑 武亚庆)

© 2013 China Water & Power Press. All rights reserved. This article is published in Chinese. For all other use, permission should be sought from China Water & Power Press.

著作权授权声明

全体著作权人同意: 论文将提交《水运工程》期刊发表, 一经录用, 本论文数字化复制权、发行权、汇编权及信息网络传播权将转让予《水运工程》期刊编辑部。