

严酷环境下混凝土结构的 耐久性设计(第二版)

DURABILITY DESIGN
OF CONCRETE STRUCTURES
IN SEVETE ENVIRONMENTS (Second Edition)

【挪威】Odd E. Gjrv 著
赵铁军 译



CRC Press
Taylor & Francis Group

中国建材工业出版社

严酷环境下混凝土结构的 耐久性设计(第二版)

Durability Design of Concrete Structures
in Severe Environments(Second Edition)

Odd E. GjØrv 著
赵铁军 译

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

严酷环境下混凝土结构的耐久性设计/(挪) 乔伊夫著; 赵铁军译. —2 版.
—北京: 中国建材工业出版社, 2015. 4

书名原文: Durability Design of Concrete Structures in Severe Environments

ISBN 978-7-5160-1175-1

I. ①严… II. ①乔… ②赵… III. ①混凝土结构—耐用性—结构设计
IV. ①TU370. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 048431 号

Durability Design of Concrete Structures in Severe Environments (Second Edition)

ISBN13: 978-1-4665-8729-8 (Hardback)

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved; 本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下, CRC 出版公司出版, 并经其授权翻译出版. 版权所有, 侵权必究.

China Building Materials Industry Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher. 本书中文简体翻译版授权由中国建材工业出版社独家出版并限在中国内地地区销售. 未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分.

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签, 无标签者不得销售.

严酷环境下混凝土结构的耐久性设计 (第二版)

[挪威] Odd E. GjØrv 著

赵铁军 译

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市海淀区三里河路 1 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

开 本: 710mm × 1000mm 1/16

印 张: 14

字 数: 251 千字

版 次: 2015 年 4 月第 2 版

印 次: 2015 年 4 月第 1 次

定 价: 88.00 元

著作权合同登记图字: 01-2015-1244

本社网址: www.jcbs.com.cn 微信公众号: zgjcgybcs

本书如出现印装质量问题, 由我社网络直销部负责调换. 联系电话: (010) 88386906

前 言

严酷环境中的混凝土结构涉及很多环境类型和很多结构类型。 尽管一些腐蚀过程诸如碱 - 骨料反应、冻融破坏、化学侵蚀对许多重要混凝土结构仍是严峻挑战和问题,但近年来混凝土技术的快速发展已使控制这些腐蚀过程变得比较容易。 另外,对于严酷环境下的新建混凝土结构,由于所用的混凝土通常很密实,混凝土的碳化实际上不会引起任何麻烦。 然而,对于氯离子环境下的混凝土结构,外部氯离子侵入和内部钢筋过早锈蚀仍是保障许多重要的混凝土基础设施耐久性能的难点和严峻挑战。 而近年来,使用除冰盐越来越多,海洋环境混凝土结构发展也越来越快。

为了更好地控制氯离子侵入和钢筋锈蚀,改进施工方法和规范要求以保障适当的混凝土质量和保护层厚度变得非常重要。 然而,在新建混凝土结构完工之时,所获得的施工质量通常离散性很高、偏差很大,这样,如果环境条件恶劣,不管用的是什么耐久性规范和材料,结构的弱点和缺陷很快就会显现。 所以,在混凝土施工过程中,完善的质量控制和质量保障措施也非常重要。

用随机方法进行耐久性设计可以在一定程度上调节高离散性和偏差,但是单一的数值方法不足以保证耐久性。 为获得更可控和更好的耐久性,有必要规定一些耐久性方面的要求,这些要求在混凝土施工过程中可监测可控制,以保证适当质量。 对于严酷环境下的混凝土结构,要使其耐久性和可控服役寿命延长,记录归档有关施工质量、符合规定耐久性要求的文件应是任何合理方法的关键。 采取较好方法进行状态评价和预防性维护也很必要,而且这些方法应是获得混凝土结构更可控耐久性和服役寿命的基础。

近年来,越来越多的混凝土结构业主已经认识到,在满足现有混凝土标准和规范之外,要获得更好更可控的耐久性,即使附加很小一些花费,也是很好的投资。 然而,更好更可控的耐久性不仅是技术和经济问题,也是重要性不断增长的环境和可持续发展问题。 尽管本书主要从技术角度论述了更好更可控耐久性,但也简要介绍了全寿命周期成本和全寿命周期评价等内容。

致 谢

在我研究延长和控制新建重要混凝土基础设施耐久性的这许多年工作中，我要感谢我的一些博士生，他们一直致力于有关混凝土耐久性的研究，并对耐久性设计和混凝土质量控制两个方法（本书将论述）有所贡献。他们是：Tiewei Zhang, Olaf Lahus, Arne Gussiås, Franz Pruckner, Liang Tong, Surafel Ketema Desta, Miguel Ferreira, Öskan Sengül, Guofei Liu, 和 Vemund Årskog。

我还要感谢给予很好科研合作与支持的挪威海岸总署和挪威港口工程师协会，并特别感谢 Tore Lundestad 和 Roar Johansen 先生，他们怀着极大的兴趣和勇气，成功将新知识用到挪威港口新建的重要混凝土基础设施中。合作结果，研制出了新建高耐久海洋混凝土结构推荐标准和指南，并于 2004 年被挪威港口工程师协会采用。这些推荐标准和指南在实际应用中的经验和教训，在接下来的修订版中得到了体现，第三版，也就是最后一版，从 2009 年起也被 PIANC 的挪威篇采用，PIANC 是有水传输的基础设施世界性协会。这些推荐标准和指南基本上与本书中描述的相同，作为耐久性分析基础的 DURACON 软件也与之相同。该软件可从 PIANC 的挪威篇首页上（<http://www.pianc.no/duracon.php>）自由下载。

在本书的第二版，也即修订版中，包含了更多的将如上耐久性设计和混凝土质量控制方法用于近年来奥斯陆港口 KF 和在奥斯陆的 Nye Tjuvholmen KS 实际商业工程的结果和经验。有机会发表这些结果深感荣幸。

本书还包含新加坡南洋理工大学较系统的 NRF 研究项目“未来水下基础设施和 underwater city”的一些初步研究结果，在此表示感谢。在该项目中，上述耐久性设计和混凝土质量控制方法也作为有大量接触海水混凝土结构的新加坡城市未来发展的部分技术基础所采用。

Odd E. GjØrv

挪威 Trondheim 市

作者简介

Odd E. Gjrv, 博士, 挪威科技大学 (Trondheim 市) 建筑材料系名誉教授。他 1971 年到该校任教, 给混凝土技术专业的本科生和研究生开设了许多课程, 还作为混凝土技术专业的硕士生和博士生导师指导了很多学生。作为客座教授, 他在美国伯克利加州大学讲过学, 还受邀在许多国家讲课。1979 年, 成为挪威科学院院士, 参与了大量的国际性专业组织和学会。目前, 他受聘作为 NRF 研究项目的国际合作者在新加坡南洋理工大学进行“未来水下基础设施和 underwater city”研究。

Gjrv 博士发表了 350 余篇科技论文, 出版了 2 部著作, 并参与了许多其他专业书籍的编写。由于研究成果丰硕, 他获得了许多国际性奖励和荣誉。自 1989 年起, 他成为美国混凝土学会会员。在 1971 ~ 1995 年期间, 他连续参与开发和建设了北海的所有油气钻探海洋混凝土平台。Gjrv 博士研究领域涵盖了先进混凝土材料、混凝土施工、严酷环境下混凝土结构耐久性能等。可通过网站 <http://folk.ntnu.no/Gjrv/> 与作者联系。

再版译序

本书第一版的中文版于2010年1月由中国建材工业出版社出版发行。在第一版翻译、联络、出版及后期发行等效果看，一切良好，而且各方合作愉快。这期间，我们也邀请了Gjørv教授到学校作学术报告和有关学术交流，大家一致对前期合作感到满意，并表达了对之后继续合作的愿望。在本书再版编写的过程中，Gjørv教授及时告知我们编写进程，当我们表示愿意继续翻译该书再版并希望继续合作时，他欣然同意，并在该书再版印刷的第一时间通知我们，我们深感荣幸。于是，我们马上联系中国建材工业出版社有关人员，虽然各项工作都需严谨敬业，但确实轻车熟路。

翻译中发现，与第一版比较，第二版进行了重新组织，并增补了许多内容。在中文书出版的翻译和校对过程中，Gjørv教授又通过邮件增补和修改了一些内容。

感谢Gjørv教授对我们的信任；感谢中国建材工业出版社贺悦女士与我们多年卓有成效的合作；感谢团队成员万小梅、曹卫群、张鹏、王鹏刚、尚君、王兰芹、高倩、陆文攀等参与翻译和校对；感谢研究课题——国家973项目（2015CB655100）和国家自然科学基金重点国际合作项目（51420105015）的支持。

由于译者的专业和英语水平有限，难免有疏漏和不当之处，敬请读者批评指正。

赵铁军

2014年11月于青岛



中国建材工业出版社
China Building Materials Press

我们提供

图书出版、图书广告宣传、企业/个人定向出版、设计业务、企业内刊等外包、
代选代购图书、团体用书、会议、培训，其他深度合作等优质高效服务。

编辑部
010-88386119

宣传推广
010-68361706

出版咨询
010-68343948

图书销售
010-88386906

设计业务
010-68361706

邮箱: jccbs-zbs@163.com

网址: www.jccbs.com.cn

发展出版传媒 服务经济建设

传播科技进步 满足社会需求

(版权所有，盗版必究。未经出版者预先书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。举报电话：010-68343948)

目 录

第1章 历史回顾	1
参考文献	12
第2章 现场调查	15
2.1 概述	15
2.2 港口结构	16
2.3 桥梁工程	36
2.4 近海工程	45
2.5 其他工程结构	54
2.6 总结	55
2.6.1 概述	55
2.6.2 劣化机理	55
2.6.3 标准和细则	56
2.6.4 实际施工质量	57
2.6.5 结构的运营维护	57
参考文献	58
第3章 钢筋的锈蚀	64
3.1 概述	64
3.2 氯离子侵蚀	65
3.2.1 概述	65
3.2.2 水泥类型的影响	66
3.2.3 温度的影响	73
3.3 钢筋的钝化	76
3.4 锈蚀速率	78

3.4.1 概述	78
3.4.2 电阻率	78
3.4.3 氧的获得	80
3.5 裂缝	82
3.6 自由暴露钢材与混凝土内钢筋之间的电偶	83
3.7 结构设计	84
参考文献	85

第4章 耐久性分析 89

4.1 概述	89
4.2 氯离子渗透计算	91
4.3 概率计算	91
4.4 锈蚀概率计算	93
4.5 输入参数	94
4.5.1 概述	94
4.5.2 环境荷载	95
4.5.3 混凝土质量	98
4.5.4 混凝土保护层厚度, X_c	103
4.6 案例分析	103
4.6.1 概况	103
4.6.2 混凝土港口结构	104
4.6.3 水下结构	108
4.6.4 结果评价与讨论	111
参考文献	112

第5章 附加策略与防护措施 117

5.1 概述	117
5.2 不锈钢钢筋	117
5.3 其他防护措施	121
5.3.1 非金属筋	121
5.3.2 混凝土表面防护	122
5.3.3 混凝土憎水化	126
5.3.4 阴极保护	126

5.3.5 阻锈剂	128
5.3.6 结构设计	128
5.3.7 预制结构构件	129
参考文献	131
第6章 混凝土质量控制与保障	135
6.1 概述	135
6.2 氯离子扩散系数	136
6.2.1 概述	136
6.2.2 试验的试件	138
6.2.3 试验步骤	138
6.2.4 结果评价	140
6.3 电阻率	140
6.3.1 概述	140
6.3.2 试验方法	140
6.3.3 结果评价	142
6.4 混凝土保护层	144
6.5 电连通性	145
6.5.1 概述	145
6.5.2 检测步骤	145
参考文献	146
第7章 实际施工质量	148
7.1 概述	148
7.2 符合规定的耐久性	148
7.3 现场质量	149
7.4 潜在质量	150
第8章 状态评估,防护与修复	151
8.1 概述	151
8.2 氯离子侵入控制	152
8.3 锈蚀概率	154
8.4 防护措施	156

8.5 修复	157
8.6 案例分析	157
8.6.1 概述	157
8.6.2 状态评估	157
8.6.3 防护措施	159
参考文献	160
第9章 实际应用	162
9.1 概述	162
9.2 1号集装箱码头,奥斯陆(2002年)	163
9.2.1 耐久性规定	163
9.2.2 实际施工质量	164
9.2.3 现场质量	165
9.2.4 潜在质量	166
9.3 2号集装箱码头,奥斯陆(2007年)	166
9.3.1 概况	166
9.3.2 耐久性规定	166
9.3.3 符合规定的耐久性	167
9.3.4 现场质量	170
9.3.5 潜在质量	171
9.4 新城开发区,奥斯陆(2010年)	171
9.4.1 概况	171
9.4.2 耐久性规定	173
9.4.3 混凝土质量控制	174
9.4.4 实际施工质量	177
9.4.5 抗冻性能	180
9.4.6 附加防护措施	181
9.5 结果评价与讨论	182
9.6 结束语	184
参考文献	185
第10章 全寿命周期成本	187
10.1 概述	187

10.2 案例研究	188
10.2.1 概述	188
10.2.2 不采取任何措施	190
10.2.3 提高混凝土强度	190
10.2.4 增加混凝土保护层厚度	190
10.2.5 提高混凝土强度并增加保护层厚度	190
10.2.6 采用 75% 的不锈钢	190
10.2.7 全部采用不锈钢(100%)	191
10.2.8 阴极保护	191
10.2.9 结果评价与讨论	191
参考文献	192
第 11 章 全寿命周期评价	193
11.1 概述	193
11.2 全寿命周期评价框架	194
11.3 案例分析	197
11.3.1 概述	197
11.3.2 小面积修补	197
11.3.3 表面憎水处理	198
11.3.4 结果评价与讨论	199
参考文献	200
第 12 章 标准与实施细则	202
12.1 概述	202
12.2 标准与实施细则	203
12.2.1 近海混凝土结构	203
12.2.2 陆上混凝土结构	204
12.3 新的推荐性标准	209
12.3.1 服役期	209
12.3.2 实际施工质量	210
12.3.3 状态评估和预防性维护	210
参考文献	211

第1章 历史回顾

1756~1759年间, Smeaton 在英吉利海峡出海口处的埃迪斯通岩石上建造了著名的灯塔 (Smeaton, 1791), 此工程中首次使用了为适应恶劣的海洋环境而专门开发的水泥 (Lea, 1970)。1877年, 由于基岩的严重腐蚀而被迫拆除时, 这个灯塔已经完好无损地屹立了一百多年。自从 Smeaton 报道自己建造这座灯塔 (图 1.1) 的经验以来, 有关海洋环境中服役混凝土的大量文献已成为漫长的混凝土技术史中引人入胜的篇章。在过去的 150 年间, 许多专业人士、委员会和国家部门都曾致力于这一课题的研究, 并在国际会议上发表了大量学术论文, 诸如国际材料试验联合会于 1909 年在哥本哈根、1912 年在纽约以及 1927 年在阿姆斯特丹组织召开了三届国际会议; 国际航运协会 (PIANC) 于 1923 年在伦敦、1926 年在开罗、1931 年在威尼斯以及 1949 年在里斯本也召开了多次国际会议; 国际材料与结构试验研究协会 (RILEM) 于 1961 年和 1969 年在布拉格举行了国际会议; PIANC-RILEM 于 1965 年在巴勒莫组织了国际会议; 国际预应力混凝土协会 (FIP) 于 1972 年在第比利斯举行国际会议。据 Atwood 和 Johnson (1924) 统计, 截至 1923 年这方面的相关文献已有 3000 余篇, 并且针对海洋环境下混凝土结构的耐久性研究还将继续成为课题研究和国际会议的主题 (Malhotra, 1980、1988、1996; Mehta, 1989、1996; Sakai 等, 1995; Gjrv 等, 1998; Banthia 等, 2001; Oh 等, 2004; Toutlemonde 等, 2007; Castro-Borges 等, 2010; Li 等, 2013)。

上述所有的这些文献对影响严酷环境中混凝土结构耐久性和长期性能的各种劣化作用进行了广泛报道和讨论。尽管碱-骨料反应、冻融和化学侵蚀等许多劣化作用仍然是很多混凝土结构面临的严重挑战和潜在威胁, 但是, 很多重要结构的耐久性和长期性能面临的最大威胁并不是混凝土自身的破坏, 而是来源于氯离子导致的混凝土内钢筋的电化学腐蚀。早在 1917 年, Wig 和 Ferguson (1917) 对美国海域的混凝土结构进行了一次全面调查之后, 就指出了混凝土中钢筋锈蚀的问题。

长期以来, 除了桥梁和海港等传统的混凝土结构外, 钢筋混凝土和预应力混凝土已被越来越多地用于建造非常重要的海洋结构和大型船舶。在地球总表面积中, 海洋面积大约占了 70%, 而剩余面积中的可居住部分甚至更小而且

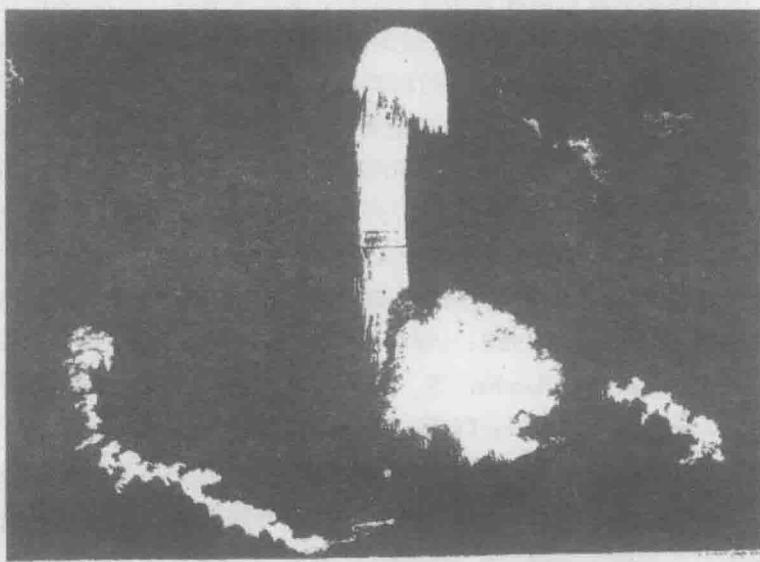
还在不断地被增长的人口占据。由于对更广阔空间、原材料和交通运输的需求不断增长, 越来越多的人类活动逐渐向海洋和沿海地区转移。

A
NARRATIVE OF THE BUILDING
AND
A DESCRIPTION of the CONSTRUCTION
OF THE
EDYSTONE LIGHTHOUSE
WITH STONE:

TO WHICH IS JOINED,

AN APPENDIX, giving some Account of the LIGHTHOUSE on the SPURN POINT,
BUILT UPON A SAND.

By JOHN SMEATON, *CIVIL ENGINEER, F.R.S.*



The MORNING after A STORM at S.W.

LONDON:
PRINTED FOR THE AUTHOR, BY H. HUGHES;
SOLD BY C. NICOL,
BOOKSELLER TO HIS MAJESTY, PALACE-MALL. 1791.

图 1.1 John Smeaton 于 1791 年撰写的埃迪斯顿灯塔建设报告的首页 (来源: 大英博物馆)

早在 20 世纪 70 年代,美国混凝土学会 (ACI) 就对未来混凝土的应用做了技术性预测,其中提到了大陆架的快速开发 (ACI, 1972)。在该预测报告中,不仅探讨了与海洋石油、天然气开采有关的工程结构,而且还探讨了能够减轻陆地拥挤状况的工程结构。1972 年,在第比利斯 (Tbilisi) 由 Gosstroy 教授组织召开的一个关于混凝土海洋结构的 FIP 论坛中 (Gosstroy, 1972), 讨论了将在海洋和近海环境开发活动中不断发挥作用的众多混凝土结构。这些结构形式种类繁多, 诸如:

- 无锚固的自由漂浮结构, 如船、游艇、海面漂浮箱;
- 浮在水平面上的锚固结构, 如桥、干船坞、操作平台、泊位、发电厂、机场、城市;
- 浮在水平面下的锚固结构 (正浮力), 如隧道;
- 位于海床以上的底部支撑结构 (负浮力), 如隧道、仓库;
- 落在海床上或以下的底部支撑结构 (负浮力), 如桥梁、港口结构、隧道、仓库、沉箱、操作平台, 以及潮汐发电站和核电站。

ACI 预见性地指出, 混凝土在海洋工程, 尤其是近海石油和天然气勘探工程中的应用将具有巨大的潜力。

迄今为止, 挪威已建造了大量的海洋混凝土结构, 在海洋环境下的混凝土应用方面具有悠久的历史。早在 20 世纪初期, 在修建美国与加拿大之间的底特律河隧道时, 两位挪威工程师 Gundersen 和 Hoff 就开发并申请了用于水下混凝土浇筑的“导管法”专利 (Gjörv, 1968)。从 1910 年 Gundersen 回到挪威并成为 AS Høyer-Ellefsen 公司的董事长以来, 他提出的水下浇筑混凝土的新专利方法也成为了挪威岩石海岸沿线上新一代码头和港口结构建造的基本方法 (Gjörv, 1968, 1970)。这些结构通常是由一个位于柱顶的开放式钢筋混凝土桥面板和位于水下的钢筋混凝土柱组成。尽管水下混凝土柱已逐渐被钢管混凝土所取代, 但是这种开放式混凝土结构依然是挪威沿海最普遍的港口结构形式 (图 1.2)。



图 1.2 开放式混凝土结构仍然是挪威沿岸港口结构中最普遍的形式

由于海岸线漫长, 且其间分布着众多的峡湾和大量有人居住的岛屿, 因此挪威在将混凝土用作海洋环境建筑材料方面已有悠久的历史 (图 1.3)。起初,



图 1.3 拥有众多峡湾和无数大大小小岛屿的挪威沿海，岸上和海上都有许多混凝土结构（来源：NOTEBY AS）