

文章编号:1007-9629(2023)08-0897-09

环渤海湾海洋混凝土结构的长寿命研究与分析

麻海燕¹, 宋姗姗¹, 余红发^{1,*}, 孙悦锋², 徐 彧³

(1. 南京航空航天大学 土木与机场工程系, 江苏 南京 211106; 2. 中交一航局三公司, 辽宁 大连 116083; 3. 南京高等职业技术学校, 江苏 南京 210019)

摘要:以环渤海湾海洋工程混凝土结构耐久性作为研究对象,根据多年来积累的实验室、海洋暴露站和工程实测数据,采用 ChaDuraLife V1.0 混凝土结构寿命预测模型与计算机软件,分析不同矿物掺合料掺量、水胶比对海洋混凝土结构服役寿命的影响规律.结果表明:降低水胶比,提高粉煤灰掺量和磨细矿渣掺量都能有效延长海洋混凝土结构的预期服役寿命.以环渤海湾海洋浪溅区混凝土结构为例,最长服役寿命所对应的海洋混凝土配合比最优参数是:粉煤灰和磨细矿渣掺量分别为 20%、40%,水胶比为 0.30,混凝土结构满足 100、200、500 a 寿命所需最小保护层厚度分别为 60、75、120 mm.

关键词:海洋混凝土结构;耐久性设计;保护层厚度;矿物掺合料;水胶比

中图分类号:TU528

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.08.010

Research and Analysis on Long Life of Marine Concrete Structure in Bohai Gulf

MA Haiyan¹, SONG Shanshan¹, YU Hongfa^{1,*}, SUN Yuefeng², XU Yu³

(1. Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;
2. No.3 Engineering Company Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Company, Dalian 116083, China;
3. Nanjing Technical Vocational College, Nanjing 210019, China)

Abstract: Durability of concrete structures in marine engineering around Bohai Gulf was studied. According to the data obtained from a great series of experiments, the effect of mix design factors including different types of supplementary cementitious materials and different water-binder ratios on the life span of concrete structure in marine environment was carefully studied with the help of ChaDuraLife V1.0 life prediction model and software, which is developed on the base of reliability and modified chloride diffusion theory. The results show that the reduction in the water-binder ratio and the increment in content of fly ash and ground slag can effectively prolong the expected life span of marine concrete structures. Taking the concrete structure with the steel cover thickness of 75 mm in sea splash zone around Bohai Gulf as an example, the mix design which has the water-binder ratio of 0.30, fly ash content of 20% and slag content of 40% is corresponding to the longest life span of marine concrete. In this area, the minimum thickness of concrete steel reinforcement in this mix design corresponds to the life span of 100, 200, 500 a are 60, 75, 120 mm respectively.

Key words: marine concrete structure; durability design; thickness of concrete steel reinforcement; mineral admixtures; water-binder ratio

影响海工混凝土结构服役寿命的主要因素是海洋氯化物引起的钢筋锈蚀,随着钢筋锈蚀作用的逐

渐发展,会导致混凝土结构出现顺筋开裂、承载力下降等一系列耐久性和安全性问题.1970年 Collepardi

收稿日期:2022-10-26; 修订日期:2022-12-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878350,11832013)

第一作者:麻海燕(1976—),女,湖南吉首人,南京航空航天大学副教授,硕士生导师,博士.E-mail:mahaiyan@nuaa.edu.cn

通讯作者:余红发(1964—),男,湖北武穴人,南京航空航天大学教授,博士生导师,博士.E-mail:yuhongfa@nuaa.edu.cn

等^[1]提倡用Fick第二扩散定律来描述氯离子在混凝土中的表观扩散行为,随后各种修正的氯离子扩散模型陆续被提出.比较典型的氯离子扩散模型包括:Mangat模型^[2]、Maage模型^[3]、Amey模型^[4]、Kassir模型^[5]、欧洲DuraCrete模型^[6]、美国Life-365模型^[7]、瑞典ClinConc模型^[8]以及余红发等^[9-10]提出的修正氯离子扩散模型及其编制的ChaDuraLife V1.0氯盐环境下混凝土结构寿命预测模型与计算机软件^[11].

在经典氯离子扩散模型的适用性方面,Tang等^[12]研究指出瑞典ClinConc模型适用性较好,余红发等^[10]通过对多种模型对比研究后发现,ChaDuraLife V1.0模型更加适合于海洋混凝土结构的寿命设计,并已经成功应用于大连湾海底沉管隧道混凝土结构的寿命设计.关于混凝土结构寿命,吴中伟^[13]认为应在150~200 a,蒲心诚^[14]认为在理论上可达500~2 000 a.西方发达国家已经采用大掺量矿物掺合料(粉煤灰、磨细矿渣等)高性能混凝土(HPC)建造了设计寿命为150 a的中东海湾混凝土桥梁、设计寿命为250 a的荷兰东谢尔德预应力混凝土海闸和设计寿命为300 a的澳大利亚昆士兰布里斯班大桥^[15].因此,中国非常有必要突破100~120 a寿命设计的行业界限或思维定式,开展200 a甚至500 a的混凝土结构服役寿命设计方法和分析技术研究工作.

环渤海湾包含众多深水不冻港,并处于东北亚经济圈的中心地带,在当前背景下具有巨大发展潜力.本文以拟规划投资两千亿级的环渤海湾重大海洋工程为背景,根据本课题组多年来积累的实测数据,运用ChaDuraLife V1.0模型进行分析,研究粉煤灰掺量 w_{FA} 、磨细矿渣掺量 w_{GGBS} 和水胶比 m_w/m_b 对海洋混凝土结构服役寿命的影响规律,为实现中国大型跨海工程混凝土结构超长寿命设计提供优化的混凝土配合比设计参数和最小钢筋保护层厚度等建议.

1 试验方法

1.1 海洋工程混凝土的设计与试验

1.1.1 原材料

水泥(C)采用大连水泥厂的P·O 42.5普通硅酸盐水泥,比表面积为 $347 \text{ m}^2/\text{kg}$;粉煤灰(FA)采用大连华能I级粉煤灰,细度¹⁾(0.045 mm)4.6%,需水量比91%;矿渣粉(GGBS)采用大连金桥公司生产的S95级磨细矿渣,密度 $2.88 \text{ g}/\text{cm}^3$,比表面积 $415 \text{ m}^2/\text{kg}$.水泥、粉煤灰和矿渣的主要化学组成见文献^[13].砂(S)采用大连河砂,中砂,表观密度 $2 640 \text{ kg}/\text{m}^3$,堆

积密度 $1 480 \text{ kg}/\text{m}^3$,含泥量1.3%;石(G)采用大连碎石,表观密度 $2 750 \text{ kg}/\text{m}^3$,堆积密度 $1 570 \text{ kg}/\text{m}^3$,最大粒径为25 mm,含泥量0.4%,针片状颗粒含量1%,压碎指标8.4%,基本属于5~25 mm连续级配;减水剂(WR)采用大连申维建材制品有限公司产SW-A型聚羧酸高性能减水剂,液体,密度 $1.044 \text{ g}/\text{mL}$,pH值5.5,氯离子含量0%,总碱含量1.02%,减水率26.3%,含气量2.0%;引气剂(AE)采用青岛科力建材有限责任公司产PC-2型松香热聚物类引气剂,pH值12.2,氯离子含量0%,总碱含量0.68%,泡沫度45%,泌水率50.8%,减水率7.5%,含气量4.4%;水(W)采用大连自来水.

1.1.2 混凝土试件的制备与养护

表1为设计强度等级C40~C50的高性能混凝土配合比和基本性能.用于海洋工程的高性能混凝土,采用大掺量矿物掺合料混凝土的设计理念.先将水泥、石、砂、矿物掺合料、外加剂等原材料在搅拌机中干拌1 min,再加入水搅拌3 min.出料之后首先测定拌和物的坍落度和含气量,然后浇注振动成型混凝土试件,试件尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$.试件成型后用保鲜膜覆盖,带模养护24 h,拆模后继续进行标准养护.

1.1.3 混凝土室内海水浸泡试验和海洋浪溅区现场暴露试验

混凝土试件标准养护28 d后,将各配合比试件分别在实验室海水池浸泡并在环渤海湾的大连与秦皇岛有关海港进行现场暴露试验^[10].图1是混凝土试件的环渤海湾海洋暴露试验和室内海水浸泡试验情况,其中海洋暴露试验分别为大气区、潮汐区、浪溅区和水下区,室内浸泡试验中海水取自大连湾.

1.1.4 混凝土试件的钻孔取样

对经过室内海水浸泡或海洋浪溅区现场暴露达到一定时间的混凝土试件,用工业台钻进行钻孔逐层取样.钻孔面选择混凝土试件的2个相对的侧面,取样位置如图2所示.图2(a)中,序号1表示第1个暴露龄期的取粉位置,序号2表示第2个暴露龄期的取粉位置,依次类推.每层取样厚度5 mm,同时收集同一层厚度下8个坐标位置处等量的钻孔粉末样品合并成该指定深度的混凝土粉末样品,用于后续的氯离子含量分析.

1.2 混凝土中氯离子含量测试方法

根据JTJ270—1998《水运工程混凝土试验规程》对混凝土粉末样品中总氯离子含量与自由氯离子含

1) 文中提及的细度、掺量和水胶比等除特别说明外均为质量分数或质量比.

表1 高性能混凝土的配合比和基本性能
Table 1 Mix proportion and basic performance of HPC

Specimen	m_w/m_B	$w_{FA}/\%$	$w_{GGBS}/\%$	Mix proportion/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)								28 d compressive strength/MPa	Gas content (by mass)/%	Slump/ mm
				C	FA	GGBS	S	G	W	WR	AE			
A1-1	0.34	20	40	171	85	170	692	1 123	145	4.05	0.042 6	45.3	4.5	225
A1-2	0.34	20	35	192	85	149	692	1 123	145	4.05	0.042 6	48.2	5.3	225
A1-3	0.34	20	30	213	85	128	692	1 123	145	4.05	0.042 6	49.4	5.7	210
A1-4	0.34	20	25	235	85	106	692	1 123	145	4.05	0.042 6	51.7	6.0	225
B1-1	0.32	20	40	181	91	181	663	1 127	145	4.30	0.045 3	50.8	5.2	210
C1-1	0.30	20	40	193	97	193	632	1 128	145	4.83	0.062 8	55.4	4.0	220
E1-1	0.36	20	40	161	81	161	719	1 115	145	3.63	0.040 3	55.9	6.2	240
F1-1	0.34	15	25	265	66	110	688	1 106	150	3.97	0.052 9	58.1	4.5	230
F1-3	0.34	10	25	287	44	110	696	1 106	150	3.97	0.052 9	55.3	5.0	225

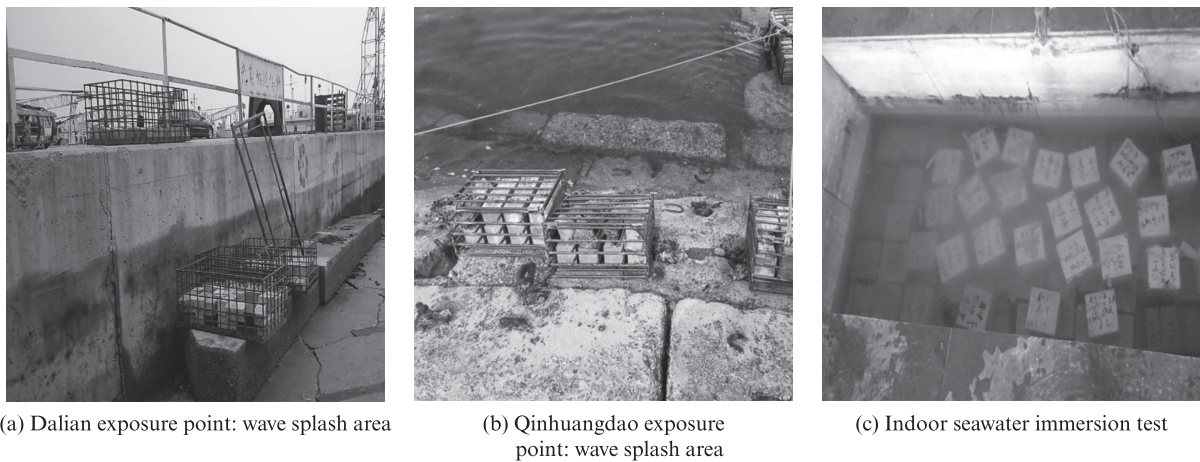


图1 混凝土试件的环渤海湾海洋暴露试验与室内海水浸泡试验
Fig. 1 Exposure test and indoor seawater immersion test of concrete specimens in Bohai Gulf

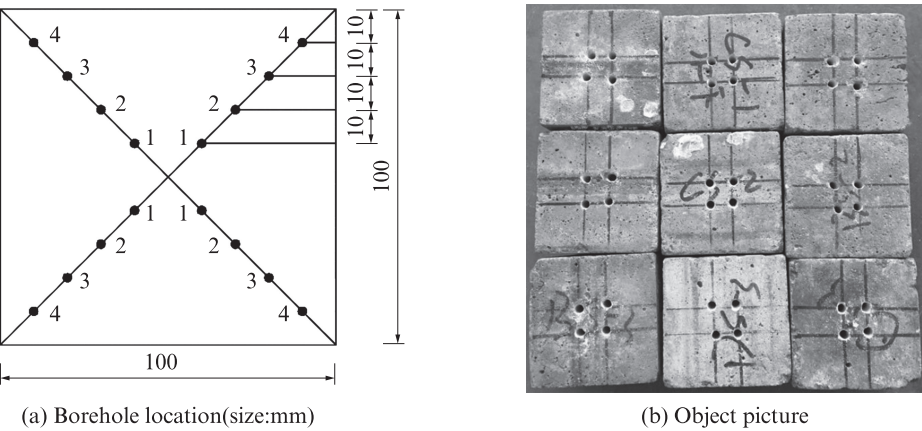


图2 混凝土暴露试件的钻孔逐层取样^[10]
Fig. 2 Layer-by-layer drilling sampling of exposed concrete specimens

量的化学分析,其中,总氯离子含量分析采用酸溶萃取法,自由氯离子含量分析采用水溶萃取法。

1.3 基于可靠度理论的海洋混凝土结构寿命分析模型与方法

1.3.1 氯离子扩散导致钢筋锈蚀的寿命预测模型
ChaDuraLife V1.0模型设计了综合考虑混凝土

氯离子扩散系数时变性效应^[3]、混凝土氯离子结合能力^[16]和结构微缺陷影响^[17]的修正氯离子扩散理论新方程:

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} = \frac{KD_0 t_0^m}{1+R} \cdot t^{-m} \cdot \frac{\partial^2 C_f}{\partial x^2}$$

(1)

式中: t 为混凝土暴露时间; C_f 为扩散深度 x 处的自由

氯离子含量(以混凝土质量计); R 为混凝土的氯离子结合能力; D_0 为混凝土在暴露时间 $t_0=28$ d时的自由氯离子扩散系数; m 为反映氯离子扩散系数随着暴露时间 t 呈幂函数衰减的时间依赖性指数; K 为混凝土微缺陷加速氯离子扩散的劣化效应系数。

在初始条件($t=0, x>0$ 时, $C_i=C_0$)和常数边界条件($x=0, t>0$ 时, $C_i=C_s$)下,余红发等^[9]经过严密的数学推导,得到一维半无限混凝土结构的修正氯离子扩散理论模型:

$$C_i = C_0 + (C_s - C_0) \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2 \sqrt{\frac{KD_0 t_0^m}{(1+R)(1-m)} \cdot t^{1-m}}} \right] \quad (2)$$

式中: C_s 为混凝土结构的表面自由氯离子含量; C_0 为混凝土内部的初始自由氯离子含量。

借助于Amey等^[4]和Kassir等^[5]提出的时变性边界条件,余红发^[18]提出了2种幂函数时变性边界条件:

$$C_s = kt^{1-m} + C_0 \quad (3)$$

$$C_s = kt^{\frac{1-m}{2}} + C_0 \quad (4)$$

式中: k 为常数。

在上述2种时变性边界条件下,当初始条件不变时,进一步推导出混凝土边界条件持续增长型的修正氯离子扩散理论模型。

1.3.2 混凝土结构可靠度理论

影响结构功能的因素可以归纳为2个综合变量,即结构的荷载作用效应 S 和结构抗力 R ,此时结构功能函数可表达为 $G=R-S$,当结构的极限状态方程 $G=0$ 时,表示结构处于极限状态.当各随机变量相互独立且服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 时,功能函数的平均值与标准差分别为 μ_z, σ_z .设 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 为影响结构可靠度因素的随机变量,结构功能函数为 $Z=G(X_1, X_2, \dots, X_n)$,随机变量的平均值和标准差为 μ_{X_i}, σ_{X_i} ,可将结构功能函数展开为泰勒级数,取线性项后得到其近似表达式为:

$$Z \approx g(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_n}) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial g}{\partial X_i} \bigg|_{\mu_{X_i}} (X_i - \mu_{X_i}) \quad (5)$$

式中: g 为 G 的泰勒展开级数。

则可近似确定可靠度指标 β 为:

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} \approx \frac{g(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_n})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \bigg|_{\mu_{X_i}} \sigma_{X_i} \right)^2}} \quad (6)$$

在对海洋工程混凝土进行服役寿命可靠度分析

时,钢筋锈蚀的临界氯离子含量 C_{cr} 为结构抗力,钢筋表面自由氯离子含量 C_i 为荷载效应,并建立功能函数 $Z=C_{cr}-C_i$.当混凝土内部钢筋表面 C_i 达到临界氯离子含量(即 $C_{cr} \leq C_i$)时,混凝土结构失效概率 $P_f = \Phi(-\beta)$,其中 $\Phi(x)$ 为正态分布函数,则混凝土结构的可靠度为 $P_r = 1 - P_f = 1 - \Phi(-\beta)$ 。

2 结果与讨论

2.1 混凝土中氯离子扩散规律与寿命设计参数

2.1.1 混凝土试件在海洋环境中的氯离子扩散规律

对C50中等掺量矿物掺合料高性能混凝土(试件F1-1)在大连与秦皇岛海洋浪溅区进行暴露试验,得到不同暴露时间下自由氯离子含量随混凝土深度变化的分布规律,见图3.由图3可知,混凝土试件内部自由氯离子含量随暴露时间和扩散深度的分布规律符合Fick第二扩散定律。

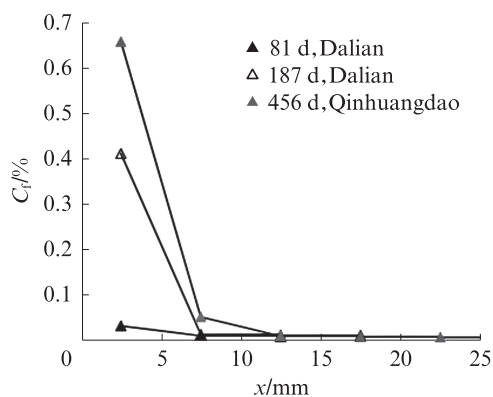


图3 海洋浪溅区混凝土试件F1-1的氯离子扩散规律

Fig. 3 Chloride diffusion law of concrete specimen F1-1 in splash zone

图4给出了试件F1-1的自由氯离子扩散系数 D_a 的时变规律.由图4可见,试件F1-1的氯离子扩散系数随着扩散时间衰减的时间依赖性指数 m 为0.581。

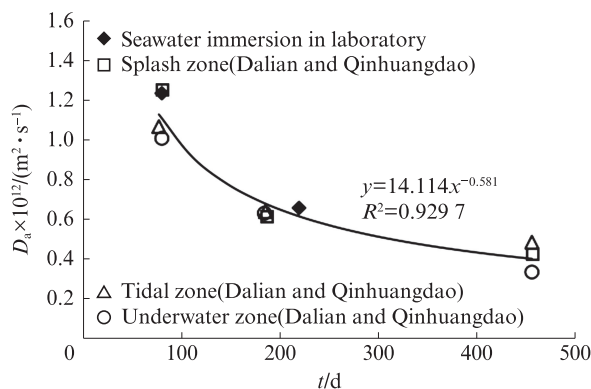


图4 试件F1-1自由氯离子扩散系数 D_a 的时变规律

Fig. 4 Time-varying law of D_a for specimen F1-1

2.1.2 大连地区海洋混凝土结构工程的氯离子扩散行为

图5为实际海洋工程中混凝土结构的氯离子扩散规律,其中显示了大连地区不同码头混凝土结构在浪溅区的典型自由氯离子含量分布规律,同时列出了阿尔及利亚加扎乌埃特(Ghazaouet)港服役58、95 a混凝土防波堤^[19]和法国圣纳泽尔(Saint Nazaire)港煤炭码头服役28 a混凝土梁^[20]的自由氯离子含量分布.由图5可见,实际海洋工程中混凝土结构内部的氯离子扩散行为同样符合Fick第二扩散定律.

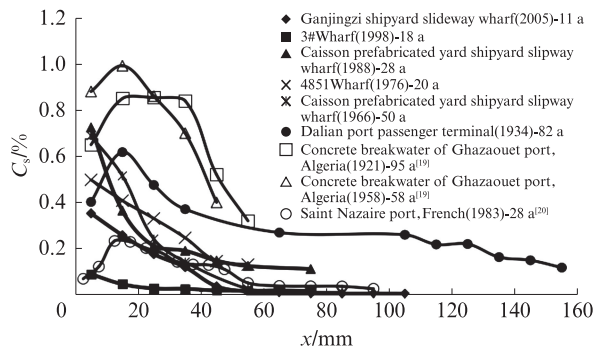


图5 实际海洋工程中混凝土结构的氯离子扩散规律
Fig. 5 Chloride diffusion law of actual marine engineering concrete structures

2.1.3 现代海洋混凝土结构寿命设计参数的确定

图6统计了大连海洋浪溅区混凝土(1934年和2005年)及其他3个服役时间海洋工程^[19-20]的自由氯离子扩散系数 D_a 的时变规律. Maage等^[21]分析了丹麦和瑞典的140多组数据,认为在60 a内时间依赖性指数 $m=0.64$. Yu等^[22]分析了2 207组全球数据(最长暴露时间91 a)得出 m 可以统一取值为0.630 4,与Maage等所得结果非常接近.

图7统计了中国环渤海湾、韩国与日本以及阿尔及利亚和法国等近似纬度地区海洋浪溅区混凝土结构的表面自由氯离子含量 C_s 的时变规律^[10]. 由图7可见,在 $m=0.630 4$ 时,表面自由氯离子含量与暴露时

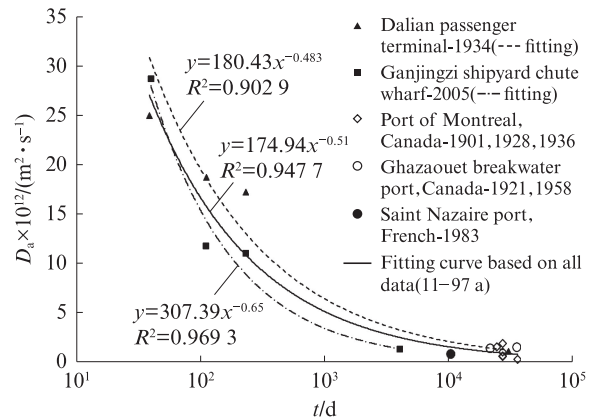


图6 实际海洋工程混凝土结构 D_a 的时变规律
Fig. 6 Time-dependent law of marine engineering concrete structure D_a

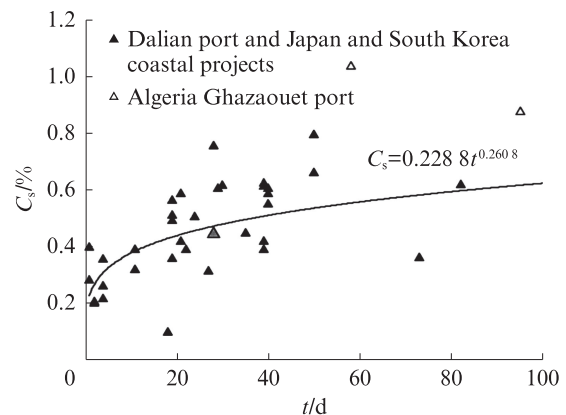


图7 实际海洋工程混凝土结构的 C_s 时变规律
Fig. 7 Time-dependent law of marine engineering concrete structure C_s

间之间符合非常显著的幂函数增长关系,见式(4),常数 $k=0.228 8$,显著性水平 $\alpha=0.01$.

表2是不同配合比混凝土在海水中自然扩散(暴露时间28 d)的自由氯离子扩散系数.其中, D_0 是在基准温度20℃下获得的自由氯离子扩散系数;考虑到环渤海湾海水温度常年保持在10℃左右,同时按照文献[16]计算出经过温度修正后的自由氯离子扩散系数 D_T .

表2 不同配比混凝土的自由氯离子扩散系数

Table1 Free chloride diffusion coefficient of concrete with different proportions

Coefficient	A1-1	A1-2	A1-3	A1-4	B1-1	C1-1	E1-1	F1-1	F1-3
$D_0 \times 10^{12} / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	1.84	2.01	2.03	1.79	1.65	1.58	2.00	2.39	2.46
$D_T \times 10^{12} / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	1.18	1.29	1.31	1.15	1.06	1.02	1.29	1.54	1.58

在进行海洋混凝土结构的服役寿命分析计算时, C_0 值取0.01%^[23].混凝土的 C_{cr} 值采用Funahashi^[24]的建议:浪溅区和潮汐区 $C_{cr}=0.05\%$,水下区 $C_{cr}=0.15\%$ ^[10].经过大连和秦皇岛海洋暴露试验和室内海水平行浸泡试验^[10], K 值平均值为:浪溅区1.81、潮汐区1.72和水下区1.62. k 值建议为:浪

溅区0.257 4,水下区和潮汐区取0.282 1. m 值取0.630 4.不同配合比混凝土试件在室内海水浸泡以及大连和秦皇岛海洋暴露试验81~456 d之后测定的氯离子结合能力 $E=0.36$ (样本数394,显著性水平 $\alpha=0.001$);保护层厚度 X_0 的计算范围为55~120 mm.除基准暴露时间 t_0 为常数(28 d)以外,其余扩散参数

均为正态分布随机变量^[25],计算时各扩散参数的变异系数取20%。

2.2 海洋暴露区域对海洋工程混凝土结构服役寿命的影响

以C50中等掺量矿物掺合料高性能混凝土(试件F1-3,其钢筋保护层厚度为60 mm)为例,计算混凝土结构在渤海湾不同海洋暴露区域服役过程中的失效概率,结果如图8所示。由图8可见,混凝土结构在不同海洋暴露区域服役寿命不同,在浪溅区的服役寿命最短(62~68 a),水下区的服役寿命最长(104~110 a),在潮汐区的服役寿命介于两者之间(65~70 a),其中浪溅区混凝土结构的服役寿命比水下区降低约40.4%。这充分证明,浪溅区是混凝土结构受到海洋环境影响最严酷的区域,因此本文选择海洋浪溅区环境进一步分析研究混凝土结构服役寿命与保护层厚度、混凝土配合比之间的关系。

2.3 矿物掺合料对海洋工程混凝土结构服役寿命的影响

2.3.1 粉煤灰掺量影响海洋浪溅区混凝土结构寿命的可靠度分析

图9给出了粉煤灰掺量对海洋浪溅区混凝土结构服役寿命的可靠度分析结果。其中试件F1-3、F1-1和A1-4的钢筋保护层厚度均为75 mm,水胶比均为

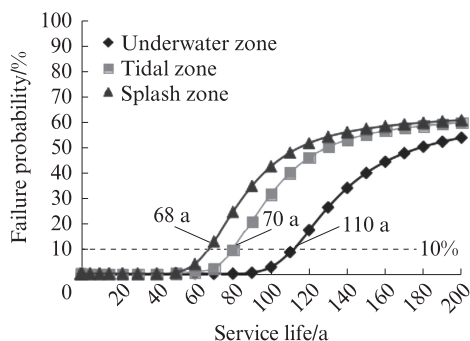


图8 混凝土结构在不同海洋暴露区域服役过程中的失效概率

Fig. 8 Failure probability of concrete structures in different marine exposed areas

0.34。由图9可见:在失效概率5%~10%条件下,复合掺加10%和15%粉煤灰的混凝土结构服役寿命分别为120~128、125~130 a,两者差异不明显;当复合掺加20%粉煤灰时,混凝土结构的服役寿命显著延长,达到了173~183 a,比复合掺加10%粉煤灰的混凝土结构服役寿命约延长了43%。因此,对于矿渣掺量25%的混凝土结构,同时再复合掺加20%粉煤灰有利于进一步提高海洋混凝土结构的耐久性。在钢筋保护层厚度75 mm时海洋浪溅区混凝土结构的服役寿命至少能够达到150 a,并且随着粉煤灰掺量的增加,混凝土对氯离子的固化能力有所提高^[26]。

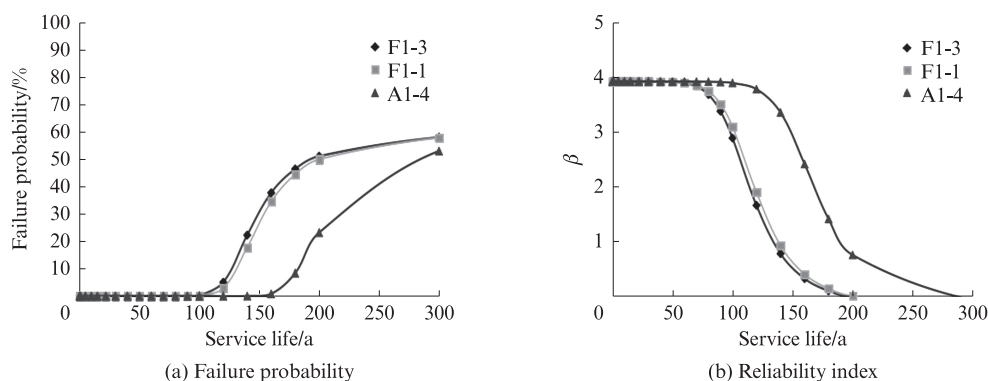


图9 粉煤灰掺量对海洋浪溅区混凝土结构服役寿命的可靠度分析

Fig. 9 Reliability analysis of fly ash content on service life of concrete structures in marine splash zone

2.3.2 磨细矿渣掺量影响海洋浪溅区混凝土结构服役寿命的可靠度分析

图10显示了在不同矿渣掺量条件下海洋浪溅区混凝土结构服役寿命的可靠度分析结果。其中,试件A1-1、A1-2和A1-3的钢筋保护层厚度均为75 mm,水灰比均为0.34。由图10可见,对于已经掺加20%粉煤灰的海洋浪溅区混凝土结构,当矿渣掺量由30%(150~160 a)增加到35%(152~162 a)时其服役寿命略有延长,当矿渣掺量进一步增加到40%时混凝土服役寿命的延长比较明显(168~178 a),延寿比例达

到了14%。这证明对于海洋混凝土结构,采用较大掺量的矿渣等矿物掺合料,非常有利于提高海洋混凝土结构的耐久性。在本文研究范围内,由40%硅酸盐水泥、20%粉煤灰和40%矿渣组成的胶凝材料,是海洋工程混凝土结构实现较长服役寿命的较理想胶凝材料配比方案。

2.4 水胶比对大掺量矿物掺合料高性能混凝土结构在海洋浪溅区服役寿命的影响

针对前述具有较长服役寿命的大掺量矿物掺合料高性能混凝土(复掺20%粉煤灰和40%矿渣),进

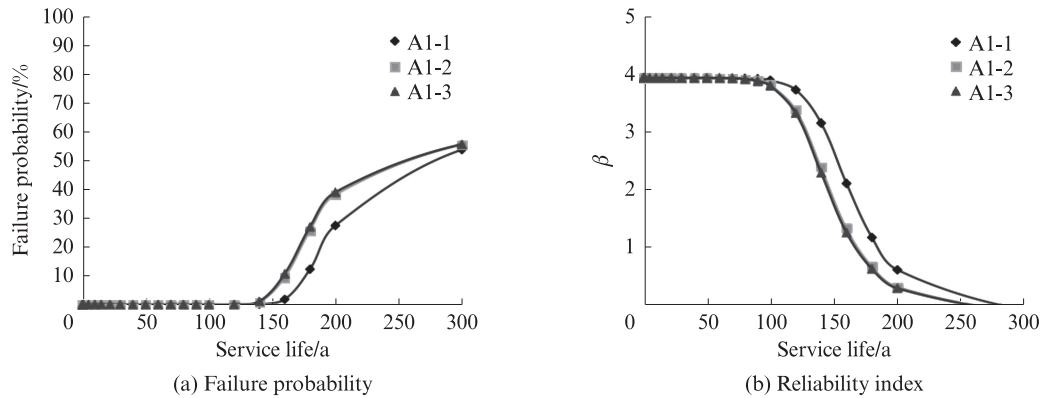


图10 不同矿渣掺量时海洋浪溅区混凝土结构服役寿命的可靠度分析

Fig. 10 Reliability analysis of service life for concrete structures in marine splash zone with different slag admixtures

一步计算了水胶比在0.30~0.36范围内的高性能混凝土结构在海洋浪溅区长期服役过程中的钢筋锈蚀概率和可靠度指标,结果如图11所示.其中,钢筋保

护层厚度均为75 mm,水胶比分别为0.36(试件E1-1)、0.34(试件A1-1)、0.32(试件B1-1)和0.30(试件C1-1).

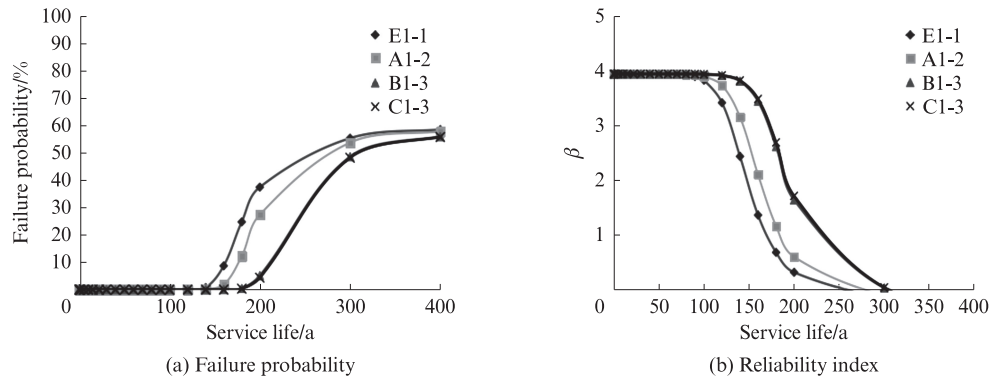


图11 水胶比对海洋浪溅区混凝土结构失效概率和可靠度的影响

Fig. 11 Effect of water-binder ratio on failure probability and reliability of concrete structures in marine splash zone

由图11可见:在复掺20%粉煤灰与40%矿渣以及失效概率为5%、10%的前提条件下,水胶比越低,海洋混凝土结构的服役寿命就越长;对于钢筋保护层厚度75 mm的海洋浪溅区混凝土结构,当水胶比为0.36(试件E1-1)时结构的服役寿命为152~162 a,当水胶比为0.30(试件C1-1)时结构的服役寿命延长到202~214 a,后者比前者寿命延长了32%.因此,具有较长寿命的海洋混凝土结构,宜采用低水胶比的大掺量矿物掺合料高性能混凝土.

2.5 渤海湾超长寿命海洋工程混凝土结构的可靠度分析

图12是钢筋保护层厚度 X_0 对处于海洋浪溅区环境的低水胶比、大掺量矿物掺合料高性能混凝土(试件C1-1)结构服役寿命的影响.由图12可见:对渤海湾海域的浪溅区混凝土结构,当采用优化配合比的大掺量矿物掺合料高性能混凝土(水胶比0.30,粉煤灰掺量20%,矿渣掺量40%)时,在失效概率为5%~10%条件下,满足100、200、500 a服役寿命的

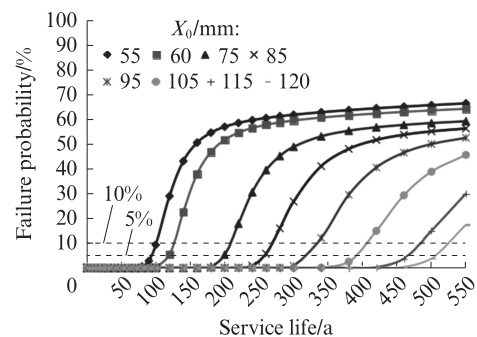


图12 钢筋保护层厚度对海洋浪溅区混凝土结构服役寿命的影响

Fig. 12 Effect of steel cover thickness on service life of concrete structures in marine splash zone

钢筋保护层厚度分别为60、75、120 mm;且随着保护层厚度的增加,钢筋锈蚀概率和腐蚀速率降低^[27].因此,基于可靠度理论和修正氯离子扩散理论,对于跨越渤海湾海峡的重大混凝土桥梁与隧道工程结构,实现500 a设计寿命的伟大构想,在理论上是完全可能的.为了避免保护层过厚可能导致混凝土结构表

面开裂的问题,可以借鉴澳大利亚昆士兰布里斯班大桥桥墩承台采用“在保护层中间位置加一层不锈钢钢筋防裂网”的成功设计经验^[15]。

3 结论

(1)分析研究了环渤海湾海洋混凝土结构在水下区、潮汐区和浪溅区长期服役过程中的钢筋锈蚀概率与可靠度指标演变规律,并证明了在浪溅区的混凝土结构服役寿命最短。

(2)研究了混凝土试件和实际混凝土结构在海洋环境中的氯离子扩散过程,混凝土具备氯离子结合能力,表面自由氯离子含量、自由氯离子扩散系数与暴露时间分别呈现幂函数增长和幂函数衰减关系,并确定了表面自由氯离子含量与氯离子扩散系数的时变性效应幂指数数值。

(3)降低水胶比,提高粉煤灰掺量和磨细矿渣掺量都能有效地延长海洋混凝土结构的预期服役寿命。在本文研究范围内其混凝土优化配合比特征是:复合掺加20%粉煤灰和40%矿渣,水胶比为0.30,此时混凝土结构服役寿命达到200 a。

(4)对于海洋浪溅区混凝土结构,随着钢筋保护层厚度的增加,混凝土结构的服役寿命逐渐延长。在55~120 mm的钢筋保护层范围内,大掺量矿物掺合料高性能混凝土结构的服役寿命范围为88~528 a。当钢筋保护层厚度达到120 mm,并在保护层中间采用不锈钢钢筋防裂网的附加技术措施时,将有可能实现大掺量矿物掺合料高性能混凝土结构在海洋环境中具有500 a的超长服役寿命。

参考文献:

- [1] COLLEPARDI M, MARCIALIS A, TURRIZZANI R. The kinetics of penetration of chloride ions into the concrete[J]. II Cemento, 1970(4): 157-164.
- [2] MANGAT P S, LIMBACHIYA M C. Effect of initial curing on chloride diffusion in concrete repair materials[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(9): 1475-1485.
- [3] MAAGE M, HELLAND S, POULSEN E, et al. Service life prediction of existing concrete structures exposed to marine environment[J]. ACI Materials Journal, 1996, 93(6): 602-608.
- [4] AMEY S L, JOHNSON D A, MILTENBERGER M A, et al. Predicting the service life of concrete marine structures: An environmental methodology[J]. ACI Structural Journal, 1998, 95(2): 205-214.
- [5] KASSIR M K, GHOSN M. Chloride-induced corrosion of reinforced concrete bridge decks[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(1): 139-143.
- [6] MEJLBRO L. The complete solution of Fick's second law of diffusion with time-dependent diffusion coefficient and surface concentration[C]//Durability of Concrete in Saline Environment. Danderyd: Cement AB, 1996: 127-158.
- [7] Life-365 Consortium II. Life-365 Service life prediction model and computer program for predicting the service life and life-cycle cost of reinforced concrete exposed to chlorides[M]. Washington, DC: SFA, 2008.
- [8] TANG L P. Engineering expression of the ClinConc model for prediction of free and total chloride ingress in submerged marine concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(8/9): 1092-1097.
- [9] 余红发,孙伟,鄢良慧,等. 混凝土使用寿命预测方法的研究 I——理论模型[J]. 硅酸盐学报, 2002, 30(6): 686-690.
YU Hongfa, SUN Wei, YAN Lianghui, et al. Study on prediction method of service life of concrete I—Theoretical model[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2002, 30(6): 686-690. (in Chinese)
- [10] 余红发,冯滔滔,许梅,等. 大连湾海底沉管隧道结构的耐久性评估与120年寿命初步设计研究报告[R]. 南京:南京航空航天大学,中交一航局三公司,2017.
YU Hongfa, FENG Taotao, XU Mei, et al. Durability assessment and preliminary design of 120-year life of Dalian bay submarine immersed tunnel structure[R]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, No.3 Engineering company Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Company, 2017. (in Chinese)
- [11] 余红发. ChaDuraLife V1.0氯盐环境下混凝土结构寿命预测模型与计算机软件[CP]. 南京:南京航空航天大学,2015.
YU Hongfa. Life prediction model and computer software for concrete structures in ChaDuraLife V1.0 chloride environment [CP]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)
- [12] TANG L P, UTGENANNT P, BOUBITSAS D. Durability and service life prediction of reinforced concrete structures[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2015, 43(10): 1408-1419.
- [13] 吴中伟. 混凝土耐久性与碱-集料反应[C]//低碱水泥应用研讨会论文集. 北京:北京兴发水泥有限公司·拉法基水泥,1998.
WU Zhongwei. Durability of concrete and alkali-aggregate reaction [C]// Symposium on Application of Low Alkali Cement. Beijing: Beijing Xingfa Cement Co., Ltd. · Lafarge Cement Series, 1998. (in Chinese)
- [14] 蒲心诚. 论混凝土工程的超耐久性[J]. 混凝土, 2000(1): 3-7.
PU Xincheng. On the super durability of concrete engineering[J]. Concrete, 2000(1): 3-7. (in Chinese)
- [15] CONNALL J, BERNET M. Sustainable bridges: 300 year design life for second gateway bridge [C]//Austroads Bridges Conference, Auckland: [s.n.], 2009.
- [16] MARTIN-PEREZ B, ZIBARA H, HOOTON R D, et al. A study of the effect of chloride binding on service life predictions [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(8): 1215-1223.
- [17] GERARD B, MARCHAND J. Influence of cracking on the diffusion properties of cement-based materials Part I: Influence

- of continuous cracks on the steady-state regime[J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(1):37-43.
- [18] 余红发. 盐湖地区高性能混凝土的耐久性、机理与使用寿命预测方法[D]. 南京: 东南大学, 2004.
- YU Hongfa. Durability, mechanism and service life prediction of high performance concrete in salt lake area [D]. Nanjing: Southeast University, 2004. (in Chinese)
- [19] TOUIL B, GHOMARI F, KHELIDJ A, et al. Durability assessment of the oldest concrete structure in the Mediterranean coastline: The Ghazaouet harbour[J]. *Marine Structures*, 2022, 81:103121.
- [20] OTHMEN I, BONNET S, SCHOEFS F. Statistical investigation of different analysis methods for chloride profiles within a real structure in a marine environment [J]. *Ocean Engineering*, 2018, 157: 96-107.
- [21] MAAGE M, HELLAND S T, CARLSEN J E. Chloride penetration in high performance concrete exposed to marine environment [C]//Durability of High Performance Concrete. Vienna: RILEM Publications SARL, 1994: 194-207.
- [22] YU H F, TAN Y S, FENG T T. Study of temporal change in the chloride diffusion coefficient of concrete[J]. *ACI Materials Journal*, 2019, 116(1):103-112.
- [23] GJØRV O E. Durability design of concrete structures in severe environments[M]. London: Taylor & Francis, 2009.
- [24] FUNAHASHI M. Predicting corrosion-free service life of a concrete structure in a chloride environment[J]. *ACI Materials Journal*, 1990, 87(6): 581-587.
- [25] RYAN P C, O'CONNOR A J. Probabilistic analysis of the time to chloride induced corrosion for different self-compacting concretes[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 47(10): 1106-1116.
- [26] 左晓宝, 邹帅, 李向南, 等. 氯盐环境下粉煤灰-混凝土中钢筋的锈蚀过程[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(4):875-881.
- ZUO Xiaobao, ZOU Shuai, LI Xiangnan, et al. Corrosion process of steel bars in fly ash-concrete under chloride environment [J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(4): 875-881. (in Chinese)
- [27] 吴彰钰, 余红发, 麻海燕, 等. 全珊瑚混凝土中钢筋锈蚀的氯离子阈值研究[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(5):1078-1085, 1092.
- WU Zhangyu, YU Hongfa, MA Haiyan, et al. Determination of chloride threshold value in reinforced coral aggregate concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(5): 1078-1085, 1092. (in Chinese)

(上接第 896 页)

- lightweight ultra high-performance concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2022, 158: 106842.
- [119] 刘军, 李振林, 张伟卓, 等. 工业固体废弃物材料制作冷粘结人造轻骨料的研究进展[J]. *材料导报*, 2023, 37(18): 1-31.
- LIU Jun, LI Zhenlin, ZHANG Weizhuo, et al. Research progress of cold-bonded artificial lightweight aggregate made from industrial solid waste materials [J]. *Materials Reports*, 2023, 37(18): 1-31. (in Chinese)
- [120] HOLM T, OOI O, BREMNER T. In moisture dynamics in lightweight aggregate and concrete [C]// 6th International Conference on the Durability of Concrete. Greece: Thessaloniki, 2003.
- [121] 石东升, 林书宇, 韩佳彤. 具有潜在活性的细骨料混凝土抗氯离子性能研究[J]. *混凝土*, 2022(3): 113-116.
- SHI Dongsheng, LIN Shuyu, HAN Jiatong. Study on chloride resistance of fine aggregate concrete with potential activity[J]. *Concrete*, 2022(3): 113-116. (in Chinese)