

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.05.009

混凝土内修正的氯离子运移模型及耐久性分析

高子瑞¹,徐永福¹,李淑娥²,陈志明²

(1. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院,上海 200240; 2. 南通市公路管理处,江苏 南通 226000)

摘要: 基于 Fick 第二定律,建立了混凝土内综合考虑扩散、电场迁移与结合作用的氯离子运移耦合模型,并通过已有试验数据对模型进行验证。以南通盐渍土环境为例,运用 Comsol Multiphysics 软件分析盐渍土内混凝土中氯离子的运移机制以及混凝土内氯离子随时间和空间的分布,研究不同强度等级的普通硅酸盐水泥混凝土和粉煤灰混凝土抗氯盐侵蚀的能力。结果表明:盐渍土腐蚀环境下,普通硅酸盐水泥混凝土结构仅靠提高混凝土强度和保护层厚度不能满足高耐久性要求,采用粉煤灰混凝土能延长结构使用年限;在保证使用年限为 100 a 的前提下,建议南通盐渍土环境中的钢筋混凝土结构采用粉煤灰混凝土,强度等级为 C30、C40、C50 和 C60 的混凝土结构保护层厚度分别为 55 mm、50 mm、45 mm 和 40 mm。

关键词: 氯离子运移模型;盐渍土;混凝土腐蚀;混凝土耐久性;Comsol Multiphysics 软件;普通硅酸盐水泥混凝土;粉煤灰混凝土

中图分类号:TU448;TU528

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2016)05-0432-06

Modified migration model for chloride ions in concrete and durability analysis of concrete

GAO Zirui¹, XU Yongfu¹, LI Shue², CHEN Zhiming²

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Nantong City Highway Management Office, Nantong 226000, China)

Abstract: In consideration of the diffusion, electric field migration, and binding, a coupling chloride ion migration model was established based on Fick's second law. The model was verified with experimental data. Using the saline soil environment in Nantong City as an example, Comsol Multiphysics software was used to analyze the migration mechanisms of chloride ions in concrete, to simulate the temporal and spatial distributions of chloride ions in concrete, and to examine the chloride resistance of ordinary Portland cement (OPC) concrete and fly ash concrete with different strength grades. The results show that, in the saline soil environment, the OPC concrete structure cannot meet the durability requirements by only improving the concrete strength grade and protective cover thickness. Fly ash concrete can improve the service life of the concrete structure. In the saline soil environment in Nantong City, a reinforced concrete structure should adopt fly ash concrete, and the protective cover thickness of fly ash concrete with strength grades of C30, C40, C50, and C60 should be 55 mm, 50 mm, 45 mm, and 40 mm, respectively, for a service life of 100 years.

Key words: migration model for chloride ions; saline soil; concrete corrosion; concrete durability; Comsol Multiphysics softwar; ordinary Portland cement concrete; flyash concrete

钢筋混凝土结构物劣化破坏的主要原因是腐蚀。海洋工程中混凝土结构的耐久年限普遍小于 20 a,天津滨海盐渍土内的混凝土结构物一般使用 7~8 a 便会出现严重腐蚀,盐湖盐渍土中使用年限则一般不足

收稿日期:2015-11-28

基金项目:江苏省交通科学研究计划项目(2015T18)

作者简介:高子瑞(1990—),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要从事盐渍土工程性质研究。E-mail:zirui_gao@163.com

通信作者:徐永福,教授。E-mail:yongfuxu@hotmail.com

5 a^[1-2]。与海洋环境相比,盐渍土区域地下水中的侵蚀性化学成分含量较高,对钢筋混凝土的腐蚀更为剧烈^[3]。目前,盐渍土环境下的钢筋混凝土结构抗氯离子腐蚀研究相对较少,且研究多是基于短时间的室内试验,没有综合考虑离子运移过程的时间依赖关系以及离子迁移受到的电迁移场作用和结合作用等。

张俊芝等^[4]和杨跃等^[5]利用试验数据分别得到了普通硅酸盐水泥混凝土和粉煤灰混凝土内的氯离子扩散系数与抗压强度之间的关系;张巨松等^[6]研究了混凝土内粉煤灰和矿粉掺量对氯离子扩散系数的影响。上述研究是基于混凝土中氯离子扩散系数的研究,是短时间室内试验的结果,没有考虑离子迁移系数随着时间的衰减变化,不能用于分析混凝土抗氯离子的侵蚀能力。Wang 等^[7]和 Samson 等^[8]考虑了多重离子迁移的电势场影响,Boddy 等^[9]研究了混凝土内氯离子的多种迁移方式及影响因素,以上方法是基于理想状态的扩散,没有考虑扩散的时间和温度依赖关系,也没有综合考虑离子的运移机制,不适合工程应用。乔頔等^[1]分析了混凝土内氯离子的不同运移机制对离子迁移的影响,但研究仅限于普通硅酸盐水泥混凝土。

笔者通过研究混凝土内氯离子运移机制,在 Fick 第二定律基础上考虑等效扩散系数,建立综合扩散作用、电势场作用与结合作用的耦合模型,并利用已有试验数据对模型进行验证。在南通盐渍土环境下,通过 Comsol Multiphysics 软件计算了氯离子在不同强度等级的普通硅酸盐水泥混凝土和粉煤灰混凝土中随时间和空间的分布;基于结构物 100 a 的使用寿命,探讨了南通盐渍土中混凝土种类、强度等级以及保护层厚度对混凝土抗氯离子侵蚀的影响。

1 氯离子的运移机制

1.1 混凝土内氯离子运移基本方程

影响混凝土内氯离子运移的因素主要有:离子浓度差引起的扩散、混凝土固相对氯离子的结合、毛细水压力差引起的渗流以及电势场作用下的电迁移^[10]。由于渗流可以让毛细水压力差很快达到平衡,故在结构寿命期内可以忽略毛细作用的影响。氯离子运移的基本方程为

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中: C ——混凝土内 t 时刻、 x 深度处的氯离子浓度; D ——氯离子等效扩散系数。

式(1)能较好地描述氯离子的非稳态扩散过程,但该方程未考虑混凝土的结构形式、材料性质以及周边环境,因而得到的结果不可靠;在式(1)基础上,考虑采用等效扩散系数,Boddy 等^[9]提出了离子的扩散系数为

$$D = D_{\text{ref}} \left(\frac{t_{\text{ref}}}{t} \right)^m \exp \left[\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2)$$

式中: D_{ref} ——温度 T_{ref} 、时刻 t_{ref} 的扩散系数; m ——扩散系数的时间衰减系数,普通硅酸盐水泥混凝土取 0.34^[11],粉煤灰混凝土取 0.64^[12]; U ——扩散过程活化能; T ——绝对温度; R ——气体常数。

1.2 综合考虑电势场与结合作用的修正方程

混凝土与盐渍土之间存在浓度梯度的离子主要有 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 OH^- ^[9,12],由于浓度差异,不同离子会以不同的速率向混凝土内迁移,在这过程中移动速度较快的离子携带着多余的电量便会在混凝土内部产生电势场,电势场的存在将会影响氯离子的运移。在不考虑侵入离子间的化学作用,且假定混凝土孔隙饱和和情况下,扩散电迁移场作用下的氯离子通量 J_v 简化为^[8]

$$J_v = -D_i \frac{s_i F}{RT} C_i \nabla V \quad (3)$$

式中: D_i 、 C_i 、 s_i ——离子 i 的扩散系数、浓度、电荷数; F ——法拉第常数; V ——离子扩散产生的电势,可通过电荷的空间分布(式(4))定义。

$$\begin{cases} \nabla^2 V + \frac{\rho}{\varepsilon} = 0 \\ \rho = F \left(\sum s_i C_i + \omega \right) \end{cases} \quad (4)$$

式中: ρ ——电荷密度; ε ——混凝土介电常数; ω ——区域内固定电荷密度。

混凝土固相能吸附孔隙中迁移的氯离子,除物理吸附外,氯离子与 C_3A 发生化学反应。刘芳等^[13]认为

Langmuir 等温线较适合自由氯离子与结合氯离子之间的关系。离子迁移过程中混凝土固相吸附 Cl^- 与解吸附 OH^- 的过程相互补偿^[8], 研究其他离子在混凝土中的运移很少, 可不考虑结合作用对其他离子的影响。于是基于 Langmuir 等温线关系为

$$C = C_b + C_f \quad \frac{\partial C_b}{\partial C_f} = \frac{\alpha}{(1 + \beta C_f)^2} \quad (5)$$

式中: C_b ——结合氯离子浓度; C_f ——自由氯离子浓度; α, β ——经验系数, 分别取 1.67、4.08^[14]。

综上, 根据离子质量守恒, 恒温条件, 孔隙饱和, 忽略不同离子间化学作用, 且不考虑结合作用对其他离子的影响, 考虑了扩散、电迁移场与结合作用的修正氯离子迁移方程为

$$\delta_i \frac{\partial C_i}{\partial t} = \nabla (D_i \nabla C_i - J_v)$$

$$\delta_i = \begin{cases} 1 + \frac{\alpha}{(1 + \beta C_i)^2} & \text{Cl}^- \\ 1 - \frac{\alpha}{(1 + \beta C_i)^2} & \text{OH}^- \end{cases} \quad (6)$$

式中: δ_i ——结合作用影响系数, 当离子为 Na^+ 、 K^+ 时 $\delta_i = 1$ 。

2 有限元模型描述

2.1 模型环境

南通市洋口港地区的盐渍土属于典型的滨海相盐渍土。近地表区域, 因受到强烈的蒸发作用, 含盐量较高, 又因地下水流影响, 沿地表向下盐渍土含盐量逐渐减小(图1), 图1中 z 为地下深度, p 为离子的质量分数, C 为氯离子质量浓度。盐渍土中 Cl^- 与 SO_4^{2-} 质量浓度平均值比在 5~9 之间^[15], 根据 JTG D30—2015《公路路基设计规范》^[16], 盐渍土为典型的氯盐渍土。易溶盐的质量分数为 0.4%~1.2%, 氯盐质量分数为 0.2%~0.6%^[15], 区域土为弱-中盐渍土, 以弱盐渍土为主。实测氯离子质量浓度在 0~2 m 范围波动幅度较大, 2 m 以后变化较小, 如图 1(b) 所示。当采用线性拟合, 可以考虑采用放大 1.45 倍后的上限值, 模型边界处的氯离子浓度随深度变化关系为

$$C = 1.45(-0.6z + 6.4) \quad (7)$$

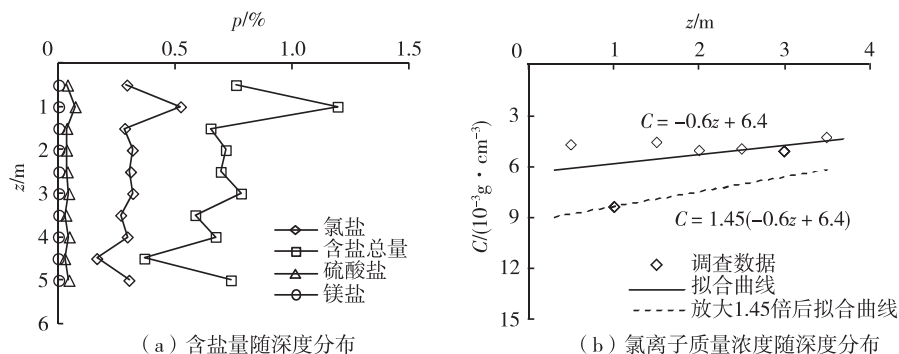


图1 南通滨海地区盐渍土盐含量分布

Fig. 1 Distribution of salt content in saline soil in coastal area in Nantong City

2.2 计算模型

基于修正氯离子运移方程, 通过 Comsol Multiphysics 软件建立混凝土保护层中氯离子迁移模型。考虑到盐含量在地表向下 2 m 范围内波动较大, 且出现最大值, 模型的尺寸设为 80 mm×2 mm。鉴于混凝土内与表面处的离子浓度差异很大, 加密边界附近的网格。模型的初始及边界条件为

$$\begin{cases} t = 0 & 0 < x < L, C_i = C_{i, \text{init}}, V = 0 \\ t > 0 & \begin{cases} x = 0, C_i = C_{i, b}, V = 0 \\ x = L, \frac{\partial C_i}{\partial x} = 0, \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

式中: L ——模型宽度; $C_{i,init}$ 、 $C_{i,b}$ ——混凝土内离子 i 的初始浓度和边界浓度。

2.3 计算参数

混凝土孔隙溶液为电中性平衡时, Na^+ 与 K^+ 的初始浓度分别为 OH^- 浓度的 $2/3$ 和 $1/3$ ^[9];混凝土表面离子浓度设为南通滨海盐渍土环境下的离子浓度值,其中 OH^- 浓度非常小^[12],认为 OH^- 浓度值为 0。模型计算参数见表 1。张俊芝等^[4]拟合试验数据认为普通硅酸盐水泥混凝土的氯离子扩散系数与其抗压强度存在较好的相关性(式(9));杨跃等^[5]认为粉煤灰混凝土内的氯离子扩散系数与抗压强度之间相关(式(10)),由式(9)、式(10)可得氯离子扩散系数。

$$D_{\text{ref}}=32.766 f_c^{-0.533}\times10^{-12}$$

(9)

$$D_{\text{ref}}=(-0.05424 f_c+5.58686)\times10^{-12}$$

(10)

式中: f_c ——标准养护 28 d 实测混凝土抗压强度, MPa。

3 计算结果分析

3.1 普通硅酸盐水泥混凝土抗氯离子侵蚀能力

混凝土内的氯离子分布是分析盐渍土环境下混凝土结构耐久性的前提^[17]。图 2 为模型上边界的氯离子浓度随时间和空间的分布,其中 l 为距混凝土表面距离, C_{Cl} 为氯离子浓度。由图 2(a)可知,普通硅酸盐水泥混凝土,10 a 时,C30 强度等级,混凝土内 50 mm 深度处,氯离子浓度为 93.9 mol/m³,而 C60 强度等级,最大为 53.8 mol/m³,降低了约 1.75 倍。说明提高混凝土抗压强度等级有利于延缓氯离子向混凝土内部的运移,这是因为混凝土强度等级越高,结构越密实,孔隙率越小,越能阻碍氯离子迁移。随着时间的增加,混凝土内的氯离子浓度增加十分迅速,20 a 时,C30、C60 强度等级下,混凝土内 50 mm 深度处的氯离子浓度已分别为 154.2 mol/m³和 110.9 mol/m³,而 C60 强度等级下,混凝土内60mm深度处仅为 66.7 mol/m³,相比 50 mm 处降低了约 1.67 倍,说明随着保护层厚度的增加混凝土内部氯离子含量降低。

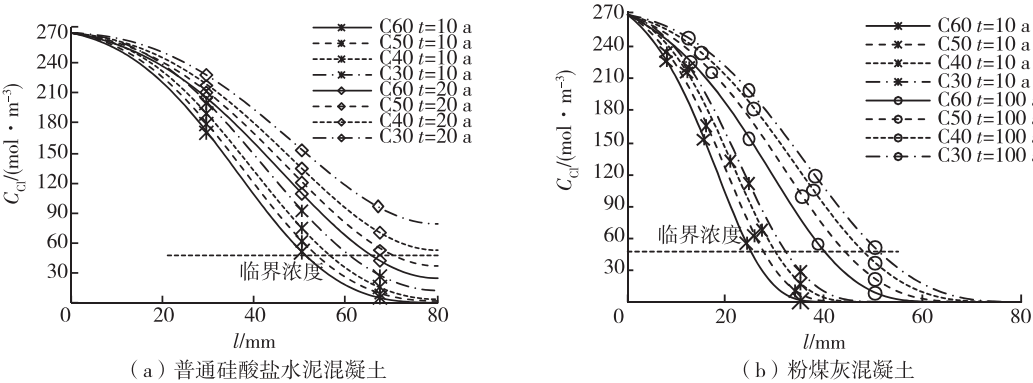


图 2 混凝土模型上边界的氯离子浓度分布规律
Fig. 2 Distribution of chloride ion concentration at upper boundary of concrete model

钢筋混凝土预测寿命从安全角度考虑为腐蚀破坏过程的初始阶段,即混凝土内钢筋表面达到氯离子临界浓度,钢筋腐蚀开始的时刻^[12]。考虑到开始腐蚀时钢筋点腐蚀电位小于-200 mV,此时氯离子临界浓度约为 47.9 mol/m³^[12]。因此南通盐渍土环境,即便采用 C60 强度等级的普通硅酸盐水泥混凝土,保护层厚取 50 mm,其耐久年限只有 10 a 左右,保护层厚取 60 mm,其耐久年限也仅有 20 a,这也说明了为什么在氯离子侵蚀环境,钢筋混凝土结构一般使用不到 20 a 就出现严重腐蚀^[1-3,12],所以盐渍土内的钢筋混凝土结构,仅靠提高普通硅酸盐水泥混凝土的强度等级及其保护层厚度,达不到结构要求的耐久年限。

3.2 粉煤灰混凝土抗氯离子侵蚀能力

由图 2(b)可知,掺用粉煤灰的 C30 混凝土,10 a 时,混凝土内 50 mm 深度处的氯离子浓度几乎为 0;100 a 时,为 53.2 mol/m³,采用 C60 强度等级时,仅为 9.8 mol/m³。说明盐渍土环境,采用粉煤灰混凝土可以

极大阻碍氯离子对混凝土的侵入。因为粉煤灰使混凝土初期的干燥收缩降低,粉煤灰中的微细颗粒使胶凝材料的颗粒级配得到改善,进而混凝土更加密实。粉煤灰中的火山灰反应生成 CSH 凝胶和钙矾石等水化产物,这些产物对氯离子有着较强的物理吸附能力,而且进一步填充混凝土的毛细孔,使孔隙细化,降低混凝土孔隙率,使得氯离子迁移速度降低^[5]。同时,粉煤灰的初始固化能力较强,氯离子与粉煤灰中含量较高的 Al_2O_3 反应生成 Friedel 盐,可提高混凝土的固化吸附能力。

3.3 粉煤灰混凝土耐久年限分析

如图 3 所示, t_c 为混凝土结构物耐久年限, d 为保护层厚度。随着混凝土强度提高以及保护层厚度增加,混凝土使用年限有着极大的提高。混凝土强度一定时,增加保护层厚度能极大的延长结构物的使用寿命。保护层厚度一定时,增大混凝土强度同样能延长结构物的使用寿命。例如, C30 混凝土,采用保护层 55 mm 时,混凝土结构预测使用寿命为 138.5 a;而保护层为 40 mm,采用 C60 混凝土时,为 100 a,因此为保证 100 a 耐久年限,南通盐渍土环境下建议采用粉煤灰混凝土,在 C30、C40、C50、C60 强度等级下,保护层厚度分别为 55 mm、50 mm、45 mm、40 mm。

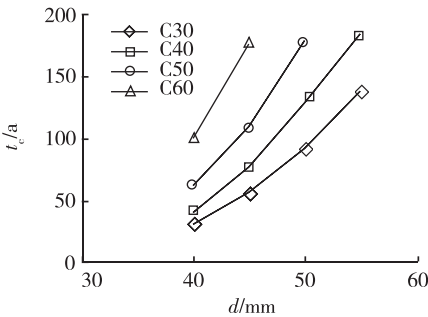


图 3 粉煤灰混凝土使用寿命
Fig. 3 Service life of fly ash concrete

表 2 模型验证计算参数

Table 2 Calculated parameter values for model verification

出处	试样	$C_{i,b}/(\text{mol} \cdot \text{m}^{-3})$			
		Cl^-	Na^+	K^+	OH^-
王玲等 ^[18]	除冰盐区	200	150	50	0
刘卫民 ^[19]	天津滨海区	408	358	50	0
Thomas 等 ^[20]	试块 (HPC)	300	250	50	0

4 模型验证

如图 4(a)所示,王玲等^[18]对北京除冰盐环境下使用了 18 a 的西直门立交桥桥基的混凝土取芯样,芯样为 C45 普通混凝土,对应的 D_{28} 为 $4.31 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[4], m 取 0.34^[2,11]。模型边界处的氯离子浓度可由实测浓度分布曲线反推,约为 $200 \text{ mol}/\text{m}^3$ 。刘卫民^[19]对天津滨海浪溅区使用了 11 a 的天津港码头 7~8 段进行梁板混凝土构件取样分析,取样为 C35 粉煤灰混凝土,对应 D_{28} 为 $3.69 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[5], m 取 0.64^[2,11],模型边界处氯离子浓度约为 $408 \text{ mol}/\text{m}^3$ 。如图 4(b)示,Thomas 等^[20]把混凝土试块暴露在英国南部海岸的海水浪溅区 8 a,试块为 C50 粉煤灰混凝土,对应 D_{28} 为 $2.87 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[5], m 取 0.64^[2,11],模型边界处氯离子浓度约为 $300 \text{ mol}/\text{m}^3$ 。参数见表 2。图 4 表明,模型计算的结果与已有试验数据有较好吻合。

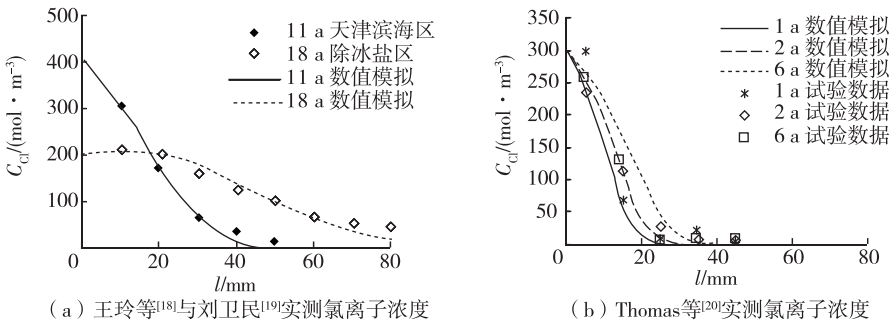


图 4 氯离子浓度计算结果与实测结果对比
Fig. 4 Comparison of calculated and measured chloride ion concentrations

5 结 论

- a. 得到南通盐渍土环境下氯离子在混凝土内随时间和空间的分布,混凝土内氯离子的侵入量随着时间增加而逐渐增长,随着距混凝土表面距离增加迅速减少。
- b. 采用 C60 高强普通硅酸盐水泥混凝土,保护层厚 60 mm 时,混凝土结构的抗氯离子侵蚀年限也达不到 20 a,因此盐渍土环境仅靠提高普通硅酸盐水泥混凝土强度等级及保护层厚度不能满足混凝土高耐久性要求,而采用粉煤灰混凝土则可以延长混凝土结构使用年限。

c. 随着粉煤灰混凝土强度等级的提高、混凝土保护层厚度的增大,混凝土内部氯离子侵入量急剧减少,混凝土结构的耐久寿命有明显提高。

d. 在保证 100 a 使用年限的前提下,南通盐渍土腐蚀环境中的钢筋混凝土结构建议采用粉煤灰混凝土,在 C30、C40、C50、C60 强度等级下,保护层厚度分别应为 55 mm、50 mm、45 mm、40 mm。

参考文献:

- [1] 乔嶝,夏文俊,赵阳,等. 盐渍土环境下氯离子侵入混凝土模型研究[J]. 公路交通科技, 2011, 28(10): 153-158. (QIAO Di, XIA Wenjun, ZHAO Yang, et al. Model of chlorion ingress of concrete from saline soil[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(10): 153-158. (in Chinese))
- [2] 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.
- [3] 赵阳,夏文俊,乔嶝,等. 盐渍土与海洋环境下氯离子侵蚀混凝土对比分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2013(12): 290-293. (ZHAO Yang, XIA Wenjun, QIAO Di, et al. Comparative analysis of chloride ion erosion in saline soil and marine environment[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Application Technology Edition), 2013(12): 290-293. (in Chinese))
- [4] 张俊芝,王建泽,孔德玉. 水工混凝土渗透性与氯离子扩散性及其相关性的试验研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28(6): 188-192. (ZHANG Junzhi, WANG Jianze, KONG Deyu. Experimental study on permeability of hydraulic concrete, diffusion of chlorions and their correlation[J]. Journal Hydroelectric Engineering, 2009, 28(6): 188-192. (in Chinese))
- [5] 杨跃,袁杰,王晓博. 粉煤灰高性能混凝土氯离子渗透性研究[J]. 低温建筑技术, 2008(4): 13-15. (YANG Yue, YUAN Jie, WANG Xiaobo. Study on chloride permeability of HPC containing fly ash[J]. Low Temperature Construction Technology, 2008(4): 13-15. (in Chinese))
- [6] 张巨松,张微,邓斌,等. 粉煤灰、矿粉混凝土氯离子扩散系数试验研究[J]. 混凝土, 2014(10): 5-7. (ZHANG Jusong, ZHANG Wei, DENG Pin, et al. Study on chloride-ion-diffusion-coefficient of concrete mixed fly-ash and slag[J]. Concrete, 2014(10): 5-7. (in Chinese))
- [7] WANG Y, LI L Y, PAGE C L. Modelling of chloride ingress into concrete from a saline environment[J]. Building and Environment, 2005, 40: 1573-1582.
- [8] SAMSON E, MARCHAND J, ROBERT J L, et al. Modelling ion diffusion mechanisms in porous media[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999, 46: 2043-2060.
- [9] BODDY A, BENTZ E, THOMAS M D A, et al. An over view and sensitivity study of a multimechanistic chloride transport model[J]. Cement and concrete research, 1999, 29(6): 827-837.
- [10] BERTOLINI L, ELSENER B, PEDEFERRI P, et al. Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair[J]. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005, 49(1065): 4113-4133.
- [11] 杨进波,赵铁军,阎培渝. 混凝土氯离子扩散系数试验研究[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(2): 223-229. (YANG Jinbo, ZHAO Tiejun, YAN Peiyu. Experimental research of chloride diffusion coefficient in concrete[J]. Journal of Building Materials, 2007, 10(2): 223-229. (in Chinese))
- [12] 乔嶝. 滨海盐渍土环境中结构物耐久性分析与对策[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [13] 刘芳,金伟良,张奕. 实际混凝土结构中氯离子结合理论对比分析[J]. 新型建筑材料, 2007, 34(6): 13-17. (LIU Fang, JIN Weiliang, ZHANG Yi. Comparison and an analysis of chloride binding isotherm in existing concrete structure[J]. New Building Materials, 2007, 34(6): 13-17. (in Chinese))
- [14] SERGI G, YU S W, PAGE C L. Diffusion of chloride and hydroxyl ions in cementitious materials exposed to a saline environment[J]. Magazine of Concrete Research, 1992, 44(158): 63-69.
- [15] 周忠勤,叶景艳,董军林,等. 南通某沿海地区盐渍土分布特征及其腐蚀特性研究[J]. 海洋开发与管理, 2014(4): 42-45. (ZHOU Zhongqin, YE Jingyan, DONG Junlin, et al. Study on the distribution and corrosion characteristics of saline soil in a coastal area of Nantong[J]. Ocean Development and Management, 2014(4): 42-45. (in Chinese))
- [16] 中交第二公路勘察设计院有限公司. JTG D30—2015 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [17] 杨绿峰,洪斌,高钦,等. 混凝土结构中氯离子扩散分析的精细积分法[J]. 水利水电科技进步, 2012, 32(2): 32-36. (YANG Lyufeng HONG Bin, GAO Qin, et al. Precise integration method for analysis of chloride diffusion in concrete structure[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(2): 32-36. (in Chinese))
- [18] 王玲,田培,姚燕,等. 西直门旧桥混凝土破坏原因分析[C]//阎培渝,姚燕. 水泥基复合材料科学与技术. 北京: 中国建材工业出版社, 1998: 79-82.
- [19] 刘卫民. 海洋环境中钢筋混凝土结构使用寿命的研究[J]. 中国港湾建设, 2004(2): 41-45. (LIU Weimin. Study of service life of reinforced concrete structures in marine environment[J]. China Harbour Engineering, 2004(2): 41-45. (in Chinese))
- [20] THOMAS M D A, BAMFORTH P B. Modeling chloride diffusion in concrete: effect of fly ash and slag[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(4): 487-495.