

碳化作用对水泥净浆中游离氯离子浓度的影响

江乐鑫, 杨梦娜, 柳俊哲, 林楠

(宁波大学土木与环境工程学院, 浙江宁波 315211)

摘要:以探究碳化作用对水泥净浆中游离氯离子浓度的影响为目标,并借助XRD衍射图谱、SEM扫描电镜图等微观手段,研究了碳化作用下水泥净浆内游离氯离子浓度的影响规律以及微观结构特征。结果表明:水灰比对碳化作用前游离氯离子浓度的影响变化受总氯离子浓度的影响,总氯离子浓度越高,水灰比对游离氯离子浓度的影响越大;碳化不利于氯离子的结合,一方面是因为碳化作用不利于Friendel盐的生成和稳定,减少了离子化学固化量。另一方面水化产物中的C-S-H凝胶的生成量也减少,大量的 Ca^{2+} 被消耗,Ca/Si比也减小,削弱了物理吸附作用,减少了离子物理吸附量,从而增大了水泥净浆中游离氯离子浓度;碳化能显著细化孔隙结构,减少孔隙率,有利于减弱游离氯离子的扩散与侵蚀。

关键词:碳化;水泥净浆;水灰比;氯离子;水泥浆微观结构

中图分类号:TV331

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2020)02-0190-06

Effect of carbonation on the concentration of free chloride ions in cement paste

JIANG Lexin, YANG Mengna, LIU Junzhe, LIN Nan

(School of Civil and Environmental Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The effect of carbonation on the concentration of free chloride ions in cement paste and the microstructure characteristics of the ions were studied using microscopic images of X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM). The results showed that the influence of water - cement ratio on the concentration of free chloride ions before carbonation was affected by the concentration of total chloride ions. The higher the total chloride ion concentration was, the greater the effect of water - cement ratio on free chlorine concentration was. Carbonation had an adverse effect on the binding of chloride ions based on two reasons. First, carbonation promoted the decomposition of Friendel salt and reduced the amount of ion chemical curing. Second, due to the decrease of the amount of C - S - H in the hydration product, a large amount of Ca^{2+} was consumed, so the Ca/Si ratio reduced, which weakened the physical absorption ability, and reduced the adsorption amount of ions, therefore increased the concentration of free chloride ions in cement paste. The results suggest that carbonation can significantly refine pore structure and reduce porosity, which is conducive to weakening the diffusion and erosion of free chloride ions.

Key words: carbonation; cement paste; water - cement ratio; chloride ion; microstructure of cement paste

1 研究背景

由于氯离子的侵蚀和长期的碳化,导致工程中钢筋锈蚀现象十分严重——尤其是沿海地区,因而,长期以来钢筋混凝土耐久性受到世界各方面的关注^[1-4]。Tumidajski等发现碳化作用对普通硅酸

盐混凝土中的氯离子扩散系数影响不大,但是增加了高炉矿渣混凝土中的氯离子扩散系数^[5]。Zhu等^[6]的研究表明,当混凝土遭受碳化和氯离子侵蚀时,氯离子的侵蚀作用更显著。当前国内外对氯离子的研究大多只针对氯离子的扩散与固化,主要探究的都是结合氯离子含量的性能机理^[7-11]。然而

收稿日期:2019-09-11; 修回日期:2019-11-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51778302)

作者简介:江乐鑫(1996-),男,福建武夷山人,在读硕士研究生,主要研究方向为混凝土耐久性。

通讯作者:柳俊哲(1964-),男,黑龙江五常人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为混凝土耐久性。

并不是所有的氯离子对钢筋混凝土都有破坏作用。氯离子存在形式主要分为游离状态和结合状态,一般认为仅游离氯离子能迁移扩散到钢筋表面附近,导致钢筋表面的钝化膜遭受破坏,从而进一步致使钢筋锈蚀^[12-14],但是现阶段鲜有文献探讨碳化作用下水泥净浆中游离氯离子浓度的变化和浆体的微观结构特征^[15-17]。

因此,本试验旨在探究碳化作用对水泥净浆中游离氯离子浓度的影响,并且阐明碳化作用下浆体的微观结构特征,为寻找最佳配合比提供理论依据。

表 1 试验用水泥化学组分质量百分比

| 化学成分 | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | R ₃ O |
|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|------------------|
| 质量百分比 | 20.89 | 5.44 | 3.93 | 62.24 | 1.71 | 2.65 | 0.48 |

表 2 试验水泥净浆配合比

| 试块编号 | 水灰比 W/C | NaCl/% |
|------|---------|--------|
| A1-a | 0.25 | 0.1 |
| A2-a | 0.30 | 0.1 |
| A3-a | 0.35 | 0.1 |
| A1-b | 0.25 | 0.3 |
| A2-b | 0.30 | 0.3 |
| A3-b | 0.35 | 0.3 |
| A1-c | 0.25 | 0.5 |
| A2-c | 0.30 | 0.5 |
| A3-c | 0.35 | 0.5 |
| A1-d | 0.25 | 0.7 |
| A2-d | 0.30 | 0.7 |
| A3-d | 0.35 | 0.7 |
| A1-e | 0.25 | 1.0 |
| A2-e | 0.30 | 1.0 |
| A3-e | 0.35 | 1.0 |

2.2 试验方法

2.2.1 加速碳化试验 碳化试验在加速碳化室内进行^[18]。以 20% 的 CO₂ 浓度、(35 ± 2)℃ 温度、(70 ± 2)% 相对湿度条件处理混凝土样品,碳化时长为 28 d。

2.2.2 游离氯离子浓度测定试验 养护至 240 d 的水泥石样品敲碎取中间部分研磨成粉,筛选出粒径小于 0.05 mm 的粉末,置于烘箱中以 (60 ± 5)℃ 的温度烘 24 h。称取 20 g 干燥粉末配置氯离子提取液,置于磁力搅拌器上搅拌 30 min,静置沉淀后取上层澄清溶液用快速氯离子测定仪测定氯离子浓度。

2 试验材料与方法

2.1 原材料与配合比

试验采用宁波海螺 P·O42.5 级水泥,表 1 为该水泥化学组分。由于考虑到常用水灰比和海砂的淡化程度,本试验设计了 3 种不同水灰比的水泥净浆试块 A1、A2、A3 (水灰比分别对应 0.25、0.30 和 0.35),选用分析纯 NaCl,内掺占水泥质量 0.1%、0.3%、0.5%、0.7% 和 1.0% 的 NaCl (试块编号后缀 a、b、c、d、e 用以区分)。其配合比见表 2。

2.2.3 XRD 物相分析 用取芯机钻取标准养护至 240 d 的水泥石样品,取其中间部分磨细,筛选出粒径小于 0.3 mm 的粉体置于烘箱中干燥,24 h 后取出装入塑料密封袋冷却待用,最后样品再通过 X 射线衍射扫描得到 XRD 衍射谱图。

2.2.4 SEM 扫描电镜分析 将在自然条件下养护 240 d 的水泥石样品,敲碎成粒径约为 5 mm 大小的碎块,随后取少许的碎块置于烘箱在 (60 ± 5)℃ 的条件下烘 24 h,烘干后取出装入塑料密封袋冷却待用,采用 SU-70 型场发射扫描电镜对样品碎片进行扫描分析,通过放大不同倍数来观察结构内部形貌和水化产物形貌。

3 结果分析与讨论

3.1 碳化前水泥净浆中游离氯离子浓度变化

图 1 为碳化前水泥净浆中游离氯离子浓度与总氯离子浓度的关系曲线,由图 1 可知,净浆内游离氯离子浓度随总氯离子浓度的不断增加而增加。总氯离子浓度一定时,随着水灰比不断增大,各水泥净浆内的游离氯离子浓度表现为先增大后减小。这是因为水灰比的变化会影响水泥的水化程度和水化速度,从而改变水化产物的生成量。一般情况下,水泥熟料中的 C₃A 能够与孔隙液中的游离氯离子发生化学反应生成 Friedel 盐,从而以化学结合的方式固化部分游离氯离子,同时,水化产物 C-S-H 凝胶对游离氯离子具有物理吸附作用,也能够结合一部分游离氯离子^[19-20]。因此,水化产物的生成量会影响水泥基材料对游离氯离子的吸附能力,从而影响水泥净浆内游离氯离子浓度。

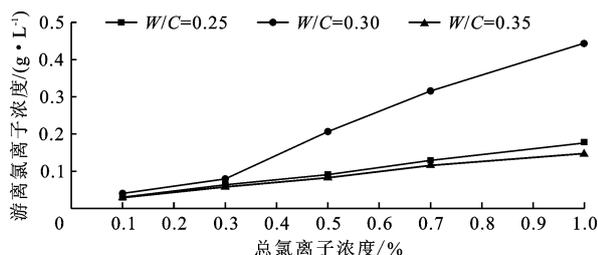


图1 碳化前不同水灰比水泥净浆中游离氯离子与总氯离子浓度的关系曲线

图2为不同NaCl含量水泥净浆中游离氯离子浓度随水灰比的变化曲线,体现了水灰比对水泥净浆内游离氯离子浓度的影响。从图2中可以看出,NaCl含量为0.1%时,水灰比对游离氯离子浓度的影响甚微,各组水灰比试样内的游离氯离子浓度十分接近。但随着总氯离子浓度的增加,各组水灰比试样内的游离氯离子浓度差也越来越大。说明水灰比对水泥净浆内游离氯离子浓度的影响规律与内掺氯离子浓度的大小有关,内掺氯离子浓度越高,水灰比对游离氯离子浓度的影响也越大。

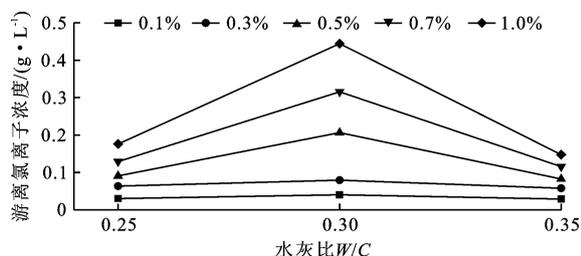


图2 不同NaCl含量水泥净浆中游离氯离子浓度随水灰比的变化曲线

图3为内掺1.0%NaCl,水灰比分别为0.25、0.30、0.35的3组水泥净浆在养护240d后的X射线衍射图。由图3可知,该产物主要是石英、C-S-H凝胶、Ca(OH)₂和少量的Friendel盐。水灰比为0.25和0.30的两组试样中存在微量的钙矾石。其中,石英、Ca(OH)₂晶体和钙矾石的含量均随着水灰比的增加而减少。这是因为水灰比越大,水泥的水化越充分,水化过程中消耗的Ca(OH)₂量越大。Ca(OH)₂晶体的大量消耗也会降低水泥浆体系中的OH⁻含量,抑制水化产物C-A-H凝胶的生成。而钙矾石是由C-A-H和硫酸根离子结合产生。所以,水灰比越大,钙矾石生成量越少。Friendel盐的生成量在一定程度上能够反映氯离子的化学结合量,其生成量变化趋势表现为:W/C=0.25>W/C=0.35>W/C=0.30。随着水灰比的增加,C-S-H凝胶的生成量不断增加。C-S-H凝胶的数量与其表面所带的

正电荷数决定了对游离氯离子的物理吸附能力。C-S-H凝胶表面带正电的电荷数量与水泥浆体系中的Ca/Si比有关,Ca/Si比越高,C-S-H凝胶表面带正电的电荷数就越多,对氯离子的吸附能力也越强。观察XRD图谱,发现Ca/Si比的变化趋势表现为W/C=0.35>W/C=0.30>W/C=0.25,即水灰比为0.35时物理吸附作用最强。

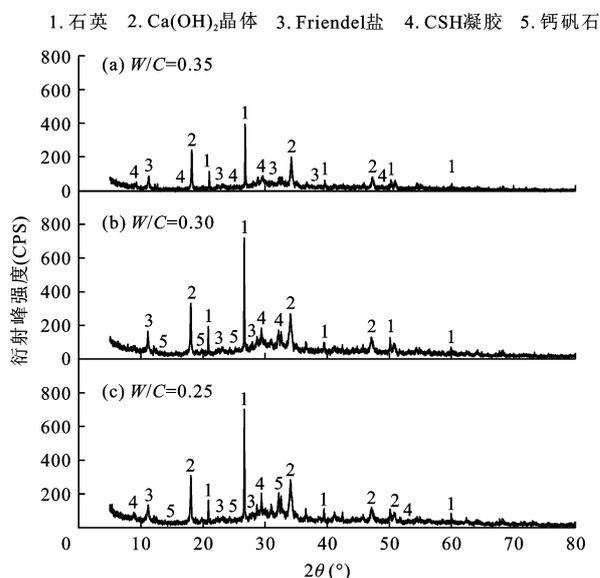


图3 不同水灰比水泥净浆试样的X射线衍射图(NaCl掺量1.0%)

图4为内掺1.0%NaCl时,水灰比分别为0.25、0.30、0.35的水泥净浆内部扫描电镜图,由图4可发现,水灰比为0.25、0.30时,存在大量的凝胶蓬松絮状的C-S-H结构和方块状的Ca(OH)₂,内部界面结构更粗糙。各组试样内部均存在大量的孔洞,其中水灰比为0.35的净浆试样内部结构表面存在着一些明显的大孔洞,毛细孔洞也最多,且表面覆盖着大量的晶体。水灰比为0.30的净浆试样内部毛细孔数次之。水灰比为0.25的净浆试样内部结构最为致密,孔洞数最少。可见,水灰比的增加不仅改变了水化产物的生成量,还可以改善水泥石的界面结构。

3.2 碳化后水泥净浆中游离氯离子浓度变化

碳化作用后水泥净浆内游离氯离子浓度与总氯离子浓度关系曲线如图5所示。从图5中可以看出,游离氯离子浓度随总氯离子浓度的转变趋势随着水灰比的不同而变化。当水灰比为0.30或0.35时,游离氯离子浓度始终随总氯离子浓度的增加而增加;而水灰比为0.25时,内掺0.5%氯离子的净浆内游离氯离子浓度最小。可见,碳化作用下水灰比对水泥浆体系中游离氯离子浓度的影响更为复杂。

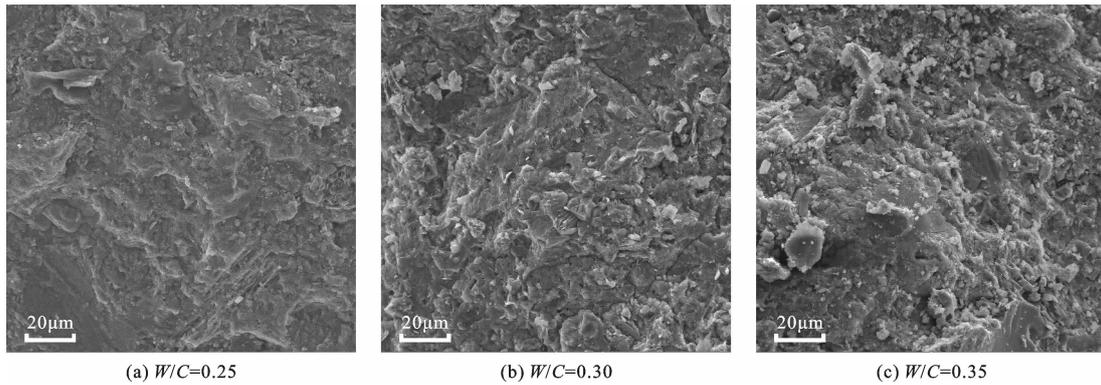


图4 不同水灰比水泥净浆内部扫描电镜图(NaCl 掺量 1.0%, ×2.5k)

结合图1可以发现,当总氯离子浓度与水灰比一定时,碳化作用下水泥净浆内的游离氯离子浓度更大,且随着总氯离子浓度的增加,两者的游离氯离子浓度差值也越来越大,说明碳化作用并不利于氯离子结合,氯盐掺量越高,碳化越不利于氯离子的结合。这是因为当 CO_2 溶解到混凝土孔溶液时生成 CO_3^{2-} ,与孔溶液中微量的 Ca^{2+} 反应生成 CaCO_3 沉积,导致孔溶液中 Ca^{2+} 浓度下降。为了弥补孔溶液中损耗的 Ca^{2+} , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体持续溶解,孔溶液中的pH值下降,从而破坏Friendel盐的稳定性,加快Friendel的分解,使部分氯离子被重新释放到孔溶液中,同时游离氯离子会继续向着未碳化区扩散迁移,从而使未碳化区的游离氯离子浓度升高。且扩散至结构内部的 CO_2 会与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应,削弱游离氯离子与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应的能力,降低水泥基材料对游离氯离子的化学结合能力。同时,部分水化产物也参与了碳化反应,在这个过程中会消耗大量的C-S-H, C3S, C2S等凝胶类物质,而这些物质均能通过物理吸附作用固化一部分的游离氯离子,在一定程度上削弱游离氯离子的结合能力,导致水泥浆体系中的游离氯离子浓度升高^[21]。

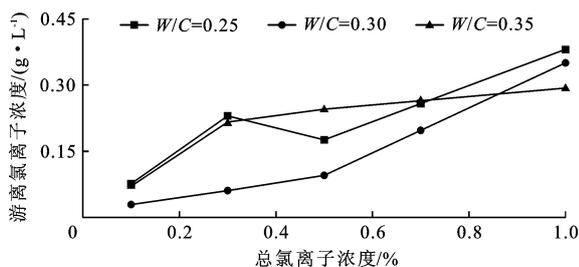
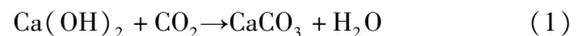


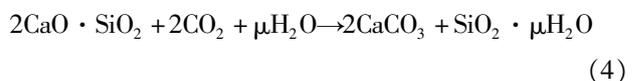
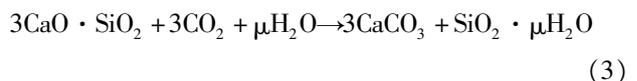
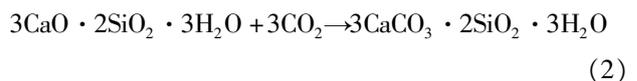
图5 碳化后水泥净浆内游离氯离子与总氯离子浓度关系曲线

图6为碳化与未碳化水泥净浆试样的X射线衍射对比图,其中水灰比为0.35, NaCl掺量为1.0%。观察图6发现,碳化作用下水泥净浆内的

C-S-H凝胶衍射峰消失, Friendel盐衍射峰减少且减弱,出现了少量的AFm相衍射峰,石英和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的衍射峰强度增强,并且还出现了以方解石为主的碳酸盐物质的衍射峰。可见,碳化会影响水泥基材料的水化作用,改变水化产物的生成种类和生成量。一般的硅酸盐水泥水化后会生成大量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CO_2 进入就会与孔隙液中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应,产生碳酸钙和水:



扩散到水泥基材料中的 CO_2 不单会与孔隙液中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应,还会与部分水化产物如C-S-H, C3S, C2S等凝胶类物质发生化学反应:



CO_2 与溶解在孔隙液中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 以及部分水化产物反应生成碳酸钙,导致碳酸盐类物质衍射峰的出现。同时,又削弱了游离氯离子与未水化 C_3A 的反应,从而减少了Friendel盐的生成量。另一方面, OH^- 的大量消耗会降低孔溶液中的pH值,从而使得生成的Friendel盐不稳定,部分分解,致使Friendel盐衍射峰减少且减弱。未水化的 C_3A 还能够与 SO_4^{2-} 反应生成钙矾石,这种物质易失水表现为 SO_4^{2-} 。因为AFm相能在低碱度环境中稳定存在,所以在碳化组的水泥净浆中出现了AFm相衍射峰。而C-S-H凝胶衍射峰消失是因为C-S-H凝胶与 CO_2 反应生成了其他物质。水化产物中 C_3S , C_2S 等凝胶类物质也会与 CO_2 反应,生成大量的 SiO_2 ,使得 SiO_2 衍射峰增强。

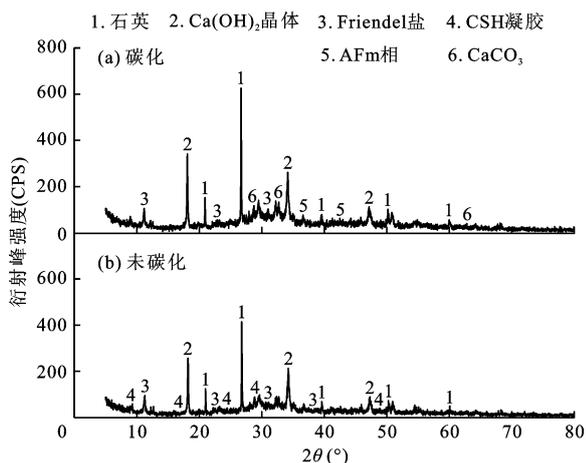


图6 碳化与未碳化水泥净浆试样的X射线衍射对比图($W/C=0.35$, NaCl掺量1.0%)

图7为碳化作用下水灰比为0.35, NaCl内掺量为1.0%的水泥净浆扫描电镜图。与配合比相同的图4相比,碳化后的水泥净浆内部的结构更密实,孔洞较少,这是因为碳化作用生成的碳酸钙会沉积在孔隙中,使得水泥基材料中的孔隙减少,水泥浆体的结构更密实。从图7中可以看出,由于遭到碳化作用,水泥石表面出现了许多填补水泥浆体内孔洞的晶体结构,细化了浆体的内部结构,减小了孔隙率。这利于减弱游离氯离子的扩散与侵蚀。

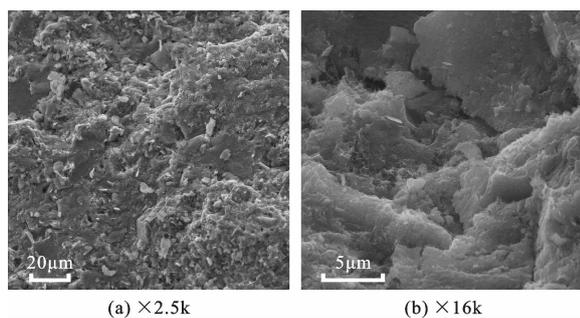


图7 碳化作用下水泥净浆内部扫描电镜图($W/C=0.35$, NaCl掺量1.0%)

4 结论

(1)碳化前水灰比对净浆内游离氯离子浓度的影响规律受总氯离子浓度的影响。当总氯离子浓度为0.1%时,水灰比对游离氯离子浓度的影响甚微,各组试样的游离氯离子浓度值相近,随着总氯离子浓度的不断增大,各组试样内的游离氯离子浓度差值越来越大。即总氯离子浓度越大,水灰比对水泥净浆中游离氯离子浓度的影响越大。

(2)碳化不利于氯离子结合,一方面是因为碳

化后孔溶液的pH值下降,不利于Friedel盐的稳定,部分Friedel分解,使氯离子重新被释放到孔溶液中,减少了离子化学固化量。另一方面水化产物C-S-H凝胶的生成量也减少, Ca^{2+} 被大量消耗,Ca/Si比有所减小,削弱了物理吸附作用,减少了离子的物理吸附量,从而增大了水泥净浆中游离氯离子的浓度。

(3)碳化作用生成的碳酸钙会沉积在孔隙中,使得水泥基材料中的孔隙减少,水泥浆体结构更密实,这可能有利于减弱游离氯离子的扩散与侵蚀。

参考文献:

- [1] JIN Zuquan, ZHAO Xia, ZHAO Tiejun, et al. Chloride ions transportation behavior and binding capacity of concrete exposed to different marine corrosion zones[J]. Construction and Building Materials, 2018, 177(20): 170-183.
- [2] BALESTRA C E T, REICHERT T A, SAVARIS G. Contribution for durability studies based on chloride profiles analysis of real marine structures in different marine aggressive zones[J]. Construction and Building Materials, 2019, 206:140-150.
- [3] CARLOS E T B, THIAGO A R, WAGNER A P, et al. Chloride profile modeling contemplating the convection zone based on concrete structures present for more than 40 years in different marine aggressive zones[J]. Construction and Building Materials, 2019, 198:345-358.
- [4] HU Jiezheng, DENG Peichang, LI Xiaogang, et al. The vertical Non-uniform corrosion of reinforced concrete exposed to the marine environments[J]. Construction and Building Materials, 2018, 183:180-188.
- [5] TUMIDAJSKI P J, CHAN G W. Effect of sulfate and carbon dioxide on chloride diffusivity[J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(4): 551-556.
- [6] ZHU Xingji, GOANGSEUP Z, WONWOO L, et al. Probabilistic analysis of reinforcement corrosion due to the combined action of carbonation and chloride ingress in concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 124:667-680.
- [7] 谢燕,吴笑梅,樊粤明,等.内掺氯离子对钢筋锈蚀的影响及不同材料对氯离子的固化[J].华南理工大学学报(自然科学版), 2009, 37(8):132-139.
- [8] LIU Jin, QIU Qiwen, CHEN Xiachi, et al. Understanding the interacted mechanism between carbonation and chloride aerosol attack in ordinary Portland cement concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2017, 95:217-225.
- [9] ZHANG J L, LI Y S, TONG K T, et al. Deformation of Steel-bamboo composite beam considering the effect of interfacial slippage[J]. Advanced Steel Construction, 2018,

- 14(3):324-336.
- [10] 柳俊哲,闫加利,巴明芳,等. 碳化对水泥混凝土内氯离子分布的影响[J]. 建筑材料学报,2015, 18(1):113-117.
- [11] 徐鹏,张妍,荆杰. 混凝土中氯离子侵蚀综述[J]. 混凝土,2017(9):45-48.
- [12] 勾密峰,管学茂,张海波,等. 水化程度对水泥基材料固化氯离子的影响[J]. 材料导报,2011, 25(20):125-127.
- [13] ZHANG Zhenwen, LI Yushun, LIU Rui. Failure behavior of adhesive bonded interface between steel and bamboo plywood[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2016,30(19):2081-2099.
- [14] YUAN Qiang, SHI Caijun, SCHUTTER G D, et al. Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment—A review[J]. Construction and Building Materials,2009,23(1):1-13.
- [15] WENG Zhicai, YU Hongfa, SUN Wei, et al. Influence of water-cement ratio and cement content on chloride binding capacity of concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2006,28(3):47-50.
- [16] ANN K Y, AHN J H, RYOU J S. The importance of chloride content at the concrete surface in assessing the time to corrosion of steel in concrete structures[J]. Construction and Building Materials, 2009,23(1):239-245.
- [17] NGALA V T. Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes[J]. Cement and Concrete Research,1997,27(7):995-1007.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准:GB/T50082-2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [19] HIRAO H, YAMADA K, TAKAHASHI H, et al. Chloride binding of cement estimated by binding isotherms of hydrates[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2005,3(1):77-84.
- [20] LUPING T, NISSON L O. Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars[J]. Cement and Concrete Research,1993,23(2):247-253.
- [21] 牛荻涛,孙丛涛. 混凝土碳化与氯离子侵蚀共同作用研究[J]. 硅酸盐学报,2013, 41(8):1094-1099.

(上接第189页)

- [10] 吴平,万燎榕. 库水位骤降偶遇地震作用下黏土心墙坝渗透及抗震稳定性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2019,30(3):194-199.
- [11] 赵丹. 不同工况下梯级土石坝溃决模型对比研究[J]. 水利规划与设计,2018(3):74-78.
- [12] 罗日洪,董海洲,张令,等. 堤坝渗漏通道热流耦合模型及试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2016, 12(S1):32-38.
- [13] 吴大志,余璐. 土工膜缺陷对堤坝渗流影响的试验研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版),2016, 35(3):474-478.
- [14] 李嘉,王博,张景伟. 高聚物防渗墙土质堤坝地震加速度响应的动力离心试验研究[J]. 地震工程与工程振动,2016,36(6):1-10.
- [15] 黄娟,刘栋,纪君娜. 抛石堤坝稳定性试验[J]. 交通科学与工程,2014,30(1):56-59+92.
- [16] 白广明,张守杰,卢建旗,等. 流场法探测堤坝渗漏数值模拟及分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018,46(1):52-58.
- [17] 李宏恩,徐海峰,李铮,等. 地面核磁共振法与高密度电法联合探测堤坝渗漏隐患原位试验研究[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(4):1627-1634.
- [18] 姚斌斌,陈亮,李月奇,等. 堤坝渗漏广义示踪法室内试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2017,34(2):43-49.
- [19] 张汝凯,张晓培,吕守航,等. 三维高密度电阻率法在堤坝工程中的模拟试验[J]. 世界地质,2016, 35(4):1133-1137.
- [20] 姚纪华,宋汉周,罗仕军,等. 综合示踪法在岩溶水库渗漏探测中的应用[J]. 工程勘察,2014,42(5):93-98.
- [21] 张守仁. 考虑饱和-非饱和渗流的土石坝渗流及稳定性计算[J]. 安徽建筑, 2019, 26(9):196-197+234.
- [22] 叶楠. 爆破振动对水库大坝及建筑物安全影响分析[J]. 小水电,2018,203(5):28-30.
- [23] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册:第五版[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2018:341-342.
- [24] 赵明阶,邹颖,张欣. 含隐患土石坝的三维波场数值模拟及其特征分析[J]. 水利学报,2016,47(5):599-607.