

文章编号:1007-9629(2022)04-0389-06

干湿循环下废弃纤维再生混凝土氯离子传输性能

康天蓓, 刘 昱, 周静海*, 王凤池, 张逸超

(沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要:研究了干湿循环次数、再生粗骨料取代率、废弃纤维体积分数对废弃纤维再生混凝土氯离子传输性能的影响,并分析了氯离子的传输机理.结果表明:干湿循环下,随着再生粗骨料取代率的增加,再生混凝土抗氯离子侵蚀能力降低,掺入废弃纤维能够提高其抗氯离子侵蚀能力;干湿循环条件对不同再生粗骨料取代率试件中自由氯离子含量影响更显著,且自由氯离子含量随侵蚀深度增加先增大后减小;自由氯离子含量与总氯离子含量呈线性相关,氯离子结合能力系数的精确度为 0.001;在实际工程的耐久性性能设计中,可忽略再生粗骨料取代率和废弃纤维体积分数对氯离子结合能力的影响.

关键词:再生粗骨料;废弃纤维;氯离子含量;氯离子结合能力

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.04.009

Chloride Transport Performance of Waste Fiber Recycled Concrete under Dry-Wet Cycles

KANG Tianbei, LIU Yu, ZHOU Jinghai*, WANG Fengchi, ZHANG Yichao

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: The effects of dry-wet cycles, replacement rate of recycled coarse aggregates and volume fraction of waste fiber on chloride transport performance of waste fiber recycled concrete were studied, and the chloride transport mechanism was analyzed. The results show that with the increase of replacement rate of recycled coarse aggregate, the chloride erosion resistance of recycled concrete becomes smaller under dry-wet cycles. The addition of waste fiber can improve the resistance of chloride erosion of the recycled concrete. The dry-wet cycled condition show a more significant effect on the content of free chloride ion with different recycled aggregate replacement rates. Under the dry-wet cycles, the content of free chloride increases first and then decreases with the increase of the erosion depth. There is a linear correlation between free and total chloride content, and the accuracy of coefficient representing chloride binding capacity is 0.001. In the actual engineering durability design, the effects of replacement rate of recycled coarse aggregate and the volume fraction of waste fiber on chloride binding capacity can be ignored.

Key words: recycled coarse aggregate; waste fiber; content of chloride; chloride binding capacity

再生混凝土的推广应用缓解了土地资源侵占和自然资源匮乏等生态问题^[1].除建筑垃圾外,仅 2020 年中国化学纤维产量达 6 126.5 万 t,较 2019 年增长了 4.1%^[2].将废弃地毯纺织纤维作为增强纤维加入再生混凝土中,可以有效改善再生粗骨料带来的力

学性能、耐久性能劣化等问题^[1,3],并充分利用建筑和生活垃圾,具有“以废治废”的重要意义.

氯离子侵蚀是造成混凝土结构性能退化、提前退出服役的主要耐久性问题^[4].吴庆令等^[5]提出干湿循环条件下,氯离子扩散系数随着暴露时间的增加

收稿日期:2021-01-12; 修订日期:2021-04-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52108235, 51678374);辽宁省教育厅青年基金资助项目(lnqn202003);辽宁省高等学校创新团队项目(LT2019011);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(300102341511)

第一作者:康天蓓(1987—),女,辽宁锦州人,沈阳建筑大学副教授,硕士生导师,博士. E-mail:kangtianbei@sjzu.edu.cn

通讯作者:周静海(1965—),男,黑龙江尚志人,沈阳建筑大学教授,博士生导师,博士. E-mail:zhoujinghai@sjzu.edu.cn

而降低.尹世平等^[6]研究发现,当氯盐溶液质量分数为5%时,随着干湿循环次数的增加,纤维束与混凝土界面性能呈下降趋势.再生混凝土中由于骨料表面附着老旧砂浆和多重界面过渡区(ITZ)的存在,使氯离子扩散速率加快^[7-8],而加入各类纤维可使水泥基体的孔隙发生变化^[9-10],从而影响氯离子的扩散.

本文研究了干湿循环次数、再生粗骨料取代率 w_{RA} 和废弃纤维体积分数 φ_{WF} 对废弃纤维再生混凝土(WFRC)氯离子传输性能的影响,并测试了随着侵蚀深度的增加氯离子含量分布情况,同时在细观尺度上分析了废弃纤维再生混凝土中氯离子的传输机理.

1 试验

1.1 原材料

天然粗骨料(NA)为天然碎石;再生粗骨料(RA)是将原始强度C40、龄期2 a的混凝土板,经人工破碎、筛分等一系列过程制备而成,其物理力学性能见表1.细骨料为天然河砂,细度模数为2.7,表观密度为2 620 kg/m³.水泥采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥.废弃纤维来自废弃的丙纶地毯,单丝废弃纤维的密度为0.91 g/cm³,极限伸长率为1.73%,吸水率¹⁾小于0.1%,经人工拆分、去除杂质后制备成废弃纤维束.

表1 再生粗骨料的物理力学性能

Table 1 Physical and mechanical properties of recycled coarse aggregates

Aggregate	Apparent density/ (kg·m ⁻³)	Gradation/mm	Water absorption (by mass)/%	Crushing index/%	Residual mortar content (by mass) /%
NA	2 690.0	5-20	1.12	6.4	
RA	2 461.0	5-20	4.18	17.0	27

1.2 配合比与试件制备

根据文献[1,3],制备WFRC的用水量分为净用水量和附加用水量,在计算有效水灰比时,不考虑附

加用水量,采用净用水量进行计算;附加用水量由表1中再生粗骨料的绝对吸水率计算得到.WFRC的水灰比 m_w/m_c 为0.5,其配合比见表2.

表2 WFRC的配合比

Table 2 Mix proportion of WFRC

Specimen	$w_{RA}/\%$	$\varphi_{WF}/\%$	Mix proportion/(kg·m ⁻³)				
			Cement	Sand	NA	RA	Water
NC	0	0	390	709	1 156	0	195
FC-0.08	0	0.08	390	709	1 156	0	195
RC50	50	0	390	709	578	578	219
FRC50-0.08	50	0.08	390	709	578	578	219
FRC50-0.12	50	0.12	390	709	578	578	219
FRC50-0.16	50	0.16	390	709	578	578	219
FRC100-0.08	100	0.08	390	709	0	1 156	243

WFRC的制备方法为:将水泥和细骨料倒入搅拌机内搅拌至均匀,接着将废弃纤维分散地投入搅拌机中搅拌1 min,加水继续搅拌1 min,至水泥砂浆均匀,再加入粗骨料拌制2~3 min,最后将拌和物倒入模具,24 h后脱模,放入标准养护室中养护至28 d后进行试验.

1.3 试验方法

氯离子传输试验试件尺寸为100 mm×100 mm×100 mm,测定自由氯离子含量 w_{free} 和总氯离子含量 w_{total} ,每个编号进行3次平行试验,结果取平均值.NaCl

溶液浓度为0.6 mol/L,定义实验室内每个干湿循环周期内试件失水量和吸水量相同时为平衡状态.干湿循环制度为:浸泡2 d、晾干3 d为1个循环,设置浸泡时间 $t=30、60、90$ d,分别对应6、18、90个循环.

WFRC试件浸泡前将5个面用环氧树脂封闭,浸泡达到预定时间后,除去环氧树脂,将非封闭面在混凝土打磨机上逐层磨粉,每2 mm为1层并取样;将所得样品通过0.63 mm筛,并置于(105±5)℃的烘箱内2 h,取出后放入干燥箱中冷却至室温备用.用S-4800扫描电子显微镜(SEM)观测WFRC样品的

1)文中涉及的吸水率、含量、水灰比等除特殊说明外均为质量分数或质量比.

微观形貌。

滴定终点的颜色是判定氯离子含量的重要标准。根据JTJ 270-98《水运工程混凝土试验规程》及文献[9,11],滴定终点为砖红色,而JGJ/T 322—2013《混凝土中氯离子含量检测技术规程》将滴定终点更改为桃红色。按照2种终点颜色进行精确配置,对已知浓度的氯化钠标准溶液进行验证,发现桃红色的结果与真实值更接近,这是因为当溶液滴定至呈砖红色时,硝酸银溶液已过量,以略带桃红色的黄色不消失作为滴定终点的判定颜色则与真实值更接近,因此,本文总氯离子含量测试以桃红色为滴定终点。

2 结果与分析

2.1 再生粗骨料取代率对自由氯离子含量影响

不同再生粗骨料取代率对WFRC中自由氯离子含量的影响见图1。由图1可见,各试件曲线形态相同:第1阶段,随着侵蚀深度的增加,WFRC中自由氯离子含量增加;第2阶段,随着侵蚀深度的继续增加,WFRC中自由氯离子含量减小,曲线形态先迅速下降,然后趋于平缓。在曲线的第1阶段,氯离子的主

要侵蚀模式为对流作用,“对流区”侵蚀深度为0~5 mm,对流作用主要是由于孔隙饱和度处于非均匀状态,孔隙液在场的作用下而发生的渗流^[12];在曲线的第2阶段,氯离子侵蚀模式主要为扩散作用,称为“扩散区”。表层氯离子含量峰值的形成是对流和扩散这2种作用耦合的结果,而在长期浸泡下,表层区不存在离子的对流作用,因此不会形成局部氯离子含量峰值,表现出显著的扩散特征^[13]。

由图1还可见:在“扩散区”,随着再生粗骨料取代率的增加,相同侵蚀深度下自由氯离子含量增加;随着侵蚀深度的继续增加,自由氯离子含量逐渐趋于相等。不同再生粗骨料取代率下WFRC中自由氯离子含量的提高率见表3,表中 Δw_{0-50} 和 Δw_{50-100} 分别为再生粗骨料取代率由0%提高到50%、50%提高到100%时WFRC中自由氯离子含量的提高率。由表3可见:再生粗骨料取代率对“扩散区”的影响程度大于“对流区”,随着侵蚀时间的增加其影响程度逐渐减小,曲线峰值右移,但由于毛细吸附和对流耦合作用较复杂,因此规律性不强;再生粗骨料取代率由50%提高到100%时,其对自由氯离子含量的影响程度增大。

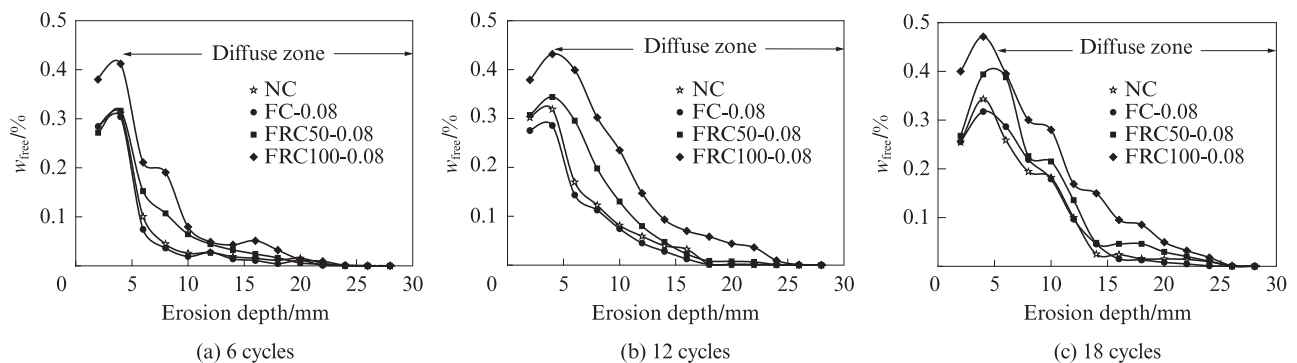


图1 不同再生粗骨料取代率对WFRC中自由氯离子含量的影响

Fig. 1 Effect of different w_{RA} on w_{free} in WFRC

表3 不同再生粗骨料取代率下WFRC中自由氯离子含量的提高率

Table 3 Increase rate of w_{free} in WFRC under different w_{RA}

Zone	Erosion depth/mm	6 cycles		12 cycles		18 cycles	
		$\Delta w_{0-50}/\%$	$\Delta w_{50-100}/\%$	$\Delta w_{0-50}/\%$	$\Delta w_{50-100}/\%$	$\Delta w_{0-50}/\%$	$\Delta w_{50-100}/\%$
Convection	4	3.80	23.30	16.92	42.77	19.40	16.40
Diffuse	10	70.39	18.77	20.93	44.68	16.75	23.29

2.2 废弃纤维体积分数对自由氯离子含量影响

不同废弃纤维体积分数对WFRC中自由氯离子含量的影响见图2;不同废弃纤维体积分数下自由氯离子含量的提高率见表4,表中 $\Delta w_{0.08-0.12}$ 、 $\Delta w_{0.12-0.16}$ 分别为废弃纤维体积分数 φ_{WF} 由0.08%提高到0.12%、由0.12%提高到0.16%时WFRC中自由氯离子含量的

提高率。由图2和表4可见:废弃纤维体积分数对WFRC“对流区”的影响较大,数据规律不明显; $\varphi_{WF}=0.12\%$ 的试件“扩散区”水泥基体中自由氯离子含量最小,随着干湿循环次数增加,废弃纤维体积分数对WFRC中自由氯离子含量的影响程度减小;当 $\varphi_{WF}=0.16\%$ 时,WFRC中自由氯离子含量增加程度明显。

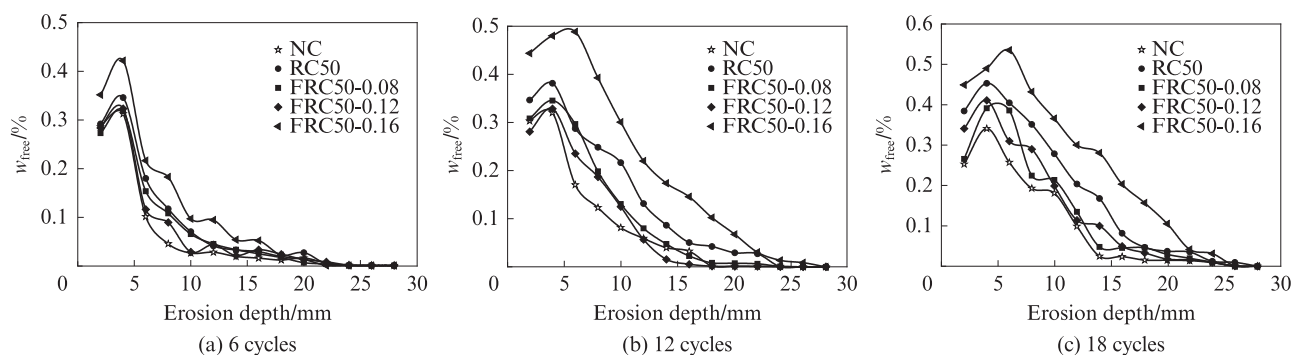


图2 不同废弃纤维体积分数对WFRC中自由氯离子含量的影响

Fig. 2 Effect of different φ_{WF} on w_{free} in WFRC

表4 不同废弃纤维体积分数下WFRC中自由氯离子含量的提高率

Table 4 Increase rate of w_{free} in WFRC under different φ_{WF}

Zone	Erosion depth/mm	6 cycles		12 cycles		18 cycles	
		$\Delta w_{0.08-0.12}/\%$	$\Delta w_{0.12-0.16}/\%$	$\Delta w_{0.08-0.12}/\%$	$\Delta w_{0.12-0.16}/\%$	$\Delta w_{0.08-0.12}/\%$	$\Delta w_{0.12-0.16}/\%$
Convection	4	1.75	34.41	-5.07	31.55	90.48	16.10
Diffuse	10	-132.68	71.12	-4.24	58.33	-7.38	45.61

2.3 干湿循环次数对自由氯离子含量影响

由图1、2可见:随着干湿循环次数的增加,WFRC中自由氯离子含量和曲线峰值逐渐增大,峰值点的侵蚀深度基本保持一致,在该侵蚀深度下干湿循环机制达到了平衡状态;废弃纤维体积分数对自由氯离子含量的影响程度低于再生粗骨料取代率;干湿循环次数对再生粗骨料混凝土自由氯离子含量的影响较大,RC50在干湿循环18次时的自由氯离子含量峰值是其干湿循环6次时的1.32倍,是天然混凝土NC的1.1倍,这是因为再生混凝土的多重ITZ、骨料表面的老旧砂浆和高孔隙率为氯离子侵入提供了更多的途径;FRC50-0.12的曲线形态不如其他试件光滑,主要由于在制备砂浆试样时有纤维掺入其中,纤维表面易吸附氯离子,增加了该侵蚀深度下的自由氯离子含量。

2.4 自由氯离子与总氯离子含量的关系

WFRC中自由氯离子与总氯离子含量的关系见图3。由图3可见,WFRC中自由氯离子含量 w_{free} 与总氯离子含量 w_{total} 呈线性关系,相关系数为0.998,关系式为:

$$w_{total} = aw_{free} + b \quad (1)$$

式中: a 、 b 为系数。

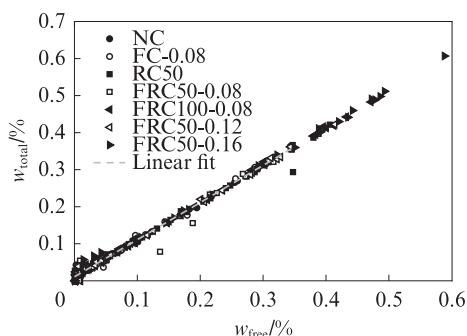


图3 WFRC中自由氯离子与总氯离子含量的关系

Fig. 3 Relationship between the content of free and total chloride ions in WFRC

在相同侵蚀深度下,由于氯离子结合效应,WFRC中总氯离子含量大于自由氯离子含量。线性结合理论是氯离子结合效应主要的计算理论^[4]。总氯离子含量可表示为:

$$w_{total} = \omega_e w_{free} + w_r \quad (2)$$

式中: ω_e 为可蒸发水占混凝土的体积分数; w_r 为结合氯离子含量。

由此可见,式(1)中系数 a 表征有效含水量对总氯离子含量的影响,系数 b 表征氯离子结合能力对总氯离子含量的影响。系数 a 、 b 及相关系数 R 见表5。由

表5 系数 a 、 b 及相关系数 R Table 5 Coefficient a , b and correlation coefficient R

Coefficient	NC	FR-0.08	RC50	FRC50-0.08	FRC50-0.12	FRC50-0.16	FRC100-0.08
a	0.135 1	1.036 1	1.024 7	1.031 0	1.003 9	1.042 7	1.031 5
b	0.007 5	0.006 5	0.010 4	0.007 2	0.008 5	0.009 9	0.008 3
R	0.998 0	0.998 0	0.996 0	0.998 0	0.997 0	0.996 0	0.994 0

表5可见:所有试件中的自由氯离子含量与总氯离子含量的线性相关系数均在0.99以上,线性拟合程度较好;除RC50外,各试件系数 b 的精度为0.001,选择单因素试件进行分析,FR-0.08的系数 b 比NC降低了13.3%,而RC50的系数 b 比NC增加了38.7%;各设计变量对氯离子的结合能力较小,该结论与文献[5,13]相同.由此可以认为总氯离子含量与自由氯离子含量呈 $w_{\text{total}}=w_c w_{\text{free}}$ 的关系,在实际工程设计和耐久性能计算时可以忽略再生粗骨料取代率和废弃纤维体积分数对氯离子结合能力的影响.

2.5 机理分析

WFRC的微观形貌见图4.再生粗骨料对WFRC中自由氯离子含量产生影响的原因主要有:(1)随着再生粗骨料取代率的增加,ITZ数量增加,图4(a)中

ITZ处存在贯穿的微裂缝,具有高钙硅比的水化产物和高孔隙率的特点,它不仅是混凝土中的薄弱环节,而且增加了氯离子侵入的通道数量,这与Yeáú等^[14]和Zaharieva等^[15]得到的结论相同;(2)再生粗骨料表面附着老旧砂浆,文献[16]提出当侵蚀深度相同时,老旧砂浆处的氯离子含量高于天然骨料处,Vázquez等^[17]研究发现再生粗骨料表面附着的老旧砂浆在一定程度上提高了氯离子的侵蚀通道;(3)再生混凝土有更高的孔隙率,文献[11]采用“可蒸发含水量法”测试了再生混凝土孔隙率,采用与本文相同的方法测试了混凝土中的氯离子含量,得到氯离子含量随着再生混凝土孔隙率的增加而增加的结论,一些连通或者较大的孔成为了再生混凝土中自由氯离子传输的新通道.

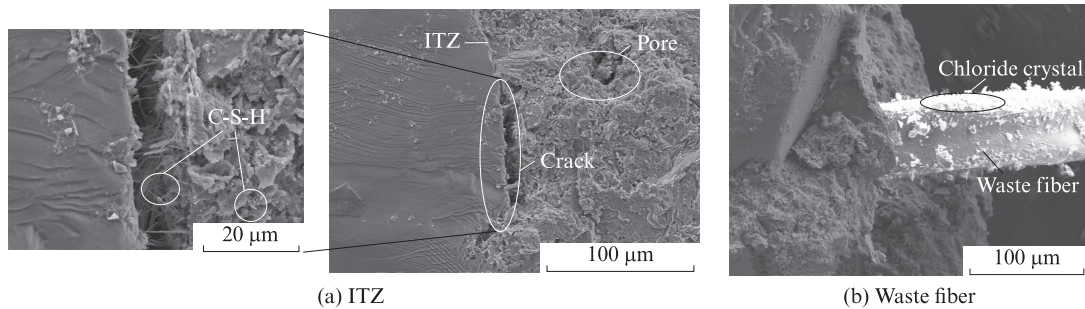


图4 WFRC的微观形貌
Fig. 4 Micro-morphologies of WFRC

废弃纤维体积分数对混凝土中自由氯离子含量的影响程度小于再生粗骨料取代率.当废弃纤维在合理的体积分数范围内时,首先,纤维的加入优化了再生混凝土内部孔结构,提高了再生混凝土密实度;其次,纤维可以阻断裂缝发展,缩短氯离子通过路径;最后,氯盐晶体有少量附着在废弃纤维表面(见图4(b)),减少了基体中的自由氯离子含量.而当大量废弃纤维掺入时,由于分散不均匀或纤维相互叠加易形成纤维团,混凝土硬化后在混凝土内部形成空鼓,降低了试件的密实程度,并且增加了新的界面,因而增大了其自由氯离子含量.

3 结论

(1)干湿循环下,随着再生粗骨料取代率的增加,废弃纤维再生混凝土的抗氯离子侵蚀能力降低;掺入废弃纤维能够提高再生混凝土的抗氯离子侵蚀性能.

(2)干湿循环下,废弃纤维再生混凝土中的自由氯离子含量随着侵蚀深度的增加先增大后减小,曲线存在明显峰值,以峰值为界限分为“对流区”和“扩

散区”;干湿循环作用对不同再生粗骨料取代率试件中的自由氯离子含量影响更灵敏.

(3)自由氯离子含量与总氯离子含量呈强线性相关.本结论中,代表氯离子结合能力的系数 b 的精确度为0.001,因此在实际工程和耐久性能设计时可以忽略再生粗骨料取代率和废弃纤维体积分数对氯离子结合能力的影响.

参考文献:

- [1] 肖建庄.再生混凝土创新研究与进展[M].北京:科学出版社,2020:1-3.
XIAO Jianzhuang. Innovative research and development of recycled aggregate concrete[M]. Beijing: The Science Publishing Company, 2020:1-3. (in Chinese)
- [2] 国家统计局.中华人民共和国2020年国民经济和社会发展统计公报[R/OL].(2021-02-28)[2021-04-20].http://www.gov.cn/xinwen/2021-02/Z8/content_5589283.htm
National Bureau of Statistics. Statistical bulletin of national economic and social development of China in 2020[R/OL]. (2021-02-28) [2021-04-20]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-02/Z8/content_5589283.htm (in Chinese)

- [3] ZHOU J H, KANG T B, WANG F C. Pore structure and strength of waste fiber recycled concrete[J]. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2019, 14:1-10.
- [4] 金伟良,赵羽习.混凝土结构耐久性[M].北京:科学出版社,2002:48-54.
JIN Weiliang, ZHAO Yuxi. Durability of concrete structure[M]. Beijing: The Science Publishing Company, 2002: 48-54. (in Chinese)
- [5] 吴庆令,余红发,梁丽敏,等.海工混凝土的氯离子扩散性与寿命评估[J].建筑材料学报,2009,12(6):711-715.
WU Qingling, YU Hongfa, LIANG Limin, et al. Life assessment and chloride ion diffusivity of marine concrete[J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(6):711-715.(in Chinese)
- [6] 尹世平,王波,强东峰,等.氯盐干湿循环下纤维编织网增强混凝土力学性能[J].建筑材料学报,2016,19(4):752-756.
YIN Shiping, WANG Bo, QIANG Dongfeng, et al. Mechanical performance of textile reinforced concrete under chloride salt dry-wet cycle[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(4): 752-756.(in Chinese)
- [7] XIAO J Z, LI W G, SUN Z H, et al. Properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete tested by nanoindentation[J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 37(3):276-292.
- [8] 吴相豪,岳鹏君.再生混凝土中氯离子渗透性能试验研究[J].建筑材料学报,2011,14(3):381-384.
WU Xianghao, YUE Pengjun. Experimental study on chloride ion penetration into recycled aggregate concrete [J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(3):381-384.(in Chinese)
- [9] 王晨飞,牛荻涛,焦俊婷.海洋潮汐环境纤维混凝土中氯离子迁移规律研究[J].混凝土,2017(1):20-23.
WANG Chenfei, NIU Ditao, JIAO Juntong. Chloride transport in fiber concrete under sea tidal environment[J]. Concrete, 2017(1):20-23.(in Chinese)
- [10] ZHANG P, LI Q F. Effect of polypropylene fiber on durability of concrete composite containing fly ash and silica fume [J]. Composites Part B:Engineering, 2013, 45(1):1587-1594.
- [11] OLLIVIER J P, MASSAT M. Permeability and microstructure of concrete: A review of modelling[J]. Cement and Concrete Research, 1992, 22(2/3):503-514.
- [12] 张奕,姚昌建,金伟良.干湿交替区域混凝土中氯离子分布随高程的变化规律[J].浙江大学学报(工学版),2009,43(2):360-365.
ZHANG Yi, YAO Changjian, JIN Weiliang. Chloride ion distribution in concrete of dry-wet cycling region along elevated altitude[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2009, 43(2):360-365. (in Chinese)
- [13] 王传坤,高祥杰,赵羽习,等.混凝土表层氯离子含量峰值分布和对流区深度[J].硅酸盐通报,2010,29(2):262-267.
WANG Chuankun, GAO Xiangjie, ZHAO Yuxi, et al. Peak value distribution of surface chloride concentration and convection depth of concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2010, 29(2):262-267. (in Chinese)
- [14] YEAU K Y, KIM E K. An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulate blast-furnace slag[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(7):1391-1399.
- [15] ZAHARIEVA R, BUYLE-BODIN F, SKOCZYLAS F, et al. Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2003, 25(2):223-232.
- [16] XIAO J Z, LI W, CORR D J, et al. Effects of interfacial transition zones on the stress-strain behavior of modeled recycled aggregate concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2013, 52(10):82-99.
- [17] VÁZQUEZ E, BARRA M, APONTE D, et al. Improvement of the durability of concrete with recycled aggregates in chloride exposed environment[J]. Construction and Building Materials, 2014, 67:61-67.