环境和荷载对 RC 柱滞回性能和氯质量分数的影响

沈 孛[1,2], 刁 波[1,2], 叶英华[1], 耿 娇[1]

(1.北京航空航天大学 土木工程系, 100191 北京; 2. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 510640 广州)

摘 要: 为研究不同持续荷载比例(持续偏压荷载占极限偏压荷载的比例)和不同环境对 RC(reinforced concrete)柱的滞回性能和氯质量分数影响,试验室模拟了沿海地区 RC 结构的工作条件. 持续荷载比例分别为 0、0.2 和 0.35 的 RC 柱试件, 经历 100 次海水干湿循环或置于大气环境 100 d 后,进行低周水平反复加载试验并测试受拉区混凝土的氯离子质量分数. 结果表明,持续偏压荷载使海水干湿循环柱和大气环境柱的滞回曲线均呈现明显的不对称性,且前者的不对称性甚于后者. 当水平荷载产生的截面应力分布与持续偏压荷载的同向且持续荷载比例为 0.35 时,海水干湿循环柱的峰值荷载和耗能能力分别是大气环境柱的 0.89 和 0.57 倍;反之,前者分别是后者的 1.04 和 1.08 倍. 持续偏压荷载耦合海水干湿循环作用后,距受拉表面 20 mm 和 40 mm 深处,受拉混凝土的氯离子质量分数均是持续偏压荷载单独作用(即大气环境柱)的 3 倍以上. 可见,持续偏压荷载耦合海水干湿循环作用加速了氯离子的渗透和滞回性能的劣化.

关键词: 持续荷载;海水干湿循环;大气环境;滞回性能;氯离子质量分数

中图分类号: TU375.3;TU317.1 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2014)10-0087-07

Impact of environment and load on the hysteretic behavior and chloride mass fraction of RC columns

SHEN Bei[1,2], DIAO Bo[1,2], YE Yinghua[1], GENG Jiao[1]

(1.Dept. of Civil Engineering, Beihang University, 100191 Beijing, China; 2. State Key Laboratory of Subtropical Architecture Science, South China University of Technology, 510641 Guangzhou, China)

Abstract: To investigate the impact of different sustained load ratios (the ratio of sustained eccentric compressive load to ultimate eccentric compressive load) and different environments on hysteretic behavior and chloride mass fraction of RC(reinforced concrete) columns, the working conditions of RC structures in coastal region were simulated in laboratory. The sustained load ratios were 0, 0.2 and 0.35, respectively. After the RC columns with sustained load had undergone 100 cycles of seawater dry-wet or 100 days in atmospheric environment, low cyclic horizontal loading test was conducted and chloride mass fraction in tensile concrete was tested. Results show that sustained eccentric compressive load lead to the apparent asymmetric pattern of the hysteretic curves of RC columns in seawater dry-wet environment or in atmospheric environment. And the asymmetric pattern of former is more apparent than that of latter. While the stress distribution of cross-section under horizontal cyclic loading is the same as that of sustained eccentric compressive load and the sustained load ratio is 0.35, the peak load and the energy dissipation of RC columns in seawater dry-wet environment are 0.89 and 0.57 times of that in atmospheric environment, respectively. But the former are 1.04 and 1.08 times of the latter if reverse cyclic load is applied. In the depth of 20 mm and 40 mm from tensile surface, chloride mass fraction of tensile concrete in the columns subjected the coupled actions of sustained load and seawater dry-wet cycles are more than 3 times of that only subjected to sustained load (the RC columns in atmospheric environment). These clearly imply that the coupled action of sustained eccentric compressive load and seawater dry-wet cycles could facilitate the chloride penetration and hysteretic behavior degradation.

Keywords: sustained load; dry-wet cycle of sea water; atmospheric environment; hysteretic behavior; chloride mass fraction

收稿日期: 2013-06-12.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178020);亚热带建筑科学国家重点实验室重点项目(2013KA03).
作者简介: 沈 孛(1987—),男,博士研究生;
刁 波(1958—),女,教授,博士生导师.
通信作者: 刁 波, diaobo@buaa.edu.cn.

我国是地震多发国家,混凝土结构在正常使用阶段通常是带裂缝工作的,沿海环境下混凝土结构经历一段时间的使用荷载和氯离子侵蚀综合

作用后的抗震性能和耐久性能引人关注.耐久性设计规范[1]将海洋氯化物环境分为大气区、潮汐区、浪溅区等.金祖权等[2]试验研究了长期浸泡和浸泡烘干循环混凝土中氯离子扩散规律,发现与长期浸泡相比,浸烘循环增加了氯离子在混凝土中的扩散速率;Thomas[3]研究了海水潮汐区钢筋混凝土试件中钢筋锈蚀及氯离子含量,发现增加粉煤灰掺量会降低氯离子阈值;Cheewaket 等[4]对建成 10 年的海港的不同深度混凝土取样测试氯离子含量,提出钢筋开始锈蚀的氯离子含量阈值.

牛荻涛等[5]和贡金鑫等[6]研究了钢筋锈蚀率对钢筋混凝土偏压构件抗震性能的影响,刘伯权等[7]通过幅对称位移低周疲劳加载试验研究混凝土柱的累积损伤; Li[8-9]试验研究了不同裂缝宽度钢筋混凝土梁的氯渗透性,基于试验结果提出初始裂缝宽度限值为 0.1 mm; Win 等[10]用电子探针测试荷载裂缝宽度分别为 0.1、0.2、0.3 mm 时,从裂缝面或试件表面渗透的氯离子浓度和深度,结果表明,裂缝面渗透的浓度约是表面渗透的 2 倍,裂缝宽度为 0.1 mm 和 0.2 mm 时氯溶液的渗透深度相近;Diao 等[11-12]研究了持续承载的钢筋混凝土构件经历侵蚀和冻融综合作用后剩余承载力的变化规律,证实持续荷载加剧了构件的劣化速度;Tammo 等[13]通过轴心加载柱试验,证实钢筋应力是混凝土裂缝宽度的主要影响因素;Berto 等[14]通过非线性分析研究钢筋锈蚀和环境对结构抗震性能的影响,建议进行在役混凝土结构剩余抗震性能试验.对于同样承受持续偏压荷载的钢筋混凝土柱,经历海水干湿循环后的滞回性能与放置在大气环境下的有何差别尚未见相关文献报导.

本文首先模拟结构正常使用状态,利用螺栓杆和螺帽对 RC 柱施加偏压荷载,再进行 100 次海水干湿循环模拟沿海潮汐环境或放置在大气环境下 100 d,最后进行低周水平反复加载试验并测试氯离子质量分数.研究持续偏压荷载比例分别为 0、0.2、0.35 时,海水干湿环境与大气环境下 RC 柱滞回性能的差异和氯离子质量分数的差异.

1 试验概况

1.1 试件设计

总共制作 7 个 RC 柱试件和 3 个混凝土立方体试件,7 个柱试件编号为 Z0~Z6.RC 柱试件尺寸及配筋见图 1,保护层厚度为 25 mm.龄期 28 d 时对参考柱试件 Z0 进行单调加载得到极限偏压荷载,作为柱试件 Z1~Z6 持续偏压荷载的参考.各试件的试验环境和持续荷载比例(持续偏压荷载与极限偏压荷载的比值)见表 1.柱试件 Z1~Z3 处于大气环境,柱试件 Z4~Z6 处于海水干湿循环环境.

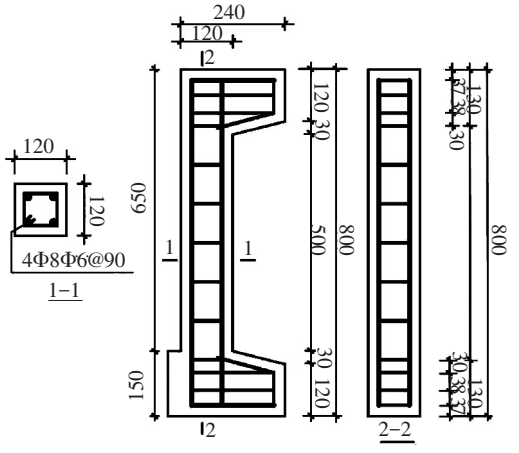


图 1 柱试件几何尺寸及配筋

表 1 柱试件 Z0~Z6 的试验条件

编号	持续荷载比例	试验环境	循环次数	加载龄期/d	加载方式
Z0	0	—	0	28	单调加载
Z1	0	大气环境	0	128	反复加载
Z2	0.20	大气环境	0	128	反复加载
Z3	0.35	大气环境	0	128	反复加载
Z4	0	海水干湿	100	128	反复加载
Z5	0.20	海水干湿	100	128	反复加载
Z6	0.35	海水干湿	100	128	反复加载

因本试验重点研究不同持续荷载比例和不同环境下 RC 柱的滞回性能和氯离子质量分数的差异,且 RC 柱试件的截面尺寸和配筋均相同,故可忽略尺寸效应的影响.

混凝土骨料最大粒径为 10 mm,细骨料中砂的细度模数为 2.6, 硅酸盐水泥强度等级 PC32.5R, 混凝土配合比见表 2.纵筋直径 8 mm, 屈服强度为 250 MPa, 混凝土 28 d 立方体抗压强度为 51.1 MPa.

表 2 混凝土配合比 kg·m^{-3}

水	水泥	砂	石	粉煤灰	减水剂
184.9	472.5	586.2	1066.8	52.5	6.3

1.2 试验方案

如表 1 所示,7 个柱试件编号为 Z0~Z6.试件 Z0 在 28 d 龄期时测得极限偏压荷载 P_u = 65.1 kN,偏心距为 100 mm.依据表 1 的持续荷载比例,28 d 龄期时对柱试件 Z1 和 Z4,Z2 和 Z5,Z3

和 Z6 分别施加 0、0.2P_u、0.35P_u 的持续偏心压力，施加方式与文献[15]相同.

依据表 1 的试验环境和循环次数，柱试件 Z1～Z3 在大气环境下放置到龄期 128 d.柱试件 Z4～Z6 在(20±3)℃的海水中完成 100 个干湿循环.每个海水干湿循环持续 24 h，其中在海水中浸泡12 h，在大气环境下放置12 h.海水按 3% NaCl 和 0.34%$MgSO_4$ 的配比人工配置.

依据表 1 的加载龄期和加载方式，到 128 d 龄期时，卸去柱试件的持续偏压荷载，进行柱顶低周水平反复加载试验.反复加载试验装置如图 2 所示.先在柱顶施加轴心受压荷载至 105 kN(轴压比为 0.19)，并在整个加载过程保持不变，再在柱顶施加由水平位移控制的低周反复荷载，每级位移增量为 2 mm，逐级加载至荷载下降到峰值荷载的 85%后结束试验.试验过程中，纵筋和混凝土应变、以及水平位移等数据由 IMP 系统自动采集.

水平低周反复加载试验完成后，在柱试件 Z1～Z6 承受持续偏压荷载的受拉侧，分别距受拉表面 20 mm 和 40 mm 深处取样混凝土，测定自由氯离子质量分数.



图 2　低周水平反复加载装置

2　主要试验结果及分析

2.1　RC 柱试件主要试验结果

表 3 给出了低周水平反复加载试验结果，即柱 Z1～Z6 的屈服荷载、峰值荷载、破坏荷载及其对应的柱顶水平位移.正向加载是指水平荷载产生的截面应力分布与持续偏压荷载同向，反向加载指水平荷载产生的截面应力分布与持续偏压荷载反向，下同.

表 3　柱试件 Z1～Z6 的特征荷载与位移

加载方向	编号	纵筋屈服		峰值		破坏		位移延性系数
		荷载/kN	位移/mm	荷载/kN	位移/mm	荷载/kN	位移/mm	
正向加载	Z1	13.7	3.4	17.7	12.6	15.6	17.9	5.3
	Z2	12.2	4.7	16.7	13.1	14.7	18.6	4.0
	Z3	11.1	5.5	15.6	15.0	13.5	20.3	3.7
	Z4	12.4	3.1	16.7	9.3	14.3	15.2	4.9
	Z5	11.2	4.2	16.0	10.7	13.8	16.9	4.0
	Z6	10.6	3.5	13.9	8.1	11.8	12.9	3.7
反向加载	Z1	−17.1	−8.5	−19.7	−14.9	−17.6	−20.8	2.4
	Z2	−16.6	−7.5	−19.4	−15.0	−16.7	−20.1	2.7
	Z3	−15.3	−6.5	−19.1	−14.8	−15.1	−19.0	2.9
	Z4	−16.3	−6.8	−19.3	−14.8	−17.5	−18.7	2.8
	Z5	−15.2	−5.4	−19.3	−14.8	−15.8	−19.2	3.6
	Z6	−16.3	−8.6	−19.9	−17.7	−18.0	−19.7	2.3

注：屈服荷载及其位移依据能量法确定；延性系数为破坏点(柱顶水平荷载下降至峰值荷载的 85%时对应的点)位移与屈服位移的比值

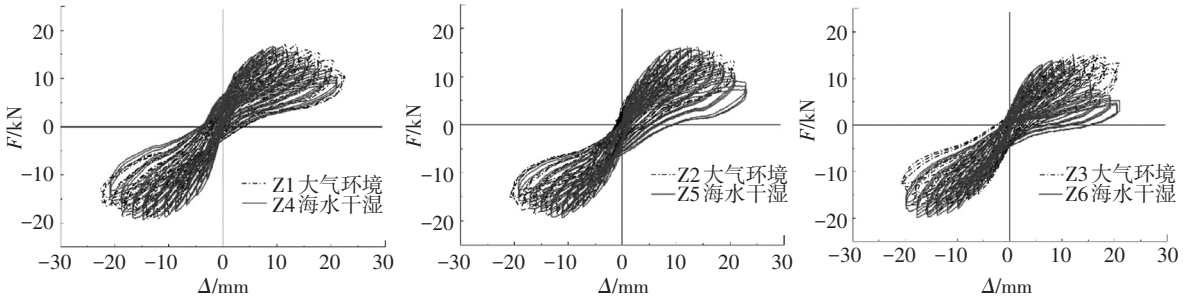
由表 3 可以看出，正向加载时，大气环境柱 Z1～Z3 和海水干湿柱 Z4～Z6 的屈服荷载、极限荷载和延性系数均随持续偏压荷载比例的增加而降低，反向加载时变化规律不明显.

2.2　荷载-位移滞回曲线

将持续荷载比例相同的大气环境柱和海水干湿柱的滞回曲线绘于图 3.由图 3 可见，海水干湿柱的加载刚度和峰值荷载均小于大气环境柱；越过峰值荷载后，干湿循环柱的承载力下降速度比大气环境柱快；随着持续荷载比例增加，海水干湿柱和大气环境柱的滞回曲线均呈现不对称，其中，海水干湿柱的不对称性更加显著.

造成滞回曲线不对称的原因有：首先，柱试件从 28 d 龄期起受到持续偏压荷载作用 100 d，受压区混凝土产生徐变，受压钢筋产生预压应力，从而提高反向加载刚度和峰值荷载；其次，在海水干

湿循环过程中,海水易通过柱试件 Z5 和 Z6 裂缝渗入混凝土并造成腐蚀,导致其滞回曲线不对称甚于柱 Z2 和 Z3.贡金鑫等[6]的试验结果也表明钢筋锈蚀使柱的滞回曲线呈现明显的不对称.

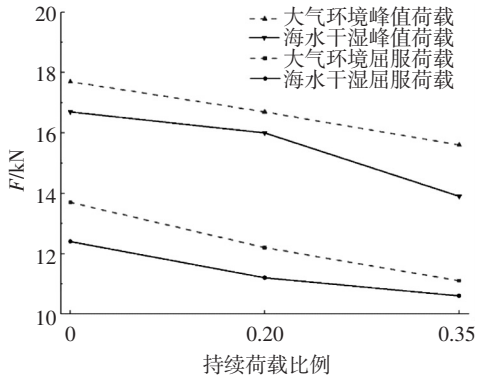


(a) 持续荷载比例0 (b) 持续荷载比例0.2 (c)持续荷载比例0.35

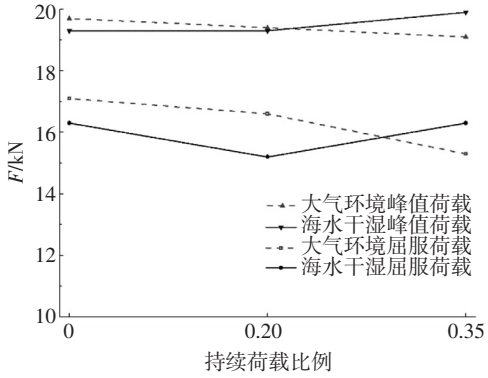
图 3 海水干湿柱与大气环境柱滞回曲线比较

2.3 海水干湿柱与大气环境柱峰值荷载

将海水干湿柱和大气环境柱在正向加载和反向加载时的屈服荷载、峰值荷载与持续荷载比例的关系绘于图 4.由图 4 可见,正向加载时,大气环境柱的屈服荷载、峰值荷载均大于海水干湿柱.反向加载时,变化规律不明显.



(a)正向加载



(b)反向加载

图 4 不同持续荷载比例柱试件的屈服荷载和峰值荷载

2.4 海水干湿柱与大气环境柱延性

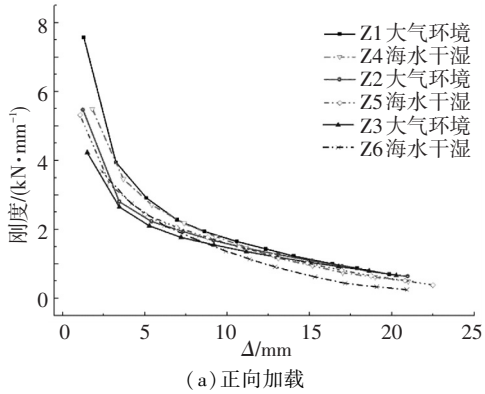
将海水干湿柱 Z4、Z5、Z6 和相同持续荷载比例的大气环境柱 Z1、Z2、Z3 的延性系数的比值列于表 4.由表 4 可见,正向加载时,延性比值随持续荷载比例变化较小,说明两种环境对延性影响不大.

表 4 海水干湿柱和大气环境柱峰值荷载和延性比值

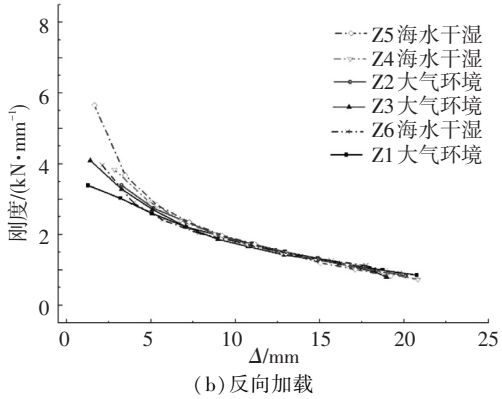
持续荷载比例	峰值荷载比值		延性比值	
	正向加载	反向加载	正向加载	反向加载
0	0.92	0.98	0.92	1.17
0.20	0.96	0.99	1.00	1.33
0.35	0.89	1.04	1.00	0.79

2.5 海水干湿柱与大气环境柱刚度

将海水干湿柱和大气环境柱在正向加载和反向加载时的割线刚度变化曲线绘于图 5.由图 5 可见,正向加载时,持续偏压柱试件 Z2、Z3、Z5、Z6 的刚度均低于未承受偏压柱试件 Z1 和 Z4,说明持续偏压荷载使 RC 柱的正向加载刚度降低.反向加载时,则无明显规律.因此,无论是正向加载还是反向加载,海水干湿柱和大气环境柱割线刚度无明显差异.



(a)正向加载

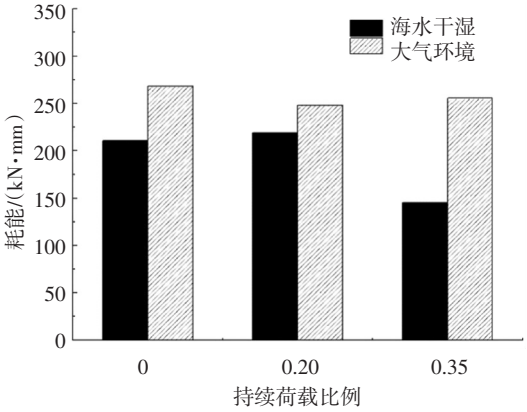


(b)反向加载

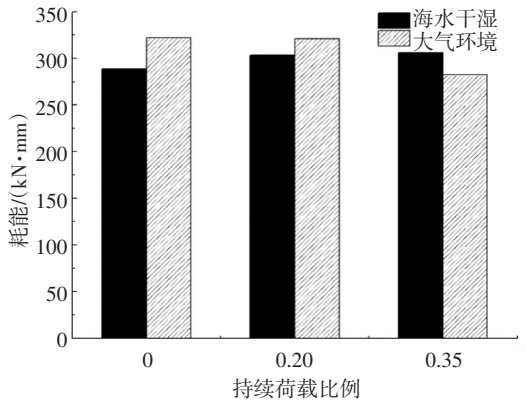
图 5 海水干湿柱与大气环境柱刚度比较

2.6　海水干湿柱与大气环境柱的耗能能力

骨架曲线所围面积可近似表示耗能能力.过峰值荷载后下降到 85%峰值荷载时,骨架曲线与坐标轴所围面积值(耗能)绘于图 6.由图 6 可见,海水干湿柱的耗能能力小于大气环境柱.将海水干湿柱 Z4、Z5、Z6 的耗能值分别除以相同持续荷载比例的大气环境柱 Z1、Z2、Z3 的耗能值,所得比值见表 5.持续荷载比例为 0.35 时,正向加载耗能比为 0.57(海水干湿柱耗能较大气环境柱低 43%),反向加载耗能比为 1.08.说明海水干湿柱 Z6 正向耗能明显减弱,反向耗能增加,可见,持续偏压荷载耦合海水干湿作用对 RC 柱耗能的影响大于持续偏压大气环境柱.



(a)正向加载



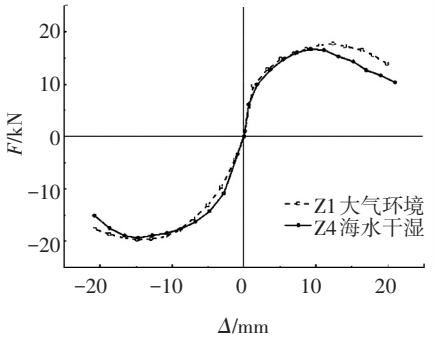
(b)反向加载

图 6　海水干湿柱与大气环境柱耗能比较

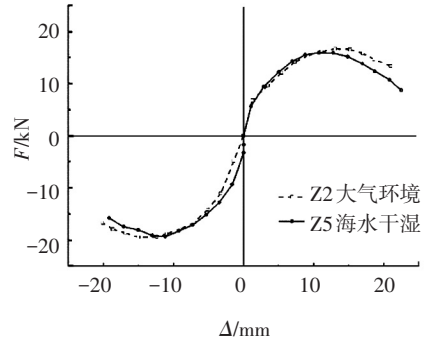
表 5　海水干湿柱与大气环境柱的耗能能力

持续荷载比例	编号	正向耗能/(kN·mm)	正向耗能之比	反向耗能/(kN·mm)	反向耗能之比
0	Z4	210.6	0.79	288.9	0.90
	Z1	268.0		322.3	
0.20	Z5	219.1	0.88	303.2	0.94
	Z2	248.1		321.1	
0.35	Z6	145.1	0.57	306.2	1.08
	Z3	255.5		282.3	

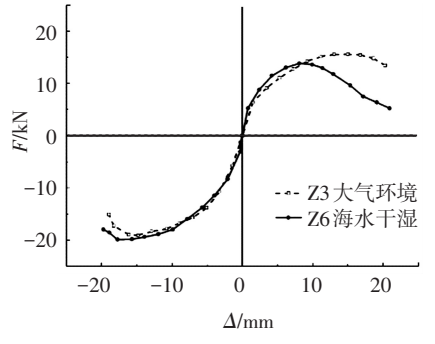
将相同持续荷载比例的海水干湿柱与大气环境柱的骨架曲线绘于图 7.由图 7 可见,持续荷载比例不大于 0.2 时,骨架曲线接近,越过峰值点后海水干湿循环柱 Z4 和 Z5 的承载力下降速度较大气环境柱 Z1 和 Z2 略快;持续荷载比例为 0.35 时,海水干湿柱 Z6 骨架曲线的不对称性较大气环境柱 Z3 更加显著.



(a)持续荷载比例0



(b)持续荷载比例0.2



(c)持续荷载比例0.35

图 7　海水干湿柱与大气环境柱的骨架曲线对比

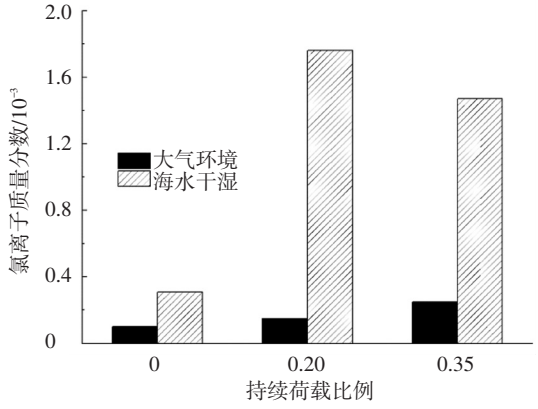
2.7　海水干湿柱与大气环境柱氯离子质量分数

低周反复加载试验结束后,在柱试件 Z1～Z6 承受持续偏压作用的受拉侧,距受拉表面 20 mm 和 40 mm 深处取样混凝土,测定氯离子质量分数的结果见表 6,环境影响比较见表 6 和图 8.

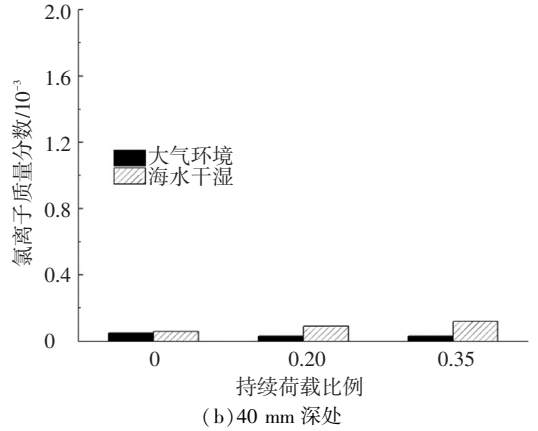
表 6 海水干湿柱与大气环境柱的氯离子质量分数

持续荷载比例	试件编号	氯离子质量分数/10^{-4}		海水干湿柱/大气环境柱	
		20 mm	40 mm	20 mm	40 mm
0	Z4	3.13	0.59	3.3	1.3
	Z1	0.96	0.46		
0.20	Z5	17.63	0.92	12.0	3.0
	Z2	1.47	0.31		
0.35	Z6	14.74	1.24	5.8	3.8
	Z3	2.55	0.33		

注：氯离子质量分数为占混凝土胶凝材料的质量比.



(a) 20 mm 深处



(b) 40 mm 深处

图 8 海水干湿柱与大气环境柱氯离子质量分数比较

图 8(a)给出了海水干湿柱和大气环境柱距受拉表面 20 mm 处混凝土的氯离子质量分数.可以看出,持续荷载比例相同时,海水干湿柱受拉混凝土的氯离子质量分数远高于大气环境柱.表 6 给出了两者的氯离子质量分数比值,即海水干湿柱的氯离子质量分数是大气环境柱的 3.3 倍以上.图 8(b)给出了 40 mm 处混凝土的氯离子质量分数比较.由图 8(b)可见,无持续荷载时海水干湿柱与大气环境柱的氯离子质量分数基本相同;随着持续荷载比例增加,海水干湿柱的氯离子质量分数增加,而大气环境柱的氯离子质量分数大体相同.由表 6 可见,无论在 20 mm 还是 40 mm 深处,持续偏压荷载耦合海水干湿循环作用后,海水干湿柱与大气环境柱氯离子质量分数的比值均在 3.0 倍以上;说明持续偏压荷载耦合海水干湿循环作用时的氯离子质量分数增幅大于持续荷载单独作用(即相同持续荷载比例的大气环境柱).

低周反复加载试验完成后,除去保护层,可以看到柱试件中钢筋的锈蚀状态.试件 Z1～Z4 的纵筋和箍筋均无锈蚀,仅海水干湿柱 Z5 和 Z6 的受拉一侧的箍筋出现锈蚀.如图 9 所示,试件 Z5 的箍筋出现轻微锈蚀,试件 Z6 的箍筋锈蚀程度较重.可见,持续受拉应力耦合海水干湿循环加速了钢筋的锈蚀.



(a) Z5(持续荷载比例 0.20)



(b) Z6(持续荷载比例 0.35)

图 9 不同持续荷载比例海水干湿柱受拉侧箍筋锈蚀状态

3 结 论

1)当柱顶水平荷载与持续偏压荷载产生的截面应力分布同向时,海水干湿柱和大气环境柱的屈服荷载、峰值荷载和延性均随持续荷载比例提高而降低;反之,变化规律不明显.

2)持续偏压荷载作用下,海水干湿柱和大气环境柱的滞回曲线均随持续荷载比例提高而呈现不对称性,其中,海水干湿柱的不对称性更加显著.

3)当柱顶水平荷载与持续偏压荷载产生的截面应力分布同向时,海水干湿柱的峰值荷载和耗能能力均小于相同持续荷载比例的大气环境柱;持续荷载比例为 0.35 时,海水干湿柱的峰值荷载和耗能能力分别比大气环境柱低 11%和 43%.

4)持续偏压荷载耦合海水干湿循环作用后,

距受拉表面 20 mm 和 40 mm 深处，受拉混凝土的氯离子质量分数是持续偏压荷载单独作用（即大气环境柱）的 3 倍以上.可见，持续偏压荷载耦合海水干湿循环作用加速了氯离子的渗透，进而会影响 RC 结构的使用寿命.

参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB/T 50476—2008 混凝土结构耐久性设计规范[S].北京：中国建筑工业出版社，2009.

[2] 金祖权，孙伟，张云升，等.混凝土在硫酸盐、氯盐溶液中的损伤过程[J].硅酸盐学报，2006，34(5)：631-635.

[3] THOMAS M.Chloride thresholds in marine concrete[J]. Cement and Concrete Research，1996，26(4)：513-519.

[4] CHEEWAKET T，JATURAPITAKKUL C，CHALEE W. Initial corrosion presented by chloride threshold penetration of concrete up to 10 year-results under marine site[J]. Construction and Building Materials，2012，37：693-698.

[5] 牛荻涛，陈新孝，王学名.锈蚀钢筋混凝土压弯构件抗震性能试验研究[J].建筑结构，2004，34(10)：58-64.

[6] 贡金鑫，仲伟秋，赵国藩.受腐蚀钢筋混凝土偏心受压构件低周反复性能的试验研究[J].建筑结构学报，2004，25(5)：92-98.

[7] 刘伯权，白绍良，赖明.等幅对称位移循环下钢筋混凝土柱的破坏[J].福州大学学报，1996，24(9)：33-42.

[8] LI C Q. Initiation of chloride-induced reinforcement corrosion in concrete structural member-experimentation [J].ACI Structure Journal，2001，98(4)：502-510.

[9] LI C Q. Initiation of chloride-Induced reinforcement corrosion in concrete structural members-prediction[J]. ACI Structural Journal，2002，99(2)：133-141.

[10] WIN P P，WATANABE M，MACHIDA A.Penetration profile of chloride ion in cracked reinforced concrete[J]. Cement and Concrete Research，2004，34 (7)：1073-1079.

[11] DIAO Bo，ZHANG Jian，YE Yinghua，et al.Effects of freeze-thaw cycles and seawater corrosion on the behavior of reinforced air-entrained concrete beams with persistent loads [J]. Journal of Cold Regions Engineering，ASCE，2013，27(1)：44-53.

[12] DIAO Bo，SUN Yang，YE Yinghua，et al. Effects of mixed corrosion，freeze-thaw cycles，and persistent loads on behavior of reinforced concrete beams [J]. Journal of Cold Regions Engineering，ASCE，2011，25 (1)：47-63.

[13] TAMMO K，THELANDERSSON S. Crack behavior near reinforcing bars in concrete structures[J].ACI Structural Journal，2009，106(3)：259-268.

[14] BERTO L，VITALIANI R，SAETTA A，et al.Seismic assessment of existing RC structures affected by degradation phenomena[J].Structural Safety，2009，31：284-297.

[15] 刁波，孙洋. 混合侵蚀与冻融交替作用下持载钢筋混凝土偏压构件试验[J].建筑结构学报(增刊 2)，2009，S2：292-297.

（编辑　赵丽莹）