

文章编号:1671-6833(2016)05-0006-06

# 干湿循环作用下盐分对桥墩混凝土耐久性影响实验研究

孙增智, 田俊壮, 杨 凯, 张 雷, 陈华鑫

(长安大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710061)

**摘 要:**以青海德香高速公路大桥桥墩混凝土为依托,对其沿线主要易溶盐含量进行分析,通过室内模拟实验,配制了 7 种腐蚀溶液,并设计 4 种配合比混凝土,通过外观形貌、质量损失率和相对动弹模量 3 方面研究干湿循环作用下,盐分对混凝土耐久性的影响.结果表明:干湿循环作用下,单一盐类如  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{MgSO}_4$ 、 $\text{NaCl}$  溶液对混凝土破坏形式和程度均不相同;在复合盐溶液中,复盐对混凝土的腐蚀损伤效应会发生叠加,而且溶液浓度越大,混凝土腐蚀破坏越严重;掺加水泥基自愈合材料、粉煤灰能够提高混凝土抗盐蚀破坏能力.

**关键词:**道路工程;混凝土;干湿循环;盐蚀;耐久性

**中图分类号:** TU528.33 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2016.05.002

## 0 引言

在实际工程中,混凝土结构物所处环境复杂多变,温湿变化剧烈,同时遭受周围腐蚀物质侵蚀,如桥梁下部结构的浪溅区和水流冲刷区等.经常处于盐蚀与干湿循环双重作用下的混凝土要比处于稳定潮湿环境中的混凝土破坏严重得多<sup>[1-5]</sup>.因此,对混凝土结构物在盐蚀与干湿循环耦合作用下的抗损伤能力研究很有必要.

国内外学者对水泥混凝土在干湿循环作用下抗盐腐蚀性进行了大量研究,取得了一些研究成果.宿晓萍等<sup>[4]</sup>对混凝土进行了干湿循环与复合盐蚀耦合下混凝土耐久性进行研究,得出加入引气剂和粉煤灰,能提高混凝土抗盐蚀-干湿循环破坏能力.KIM<sup>[6]</sup>、延永东<sup>[7]</sup>和唐先习等<sup>[8]</sup>对混凝土内部结构中氯离子扩散、运输机理及氯离子对混凝土的损伤进行了研究,得出了在干湿循环作用下氯离子在混凝土内部的扩散和在开裂混凝土中的运输模型.金祖权等<sup>[9]</sup>研究了干湿循环作用下不同类型的混凝土在单盐、复合盐中的损伤规律,提出了不同腐蚀因素下混凝土损伤方程,并对严酷盐湖环境下混凝土的选择提出了建议.李立辉等<sup>[10]</sup>研究了多因素耦合作用下混凝土的损伤过程,得出混凝土损伤与硫酸盐和氯盐的相对浓度有关.但是,国内对混凝土在干湿循环作用下损伤破

坏研究大都是单一因素研究,盐类型、复合盐溶液浓度等因素对混凝土的破坏形式、破坏过程及破坏机理进行系统研究较少.同时,对掺加水泥基自愈合材料的混凝土耐久性研究也较少.

笔者模拟青海德香公路大桥所处地区的土质和气候环境,采用  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{MgSO}_4$ 、 $\text{NaCl}$  和上述 3 种盐的复合盐溶液,分别从外观形貌、质量损失和相对动弹模量 3 方面研究干湿循环作用下,盐类型和复合盐溶液浓度对基准混凝土、粉煤灰混凝土、掺加水泥基自愈合材料水泥混凝土的耐久性影响.

## 1 试验方案

### 1.1 原材料

水泥:采用抗硫酸盐水泥.粉煤灰为Ⅱ级粉煤灰,表观密度  $2\,150\text{ kg/m}^3$ ,  $0.08\text{ mm}$  方孔筛筛余量为  $2.14\%$ ,主要化学成分见表 1.水泥基自愈合材料采用化学转化型材料(CCSM)<sup>[11]</sup>.细集料选用中砂,粗集料为  $5\sim 20\text{ mm}$  连续级配碎石,技术指标均满足规范要求.聚羧酸高效减水剂购自江苏苏博特新材料股份有限公司,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{MgSO}_4$ 、 $\text{NaCl}$  均购自天津市天力化学试剂有限公司.

### 1.2 盐侵蚀溶液配制

由青海省交通科学研究院试验室对德香高速公路沿线大桥基坑  $0.5\text{ m}$  深度的土质进行化学检

收稿日期:2016-02-05;修订日期:2016-06-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51202016)

通讯作者:孙增智(1967-),男,陕西商洛人,长安大学高级工程师,工学博士,主要从事道路材料研究,E-mail:zzsun@chd.edu.cn.

测分析,得知土质中含有  $\text{Na}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Cl}^-$ ,根据检测报告中盐渍土种类以及各离子浓度配制了盐浓度为 5.60% (盐质量计)的复合盐溶液(B 组),以此为基准盐溶液,根据沿线易溶盐含量多变的情况,配制了盐浓度分别为10.60% (C 组)和 15.09% (D 组)的复合盐溶液.为了对比复盐中每种单盐对混凝土的影响和破坏形式并与复盐溶液作对比,又分别配制了  $\text{NaCl}$ 、 $\text{MgSO}_4$  和  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  3 种单盐溶液,浓度分别为 4.08% (E 组)、4.58% (F 组)和 4.58% (G 组).此外,设置了水溶液(A 组)用作对比试验.具体配比如表 2.

表 1 粉煤灰的化学成分

Tab.1 Chemical compositionn of fly ash

种类	$\text{SiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	f-CaO
比例/%	51.8	3.64	1.08	4.51	28.78	6.09

表 3 混凝土配合比及力学性能

Tab.3 Mix proportion and properties of concretes

编号	混凝土类型	水泥/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	水/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	砂/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	石/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	减水剂/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	粉煤灰/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	自愈合材料/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	28 d 抗压 强度/MPa
K	基准	436	170	767	1 103	4.36	0	0	49.15
F1	掺加 10% FA	392.4	170	767	1 103	4.36	43.6	0	47.85
F2	掺加 20% FA	348.8	170	767	1 103	4.36	87.2	0	45.68
Z	掺加 1.5% 自愈	436	170	767	1 103	0	0	6.54	50.02

1.4 混凝土盐蚀-干湿循环方法的确定

考虑到德香公路沿线地面的最高温度,将干湿循环最高温度定为 60 ℃,为消除骤冷骤热导致的温度应力,先在室温下冷却 1 h,再放入溶液中,考虑到试验周期以 24 h 为 1 个循环,最终确定的干湿循环方法为 60 ℃烘箱烘 12 h,室温冷却1 h,再放入溶液中 11 h,共 24 h 为 1 个循环<sup>[12]</sup>.采取全浸泡方式模拟现场埋设混凝土的腐蚀状况.

2 分析与讨论

2.1 盐蚀-干湿循环作用下混凝土外观损伤分析

图 1 为基准混凝土在 B 组、C 组和 D 组溶液

中后期的外观,图 2 为 K 组、F1 组、F2 组和 Z 组混凝土在 C 组溶液中的后期外观.从图 1 可知,随着溶液浓度增加,混凝土试件腐蚀破坏越严重.当腐蚀循环次数增加,混凝土表面先产生许多微小裂缝,随后裂缝慢慢扩展连接,并且混凝土试件棱边及角最先开始破坏剥落.从图 2 可以看出,掺加粉煤灰与自愈合材料的混凝土较基准混凝土表现出了良好的耐久性能,并且粉煤灰掺量越多,混凝土损伤越小.

粉煤灰具有“活性效应、形态效应和微骨料效

表 2 盐溶液中盐用量及溶液浓度

Tab.2 The amounts and concentrations of salt in the solutions

侵蚀溶液	盐类型及用量/( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )			溶液浓度/%
	$\text{MgSO}_4$	$\text{NaCl}$	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	
A 组溶液	0	0	0	0
B 组溶液	24	21.06	14.2	5.60
C 组溶液	48	42.12	28.4	10.60
D 组溶液	72	63.18	42.6	15.09
E 组溶液	0	42.12	0	4.04
F 组溶液	48	0	0	4.58
G 组溶液	0	0	48	4.58

1.3 混凝土配合比

水泥混凝土配合比设计如表 3 所示,试件尺寸为 100 mm × 100 mm × 400 mm 的长方体试件.

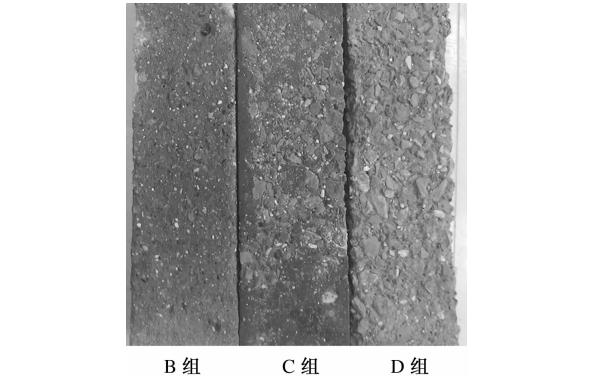


图 1 K 组混凝土在不同浓度复合盐溶液中后期外观状况

Fig.1 Late appearance of Group K concrete in salt-mixing solution with different concentrations

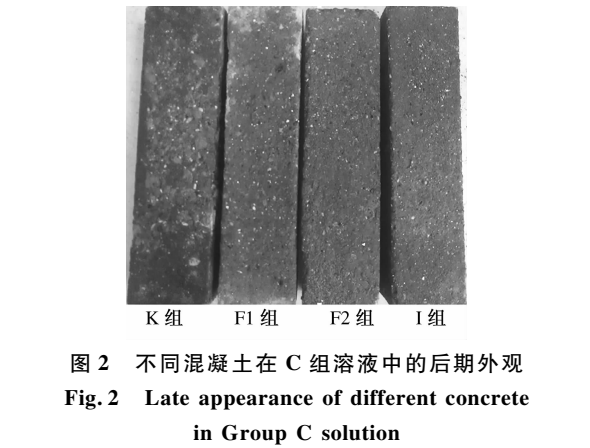


图 2 不同混凝土在 C 组溶液中的后期外观

Fig.2 Late appearance of different concrete in Group C solution

应”,混凝土矿物掺和料时能极大地改善混凝土的性能,同时粉煤灰可以使骨料与胶浆之间的过渡区得到改善,使混凝土的孔结构得以优化,进而能够提高混凝土抗腐蚀离子渗透能力.水泥基自愈合材料中的活性物质通过扩散进入混凝土中,与尚未水化的水泥反应生成晶体,能够堵塞混凝土中的微小裂缝和毛细孔通道,使得混凝土的抗渗性提高,防止盐渍土中的腐蚀离子向混凝土内部渗透,提高混凝土的耐久性<sup>[13]</sup>.由此可见,混凝土的破坏程度与盐溶液浓度和混凝土配合比有关.

2.2 盐蚀-干湿循环作用下混凝土质量损失规律

2.2.1 外掺料的影响

图 3 为混凝土质量损失率.如图 3 所示,在 A 组溶液中,混凝土试件的质量前期略有增加,在 30~40 个循环后逐渐减小.同一溶液中不同配比混凝土质量损失率曲线斜率各不相同,掺加自愈合材料的混凝土质量变化最为平缓,其次为粉煤灰混凝土,且粉煤灰掺量越大,质量损失率曲线的斜率越小,而基准混凝土的质量损失变化曲线斜率最大,可见掺加粉煤灰和水泥基自愈合材料都可以提高混凝土的抗盐蚀-干湿循环的能力.

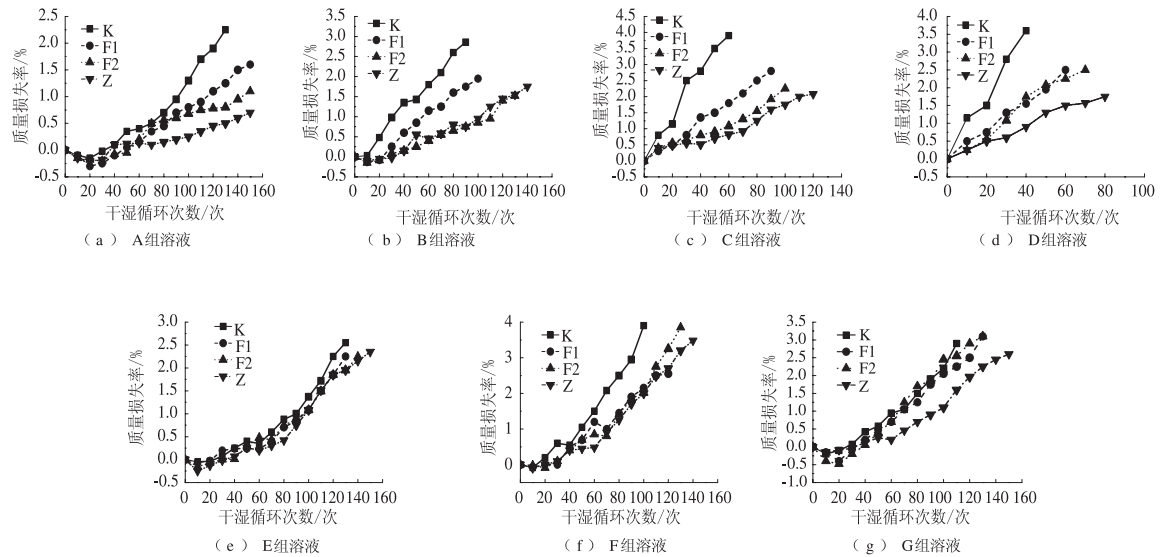


图 3 盐蚀-干湿循环后混凝土质量损失率变化规律

Fig. 3 Weight losses of concrete after salt corrosion-dry-wet cycle

2.2.2 复合盐溶液浓度的影响

图 4 为混凝土不同浓度复合盐中的质量损失率.如图 4 所示,在 A 组溶液中,随着干湿循环次数增加,混凝土质量损失率缓慢增加;在 B 组溶液中,混凝土质量损失率前期出现负增长,随着干湿循环次数增加,质量损失率逐渐增大;在 C 组和 D 组溶液中,混凝土质量增加段基本没有,在 10 次循环后,质量损失率快速增加.在不同浓度的 3 种复合盐溶液中,溶液浓度越大,质量损失率越大,说明在干湿循环作用下,随着复盐溶液浓度的提高,混凝土破坏越严重.

2.2.3 盐类型的影响

图 5 为基准混凝土的质量损失.如图 5 所示,基准混凝土在单盐溶液中的质量损失率曲线呈现先增加后下降的趋势.对 3 组单盐溶液中混凝土的质量损失率曲线增长速度和最大质量损失率进行

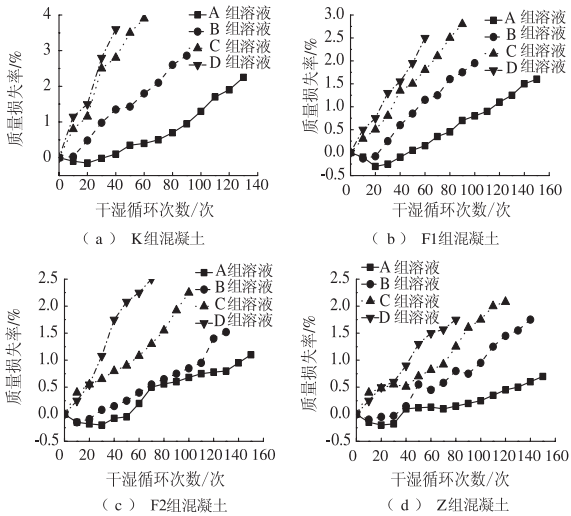


图 4 混凝土在不同浓度复合盐溶液质量损失率变化规律

Fig. 4 Weight losses of concretes in salt-mixing solution with different concentrations

对比分析,可知单盐溶液对基准混凝土质量损失的影响程度由小到大依次为:水 < NaCl < NaSO<sub>4</sub> < MgSO<sub>4</sub>. 这是由于不同盐类结晶膨胀率和结晶温度不同,硫酸盐结晶体膨胀率明显高于氯化钠,同时硫酸盐能够与水化产物反应生成石膏和钙矾石,进一步促进混凝土膨胀. 由于 MgSO<sub>4</sub> 中 Mg<sup>2+</sup> 的置换反应,生成无胶结物,使得 MgSO<sub>4</sub> 的质量损失大于 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> [14-16].

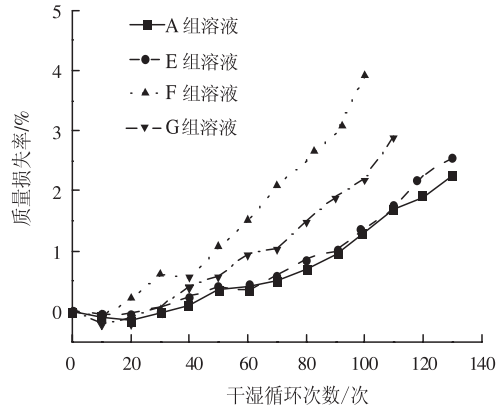


图 5 基准混凝土在水中及单盐溶液干湿循环后质量损失变化

Fig.5 Weight losses of reference concrete in water and different single salt solution after dry-wet cycle

2.3 盐蚀-干湿循环作用下混凝土动弹性模量变化规律

2.3.1 外掺料的影响

图 6 为混凝土相对动弹性模量. 如图 6 所示, 在相同溶液中,不同配比混凝土的最大干湿循环次数存在显著差异,在 A 溶液中,基准混凝土的最大循环次数为 130 次,而 F1、F2 和 Z 组在 150 次循环后相对动弹性模量分别为 61.7%、71% 和 75%,即最终混凝土都未破坏. 从图 6 中还可以看出,在 20 次循环后,K、F1、F2 和 Z 的相对动弹性模量都大于 100%,分别为 101.4%、103.7%、107.7% 和 104.5%,这说明在水中干湿循环前期促进了混凝土进一步水化,粉煤灰的二次水化对 F1 和 F2 组混凝土动弹性模量有很大提升.[17],水泥基自愈合材料也促进了混凝土的进一步密实. 在 B、C、D 3 种盐溶液中,F1、F2 和 Z 组混凝土的最大干湿循环次数都明显高于 K 组的最大干湿循环次数,并且 Z 组混凝土的干湿循环次数明显高于 F1 和 F2 组混凝土,具体表现为:Z 组 > F2 组 > F1 组 > K 组. 由此可知,相比基准混凝土而言,掺加粉煤灰对提升混凝土抗盐蚀-干湿循环破坏有很大提升,但提升幅度不如掺加水泥基自愈

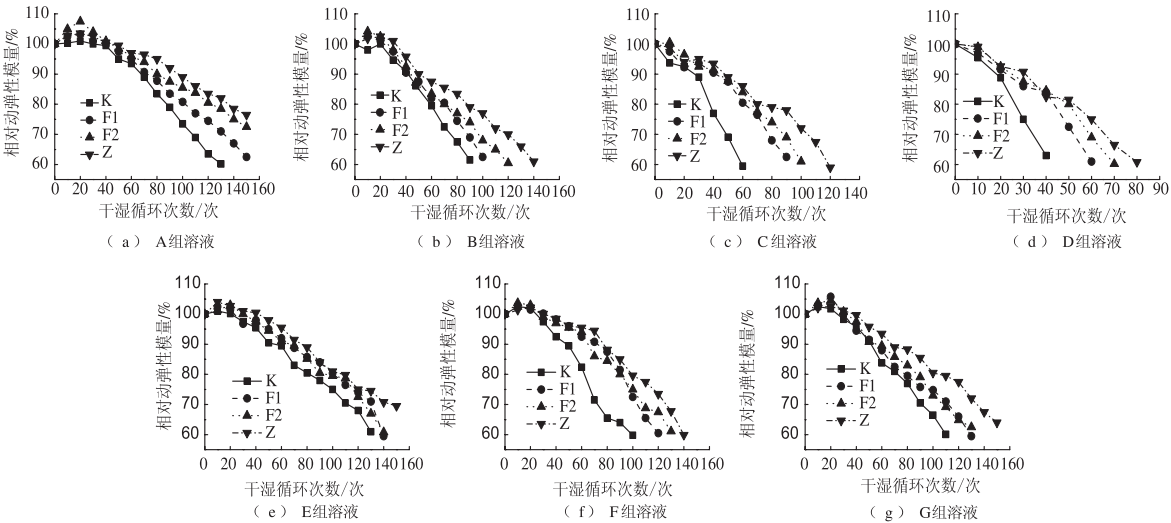


图 6 盐蚀-干湿循环后混凝土相对动弹性模量变化规律

Fig.6 Relative dynamic elasticity modulus of concretes after salt corrosion-dry-wet cycle

合材料,并且复合盐溶液浓度越高,粉煤灰和水泥基自愈合材料对混凝土抗盐蚀-干湿循环破坏的提升越大.

2.3.2 复合盐溶液浓度的影响

图 7 为相对动弹性模量与盐溶液浓度的关系. 如图 7 所示,在 A、B、C 和 D 组不同浓度复合盐溶液中,盐溶液浓度对混凝土相对动弹性模量影响很大. 在溶液 A 和 B 中,混凝土在腐蚀前期动弹性模量呈增长趋势. 在 C 和 D 组溶液中,混凝土没有增长而是直接下降. K 组混凝土在 B、C

和 D 溶液中最大循环次数分别比在 A 组溶液中减少 30.8%、53.8% 和 69.2%. F1 组混凝土在 C 和 D 溶液中的最大循环次数分别比在 B 组溶液中减少了 10% 和 40%,F2 组混凝土在 C 和 D 溶液中的最大循环次数分别比在 B 组溶液减少了 16.7% 和 41.7%,Z 组混凝土在 C 和 D 溶液中的最大循环次数分别比在 B 组溶液减少了 14.3% 和 42.9%. 由此可知,盐溶液浓度越大,相对动弹性模量曲线下降越陡,试件所能承受的干湿循环作用次数就越少,试件破坏越严重.

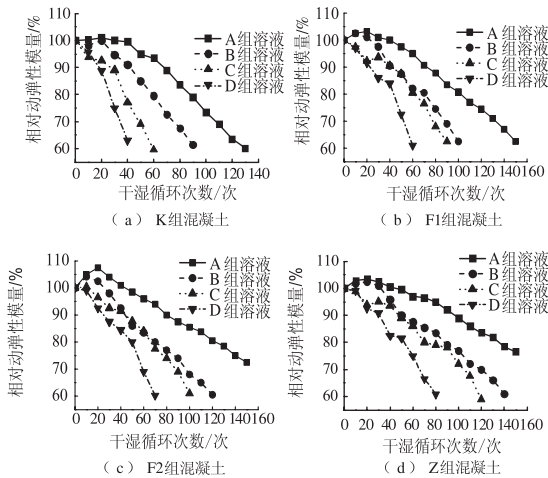


图 7 混凝土相对动弹弹性模量与盐溶液浓度关系  
Fig.7 Relationship chart of relative dynamic elasticity modulus of concretes and salt solution concentrations

2.3.3 盐类型的影响

图 8 为基准混凝土动弹模号变化. 如图 8 所示,K 组混凝土在 A 组、E 组、F 组和 G 组溶液中的相对动弹模量曲线呈先增加后下降的趋势,基本都在前 20 次相对动弹模量处于上升阶段,30 次以后相对动弹模量逐渐下降. 3 种单盐对混凝土相对动弹模量的影响大小分别为  $MgSO_4 > NaSO_4 > NaCl > 水$ . 结合外观变化可以看出,NaCl 溶液中混凝土剥落比水中严重, $MgSO_4$  溶液中的混凝土后期表面层软化,无粘结性脱落,并有微小的连贯性裂缝.  $NaSO_4$  溶液中混凝土质量前期增大,外观无明显变化,中期表面逐渐出现微裂缝,伴随边角脱落,后期严重时微裂缝相互连通、扩展和增多,个别试件甚至出现断裂现象,剥落现象,但是没有在  $MgSO_4$  溶液中严重.

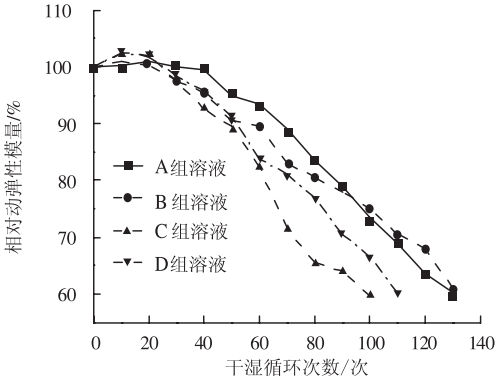


图 8 基准混凝土在水中及单盐溶液中相对动弹模量变化  
Fig.8 Relative dynamic elasticity modulus of reference concrete in water and three single salt solutions

3 结论

(1)经盐蚀-干湿循环作用后,混凝土质量先增加后减小,溶液浓度越高,后期质量损失越快,结构破坏越严重.

(2)经盐蚀-干湿循环作用后,混凝土相对动弹弹性模量呈先增长后减小,在高浓度复合盐溶液中,混凝土损伤较严重.

(3)在干湿循环条件下,盐沼泽地区复盐对混凝土有很强的腐蚀作用,不同盐类的腐蚀作用相互叠加,造成更剧烈的盐类腐蚀;化学腐蚀和盐类结晶叠加共同损伤混凝土,而析晶膨胀产生的结晶压力对混凝土损伤更大.

(4)在干湿循环条件下,单盐对混凝土的腐蚀程度: $NaCl < NaSO_4 < MgSO_4$ .

(5)水泥基自愈合材料和粉煤灰能够提高混凝土抗盐蚀-干湿循环破坏能力,在实际施工中应考虑掺加一定量的水泥基自愈合材料和适量粉煤灰.

参考文献:

[1] KOSMATK A S H, PANARESE W, KERKHOFF B, et al. 混凝土设计与控制[M]. 重庆:重庆大学出版社, 2005.

[2] JANG S Y, KIM B S, OH B H. Effect of crack width on chloride diffusion coefficients of concrete by steady-state migration tests[J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(1): 9-19.

[3] 范宏. 混凝土结构中的氯离子侵入与寿命预测[D]. 西安:西安建筑科技大学土木工程学院, 2009.

[4] 宿晓萍,王清. 复合盐与干湿循环双重因素作用下混凝土耐久性试验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 43(3): 851-857.

[5] SAVIJA B, PACHECO J, SCHLANGEN E. Lattice modeling of chloride diffusion in sound and cracked concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 42: 30-40.

[6] KIM Y Y, KIM J M, BANG J W, et al. Effect of cover depth, w/c ratio, and crack width on half cell potential in cracked concrete exposed to salt sprayed condition[J]. Construction and Building Materials, 2014, 54: 636-645.

[7] 延永东. 氯离子在损伤及开裂混凝土内的输运机理及作用效应[D]. 杭州:浙江大学建筑工程学院, 2011.

[8] 唐先习,尹月西,国伟. 混凝土开裂部位氯离子渗透试验研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(1): 66-69.

[9] 金祖权. 西部地区严酷环境下混凝土的耐久性与寿命预测[D]. 南京:东南大学材料科学与工程学院, 2006.

[10] 李立辉. 盐碱环境下混凝土冻融-干湿循环复合作用的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 2011.

[11] 王桂明. 化学转换型裂缝自修复材料及其对混凝土耐久性的影响研究[J]. 材料导报, 2006, 20(3): 155-155.

[12] 庞超明,徐剑,王进,等. 混凝土干湿过程及循环制度的研究[J]. 建筑材料学报, 2013(2): 315-320.

[13] WANG G M, YU J Y. Self healing action of permea-



ble crystalline coating on pores and cracks in cement based materials[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2005, 20(1): 89-97.

[14] 王海龙,董宜森,孙晓燕,等. 干湿交替环境下混凝土受硫酸盐侵蚀劣化机理[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(7): 1255-1261.

[15] 孙迎召,牛荻涛,姜磊,等. 干湿循环条件下混凝土硫酸盐侵蚀损伤分析[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(7): 1405-1409.

[16] 高润东,赵顺波,李庆斌,等. 干湿循环作用下混凝土硫酸盐侵蚀劣化机理试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(2): 48-54.

[17] 刘道维,刘本义,李向东,等. 硫酸盐和干湿循环耦合作用下混凝土性能研究[J]. 水利水运工程学报, 2015, 36(4): 69-74.

## Experimental Study of Effect of Salt on Durability of Bridge Pier Concrete Under Dry-wet Cycle

SUN Zengzhi, TIAN Junzhuang, YANG Kai,ZHANG Lei, CHEN Huaxin

(School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** In this paper, based on bridge pier concrete of Dexiang highway bridge in Qinghai province, the concentration and the main types of the dissolved salts along Dexiang highway were analyzed, and seven solutions of different concentration of salt were prepared and four kinds of concrete were designed by laboratory experiments. Surface morphologies, weight loss rate and relative dynamic elasticity modulus were used to study the effects of salt on concrete durability under dry-wet cycles. The results show that the corrosion damage forms and extents of concrete are different when different single salt solution is adopted such as  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{NaCl}$  under dry-wet cycles. The superposition effects of multiple salt corrosion of concrete damage can happen in the multi-salt solution, and the higher the concentration of solution, the more severe the concrete is damage under wet-dry cycles. CCSM concrete and fly ash concrete can improve the resistance to salt corrosion under wet-dry cycles.

**Keywords:** road engineering; concrete; dry-wet cycle; salt corrosion; durability

(上接第 5 页)

## Influence of Test Conditions on Dynamic Response of Asphalt Mixture and Its Master Curve

LI Peilong, RAO Wenyu, FENG Zhengang, LI Jiange

(Key Laboratory of Road Structure & Material Ministry of Transport, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** The dynamic modulus is one of the important characterization parameters of viscoelastic dynamic response of asphalt mixture. The Asphalt Mixture Performance Test (AMPT) was conducted on three gradation asphalt mixtures under the different test conditions. The change law of dynamic modulus of asphalt mixtures with the loading frequency and test temperature was analyzed. The attenuation models of dynamic modulus with temperature under different loading frequencies were gained. And the influence of loading frequency on the attenuation rate of dynamic modulus was analyzed. The master curves of visco-elastic dynamic response of asphalt mixture are obtained by discussing the shift factors of dynamic modulus. The results indicate that the dynamic modulus of asphalt mixtures goes up with an increase in loading frequency, while the increasing amplitude is smaller at a higher temperature. The dynamic modulus decreases with an increase in temperature in accordance with the attenuation index relationship, and the attenuation rate of dynamic modulus is bigger at a higher loading frequency. The attenuation rate of dynamic modulus with the temperature for AC-13 modified asphalt mixture is the smallest. The dynamic moduli of asphalt mixtures at different frequencies are close at a higher temperature (e.g. 55 °C). The dynamic modulus master curve and shift factor can reflect the effect of loading frequency and temperature on the visco-elastic properties of asphalt mixture.

**Key words:** asphalt mixture; Asphalt Mixture Performance Test (AMPT); visco-elastic dynamic response; dynamic modulus; master curve