

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.04.011

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(4): 69-74. (LIU Dao-wei, LIU Ben-yi, LI Xiang-dong, et al. Property analysis of concrete under coupling action of sulfate and wet-dry cycles[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(4): 69-74.)

# 硫酸盐和干湿循环耦合作用下混凝土性能研究

刘道维<sup>1</sup>, 刘本义<sup>2</sup>, 李向东<sup>1</sup>, 袁杰<sup>3</sup>

(1. 黑龙江省水利科学研究院, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 黑龙江省水利厅, 黑龙江 哈尔滨 150001; 3. 哈尔滨工业大学 交通运输工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150006)

**摘要:** 试验主要研究了粉煤灰与矿渣粉掺量以及新拌混凝土含气量对混凝土在硫酸盐和干湿循环耦合作用下质量损失、抗压强度、相对动弹性模量等性能变化的影响。研究结果表明: 经过3个干湿循环周期后, 掺有矿物掺合料的混凝土试件强度增长大于基准组混凝土; 从第4个干湿循环周期开始, 掺矿物掺合料的混凝土试件的质量损失均小于基准组混凝土, 且试件质量损失大大减少; 掺加矿渣后, 混凝土试件经过6次干湿循环周期, 相对动弹性模量仍保持在60%以上; 粉煤灰和矿粉复掺对混凝土的抗硫酸盐干湿循环破坏能力有所提高, 当粉煤灰与矿粉比例为3:1时, 采用复掺对改善干湿循环过程中混凝土试件的抗压强度的效果最好。并且, 混凝土中适当引气也可提高其抗硫酸盐干湿循环性能。

**关键词:** 硫酸盐; 干湿循环; 耦合作用; 矿物掺合料; 混凝土耐久性; 动弹性模量

**中图分类号:** TU528

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2015)04-0069-06

混凝土材料的耐久性问题日益突显, 特别是当混凝土在氯盐、硫酸盐等腐蚀性盐环境中时, 其性能劣化更为明显。硫酸盐侵蚀是混凝土结构化学腐蚀中最为广泛和普遍的形式, 被认为是引起混凝土材料失效破坏的四大主要因素之一<sup>[1-5]</sup>。通常情况下, 腐蚀性盐进入混凝土内部需要随着水分一同迁移, 所以当混凝土处于水位变动区等长期受干湿循环作用的环境中时, 盐的腐蚀作用和干湿循环作用将发生耦合, 这种耦合作用会使混凝土材料的劣化速度和破坏机理发生变化。国内外学者对于硫酸盐与干湿循环耦合作用下混凝土性能的变化已经进行了一定的研究<sup>[6-9]</sup>, 但相关研究成果间存在一些差异。

本文针对硫酸盐和干湿循环共同作用条件, 对混凝土质量损失、抗压强度和相对动弹性模量变化等性能进行研究, 以期对处于硫酸盐和干湿循环条件下的混凝土结构的设计、施工和服役期性能监控提供参考。

## 1 试验用原材料及试验方案

### 1.1 原材料

本次试验中水泥采用亚泰集团哈尔滨水泥有限公司生产的P·O 42.5水泥, 细集料采用哈尔滨五常中砂, 级配满足GB/T 14684—2011《建设用砂》中Ⅱ区中砂要求, 其他主要性能指标为: 细度模数2.9, 含泥量1.10%, 松散堆积密度1560 kg/m<sup>3</sup>, 表观密度2650 kg/m<sup>3</sup>。粗集料选用碎石级配为5~16 mm的连续级配碎石, 其含泥量0.55%, 泥块含量0.08%, 针片状含量6.7%, 表观密度2700 kg/m<sup>3</sup>。混凝土外加剂选用UNF-5萘系减水剂, 其减水率为25.4%, 7 d抗压强度比为145%, 28 d的为140%, 泌水率比为14.5%, 含气量

收稿日期: 2014-09-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50778055)

作者简介: 刘道维(1968—), 男, 黑龙江庆安人, 高级工程师, 硕士, 主要从事水利工程施工、水工材料研究工作。

E-mail: liudaowei68@163.com

1.8%;黑龙江省翔波新材料新技术应用开发有限公司 SB-G 引气剂,其减水率为 9.2%,7 d 抗压强度比为 98.1%,28 d 的为 96.4%,泌水率比为 53%,含气量 4.3%。试验用水为哈尔滨本地自来水。水泥、粉煤灰和矿渣粉的性能指标见表 1。

表 1 几种原材料的性能参数

Tab. 1 Property parameters for some materials

水泥	品种	标准稠度用水量/%	凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
			初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
	P·O 42.5	28	180	211	4.9	7.6	25.6	48.9
II 级粉煤灰	细度/%	需水量比/%	烧失量/%	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	SO <sub>3</sub> /%	含水率/%		
	10.5	96	1.95	2.5	1.33	0.5		
S105 矿渣粉	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	比表面积/ (m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	28 d 活性 指数/%	流动度/%	含水量/%	SO <sub>3</sub> 含量/%	Cl <sup>-</sup> 含量/%	烧失量/%
	2.89	370	125	90	0.34	2.0	0.01	1.7

## 1.2 试验配合比

试验中混凝土配合比见表 2,其中 A0 为基准组,不掺任何掺合料;AF 为掺粉煤灰混凝土;AC 为掺磨细矿渣粉混凝土;AFC 为粉煤灰和矿渣复掺的混凝土;AFQ 为粉煤灰和引气剂复掺的混凝土;ACQ 为矿渣和引气剂复掺的混凝土。

表 2 试验配合比

Tab. 2 Mix proportion of concrete

编号	水泥/ (kg·m <sup>-3</sup> )	粉煤灰/ (kg·m <sup>-3</sup> )	矿粉/ (kg·m <sup>-3</sup> )	砂/ (kg·m <sup>-3</sup> )	石子/ (kg·m <sup>-3</sup> )	用水量/ (kg·m <sup>-3</sup> )	引气剂/%	减水剂/%
A0	380	0	0	677	1 103	163	0	0.8
AF-2	304	76	0	677	1 103	163	0	0.8
AC-2	304	0	76	677	1 103	163	0	0.8
AFC-1	228	38	114	677	1 103	163	0	0.8
AFC-2	228	76	76	677	1 103	163	0	0.8
AFC-3	228	114	38	677	1 103	163	0	0.8
AFQ-1	304	76	0	677	1 103	163	0.12	0.8
AFQ-2	304	76	0	677	1 103	163	0.15	0.8
ACQ-1	304	0	76	677	1 103	163	0.12	0.8

## 1.3 试验方案

表 2 混凝土配合比成型尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 与 100 mm×100 mm×400 mm 的混凝土试件,成型后 24 h 脱模,并将试件放入标准养护室养护 28 d,养护结束后进行干湿循环试验。

干湿循环试验采用完全浸入方式进行,即将试件全部浸泡在 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中。试验时首先将试件放入 16.7% 的 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中浸泡 6 d,然后取出晾干,再放入 50℃ 的烘箱内烘干,即干湿循环流程为:烘干 6 h→冷却 1 h→浸泡 17 h,24 h 为一次干湿循环,每 7 d 为一个测试周期,每个周期结束后测定试件在烘干状态下的抗压强度、质量损失和相对动弹性模量,并以此作为评定混凝土性能变化的指标。当混凝土的质量损失达到 5% 或相对动弹性模量降低至 60% 以下时,认为混凝土试件破坏,停止试验。其中抗压强度用抗压强度比表示,质量损失率、抗压强度比和相对动弹性模量的计算分别见式(1)~(3)。

$$\Delta m_m = \frac{m_0 - m_n}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$r=f_n/f_0 \quad (2)$$

$$R_n=t_0^2/t_n^2 \times 100\% \quad (3)$$

式中: $\Delta m_m$ 为经过  $n$  次干湿循环周期后的质量损失率,以 3 个试件的平均值计算(%); $m_0$ 为干湿循环试验前的试件质量(g); $m_n$ 为  $n$  次干湿循环后的试件质量(g); $f_n$ 为经过  $n$  次干湿循环周期后试件的强度; $f_0$ 为试件初始强度; $R_n$ 为经过  $n$  次循环周期后试件的相对动弹性模量(%),精确至 0.1%; $t_0$ 为预吸水后第一次干湿循环前,超声波传播时间初始值( $\mu\text{s}$ ); $t_n$ 为经过  $n$  次干湿循环后,超声波的传播时间( $\mu\text{s}$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 单掺矿物掺合料的影响

单掺矿物掺合料时,混凝土质量、抗压强度比和相对动弹性模量随干湿循环周期的变化情况见图 1。由图 1(a)可知:从第 4 个干湿循环周期开始,掺加了矿物掺合料的混凝土试件的质量损失均小于基准组混凝土,且掺矿粉的试件质量损失减少更为明显。这表明,本试验中掺入矿粉可以更有效地改善混凝土在硫酸盐干湿循环条件下的性能。同时,在干湿循环过程中,3 组混凝土试件的质量均呈现先增大后减少的变化趋势,这是因为在干湿循环刚开始时,硫酸根离子扩散进入毛细孔,与氢氧化钙反应生成硫酸钙晶体,当硫酸根离子溶度较高时,直接反应生成钙矾石,此反应使固体体积增加 55%。钙矾石在使试件膨胀的同时吸收水分,填充试件内部的孔隙,使试件质量增大。经过 3 个干湿循环周期后,试件的质量开始降低,这是因为混凝土内部的孔隙体积有限,当孔隙被填满以后,新生成的钙矾石膨胀产生内应力导致混凝土破坏。

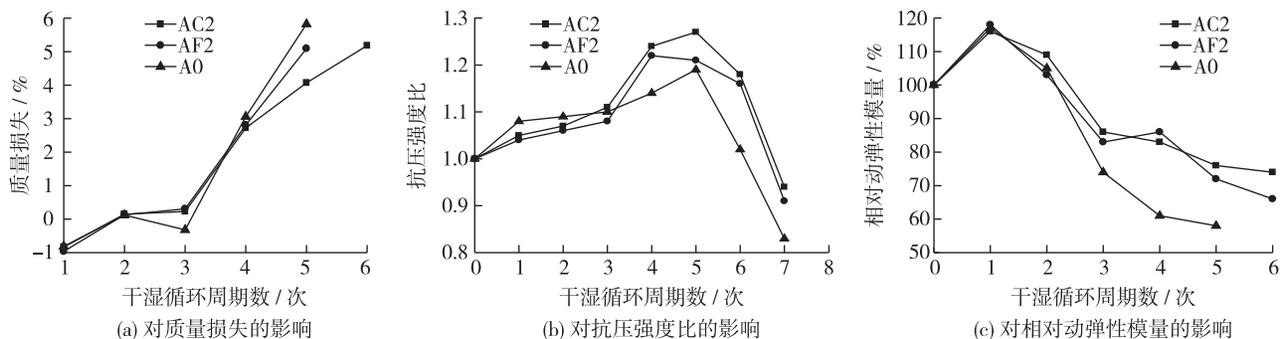


图 1 单掺矿物掺合料对质量损失、抗压强度比和相对动弹性模量的影响

Fig. 1 Influences of single mineral admixtures on loss of quality, compressive strength ratio and relative dynamic elastic modulus

由图 1(b)可知,3 组混凝土试件强度随干湿循环呈先增后降的趋势,且在干湿循环初期 3 组试件强度增加幅度相当,当经过 3 个干湿循环周期后,掺有矿物掺合料的混凝土试件强度增加大于基准组。这是因为干湿循环早期的强度增加是由于硫酸根离子进入与水化产物反应填充了试件内部孔隙引起的,而掺加了矿物掺合料后,矿物掺合料的“二次水化”作用在干湿循环中期发挥作用,图中表现为掺有矿物掺合料的试件强度的增加大于基准组。随着干湿循环继续进行,试件强度会因内部膨胀应力的作用而下降。

由图 1(c)可知,3 组试件的相对动弹性模量均呈前期增长、后期下降的规律。第 1 个周期结束时各组混凝土试件的相对动弹性模量均达最大值,随后均开始下降,且基准组混凝土试件在经过 4 个干湿循环周期后,相对动弹性模量已降至初始的 60% 以下;掺加矿物掺合料后,混凝土试件经过 6 次干湿循环周期后,相对动弹性模量仍保持在 60% 以上,表明掺加矿物掺合料后混凝土抵抗硫酸盐干湿循环破坏的能力得到提高。

### 2.2 复掺矿物掺合料的影响

复掺矿物掺合料时,混凝土质量、抗压强度比和相对动弹性模量随干湿循环周期的变化情况见图 2。

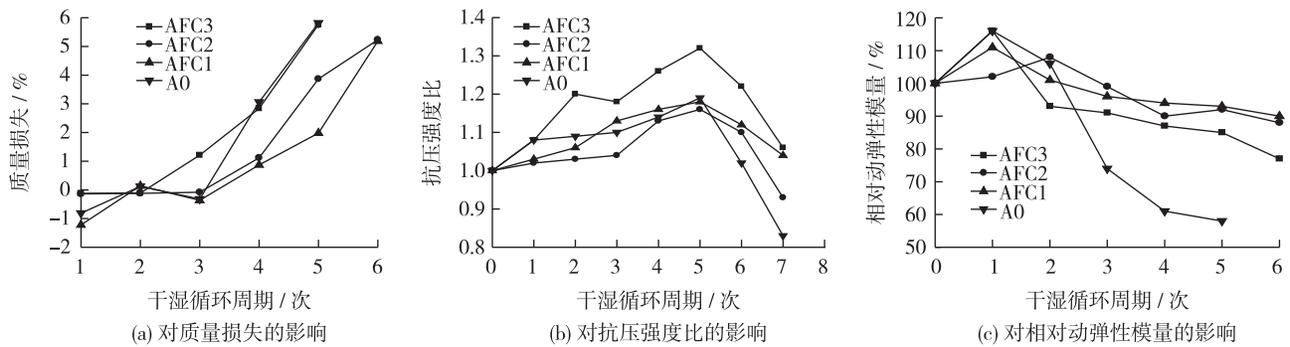


图2 复掺矿物掺合料对质量损失、抗压强度比和相对动弹性模量的影响

Fig. 2 Influences of composite mineral admixtures on loss of quality, compressive strength ratio and relative dynamic elastic modulus

由图 2(a)可知,复掺时混凝土试件的质量变化规律与单掺时基本一致,即先增后减。复掺时,当矿粉比例高于粉煤灰时,混凝土表现出更好的抗干湿循环作用的能力。由图 2(b)可知,在干湿循环初期,AFC1 和 AFC2 组的强度变化与基准组相当,而 AFC3 组混凝土试件强度保持较好。随着干湿循环的进行,各组混凝土试件的强度不同程度地下降,总体而言,当掺入粉煤灰与矿粉比例为 3:1 时,采用复掺时对干湿循环过程中混凝土试件抗压强度的改善效果最好。究其原因是因为粉煤灰和矿渣以这一比例复合使用时,两者颗粒级配更合理,从而使矿物掺合料填充孔隙、提高混凝土内部密实度的作用发挥得更为充分。

由图 2(c)可知,干湿循环初期由于硫酸盐与氢氧化钙反应生成的晶体对混凝土内部孔隙具有填充作用,故相对动弹性模量有一定的增长;随着干湿循环的进行,反应生成物晶体在混凝土内部产生膨胀应力,混凝土内部结构受到破坏,相对动弹性模量下降。当经过 5 个干湿循环周期后,基准组混凝土的相对动弹性模量已低于初始值的 60%,复掺了矿物掺合料的 3 组混凝土试件经过 6 次干湿循环周期后,相对动弹性模量仍在初始值的 75% 以上,且高于单掺时 6 次干湿循环后试件的相对动弹性模量,试验表明矿物掺合料复掺的效果要优于单掺。

### 2.3 含气量的影响

混凝土质量、抗压强度比和相对动弹性模量随含气量变化见图 3。

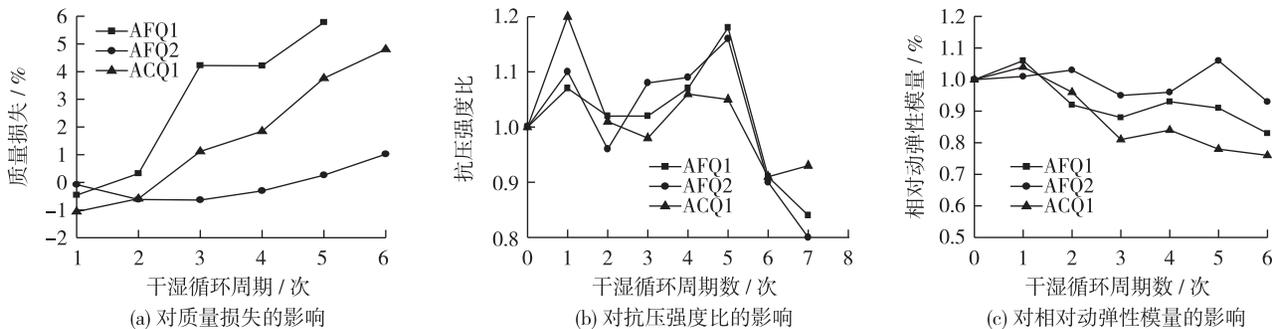


图3 含气量对质量损失、抗压强度比和相对动弹性模量的影响

Fig. 3 Influences of air content on loss of quality, compressive strength ratio and relative dynamic elastic modulus

由图 3(a)可知,对于掺粉煤灰的混凝土试件而言,含气量越高,其抗硫酸盐干湿循环破坏的能力就越强。6%含气量的 AFQ2 组的质量损失小于 3%含气量的 AFQ1 组,这是由于气泡能隔断毛细孔,提供缓冲空间;随着含气量增大,干湿循环时试件内部孔隙为钙矾石结晶膨胀提供充足空间,从而提高试件的抗硫酸盐干湿循环性能。当含气量同为 3%时,掺矿粉的混凝土试件质量损失较小,这是因为含气量相同时,矿物掺合料的影响起主要作用,此规律与矿物掺合料单掺时相同。由图 3(b)可知,引气混凝土的抗压强度比随干

湿循环次数的增加基本呈先增后减的趋势,与单掺及复掺矿物掺合料时抗压强度的变化规律基本一致。

可见,含气量高时,混凝土试件的相对动弹性模量降低较慢,其原因主要在于气泡对内部膨胀应力的缓解作用。相同含气量条件下,掺矿粉的混凝土试件抗硫酸盐干湿循环性能优于掺粉煤灰的混凝土试件。

### 3 结 语

(1)单掺粉煤灰或矿粉的混凝土在硫酸盐干湿循环条件下的质量损失、抗压强度损失和相对动弹性模量损失均小于基准组混凝土,表明掺入矿物掺合料有利于改善混凝土的抗硫酸盐干湿循环性能,且在本试验中,掺矿粉的改善效果更为明显。

(2)粉煤灰和矿粉复掺有利于提高混凝土抗硫酸盐干湿循环破坏的能力。对于质量损失和相对动弹性模量的损失而言,掺粉煤灰比例较高,改善效果较好;而增加矿粉掺入比例则对保持混凝土抗压强度更为有利。

(3)在本课题中,适当的引气可以提高混凝土的抗硫酸盐干湿循环破坏的能力,且含气量为6%时的改善效果优于3%含气量。

### 参 考 文 献:

- [1] MEHTA P K. Durability-critical issues for the future[J]. Concrete International, 1997, 19(7): 27-33.
- [2] 刘斯凤. 荷载-复合离子-干湿交替下生态混凝土的损伤过程与寿命[D]. 南京: 东南大学, 2004. (LIU Si-feng. Study on the damage process and service life of ecological concrete under load composite ions-dry and wet cycles[D]. Nanjing: Southeast University, 2004. (in Chinese))
- [3] 万旭荣, 左晓宝. 硫酸盐侵蚀下混凝土扩散反应过程的数值模拟[J]. 工业建筑, 2010, 40(增1): 843-850. (WAN Xu-rong, ZUO Xiao-bao. Numerical simulation of concrete diffusion reaction subjected to sulfate environment [J]. Industrial Construction, 2010, 40(Suppl1): 843-850. (in Chinese))
- [4] 吴庆, 汪俊华, 吴公勋. 混凝土硫酸盐侵蚀双因素影响及干湿循环与连续浸泡差异分析[J]. 四川建筑科学研究, 2010, 36(6): 192-194. (WU Qing, WANG Jun-hua, WU Gong-xun. The double factors of concrete sulfate erosion and the variance analysis of dry-wet circulation and continuous soak[J]. Sichuan Building Science, 2010, 36(6): 192-194. (in Chinese))
- [5] 彭高鹏, 杜雷, 周茗如. 干湿循环下氯盐-硫酸盐共同作用时混凝土耐久性研究初探[J]. 甘肃冶金, 2011, 33(6): 125-127. (PENG Gao-peng, DU Lei, ZHOU Ming-ru. The preliminary investigation on concrete durability in dry-wet circulation cycles under chloride and sulfate environment[J]. Gansu Metallurgy, 2011, 33(6): 125-127. (in Chinese))
- [6] 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. (GAO Run-dong, ZHAO Shun-bo, LI Qing-bin, et al. Experimental study of the deterioration mechanism of concrete under sulfate attack in wet-dry cycles[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(2): 48-54. (in Chinese))
- [7] 金伟良, 赵羽习. 混凝土耐久性[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (JIN Wei-liang, ZHAO Yu-xi. Concrete durability[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [8] 申春妮, 杨德斌, 方祥位, 等. 混凝土硫酸盐侵蚀试验方法研究[J]. 四川建筑科学研究, 2005, 31(2): 103-106. (SHEN Chun-ni, YANG De-bin, FANG Xiang-wei, et al. The research on testing methods of sulfate attack of concrete[J]. Sichuan Building Science, 2005, 31(2): 103-106. (in Chinese))
- [9] WEE T H, SURYAVANSHI A K, WONG S F, et al. Sulfate resistance of concrete containing mineral admixtures[J]. ACI Materials Journal, 2000, 97(5): 536-549.

## Property analysis of concrete under coupling action of sulfate and wet-dry cycles

LIU Dao-wei<sup>1</sup>, LIU Ben-yi<sup>2</sup>, LI Xiang-dong<sup>1</sup>, YUAN Jie<sup>3</sup>

(1. Heilongjiang Hydraulic Research Institute, Harbin 150080, China; 2. Water Resources Department of Heilongjiang Province, Harbin 150001, China; 3. Harbin Institute of Technology, School of Transportation Science and Engineering, Harbin 150006, China)

**Abstract:** Under the coupling action of wetting-drying cycles and sulfate, analysis studies of the effects of mineral admixture types, dosages and air content on mass loss, compressive strength and relative dynamic elastic modulus of concrete have been carried out. From the fourth wet-dry cycle, the quality loss of concrete specimens adding the mineral admixtures is less than that of benchmark concrete, and the reduction quality loss of the specimen mixed with ore powder is much greater; through the third dry-wet cycle, the increase in the compressive strength of the concrete specimens adding the mineral admixtures is greater than the benchmark concrete, and the reduction quality loss of the specimen mixed with ore powder is more remarkable; after the sixth wet-dry cycle, the relative dynamic elastic modulus of the concrete specimen adding mineral admixtures still remains over 60%; and mixing fly ash and mineral powder into the concrete specimens can effectively increase the resistance of the concrete specimens to damage caused by sulfate and wetting-drying cycles, thus improving concrete durability. With the composite dosage (the mix proportion of fly ash and mineral powder is 3:1) adding into the concrete specimens, the improved effects of the compressive strength of concrete are much more significant. At last, air entraining into the concrete specimens can improve the resistance of concrete to sulfate in the wet-dry cycles.

**Key words:** sulfate; wet-dry cycles; coupling action; mineral admixture; concrete durability; dynamic elastic modulus