

# 相对法评价干湿循环—硫酸盐侵蚀下的混凝土内部损伤

李维红<sup>1</sup> 包亦望<sup>2</sup> 王恽涵<sup>1</sup> 白云<sup>3</sup>

(1. 大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 116622; 2. 中国建筑材料科学研究总院, 北京 管庄 100024;  
3. 伦敦大学学院 土木环境与地质工程系, 英国 伦敦 WC1E 6BT)

**摘要:** 相对法是为确定复合材料内部各梯度层的弹性模量和强度而命名的一种简单的方法。本文将相对法理论应用于混凝土材料, 通过测量由表及里磨削掉每薄层前后样品的动弹性模量, 运用相对法理论公式计算得出混凝土内部不同深度损伤层的动弹性模量, 进而研究在干湿循环—硫酸盐耦合作用下混凝土内部损伤规律。研究结果表明: 随着侵蚀深度增加, 混凝土内部动弹性模量由表及里逐层递减, 证明混凝土将发生由内向外的逐层破坏; 随着干湿循环周期的延长, 混凝土内各梯度损伤层处的动弹性模量均呈现先降低后增大再降低的趋势, 由动弹性模量最低值处所对应的干湿循环次数, 即可得到腐蚀到该循环次数时对应的侵蚀层深度; 掺矿物掺和料的混凝土试件内部各层动弹性模量值均小于基准混凝土试件的对应值, 证明矿物掺和料的掺入加剧了干湿循环与硫酸盐侵蚀耦合作用下混凝土的损伤速率。本研究为解决常规实验方法无法测试的混凝土材料内部力学性能评价问题提供一种新思路, 对其内部力学性能及耐久性评价具有一定理论价值和实际意义。

**关键词:** 相对法; 混凝土; 硫酸盐侵蚀; 干湿循环; 损伤层; 动弹性模量

## Evaluation of Internal Damage Law of Concrete under Coupling Action of Sulfate and Dry-Wet Cycles by the Relative Method

LI Weihong<sup>1</sup>, BAO Yiwang<sup>2</sup>, WANG Yihan<sup>1</sup>, BAI Yun<sup>3</sup>

(1. Civil and Archit. Eng. College, Dalian University, Dalian 116622, China; 2. China building materials academy, Beijing 100024, China; 3. Department of Civil, Environmental & Geomatic Engineering, University College London, London WC1E 6BT, the United Kingdom)

**Abstract:** Relative method is a simple way to determine the internal elastic modulus and strength of composite material layer by layer. This method is applied in the field of concrete materials in this article, on the basis of measuring the dynamic elastic modulus of each sample before and after milled from the outside to the inside, dynamic elastic modulus of different gradient damaged layer inside concrete samples are calculated by using the theoretical equation of relative method. Furthermore, the internal damage laws of concrete under coupling action of sulfate and dry-wet cycles are studied. The results show that the internal dynamic elastic modulus of concrete outside to the inside layer decreases with the increase of erosion depth, the concrete will take place the inside-out destruction step by step; With the extension of the cycle of wet and dry, the dynamic elastic modulus variation curves of each damaged layer inside the concrete specimens are starting with a higher starting point at first, then decreased to some extent due to experience the sulfate attack, and began to pick up after experienced a certain number of dry-wet cycles. The depth of erosion layer can be obtained corresponding the lowest value of wet and dry cycle numbers; The dynamic modulus of internal concrete with mineral admixtures is less than that of benchmark concrete, which indicates that the incorporation of mineral admixtures add the damage rate of concrete under the action coupling of dry-wet cycles and sulfate erosion. In this study, the relative method is used to measure the internal dynamic elastic modulus and strength of concrete, which provides a new way to evaluate the internal mechanical properties and durability of concrete under coupling action of sulfate and dry-wet cycles, and has a certain theoretical and practical significance for practical engineering.

基金项目: 国家自然科学基金资助(51472227) 辽宁省教育厅科学技术研究项目资助(L2013466)

作者简介: 李维红(1971—), 女, 辽宁大连人, 博士, 副教授。E-mail: liweihong714@163.com

**Keywords:** Relative method; Concrete; Sulfate attack; Dry-wet cycles; Damage layer; Dynamic elastic modulus

## 0 引言

实际工程中,混凝土结构经常会受到环境中各种侵蚀因素的影响,其中硫酸盐侵蚀是混凝土结构化学腐蚀中最广泛、最普遍的形式,被认为是引起混凝土材料破坏与失效的主要因素之一<sup>[1-5]</sup>,在其侵蚀劣化过程中,会涉及到侵蚀离子在混凝土材料孔隙中的传输、侵蚀离子与水泥水化产物的化学反应或侵蚀物质的结晶析出、膨胀性侵蚀产物对混凝土结构造成破坏(具体表现为膨胀、开裂、剥落及强度损失)三个相互联系的过程,是一个十分复杂的化学物理力学变化过程。大连地处北方沿海地区,除了海水中富含的可溶性盐如硫酸盐对混凝土产生化学腐蚀外,处于浪溅区和水位变动区的混凝土又受到干湿交替的加速破坏作用。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经受干湿循环作用的环境中时,干湿循环作用和盐的腐蚀作用将发生耦合,这种耦合作用会使混凝土材料的破坏机理和劣化速度发生变化。

国内外科研人员对处于干湿循环与硫酸盐耦合作用下混凝土材料性能的变化已经进行了相关研究<sup>[6-9]</sup>,在所有这些研究中,对混凝土力学性能损伤的评价多集中在对一些宏观指标(如强度变化、整体动弹性模量或相对动弹性模量变化、质量变化、膨胀量等)的探讨,这些宏观指标能够间接的在一定程度上检验其在经受侵蚀作用后遭受破坏的程度。而混凝土内部力学性能指标,如腐蚀后内部不同深度损伤层的动弹性模量和强度等属性的测定,因损伤层与基体间难以剥离为单质材料进行测试,国内外目前还没有可行的技术。研究表明:材料的内部结构对其动弹性模量有很大影响,而对于混凝土来说,动弹性模量能够在一定程度上反应其耐久性。如果能找到一种方法,通过用已知传统评价方法获得的宏观测试指标来获得混凝土内部损伤层的动弹性模量性能指标,将有助于我们更直接更准确的评价混凝土内部损伤规律。

而相对法测试技术是包亦望教授提出的一种专门为了解决脆性材料性能评价中无法测试或者难以测试项目的一种间接测试方法<sup>[10]</sup>。本文将相对法理论应用于混凝土材料,从混凝土内部不同深度损伤层动弹性模量这一评价指标角度出发,分析研究混凝土在硫酸盐—干湿循环耦合作用下的损伤规律。

## 1 相对法基本原理

相对法的基本原理是采用间接的方法或者说是迂回的方法来获得难以测试或根本无法测试的材料参数,可达到事半功倍的效果。这种方法基本原理描述如下:如果参数 X 是难以测试的或不可能直接测试的,但参数 A 和 B 是已知的或容易测试的,通过建立参数 X 与 A 和 B 之间的理论解析关系,便可以很方便地通过 A 和 B 确定参数 X。

这是一种解决难题的的有效方法,核心是要建立几个参数之间的本构关系:  $X=f(A,B)$ 。图 1 为相对法基本原理的示意图。

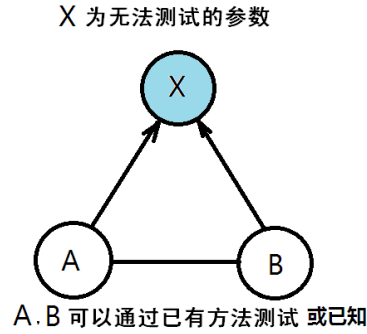


图 1 相对法基本原理的示意图

Fig.1 Schematic illustration of the relative method

对于一个无法测试的材料参数，只要确定跟它相关的性能参数，即可算出该所求参数。腐蚀后混凝土内部不同深度损伤层的动弹性模量就属于这种难测的材料参数。

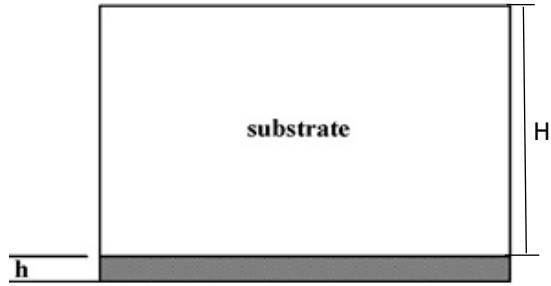


图 2 单面镀膜的梁截面示意图

Fig.2 Schematic illustration of cross-sections of beam specimens with single-face coating

包亦望教授等人<sup>[10]</sup>提出的相对法测试材料参数的基本思路是采用矩形截面的梁试样为分析模型（图 2），通过等效刚度的概念，比较弯曲载荷作用下梁试样在镀膜前和镀膜后弯曲刚度的变化，利用弹性变形理论计算出单层膜的弹性模量  $E_c$  与基体弹性模量  $E_s$  和含涂层复合样品弹性模量  $E_q$  之间的关系：

$$E_c = f(E_s, E_q, h/H)$$

其中  $h$  是涂层厚度， $H$  为基体厚度。对于下表面含涂层的梁试样，通过考虑等效弯曲刚度得到关系式：

$$E_c = \frac{-A + \sqrt{A^2 + C}}{2R^3} \cdot E_s \quad (1)$$

式中  $A = 4R^2 + 6R + 4 - F$ ， $C = 4R^2(F - 1)$ ， $R = h/H$ ， $F = (1 + R)^3 \cdot E_q / E_s$

虽然涂层的弹性模量无法直接测试，但是只要分别测出含涂层样品与不含涂层样品的弹性模量，运用公式（1）就可以算出涂层材料的弹性模量。作为一个简单的验算，假设基体的弹性模量与复合材料弹性模量相等，即  $E_s = E_q$ ，则  $F = (1 + R)^3$ ，这样，无论厚度比  $R$  等

于多少（通常小于 0.5），带入公式计算后均会得到  $E_c=E_s=E_q$  相等，验证了上述理论的正确性。

我们将这种思路用于评价混凝土腐蚀后内部不同梯度层的力学性能。先把最表层看作是单层涂层，测试试样弹性模量  $E_q$ ，然后研磨掉最表层（图 3），剩余的试样看作复合基体并测试其弹性模量  $E_s$ ，运用公式 1 计算得到被磨掉最表层腐蚀层的弹性模量  $E_c$ ；重复以上步骤，逐层确定各梯度损伤层的弹性模量。样品横截面和操作流程参见示意图 4。



图 3 混凝土试块逐层磨削

Fig.3 Concrete block grinding layer by layer

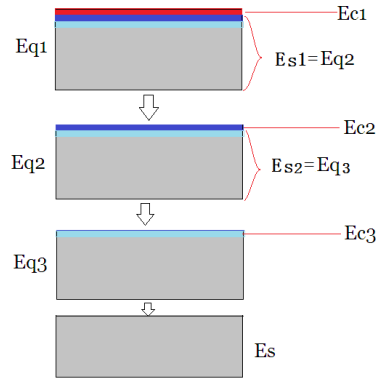


图 4 腐蚀后混凝土内部弹性模量逐层测试

Fig.4 Composite coating Modulus test layer by layer

## 2 试验用原材料及实验方案

### 2.1 原材料

#### (1) 水泥

选用大连水泥集团有限公司生产的 P.O.42.5，主要性能指标见表 1。

表 1 42.5R 普通硅酸盐水泥

Tab.1 42.5R Ordinary Portland Cement

项目 Project		国家标准 GB175—1999	本厂实际 Actual level
抗折强度(MPa)	3 天 (3Days)	$\geq 4.0$	4.0—4.8
Break strength	28 天 (28Days)	$\geq 6.5$	6.5—7.5
抗压强度(Mpa)	3 天 (3Days)	$\geq 21.0$	23.0—26.0
Compression strength	28 天 (28Days)	$\geq 42.5$	49.0—55.0
凝结时间(min)	初凝时间 Coagulating start time	$\geq 45$	90—150
Coagulating time	终凝时间 Coagulating end time	$\leq 600$	180—240
	细度 (0.080 方孔筛)(%)	$\leq 10.0$	$\leq 6.0$
	烧失量(Loss on ignition)(%)	$\leq 5.0$	2.5—3.5
	比面积 ( $m^2/kg$ )	$\geq 300$	350-390
	安定性 (沸煮法)	合格	合格
适用范围	国防、海港、铁路、机场、桥梁、水工、高层建筑等混凝土工程。		

(2) 细集料

选用大连普兰店河砂，中砂，性能指标见表 2。

表 2 砂的性能指标  
Tab.2 Performance index of sand

表观密度 (kg/m <sup>3</sup> )	含泥量 (%)	细度模数	有机物含量
2700	1.8	2.6	合格

(3) 粗集料

选用大连市前关碎石，粒径 5-25mm，连续级配，性能指标见表 3。

表 3 碎石性能指标  
Tab.3 Performance index of crushed aggregate

堆积密度 (kg/m <sup>3</sup> )	表观密度 (kg/m <sup>3</sup> )	含泥量 (%)	针片状含量 (%)
1598	2719	0.5	2.83

(4) 粉煤灰

选用大连华能电厂生产的 II 级粉煤灰。

(5) 外加剂

选用大连建科北方化学有限公司生产的 pk-3 高效减水剂。

(6) 水

本试验研究中拌合用水采用自来水；配制硫酸钠溶液的溶剂水来自大连霞光水处理技术服务站提供的蒸馏水。

(7) 化学试剂

沈阳华东试剂厂生产的质量分数不少于 99.0% 的 AR 级分析纯试剂，符合国标 GB/T6009-2003 的要求，分子式为 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>，相对分子质量为 142.04。

## 2.2 试验配合比

为了更贴近实际应用，本试验选取大连亚细亚混凝土有限公司预拌商品混凝土常用的一组配合比，其中 P0 为基准组，不掺任何掺和料；P1 为矿粉和粉煤灰复掺的混凝土，具体配合比见表 4。

表 4 混凝土配合比  
Tab.4 Mix proportions of concrete

编号	水泥 kg/m <sup>3</sup>	水 kg/m <sup>3</sup>	砂 kg/m <sup>3</sup>	石 kg/m <sup>3</sup>	矿粉 kg/m <sup>3</sup>	粉煤灰 kg/m <sup>3</sup>
P1	270	141	929	800	55	80
P0	405	141	929	800	-	-

## 2.3 试验方案

按照表 4 混凝土配合比成型尺寸为 70mm×70mm×280mm 的混凝土试件，数量和编号如表 5 中所示。其中，P1 配合比和基准配合比各 6 组，每组 3 块。

表 5 试样数量及编号

Tab. 5 The sample number and serial number

配合比 批次	组数	数量	试块编号
P1	1	3	P1-1 (2、3)
	1	3	P1-15-1 (2、3)
	1	3	P1-45-1 (2、3)
	1	3	P1-75-1 (2、3)
	1	3	P1-90-1 (2、3)
	1	3	P1-105-1 (2、3)
P0	1	3	P0-1 (2、3)
	1	3	P0-15-1 (2、3)
	1	3	P0-45-1 (2、3)
	1	3	P0-75-1 (2、3)
	1	3	P0-90-1 (2、3)
	1	3	P0-105-1 (2、3)

注：编号 P1/P0 为配合比分类；中间数字 15、45、75、90、105 为干湿循环周期数编号；最后的数字 1-3 为每组三个试块数编号。

试件成型后 24h 脱模（图 5），并放入标准养护室养护 28d（图 6），养护结束后所有试件均五面涂环氧树脂防腐漆（留一个侧面不涂层），进行干湿循环试验。



图 5 混凝土试块（70×70×280 mm）静置 24h

Fig.5 Concrete block (70×70×280 mm) stand for 24 h

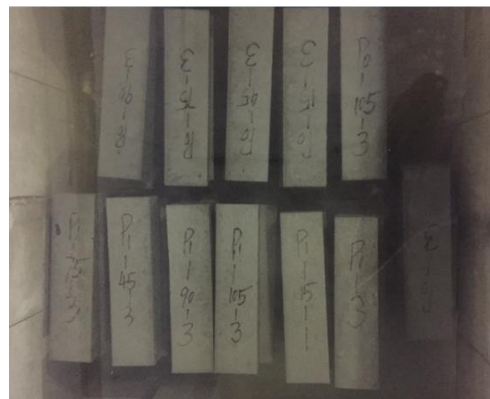


图 6 标准养护 28d 混凝土试块

Fig.6 Concrete block standard curing 28 d

干湿循环试验参照《标准普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》<sup>[11]</sup>。在 28d 养

护龄期的前 2d, 将需进行干湿循环的试件从养护室取出。将表面水分擦干, 放入烘箱中, 在  $(80\pm 5)^\circ\text{C}$  温度下烘干 48h。烘干后干燥环境中冷却至室温。冷却后放入硫酸盐干湿循环试验机 (图 7、8), 侵蚀溶液选择硫酸钠 ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) 溶液, 设计浓度为 5%。设置干湿循环时间、温度参数: ①温度: 水箱温度  $15^\circ\text{C}$ ; 箱内温度  $25^\circ\text{C}$ , 高温烘干阶段  $80^\circ\text{C}$ ; ②时间: 进水 0.11h, 浸泡 15.5h, 出水 0.12h, 风干烘干 6h, 冷却 2h。即每个干湿循环的总时间为  $(24\pm 2)$  h。干湿循环流程为: 浸泡、烘干、冷却, 每 15 个干湿循环为一个测试周期。每个周期结束后进行动弹性模量的测量。



图 7 干湿循环试验机

Fig.7 dry-wet cycle test machine



图 8 试验机内试块摆放

Fig.8 tester blocks is put in

## 2.4 试验检测指标

本研究中混凝土试样的动弹性模量采用共振法<sup>[11]</sup>测定 (图 9)。通过共振法测得材料的基频, 运用公式 (2) 就可以推知材料的动弹性模量。用此方法分别测试逐层研磨前后 (磨削掉一层, 测一层, 层厚 2mm, 总共磨削 4 层, 如图 4 所示) 混凝土的动弹性模量, 再带入公式 (1) 便可计算得到由表及里各腐蚀层的动弹性模量。这样一来, 过去无法测试的混凝土内部损伤层的动弹性模量变成了可以用简单的共振法进行测试。

$$E_d = 13.244 \times 10^{-4} \times WL^3 f^2 / a^4 \quad (2)$$

式中:  $E_d$ —混凝土动弹性模量 (MPa);

$a$ —正方形截面试件的边长 (mm);

$L$ —试件的长度 (mm);

$W$ —试件的质量 (kg), 精确到 0.01kg;

$f$ —试件横向振动时的基频振动频率 (Hz)



图9 动弹性模量测试仪

Fig. 9 Dynamic elastic modulus tester

### 3. 结果与讨论

#### 3.1 混凝土内部不同深度损伤层动弹性模量变化规律研究

图 10—14 所示为两种不同配合比的混凝土处在各腐蚀循环周期不同梯度损伤层的动弹性模量随深度的变化曲线。可以看出，两种不同配比混凝土试样在硫酸盐及干湿循环双重腐蚀作用下，由表及里不同损伤层的动弹性模量变化呈逐层递减趋势。这是由于试件的动弹性模量和混凝土的密实性相关。混凝土表层硫酸根离子浓度较大，由于氢氧化钙与硫酸盐反应生成的石膏、钙矾石等晶体最初对孔隙具有密实填充作用，故表层的混凝土动弹性模量较大。随着侵蚀深度的增加，硫酸根含量明显降低，此时，干湿循环对混凝土起主要破坏作用。在本试验的湿状态下，混凝土在经受硫酸盐溶液连续浸泡后，硫酸根离子会沿着孔隙通道进入混凝土内部，同时与水泥水化产物发生化学反应，生成石膏、钙矾石等膨胀性侵蚀产物，随着侵蚀产物的不断累积，其膨胀性作用会在孔隙壁上导致微裂纹产生；在干状态下，孔隙溶液中的水分由表及里不断蒸发，当达到过饱和状态时，盐晶体迅速生长并产生结晶压力。Flatt 等人的研究结果<sup>[12]</sup>证实，由于水分蒸发引起的结晶压力足以使混凝土开裂，当混凝土再次经历湿状态时，盐晶体又将发生溶解，但由其引发的微裂纹已达到塑性破坏状态，难以恢复。在干湿循环的反复作用下，更多的微裂纹产生并使侵蚀边界不断前移，为硫酸根离子向混凝土内部的传输提供了更多的传输通道<sup>[6]</sup>。因此，干湿循环作用改变了混凝土内部孔结构，加速了硫酸盐侵蚀破坏。由此可见，在干湿循环及硫酸盐双重破坏作用下，混凝土将发生由内向外的逐层破坏。该结论与 Jie Yuan<sup>[13]</sup>等所做研究结论一致。



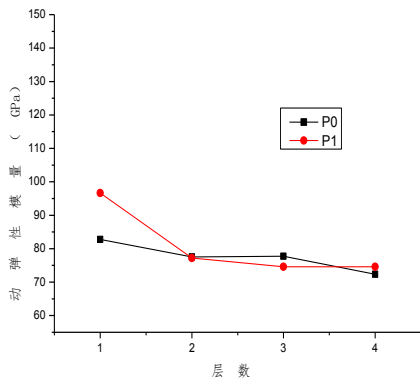


图 10 15 次循环动弹性模量随深度变化曲线  
Fig.10. 15 cycle curves of dynamic elastic modulus with depth

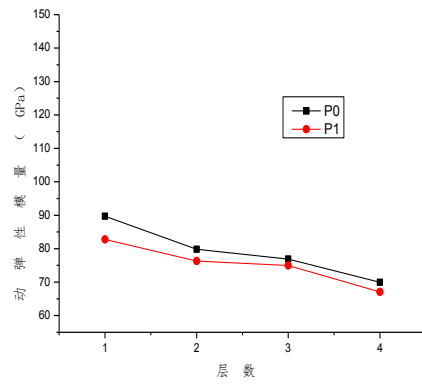


图 11 45 次循环动弹性模量随深度变化曲线  
Fig.11. 45 cycle curves of dynamic elastic modulus with depth

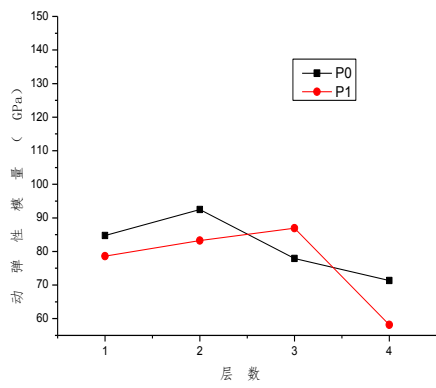


图 12 75 次循环动弹性模量随深度变化曲线  
Fig.12. 75 cycle curves of dynamic elastic modulus with depth

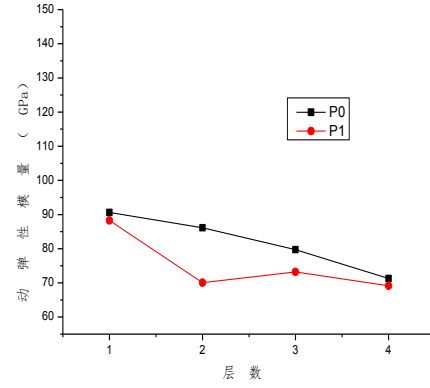


图 13 90 次循环动弹性模量随深度变化曲线  
Fig.13. 90 cycle curves of dynamic elastic modulus with depth

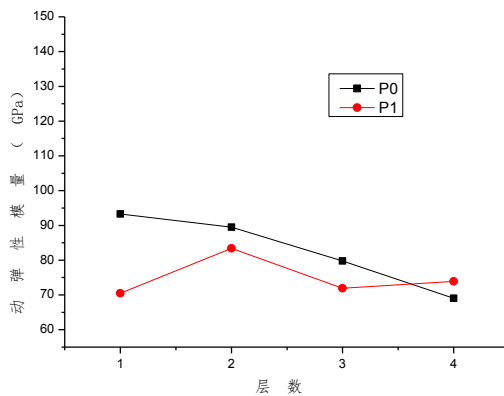


图 14 105 次循环动弹性模量随深度变化曲线  
Fig.14. 105 cycle curves of dynamic elastic modulus with depth

图 15 所示为在同样养护条件养护烘干以后，存放于室内条件相同时间，而不进行硫酸

盐侵蚀及干湿循环作用的试样由表及里各层的动弹性模量值。从图 15 中可以看出，与上述遭受硫酸盐干湿循环耦合作用侵蚀的试件内部动弹性模量变化趋势相反，在自然存放状态下未经硫酸盐侵蚀及干湿循环作用的试样，经过一定时间后，动弹性模量值由表及里呈逐渐递增趋势。出现这种现象的原因是由于在养护期，试件经过高温烘干后于室温条件养护，试样表面失水较严重，导致表层水泥的水化反应明显减慢，而此时在混凝土内部的水化反应继续进行，内部混凝土强度持续增长。因此试件由外向内各层的动弹性模量值逐渐增大。这再一次证明，在干湿循环及硫酸盐耦合破坏作用下，混凝土将由内向外发生逐层破坏。

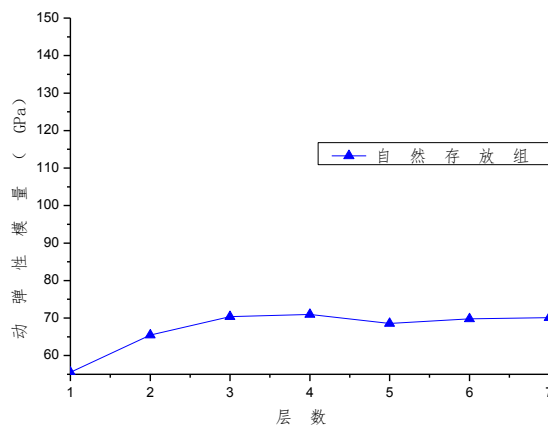


图 15 未经历干湿循环试样动弹性模量随深度变化曲线

Fig.15. The dynamic elastic modulus curves with depth of natural storage group sample

### 3.2 掺合料对混凝土抗硫酸盐侵蚀性能影响的研究

依据表 6 所得实验结果，可以得出掺混合料和未掺混合料的混凝土试样内部不同深度损伤层的动弹性模量随循环周期的变化曲线，如图 16—图 19 所示。

表 6 不同深度层混凝土内部动弹性模量

Tab.6 Dynamic elastic modulus of each depth layer in concrete sample

循环次数	损伤层	动弹性模量 (GPa)		循环次数	损伤层	动弹性模量 (GPa)	
		P0	P1			P0	P1
15	1	82.79	96.67	45	1	89.72	82.76
	2	77.56	77.24		2	79.84	76.30
	3	77.73	74.59		3	76.91	74.99
	4	72.36	74.62		4	69.94	67.06
75	1	90.63	88.26	90	1	85.57	85.25
	2	86.16	70.04		2	92.62	79.87
	3	79.73	73.21		3	70.58	81.79
	4	71.28	69.16		4	71.41	67.82
循环次数	损伤层	动弹性模量 (GPa)					

	P0	P1
105	1	70.50
	2	83.39
	3	71.94
	4	73.93

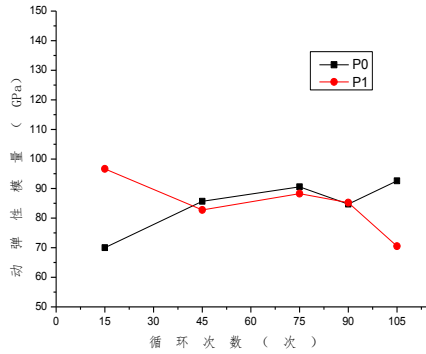


图 16 动弹性模量随循环次数的变化曲线(第 1 层)  
Fig.16 The change of dynamic elastic modulus curve with cyclic number (layer-1)

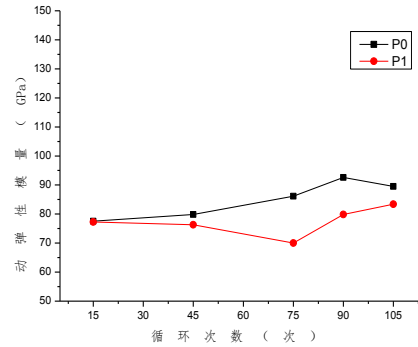


图 17 动弹性模量随循环次数的变化曲线(第 2 层)  
Fig.17 The change of dynamic elastic modulus curve with cyclic number (layer-2)

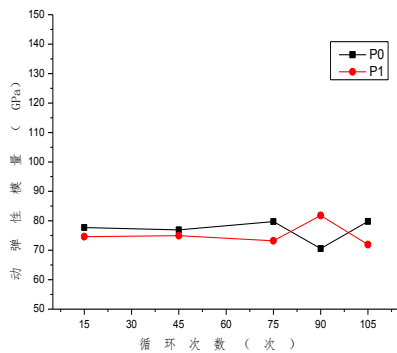


图 18 动弹性模量随深度变化曲线(第 3 层)  
Fig.18 The change of dynamic elastic modulus curve with cyclic number (layer-3)

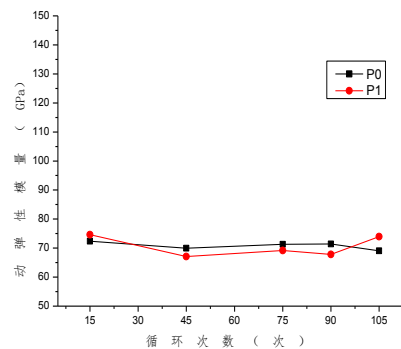


图 19 动弹性模量随深度变化曲线(第 4 层)  
Fig.19 The change of dynamic elastic modulus curve with cyclic number (layer-4)

从图 16—图 19 所示曲线可以看出,随着循环次数的增加,1—4 损伤层中每一层混凝土的动弹性模量,均显示为 P0 (不含矿物掺合料) 混凝土的动弹性模量值大于 P1 (含矿物掺合料) 混凝土的动弹性模量值,且在深度为 2-4mm 的第二层,两种混凝土的动弹性模量值在整个循环测试过程中都相差较大,而其他层相差较小。

一些研究<sup>[4]</sup>认为,矿物掺合料因具有火山灰活性特点,其高度分散的活性氧化物能与水泥水化产物中的氢氧化钙发生反应,生成水化铝酸钙和水化硅酸钙,填充于水泥石的孔隙之间;另外,因活性矿物掺合料取代了一部分水泥,从而稀释了体系中含铝组分的含量,因此显著提高了混凝土的抗硫酸盐侵蚀能力。然而从上述试验研究结果中我们却发现,硫酸盐侵蚀与干湿循环的耦合作用下,掺入矿物掺合料不但没有改善混凝土的抗侵蚀性能,反而加剧了其力学性能的损伤。Ganjian E<sup>[5]</sup>曾通过分析比较遭受硫酸盐侵蚀—干湿循环后硅酸盐水

泥石与掺矿物掺合料水泥石的 EDXA 图(如图 20), 图中掺矿物掺合料水泥石中的 C-S-H 凝胶含量相对于硅酸盐水泥石是极少的, 所以认为干湿交替环境影响了矿物掺合料火山灰活性的发挥, 进而没有足够的水化产物填充于混凝土内部孔隙, 从而降低了混凝土结构的密实性。这将使硫酸盐溶液更容易渗透扩散至混凝土内部, 生成石膏、钙矾石等膨胀性物质(图 20 中显示, 掺矿物掺合料的水泥石内部存在含量极高的有害的钙矾石), 再加上矿物掺合料取代部分水泥所造成的强度损失, 导致掺矿物掺合料混凝土的性能迅速劣化。本试验所得研究结论同 Sahmaran M.<sup>[16]</sup>的研究结果一致。

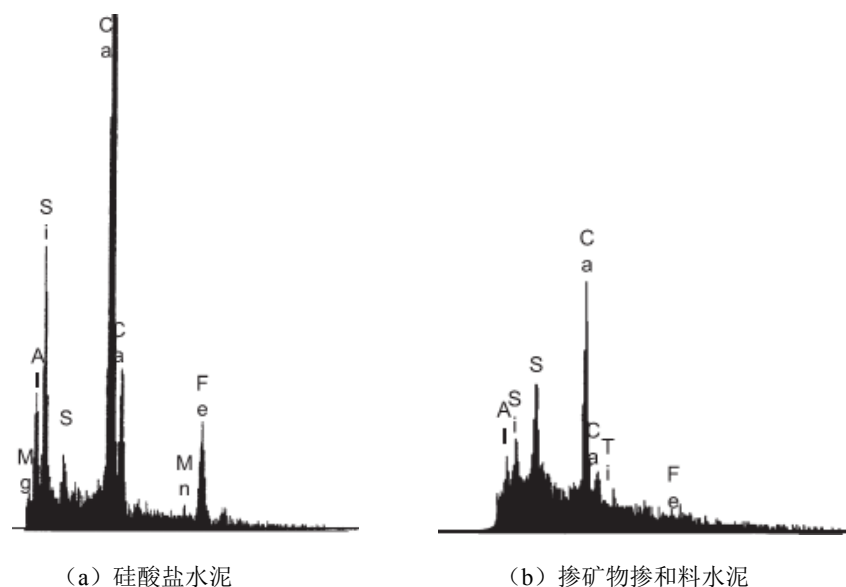


图 20 侵蚀后水泥石的 EDXA

Fig.20. EDXA of cement stone after the erosion

另外, 从图 16—图 19 中所示曲线也可以看到, 在硫酸盐干湿循环过程中, 两种配合比的试块, 内部不同侵蚀层处的动弹性模量变化曲线部分点呈现波动, 这种波动可能与试件成型条件未控制好、混凝土材料本身的离散性、试件的水泥水化程度存在差异以及存在人为测试误差等原因有关。

### 3.3 循环周期对侵蚀深度的影响研究

含矿物掺合料的混凝土试样, 每个深度损伤层的动弹性模量随循环周期的变化曲线, 如图 21 所示。竖向对比四条曲线, 可以看出混凝土试样内部由表及里的动弹性模量值逐渐减小, 这也再次证实了本文 3.1 所得结论。与此同时, 可以看出混凝土试样在经历第 15 次干湿循环时, 第一层和其他几层的动弹性模量值相差较大, 这可以理解为在 15 次干湿循环时, 硫酸盐溶液仅侵蚀到试样第一层, 还未到达第二层; 横向对比四条曲线, 可以看出曲线走势为: 第一层也就是试样的最外 2mm 损伤层, 试样表面最先接触硫酸盐溶液, 在 45 次循环结束时降到最低点, 在 75 次干湿循环后达到最高点, 此后持续下降; 第二层和第三层均为在 75 次循环时达到最低点, 而后在 75-90 次的循环过程中, 动弹性模量值均呈逐渐增大趋势, 随后急剧降低; 而第四层在 90 次循环后方达到最低点, 在后续循环破坏过程中动弹性模量值呈上升趋势。

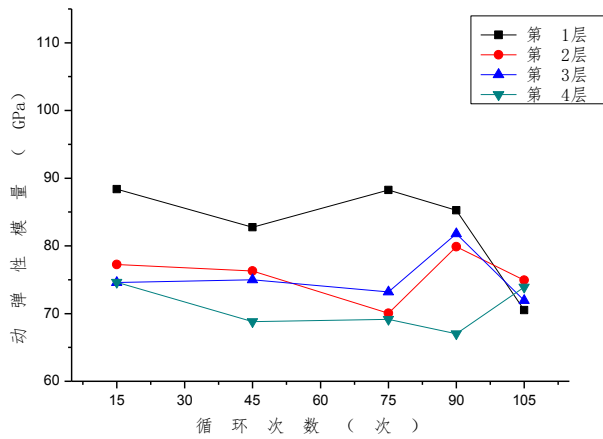


图 21 每一层动弹性模量随循环次数变化曲线 (P1)

Fig.21 The dynamic elastic modulus curves of each layer with cycle number (P1)

综合以上试验结果,可以看出,在刚开始经历干湿循环后一定时间内,各层混凝土的动弹性模量值均达到其最低点,可见由于干湿循环初期对混凝土的破坏作用,导致试件的基准频率明显下降。随着时间的延长,干湿循环的逐渐深入进行,试件内部掺合料逐渐参与反应<sup>[17]</sup>,使其抵制恶劣环境的性能日渐明显地发挥出来,所以各层混凝土试件的动弹性模量值开始回升。各层的曲线走势非常接近,动弹性模量值的变化几乎均为先从较高起点经历循环过程中的硫侵蚀而有一定程度的下降,而后又在经历一定循环次数后开始回升。因此,我们从图 21 中各曲线对应的最低点即可得到混凝土试样处于不同干湿循环次数时所对应的损伤层深度。在本试验条件下,试样经过 45 次干湿循环后侵蚀损伤到 2mm 深度范围,75 次干湿循环时侵蚀到 4mm 深度,80 次左右即可以到达 6mm 深度,90 次侵蚀到 8mm 深度范围。这是由于在硫酸盐侵蚀—干湿循环双重作用下,硫酸盐是通过循环的湿度梯度作用加速向混凝土内部累积扩散的,随着干湿循环次数的增加,盐分不断积累,即随着腐蚀龄期的延长混凝土损伤越明显。另外,比较几条曲线可以看出,第一层曲线,即表层 2mm 深度范围内混凝土试样在经历从 15 次到 105 次硫酸盐干湿循环过程中,动弹性模量的值变化最大(105 次循环后的动弹性模量值 (70.50GPa) 与 15 次循环时动弹性模量值 (96.67GPa) 相比下降了近 30%),也即表层范围内的混凝土是侵蚀程度最为严重的区域。

## 4. 结论

1) 利用相对法原理及本构关系式计算得到混凝土内部不同深度损伤层的动弹性模量,进而分析混凝土在干湿循环—硫酸盐侵蚀耦合作用下的损伤规律,所得研究结果与以往传统研究方法所得结论一致,证明采用相对法原理计算混凝土内部损伤层的动弹性模量指标可行。

2) 相同干湿循环次数不同配合比的混凝土试样,随着侵蚀深度的增加,动弹性模量由表及里逐层递减,说明在硫酸盐及干湿循环双重破坏作用下,混凝土将发生由内向外的逐层破坏。

3) 矿物掺合料的掺入加剧了硫酸盐侵蚀与干湿循环双重作用下混凝土的损伤速率,分析其原因可能是由于干湿交替循环作用影响了矿物掺合料火山灰活性的发挥,加上部分水泥被取代所造成的强度损失,使得混凝土性能迅速劣化。

4) 随着干湿循环周期的延长,混凝土试件由表及里各层动弹性模量变化规律均为先从

较高起点经历干湿循环过程中的硫侵蚀而有一定程度的下降,而后又在经历一定循环次数后开始回升。由动弹性模量最低值处所对应的干湿循环次数,即可得到腐蚀到该循环次数时对应的侵蚀层深度。

## 参考文献 References

- [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(Suppl 1): 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.
- [10] Y. W. Bao, Y. C. Zhou, X. X. Bu, et al, Evaluating elastic modulus and strength of hard coatings by relative method, Materials Science and Engineering A, 2007, 458, 268-274
- [11] 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准 (GB/T 50082-2009). 北京: 中国建筑工业出版社; 2009. (Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete (GB/T 50082-2009). Beijing: China Architecture and Building Press; 2009. (in Chinese))
- [12] Flatt R J. Salt damage in porous materials: how high supersaturations are generated [J]. Journal of Crystal Growth, 2002, 242(3/4): 435-454

- [13] Jie Yuan , Yang Liu, Zhicheng Tan , Baokun Zhang. Investigating the failure process of concrete under the coupled actions between sulfate attack and drying–wetting cycles by using X-ray CT [J]. Construction and Building Materials, 108 (2016): 129–138
- [14] Irassar E F, Maio A D, Batic O R. Sulfate attack on concrete with mineral admixtures[J]. Cement and Concrete Research,1996,26(1).
- [15] Ganjian E, S Pouya H. Effect of magnesium and sulfate ions on durability of silica fume blended mixes exposed to the seawater tidal zone [J].Cement and Concrete Research,2005,35.
- [16] Sahmaran M, Erdem T K, Yaman I O. Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to wetting-drying and heating-cooling environments [J].Construction and Building Materials, 2007, 21.
- [17] Thomas M D A, Shehata M H, Shashiprakash S G. The use of fly ash in concrete: classification by composition [J].Cement Concrete and Aggregates, 1999, 21(2):26-30.