

doi:10.3969/j.issn.1674-4764.2013.01.017

# 单轴受压混凝土的微裂缝和氯离子侵入性

万小梅<sup>1</sup>, 苏 卿<sup>2</sup>, 赵铁军<sup>1</sup>, 任心波<sup>1</sup>

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 同济大学 土木学院, 上海 200092)

**摘 要:**采用 1 种无破损微裂缝估算指标-比裂缝面积来评价单轴压力作用下混凝土棱柱体的扩展微裂缝。加压卸载后试块暴露于氯离子环境中,测得试块中的氯离子含量分布。分析了单轴压力下混凝土微裂缝的发展以及荷载、微裂缝和氯离子渗透性的相关规律。试验结果表明,在大约 0.3 的应力水平范围内,受压并卸载后的试块表观氯离子扩散系数普遍降低,但随着应力水平的继续提高,氯离子扩散性能开始提高并超过未加载时的氯离子扩散系数。混凝土在单轴受压并卸载的情况下,其微裂缝的发展和恢复与应力水平关系密切。比裂缝面积能够较好地表征混凝土中微裂缝的发展,有助于分析混凝土在荷载作用下产生的微裂缝对氯离子传输性能的影响。

**关键词:**混凝土;单轴压力;微裂缝;氯离子;比裂缝面积

**中图分类号:**TU528.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)01-0104-07

## Microcracking and Chloride Penetration of Concrete under Uniaxial Compression

Wan Xiaomei<sup>1</sup>, Su Qing<sup>2</sup>, Zhao Tiejun<sup>1</sup>, Ren Xinbo<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, P. R. China;

2. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

**Abstract:** A non-destructive method of evaluation of specific crack area was used to characterise microcracking in concrete prisms during uniaxial compression loading and unloading. Chloride profiles were also measured after the same concretes were exposed to chloride environment. The relation among microcracking, stress-strength ratio and chloride penetration of concrete were analysed based on the experimental results. Under compressive load, the apparent chloride diffusion coefficient decreases until about one third of the ultimate load. Further increase of compressive load improves the chloride diffusion coefficient again. There is a close link between microcracking and stress-strength ratio. The index of specific crack area can be used to indicate the microcracking and study chloride transport behaviour into concrete under the influence of microcracking.

**Key words:** concrete; uniaxial compression; micro crack; chloride; specific crack area

荷载对混凝土传输性的影响,主要是通过荷载引起的混凝土微裂缝来作用。由于泌水、收缩、温度梯度、冻融和碱-骨料反应等原因,浇筑后未经使用的混凝土中就存在微裂缝。而外部荷载或其它环境

条件则会使混凝土产生更多的微裂缝并促使混凝土中的原始微裂缝扩展和相互贯通。这些微裂缝可以形成潜在的传输通道,使侵蚀性盐类或离子更容易进入混凝土内部。目前,已有不少围绕荷载、微裂缝

收稿日期:2012-05-27

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2009CB623203);山东省自然科学基金(ZR2011EEQ031)

作者简介:万小梅(1974-),女,副教授,博士,主要从事混凝土结构及材料的耐久性、力学与环境因素作用下结构物的劣化机理研究,(E-mail)wanxiaomeiqj@126.com。

与混凝土传输性及各种劣化机理的相关关系研究及成果报道<sup>[1-7]</sup>。这些研究表明裂缝的存在会使材料的渗透率(或吸水率)产生变化。

Samaha 等<sup>[8]</sup>检测从压力试验后的圆柱体上切取的混凝土切片,确定微裂缝的裂缝长度。然后将裂缝长度与根据 ASTM C1202 测得的电荷通量进行比较。他们发现,在低于 75% 抗压强度的应力水平下,混凝土中的微裂缝不会影响混凝土的整体渗透性。Loo<sup>[9]</sup>在单轴压力下混凝土圆柱体试验中报道了混凝土中的微裂缝在应力达到 70%~90% 的抗压强度时变得不稳定,此时在荷载作用下微裂缝开始快速扩展。Lim 等<sup>[10]</sup>对混凝土圆柱体加载单轴压力至极限强度的 30%~95%,在此过程中采用与 Loo 类似的微裂缝估算方法来研究混凝土圆柱体中微裂缝的扩展。压力试验后,在此圆柱体上切取试件进行快速氯离子渗透性试验(RCPT)。试验表明,用比裂缝面积表示的微裂缝特征在混凝土加载和卸载时有很大不同。Lim 等认为混凝土卸载后的氯离子渗透性受一定的应力水平即所谓临界应力的达到与否的影响。当混凝土试件超过临界应力时,量测到一个比较大的氯离子渗透性。当试件没有超过临界应力时,虽然微裂缝有较大的增长,但是渗透性的增长微乎其微。

有研究指出,当荷载引起的微裂缝宽度小于 50  $\mu\text{m}$  时,微裂缝对渗透性影响很小;但当荷载引起的微裂缝宽度增大到 50~200  $\mu\text{m}$  时,混凝土的渗透性大大增加;裂缝宽度大于 200  $\mu\text{m}$  后,混凝土的渗透性加速增大,并趋于稳定。总的说来,裂缝平均宽度、裂缝长度、裂缝面积、裂缝网络的连续性等参数对材料的渗透性都有程度不同的影响。文献<sup>[11]</sup>则指出,尽管硅烷凝胶表面防水处理对提高混凝土抗碳化性和抗氯离子渗透性均有显著作用,但如果经表面处理的试块出现裂缝,其碳化程度和氯离子渗透情况均会有所回升。

总体而言,尽管微裂缝对混凝土渗透性影响的重要性已受到人们的重视,但已有研究结果中常常出现冲突的观点,试验方法和理论还有待进一步完善。为此,本文将通过试验,以一种无损估算方法研究单轴压力作用的混凝土的微裂缝发展,分析微裂缝与氯离子传输性能间的相关性,基于试验深入研究荷载及微裂缝对混凝土渗透性的影响。

## 1 微裂缝评价方法

用于测定微裂缝的试验方法可以分为 2 类,一类是借助一定辅助手段的视觉观测法,也可称为直

接法,包括表面裂缝的微观观测以及加载中或加载后对混凝土薄片或锯片上的裂缝的观测,以及 X 射线成像技术;另一类是通过一些容易观测的指标如变形、泊松比、弹性模量等,借助裂缝形成与这些指标之间的内在关系量化混凝土内部的微裂缝,这类方法可称为间接法,包括表面应变的量测、超声脉冲法、声发射技术、在循环加载中测定能量的累积耗散和变形模量的变化、全息干涉测量法等。Antonaci 等<sup>[12]</sup>利用一种分层削减法(Scaling Subtraction Method)的非线性超声技术,可以辨别混凝土中的不连续性是属于裂缝类型还是属于密实度低等低质量类型。

这 2 类方法也可结合使用,Elaqra 等<sup>[13]</sup>就使用声发射和三维 X 射线断面摄像术来探明混凝土试块在受压中的破坏机理和断裂过程。

直接观测单轴受压下混凝土内部裂缝的方法又具体分为在加载前将试块切片和加载后将试块切片 2 种方式。加载前切片可以观察到裂缝在加载过程中的发展,但是却观察不到横向裂缝的发展。加载后切片虽然可以观测到横向裂缝的情况,但是加载后对试块进行切片需特别谨慎,因为锯切、着色和打磨都可能引起试块中新的微细裂缝生成。而且,卸载后在薄片观测到的裂缝一般都与荷载下的裂缝有很大不同。

基于 Loo<sup>[9]</sup>提出的比裂缝面积无损估算方法来评价轴压混凝土的微裂缝发展情况。这是一种可以结合混凝土应变测试结果量化混凝土微裂缝发展程度的方法。公式建立在以下假设基础上:单轴压力下混凝土试件的截面积变化等于由于泊松比影响产生的截面积的弹性变化和由于微裂缝引起的膨胀之和,也就是假定线弹性应变之外的部分是由于微裂缝的扩展而产生的,因此,

$$\Delta A_T = \Delta A_C + \Delta A_{PR} \quad (1)$$

式中: $\Delta A_T$  为混凝土受载后截面积的总变化; $\Delta A_C$  为由于裂缝开展引起的截面积变化; $\Delta A_{PR}$  为由于泊松比影响产生的截面积的变化。定义单位截面面积上的裂缝开展面积为比裂缝面积,用  $\epsilon_{cr}$  表示:

$$\epsilon_{cr} = \frac{\Delta A_C}{A} \quad (2)$$

在上述假定的基础上,本文给出了对于棱柱体试块在轴压时平行于荷载方向的侧表面的裂缝开展面积估算公式,

$$\Delta A_T = (a + a \cdot \epsilon_x) \cdot (h - h \cdot \epsilon_y) - a \cdot h \approx a \cdot h \cdot (\epsilon_x - \epsilon_y) \quad (3)$$

$$\Delta A_{PR} = (a + a \cdot \mu_e \cdot \epsilon_y) \cdot (h - h \cdot \epsilon_y) - a \cdot h \approx a \cdot h \cdot (\mu_e \epsilon_y - \epsilon_y) \quad (4)$$

$$\Delta A_C = \Delta A_T - \Delta A_{PR} = a \cdot h \cdot (\epsilon_x - \mu_c \epsilon_y) \quad (5)$$

式中:  $A$  为混凝土受力变形前的横截面面积;  $\epsilon_x$ 、 $\epsilon_y$  分别为横向和轴向应变,可在加载和卸载过程中由应变计测量得到;  $a$  为棱柱体横截面的边长;  $h$  为棱柱体所取计算侧面的高度。所以,棱柱体试块侧表面的比裂缝面积:

$$\epsilon_{cr} = \epsilon_x - \mu_c \epsilon_y \quad (6)$$

其中  $\mu_c$  为弹性泊松比。通常意义的泊松比是指在材料受力在弹性极限以下时横向应变与纵向应变的绝对比值<sup>[14]</sup>。笔者前期有关试验研究表明<sup>[15]</sup>,当加载处于应力与应变呈线性发展的弹性阶段(30%~50%应力水平以下)时,泊松比都保持在 0.15~0.24 范围内,平均值约为 0.20。之后,随着应力进一步增大,横向变形的增长速度比纵向变形的增长速度越来越大,故即时测取的泊松比随应力增加也适当增大,泊松比不再稳定,混凝土的应力应变发展进入到非弹性阶段。为避免受非线性变形带来的泊松比误差影响,式(6)中的  $\mu_c$  值是在应力-泊松比曲线上取用靠近初始阶段且已稳定的泊松比值。

## 2 试验方案

### 2.1 原材料及试块制备

试验采用 TC1 和 TC2 两种混凝土配合比,试块的原材料包括:山东东岳水泥厂的 42.5 普通硅酸盐水泥、青岛四方电厂的二级粉煤灰、青岛大沽河的中砂、最大粒径为 25 mm 的碎石、萘系高效减水剂。混凝土试块的配合比如表 1 所示。试块规格为 100 mm×100 mm×400 mm 的棱柱体,成型后的试块放置在氢氧化钙饱和溶液中养护至规定龄期。

表 1 混凝土试块的配合比 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

编号	水泥	粉煤灰	砂率	砂	石子	减水剂	水
TC1	306	77	0.4	754	1131	2.87	180
TC2	383	0	0.4	754	1131	2.87	180

### 2.2 试块加载及暴露环境

试块养护至 28 d 龄期时,分别测得 TC1 和 TC2 棱柱体试块抗压强度平均值为 43.5、46.0 MPa。完成强度测定后在电液伺服试验机上对试块进行单轴静力加压,调节进油阀使压力机匀速加载,直至应力水平分别达到混凝土棱柱体抗压强度的 0、20%、30%、50%、80%。加载达到预定应力水平后持载 5 分钟,再匀速卸载。每个试块在相对的两个成型面上的中间高度位置沿横向及纵向粘贴应变计各一对,加载、持载和卸载期间同时进行应变测量。应变

测量采用胶基应变计和北戴河电子仪器厂生产的 CM-1A-20 数字静态应变仪组成的应变测试系统进行。

卸载结束后,从混凝土试块上取走应变计并清理表面,切割并保留原应变计所在区域的部分试块(约 100 mm 的试块高度),以该局部表面为暴露面,将试块其余面涂敷环氧树脂,将试块浸泡在 5% 的 NaCl 溶液中。当试块浸泡一定时期(1 个月或 2 个月)后,逐层磨粉取样,采用《混凝土结构耐久性设计规范》<sup>[16]</sup> 规定的硝酸银滴定法检测混凝土中水溶性氯离子含量,得出混凝土中不同深度的氯离子含量分布。

## 3 比裂缝面积

用加载、卸载过程采集到的应力应变数据,根据公式(6)计算得到各混凝土试块的比裂缝面积。图 1 是加载、卸载过程中的混凝土比裂缝面积变化的部分试验结果,图中加载和卸载阶段分别用黑色和灰色线表示。从各曲线整体发展来看,在加载初期应力水平不超过 0.4 的时候,比裂缝面积发展较小,意味着本试验中的混凝土中微裂缝在低应力水平范围内没有大的发展,卸载后比裂缝面积几乎全部恢复为 0。当应力比超过一定水平时,比裂缝面积迅速增大,这意味着此时混凝土内的裂缝开始有了较大发展。总体来看,这些突变点对应的应力水平基本出现在 0.3~0.7 的较大范围内。Loo<sup>[9]</sup> 曾认为,混凝土比裂缝面积的突变点对应的应力或应力水平与混凝土的强度以及弹性模量并没有明显规律。但从实验全部结果来看,TC1 和 TC2 两种配合比的混凝土的比裂缝面积突变应力水平并不一致,掺加粉煤灰的 TC1 的微裂缝突变应力水平在 0.5~0.7 范围内(图 1(d)中该值约为 0.7),而 TC2 微裂缝突变应力水平在 0.3~0.5 范围内(图 1(g)中该值约为 0.5)。可见,掺加粉煤灰有提高混凝土裂缝发展突变应力水平的趋势。试验中,比裂缝面积在加载初始阶段数值和变化波动都较小,部分试块因初始加载条件不稳定造成泊松比初期较大,之后才略有下降达到稳定阶段,所以加载初期比裂缝面积有负值且出现波动。

在卸载阶段,随着试块应力水平的下降,比裂缝面积也有所回退,当应力降为零时,所对应的比裂缝面积就是由混凝土中未能恢复的残余变形造成的。从图 1 的试验结果可以看出,卸载后剩余的比裂缝面积与加载达到的最高应力水平有一定关系。对

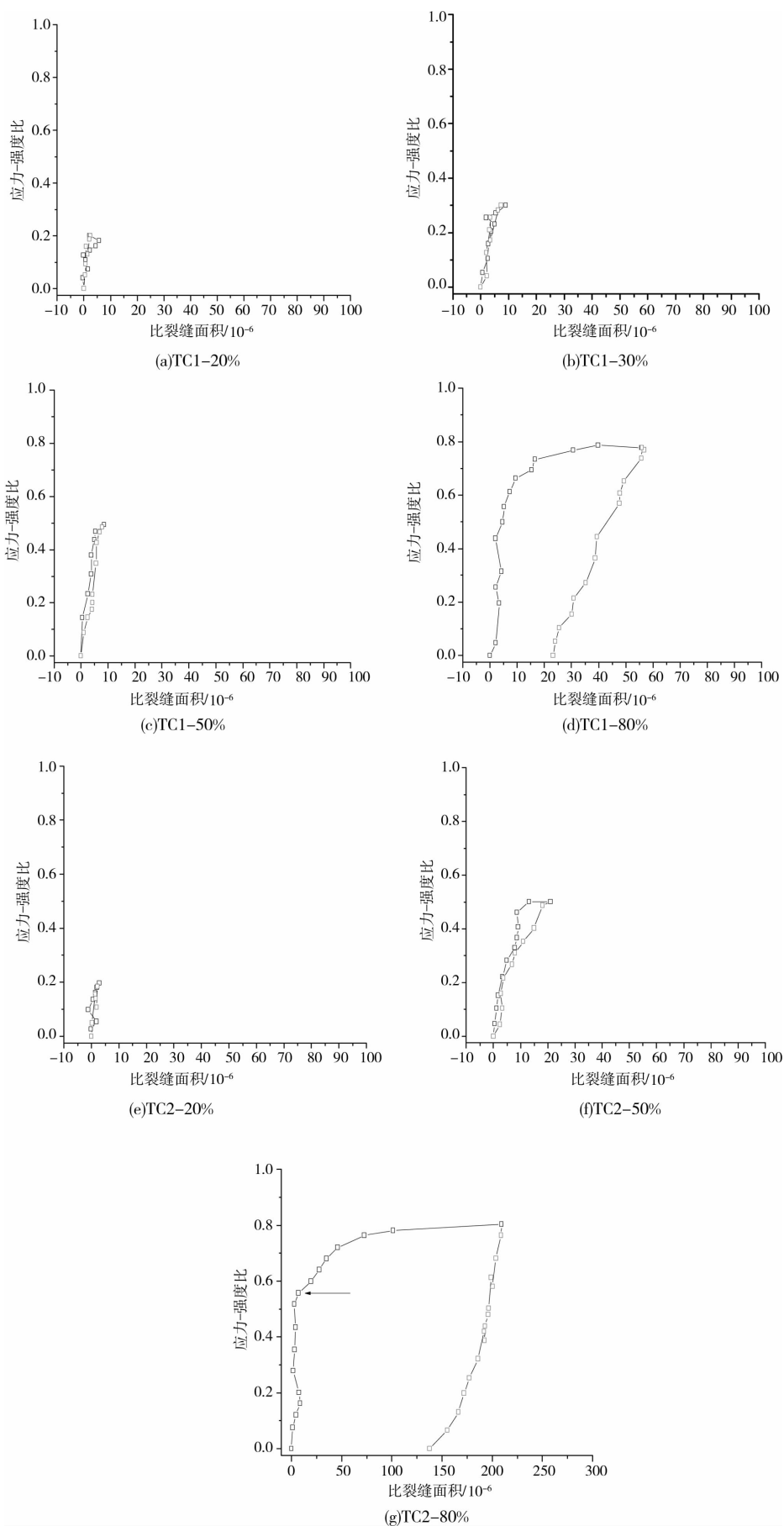


图 1 加载和卸载中的混凝土比裂缝面积

TC1 而言,加载到 0~0.5 的应力水平后卸载的剩余比裂缝面积均为 0,加载到 0.8 的应力水平后卸载的剩余比裂缝面积为  $23.2 \times 10^{-6}$ ;TC2 加载到 0~0.5 的应力水平后卸载的剩余比裂缝面积也为 0,但加载到 0.8 的应力水平后卸载的剩余比裂缝面积为  $137.5 \times 10^{-6}$ 。显然,同样是 0.8 应力水平,掺加适量粉煤灰的混凝土卸载后剩余的比裂缝面积较纯水泥混凝土试块明显偏小。

结合前期的研究结果<sup>[17]</sup>可以认为,对普通混凝土来说,当应力水平达到 0.7 以上时,卸载后的残余损伤已不可忽视,即使混凝土不再继续承受荷载,其残余损伤对混凝土长期性能的影响也应谨慎对待。文献[10]也给出了类似的结论,认为加压到 0.7~0.95 应力水平再卸载后混凝土的残余损伤已比较明显。但不同强度、配合比的混凝土其对剩余比裂缝面积产生突变影响的应力水平值各有差异。

## 4 氯离子含量分布

TC1 和 TC2 在 5% 的氯化钠溶液里浸泡 1 个月和 2 个月后,测得其氯离子含量(占混凝土的质量百分比)分布见图 2。可以看出,同样的浸泡暴露条件下掺加粉煤灰的 TC1 混凝土的氯离子侵入情况总体上低于未掺加粉煤灰的 TC2 混凝土。这是由于,在适量添加粉煤灰的条件下,粉煤灰微细颗粒均匀分布在水泥浆体中,可有效填充初始微裂隙,改善混凝土孔结构。随着轴向压荷载应力水平的增加,混凝土中氯离子的侵入总体含量出现了先降低,之后又随应力水平增加而进一步增加的趋势。其中,荷载对未掺加粉煤灰的 TC2 混凝土的氯离子传输性的影响效应要大于荷载对掺加粉煤灰的 TC1 混凝土的氯离子传输性的影响效应。

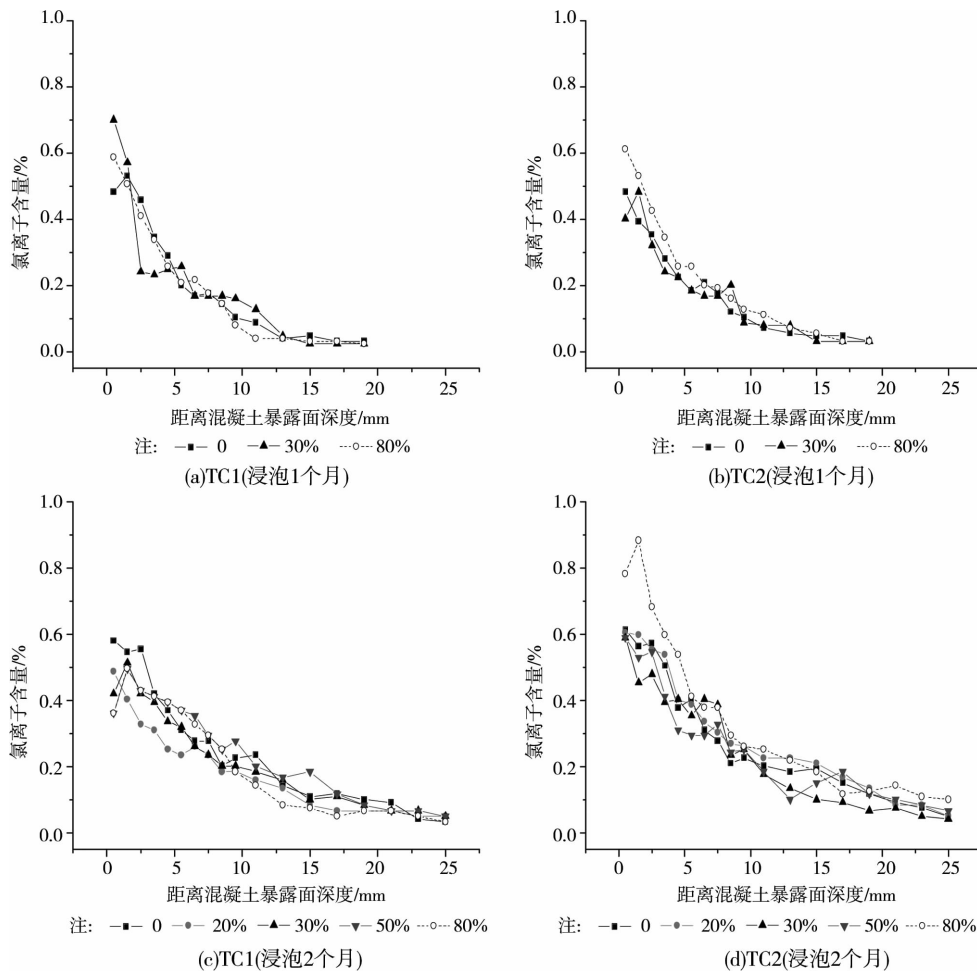


图 2 混凝土的氯离子含量分布

因为本试验采用自然浸泡的方式,根据 Fick 第二定律的解析公式(式 5),在一定时间  $t$  的暴露之后,由不同深度的氯离子含量曲线  $C(x, t)$ ,采用误

差函数可以计算出混凝土在该段时间内的表观氯离子扩散系数,试验计算结果见表 2,表中括号里的数值是加载过的试块相对于未加载的基准试块的氯离

子扩散系数变化情况。

$$C(x, t) = C_0 + (C_s - C_0) \cdot \left[ 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \right] \quad (5)$$

式中:  $x$  是距离混凝土暴露面的深度;  $t$  是暴露时间;  $C_0$  是混凝土中的初始氯离子含量;  $C_s$  是表面氯离子浓度;  $D$  是表观氯离子扩散系数;  $\operatorname{erf}$  是误差函数,  $\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-z^2) dz$ 。

表 2 单轴受压后混凝土的表观氯离子扩散系数

浸泡时间	配合比编号	荷载水平	氯离子扩散系数/ ( $10^{-6}(\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ )
1 月	TC1	0	7.82 (1)
		0.3	7.45 (0.95)
		0.8	7.76 (0.99)
	TC2	0	10.09 (1)
		0.3	9.68 (0.96)
		0.8	10.62 (1.05)
2 月	TC1	0	5.95 (1)
		0.2	5.35 (0.90)
		0.3	5.65 (0.95)
		0.5	6.07 (1.02)
		0.8	6.42 (1.08)
	TC2	0	7.32 (1)
		0.2	7.18 (0.98)
		0.3	7.24 (0.99)
		0.5	7.62 (1.04)
		0.8	8.58 (1.17)

从表 2 中反映出的一致规律是,混凝土的表观氯离子扩散系数同样随着压应力水平先减小后增大,这是由于低应力水平的压荷载使混凝土中初始的微裂缝适当闭合,内部趋于密实,氯离子传输性下降,但随着压应力水平继续增大,混凝土内的界面裂缝和砂浆裂缝重新发展,导致混凝土的氯离子传输性能重新增大。但本试验中,比裂缝面积结果无法反映荷载对混凝土初始裂缝的闭合效应。

同时,表 2 的试验结果中,2 个月浸泡的混凝土表观氯离子扩散系数比 1 个月浸泡得到的混凝土表观氯离子扩散系数降低了 17%~27%,体现了自然暴露条件下混凝土表观氯离子扩散系数随时间衰减的效应。

## 5 荷载、微裂缝与氯离子传输的相关关系

根据得到的试验结果,将不同应力水平作用并

卸载后的混凝土剩余比裂缝面积和氯离子扩散系数绘制在图 3 中。可以看出,在大约 0.3 的应力水平范围内,受压并卸载后的试块表观氯离子扩散系数普遍降低,但随着应力水平的继续提高,氯离子扩散性能开始提高并超过未加载时的氯离子扩散系数,说明较高水平的压应力使混凝土表层及内部产生新的裂缝并发展,由此改变了混凝土的氯离子传输性能。以浸泡 2 个月的 TC1 试验结果为例,加载 0.2、0.3 应力水平的试块表观氯离子扩散系数分别降至未加载时的 90% 和 95%,加载 0.5 应力水平的氯离子扩散系数则已回升至未加载时的情况,当加载 0.8 应力水平时其表观氯离子扩散系数已增至未加载时的 1.08 倍。

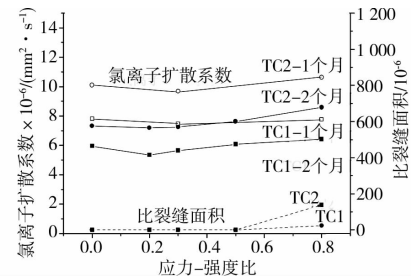


图 3 不同应力水平作用并卸载后的混凝土剩余比裂缝面积与氯离子扩散系数

如前所述,试验中的混凝土在单轴受压并卸载的情况下,其微裂缝的发展和恢复与应力水平关系密切。当应力水平在 0.5 以下时,2 种混凝土的剩余比裂缝面积均基本保持为 0,试块相应的表观氯离子扩散系数也保持在低于或基本持平于未加载时氯离子扩散系数的水平。当应力水平达到 0.8 时,2 种混凝土的比裂缝面积分别为  $23.2 \times 10^{-6}$ 、 $137.5 \times 10^{-6}$ ,试块相应的表观氯离子扩散系数则分别达到了未加载时氯离子扩散系数的 1.08 倍和 1.17 倍。与 TC1 相比,单轴压力下 TC2 混凝土的微裂缝在水泥浆中的扩展较为严重,剩余比裂缝面积较大,因而氯离子含量也多于未加载时的氯离子含量。说明比裂缝面积能够较好地表征混凝土中微裂缝的发展,它的大小与混凝土材料组成及应力水平有关,有助于分析混凝土在荷载作用下产生的微裂缝对氯离子渗透性的影响。但是,比裂缝面积不能反映出混凝土在较低应力水平的压荷载下趋于密实、从而降低传输性的情况。

## 6 结论

通过试验分析了单轴压力下混凝土微裂缝的发展以及荷载、微裂缝和氯离子渗透性的相关规律。

1)混凝土在单轴受压并卸载的情况下,其微裂缝的发展和恢复与应力水平关系密切。在单轴受压加载初期应力水平不超过0.4时,比裂缝面积发展较小,卸载后比裂缝面积几乎全部恢复为0。当应力比超过一定水平时,比裂缝面积迅速增大。

2)卸载后剩余的比裂缝面积与加载达到的最高应力水平有一定关系。在0.8应力水平下,掺加适量粉煤灰的混凝土卸载后剩余的比裂缝面积较纯水泥混凝土试块明显偏小。

3)在大约0.3的应力水平范围内,受压并卸载后的试块表现氯离子扩散系数普遍降低,但随着应力水平的继续提高,氯离子扩散性能开始提高并超过未加载时的氯离子扩散系数。这与不同应力水平下剩余比裂缝面积的发展有一致性。但比裂缝面积不能反映出混凝土在较低应力水平的压荷载下趋于密实、从而降低传输性的情况。

4)主要理论假设是将微裂缝引起的截面变化简化为混凝土的总截面变化与因泊松比影响产生的截面积的弹性变化之差。在该理论假设基础上,提出了估算轴压下混凝土棱柱体侧表面的裂缝开展估算公式。与氯离子的渗透性试验结果对照表明,该公式和相应计算得到的比裂缝面积能够较好地提供混凝土中微裂缝开展的连续信息,有助于分析混凝土在荷载作用下产生的微裂缝对氯离子传输性能的影响。

#### 参考文献:

- [1] Shahzma J J, Carolyn M H. Chloride-induced corrosion products of steel in cracked-concrete subjected to different loading conditions[J]. *Cement and Concrete Research*, 2009,39:116-125.
- [2] 杨林德, 潘洪科, 祝彦知, 等. 多因素作用下混凝土抗碳化性能的试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2008,11(3): 345-348.  
Yang L D, Pan H K, Zhu Y Z, et al. Experimental study of concrete's carbonation resistance under combined action of factors [J]. *Journal of Building Materials*, 2008,11(3): 345-348.
- [3] 黄战, 邢锋, 董必钦, 等. 荷载作用下的混凝土硫酸盐腐蚀研究[J]. *混凝土*, 2008,(2): 66-69  
Huang Z, Xing F, Dong B Q, et al. Study on sulfate corrosion of concrete under the action of loading [J]. *Concrete*, 2008,(2): 62-69.
- [4] Xie S Y, Shao J F, Burlion N. Experimental study of mechanical behaviour of cement paste under compressive stress and chemical degradation [J]. *Cement and Concrete Research*, 2008,38: 1416-1423.
- [5] Wan X, Wittmann F H, Zhao T. Influence of

mechanical load on service life of reinforced concrete structures under dominant influence of carbonation [J]. *Restoration of Buildings and Monuments*, 2011,17(2): 103-110.

- [6] 张君, 居贤春, 公成旭. 混凝土中的裂缝对氯盐侵蚀作用的影响[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2010,31(6): 720-724.  
Zhang J, Ju X C, Gong C X. Effect of cracks in concrete on chloride penetration [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2010,31(6): 720-724.
- [7] 张士萍, 刘加平, 董良. 收缩裂缝对混凝土氯离子传输的影响[J]. *武汉理工大学学报*, 2011,33(6): 90-92, 143.  
Zhang S P, Liu J P, Dong L. Influence of shrinkage cracking on chloride ions transport of concrete [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2011,33(6):90-92,143.
- [8] Samaha H R, Hover K C. Influence of microcracking on the mass transport properties of concrete [J]. *ACI Materials Journal*, 1992, 89(4): 416-424.
- [9] Loo Y H. A new method for microcrack evaluation in concrete under compression [J]. *Materials and Structures*, 1992, 25: 573-578.
- [10] Lim C C, Gowripalan N, Sirivivatnanon V. Micro cracking and chloride permeability of concrete under uniaxial compression [J]. *Cement and Concrete Composite*, 2000, 22(6): 353-360.
- [11] 赵铁军. 渗透型涂料表面处理与混凝土耐久性[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [12] Antonaci P, Bruno C L E, Bocca P G, et al. Nonlinear ultrasonic evaluation of load effects on discontinuities in concrete[J]. *Cement and Concrete Research*, 2010, 40: 340-346.
- [13] Elaqla H, Godin N, Peix G, et al. Damage evolution analysis in mortar, during compressive loading using acoustic emission and X-ray tomography: effects of the sand/cement ratio[J]. *Cement and Concrete Research*, 2007,37(5): 703-713.
- [14] Standard definitions of terms relating to methods of mechanics testing [S]. E 6, American Society for Testing and Materials, 1973.
- [15] 万小梅. 力学荷载及环境复合因素作用下混凝土结构劣化机理研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
- [16] 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, 2008.
- [17] Wan X M, Zhao T J, Jiang F X, etc. Experimental research on carbonation performance of mechanical loaded concrete [C]//Proceedings of the Fifth Symposium on Strait Crossings, Trondheim, Norway, 2009: 525-530.