

损伤混凝土毛细吸水性能试验研究和水分分布预测分析

王立成^{*1,2}, 鲍玖文², 李淑红³

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

3. 上海联创建筑设计有限公司青岛分公司, 山东 青岛 266034)

摘要: 混凝土内部微裂缝的产生或贯通, 加快了水及侵蚀性介质侵入混凝土内部的速度, 是引起混凝土性能劣化和结构耐久性不足的重要原因. 开展了混凝土试件的轴心受拉、受压试验, 采用持载、反复加载方式, 对混凝土试块分别加载至极限荷载的70%、80%、90%后卸载. 为了实现吸水过程的连续性, 利用改进后的吸水装置开展损伤混凝土的累积吸水量测试试验. 与未加载试件的吸水结果对比分析表明, 荷载水平是影响混凝土毛细吸水速率的重要因素. 对不同荷载水平的累积吸水曲线 $i-t^{1/2}$, 采用线性拟合方法可得到混凝土的初始吸水率 (S_1) 和后期吸水率 (S_2). 根据吸水率试验结果, 结合非饱和毛细吸水理论模型, 引入 Boltzmann 变量, 建立了损伤混凝土内相对含水量分布的预测分析方法, 为开展混凝土内有害介质(如氯离子或者硫酸根离子等)的传输分析提供了工具.

关键词: 加载损伤; 微裂缝; 毛细吸水; 相对含水量; 吸水率; 水分分布

中图分类号: TU528.01 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb201506006

0 引言

在非饱和状态下, 水作为侵蚀性介质迁移的载体, 主要通过孔隙液体表面张力产生的毛细吸附侵入混凝土材料的内部, 造成钢筋混凝土结构的膨胀、开裂以及钢筋的锈蚀. 混凝土中毛细吸水现象与内部孔隙结构及分布密切相关^[1]. 由于力学原因(外部荷载)与非力学原因(碱骨料反应、碳化及冻融循环等)的影响, 桥墩、水坝及码头等实际结构中混凝土均存在不同程度的损伤(微裂缝)或开裂(裂缝). 裂缝或微裂缝相互贯通形成大量的物质迁移通道, 加快了水及侵蚀性介质在混凝土内的传输, 进而影响结构的耐久性^[2-6].

关于水分在损伤混凝土中的渗透问题, 国内外学者已进行了大量研究, 如 Wang 等^[5]和 Aldea 等^[6]采用反馈控制劈裂法产生一定宽度的单条裂缝, 对其进行水分渗透试验, 分析了裂缝宽度与水分渗透率之间的关系. 研究表明, 裂缝宽度在50~

200 μm 时, 渗透率呈递增趋势. Yang 等^[7]分别开展对轴拉加载卸载后和冻融循环破坏后的混凝土试件吸水试验, 发现加载应力水平低于90%时, 吸水量和吸水速度对应力水平并不敏感, 而冻融损伤与混凝土导电率呈双线性关系. Zhang 等^[8]利用中子放射及成像技术装置, 开展了带有单条裂缝的混凝土中水分侵入过程的可视化实时跟踪试验, 发现宏观及微观(钢筋周边)裂缝对水分的传输速度有重要影响.

目前, 建筑材料的吸水率(sorptivity)已被广泛用来表征混凝土的吸水性能, 进而逐渐成为评价混凝土耐久性的一个重要指标. 国内外学者研究混凝土毛细吸水性能通常采用试块吸水前后的质量差来衡量吸水率^[9-10]. 试验称重中首先需人工擦拭试件表面, 容易带来操作误差, 而且获得的试验数据点较少, 缺少连续性. 为了解决传统测重法的这一缺点, 本文设计混凝土毛细吸水的改进试验装置, 以实现吸水过程的连续性. 且根据改进装置的优

收稿日期: 2015-01-20; 修回日期: 2015-07-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51378090); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金资助项目(2013491711).

作者简介: 王立成^{*}(1975-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: wanglicheng2000@163.com; 鲍玖文(1989-), 男, 博士生, E-mail: baojiuwen55@126.com.

势,开展混凝土试件的轴心受拉、受压试验,采用持载、反复加载方式,对混凝土试块分别加载至极限荷载的70%、80%、90%后卸载.随后测量损伤混凝土的累积吸水量,分析荷载水平(70%、80%、90%极限荷载)、加载方式(持载和反复加载)对混凝土毛细吸水性能的影响规律.根据不同荷载水平下吸水率的试验结果,结合毛细吸水理论模型,建立损伤混凝土内部水分含量的预测分析方法.

1 混凝土内水分分布预测分析

1.1 毛细吸水理论

对于非饱和混凝土,通常采用扩展的 Darcy 定律并结合质量守恒定律,描述混凝土中的毛细吸水作用,其表达式为

$$\begin{aligned} \mathbf{q} &= K(\theta) \cdot \nabla p_c \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{q} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: \mathbf{q} 为水分流速; p_c 为毛细管压力; $K(\theta)$ 为毛细吸水时水力传导率, θ 为材料的相对含水量,表达式为 $\theta = (\Theta - \Theta_i) / (\Theta_s - \Theta_i)$,其取值范围为 $0 \sim 1$, Θ_s 和 Θ_i 分别为饱和和干燥状态下的体积含水量.当假定试件初始为完全干燥状态,即 $\theta = 0$;假设试件只有一个暴露面与水源完全接触及忽略重力因素影响,则混凝土中一维的毛细吸水方程为^[11-12]

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right); \quad 0 < x < \infty \quad (2)$$

并满足初始条件: $\theta = 0$,当 $x \geq 0, t = 0$;以及边界条件: $\theta = 1$,当 $x = 0, t > 0, \theta = 0$,当 $x \rightarrow \infty, t > 0$.需要指出的是,式(2)从形式上类似二次非线性扩散方程, $D(\theta)$ 可以称为“扩散系数”,但其物理含义与溶液中离子在浓度梯度下的扩散过程完全不同^[13].

$D(\theta)$ 为相对含水量的非线性函数,通常采用指数函数形式($D(\theta) = D_0 e^{n\theta}$)和幂函数形式($D(\theta) = D_0 \theta^n$)^[12,14].引入 Boltzmann 变量 $\phi = xt^{-1/2}$,则一维非线性的毛细吸水方程(2)及其边界条件变为

$$-\frac{1}{2}\phi \frac{d\theta}{d\phi} = \frac{d}{d\phi} \left(D(\theta) \frac{d\theta}{d\phi} \right) \quad (3)$$

满足 $\phi = 0$ 时, $\theta = 1$; $\phi \rightarrow \infty, \theta = 0$.于是,式(3)变为常微分方程的边值问题. Parlange 等^[15]给出了式(3)的近似解析解,具有很高的精度,有关表达式如下:

$$2 \int_{\theta}^1 \frac{D(a)}{a} da = s\phi + \frac{A}{2}\phi^2 \quad (4)$$

式中: s 为相对吸水率,可表示为

$$s = \frac{S}{\Theta_s - \Theta_i} \cong \left(\int_0^1 (1 + \theta) D(\theta) d\theta \right)^{1/2} \quad (5)$$

其中 S 为吸水率.荷载造成混凝土结构的损伤,改变了内部孔隙结构的分布,引起孔隙率的变化,由式(5)可知相对吸水率 s 与孔隙率有关,即外荷载作用对混凝土的毛细吸水性能的影响,可以等效为外荷载所引起孔隙率改变对水分迁移的影响.式(4)中系数 A 的表达式为

$$A = \left(2 - \frac{s^2}{\int_0^1 D(\theta) d\theta} \right) \quad (6)$$

将扩散系数 $D(\theta)$ 的表达式代入式(4),定义 $\lambda(\theta) = \int_{\theta}^1 \frac{D(a)}{a} da$,则式(4)变成

$$\frac{A}{2}\phi^2 + s\phi - 2\lambda(\theta) = 0 \quad (7)$$

解此方程即可得到由相对吸水率 s 表示的任意相对含水量 θ 时的 Boltzmann 变量 ϕ .通过试验可获得不同程度损伤下试件的累积吸水量,得到损伤混凝土的相对吸水率.综上所述,可得损伤混凝土试件内任意时刻水分的渗入深度

$$x = \phi \sqrt{t} = \frac{-s + \sqrt{s^2 + 4A\lambda(\theta)}}{A} \sqrt{t} \quad (8)$$

1.2 模型参数验证

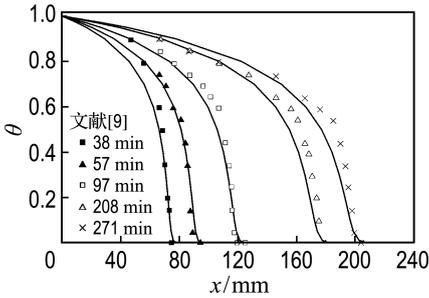
下面分别给出当扩散系数采用指数和幂函数形式时含水量的理论预测值与试验值的对比.根据式(5)和(6)可分别得到系数 A 和 D_0 .由相对吸水率 s 表示的表达式如表1所示.研究表明,指数函数中参数 n 取值一般在 $6 \sim 9$,与材料性能几乎无关^[9,14].当 n 越小时,理论值越偏于安全.对于幂函数形式, n 的取值范围为 $4 \sim 6$ ^[9],一般可取下限值 4 ^[12].因此,在给定 n 的情况下,可以确定 A 的取值,另外如果材料的相对吸水率通过试验确定,则可通过表中相应式子确定参数 D_0 .

结合文献[9]中砂浆毛细吸水的试验数据,对比分析当 $D(\theta)$ 采用以上两种函数时试件内相对含水量的分布(如图1所示).试验中采用核磁共振成像技术测量试件中水分含量,水泥砂浆采用普通硅酸盐水泥,水灰比为0.45,孔隙率为0.27(配合比为 $m(\text{水泥}) : m(\text{石灰}) : m(\text{砂子}) = 1 : 3 : 12$).由图1可见, $D(\theta)$ 采用以上两种形式均能给出多孔建筑材料内部水分含量和分布的合理预测.另一方面,说明混凝土内水分分布预测方法的准确性.

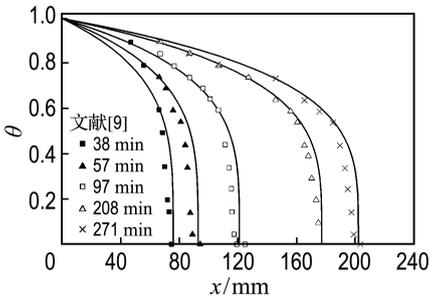
表 1 两种扩散系数中的参数表达式

Tab.1 Parameter expressions in two kinds of diffusion coefficient

指数函数形式($D(\theta) = D_0 e^{n\theta}$)	幂函数形式($D(\theta) = D_0 \theta^n$)
$D_0 = \frac{n^2 s^2}{e^n (2n-1) - n + 1}$	$D_0 = \frac{(1+n)(2+n)s^2}{3+2n}$
$A = (e^n - n - 1) / [n(e^n - 1)]$	$A = 1/2(2+n)$
$\lambda(\theta) = D_0 \left[\sum_{N=1}^{\infty} \frac{n^N}{N \cdot N!} (1-\theta^n) - \ln \theta \right]$	$\lambda(\theta) = \frac{D_0}{n} (1-\theta^n)$



(a) 指数函数形式



(b) 幂函数形式

图 1 指数函数和幂函数形式扩散系数得到的试件内水分分布

Fig.1 The distribution of relative water content in specimens by exponential or power law function

2 试验概况

2.1 原材料与试件制作

本试验所采用的原材料主要有 P. O 32.5R 普通硅酸盐水泥；最大粒径 20 mm 的天然花岗岩石材粗骨料；细度模数为 2.7、最大粒径为 3 mm 的中砂；聚羧酸盐类高效减水剂；设计强度为 C30 混凝土，试件配合比和强度值如表 2 所示。本试验共制作 21 个轴心受压试件(3 个为未加载)和 12 个形状为“哑铃型”的受拉试件。两组试件的几何平面尺寸及加载形式如图 2 所示，试件高度为 200 mm。

表 2 混凝土的配合比和强度值

Tab.2 Mixture proportion and strength of the concrete

材料用量/(kg · m ⁻³)				水灰比	减水剂用量
水泥	粗骨料	细骨料	水		
410	1 195.95	589.05	205	0.5	0.2% <i>m_c</i>
试件强度/MPa					
立方体抗压强度		轴压强度平均值		轴拉强度平均值	
35.71		41.17		3.6	

注：*m_c* 为水泥用量

2.2 加载及毛细吸水试验

本试验采用大连理工大学结构试验大厅 300 t 压力试验机和新三轴动态电液伺服控制试验机(受拉)。施加的最大荷载为极限荷载 *f_u* 的 70%、80% 和 90%，作为轴压(拉)试验的 3 种荷载水平。为了保证试块内部一定程度的损伤，具体的试验加载机制如表 3 所示。当试件达到预期的荷载水平并满足卸载条件，开始卸载。

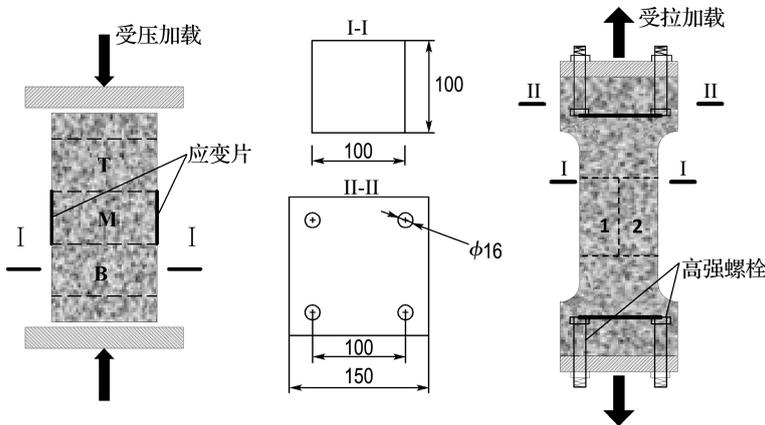


图 2 试件几何尺寸和加载示意图

Fig.2 Specimen geometry sizes and loading configuration

表 3 混凝土试块加载机制

Tab. 3 The experimental design of loading mechanisms for concrete

荷载水平 $\lambda_F = f/f_u$	加载路径			
	单向轴压		单向轴拉	
0	—	—	—	—
70%	持载 10 min	反复加载 25 次	持载 10 min	反复加载 25 次
80%	持载 10 min	反复加载 25 次	持载 10 min	反复加载 25 次
90%	持载 10 min	—(压溃)	持载 10 min	反复加载 25 次

为了保证毛细吸水方向与微裂缝的宏观走向相一致,按图 2 中虚线位置进行切割,切割后的试件(100 mm×100 mm×50 mm)分别进行毛细吸水试验.吸水试验装置图如图 3 所示.为了保证水分的一维传输,利用环氧树脂密封试件侧面.待凝固干燥以后,放入 105 °C 的烘干箱烘干(约 24 h),然后将试块放在室内自然冷却至室温.从注水漏斗向水箱注水,水位达到 ASTM C1585 标准中规定的高度后,同时打开计时器开始计时.根据标准中的时间间隔,记录水平管中水柱的累积减少长度.每个荷载水平取 3 个试件,每个试件不同部位的累积吸水量取其平均值.

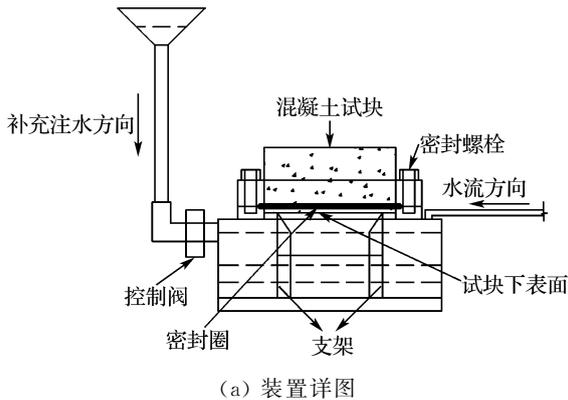


图 3 累积吸水试验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup for cumulative water absorption

对于多孔建筑材料,吸水率 S 表示与水接触时的吸水速度^[10]. Hall^[9] 通过试验发现:当忽略水化反应,由试验得到的吸水率并不符合 $i-t^{1/2}$ 的直线定律,而是存在一定的偏差,所以对于一维毛细吸水在一定时间内混凝土的累积吸水量可表示为

$$i = S\sqrt{t} + b \quad (9)$$

式中: i 为混凝土单位横截面积上的累积吸水量, mm; t 为吸水时间, min; b 为 i 轴截距,主要由与水接触瞬间,试件表面孔隙被快速填充引起.按照毛细吸水试验中水平管中水柱的累积减少量,可计算得到累积吸水量 i :

$$i = \Delta m / \rho_w A_c \quad (10)$$

式中: Δm 为某一时刻对应的试块累积吸水质量, g; ρ_w 为水的质量密度, g/mm³; A_c 为切割试块的横截面面积, mm².

3 试验结果及分析

3.1 累积吸水曲线

按照 ASTM C1585 标准,利用改进的测量装置,实现了测试试件连续吸水过程,测得持载 10 min、反复加载 25 次作用下(轴向拉、压)混凝土试块的累积吸水量曲线如图 4 所示.从图中可以发现,两种加载方式下,试件的累积吸水量随时间的变化趋势相同;相同荷载水平时,对轴压试件在持载和反复加载作用下,测得累积吸水量 i 几乎相同,说明在此情况下加载方式几乎没有影响.但是,反复加载作用下,轴向受拉试件的累积吸水量明显略大于持载情况.另一方面,在持载 10 min 作用下,拉、压试件的累积吸水量均随荷载水平的提高而提高,呈现单调递增的趋势;然而,反复加载情况下,荷载水平对累积吸水量的影响并不明显.

从图4中还可以看出,当试件底面暴露于水源后,即边界条件为 $\theta=1$,混凝土的累积吸水量显著增加.随着吸水时间的延续,累积吸水量曲线 $i-t^{1/2}$ 的斜率逐渐变小,即式(1)中吸水率 S 渐渐变小.在吸水时间 $t \approx 100$ min时,将累积吸水曲线分成两段线性段,曲线后半段的斜率明显小于

初始阶段,表明累积吸水量与吸水时间的双线性变化规律.

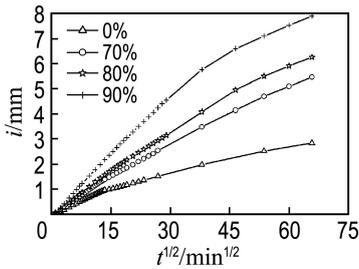
3.2 吸水率分析

由累积吸水曲线表现的双线性变化规律可知,对于荷载损伤后混凝土试块的毛细吸水性能,可用两阶段的吸水率来描述:初始吸水率(S_1)和后期吸水率(S_2).利用式(1)形式,对不同荷载水平下的累积吸水曲线进行两阶段的线性拟合,可以得到持载和反复加载下 S_1 和 S_2 随不同荷载水平 λ_F 的变化规律,如图5所示.

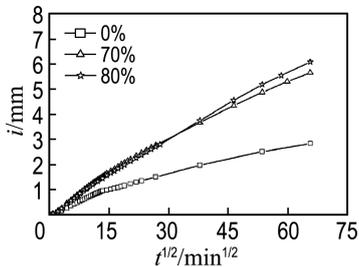
由图5可以看出,不同荷载水平下混凝土吸水率均有提高,证实了荷载引起的损伤对内部孔隙结构及分布的影响.通过与未加载试件对比发现,持载10 min和反复加载25次试件的吸水率 S 约为未加载试件的2倍. S_1 明显大于 S_2 ,由混凝土中水分的传输机理可知,毛细吸水过程主要分为两阶段得到了验证,则初始阶段是试块表面区域毛细孔隙被水分迅速填充,直至饱和状态;后期阶段是在长期的表面张力作用下材料内部非贯通孔隙的缓慢吸附^[7].由于本文试验的荷载水平范围较小(70%~90%),加载方式对混凝土吸水率的影响并不显著,另外,吸水率与荷载水平也并不呈现单调递增的关系.对于反复加载情况下,70%的荷载水平对应的吸水率大于荷载水平为80%、90%时的吸水率,一方面是本文获得的试验数据较少,不能满足统计规律的要求,数据的变化规律并不明显;另一方面是由于试件卸载后导致部分微裂缝的恢复或闭合,引起材料内部孔隙结构的变化,孔隙率变小,所以荷载损伤对吸水率变化的影响有所降低.

3.3 损伤混凝土内水分分布预测

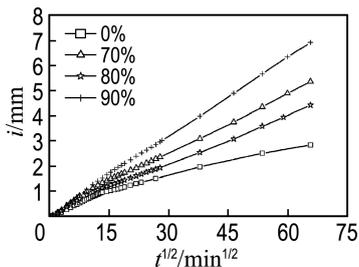
试件加载前和经受不同荷载水平(拉、压)持载作用后,不同时刻(10、20、40、80、100 min)混凝土内部的水分分布预测结果如图6和7所示.对轴向压力持载作用,测得荷载水平为80%和90%时的相对吸水率数值十分接近,根据毛细吸水理论计算公式计算得到参数 D_0 相等,则两者水分分布预测曲线基本相同.从图中可以看出,指数函数和幂函数形式的扩散系数均可以预测混凝土内的水分分布规律,并且随荷载水平的增加,毛细吸水



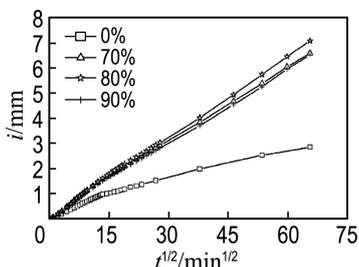
(a) 轴向压力持载 10 min



(b) 轴向压力反复加载 25 次



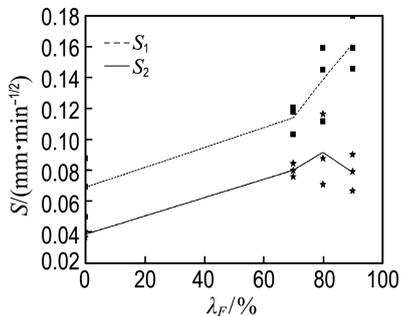
(c) 轴向拉力持载 10 min



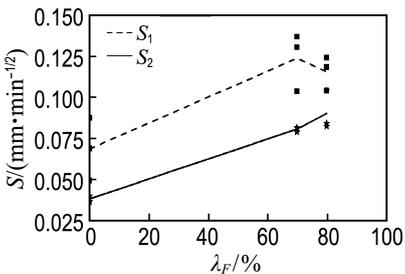
(d) 轴向拉力反复加载 25 次

图4 不同荷载水平下持载和反复加载的累积吸水曲线

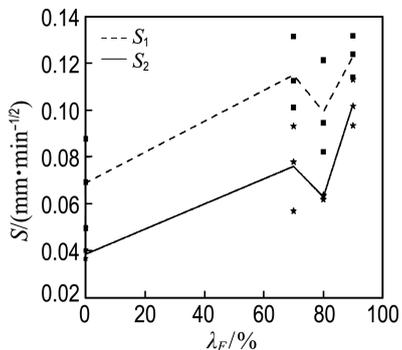
Fig. 4 Cumulative water absorption curves under different sustained and repeated load levels



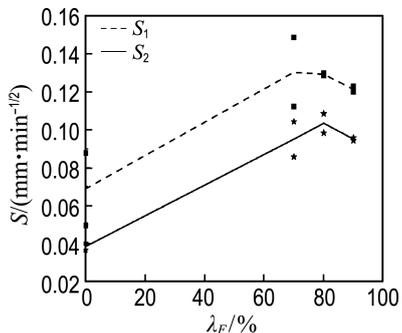
(a) 轴向压力持续 10 min



(b) 轴向压力反复加载 25 次



(c) 轴向拉力持续 10 min



(d) 轴向拉力反复加载 25 次

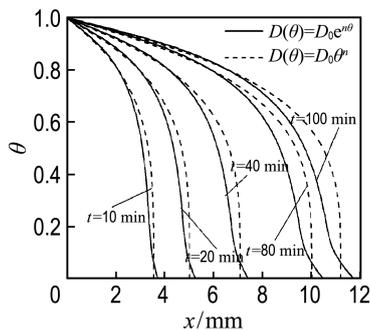
图 5 不同加载形式下吸水率随荷载水平 λ_F 的变化规律

Fig. 5 Relationship between the sorptivity and loading level λ_F of different loading patterns

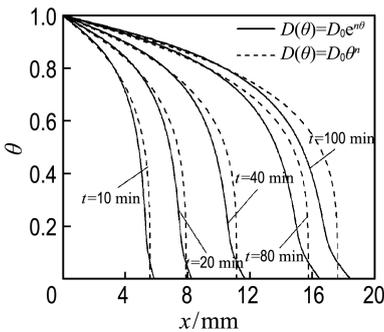
深度也随之增加。但是,轴向拉力持续作用下,荷载水平对毛细吸水深度递增趋势的影响并不明显,荷

载水平为 80% 的渗入深度却低于 70% 和 90% 的,产生这种现象的原因如前面吸水率分析中所述。

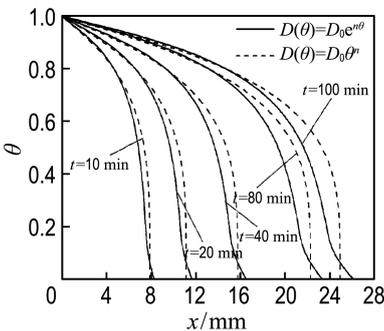
与未受荷载作用的毛细吸水结果对比可知,3 种拉压荷载水平均对混凝土造成不同程度的损伤,改变了混凝土内部结构,增大了混凝土的孔隙率,导致毛细吸水率的提高,以至于毛细吸水深度约为未加载试件的 1.5~2.5 倍;以上分析表明损伤混凝土内相对含水量分布的预测分析方法有效,为开展混凝土内有害介质(如氯离子或者硫酸根离子等)的传输分析提供了工具。



(a) 无荷载作用



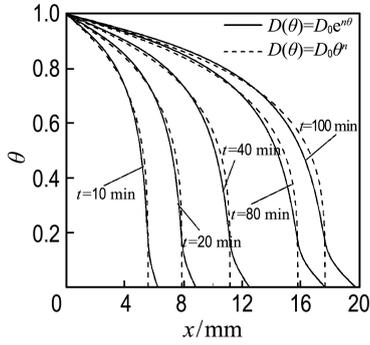
(b) 70% 轴向压力荷载水平



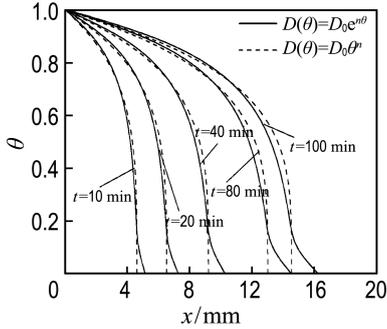
(c) 90% 轴向压力荷载水平

图 6 不同轴向压力荷载水平下混凝土内相对含水量分布

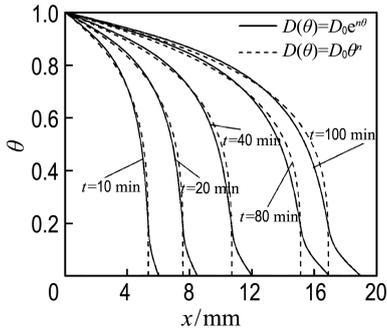
Fig. 6 The profiles of relative water content in concrete subjected to different compressive loadings



(a) 70%轴向拉力荷载水平



(b) 80%轴向拉力荷载水平



(c) 90%轴向拉力荷载水平

图7 不同轴向拉力荷载水平下混凝土内含水量分布

Fig.7 The profiles of water content in concrete subjected to different tensile loadings

4 结论

(1)通过试验发现,损伤混凝土中毛细累积吸水曲线呈现双线性变化规律,并且初始吸水率 S_1 大于后期吸水率 S_2 。

(2)结合毛细吸水的理论模型,验证了指数函数和幂函数形式的两种扩散系数用来描述毛细水的传输速度,利用试验得到了损伤混凝土的初始和后期吸水率,并有效地建立了损伤混凝土内相对含水量分布的预测分析方法。

(3)与未加载的混凝土试件相比,不同荷载形式作用后混凝土的毛细吸水量具有随荷载水平的提高而增大的趋势;毛细吸水率和吸水深度较未受荷载作用时提高2倍左右。

参考文献:

- [1] 王新友,蒋正武,高相东,等. 混凝土中水分迁移机理与模型研究评述[J]. 建筑材料学报, 2002, 5(1):66-71.
WANG Xin-you, JIANG Zheng-wu, GAO Xiang-dong, et al. Review on the mechanism and model of moisture transfer in concrete [J]. **Journal of Building Materials**, 2002, 5(1):66-71. (in Chinese)
- [2] 宋玉普,宋立元,赵敏. 混凝土海洋平台抗氯离子侵蚀耐久寿命预测试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(5):707-711.
SONG Yu-pu, SONG Li-yuan, ZHAO Min. Experimental study of durable life prediction resisting chloride ion penetration for concrete offshore platforms [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2005, 45(5):707-711. (in Chinese)
- [3] Hearn N. Effect of shrinkage and load-induced cracking on water permeability of concrete [J]. **ACI Materials Journals**, 1999, 96(2):234-241.
- [4] Gérard B, Breyse D, Ammouche A, et al. Cracking and permeability of concrete under tension [J]. **Materials and Structures**, 1996, 29(3):141-151.
- [5] WANG Ke-jin, Jansan D C, Shah S P. Permeability study of cracked concrete [J]. **Cement and Concrete Research**, 1997, 27(3):381-393.
- [6] Aldea C M, Shah S P, Karr A. Permeability of cracked concrete [J]. **Materials and Structures**, 1999, 32(5):370-376.
- [7] Yang Z F, Weiss W J, Olek J. Water transport in concrete damaged by tensile loading and freeze-thaw cycling [J]. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2006, 18(3):424-433.
- [8] Zhang P, Wittmann F H, Zhao T, et al. Neutron imaging of water penetration into cracked steel reinforced concrete [J]. **Physica B: Condensed Matter**, 2010, 405(7):1866-1871.
- [9] Hall C. Water sorptivity of mortars and concretes: a review [J]. **Magazine of Concrete Research**, 1989, 41(147):51-61.
- [10] ASTM. ASTM C1585 Standard Test Method for

- Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes [S]. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 2004.
- [11] 王立成. 建筑材料吸水过程中毛细管系数与吸水率关系的理论分析[J]. 水利学报, 2009, **40**(9): 1085-1090.
- WANG Li-cheng. Analytical relationship between the capillarity coefficient and sorptivity of building materials [J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2009, **40**(9):1085-1090. (in Chinese)
- [12] Lockington D A, Parlange J Y, Dux P. Sorptivity and the estimation of water penetration into unsaturated concrete [J]. **Materials and Structures**, 1999, **32**(5):342-347.
- [13] Hall C. Anomalous diffusion in unsaturated flow: fact or fiction? [J]. **Cement and Concrete Research**, 2007, **37**(3):378-385.
- [14] Leech C, Lockington D, Dux P. Unsaturated diffusivity functions for concrete derived from NMR images [J]. **Materials and Structures**, 2003, **36**(6): 413-418.
- [15] Parlange J Y, Lisle I G, Prasad S N, *et al.* Wetting front analysis of the nonlinear diffusion equation [J]. **Water Resources Research**, 1984, **20**(5):636-638.

Experimental study of capillary water absorption in damage concrete and prediction of water content distribution

WANG Li-cheng^{*1,2}, BAO Jiu-wen², LI Shu-hong³

- (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
3. Qingdao Branch of Shanghai UDG Architecture Design Corporation, Qingdao 266034, China)

Abstract: It is generally recognized that the formation or interconnection of microcracks within concrete is the important cause for deterioration of the concrete performance and poor durability of structure, which speeds up water and aggressive agents to transport into concrete. The experiments of concrete specimens are firstly carried out under axial tensile and compressive loading and subjected to either sustained or repeated loads with three load levels of 70%, 80% and 90% of the ultimate strength. After unloading, in order to realize the continuity of the suction process, the samples are then moved to an improved gravimetric device for cumulative water measurement. Compared with the results of unloading specimen, it is indicated that the loading-induced damage (microcracks) is the key factor to influence the capillary water absorption of concrete. By linearly fitting the two portions of the cumulative water absorption curve $i-t^{1/2}$ with different load levels, the initial and the second sorptivities S_1 and S_2 of concrete after subjected to different load levels are obtained. In terms of the test results of sorptivity, and combined with the theoretical model of capillary absorption of unsaturated water, the prediction method for relative water content distribution in concrete is proposed by means of introducing the Boltzmann variables, which is foreseen to facilitate the transport analysis of aggressive agents (such as chloride or sulfate ions) through concrete.

Key words: mechanical loading damage; microcrack; capillary water absorption; relative water content; sorptivity; water content distribution