

# 混凝土毛细吸水影响因素探讨

朱方之<sup>1,3</sup>, 赵铁军<sup>2</sup>, 王鹏刚<sup>2</sup>, 马志鸣<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 青岛理工大学, 山东 青岛 266033;  
3. 宿迁学院建筑工程系, 江苏 宿迁 223800)

**摘 要:**混凝土吸水性是混凝土耐久性能评价的重要指标。采用混凝土下部吸水的方法, 试验研究了混凝土水灰比、烘干温度、水浸没试块的深度以及试验环境的温度和相对湿度对混凝土吸水性的影响规律。试验结果表明: 水灰比和烘干温度对混凝土吸水性影响显著; 水浸没深度控制在 5 mm 以内对混凝土吸水性影响不大。吸水试验的环境温度和相对湿度增加, 会促进水的毛细吸收, 毛细吸收对环境温度的敏感性要高于环境相对湿度。

**关键词:**毛细吸水; 烘干温度; 温度; 相对湿度; 耐久性评价

**中图分类号:** TU528.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2012)05-0627-05

混凝土是一种多孔的建筑材料。孔是混凝土微结构中重要的组成之一, 孔对混凝土的耐久性如冻融、碳化以及氯离子、硫酸盐等有害物质在混凝土中传输都有着重要的影响<sup>[1]</sup>。同时, 混凝土也是一种亲水性材料, 表面具有数量不等、活性很大的羟基(来源于水泥不断水化时持续析出的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )。水在毛细管中的接触角较小, 空气中的水分或雨水极易在其表面延展, 并沿毛细管向材料内部渗透。暴露环境中的水溶性侵蚀性介质(如氯盐和硫酸盐等)通常以水为载体, 以混凝土孔隙为传输通道侵入材料内部。测试水在混凝土中的传输性能可在某种程度上评价混凝土的渗透性能。因此, 混凝土的吸水率大小逐渐成为评价耐久性能的一个重要指标<sup>[2-3]</sup>。

目前用来确定材料吸水率、内部水分迁移或者分布规律的方法主要有核磁共振(NMR)、传感器技术、伽马射线以及中子成像技术(NR)等<sup>[4]</sup>。但这些技术试验过程和定量分析都非常复杂, 所需要的设备在一般实验室很难实现, 国内外研究者更多采用称重法, 即测量一定时间间隔内试件单位面积累计吸水质量变化来评估材料的抗侵蚀性能。尽管该测试方法操作简单, 方便易行, 但影响混凝土吸水率的因素众多, 某一因素的改变, 将导致试验结果产生较大的偏差, 甚至得出不恰当的结论。因此, 有必要对混凝土毛细吸水试验的影响因素进行系统研究, 界定试验的方法与条件, 便于不同研究成果之间相互比较。

针对上述问题, 本文选取具有代表性的三种水灰比 0.4、0.5 和 0.6, 定量研究混凝土水灰比、烘干温度、水浸没试块的深度以及试验环境的温度和湿度等因素对混凝土吸水性的影响, 并对其影响程度作出评价, 研究成果为相关的试验提供参考。

## 1 毛细原理

当混凝土孔隙非饱和时, 混凝土与溶液接触会使毛细孔隙压力上升, 溶液被吸收到混凝土孔隙内。这种现象可用细管插入液体后管内水面升高的现象来解释<sup>[5]</sup>。如图 1 所示, 在液体润湿细管表面的情况下, 由于液体与孔壁之间的接触角  $\theta$  为锐角, 在细管刚插入液体中时, 液面变为凹液面, 使液面下方 B 点的压强比液面上方的大气压小, 而在与 B 点同高的水平液面处的 C 点压强仍等于液面上的大气压。根据液体静力学原理, 同高两点的压强应相等, 因此液面要在管中上升, 直至 B 点与 C 点的压强相等。显然 A 点的压强要比大气压小, 二者的差值即为凹液面 A 处的附加压

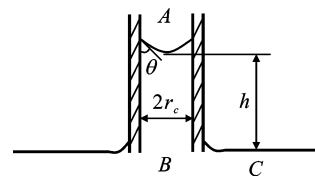


图 1 毛细原理

Fig. 1 Capillary theory

收稿日期: 2012-02-25 修改稿日期: 2012-10-10

基金项目: 国家重点基础研究发展(973)计划资助项目(2009CB623203); 宿迁市工业支撑计划资助项目(H2011118)

作者简介: 朱方之(1973-), 男, 江苏徐州人, 副教授, 主要从事混凝土材料与结构耐久性研究工作。

力,其值与液体的表面张力系数 $\sigma$ ,接触角 $\theta$ 以及细管的平均半径 $r_c$ 有关。

Kelham<sup>[6]</sup>由吸收试验得出在初始吸水时间内单位面积混凝土的毛细水吸收量与时间的平方根之间呈线性关系,如式(1)所示:

$$i = A\sqrt{t} \quad (1)$$

式中, $i$ 为单位面积混凝土的毛细吸水量; $A$ 为混凝土的毛细吸收系数,其表达式为:

$$A = \phi\rho\sqrt{\frac{\sigma r_c \cos\theta}{2\eta}} \quad (2)$$

式中: $\phi$ 为容水率; $\rho$ 为水的密度; $\eta$ 表示水的粘滞系数。其他参数同上。在假设混凝土各向同性以及不考虑混凝土基体内部成分与水发生化学变化的理想状态下,可以认为 $A$ 为一个常数。

Hall<sup>[7-8]</sup>在不考虑水化反应的条件下,由试验得出的吸水率并不符合式(1)的关系,而是存在一定的偏差,即 $i - t^{1/2}$ 在 $i$ 轴上存在一个很小的截距。如式(3)所示:

$$i = A\sqrt{t} + a \quad (3)$$

式中, $a$ 为 $i$ 轴上的截距,是由试件表面与水接触的孔隙快速填充引起的。毛细吸附系数 $A$ 和截距 $a$ 可通过 $i - t^{1/2}$ 曲线初始阶段线性拟合得到。本文所述及的毛细吸收系数均按式(3),拟合初始4 h吸水时间范围内曲线斜率得到。

## 2 毛细吸水装置

Hall<sup>[7]</sup>在考虑水的重力影响情况下,提出了三种一维毛细吸水方式,如图2所示。

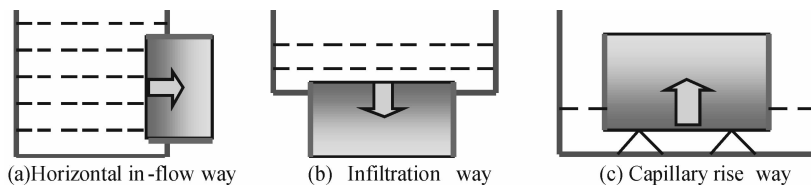


图2 混凝土毛细吸水试验测试示意图

Fig. 2 Test schematic plan of concrete capillary suction

图2中(a)为侧吸法,该吸水方式避免了水的重力对毛细吸水影响,但同时引入了静水压力的影响;(b)为上吸法,受毛细和重力的双重作用;(c)为下吸法,此时水沿毛细孔隙上升,重力的作用与毛细吸附力刚好相反。对大多数非饱和的建筑材料来说,毛细作用是水进入材料内部的主要推动力。同时,考虑测试方法的简便性,多数的研究者倾向于选用下吸法。本文亦采用下吸法进行相关的试验研究。

## 3 试件制备与试验程序

### 3.1 原材料和配合比

本试验选用的原材料包括:青岛山水水泥厂生产的42.5级普通硅酸盐水泥,细度为342 kg/m<sup>2</sup>,各项指标符合标准要求;粗骨料选用粒径为5~25 mm连续级配花岗岩质碎石;细骨料为最大粒径5 mm的青岛大沽河砂,细度模数2.9;拌合水为普通自来水;外加剂为一种聚羧酸型高效减水剂。混凝土基准配合比及28 d立方体抗压强度见表1。

表1 混凝土配合比和28 d立方体抗压强度

Tab. 1 Concrete mix and cubic compressive strength at 28 d

Name	Water cement ratio	Raw material / kg · m <sup>-3</sup>					Strength / MPa
		Cement	Sand	Stone	Water	Water reducer	
A	0.4	380	627	1269	152	5.7	50.2
B	0.5	320	653	1267	160	3.2	39.5
C	0.6	300	699	1191	180	/	32.6

### 3.2 试件制作

浇筑的试件为边长100 mm立方体试块。成型24 h后脱模,放入标养室((20±2)℃、RH≥95%)中养护。为不影响硬化后混凝土表面吸水效果,浇筑时使用水性脱模剂。养护龄期28 d后取出试块,沿试

块成型面中线切割成尺寸为  $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 50\text{ mm}$  的试件,洗净后放在实验室中备用。

### 3.3 毛细吸水过程

根据 Bamforth<sup>[9]</sup> 提出的吸水试验程序,即在吸水试验前,将试块放入电热鼓风干燥箱干燥至恒重,再把试块放入干燥皿中冷却,最后用石蜡密封除切割面及相对面(吸水面)之外的四个侧面。除环境温度为  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  的吸水试验在一般实验室进行外,其他吸水试验均安排在收缩实验室中进行。收缩实验室的室内温度设置为  $(20 \pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,湿度为  $(50 \pm 2)\%$ ,由恒温恒湿空调设备控制。

采用精度为  $0.01\text{ g}$  的电子天平称量试块吸水前的重量后,将试块的吸水面向下,置于盛水容器中的玻璃棒上,然后缓慢地向容器内加水直至标记的高度。吸水试验使用的水应在试验环境下存放 12 h 以上。在加水的同时记录加水的起始时间,然后间隔  $0.5\text{ h}$ 、 $1\text{ h}$ 、 $2\text{ h}$ 、 $4\text{ h}$ 、 $8\text{ h}$ 、 $12\text{ h}$  和  $24\text{ h}$  将试块取出,用湿润的布吸走试块表面的明水,迅速称量试块的重量。试块从盛水容器中取出到重新放入的时间应控制在  $30\text{ s}$  之内。每一种情况下的吸水以 3 个试块为一组,取其平均值作为该时刻的试块吸水量。混凝土的毛细吸水试验装置如图 3 所示。

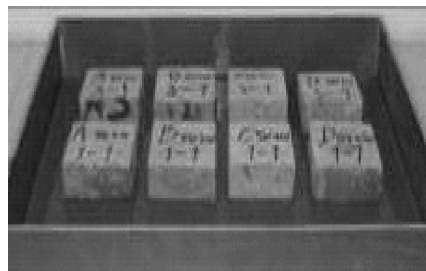


图3 混凝土毛细吸水装置图

Fig. 3 Set-up of concrete capillary suction

## 4 试验结果与讨论

### 4.1 水灰比对混凝土吸水率的影响

水灰比是反映混凝土渗透性和密实性的综合指标。混凝土毛细吸收系数与混凝土的孔隙率、孔径大小和分布有关。Gerdes<sup>[10]</sup> 指出,从理论上讲,混凝土水胶比越低,孔隙半径越小,混凝土的吸水能力越低;反之,水胶比越高,混凝土吸水能力越强。图 4 和图 5 分别为混凝土吸水量与吸水时间平方根关系曲线以及经线性拟合出的吸收系数与水灰比的关系曲线。可以看出,水灰比对混凝土的吸水能力影响显著。水灰比从  $0.4$  增加到  $0.5$ 、 $0.6$ ,混凝土的  $4\text{ h}$  吸水量分别增加  $20.8\%$  和  $70\%$ ,  $24\text{ h}$  的吸水量分别增加  $18.4\%$  和  $89.1\%$ 。在水灰比较低时,毛细吸收系数增加趋势较为平缓;水灰比较高时,毛细吸收系数增加较快。其主要原因是水灰比增大以后,不仅混凝土总孔隙率变大,增强了混凝土对水的吸收和容水能力;而且混凝土微观孔结构发生根本变化,孔径变大,有害孔数量增多以及孔径增大增多后使孔连通性增强,导致混凝土的吸水能力增加。

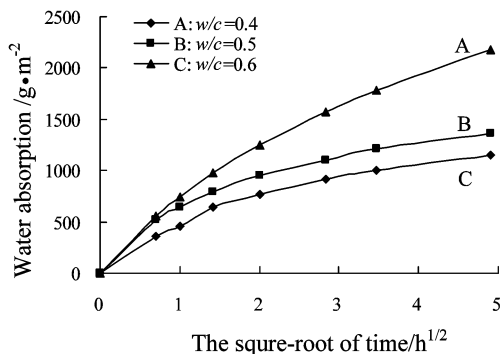


图4 不同水灰比混凝土吸水量与吸水时间平方根关系曲线

Fig. 4 Curves of cumulative water absorption and  $t^{1/2}$

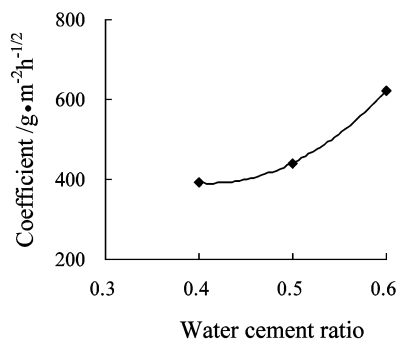


图5 吸附系数与水灰比拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of absorption coefficient with W/C

### 4.2 干燥温度对混凝土吸水率的影响

在毛细吸水试验前,一般要求混凝土处于完全干燥状态。因此混凝土的烘干是毛细吸水试验中非常关键的一个环节,具体涉及到混凝土烘干温度、烘干时间以及达到完全干燥状态的判断标准。设置的烘干温度高,混凝土的干燥时间短,但过高的烘干温度会改变混凝土的毛细孔结构;设置的烘干温度低,干燥时间较长。在判断混凝土达到干燥状态时,往往采用称重法,即混凝土质量稳定时认为达到了干燥状态。

为了解混凝土在干燥过程中的失水情况,随机取出 B 组 12 个试块,真空饱水后分两批置于  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、

60℃、80℃和105℃电热鼓风烘箱中,间隔一定时间称量试块的重量.初始饱水重量与每次称得重量差值为混凝土的失水量,将失水量与初始饱水重量的比值,定义为混凝土烘干失水率.则混凝土烘干失水率与时间的变化曲线如图6所示.可以看出,混凝土失水过程主要表现为前期较快,后期趋于平缓.这与表层混凝土自由水失去相对容易,而内部水分的逸出较慢有关.另外,随着烘干温度的升高,混凝土的失水速度加快,同一烘干时间对应的失水率依次增大.如果定义试块烘干失水率变化小于0.1%时试块重量达到稳定,则40℃、60℃和80℃烘干温度下的重量稳定的时间约为7~8天,105℃烘干温度下的重量稳定的时间约为5d.

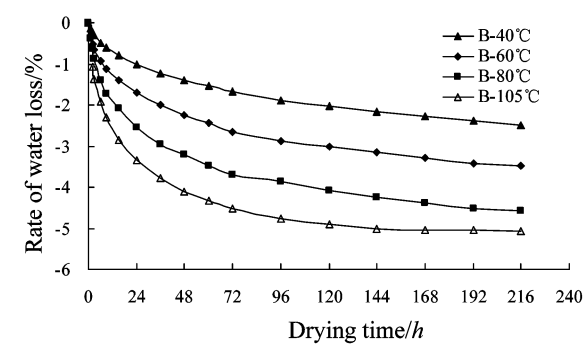


图 6 混凝土烘干失水率-时间变化曲线  
Fig. 6 Curves of water loss rate and drying time

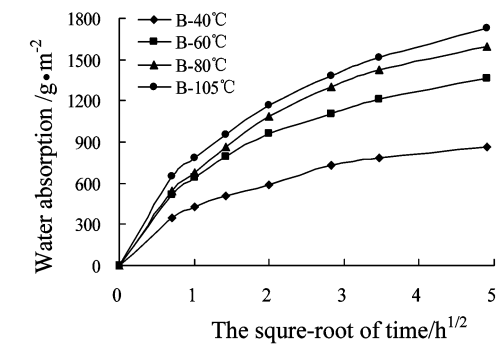


图 7 混凝土吸水量与吸水时间平方根关系曲线  
Fig. 7 Curves of cumulative water absorption and  $t^{1/2}$

为使试验结果具有可比性,混凝土试块在四种温度下的烘干时间统一为7天.图7为经不同温度烘干后混凝土吸水量与时间平方根关系曲线.表2列出了混凝土的毛细吸收系数.可见,不同烘干温度下,混凝土干燥程度不同,毛细吸收系数也表现出较大差异.如果以60℃烘干温度下的毛细吸收系数为参照标准,烘干温度降低20℃,混凝土的毛细吸收系数减少39%;烘干温度依次增加20℃,混凝土的毛细吸收系数增大14%和17%.即混凝土毛细吸收能力受混凝土自

表 2 混凝土经不同温度烘干 7 d 后毛细吸收系数

Tab. 2 Capillary absorption coefficient of concrete after drying for 7 d

Drying temperature /℃	40	60	80	105
Absorption coefficient / $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1/2}$	289.38	471.57	538.69	619.80

身的干燥程度影响较大.混凝土愈干燥,外界的水和侵蚀性介质愈容易进入混凝土内部.但烘干温度在80℃以上时,混凝土毛细吸收能力增加更主要与其微观孔结构的改变有关.文献[11]采用压汞的试验方法研究了30℃、50℃和110℃三种干燥温度下混凝土孔径分布,30℃干燥温度下混凝土最可几孔径为0.08μm,110℃干燥时最可几孔径增大为0.2μm,其最可几孔径增大了近3倍.上述试验表明较高的烘干温度会改变混凝土的微观结构,增大混凝土的毛细孔孔径、孔隙率以及孔的连通情况,使混凝土的吸水能力显著增强.因此,在进行毛细吸水试验时,要选择同一烘干温度和烘干时间,控制试件的最高烘干温度,尽可能减少烘干条件差异对混凝土吸水性的影响.

4.3 水浸没深度对混凝土吸水性能的影响

水的重力是影响混凝土吸水性的的重要因素. Hall 在式(1)基础上,引入吸水时间  $t$  的一次项,来考虑水的重力对混凝土吸水的影响.为探究水的重力对混凝土吸水性的影响规律,设计了2mm、5mm和10mm三种水的浸没深度.表3列出了A、C配比混凝土在不同浸没深度吸收系数.可以看出,当水的浸没深度从2mm增加到5mm时,混凝土吸收系数增加趋势较缓,为7.1%和13.9%;当浸没深度达到10mm时,相对于2mm水的浸没深度,混凝土A和C的吸收系数分别增加39.6%和49.8%.从毛细吸水原理可知,在浸没深度范围内水的吸入受到了毛细力和静水压力的双重影响,静水压力促进了混凝土对水的吸入.浸没深度越大,初始的吸水速度和吸入深度越高.另外,浸没深度对水灰比较高的混凝土毛细吸收的影

表 3 不同浸没深度混凝土吸收系数

Tab. 3 Capillary absorption coefficient of concrete for diffient submerged depth / $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1/2}$

Name	Submerged depth		
	2 mm	5 mm	10 mm
A	391.44	419.12	546.5
C	621.68	707.91	931.54

响程度更大. 因此, 根据本文的试验结果和已有的研究, 建议水的浸没深度控制在 5 mm 范围内.

#### 4.4 环境温度、湿度对混凝土吸水性能的影响

混凝土吸水试验时, 要受到周围环境温度和湿度的影响. 实际环境下的工程结构, 混凝土内部微环境温湿度又受外部大气环境的影响, 最终达到一个动态的平衡. 为了解环境温度和湿度对混凝土吸水性的影响, 本文安排三组试验, 其中一组在普通实验室内进行, 由于试验恰逢冬季, 室内自然环境的温度为  $(5 \pm 2)^\circ\text{C}$ , 试验过程中大气相对湿度在 50%~62% 之间变化; 另外两组分别在两个收缩实验室内同时进行, 试验环境温度均设置为  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ , 湿度分别设置为 50% 和 70%. 试验结果表明, 在湿度差别不大的情况下,  $5^\circ\text{C}$  毛细吸收系数为  $406.9 \text{ g/m}^2 \text{ h}^{1/2}$ ,  $20^\circ\text{C}$  时为  $471.6 \text{ g/m}^2 \text{ h}^{1/2}$ , 约增加 15.9%. 即环境温度升高促进了混凝土对水的毛细吸收. 当相对湿度从 50% 变化到 70%, 混凝土的吸收系数变化为  $486.7 \text{ g/m}^2 \text{ h}^{1/2}$ , 即空气相对湿度提高, 混凝土毛细吸附系数也略有提高, 约增加 3.2%. 根据混凝土毛细吸收系数计算公式(2), 不同温度下混凝土吸水性与  $(\sigma/\eta)^{1/2}$  值成比例关系, 经理论计算可得,  $5^\circ\text{C}$  时  $(\sigma/\eta)^{1/2}$  值为  $7.02 \text{ m}^{1/2}/\text{s}^{1/2}$ ,  $20^\circ\text{C}$  时  $(\sigma/\eta)^{1/2}$  值为  $8.49 \text{ m}^{1/2}/\text{s}^{1/2}$ , 则理论计算的毛细吸收系数提高 21%, 比试验实测的毛细吸收系数稍大 5%. 本文认为与普通实验室环境下温度和湿度不断变化, 而且环境平均湿度要高于收缩实验室设置的湿度有关.

## 5 结 论

通过以上分析, 可以得出以下结论:

(1) 混凝土的吸水性是混凝土固有的属性. 水灰比大小对混凝土的吸水能力影响显著, 毛细吸收系数随着水灰比增加而增加. 水灰比越大, 实际环境下外部侵蚀性介质越容易侵入混凝土内部.

(2) 试验环境条件对混凝土的吸水性产生重要的影响. 按照影响的程度大小, 依次为混凝土烘干温度、环境温度、水浸没试块的深度以及环境的相对湿度. 在进行吸水试验时, 应控制混凝土烘干温度在  $60^\circ\text{C}$  以内, 水浸没试块的深度 2~5 mm 为宜. 试验环境温度升高会促进混凝土的吸水性, 但环境相对湿度变化对混凝土的吸水性影响不明显.

## 参考文献 References

- [1] 朱方之, 赵铁军, 张 鹏, 等. 冻融后表层混凝土的孔结构劣化与损伤特性研究[J]. 公路, 2011(12): 1-5.  
ZHU Fang-zhi, ZHAO Tie-jun, ZHANG Peng, et al. Study on deterioration of pore structure and damage property of surface concrete caused by freeze-thaw action[J]. Highway, 2011(12): 1-5.
- [2] 田 砾, 郭磊磊, 赵铁军, 等. 应变硬化水泥基材料轴拉荷载下的氯离子渗透[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2010, 42(2): 221-225.  
TIAN Li, GUO Lei-lei, ZHAO Tie-jun, et al. Research on Cl-ion permeability of strain hardening cement based composites (SHCC) under tensile load[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2010, 42(2): 221-225.
- [3] LOCKINGTON D, PARLANGE J Y, DUX P. Sorptivity and the estimation of water penetration into unsaturated concrete[J]. Materials and Structures, 1999, 219(32): 342-347.
- [4] 张 鹏. 水泥基材料内部水分运动的可视化成像追踪及其规律研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2010.  
ZHANG Peng. Visualization of water movement in cement-based materials and its characteristics[D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2010.
- [5] 王 经. 传热学与流体力学基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2007.  
WANG Jing. Foundation of Heat Transfer and Fluid Mechanics[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2007.
- [6] KELHAM S A. A water absorption test for concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 1988, 40(143): 106-110
- [7] HALL C. Watersorptivity of mortars and concrete: a review[J]. Magazine of Concrete Research, 1989, 41: 51-61
- [8] HALL C, RAYMOND M H. Water movement in porous building materials: The water absorption and sorptivity of concrete[J]. Building and Environment, 1987, 22(1): 77-82.
- [9] BAMFORTH P B. The water permeability of concrete and its relationship with strength[J]. Magazine of Concrete Research, 1991, 43(157): 233-241.

(下转第 636 页)

such test liquid plastic limit test, compaction test, strength test, contraction test and stability test. Feasibility of recycling old subbase material as lime, cement or lime-fly ash treated fine-grained soil is proved. Test results show that cement stabilized recycling lime-treated soil has similar physical properties as typical semi-rigid materials. The recycled material also illustrates good road-use properties and thus is suitable to be used as subbase. This is of significance both to the comprehensive utilization of cold pavement material and to the achievement of the maximum economic and social benefits.

**Key words:** *cold regeneration; materials; subbase; lime soil*

---

**Biography:** ZHANG Qian, Ph. D., Associate Professor, Xi'an 710055 P. R. China, Tel: 0086-13609129179, E-mail: zh22qs@126.com

---

(上接第 631 页)

- [10] GERDES A, WITTMANN F H. A new application technology for water repellent surface treatments[C]//Proc. Hydrophole II Int. Cont. on Water Repellent Treatment of Buildings Materials, Switzerland, Aedificatio Publishers, 1998:217.
- [11] SAKURADA Ryoji, MARUYAMA Kyu-ichi. Effect of Pore Structure on the Chloride-ion Diffusivity of Concrete [C]//Proceedings of the Beijing International Symposium on Cement and concrete, 1998:359-364.

## Discussion of the affecting factors on concrete sorption capacity

ZHU Fang-zhi<sup>1,3</sup>, ZHAO Tie-jun<sup>2</sup>, WANG Peng-gang<sup>2</sup>, MA Zhi-ming<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China;

3. Department of Building Engineering, Suqian College, Suqian 223800, China)

**Abstract:** Concrete sorption capacity is an important index of durability appraisal. The theory and measurement of capillary suction in the concrete were introduced. The effect of water-cement ratio, drying temperature, submerged depth, environmental temperature and relative humidity on sorption capacity in the concrete were investigated by the capillary rise test. The test results showed that water-cement ratio and drying temperature had significant effects on concrete sorption capacity. The submerged depth below 5 mm had little effect on it. The increase of the environment temperature and relative humidity could promote the concrete sorption capacity. The sensitivity of the environmental temperature on the sorption capacity was higher than that of the relative humidity.

**Key words:** *sorption capacity; drying temperature; environmental temperature; relative humidity; durability appraisal*

---

**Biography:** ZHU Fang-zhi, Associate Professor, Ph. D., Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-527-84203115, E-mail: fzzhu@sqc.edu.cn