

基于非饱和试件的混凝土水分传输评定^①

童 慧 芝

浙江同济科技职业学院 建筑工程系, 杭州 311231

摘要: 混凝土是一种多孔材料, 水或空气可自由渗入混凝土, 降低了混凝土的耐久性. 混凝土抗渗性能是耐久性问题的主要影响因素之一, 多数研究集中在饱水混凝土的渗透系数和氯离子扩散系数方面, 实际上建筑工程多数处于非饱水状态, 混凝土水不饱状态也是影响抗渗性能的重要因素之一. 多数研究对试件进行切片研究, 费力费时, 受试验方式方法环境等影响大, 也不能做到实时、全寿命监测. 该文通过施加水压, 从混凝土表面渗入压力水到钢筋骨架附近, 研究了非饱和状态下混凝土内部的水分传输监测装置, 水分迁移评价方法. 研究表明, 45%初始饱和度以下混凝土可以采用电阻法进行全寿命监测. 低水平荷载下, 既定深度处水分到达时点与荷载水平成反比.

关 键 词: 非饱和试件; 混凝土; 抗渗性能评价; 水分传输; 电阻法

中图分类号: TU528.31

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2018)05-0121-06

混凝土是一种三相多孔复合材料, 孔隙为外界物质在混凝土内部迁移创造了条件, 尤其是数量众多且连通的孔隙. 水分传输为外界物质进入混凝土提供了传输媒介, 在混凝土性能劣化过程中起着至关重要的作用^[1]. 水分子的直径在一个纳米左右, 大水分子一个数量级以上的孔隙为水分子通过提供了条件^[2]. 按照孔径大小可以分为 50~100 nm 之内的毛细孔和大于 100 nm 以上的大孔. 水分子的表面张力使得干燥毛细孔内水分在没有外界压力情况下也得以传输, 称为毛细作用, 混凝土初始饱和度决定了毛细作用的程度. 大孔内的水分传输主要以外界水压力为动力. 服役时混凝土内部孔隙特征发生变化, 尤其在拉应力的作用下, 混凝土内部容易产生微损伤, 使得内部孔隙形态和孔径特征都产生劣化^[3-4]. 浪溅区梁板等包含受拉区的构件就处于这样的服役环境之中, 干湿循环加速了外界物质在混凝土内部的迁移.

研究者们采用了电压法、压气法、水压法、氯离子扩散法配合混凝土切片等等试验方法来对混凝土抗渗性能进行研究, 然而大部分的研究不能做到无损、实时、全寿命监测, 其试验方法步骤繁多也容易受到试验过程中操作、环境的污染和影响^[5-8].

混凝土弹性模量低, 变形性能差, 其较差的抗拉性能是现代钢筋混凝土结构中钢筋存在的主要原因. 混凝土开裂之前应力应变呈直线关系, 混凝土内部微裂纹已经受到了诱导而影响到了混凝土的耐久性.

基于上述原因, 本文通过对不同初始饱和度的混凝土施加较低水平荷载, 探寻水压作用下水分传输监测和判定的方法, 研究低水平荷载对混凝土水分传输性能的影响.

1 水分传输理论

水分在水泥基材料中的迁移主要包括压力梯度下的渗透和液体表面张力作用下的毛细吸水过程, 两者都是压力引起的水分传输.

① 收稿日期: 2017-05-09

基金项目: 2015 年度浙江省水利厅科技项目(编号 RC1551); 2013 年度浙江省水利厅科技项目(RC1466).

作者简介: 童慧芝(1983-), 女, 硕士, 讲师, 主要从事混凝土材料及结构方面研究.

研究表明,混凝土孔隙水饱和度和电阻存在相关关系^[9],相关系数达到 0.9 以上,可以用混凝土电阻来表征孔隙饱和度随时间的变化情况,从而对水分传输情况进行定量的判断. 根据本试验材料,混凝土电阻和含水率相关关系如图 1 所示. 混凝土电阻和相对含水率各自呈现出指数函数曲线特征,相互之间存在反比关系.

2 试验方案

2.1 试件制备及养护

混凝土结构设计规范中耐久性设计规定,结构混凝土材料最大水胶比一类环境不超过 0.60,二类环境不超过 0.55,三类环境不超过 0.45. 本试验采用混凝土水灰比值为 0.55,控制塌落度为(150±10) mm,以保证试验时具有较为相近的密实程度. 试件成型后放入 20℃水中养护 28 d,使混凝土充分水化. 28 d 后分两批制备两种初始饱和度,一批 6 只放入烘箱在 50℃下烘干 4 d,以模拟高温干旱天气数日后试件的干燥程度. 另一批 6 只放入温室交变养护箱养护一周,温度 20℃,相对湿度为 55%,以模拟南方潮湿的气候. 制作同配合比 100 mm×100 mm×100 mm 试件各 3 个,在各养护程序后称质量,最后 105℃烘干至恒定质量,获得各状态下的初始饱和度.

混凝土材料如表 1 所示,混凝土配合比如表 2 所示:

表 1 混凝土材料

材料	性 能
水 泥	安徽宁国水泥厂产的 P·Ⅱ 525R 型普通硅酸盐水泥; 表观密度 3 100 kg/m ³
细骨料	河砂,细度模数 3.00,表观密度 2 654 g/cm ³
粗骨料	碎石,石子粒径 5~10 mm,堆积密度 1 493 g/m ³ 表观密度 2 710 g/m ³ ,空隙率 44.73%
减水剂	聚羧酸盐系高效减水剂,减水率 25%

表 2 混凝土试验实际配合比表格(1 m³)

NO	W/C	S/A	C/kg	W/kg	S/kg	G/kg	SP×C/%	Slump/mm
OP-55	0.55	0.37	329	181	671	1143	1.4	160

1.2 试件规格与相关参数

本研究试件尺寸为 90 mm×100 mm×400 mm,采用图 2 方法对试件进行加载. 为了防止混凝土出现脆性断裂,在混凝土中部进行加筋加固,这样处理既不影响构件开裂的发生,又能够避免试验过程中的突然断裂. 为了使荷载能够在指定区域集中,在构件中部埋设 5 mm 厚 PVC 板,拆模时去除. 研究混凝土未开裂时荷载水平和水分传输之间的关系,包括了 4 种荷载水平: 0Pcr,0.3Pcr,0.5Pcr,0.7Pcr, Pcr 为试件的开裂荷载.

为了在整个加压阶段都能监测到水在混凝土中的迁移,在深度 20,30,40 mm 处埋置铜电极,并检测水平触点之间的电阻,如图 3 所示.

制备 100×100×100 mm³ 同配比混凝土试件 6 只,同条件养护 28 d 后进行抗压强度试验,其强度平均值为 50.8,相当于混凝土标号约为 C45 混凝土强度. 制备 90×100×400 mm³ 同配比混凝土试件 6 只,并同制度养护,对其进行抗折强度试验,获得开裂荷载均值为 12.4 kN.

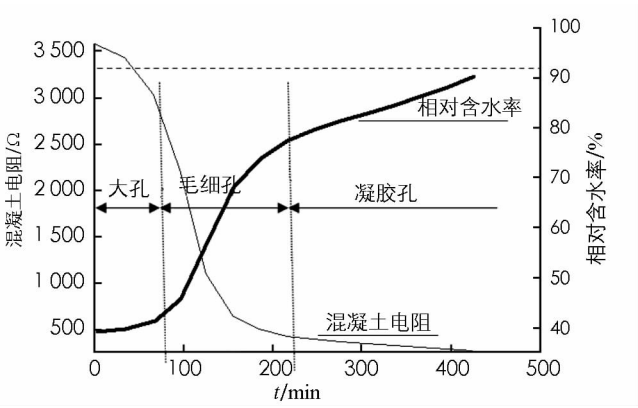


图 1 1.1 MPa 水压下,初始饱和度 45%, W/C0.65 混凝土 30 mm 渗水深度处混凝土电阻与相对含水率变化图

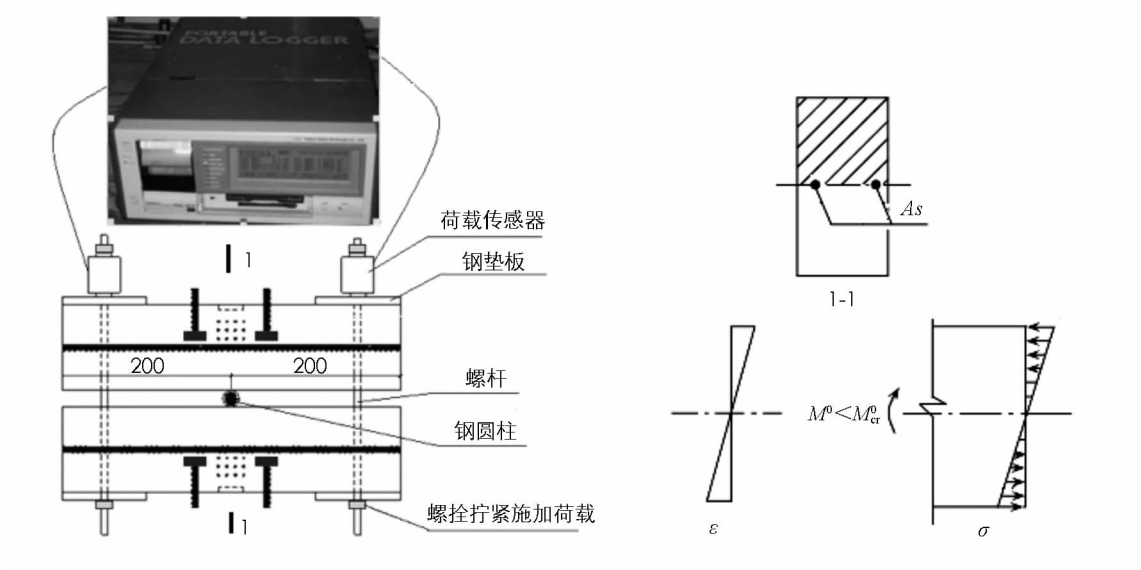


图 2 试件加载方式及应力应变分析

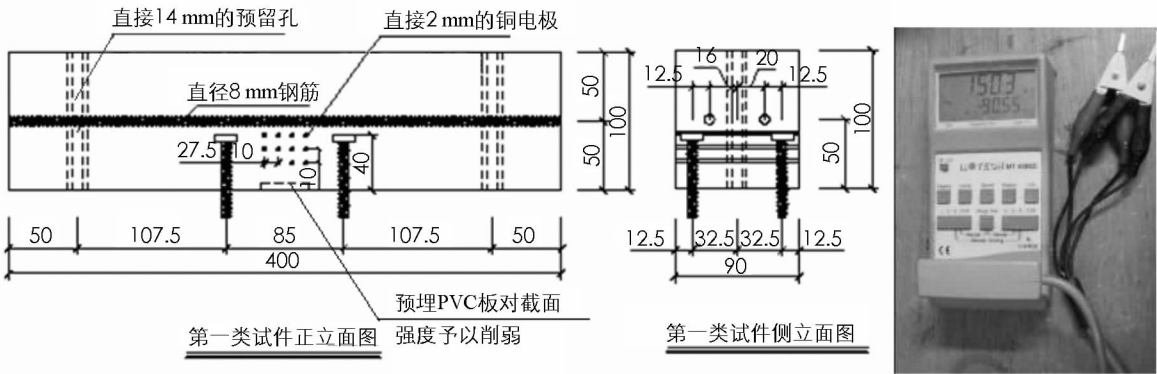


图 3 渗透性能测定试件正立面与侧立面图(单位: mm)

3 结果及讨论

3.1 不同饱和度下混凝土电阻初始值分布曲线与讨论

各制度下养护结束后, 将试件用塑料膜包裹密封冷却到室温再进行试验. 混凝土从饱和水养护环境到 55%RH 养护环境和烘干环境, 都经历了不同程度的干燥过程. 通过 100 mm×100 mm×100 mm 同配比试件平行检测, 以水养护饱和状态的饱和度为 100%, 以 105 ℃烘干至恒定质量饱和度为 0%, 测得 50 ℃烘干 4 d 平均初始饱和度为 45%, 55%RH 养护一周时平均初始饱和度为 78%. 对各加载条件下混凝土初始值进行汇总, 如图 4、图 5 所示.

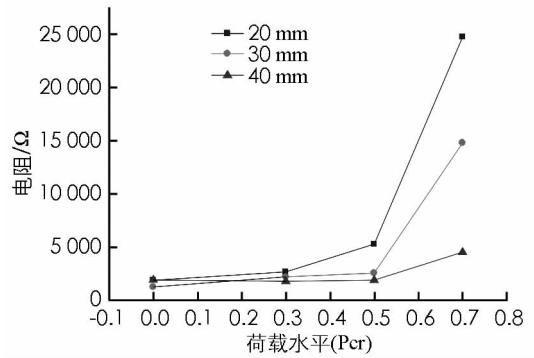


图 4 饱和度 45%混凝土初始值

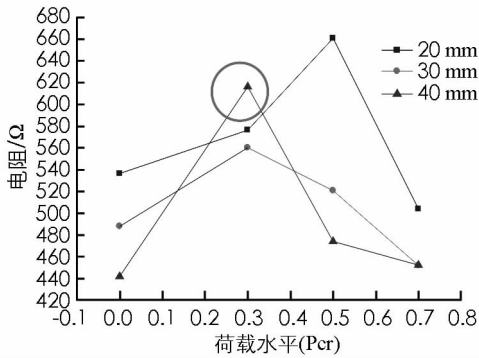


图 5 饱和度 78%混凝土初始值

无论哪种养护机制下的混凝土, 除个别值外大多数电阻值和深度成反比, 这符合干燥过程水分的单向扩散机理, 离混凝土表面越近, 水分越容易扩散, 含水率越低则电阻值越低。

比较 2 种养护机制下混凝土电阻初始值, 饱和度虽然差异不大, 电阻值却差别了一个数量级, 放在图 1 中来看却是一致的。随着荷载增加, 两组混凝土电阻值随荷载比的变化呈现出完全不同的特征。在饱和度 45% 时, 电阻初值随荷载增加而增加, 在 0.3 Pcr 时变化还不太明显, 到了 0.5 Pcr 及以上, 电阻初值迅速增长, 且随深度增加而减少, 说明荷载诱导了混凝土内部微裂隙的扩展。值得注意的是, 荷载小于混凝土开裂荷载时, 理论上应力应变关系还处于弹性阶段, 若以电阻来反映应变值的变化, 可知此时电阻和应力的关系不再是直线关系, 而是表现为一定的指数增长特征。

在 78% 饱和度时, 总体来说混凝土电阻变化较小, 在 0~0.3 Pcr 也呈现出加大的趋势, 但在 0.5 及以后却随荷载增加而降低。这种变化是由经诱导的微裂缝引起的, 在饱和度较低时, 帮助导电的水分较少, 裂隙引起的电通路断裂成为影响电阻变化的主要因素。在饱和度较高时, 孔隙水分较高, 随着微裂缝的扩展呈现出连通、迁移的变化特征, 这补偿了微裂缝扩展带来的电阻增长, 甚至降低了电阻值。因此, 在高饱和度混凝土中, 孔隙水成为电阻值的决定因素, 电阻法和荷载水平引起的裂隙增加相关性较差。

3.2 不同初始饱和度对水分传输的影响

对两组试件进行加载, 施加 1.0 MPa 水压, 每隔 30 min 用手持式 LCR 电桥对电阻进行测定, 在不同荷载水平下曲线有一定相似性, 因此以 0.7 Pcr 组为例进行分析(图 6)。

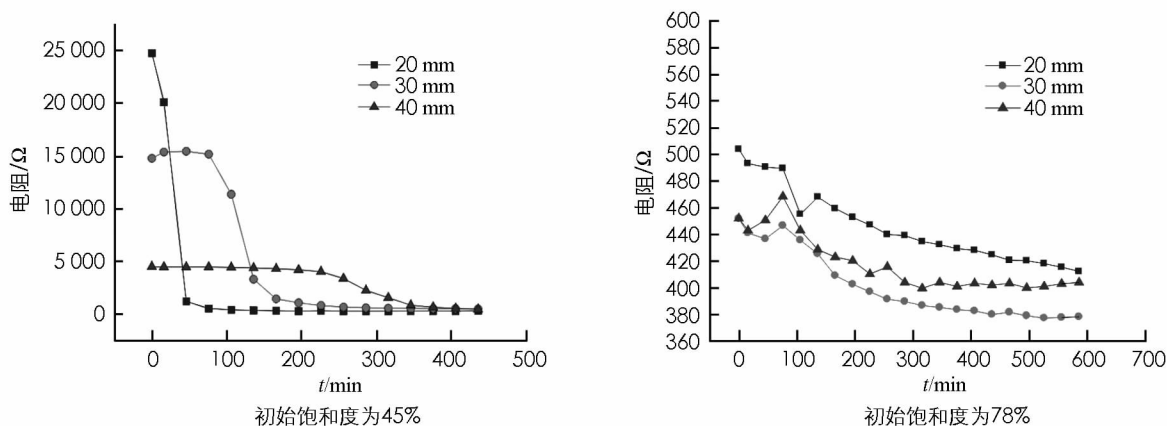


图 6 0.7 Pcr 荷载下各深度处电阻随时间变化图

图 6 表明, 初始饱和度 45% 时混凝土水渗透引起的电阻变化特征明显, 反映了孔隙水在既定深度孔隙内逐渐充盈的水分迁移特征。初始饱和度 78% 时, 电阻也随时间增加而降低, 但温度、湿度及试验过程中的外界扰动对电阻变化影响更大。饱和度较高时, 压力水在混凝土孔隙内的迁移是连续的, 电阻法不能表征水分的迁移和变化。因此, 下文将着重讨论电阻法监测低饱和度混凝土渗透性的方式方法。

从曲线变化特征来看, 55% 组在水压作用下, 在 20, 30, 40 mm 处分别不同点反映水分传输经历了 3 个阶段, 第一阶段水分传输前锋(水蒸气)到达时引起的混凝土电阻缓慢降低, 此时孔隙内未饱和部分湿度增加。第二阶段在毛细压力和水压力的作用下, 水分急速充满连通孔隙, 引起电阻急剧降低。此时压力水渗透到各处出现了明显的颜色较深的水痕。到接近饱和时为第三阶段, 此时孔隙内部水在压力作用下逐渐充满连通孔及部分封闭孔, 电阻变化非常缓慢。这跟前人对混凝土相对湿度和电导率变化特征的研究一致^[10-13]。

3.3 饱和度 55% 混凝土电阻变化情况

图 7 反映了荷载水平、渗透深度和电阻随时间的曲线关系。整体来看, 电阻变化趋势相同, 当压力水尚未到达监测点时, 电阻保持恒定, 水分前锋到达时, 电阻开始下降, 直到孔隙充满压力水, 电阻值又达到稳定。其中, 荷载水平为 0.3 倍开裂荷载的试件, 30 mm, 40 mm 深度处的电阻值在试验开始时就较快地下降, 这是因为混凝土作为一种非均质各向异性的材料, 内部孔隙分布特征可靠性不是很高, 受到混凝土浇筑、养护、内部石子不均匀分布等试验因素的影响。可以推测, 这个试件内部存在着较大的连通孔隙直达水压面, 当压力水作用时, 大的连通孔较快充满水分, 电阻值迅速降低。接着, 较细微的连通孔隙逐渐

饱和，最终达到恒定。

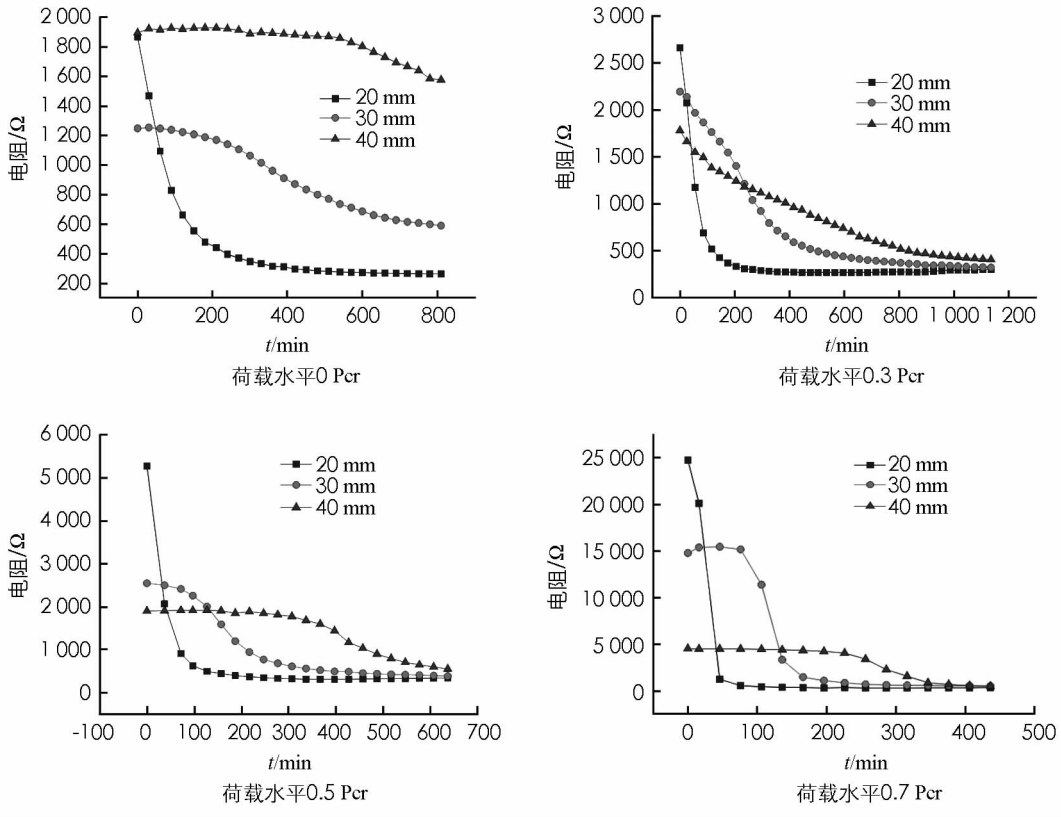


图 7 各荷载水平下混凝土电阻变化图

3.4 荷载水平对水分传输的影响

为了研究水分传输与荷载水平和深度之间的关系，取电阻变化的拐点作为压力水到达时点. 试验中也发现，拐点时点附近出现了颜色较深的压力水头. 将此拐点和荷载水平、深度关系绘图如图 8 所示.

由图 8 可知，在压力水作用下，水分在混凝土的传输与荷载水平存在显著的正比关系，荷载越大，压力水传输得越快. 虽然荷载控制在混凝土开裂荷载以内，拉应力区混凝土抗渗能力仍然下降显著，这说明在达到临界应力之前，混凝土内部微裂纹随着弹性变形的增加出现扩展的情况. 这种扩展或许是弹性的，或许是塑性的，它们的扩展和水分传输方向垂直，荷载增加，使得原本闭合的内部裂隙张开，一些脆弱的边界、封闭孔也因此打开，水分在孔隙内迁移速度加快，最终导致电通量增加.

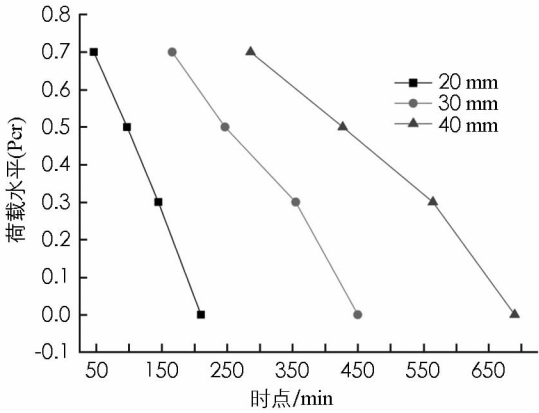


图 8 水分到达时点曲线图

3 结 论

- 1) 混凝土初始饱和度小于 45% 时，可以用电阻法全寿命监测混凝土内部水分的传输。
- 2) 初始饱和度大于 78% 时则不适用。这是由于初始饱和度较高时，压力水不是以孔隙水充盈为主，而是以迁移为主，那么依赖于孔隙水饱和度的电阻监测法就不再适用。
- 3) 水分的迁移与荷载水平成正比，深度越深，影响越大。试验采用的荷载为低水平荷载，实际工程中的受弯构件是带裂缝工作的，混凝土内部的裂缝扩展要剧烈得多，这说明服役混凝土的抗渗性能受到荷载条件的影响，需将荷载作为一个重要变量反映在抗渗指标中。

参考文献:

- [1] 沈春华, 水中和, 周紫晨. 水泥基材料水分传输及动力学研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2007(9): 84—87.
- [2] BAROGHEL-BOUNY V. Caraceterisation Des Pates De Ciment Et Des Betons-Methods, Analyses Et Interpretations [C]. Paris: Laboratoire Central des Ponts et Chaussees, 2004.
- [3] BAZANT Z P, NAJJAR L J. Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete [J]. Materiaux et Cunstructions, 1972, 25(5): 3—20.
- [4] GRIEB W E, WERNER G. Comparison of the Splitting Tensile Strength of Concrete with Flexural and Compressive Strengths [J]. Public Roads, 1962, 32(5): 97—106.
- [5] PICANDET V, KHELIDJ A, BASTIAN G. Effectof Axial Compressive Damage on Gas Permeability of Ordinary and High-Performance Concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(8): 1525—1532.
- [6] JIN Zu-quan, ZHAO Tie-jun, GAO Song, et al. Chloride Ion Penetration into Concrete Under Hydraulic Pressure [J]. J Cent South Univ, 2013, 20(12): 3723—3728.
- [7] ZHOU Chun-shen. Predicting Water Permeability and Relative Gas Permeability of Unsaturated Cement-Based Material from Hydraulic Diffusivity [J]. Cement and Concrete Research, 2014, 58(2): 143—151.
- [8] YOO J H, LEE H S, ISMAIL M A. An Analytical Study on the Water Penetration and Diffusion into Concrete Under Water Pressure [J]. Construction and Building Materials, 2011(25): 99—108.
- [9] 刘志勇, 詹镇峰. 混凝土电阻率及其在钢筋混凝土耐久性评价中的应用研究 [J]. 混凝土, 2006(10): 13—16.
- [10] McCARTER W J, WATSON D W, CHRISP T M. Surface Zone Concrete: Drying, Absorption, And Moisture Distribution [J]. J Mater Civ Eng, 2001, 13(1): 49—57.
- [11] 李春秋, 李克非. 干湿交替下表层混凝土中水分传输: 理论、试验和模拟 [J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(7): 1151—1159.
- [12] LI Chun-qi, LI Ke-fei, CHEN Zhao-yuan. Numerical Analysis of Moisture Influential Depth in Concrete and Its Application in Durability Design [J]. Tsinghua Science and Technology, 2008, 13(S1): 7—12.
- [13] 彭 智, 金南国, 金贤玉. 混凝土水分扩散表面因子理论模型与验证 [J]. 浙江大学学报, 2010, 44(10): 2010—2015.

Concrete moisture transport tests based on non-saturated specimens

TONG Hui-zhi

Department of Construction Engineering, Zhejiang Tongji Vocational College of Science and Technology, Hangzhou 311231, China

Abstract: Concrete is a porous material, water or air can corrode concrete freely that reduced the durability of concrete. The permeability, one of the most important influence factors of concrete durability, was studied based on water saturated state mostly by water coefficient and chloride diffusion coefficient according extensive literature. Actually, most constructions are serving under unsaturated state, the unsaturation should be considered as one important factor that affects the permeability of concrete. And most tests are implemented by slicing the concrete specimens, it costs huge time and procedures, and the results are influenced by the condition and the process easily, neither with realtime and whole service life monitoring. This paper discussed the water transportation evaluation system on unsaturated concrete by self-designed permeability monitoring system under water pressure with 1MPa. The result shows that it can be monitored under 45% relative saturation through whole service life. The water arrival time points are linearly dependent on the low level load.

Key words: unsaturated specimen; concrete; permeability prediction; water transprotation; resistance evaluation

责任编辑 夏 娟