

文章编号:1007-9629(2011)03-0287-06

水泥净浆、砂浆及混凝土早期收缩 与内部湿度发展分析

张 君^{1,2}, 陈浩宇², 侯东伟²

(1. 清华大学 结构工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084;

2. 清华大学 土木工程系, 北京 100084)

摘要: 采用早龄期混凝土变形与内部湿度测量装置, 测量了水泥净浆、砂浆和混凝土的自由变形及内部湿度变化规律. 结果显示: 水泥净浆、砂浆和混凝土早期变形均具有先膨胀后收缩的特征, 膨胀结束点之后的变形为有效变形; 3 种水泥基材料的早期收缩随龄期的发展遵循双阶段模式, 即早期的快速发展期(阶段 I)和随后的缓慢发展期(阶段 II); 在阶段 I, 3 种材料收缩差异不大, 骨料对收缩变形的约束作用主要体现在阶段 II; 最终混凝土收缩最小, 砂浆次之, 水泥净浆最大. 从浇筑开始, 材料内部湿度经历早期的水气饱和期(相对湿度 $RH=100\%$)和随后的湿度下降期, 湿度下降的起始点基本与收缩发展阶段 II 起始点对应, 表明阶段 II 的收缩与内部湿度下降密切相关. 收缩变形的双阶段模式及其与湿度发展的对应关系揭示了水泥基材料早期变形机制由化学减缩控制到湿度控制的转换过程.

关键词: 水泥净浆; 砂浆; 混凝土; 收缩; 内部湿度

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2011.03.001

Development of Shrinkage and Internal Moisture in Cement Paste, Mortar and Concrete at Early Age

ZHANG Jun^{1,2}, CHEN Hao-yu², HOU Dong-wei²

(1. Key Laboratory of Structural Safty and Durability of China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The development of free deformation and internal moisture in cement paste, mortar and concrete were experimentally investigated. The results show that the deformations of cement paste, mortar and concrete at early age all exhibit plastic swelling at initial several hours after casting and then shrinking with a gradually reduced rate. The end point of swelling may be corresponding to the transformation point of plastic state to solid state and this point can be defined as setting time of the cement based materials. The development of shrinkage starting from setting point of the three kinds of cementitious materials exhibits at first a fast developing stage(stage I) and is followed by a relatively slow developing stage(stage II). The restraint effect of aggregates on shrinkage is significant only in the stage II. In stage I a similar shrinkage values are observed on the three kinds of materials. The development of moisture inside cement paste, mortar and concrete can be described as a vapor saturated stage with saturated moisture followed by a stage in that internal moisture is gradually reduced. The shrinkage developed within stage II can well correlate to the reduction of internal moisture.

收稿日期: 2010-01-25; 修订日期: 2010-03-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50978143); 国家重点基础研究发展规划(973 计划)项目(2009CB623200)

第一作者: 张 君(1962—), 男, 内蒙古通辽人, 清华大学教授, 博士生导师, 博士. E-mail: junz@tsinghua.edu.cn

Key words: cement paste; mortar; concrete; shrinkage; internal moisture

混凝土材料以其卓越的建筑性能成为目前应用最广、使用最成功的结构工程材料,而混凝土结构性能的衰退直到最终退出工作均与混凝土材料开裂有关。混凝土开裂大多发生在早期,拆模时就可以看见。开裂后沿裂缝渗入的水分将导致水泥石溶蚀、钢筋锈蚀,进而缩短结构的使用寿命。工程实践表明,混凝土结构的早期开裂大多是由非荷载因素引起的,结构内温度及水分变化会引发混凝土体积收缩,导致结构在约束条件下产生的拉应力大于材料抗拉强度,从而产生开裂。

尽管目前国内外对水泥基材料自身收缩和干燥收缩的研究较多^[1-7],但研究重点大多是自身收缩的测试方法以及材料配合比、矿物掺和料、环境温湿度等因素对收缩的影响。实际上,通过综合考察水泥基材料早期完整变形特征及其与湿度变化关系来揭示其变形形成机理的问题尚未解决,同时也鲜有对水泥净浆、砂浆和混凝土的上述问题进行系列研究的实验数据。早龄期混凝土由于湿度作用引起的收缩是水泥浆(硬化前)或水泥石(硬化后)的收缩变形和粗细骨料的限缩作用在宏观上的综合表现。水化开始,水泥浆体的体积变形即开始发生。完整考察其早期变形过程可以发现,早期水泥浆体的变形机制并非由单一主导因素控制,而是经历了前、后期之间的转变过程。在塑性阶段及硬化之初,混凝土收缩变形主要是化学减缩作用的宏观表现,在这一阶段,混凝土的内部湿度基本处于饱和状态;随着水化和水泥石硬化程度的提高,化学减缩作用对混凝土宏观收缩的贡献逐渐减小,而湿度降低引起的毛细张力作用逐渐成为混凝土收缩的控制因素,相应地在此阶段可观测到混凝土内部湿度开始下降。包括混凝土、砂浆、净浆在内的水泥基材料的早龄期收缩都符合类似的收缩机制转换过程,其中骨料的限缩作用则可能使得它们的收缩速率和收缩大小有所不同。

基于以上认识,本文同步测量了相同水胶比的水泥净浆、砂浆和混凝土的早龄期完整变形和内部湿度发展规律,分析了水泥基复合材料早期变形、内部水分变化与龄期的相关关系,考察了变形机制主导因素的转变过程,同时分析了粗细骨料对水泥石收缩的约束影响程度。

1 试验方案

1.1 原材料和配合比

金隅牌 P·O42.5 水泥,密度 3.1 g/cm³;破碎

石灰石,粒径 5~25 mm;天然砂,细度模数 2.64;内蒙元宝山发电厂生产的 I 级低钙灰。采用减水剂将水泥净浆和砂浆的流动度控制在 200 mm 左右(圆台试模),混凝土坍落度控制在 120~140 mm,减水剂为萘系普通减水剂。试验用水泥净浆、砂浆和混凝土的配合比如表 1 所示。

表 1 水泥净浆、砂浆和混凝土的配合比

Table 1 Mix proportions of cement paste, mortar and concrete

Material	m_w/m_b	Mix proportion/(kg·m ⁻³)				
		Cement	Water	Sand	Stone	Fly ash
Cement paste	0.43	1 035	555			255
Mortar	0.43	583	312	1 158		144
Concrete	0.43	345	185	685	1 090	85

1.2 混凝土自由变形与温湿度测量装置

试验采用 400 mm×100 mm×100 mm 的有机玻璃(PMMA)试模(见图 1)。紧贴试模四周端面预置可拔出的有机玻璃薄片,厚约 2 mm,混凝土浇注完成一段时间后,拔出试件四周的有机玻璃薄片,使试件处于无约束的自由变形状态;试模底部铺一层 1 mm 厚的聚四氟乙烯(PTFE)片以减小试件底面的摩擦阻力。混凝土的变形采用线性变形差动传感器测量,量程 2 mm,精度 1 μm。测量时为了保证传感器准确测得混凝土的真实变形,在混凝土试件两个端面中心处预埋铜质测头,其形状如图 1(b)所示。在铜质测头的一侧端面钻直径 2 mm,深约 5 mm 的螺纹孔,与 M 3×50 的细螺栓配合使用,并在有机玻璃试模端板中心处预留孔,试验时把细螺栓引出与位移传感器相接。

采用数字式温湿度传感器测量混凝土内部温湿度。湿度测量范围 0~100%,误差 2%~3%;温度测定范围 0~120 °C,误差±0.5 °C。试验中传感器放置在内径 15 mm 的 PVC 管中以保证其在混凝土中的准确位置。PVC 管底部用塑料薄片密封,在底部侧壁切割出两段宽约 3 mm 的不连通环状带,用于传感器与周围混凝土的热湿交换。PVC 管植入正在浇注的混凝土试件中时,为防止砂浆流入 PVC 管,预先在管内插入一根比 PVC 管内径略小的钢棒,混凝土浇注约 2 h 后拔出钢棒,放入传感器。为了保证传感器测得混凝土内部真实的温湿度而不受外界环境的干扰,在传感器距触头 1 cm 高处套上 2 个 2 mm 厚的 O 型橡胶圈,以密封传感器与 PVC 管之间的间隙,同时在 PVC 管的管口处用高分子密封胶

将开口密封. 这样传感器的感应部位只与待测的混凝土内部区域相接触, 所测得的温湿度数据即为混

凝土内部该处的温湿度. PVC 管底部预切口的放大图见图 1(c).

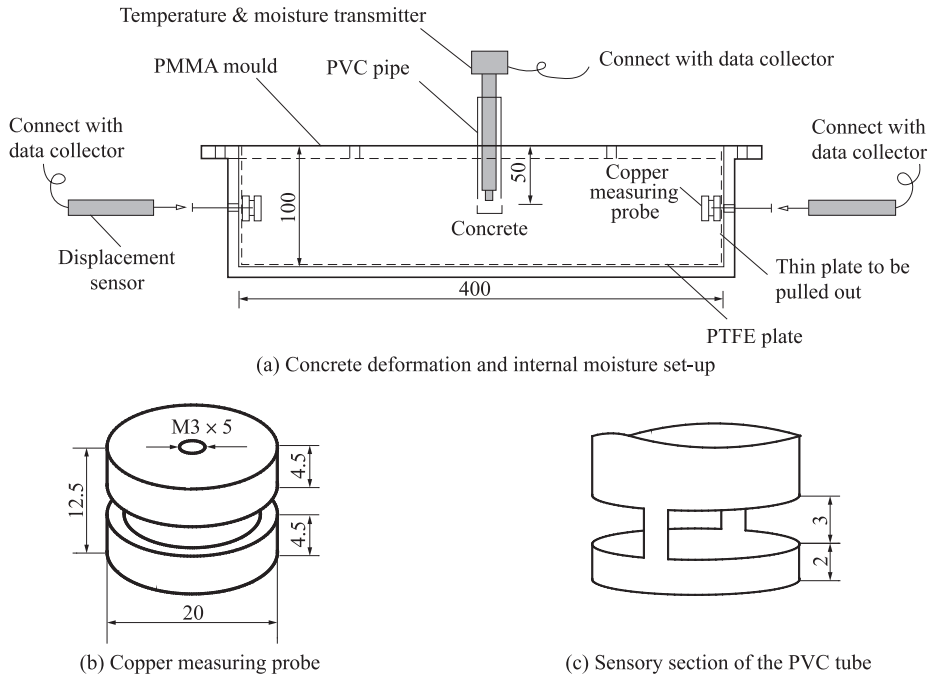


图 1 早龄期混凝土自由变形与温湿度测量试验装置示意图

Fig. 1 Schematic of free deformation and internal moisture measurements(size;mm)

1.3 试件浇注及传感器安装过程

混凝土搅拌时, 首先将粗细骨料混合, 然后加入胶凝材料(水泥和粉煤灰), 再加入溶有减水剂的水, 搅拌 3 min. 浇注前, 紧贴试模四周端面固定好可拔出的有机玻璃薄片, 然后在试模内衬一层塑料膜, 用以密封成型试件; 再在试模两端面中心孔处用细螺栓和螺母固定铜质测头. 混凝土浇注完成后在振动台微震至表面出浆并抹面, 植入 PVC 管, 深度 50 mm, 然后在试件表面覆一层塑料薄膜, 以防止混凝土表面的水分散失. 混凝土试件浇注完成约 2 h 后, 拔出 PVC 管中的钢棒, 吸干 PVC 管底部的残浆, 插入温湿度传感器并密封 PVC 管口. 然后拧下固定在铜质测头上的细螺栓, 拔出试件四周的有机玻璃薄片, 再将细螺栓固定好. 这样在混凝土四周与试模之间就形成了约 2 mm 的空隙, 试件处于四周无约束状态. 最后将位移传感器安装在试件长度方向两侧, 使其测头顶在从试模导出的细螺栓头上. 测得的铜质测头水平位移就是混凝土试件在长度方向上的变形. 试验装置(见图 1)安装完毕后, 打开数据采集系统, 传感器采集的变形和温湿度数据通过数据采集器传送到计算机记录并保存, 采集频率为每 10 min 一次.

2 结果及分析

试验测得相同水胶比的水泥净浆、砂浆和混凝土早龄期完整自由变形和内部相对湿度与龄期的关系曲线见图 2. 由图 2 可见, 水泥基复合材料的早龄期自由变形表现为先膨胀后收缩的特征. Kamen^[8] 在超高性能纤维混凝土、Sule 等^[9] 和 Bentur 等^[10] 在普通混凝土中也同样发现早龄期混凝土有此变形特征. 膨胀变形结束后收缩变形开始. 水泥净浆、砂浆和混凝土膨胀变形结束的时间分别为 15.8, 12.7 和 6.5 h. 根据文献[11]给出的基于超早龄期混凝土变形测定的凝结时间定义和确定方法可知, 混凝土的凝结时间最短, 砂浆次之, 水泥净浆最长. 这是因为一方面骨料的存在使得水泥基复合材料形成整体粘接的固相体系相对容易, 另一方面骨料对自由水的吸附、聚集效应在一定程度上降低了水泥石的含水量, 从而使其凝结时间提前. 膨胀结束点所反映的另一意义在于, 它是把水泥基复合材料的自由变形划分为有效变形和非有效变形的特征点^[11]. 水泥基复合材料在凝结之前的变形不能在结构中产生应力, 应定义为非有效变形; 凝结之后的变形在约束条件下将在结构内形成应力, 可称之为有效变形. 包含

该膨胀结束点在内的变形曲线称为早龄期水泥基材料的全变形曲线。

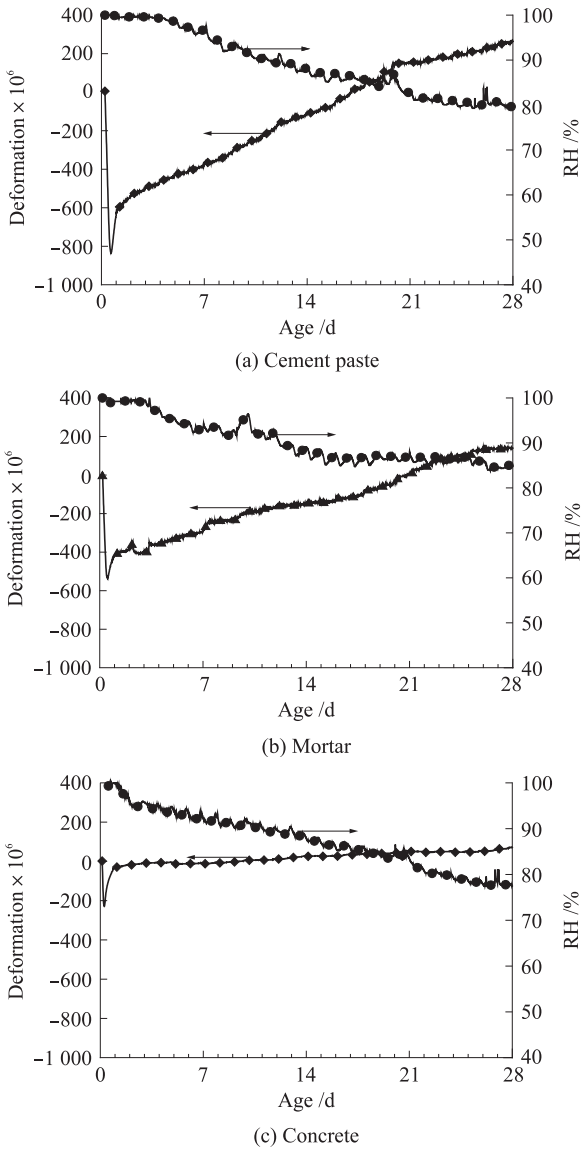


图2 水泥净浆、砂浆和混凝土的自由变形与内部湿度随龄期变化

Fig. 2 Development of free deformation and internal moisture with age of cement paste, mortar and concrete

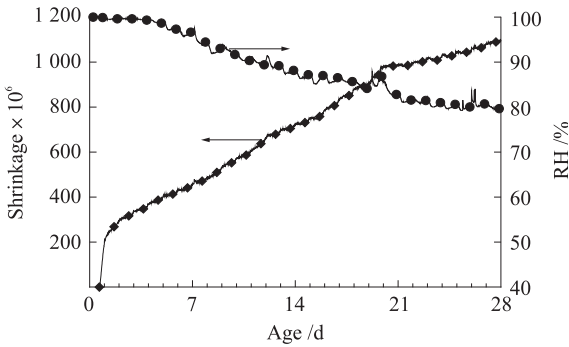
另外,图2显示试件内部湿度随水化龄期的发展均经过初期的水气饱和期(相对湿度 $RH=100\%$)和随后的湿度下降期,与文献[12-13]等研究结论相符.3种试验材料内部湿度开始下降的时间规律为混凝土最短,砂浆次之,净浆最长,与相应的凝结时间规律相同,这与其内部微观结构形成过程的差异有关,同时也与骨料对水的吸附、聚集作用在一定程度上引起水泥石含水量减小有关.28 d龄期时净浆、砂浆、混凝土的最终RH值分别为80%、84%和76%,这同样与粗细骨料加入所引起的微观结构差异和骨料对水的吸附作用有关,同时骨料的加入也使得混凝土单位体

积含水量减小,致使其28 d的RH值低于相应的净浆和砂浆.值得注意的是,膨胀变形结束的时刻(凝结的时刻)与湿度开始下降的时刻并不吻合,后者稍滞后于前者.其机理可用材料骨架形成与内部毛细孔湿度下降机制上的差异来解释^[14].

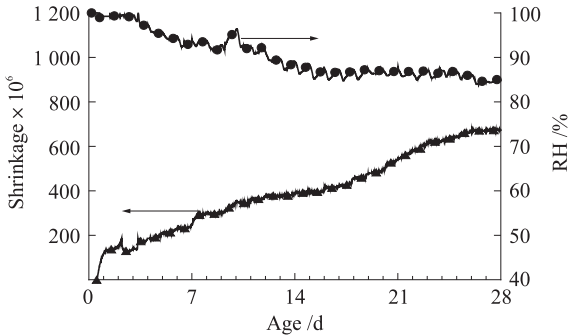
图3为净浆、砂浆、混凝土的有效收缩变形和内部相对湿度随龄期的发展规律.首先,有效变形按净浆、砂浆、混凝土顺序依次减小.这是因为水泥基复合材料的体积变形主要是由水泥石的收缩引起的宏观体积变化,因此水泥石的体积分数(或浆骨比)是影响材料收缩变形大小的重要因素.本试验中净浆、砂浆和混凝土的水泥石体积分数分别为1.00,0.56,0.33,因此其宏观体积变形体现为净浆最大,砂浆次之,混凝土最小.同时,加入的砂石骨料构成了砂浆和混凝土材料的骨架,增强了材料的整体刚度,限制了水泥石收缩,因此加入骨料的比例和骨料的级配、弹性模量等也是影响水泥基复合材料宏观变形的控制性因素.其次,水泥基材料的收缩变形随龄期的发展均呈双阶段模式,即早期的快速发展期和随后的慢速发展期.各阶段内收缩随龄期的发展近似符合线性关系(28 d以内),但净浆、砂浆、混凝土在各阶段的收缩发展速率并不相同.如定义阶段I,阶段II(28 d龄期)的收缩量、对应的龄期及收缩发展速率分别为 ϵ_1, t_1, k_1 和 ϵ_2, t_2, k_2 (见图4),则净浆、砂浆和混凝土的相应参数可用图5表示.不难看出:(1)水胶比相同时,无论净浆、砂浆还是混凝土,其 ϵ_1, t_1 值相差有限,净浆、砂浆、混凝土的 ϵ_1, t_1 值分别为 $250 \times 10^{-6}, 33 \text{ h}$; $140 \times 10^{-6}, 28 \text{ h}$ 和 $207 \times 10^{-6}, 25 \text{ h}$.(2)水胶比相同时,净浆、砂浆、混凝土的 ϵ_2 值相差较显著,净浆、砂浆、混凝土的 ϵ_2 值分别为 $1.097 \times 10^{-6}, 675 \times 10^{-6}$ 和 301×10^{-6} .(3)从收缩发展速率上看,净浆最大,砂浆次之,混凝土最小.综上所述,砂石骨料的约束作用主要体现在收缩第二阶段,3种材料(净浆、砂浆、混凝土)在此阶段的收缩发展速率 k_2 分别为 $33 \times 10^{-6}/\text{d}, 21 \times 10^{-6}/\text{d}$ 和 $3.3 \times 10^{-6}/\text{d}$.

水泥基复合材料在第一阶段的变形主要是化学减缩在宏观体积变形上的表现^[4],其收缩速率主要与水泥水化速率、浆骨比和骨料的限缩作用等因素有关.但由于是在早龄期,材料整体刚度主要取决于水化水泥浆体的刚度,因此普遍较低,此时骨料约束作用不明显,净浆、砂浆、混凝土在第一阶段的收缩应变大小差异并不大.水泥基复合材料从第一阶段过渡到第二阶段时,其内在的收缩机理由化学减缩控制逐渐转变为由内部湿度降低引发的毛细孔张力控制(见下面讨论),加上骨料约束作用由于材料刚

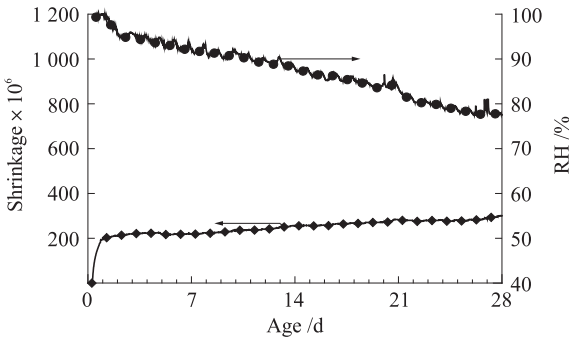
度的提高而凸显出来,因此净浆、砂浆、混凝土在第二阶段的收缩和收缩速率依次降低.



(a) Cement paste



(b) Mortar



(c) Concrete

图 3 水泥净浆、砂浆和混凝土的有效收缩变形与内部湿度随龄期变化

Fig. 3 Development of shrinkage and internal moisture with age of cement paste, mortar and concrete

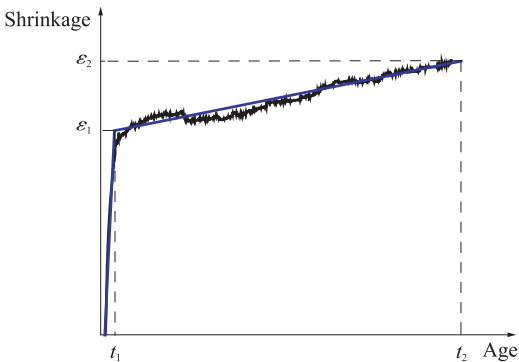


图 4 水泥基材料早期收缩的双阶段模型

Fig. 4 Two-stages model of shrinkage of cement-based composites

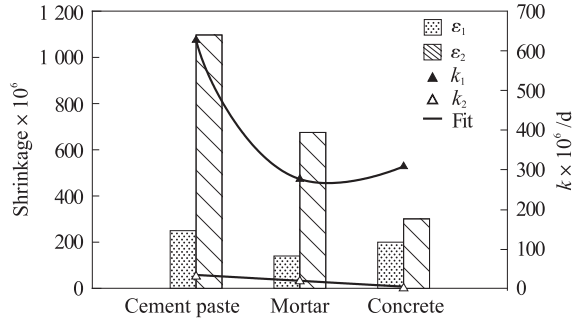


图 5 水泥净浆、砂浆、混凝土早期收缩参数对比

Fig. 5 Comparison of shrinkage parameters of cement paste, mortar and concrete

上述分析可形成早龄期水泥基材料收缩变形的机制转换说. 水泥从加水开始进行的水化反应伴生着水分的消耗、总体体积的减小和水泥石强度的增加. 在塑性阶段和水泥石硬化之初, 由于水泥基材料的整体刚度由强度较低的水泥石控制, 骨料的限缩作用不显著, 因此化学减缩可以在很大程度上反映到宏观体积变形上, 形成了水泥基材料有效收缩快速发展的第一阶段, 且净浆、砂浆和混凝土的收缩发展速率相当. 随着水化程度和水泥石硬化程度的提高, 化学减缩作用对水泥基材料宏观收缩的贡献逐渐减小直至作用甚微, 继而由湿度降低引起的毛细张力作用成为收缩变形的控制因素, 这时水泥基材料的自由变形进入收缩发展的第二阶段, 且湿度降低幅度和材料整体刚度决定着收缩变形大小和收缩发展速率. 由图 3 可以看出, 在 0.43 的水胶比下, 湿度下降的起始点基本上与收缩发展的第二阶段起始点相对应. 通常湿度开始下降标志着水化反应速率已经大大减小, 因此化学减缩引发宏观收缩的作用被取代, 而第二阶段控制收缩变形的主导因素开始转变为材料内部相对湿度. 图 6 为净浆、砂浆、混凝土在第二阶段的收缩与内部相对湿度的相关关系, 显然它们的收缩变形值与内部湿度的自然对数基本呈线性关系, 表明二者具有良好的因果关联性.

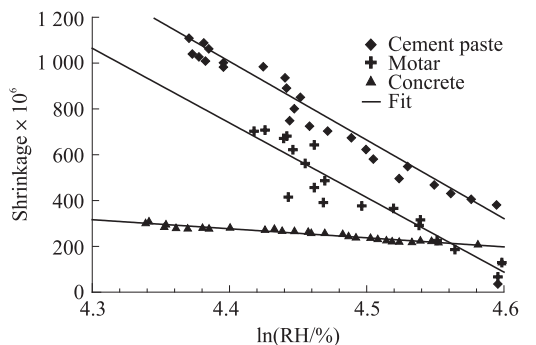


图 6 收缩与内部湿度相关关系

Fig. 6 Relationship between shrinkage and internal moisture

3 结论

(1)水泥净浆、砂浆和混凝土早期变形均具有先膨胀后收缩的特征;有效收缩变形的起始时间为早龄期膨胀变形的结束点。

(2)水泥净浆、砂浆和混凝土的早期收缩随龄期的发展有明显的双阶段特征,即早期的快速发展期(阶段Ⅰ)和随后的缓慢发展期(阶段Ⅱ)。在阶段Ⅰ,3种材料的收缩大小和收缩速率差异不大,并均在浇筑后24~40 h完成;骨料对收缩变形的约束作用主要体现在阶段Ⅱ。

(3)从浇筑开始,材料内部湿度经历早期的水气饱和期($RH=100\%$)和随后的湿度下降期,湿度下降的起始点基本上与收缩发展的第二阶段起始点相对应。

(4)变形发展特征及其与湿度变化规律的对应关系显示早龄期水泥基材料收缩机制经历了由化学减缩控制到相对湿度控制的转变。

参考文献:

- [1] HASHIDA H, YAMAZAKI N. Deformation composed of autogenous shrinkage and thermal expansion due to hydration of high strength concrete and stress in reinforced structures[C] // Proceedings of Third International Research Seminar on Self-desiccation in Concrete. Lund: [s. n.], 2002: 77-93.
- [2] 巴恒静, 高小建, 杨英姿. 高性能混凝土早期自收缩测试方法研究[J]. 工业建筑, 2003, 33(8): 1-4.
BA Heng-jing, GAO Xiao-jian, YANG Ying-zi. Research on measuring means of autogenous shrinkage of high performance concrete at early age[J]. Industrial Construction, 2003, 33(8): 1-4. (in Chinese)
- [3] KOVLER K, ZHUTOVSKY S. Overview and future trends of shrinkage research[J]. Materials and Structures, 2006, 39(9): 827-847.
- [4] 高小建, 巴恒静, 马保国. 混凝土早期自收缩、强度与水泥水化率的关系[J]. 工业建筑, 2006, 36(2): 64-67.
GAO Xiao-jian, BA Heng-jing, MA Bao-guo. The relationship among cement hydration degree, compressive strength and autogenous shrinkage of concrete at early ages[J]. Industrial Construction, 2006, 36(2): 64-67. (in Chinese)
- [5] 田倩, 孙伟, 缪昌文, 等. 高性能混凝土自收缩测试方法探讨[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(1): 85-92.
TIAN Qian, SUN Wei, MIAO Chang-wen, et al. Study on the measurement of autogenous shrinkage of high performance concrete[J]. Journal of Building Materials, 2005, 8(1): 85-92. (in Chinese)
- [6] 安明喆. 高性能混凝土自收缩研究[D]. 北京: 清华大学, 1999.
AN Ming-zhe. Investigation on autogenous shrinkage of high performance concrete[D]. Beijing: Tsinghua University, 1999. (in Chinese)
- [7] TAZAWA E, MIYAZAWA S. Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7): 281-287.
- [8] KAMEN A, DENARIE E, SADOUKI H, et al. Thermo-mechanical response of UHPFRC at early age— Experimental study and numerical simulation[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(6): 822-831.
- [9] SULE M, van BREUGEL V K. Cracking behavior of reinforced concrete subjected to early-age shrinkage[C] // Proceeding of the International RILEM Workshop. Paris: [s. n.], 2008: 417-433.
- [10] BENTUR A, IGARASHI S, KOVLER K. Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(11): 1587-1591.
- [11] 侯东伟, 张君, 孙伟. 基于早期变形特征的混凝土凝结时间的确定[J]. 硅酸盐学报, 2009, 37(7): 1079-1091.
HOU Dong-wei, ZHANG Jun, SUN Wei. Determination of concrete setting time based on measurements of deformation variations[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2009, 37(7): 1079-1091. (in Chinese)
- [12] ZHANG J, QI K, HUANG Y. Calculation of moisture distribution in early age concrete[J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 2009, 135(8): 871-880.
- [13] 黄瑜, 祁锟, 张君. 早龄期混凝土内部湿度发展特征[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2007, 47(3): 309-312.
HUANG Yu, QI Kun, ZHANG Jun. Development of internal humidity in concrete at early age[J]. J Tsinghua Univ: Sci and Tech, 2007, 47(3): 309-312. (in Chinese)
- [14] ZHANG Jun, HOU Dong-wei, SUN Wei. Experimental study on the relationship between shrinkage and internal moisture of concrete at early age[J]. Magazine of Concrete, 2010, 62(3): 191-199.