

不同水胶比混凝土内部温湿度长期变化规律研究

李永强, 巴明芳*, 朱杰兆, 吴威业

(宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 鉴于混凝土内部温湿度显著影响混凝土耐久性, 为研究混凝土内部温湿度长期的变化规律, 将不同水胶比混凝土放置于室内大气环境中, 并测量其距离表面 3 cm、5 cm、7 cm 及 9 cm 处 140 d 内温湿度的演变规律. 研究表明: 正常室温条件下, 混凝土内部温度变化主要受环境温度影响, 且与环境温度变化趋势基本相同, 浇筑完成 7 d 后内部温度与环境温度温差大约为 2°C, 60 d 以后内外温差基本消失. 高水灰比混凝土内部含水量充足, 140 d 内部相对湿度一直保持在 85%以上; 低水灰比混凝土内部含水量较少, 早期相对湿度变化受水化耗水影响明显, 混凝土内部相对湿度存在明显梯度差, 5 cm、7 cm 处相对湿度最低分别为 60.18%和 29.83%; 随着水化作用进行, 长期来看混凝土内部湿度逐步与环境湿度趋于一致.

关键词: 混凝土; 温度; 相对湿度; 水化耗水

中图分类号: TU5

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2017) 01-0082-07

混凝土内部的温湿度是影响混凝土性能的两个重要因素. 混凝土内部孔隙中的水分含量直接影响混凝土的强度、热性质以及水泥水化, 是影响混凝土结构耐久性的重要参数; 混凝土内部温度对混凝土结构耐久性和寿命影响显著, 直接决定混凝土结构工程氯盐侵蚀、钢筋锈蚀、碳化等的速率. 因此探索混凝土内部温湿度的变化规律对提高混凝土耐久性有重大意义. 目前, 已经有研究人员对混凝土内部温湿度变化进行了相关的研究. Wang 等^[1]研究了浇筑初期 350 min 内混凝土内部温度变化, 并记录了 7 000 min 内混凝土内的相对湿度变化规律. Shen 等^[2]测量了掺加不同比例高吸水性聚合物混凝土早龄期 30 d 内部相对湿度的变化规律. Han 等^[3]对掺入预浸轻骨料的高强混凝土板在 28 d 内的温湿度进行了研究, 并发现早龄期混凝土内部相对湿度变化分为两个阶段, 内部相对湿度保持在 100%的饱和蒸汽阶段和相对湿度逐渐降低阶段. 王卫仑等^[4]测量了 3 d 内自然环境温度变化和不同混凝土及混凝土不同深度处的温度变

化, 得出自然环境温度的变化和混凝土内温度变化趋势基本一致, 具有显著周期性. 马文彬等^[5]记录了自然环境和成熟混凝土 130 mm 深度处 24 h 内的温度变化和 10 d 内的湿度, 并以此研究了温湿度响应滞后效应. 蒋鸿^[6]测量了不同养护条件下 30 d 内 C30 混凝土内部温湿度变化规律. 张君等^[7]测定了早龄期混凝土 30 d 内分别在薄膜覆盖与无薄膜覆盖条件下内部相对湿度变化规律. 金祖权等^[8]探索了处于不同环境下距离混凝土表面 10~40 mm 处湿度演变规律, 其中时间跨度最大的为 120 d. 沈春华等^[9]研究了 400 h 内水泥砂浆和混凝土的一维水分传输. 蒋建华等^[10]根据 30 d 内实测数据绘制出不同试验条件下, 混凝土内部 25 mm 深度位置处相对湿度随时间的变化曲线, 研究了混凝土内相对湿度与环境相对湿度的关系. 侯云芬等^[11]记录了经历 n 次($n=5, 10, 15, 20, 25$)冻融循环作用的试件内部温度—湿度变化曲线. 胡昌斌等^[12]检测了不同季节现场水泥混凝土路面早龄期湿度场 96 h 内的变化.

收稿日期: 2015-10-23.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51308308); 宁波大学学科项目(XKL14D2068); 水利部水科学与水工程重点实验室(YK914015).

第一作者: 李永强(1992—), 男, 浙江温州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 高性能水泥基材料. E-mail: 15067455164@163.com

*通信作者: 巴明芳(1975—), 女, 山东滨州人, 博士/副教授, 主要研究方向: 高性能绿色建筑材料. E-mail: bamingfang@nbu.edu.cn

综上所述可以看出, 目前对于长期混凝土内部温湿度变化的研究较少. 本文研究室内环境下 140 d 内混凝土内部温湿度的变化规律和机理; 为获得室内环境下混凝土内部温湿度变化规律, 对放置于室内混凝土的温湿度进行长期测量和分析, 测试不同强度混凝土在不同龄期、不同深度处的温湿度变化规律; 研究揭示了混凝土内部温湿度的演变机理, 为混凝土结构耐久性研究提供依据.

1 试验

1.1 试验用原材料

试验采用建德三狮松涛水泥有限公司生产的三狮牌 P.O.42.5 水泥; 砂子为天然河砂, 最大粒径 5 mm, 含泥量<3%; 石子为天然石灰石, 最大粒径 25 mm; 减水剂采用聚羧酸类高效减水剂. 设计强度等级为 C25 和 C50 两种不同强度等级的混凝土, 分别代表一般混凝土和高强混凝土. 试验用混凝土配合比见表 1, 不同龄期混凝土抗压强度见表 2. 温湿度传感器采用上海搜博实业有限公司 SHT10 型传感器, 相对湿度(Relative Humidity, RH)测量范围 0~100%, 误差为 4.5%, 温度测量范围 -40℃~+123.8℃, 误差±0.5℃. 传感器的数字信号由计算机记录作为实验分析.

表 1 混凝土配合比

强度等级	水灰比	水泥/(kg·m ⁻³)	水/(kg·m ⁻³)
C25	0.44	398	175
C50	0.36	478	172

强度等级	砂/(kg·m ⁻³)	石/(kg·m ⁻³)	外加剂/%
C25	727	1 100	0.78
C50	710	1 068	1.5

表 2 混凝土配合比

强度等级	抗压强度/MPa		
	30 d	60 d	120 d
C25	28.3	33.5	36.9
C50	58.2	63.3	67.0

1.2 试验方案

试验采用 100 mm×100 mm×400 mm 钢模, 为保证水分的一维传输, 模具内表面铺上塑料薄膜, 只留上面浇筑面与空气接触. 首先准备放置温湿度传感器的塑料管, 塑料管内径 15 mm, 下管口用塑料薄片密封, 距离底部 2 mm 处侧壁预留宽为

3 mm 的切口. 混凝土浇注、振捣完成后, 立即植入 PVC 管, 塑料管内置同样直径的不锈钢棒以防止水泥浆流入管内. PVC 管在试件中埋入深度分别为 30 mm, 50 mm, 70 mm, 90 mm. 温湿度传感器的埋置位置如图 1 所示.

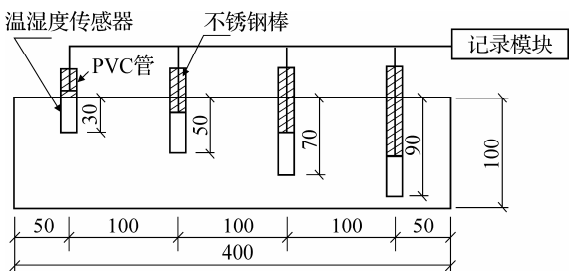


图 1 混凝土试件内传感器位置(单位: mm)

混凝土试件浇注完成 3 h 后拔出钢棒, 用医用棉签吸干塑料管底部的残浆. 浇筑完成 24 h 后将试件移入实验室, 插入温湿度传感器, 传感器测头距塑料管底约 1 mm. 传感器插入后, 在 PVC 管内塞入塑料泡沫碎末, 之后用环氧树脂密封, 以保证所测温湿度不受外界环境影响.

试件成型 24 h 后, 在空气接触面四周涂上环氧树脂, 防止水分沿塑料薄膜和混凝土界面渗入. 然后将试件置于室内养护. 设置传感器读数间隔如下: 前 20 d 每 1 h 记录 1 次, 20 d 后每 6 h 记录 1 次. 混凝土试件浇筑完成插入传感器后示意图如图 2 所示.



图 2 传感器分布示意图

2 结果分析与讨论

2.1 混凝土试件早期 30 h 内部温湿度变化规律

2.1.1 混凝土试件早期 30 h 内部温度变化规律

C25 和 C50 混凝土试件在早期 30 h 内温度变化规律如图 3 所示. 从图 3 可见, 环境温度在 1 d

内不断的进行上下波动,而混凝土内部各测点处温度的变化趋势与室内环境的温度变化趋势基本一致,随着室内温度的起伏波动,混凝土内部的温度也在进行相同趋势的波动.且混凝土内部温度基本上小于环境温度,差距约为 $1\sim 3^{\circ}\text{C}$.原因在于本试验的混凝土试件是在实验室养护1 d后再移入室内进行温湿度测量,而在夏天高温环境下,混凝土水化反应在浇筑完成后24 h内最剧烈,水化热在24 h内产生峰值,之后混凝土内部温度逐渐降低,而内部温度变化主要受环境温度变化影响,因此试验测量得到温度均与环境温度相近.

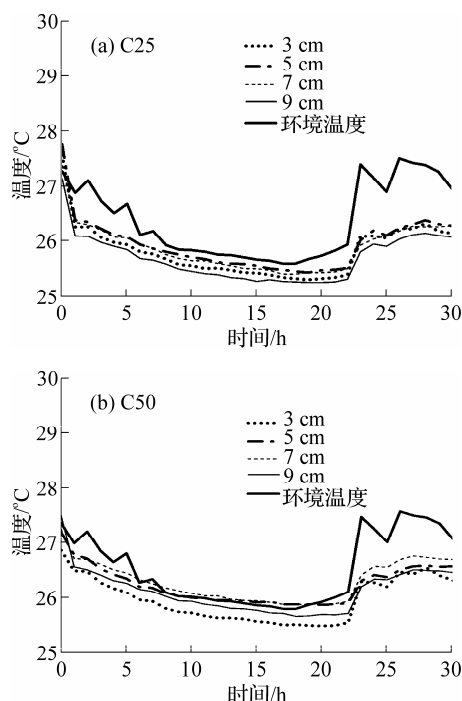


图3 混凝土早期30 h内部温度变化规律

从图3还可以看出,混凝土试件浇筑完成后,30 h内各深度处的温度也不相同,3 cm和9 cm处的温度小于5 cm和7 cm处的温度.这是由于混凝土在水化过程中产生水化热,内部水化热相对于外部来说不容易散发,这就造成了混凝土上部温度和下部温度低于中间部分温度.对比图3(a)和图3(b)可以看出,C50混凝土内部相应位置处温度高于C25混凝土.这表明C50混凝土水化反应放热比C25混凝土多,即高强度混凝土水化反应比低强混凝土剧烈.

2.1.2 混凝土试件早期30 h内部湿度变化规律

C25和C50混凝土试件在早期30 h内湿度变

化规律如图4所示.

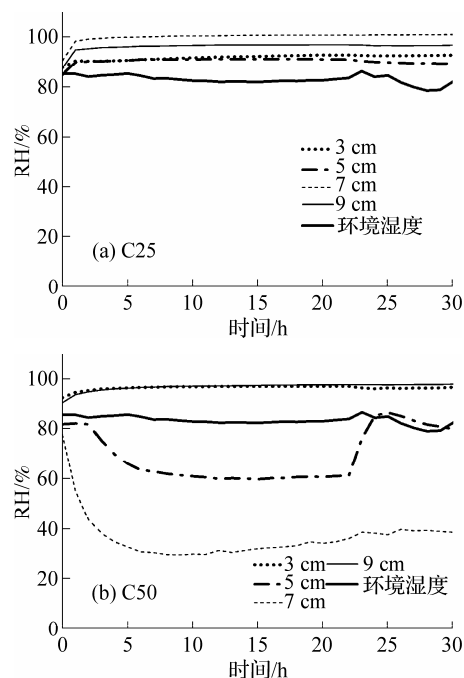


图4 混凝土早期30 h内部湿度变化

从图4可见,混凝土试件自浇筑完成后,环境相对湿度值一直保持在85%左右.从图4(a)可以观察到,C25混凝土试件内部各个深度处的湿度在测量开始的前30 h内比较平稳,波动不大,而且相对湿度值均在90%以上,明显高于环境相对湿度.表明在水化早期混凝土试件内部游离水充足,所以相对湿度均相对高于环境相对湿度.从该图还可以看出距离蒸发面的7 cm和9 cm处的相对湿度要高于距离3 cm和5 cm处的相对湿度,表明表层部分混凝土内部湿度变化受表层水分蒸发耗水的影响较为明显.

图4(b)是C50混凝土试件在水化早期30 h内的湿度变化规律图.从该图可以看出,距离试件蒸发面3 cm和9 cm处在水化早期的相对湿度要高于环境湿度,近似处于饱水状态.分析其原因,估计距离表面9 cm处由于试件底部防水通气处理问题,试件底面出现游离水,使得该位置与距离蒸发面3 cm处等效.从该图还可以看出,在距离蒸发面5 cm处的相对湿度在水化2 h后开始明显下降,而距离蒸发面7 cm处的湿度则从开始就一直处于下降状态,相对湿度在30%处稳定下来.以上结果表明水化作用对混凝土内部湿度变化的影响.5 cm和7 cm处混凝土水化作用明显,消耗水分多,使得2

个深度处的湿度含量明显下降。按照此规律, 9 cm 处湿度应当较上部位置应有一个更加明显的湿度下降趋势, 而试验中的 9 cm 处湿度则一直保持在 100% 作用, 由此可以最终判断 9 cm 处的温湿度传感器出现故障问题。而从图中也看出距离蒸发面 3 cm 处的相对湿度很大, 一直处于 100% 左右, 这主要是因为试件振捣过程中水分向上集中在混凝土蒸发面, 蒸发失水较慢, 所以使得上部湿度含量较大。同时可以在图 4(b) 观察到, 5 cm 处湿度在 22 h 处开始明显上升, 且在 2 h 后升至接近于环境湿度; 7 cm 处湿度在 11 h 处开始缓慢上升, 也是朝着环境湿度值变化。这是由于水化作用在混凝土刚浇筑的前 24 h 最剧烈, 这个时期水化消耗水分最多。对比图 4(a) 和图 4(b) 可以发现, C25 混凝土和 C50 混凝土在前 30 h 内部湿度变化有显著差异。C25 混凝土湿度变化受水化耗水影响较少, 而 C50 混凝土内部早期水化耗水对内部湿度变化影响较大。C25 混凝土内部湿度全部在 90% 以上, 且比较稳定, 没有明显的减小趋势, 而 C50 混凝土内部 5 cm 处和 7 cm 处湿度存在一个明显的下降段, 5 cm 处湿度最低降到了 60.18%, 7 cm 处则最低降到了 29.83%。

2.2 混凝土试件内部温湿度 7 d 变化规律

2.2.1 混凝土试件内部温度 7 d 变化规律

C25 和 C50 混凝土试件在 7 d 内温度变化规律如图 5 所示。

从图 5 可见, 混凝土内部各测点处温度的变化趋势与室内环境的温度变化趋势基本一致, 表现出明显的升温和降温过程, 波动周期大概为 24 h, 且各个深度处的温度都小于环境温度。对比图 5(a) 和图 5(b) 可以看出, C50 混凝土内部各个深度的温度梯度大于 C25 混凝土。这主要是因为试验采用的混凝土水灰比不同, 从而导致其热传导系数、密度及其比热容略有差异, 从而使得混凝土热阻不同, 混凝土内部对于环境温度的影响响应不同。

2.2.2 混凝土试件内部湿度 7 d 变化规律

C25 和 C50 混凝土试件在 7 d 内湿度变化规律如图 6 所示。从图 6 可见, 混凝土试件浇筑完成后的 7 d 内, 环境相对湿度值仍一直保持在 85% 左右。

从图 6(a) 可以观察到, C25 混凝土试件内部各个深度处的湿度在浇筑完成后的 7 d 内仍比较平稳,

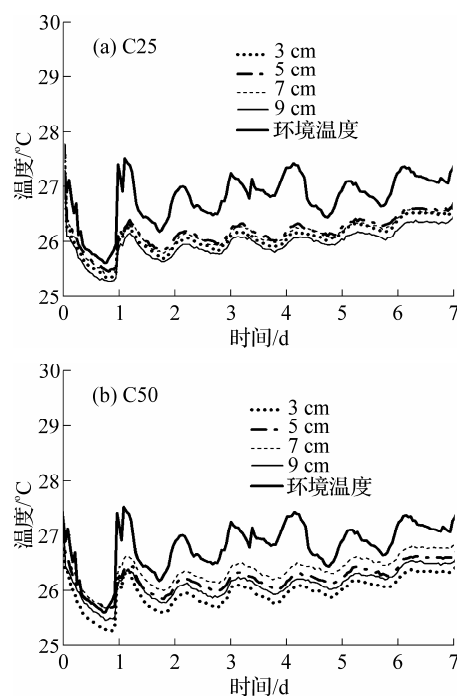


图 5 混凝土内部温度 7 d 的变化

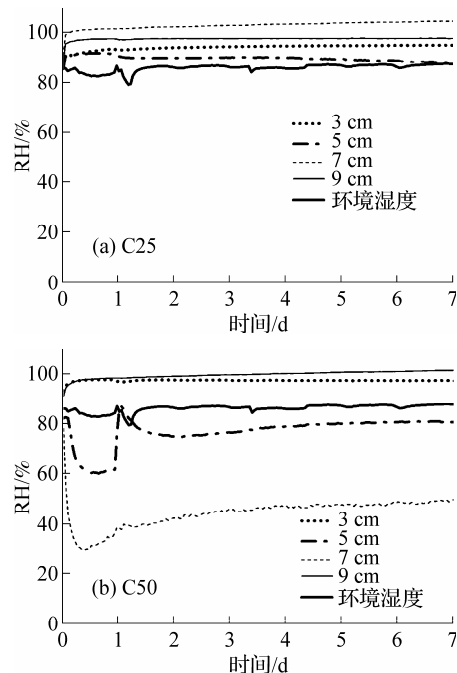


图 6 混凝土内部湿度 7 d 的变化

波动不大, 只有 5 cm 处相对湿度缓慢减小至环境湿度。表明在浇筑完 7 d 后, 试件内部游离水仍比较充足, 而表层混凝土则受蒸发作用影响湿度开始下降。从该图还可以看出, 25 h 后, 7 cm 处相对湿度值大于 100%, 且处于缓慢上升趋势, 根据温湿度传感器说明书, 湿度测量有效范围为 0~100%。

这说明此处温湿度传感器出现故障已失效。

图 6(b)是 C50 混凝土试件在水化 7 d 内的湿度变化规律图,从该图可以看出,距离蒸发面各个深度位置处的相对湿度均是朝着环境湿度变化。这表明此时内部水化开始趋于缓和,内部湿度的变化主要受环境湿度变化影响。同时还可以看到,距离蒸发面 7 cm 处相对湿度值仍大幅小于环境湿度,同时表明环境湿度对混凝土深层湿度影响有限。此外,距离蒸发面 9 cm 处相对湿度值在 30 h 左右数值大于 100%,且处于缓慢上升趋势,说明此处温湿度传感器出现故障已失效,这与 2.1.2 节的结论相符。

对比图 6(a)和图 6(b)可以发现,经过 7 d 龄期,不同强度混凝土内部湿度变化有明显不同。C25 混凝土内部各个深度相对湿度一直保持相对较高状态,而 C50 混凝土内部湿度规律则是深度越深相对湿度越小。表明水灰比越低,水化作用对混凝土内部湿度影响越大。

2.3 混凝土试件 60 d 内部温湿度变化规律

2.3.1 混凝土试件 60 d 内部温度变化规律

C25 和 C50 混凝土试件在 60 d 内温度变化规律如图 7 所示。

从图 7 可见,随着混凝土试件龄期的发展,混凝土内部温度与环境温度之间的差距逐渐减小,C25 混凝土在 41 d 左右开始,而 C50 混凝土在 40 d 左右开始,混凝土试件内部的温度与环境温度之间的差距基本可以忽略。分析其原因,混凝土养护后期内部水化放热基本可以忽略,内部温度的变化主要受环境温度变化的影响。

2.3.2 混凝土试件 60 d 内部湿度变化规律

C25 和 C50 混凝土试件在 60 d 内湿度变化规律如图 8 所示。从图 8(a)可以看出,C25 混凝土内部各个深度处相对湿度基本稳定变化不大,且朝着环境相对湿度值变化。这主要是因为此时水化作用对混凝土内部湿度的影响基本可以忽略,混凝土内部湿度变化主要受环境湿度变化影响。从图 8(b)可以看到,C50 混凝土内部相对湿度与 C25 混凝土相似,明显随着环境湿度变化而变化,距离蒸发面 7 cm 处相对湿度大幅度增加至接近于环境相对湿度。这说明此时内部湿度受环境影响明显。从该图还可以看到,环境相对湿度在某几处变化幅

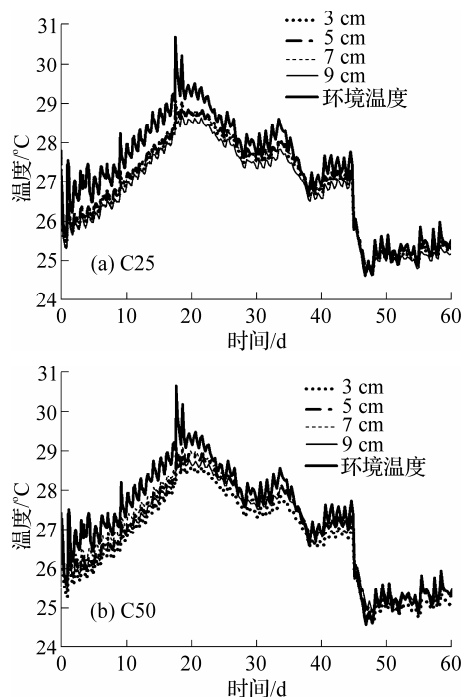


图 7 混凝土内部温度 60 d 的变化

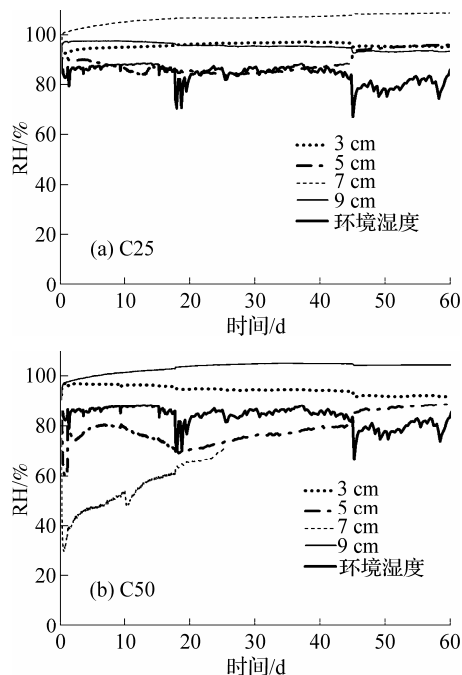


图 8 混凝土内部湿度 60 d 的变化

度很大,可能是由于在温湿度传感器读数时,实验室窗户开放,导致室内湿度变化较明显所致。

2.4 混凝土试件 140 d 内部温湿度变化规律

2.4.1 混凝土试件 140 d 内部温度变化规律

C25 和 C50 混凝土试件在 140 d 内温度变化规律如图 9 所示。

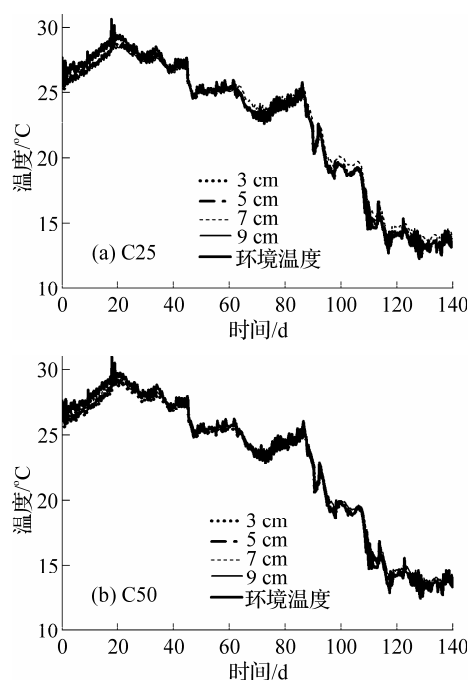


图9 混凝土内部温度 140 d 的变化

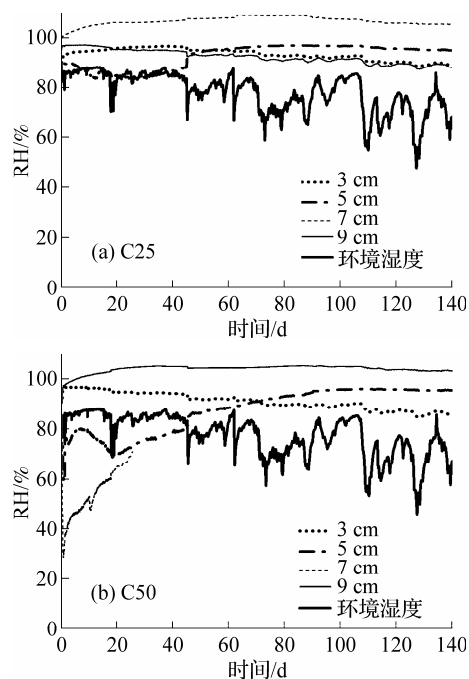


图10 混凝土内部湿度 140 d 的变化

从图9可以见,成熟龄期混凝土内部不同深度处的温度差基本可以忽略,混凝土内部的温度与环境温度基本一致,且与环境温度的差距也基本可以忽略。此外,从图中还可以发现,2种配合比的成熟混凝土内部温度基本没有差异,这也说明成熟混凝土内部温度主要受环境温度影响,与水胶

比影响不大。

2.4.2 混凝土试件 140 d 内部湿度变化规律

C25 和 C50 混凝土试件在 140 d 内湿度变化规律如图 10 所示。

从图 10 可见,140 d 龄期时,混凝土内外仍存在湿度差,实验室室内环境湿度在 45%~85%之间波动,而 2 种配合比混凝土内部湿度变化幅度则很小,且发现混凝土距离表面各深度处相对湿度均比环境湿度大,说明混凝土内部湿度响应速度较环境湿度变化要慢,短期内环境湿度的变化对混凝土内部湿度变化影响小。

3 结论

(1)混凝土内部温度在浇筑完成前 24 h 受内部水化放热影响较大,水化放热影响变小后,混凝土内部温度变化趋势与环境温度变化趋势相同,且混凝土内部温度小于环境温度。混凝土浇筑完成 7 d 内外部温差大约为 2°C,60 d 后内外温差消失。

(2)高水灰比混凝土内部游离水含量较多,湿度变化受水化耗水影响较小,140 d 内部相对湿度一直保持在 85%以上。

(3)低水灰比混凝土内部游离水含量较少,早期内部湿度受水化耗水影响有一个明显的先下降后上升的趋势,距离表面 5 cm 和 7 cm 处相对湿度最低分别为 60.18%和 29.83%。水化作用强度降低后,混凝土内部相对湿度朝着环境相对湿度变化。

(4)140 d 龄期时,混凝土内外仍存在湿度差,混凝土内部湿度响应速度较环境湿度变化要慢,短期内的环境湿度变化对混凝土内部湿度变化影响小。

参考文献:

- [1] WANG Z D, ZENG Q, WU Y K, et al. Relative humidity and deterioration of concrete under freeze-thaw load[J]. Construction and Build Material, 2014, 62(7):18-27.
- [2] SHEN D J, WANG T, WANG M G L, et al. Effect of internal curing with super absorbent polymers on the relative humidity of early-age concrete[J]. Construction and Build Material, 2015, 99:246-253.
- [3] HAN Y D, ZHANG J, LUO S Y, et al. Effect of internal curing on internal relative humidity and shrinkage[J]. Construction and Build Material, 2014, 61(3):41-49.

- [4] 王卫仑, 刘鹏, 邢锋. 自然环境中混凝土内部温度响应规律[J]. 中南大学学报, 2014, 45(2):570-575.
- [5] 马文彬, 李果. 自然气候条件下混凝土内部温湿度响应规律研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2007(2):18-21.
- [6] 蒋鸿. 混凝土养护过程中温湿度的测定分析[J]. 重庆建筑, 2011, 9(10):40-43.
- [7] 张君, 侯东伟. 基于内部湿度试验的早龄期混凝土水分扩散系数求解[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(12):2033-2035.
- [8] 金祖权, 赵铁军, 王本臻等. 海洋环境下混凝土相对湿度响应[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(10): 3608-3613.
- [9] 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, 29(9):84-87.
- [10] 蒋建华, 袁迎曙, 王嵩林, 等. 人工气候环境下混凝土内相对湿度响应预测[J]. 中南大学学报, 2013, 44(12): 5091-5099.
- [11] 侯云芬, 司武保, 王玲, 等. 冻融循环过程中混凝土内部温度相对湿度关系[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(6): 971-975.
- [12] 胡昌斌, 王丽娟, 吕恒. 水泥混凝土路面早龄期湿度场数值模拟研究[J]. 工程力学, 2014, 31(4):178-188.

Study on the long-term variation law of temperature and humidity in concrete with different water binder ratio

LI Yong-qiang, BA Ming-fang^{*}, ZHU Jie-zhao, WU Wei-ye

(Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The internal temperature and humidity of concrete significantly influence its durability. In order to investigate the long-term variation of temperature and humidity in concrete, concrete samples with different water cement ratio are placed in indoor environment, and temperature and relative humidity (RH) with distance of 3 cm, 5 cm, 7 cm and 9 cm from surface are investigated during a 140-day time-span. The results show that under normal room-temperature conditions, the variations of temperature inside the concrete are mainly related to the ambient temperature and the temperature variation trend basically keeps the same pace with the environment. At a 7-day observation, the temperature difference between internal and environment is about 2°C, and then zero difference is noted after a 60-day period. Besides, the internal moisture in the high water cement ratio concrete reaches the sufficiency level, and the RH remains at more than 85% in the 140-day test timeframe. Furthermore, a distinct RH gradient difference is noted inside the low water cement ratio concrete, and the deeper the depth is, the more relative humidity affected by hydration, and the minimum RH of 5 cm and 7 cm is 60.18% and 29.83%, respectively. The progress of hydration, the RH inside the concrete is, in the long run, consistent with the environmental humidity.

Key words: concrete; temperature; relative humidity; hydration

(责任编辑 章践立)