

早龄期混凝土内部湿度发展特征

黄瑜, 祁锬, 张君

(清华大学 土木工程系, 结构工程与振动教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 早龄期混凝土内水分含量是监控混凝土结构开裂的重要参数之一。该文采用数字式温湿度传感器, 研究了早龄期普通与高强混凝土内部湿度随浇筑龄期的发展规律。实验结果表明, 随浇筑龄期的增长, 混凝土内湿度逐渐降低。湿度随龄期的发展规律可描述为早期的水汽饱和期(阶段 I, 相对湿度 100%)及随后的湿度逐渐减小期(阶段 II, 相对湿度 < 100%)。阶段 I 的长短及阶段 II 中湿度降低的幅度与混凝土水灰比及所在位置有关。早龄期混凝土内水分含量沿高度分布不均, 存在明显的湿度梯度。

关键词: 早龄期混凝土; 相对湿度; 含水量

中图分类号: TU 528

文献标识码: A

文章编号: 1000-0054(2007)03-0309-04

Development of internal humidity in concrete at early ages

HUANG Yu, QI Kun, ZHANG Jun

(Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration
of the Ministry of Education, Department of Civil Engineering,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The changes in the internal relative humidity of a concrete slab at early age were measured using a combined digital temperature and humidity sensor. The experimental results show that the internal relative humidity decreased as the concrete aged. The relative humidity inside the concrete first has a saturated vapor stage with 100% relative humidity (stage I) followed by stage during which the relative humidity gradually decreases (stage II). The length of stage I and the magnitude of the relative humidity in stage II are greatly influenced by the initial water content in the concrete, the water/cement ratio, and the measurement location in the concrete. A humidity gradient exists along the concrete specimen at early age.

Key words: concrete at early age; relative humidity; water content

混凝土孔隙中的水分含量是混凝土老化的重要参数, 内部水分的变化不仅会导致质量的改变及体积变形, 而且当环境相对湿度低于混凝土内部相对湿度时, 混凝土内部的水分由于扩散到空气中而损失, 还会发生收缩。另外水泥水化也会引起混凝土内

部水分含量的变化而引发体积收缩, 通常称为自收缩。当混凝土处于自由状态时, 混凝土的收缩不会导致什么不良后果, 但实际上混凝土结构由于基础、钢筋或相邻部分的牵制而处于不同程度的约束状态, 混凝土收缩会受到约束而产生拉应力, 容易引起混凝土结构开裂。作为影响混凝土收缩程度的主要因素, 混凝土结构内部的水分含量及其分布研究, 尤其是早龄期混凝土, 对于计算收缩引起的应力具有理论与实践意义^[1,2]。

有关混凝土在使用环境中的水分含量变化的研究文献很少。Andrade 等^[3]测量了室外环境中的成熟混凝土内部相对湿度和温度的变化。Parrott^[4]和 Nilsson 等^[5,6]对于暴露在自然环境中或海水中的混凝土试件内部的相对湿度进行试验检测。上述试验中所采用的混凝土试件是成熟混凝土, 然而现代混凝土结构开裂大多发生在早期, 因此早龄期混凝土内部水分含量的变化对于监控混凝土结构开裂具有更重要意义。

本文主要研究一般室内环境条件下, 混凝土试件内部相对湿度发展规律。相对湿度从混凝土开始浇筑即开始测量并持续 28 d。研究选择了普通混凝土和高强混凝土进行测试。实验结果显示, 混凝土内部早期相对湿度的变化受水灰比影响显著。混凝土内部相对湿度随龄期发展的基本规律为由饱和状态逐步降低, 降低速率受混凝土强度的影响显著。

1 实验概况

为简化试验及后续理论模拟工作, 本试验中混凝土内部热量和水汽均设计为一维传输。采用

收稿日期: 2006-03-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50178043)

作者简介: 黄瑜(1983-), 女(汉), 河南, 硕士研究生。

通讯联系人: 张君, 教授, E-mail: junz@tsinghua.edu.cn

200mm × 200mm × 400mm 木制模具。为确保水分沿试件高度方向的一维传输, 模具的内表面铺上了塑料膜, 外表面包上 5 cm 塑料泡沫保温层, 上面浇筑面与空气接触。试验同时做了对比试件, 一个上表面用塑料膜封闭, 另一个直接与空气接触。

1.1 试验原材料、配合比及主要仪器

试验中普通混凝土采用京都 32.5 水泥, 高强混凝土采用京都 42.5 水泥, 砂子为天然砂, 最大粒径

5mm, 含泥量 < 3%, 石子为天然石灰石, 最大粒径 25mm, 减水剂采用萘系高效减水剂。设计强度等级为 C40 和 C80 两类, 配比如表 1 所示。采用的温湿度传感器为电容式数字传感器, 湿度测量范围 0~100%, 误差 ± 3%, 温度测定范围 0~120, 误差 ± 0.5。传感器的数字信号通过巡检仪定时采集, 放大后传送给计算机供实验分析。

表 1 混凝土配合比及表面状态

混凝土系列	水泥	水	砂	石	硅灰	粉煤灰	减水剂	试件表面状态
C40	397.0	205.0	796.0	796.0	—	70.0	2.0	覆盖/非覆盖
C80	450.0	150.0	572.1	1144.2	50.0	—	4.4	覆盖/非覆盖

1.2 试验过程

首先准备放置传感器的塑料管, 其直径 15mm, 在距管底 2mm 处沿外环线方向切割出两段宽为 3mm 的不连通的环状带, 并使之保持环状带上下塑料管的整体连续性。在塑料管底部用胶水封上塑料薄片, 使其下部处于密封状态; 准备内径为 15mm 的不锈钢棒, 预先放置于塑料管中, 保持塑料管内壁与钢棒的紧密接触, 钢棒长度超出塑料管上端 5 cm, 其目的为保证振捣过程中水泥浆体不从小孔渗入。按照上述过程, 准备长为 23、15、10 和 7.5 cm 的塑料管各两个, 并在距离塑料管上端 5 cm 处做标记线。传感器探头部分长 3 cm, 在 3 cm 处套上 2 个 O 形橡胶密封圈。

将搅拌好的混凝土倒入木质模具内并用振捣棒充分振捣, 保证混凝土填满整个模具。然后在混凝土表面选择 4 个位置再次振捣, 同时缓慢插入内置有钢棒的塑料管, 保证每个塑料管的标记线与混凝土表面齐平, 按照上述步骤, 4 根塑料管插入混凝土的深度分别为 18、10、5、2.5 cm (实际测量中, 有时只选择 3 个测点)。浇筑完成一段时间后, 缓缓拔出钢棒, 用海绵吸出残留在塑料管底端的浆体后, 将传感器放入塑料管中, 使传感器探头顶端距离塑料管底部 1mm 左右。由于传感器外壁与塑料管之间存在间隙, 采用 2mm 厚度的 O 型圈套在传感器感应部位的上端 3 cm 处, 在塑料管底部形成 3 cm 长度的密闭空间, 同时在 PVC 管的上端用高分子液体密封胶填充传感器和 PVC 管之间的间隙。这样, 传感器探头可准确地测量出指定测定位置的温湿度。在并行试验的两个试件中, 一个混凝土表面铺上塑料膜密封, 一个表面直接与空气接触。传感器放置位置如图 1 所示。各传感器可以自动采集温湿度数据, 各

位置处的温湿度数据可独立存储和输出, 每隔 10min 记录一次读数。

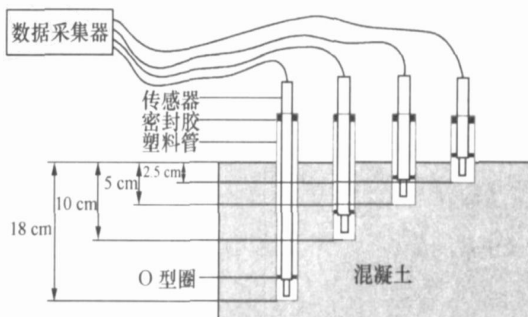


图 1 试件内传感器位置简图

2 试验结果与分析

2.1 相对湿度随浇筑龄期的发展规律

两个系列混凝土第 7 d 与第 28 d 抗压强度的测定结果如表 2 所示, 后面称 C40 混凝土为普通混凝土, C80 混凝土为高强混凝土。图 2、3 分别为上述两类混凝土在不同表面密封状态下从浇筑开始不同位置处湿度随龄期的发展规律。

表 2 各系列混凝土抗压强度

混凝土系列	抗压强度 / MPa	
	第 7 d	第 28 d
C40	28.9	40.6
C80	72.3	82.9

2.1.1 表面密封状态对普通混凝土内部湿度变化的影响

图 2 为普通混凝土上浇筑面与空气直接接触和用塑料膜密封状态下, 不同高度的相对湿度随浇筑龄期的变化规律。从图 2 可以看出, 由于混凝土中水泥的水化反应和部分水分向空气中扩散(非密封情况下), 使混凝土内水分减少, 导致相对湿度(RH)随

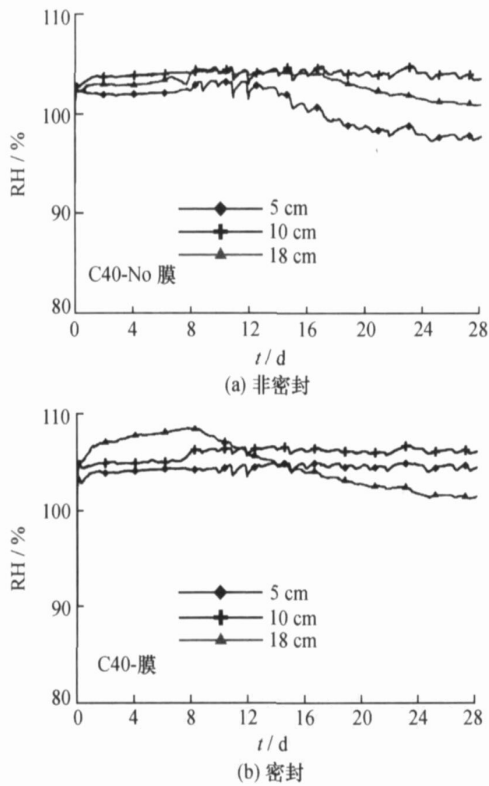


图 2 C40 混凝土表面在不同状态下内部相对湿度与时间关系

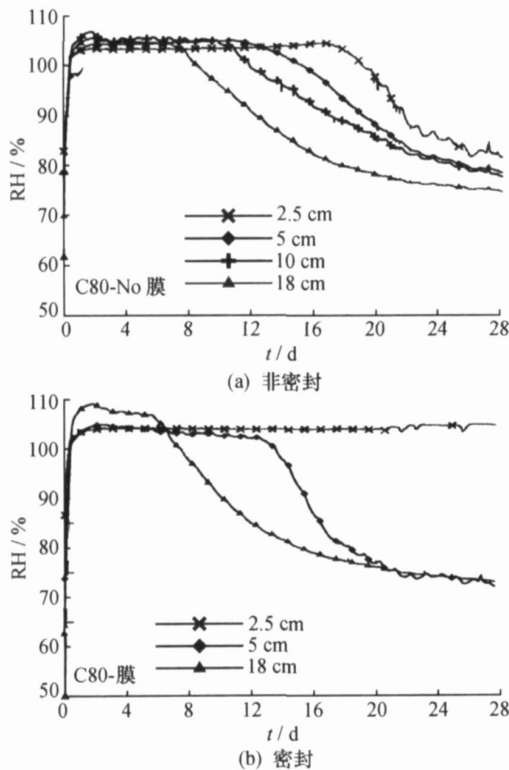


图 3 C80 混凝土表面在不同状态下内部相对湿度与时间关系

龄期增长逐渐降低。混凝土内部湿度随龄期变化的基本规律为初期水汽饱和期(相对湿度 100%)和随后的湿度逐渐减小期。初期的水汽饱和期长短受测点位置及试件表面覆盖状态影响显著,湿度减小期内不同位置(高度)湿度的下降幅度与规律明显不同,即存在湿度梯度(这点对高强混凝土更为突出)。例如,在浇筑面非密封状态下,5 cm 处湿度下降最快,18 cm 处次之,10 cm 处下降幅度最小。另外从混凝土浇筑开始,湿度明显开始下降的时间(即初期水汽饱和期)亦随位置的差异有很大的不同,5 cm 和 18 cm 处湿度开始明显下降的起始时间分别为 12 d 和 16 d,而 10 cm 处直到 28 d 湿度也没有开始明显下降。在表面封闭状态下,只有 18 cm 处湿度明显下降,5 cm 和 10 cm 处湿度在 28 d 龄期内仍接近 100%。表面覆盖时距表面 18 cm 处湿度下降最大,28 d 湿度降为 93% 左右,表面非密封时 5 cm 处湿度降幅最大,28 d 龄期湿度降为 90% 左右。表面非密封状态下 5 cm 处已表现出湿度下降幅度加大,说明干燥层深度已达到距表面 5 cm 处。混凝土表面覆盖对减缓表面混凝土内湿度下降有利,但对内部(如 5~ 10 cm 以下)湿度影响有限。

2.1.2 表面密封状态对高强混凝土内部湿度变化的影响

图 3 为高强混凝土浇筑面用塑料膜密封与非密封状态下,不同高度的相对湿度随浇筑龄期的变化规律。从图示结果可以看出: 1) 由于混凝土内含水量的差异(C40 和 C80 水胶比分别为 0.44 和 0.30),与普通混凝土相比,相对湿度随龄期的发展有明显不同,湿度降低幅度明显加大,速度明显加快。例如表面密封状态下(图 3b)28 d 时 18 cm 处湿度达 60%,而普通混凝土则为 90% 左右。2) 对给定龄期,距离浇筑面越近,湿度降低越小。不同高度处的相对湿度相差显著,即湿度梯度明显。但表面没有用塑料膜覆盖情况下,距表面 2.5 cm 处与 18 cm 处浇筑 28 d 时的相对湿度值已比较接近,湿度梯度减小。3) 初期水汽饱和期的长短受位置影响显著。浇筑面非密封时,距浇筑面 18、10、5、2.5 cm 处湿度明显降低的起始时间分别为 170、260、300 和 420 h。浇筑面密封状态下,各点湿度下降规律与非封闭状态相比略有不同。首先由于表面养护作用,2.5 cm 处湿度在 28 d 内没有明显降低;其次 5、18 cm 处湿度变化幅度与非封闭试件相差不大,湿度明显下降的时间也比较相近,说明表面养护对 5 cm 以下混凝土内部湿度变化影响不明显。

2.1.3 高强混凝土与普通混凝土内部湿度随龄期变化规律的比较

比较图 2a 和图 3a 后不难看出, 表面非密封状态下普通混凝土与高强混凝土内部湿度变化有显著差异。首先 C40 混凝土湿度减小明显低于 C80 混凝土。对于普通混凝土, 5 cm 处测点的湿度降低最大, 28 d 时湿度由 100% 降至 90% 左右; 而高强混凝土, 18 cm 处测点的湿度降低最大, 28 d 时湿度由 100% 降至 60%。在给定时间内, 普通混凝土板截面上的湿度梯度明显低于高强混凝土板。当混凝土板的浇筑面由塑料膜覆盖时, 混凝土内湿度随龄期的变化规律(图 2b 和图 3b)与图 2a 和图 3a 所示结果不同。首先两种混凝土内部的相对湿度都是越接近板底部, 相对湿度越低, 靠近浇筑面, 相对湿度越高。表面覆盖塑料膜与否对靠近表面的混凝土湿度变化影响较大, 而对离表面稍远的内部湿度影响不大。

2.2 结果分析

混凝土内水分含量随浇筑龄期而减少(表现为相对湿度逐渐降低)的原因主要包括以下 3 个方面:

- 1) 混凝土成型初期泌水而造成的早期水分含量沿高度不同变化, 越接近混凝土表面, 水分含量越大;
- 2) 水泥水化消耗水分;
- 3) 混凝土表面水分蒸发而造成水分减少。

相对湿度随龄期减小的速度还与混凝土初期的含水量(w/c , 水灰比)有关。依据相对湿度的定义, 当混凝土内的孔隙含有自由液态水时, 相对湿度将接近 100%。在混凝土浇筑初期, 孔隙内含有较多数量的液态水, 随着龄期的增长, 孔隙内液态水逐渐减少, 当孔隙内水蒸气压力低于其饱和状态下的蒸汽压, 相对湿度将开始下降, 低于 100%。而上述过程持续的时间将受混凝土孔隙内原始含水量控制, 因此不同含水量的混凝土, 如本文研究的 C40 和 C80 混凝土, 湿度开始下降的时间明显不同。同时由于浇筑初期因泌水而形成的水分沿高度分布差异, 造成了混凝土板上部湿度降低时间相对迟于底部, 当然混凝土表面有水分蒸发的情况除外。从本文试验结果来看, 普通混凝土因含水量大, 早龄期孔隙内水分含量沿试件高度的差异小于高强度混凝土。因而普通混凝土板早龄期的湿度梯度(产生收缩梯度)小于

高强混凝土。此外相对湿度减小的速度明显受控于原始含水量的多少。混凝土水灰比越小, 形成的孔隙越小, 孔隙内水蒸气将越容易达到非饱和状态, 相对湿度降低速度更快。因此高强混凝土早期收缩比普通混凝土大。从体积稳定性及其引发收缩开裂的角度, 高强度混凝土显然更容易开裂。混凝土板表面密封只能影响因环境因素引起的湿度下降, 但对混凝土内部因水泥水化而引起的湿度下降的影响有限。例如 C80 混凝土, 表面覆盖塑料膜对混凝土板底部的湿度降低基本上没有影响。

3 结论

1) 早龄期混凝土内湿度随龄期增长而变化的规律可以描述为早期的水汽饱和期(阶段 I, 相对湿度 100%)及随后的湿度逐渐减小期(阶段 II, 相对湿度 < 100%)。阶段 I 的长短及阶段 II 湿度降低的幅度、速度与混凝土水灰比、水泥水化速度及位置有关。

2) 早龄期混凝土内水分含量沿高度分布不均, 存在明显的湿度梯度, C40 混凝土内湿度梯度小于 C80 混凝土。C40 混凝土内部湿度降低的程度小于 C80 混凝土, 湿度降低的速度慢于高强混凝土。

参考文献 (References)

- [1] Bazant Z P, Najjar L J. Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete [J]. *Materials and Structures*, 1976, 5: 3-20
- [2] Ayano T, Witmann F H. Drying, moisture distribution, and shrinkage of cement-based materials [J]. *Materials and Structures*, 2002, 35: 134-140
- [3] Andrade C, Sarrá J A, Abonso C. Relative humidity in the interior of concrete exposed to natural and artificial weathering [J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29: 1249-1259
- [4] Parrott L J. Some effects of cement and curing upon carbonation and reinforcement corrosion in concrete [J]. *Materials and Structures*, 1996, 29: 164-173
- [5] Nilsson L O. Long-term moisture transport in high performance concrete [J]. *Materials and Structures*, 2002, 35: 641-649
- [6] Nilsson L O. The relation between the composition, moisture transport and durability of conventional and new concretes [C]. Gettu R, Aguado A, Shah S, eds. RILEM Workshop on Technology Transfer of the New Trends in Concrete. Barcelona, Spain, 1994: 63-82