

DOI: 10.7672/sgjs2024220060

智能混凝土喷淋养护系统及工程应用研究*

陈芝琦^{1,2}, 王世平¹, 谢洪栋^{1,2}, 彭国平^{1,2}, 王广兴^{1,2}, 林后来^{1,2}

(1. 瑞森新建筑有限公司, 山东 济南 250101; 2. 瑞森新建筑有限公司高性能建筑研究院, 山东 济南 250101)

[摘要] 为加快新浇筑混凝土的硬化及强度的增长,需对混凝土进行洒水养护,使混凝土在适宜的湿度及温度条件下持续发生水化反应并实现混凝土强度的持续增长。目前我国传统的养护方法是依据经验,在任意时间段对混凝土构件进行人工洒水养护,然而这种养护方式由于养护不及时或水分蒸发过快易使混凝土构件出现开裂等现象,对混凝土强度及结构的安全性产生影响。为解决养护不及时及主观经验性的影响,基于 PLC 自动化控制及传感器等技术研制了用于混凝土结构养护的智能化养护系统。首先根据混凝土水化热释放规律确定养护系统喷淋间隔时间;其次,结合现场监测温湿度,合理调整自动喷淋间隔时间;最后,通过在现场施工进行实际应用,结果表明该系统能有效提高混凝土构件的养护质量,并降低施工成本。

[关键词] 混凝土;智能化;养护;喷淋;PLC 自动化

[中图分类号] TU528

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2024)22-0060-05

Research on Intelligent Concrete Spray Curing System and Engineering Application

CHEN Zhiqi^{1,2}, WANG Shiping¹, XIE Hongdong^{1,2}, PENG Guoping^{1,2},
WANG Guangxing^{1,2}, LIN Houlai^{1,2}

(1. Ruison Lean Construction Co., Ltd., Jinan, Shandong 250101, China; 2. High Performance Building Research Institute of Ruison Lean Construction Co., Ltd., Jinan, Shandong 250101, China)

Abstract: To accelerate the hardening and strength growth of the newly poured concrete, it is necessary to conserve the concrete so that the hydration reaction of the concrete can continue under the appropriate humidity and temperature conditions and realize the continuous growth of the concrete strength. At present, the traditional curing method in our country is to carry on the artificial watering curing of concrete members at any time according to experience. However, this kind of curing method is easy to crack the concrete members because the curing is not timely or the water evaporates too fast, which has an impact on the strength of concrete and the safety of the structure. In order to solve the influence of delayed maintenance and subjective experience, an intelligent maintenance system for concrete structure maintenance was developed based on PLC automatic control and sensor technology. Firstly, spray interval time of curing system is determined according to the law of concrete hydration heat release. Secondly, combined with the on-site monitoring temperature and humidity, reasonable adjustment of automatic spraying interval time. Finally, through the practical application in the construction site, it shows that the system can effectively improve the maintenance quality of concrete components and reduce the construction cost.

Keywords: concrete; intelligent; curing; spraying; PLC automation

0 引言

混凝土养护对混凝土性能的发展具有重要影

响^[1-2]。ACI(American concrete institute)将养护定义为:为保证浇筑完成的混凝土具有较好的强度、耐久性及抗裂性,在混凝土刚性化之后,使水泥在适宜的水分和温度条件下持续进行水化反应,从而使混凝土逐渐成熟和硬化。我国传统的混凝土构

* 山东省工信厅企业技术创新(202350101848)

[作者简介] 陈芝琦,助理工程师,E-mail: chen651758102@163.com

[通信作者] 谢洪栋,高级工程师,E-mail: 41375902@qq.com

[收稿日期] 2024-05-10

件养护方法是人工洒水养护,可能会导致混凝土构件出现裂纹,并降低材料的耐久性。

目前,智能建造与物联网等技术在建筑工程领域得到了广泛应用。国内外众多学者对混凝土智能化养护进行了研究。Yang 等^[3]基于变频技术,通过自主研发的自动混凝土养护系统对箱形截面梁进行养护,结果发现相较于传统的人工养护,采用自动化系统养护的混凝土箱梁具有更高的早期抗压强度。樊启祥等^[4]基于智能建造的闭环控制理论,通过自主研发的智能控制设备,实现了对混凝土的保湿养护。张斌^[5]基于 PLC 技术设计出一套适用于滑模施工平台的自动喷淋养护装置,对施工平台的喷淋作业进行了自动控制,结果表明,该装置能有效解决人工洒水用量过多或不足的问题。于正航等^[6]针对传统混凝土箱梁在养护过程中易受到操作者主观因素的影响,造成养护不及时的问题,设计了以 PLC 为核心的自动喷淋养护系统,最终提高了混凝土箱梁的养护品质。Lo 等^[7]设计了一种基于物联网的混凝土养护控制系统,该系统基于传感器技术,通过监测和控制养护混凝土的含水量,使其达到适合高质量养护混凝土的水平,结果表明,该系统在混凝土养护质量方面优于传统方法。艾琦陽等^[8]基于深度学习算法技术,研发了一款 AI 智能核心筒喷淋养护系统,解决了传统超高层核心筒养护不均匀及人工喷洒养护不到位的问题,保证了养护质量。徐有为^[9]针对传统混凝土养护方式存在的问题,采用了智能养护设备对混凝土构件进行养护,并通过现场试验证明了智能养护系统的有效性。施虹先等^[10]设计了一款智能混凝土养护装置,使其能在无线智能开关的控制下将养护水均匀地喷洒在浇筑完成的混凝土表面,该装置能降低劳动强度并解决洒水不均匀的问题。

综上所述,混凝土智能化养护系统的研究及运用取得了较大进展。然而目前的智能化养护系统存在两个问题:①养护系统主要应用于箱形截面梁等较小面积混凝土构件的养护,而对于面积较大的混凝土结构,例如针对高层建筑楼面板与屋面板的智能养护系统研究较少;②部分养护系统在混凝土面层缺水后不能进行自动检测,仍需人工观测混凝土表面的干湿情况,需人工开启洒水开关,人工观察水箱内的储存水量并及时对水箱进行补水,若监测不及时仍会存在洒水养护不到位的情况,总体而言,目前的智能化养护系统仍不完善^[11]。

因此,本文针对混凝土在养护过程中存在的问

题,基于 PLC 自动化控制技术,设计一种适用于大面积混凝土构件养护的混凝土智能养护设备。通过监测混凝土面层的温湿度,可实现全方位自动化养护混凝土,控制精度更高,且可节省劳动力及水资源。

1 理论喷淋间隔时间的确定

为了对混凝土构件进行有效的喷淋养护,需根据水泥的水化热释放规律,确定合理的喷淋养护时间间隔。

1.1 水化热释放速率

测定水化热的方法一般有溶解热法测定^[12]和直接法测定两种。溶解热法按热化学盖斯定律,将未水化与水化一定龄期 t_i 的水泥分别在一定浓度的标准酸溶液中进行溶解,其溶解热差为该龄期内的水化热量 q_i 。以 t_i 时间段内的平均放热速率代替 t_i 时刻的放热速率,则其放热速率如下:

$$v_i = \frac{q_i - q_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (1)$$

式中: v_i 为 t_i 时刻的瞬时水化热速率; q_i 为 t_i 时刻对应的水化热数值; q_{i-1} 为 t_{i-1} 时刻对应的水化热数值。

运用直接法测试时,水泥在反应容器中积累的水化热会加速水化反应过程,使实际水化时间比 20℃ 标准温度条件下的水化时间短,从而对水化反应速率产生影响。因此,在本文中引入相对于标准温度为 20℃ 时的等效龄期 t_i^e ^[13] 来消除由于热量累积而导致的温度升高影响。运用基于 Arrhenius 方程^[14]来计算等效龄期:

$$t_i^e = \sum_{i=1}^n \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_r + 273} - \frac{1}{T(\Delta t_i) + 273} \right) \right] \Delta t_i \quad (2)$$

式中: t_i^e 为等效龄期; E_a 为活化能,当 $T \geq 20^\circ\text{C}$ 时, $E_a = 33.5 \text{ kJ/mol}$, 当 $T < 20^\circ\text{C}$ 时, $E_a = 33.5 + 1.47 \times (20 - T) \text{ kJ/mol}$; R 为气体常数, $R = 8.32 \text{ (J/mol/K)}$; T_r 为标准温度, $T_r = 20^\circ\text{C}$; $T(\Delta t_i)$ 为时间间隔 Δt_i 内的平均混凝土温度; Δt_i 为时间间隔。

将等效龄期 t_i^e 代入式 (1), 可得到使用直接法测试时的瞬时水化热释放速率:

$$v_i^e = \frac{q_i - q_{i-1}}{t_i^e - t_{i-1}^e} \quad (3)$$

1.2 确定喷淋时间间隔公式

水泥水化热释放过程如图 1 所示^[15]。由图 1 可知,在 48h 之内,混凝土的水化反应放热速率较快,超过 48h 后,放热速率逐渐变缓。因此应对不同

时间段的混凝土养护进行相应调整,在水化热初期应保持较高的喷淋养护频率,而在水化反应后期应降低喷淋养护的频率,避免因过度养护导致混凝土早期强度降低。

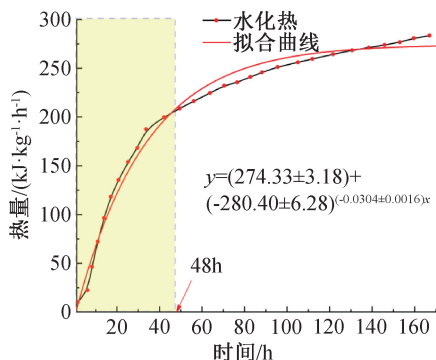


图 1 混凝土 7d 水化热的释放过程

Fig. 1 Release process of 7d hydration heat of concrete

依照不同时期的放热状态,将 48h 前后不同放热时间段的放热速率分开计算,并确定不同时间段的养护喷淋时间间隔。

1) 48h 前的喷淋时间间隔

因不同温度对混凝土结构中水化热产生速率的影响有所不同,故可通过式(2)计算等效龄期,以获得相应的放热速率。则此时间段内的喷淋时间间隔为:

$$\Delta t^e = \frac{q_n}{v_i^e} - t_{sp} \quad (4)$$

式中: q_n 为水泥的水化热量在不同喷淋养护时间区段内的名义热量; v_i^e 为等效龄期下计算出的水化热放热速率 [$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{h})$]; t_{sp} 为混凝土构件表面相对湿度低于 80% 时需提前打开喷淋的时间。

2) 48h 后的喷淋时间间隔

在 48h 后,为保证水化效果,根据式(5)计算:

$$\Delta t^e = \frac{q_n}{v_{48h}^e} - t_{sp} \quad (5)$$

式中: v_{48h}^e 为 48h 时计算出的等效龄期所对应的放热速率。

由式(4),(5)得到的时间为等效时间间隔,由式(2)可反算得到环境平均温度为 T_i 时的实际时间间隔:

$$\Delta t = \frac{\Delta t^e}{\exp\{E_a/R[1/(20+273) - 1/(T_i+273)]\}} \quad (6)$$

综上所述,混凝土构件的喷淋养护时间间隔为:

$$\Delta t = \begin{cases} \frac{q_n/v_i^e - t_{sp}}{\exp\{E_a/R[1/(20+273) - 1/(T_i+273)]\}} & (t < 48h) \\ \frac{q_n/v_{48h}^e - t_{sp}}{\exp\{E_a/R[1/(20+273) - 1/(T_i+273)]\}} & (t > 48h) \end{cases} \quad (7)$$

式中: Δt 为对应龄期的养护时间间隔; T_i 为环境平均温度。

将得到的水泥水化热释放规律和理论喷淋时间间隔等数据写入可编程控制器 PLC 中,以此作为对混凝土养护的控制时间点。

2 智能喷淋系统设计

2.1 智能养护系统组成

混凝土智能养护系统主要由可实现自动化控制的智能养护箱、旋转喷头及连接管线等构件组成,如图 2 所示。

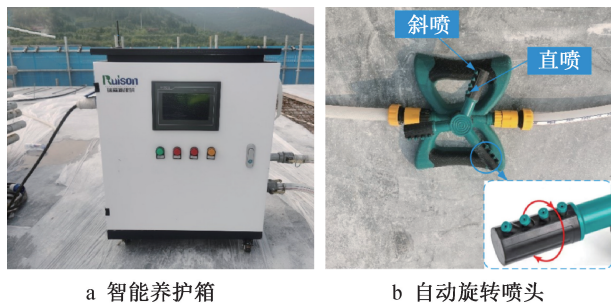


图 2 智能养护系统组成

Fig. 2 Components of the intelligent maintenance system

在智能养护箱箱体上表面安装可接收信号的传感器。使用时,智能养护系统在连接电源后,智能养护箱通过控制系统将水流传输至自动旋转喷头。自动旋转喷头在水压的冲击作用下可实现 360° 旋转喷淋,喷口可实现 15°~45° 的调节,另外其喷口由斜向喷口及直向喷口组成,可实现较大面积的喷淋养护。

在对大面积混凝土例如楼面板进行养护时,将智能养护箱安置在浇筑完成的混凝土楼面板上,并依次连接管线与自动旋转喷头。根据楼面板面积将多条连接管线等间距布设,以实现较大面积混凝土构件的喷淋养护。在智能养护系统实际投入使用前,对其进行多次试验。根据现场试验可知每个自动旋转喷头的有效喷淋半径可达 3m,即单个自动旋转喷头可实现近 28m² 混凝土构件的喷淋养护。

2.2 控制系统的硬件设计及选型

智能养护箱内部组成如图 3 所示,包括电气智

能控制模块、网络通信模块、智能感应模块、机械水泵模块和信息展示模块。网络通信模块与终端设备进行通信连接。本文所采用的智能混凝土养护系统具备双核心,即 PLC 控制器和 4G 控制模块。

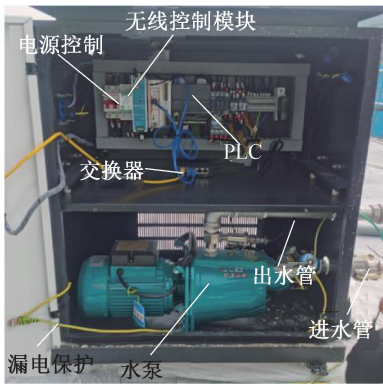


图3 智能养护箱内部组成

Fig. 3 Internal composition of intelligent maintenance box

该系统控制原理如图 4 所示,以 PLC 控制器、4G 控制模块为核心,对喷淋系统起双重控制作用。通过远程遥控或定时自动开启洒水养护,能实现混凝土自动化养护。此外,电气智能控制模块能多点探测混凝土表面含水量,当体外布设的水浸式传感器监测到混凝土面层无水时,养护系统会自动启动水泵进行洒水作业;一旦混凝土面层达到设定的湿度,水泵会自动关闭,停止洒水。这种智能养护系统具有更高的控制精度,能节省劳动力并节约水资源。

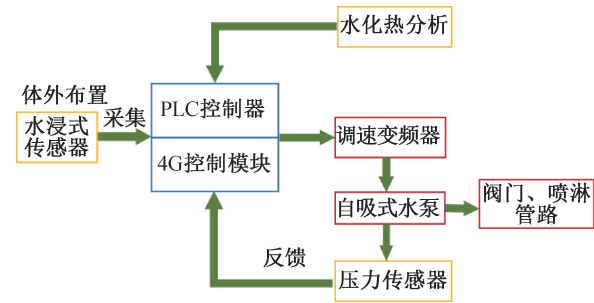


图4 混凝土智能养护系统控制原理

Fig. 4 Control principle of concrete intelligent curing system

3 现场应用

某集体宿舍楼项目位于济南市章丘区,地上 6 层,无地下室,总建筑面积 11 564. 35m²,标准层建筑面积 1 874. 57m²;建筑结构为钢结构,其中柱、梁为钢结构,楼板为钢筋桁架楼承板。在实际施工过程中,楼面板分 3 段进行浇筑。取其中的两段楼面板进行对照试验,其中一段楼面板采用传统人工养

护,另一段楼面板采用智能喷淋养护设备进行养护。根据前文自动旋转喷头喷淋半径可知,需布设至少 16 个自动旋转喷头,才可实现 600m² 左右混凝土楼面板构件的喷淋养护。所以对采用智能养护设备进行养护的楼面板段布设 16 个喷头,喷头间距为 6m,具体布设方式如图 5 所示。

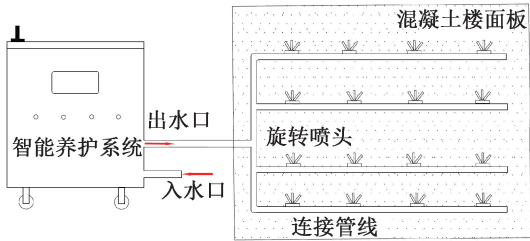


图5 自动喷淋系统布设

Fig. 5 Automatic spray system layout

将带有自动旋转喷头的 4 条给水管线等间距布设于浇筑完成的楼面板上,每条给水管上配备 4 个自动旋转喷头。并将进水管连接于智能养护箱上,运用智能养护系统对浇筑完成的混凝土楼面板进行养护,最终养护效果如图 6 所示,养护效果较好,未见初始裂缝出现。另外,从劳动力角度进行分析,传统的人工洒水养护在 7d 养护周期中,每天需安排工人进行洒水养护;而智能养护箱仅需在养护前的安装及拆除时安排工人,其他时间段无需安排人员进行养护工作,所以智能养护系统可在施工过程中大幅度降低劳动力资源的投入。



图6 智能养护楼面板最终效果

Fig. 6 Final effect of intelligent maintenance building panel

统计 10 次传统人工养护与智能养护所需的时间,得到如图 7 所示的对照折线图。由图 7 可知,智能养护所用时间相对稳定,保持在 5min 左右,而人工养护的时间上下波动幅度较大,且所用时间相较于智能养护时间较长。另外,对 7d 内的两段楼面板在养护过程中产生的成本进行综合比较分析,如表 1 所示,不考虑智能喷淋养护设备的初始研发成本,与传统人工养护相比,智能养护设备养护楼面板可

降低 68.9%的成本,节约 43.9%的用水量。

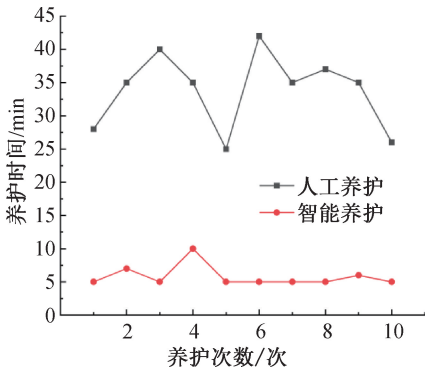


图 7 人工养护与智能养护完成时间对比

Fig. 7 Comparison of completion time between manual maintenance and intelligent maintenance

表 1 楼面板的养护成本

Table 1 Maintenance cost of floor panels				
类型	用水量/ m ³	耗电量/ (kW·h)	人工成本/ 元	总成本/ 元
智能养护	13.8	5.8	300	360.6
人工养护	24.6	14.2	1 050	1 160.8

4 结语

1)现场混凝土楼面板的最终养护效果表明,通过智能设备养护可获得力学性能好、色差低、裂纹少的混凝土。

2)从劳动力角度进行分析,与传统洒水养护方式相比较,智能养护系统可大幅度节省劳动时间,降低施工成本及节约水资源。

3)智能养护系统的应用可使现场养护施工过程更加规范化,且能自动监测混凝土表面的含水量,有效消除人工养护在混凝土养护过程中的随意性,从而实现对整个养护过程的质量把控。

参考文献:

[1] 闫振鹏,李化建,安明喆. 混凝土养护效果评价方法研究进展[J]. 混凝土, 2012 (4): 82-85, 88.
YAN Z P, LI H J, AN M Z. Research progress on evaluation methods of concrete curing effect[J]. Concrete, 2012(4): 82-85, 88.

[2] 贾兴文,冉少念,吴洲,等. 混凝土养护质量原位检测评价方法研究进展[J]. 材料导报, 2015, 29(13): 108-111.
JIA X W, RAN S N, WU Z, et al. Research progress of in-situ detection and evaluation methods of concrete curing quality[J]. Materials reports, 2015, 29(13): 108-111.

[3] YANG J, FAN J, KONG B, et al. Theory and application of new automated concrete curing system [J]. Journal of building engineering, 2018;125-134.

[4] 樊启祥,段亚辉,王业震,等. 混凝土保湿养护智能闭环控制研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(7): 671-680.
FAN Q X, DUAN Y H, WANG Y Z, et al. Research on

intelligent closed-loop control for moisture curing of concrete[J]. Journal of Tsinghua University (science and technology), 2021, 61(7): 671-680.

[5] 张斌. 基于 PLC 技术的自动喷淋控制系统设计[J]. 自动化应用, 2023, 64(4): 70-72.
ZHANG B. Design of automatic spray control system based on PLC technology [J]. Automation application, 2023, 64 (4): 70-72.

[6] 于正航,马月辉,王婵. 混凝土箱梁喷淋养护系统的设计与实现[J]. 自动化仪表, 2016, 37(11): 93-95.
YU Z H, MA Y H, WANG C. Design and implementation of spray curing system for concrete box girder [J]. Process automation instrumentation, 2016, 37(11): 93-95.

[7] LO K C, KWOK H W T, SIU M F F, et al. Internet of things-based concrete curing invention for construction quality control [J]. Advances in civil engineering, 2021;1-13.

[8] 艾琦瑒,王旭毅,郝黎明,等. 超高层核心筒 AI 联动喷淋混凝土养护技术[C]//2022 年全国土木工程施工技术交流会论文集, 2022.
AI Q Y, WANG X Y, HAO L M, et al. Super high-rise core tube AI-linked spray concrete maintenance technology [C]// Proceedings of the 2022 National Civil Engineering Construction Technology Exchange Conference, 2022.

[9] 徐有为. 水泥混凝土智能养护系统的理论与应用研究[J]. 中外建筑, 2016 (8): 157-159.
XU Y W. Research on theory and application of cement concrete intelligent curing system[J]. Chinese & overseas architecture, 2016(8): 157-159.

[10] 施虹先,安志兵,陈美军,等. 混凝土智能养护装置: 201721394076. 2[P]. 2018-08-14.
SHI H X, AN Z B, CHEN M J, et al. Concrete intelligent curing device: 201721394076. 2[P]. 2018-08-14.

[11] 孙震,谢洪栋,冷明亮,等. 智能混凝土养护设备: 202211388310. 6[P]. 2023-02-03.
SUN Z, XIE H D, LENG M L, et al. Intelligent concrete curing equipment: 202211388310. 6[P]. 2023-02-03.

[12] 殷祥男,王骁,王伟智,等. 水泥水化热测定方法综述[J]. 水泥工程, 2022(6): 56-61.
YIN X N, WANG X, WANG W Z, et al. Review of determination methods for heat of hydration of cement [J]. Cement engineering, 2022(6): 56-61.

[13] 彭春元,张小鹏,余斌,等. 基于等效龄期的再生细粉混凝土成熟度研究[J]. 混凝土, 2020(1): 22-26.
PENG C Y, ZHANG X P, YU B, et al. Research on maturity of recycled fine powder concrete based on equivalent age [J]. Concrete, 2020(1): 22-26.

[14] HANSEN P F, PEDERSEN J. Maturity computer for controlled curing and hardening of concrete[J]. Nordisk betong, 1977,111 (21): 156-159.

[15] 杨剑,彭鑫,陈康军,等. 混凝土智能养护系统研究[J]. 混凝土, 2015(4): 155-158.
YANG J, PENG X, CHEN K J, et al. Research on intelligent curing system of concrete[J]. Concrete, 2015(4): 155-158.