

全再生粗骨料高性能混凝土施工水化热温度的监测

——以南宁学院结构大厅反力墙混凝土施工为例

戴黄粒, 杨 剑, 杨景雄, 王慧霞

南宁学院土木与建筑工程学院, 广西 南宁

收稿日期: 2025年11月16日; 录用日期: 2025年12月7日; 发布日期: 2025年12月22日

摘 要

全再生粗骨料高性能混凝土水化热大的特点, 南宁学院结构大厅反力墙混凝土施工建立了完整的温控技术体系, 包括监测、控制和水管、保温等措施。研究结果表明, 采取的温控措施有效降低了全再生粗骨料高性能混凝土的内部温度, 最高温度控制在73℃以内, 且温度变化平稳。与普通C50混凝土相比, 再生混凝土内部温度明显较低, 表明温控措施有效降低了水化热的影响。水化热温度监测和控制方法能够有效控制全再生粗骨料高性能混凝土的内部温度, 防止温度裂缝的产生, 确保了工程质量, 为类似工程提供了参考, 推动了全再生粗骨料高性能混凝土在建筑行业中的应用。

关键词

全再生粗骨料高性能混凝土, 水化热, 温度监测, 温度控制

On-Site Monitoring of Hydration Thermal Regime in High-Performance Concrete Employing Entirely Recycled Coarse Aggregate

—Illustrative Case of the Counterforce Wall, Structural Testing Hall, Nanning University

Huangli Dai, Jian Yang, Jingxiong Yang, Huixia Wang

College of Architecture and Civil Engineering, Nanning University, Nanning Guangxi

Received: November 16, 2025; accepted: December 7, 2025; published: December 22, 2025

文章引用: 戴黄粒, 杨剑, 杨景雄, 王慧霞. 全再生粗骨料高性能混凝土施工水化热温度的监测[J]. 土木工程, 2025, 14(12): 3022-3030. DOI: 10.12677/hjce.2025.1412324

Abstract

Due to the characteristic of high hydration heat in high-performance concrete made from fully recycled coarse aggregate, a comprehensive temperature control technology system was established for the concrete construction of the reaction wall in the Structural Hall at Nanning University. This system included monitoring, control, and measures such as cooling pipes and insulation. The research results indicate that the adopted temperature control measures effectively reduced the internal temperature of the high-performance concrete made from fully recycled coarse aggregate, with the maximum temperature controlled within 73°C and temperature changes remaining stable. Compared to ordinary C50 concrete, the internal temperature of the recycled concrete was significantly lower, demonstrating that the temperature control measures effectively mitigated the impact of hydration heat. The monitoring and control methods for hydration heat temperature can effectively regulate the internal temperature of high-performance concrete made from fully recycled coarse aggregate, prevent the occurrence of temperature cracks, ensure engineering quality, provide references for similar projects, and promote the application of high-performance concrete made from fully recycled coarse aggregate in the construction industry.

Keywords

High-Performance Concrete with Fully Recycled Coarse Aggregate, Hydration Heat, Temperature Monitoring, Temperature Control

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着建筑业的快速发展，再生混凝土的研究与实际应用已成为土木工程的重要发展方向。全再生粗骨料高性能混凝土利用废弃混凝土制成二次骨料，契合绿色建筑理念，其的使用可以减少建筑废弃物的产生，达到可持续发展的目标，推动了建筑行业的可持续发展[1]。但，其水化热反应比传统混凝土更剧烈，可能导致温度裂缝、强度降低等问题。因此，对高性能混凝土的水化热温度进行监测和控制至关重要。

以南宁学院结构大厅反力墙施工为例，总结了大体积全再生粗骨料高性能混凝土的温控技术体系，并制定了施工方案和温控措施。该体系有效控制了水化热温度，确保了工程质量，为类似工程提供了参考。

2. 监测点的布置与选择

监测点的布置与选择是水化热温度监测的关键环节，需要综合考虑现场实际情况和监测目标。

2.1. 监测点布置的原则

代表性原则：监测点应均匀分布，覆盖墙两侧及中部，设置不同深度，关键部位设点，对比分析反力墙 A 与 B 的温度变化。

科学性原则：遵循规范，结合理论计算和数值模拟，指导监测点布置。

系统性原则：构建监测网络，实现数据共享，提高效率。

合理性原则：平衡成本与监测目标，确保施工便利和安全。

其他原则：确保监测点易维护，不影响建筑美观。

2.2. 监测点布置方案

为深入研究反力墙 B 再生混凝土结构内部混凝土、钢筋、预应力等的力学状态，对反力墙监测布点方案进行了优化(见图 1)，在其内部埋置温度计、钢筋计、应变传感器、预应力锚索测力计等，实时动态监测，确保监测数据的准确性与连续性。

在研究过程中全程采取埋置冷却水管、主体覆盖保温材料等措施来控制全再生粗骨料高性能混凝土水化热温度。

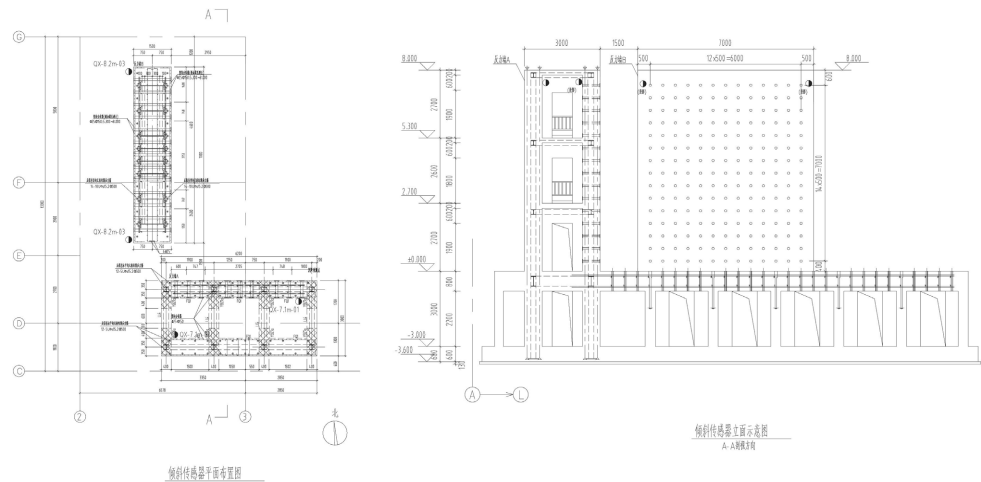


Figure 1. Optimization of the monitoring point arrangement scheme for the reaction wall
图 1. 反力墙监测布点方案优化

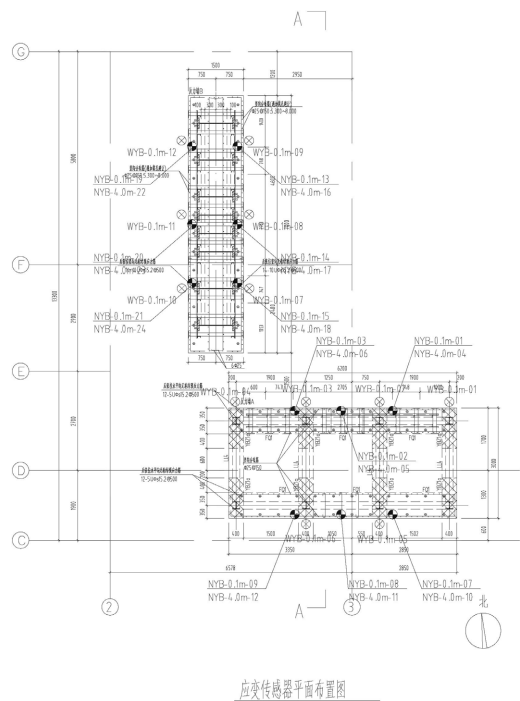


Figure 2. Planar layout of strain sensors (24 units, vibrating wire type, embedded and fastened to reinforcing steel bars in the stress direction, with temperature measurement)
图 2. 应变传感器平面布置图(24 台, 振弦原理, 预埋绑扎在受力方向钢筋上, 带测温)

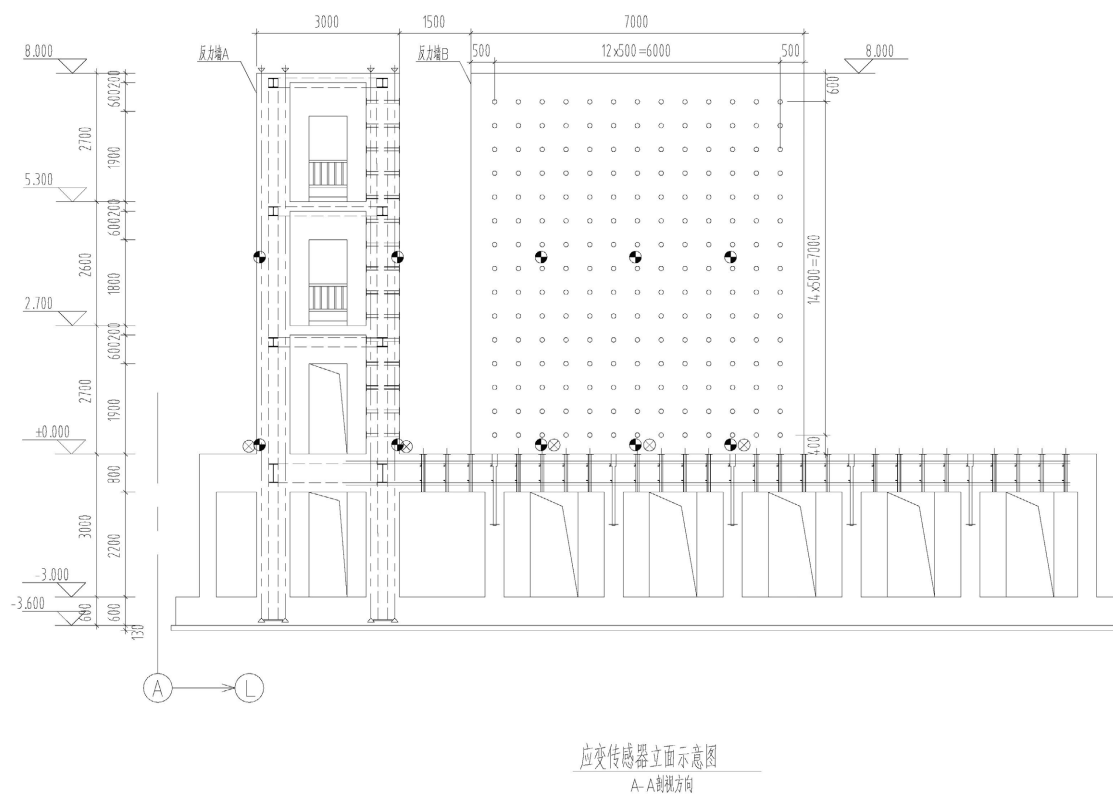


Figure 3. Schematic elevation diagram of strain sensors (Section A-A)

图 3. 应变传感器立面示意图(A-A 剖视方向)

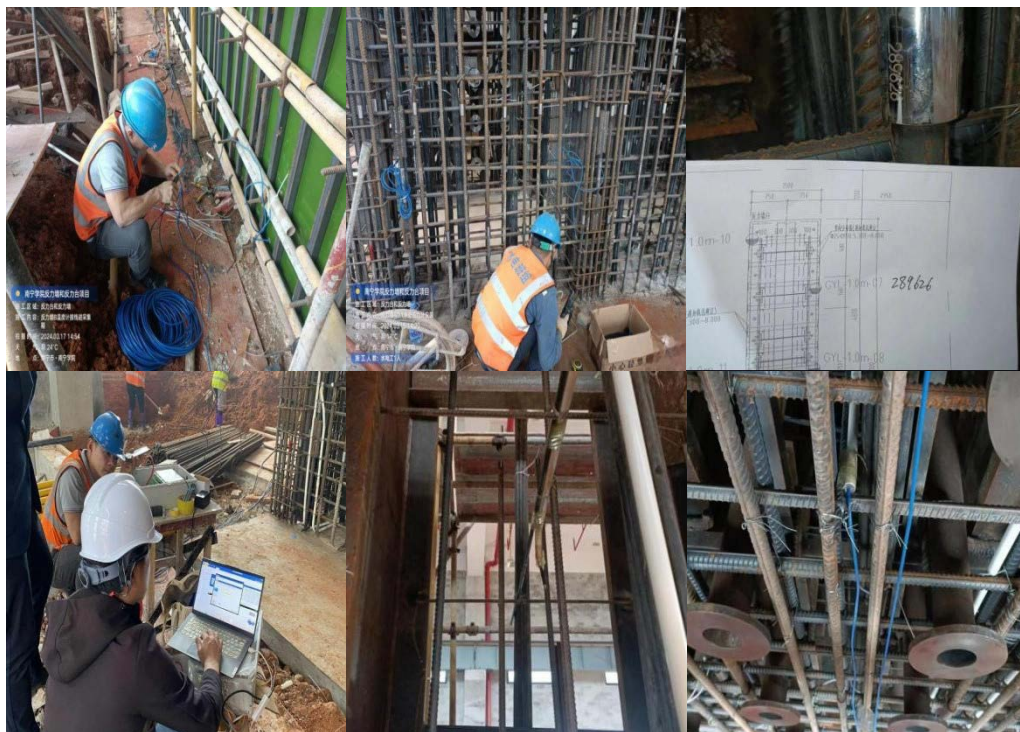


Figure 4. Field installation and wiring of monitoring instruments

图 4. 监测仪器现场安装与接线

3. 现场温度监测的内容和要求

3.1. 监测内容

3.1.1. 混凝土内部温度监测

混凝土内部温度：通过在反力墙内部不同位置布设测温点，实时监测混凝土在水化过程中产生的温度变化。这些测温点应均匀分布在反力墙的两边及中部，确保能够全面反映混凝土内部的温度情况。

3.1.2. 混凝土外部温度监测

环境温度：监测反力墙周围的大气环境温度，以便与混凝土内部温度进行对比，评估温度差异对混凝土性能的影响。

3.2. 监测要求

3.2.1. 测温点布置

测温点平行于浇筑方向均匀分布(见图 2、图 3)，两边测点距墙面一定距离，确保测量准确。测温元件安装牢固，避免损坏(见图 4)。

3.2.2. 测温频率

养护初期每 2 小时测温一次，后期可降低频率，关键部位或温度变化大的区域增加测温次数。

3.2.3. 数据处理与分析

记录温度数据，绘制曲线，分析温度差异和应力影响，调整养护措施确保温度均匀。

3.2.4. 人员要求

监测人员需熟悉流程，准确记录数据，及时发现并处理异常情况。

4. 监测设备的选择与安装

在选择反力墙水化热温度监测设备时，需要考虑多个因素，应选用精度高、反应快、稳定可靠的温度计和数据采集仪进行温度监测。确保测温元件和引线的布置合理且易于保护，避免在混凝土浇筑和振捣过程中受到破坏。

4.1. 设备选型

4.1.1. 高精度温度传感器

选择具有高精度温度传感器的设备，能够准确测量混凝土内部的水化热温度。传感器精度应达到或超过项目要求的水平，以减少测量误差。

4.1.2. 稳定性

设备应具备良好的稳定性，能够在长时间内保持测量精度不受外界环境影响。

4.2. 安装与保护

设备固定，按方案将设备固定，墙面设备用螺丝或固定架，内部传感器在浇筑前固定于模板，确保稳固。线路连接，绘制线路图，选择线缆连接传感器与数据系统，检查连接可靠性，避免短路或断路。调试校准，安装后调试设备，确保准确测量和传输数据，根据实际情况调整参数。

5. 测温数据的采集与分析

通过自动采集系统获取了完整的温度数据。分析表明，反力墙 B (再生混凝土)的内部温度在浇筑后

约 48 小时达到峰值 73℃，随后进入平稳的降温阶段。

5.1. 温升特性定量分析

由监测数据(见图 5)可见，反力墙 B 的峰值温度可达到 73℃，反力墙 A 的峰值温度仅达到 29℃，造成差异主要由以下两个因素导致：

反力墙 B 作为结构大厅的核心受力构件，其设计截面厚度大。混凝土厚度对其内部的温升影响巨大，随着混凝土厚度的增加，养护时的内部温升会快速增加[2]。所以大体积导致混凝土内部水化热积聚严重，散热困难，从而引发更高的温升。

C50 再生骨料混凝土配合比见表 1，为达到 C50 高性能要求并保证再生骨料混凝土的工作性，再生混凝土的水泥用量相对较高，并掺入了粉煤灰。尽管粉煤灰能降低早期水化热，但较高的总胶凝材料用量仍是导致其总放热量大于普通混凝土的主要原因之一。此外，再生粗骨料自身吸水率较高，引入的“附加水”也可能在一定程度上影响了水化进程。

Table 1. Mix proportion of self-compacting recycled aggregate concrete (units: kg)
表 1. 自密实再生混凝土配合比(单位/kg)

编号	水泥	粉煤灰	天然骨料	再生骨料	砂	减水剂	拌合水	附加水
R0	334	132	790	0	827.4	2.1	190	0
R50	334	132	395	395	827.4	2.1	190	5.1
R100	334	132	0	0	827.4	2.1	190	10.2

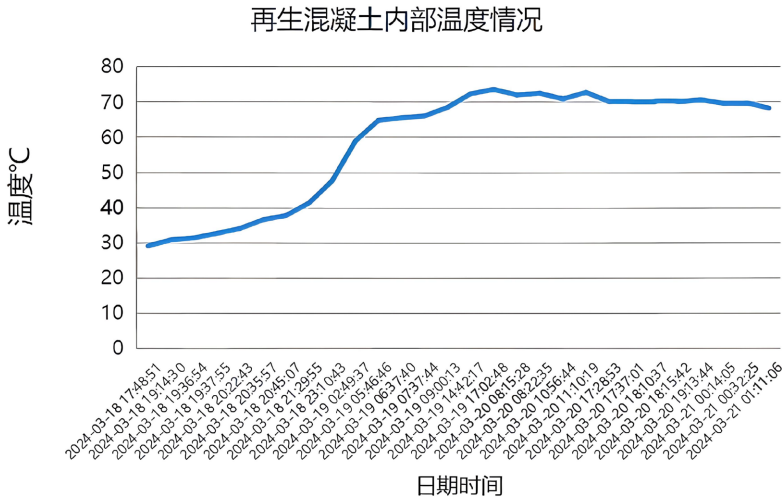


Figure 5. Heat of hydration from recycled concrete in reaction wall B
图 5. 反力墙 B 再生混凝土水化热

再生混凝土的温升速率在浇筑后 24 小时内最为剧烈，并在约 48 小时达到峰值。而普通混凝土的温升过程更为平缓，峰值温度出现较早且数值较低。这清晰地揭示了再生混凝土在水化早期具有更集中的放热特性，对温控提出了更高要求。

5.2. 与文献及理论计算对比

本研究记录的峰值温度低于文献中报道的同类大体积再生混凝土的常见峰值[3]，这凸显了本项目所采取温控措施的有效性。

根据土木工程普遍采用的混凝土绝热温升估算公式进行估算：

$$T_{\max} = T_0 + \frac{W \cdot Q}{c \cdot \rho}$$

其中：

T_0 为混凝土的入模温度(假设为 30℃)；

W 为单位水泥用量(334 kg/m³)；

Q 为水泥的最终水化热(假设为 P.O 42.5 水泥，可取值为 350 kJ/kg)；

c 为混凝土的比热容(取 0.96 kJ/kg·℃)；

ρ 为混凝土的密度(取 2285 kg/m³)。

代入计算：

$$T_{\max} = 30 + \frac{334 \times 350}{0.96 \times 2285} \approx 30 + 53.3 = 83.3^\circ\text{C}$$

理论计算的绝热温升约为 83.3℃。而实际监测到的最高温度为 73℃，低于理论值约 10.3℃。这一差异正是内置冷却水管持续散热效果的直观体现，证明了温控措施成功地带走了部分水化热，避免了混凝土处于完全绝热状态，从而降低了实际峰值温度。

6. 温控措施

6.1. 裂缝成因分析

大体积混凝土在浇筑后 3~5 天内，因水泥水化集中放热，而混凝土导热性差，导致内部热量积聚，形成高温。当内外温差过大时产生的温度应力超过混凝土早期抗拉强度，是引发温度裂缝的主要原因。

6.2. 具体温控措施

6.2.1. 原材料与配合比优化

从原材料控制着手，是规避大体积混凝土裂缝问题发生的重要措施。

首先，应注重矿物成分和水泥颗粒之间的关系，选用水化热较低的材料，以此降低水泥的水化热。

其次，含泥量越大的细骨料收缩变形程度越严重，为降低混凝土裂缝给整体施工质量带来的影响，应严格控制细骨料的含泥量，选择干净的中粗砂作为细骨料。

最后，在混凝土构件中，粗骨料可起到骨架作用，但水泥浆体和粗骨料形成的过渡区则是混凝土构件最为薄弱的部分，粒径适中的碎石是粗骨料的最佳选择。此外，混凝土浇筑还需添加一定的外加剂，但其比例也需要进行严格的控制[4]。

6.2.2. 内置循环水冷却系统

本项目创新性地利用反力墙固有的加载孔道作为冷却水循环通道，形成了一套经济有效的闭式循环降温系统。以南宁学院结构大厅反力墙混凝土施工为例。

混凝土凝结初期水泥水化热较大，由于条件所限，无法使用低温水或内部循环水，只能利用实体墙中空的加载孔作为外部循环水通道，每排加载孔形成一个循环单元，安排专人输水排水三昼夜，提高降温效率。具体做法如下：

第一，浇筑前，安排工人把加载孔的穿墙螺杆在模板上孔隙封严。

第二，在加载孔两头接触的模板钻孔，放置进出水管，首尾相连，使水路行走路线最长。

第三，加载孔的混凝土浇筑完成，即刻注水散热。

外部水循环系统布置见图 6、图 7 所示。

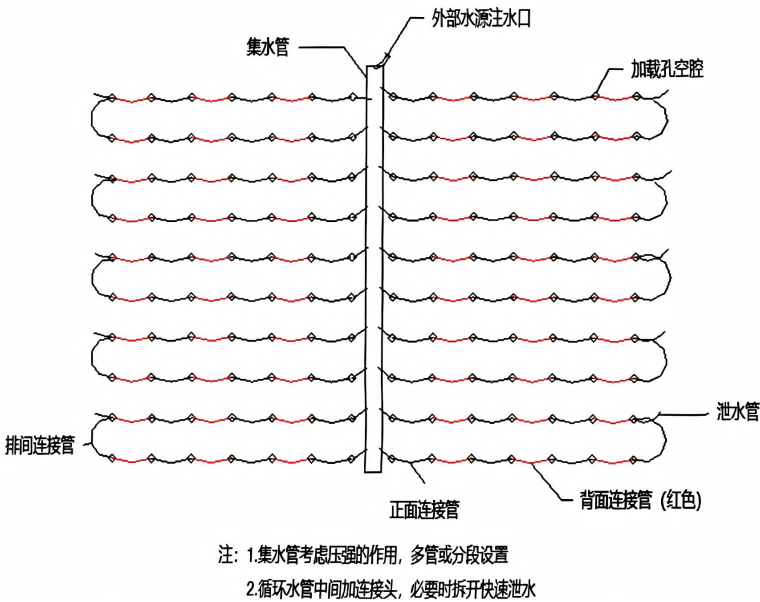


Figure 6. Layout of the external circulating water system
图 6. 外部循环水系统布置图

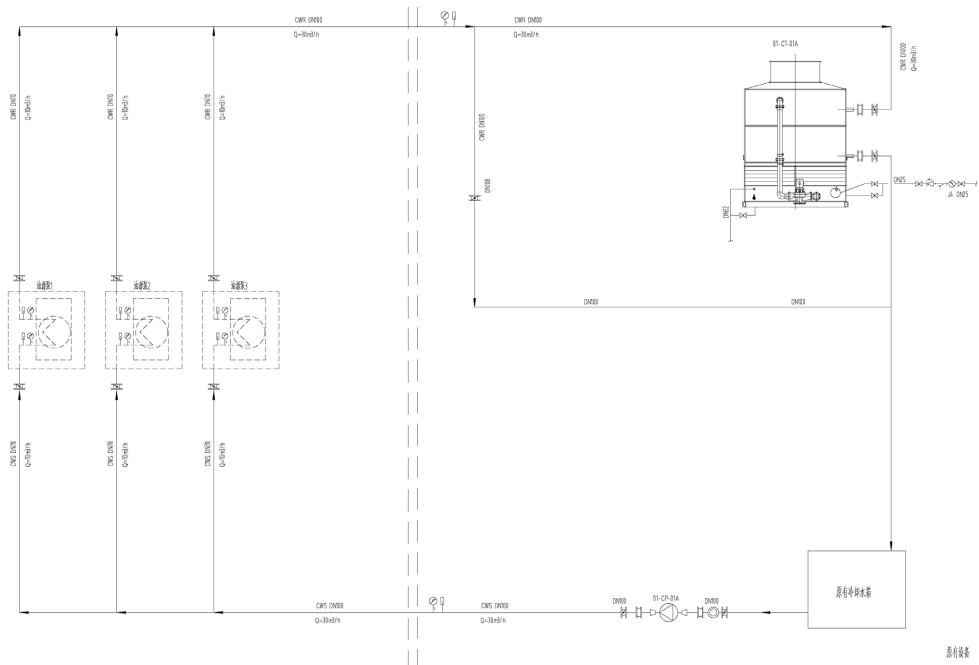


Figure 7. Schematic flow diagram of the closed-loop cooling water system
图 7. 闭式循环冷却水系统流程示意图

6.2.3. 综合保温保湿养护

在冷却散热的同时，对混凝土表面进行覆盖并定时洒水养护，保持表面长期湿润。此举既能减少内部热量散失过快，防止表面降温收缩开裂，又能促进水泥充分水化，保证再生混凝土表面平整无裂缝(见图 8)。



Figure 8. Overall appearance of fully recycled coarse aggregate concrete
图 8. 全再生粗骨料混凝土表现

7. 结论

通过对南宁学院结构大厅反力墙全再生粗骨料高性能混凝土的施工实践与温度监测,得出以下结论:

7.1. 温控体系有效性

建立的以“预防为主、冷却散热、综合养护”为核心的温控技术体系是成功的。通过优化配合比、利用加载孔实施循环水冷却、以及严格的保温保湿养护,有效控制了再生混凝土的水化热温升。

7.2. 温控体系实效性

监测数据显示,全再生粗骨料混凝土的最高内部温度被控制在 73°C 以内,且温度变化平稳。其实际峰值温度低于理论计算值约 10.3%,并与文献中同类工程相比处于较低水平,证明了温控措施的有效性。

7.3. 温控体系实践性

采取温控措施后,C50 全再生粗骨料混凝土施工顺利进行,表观质量良好,未出现有害温度裂缝。本案例为全再生粗骨料高性能混凝土在大体积结构中的安全应用提供了完整的技术路径和实践范例,对推广绿色建筑材料具有重要意义。

本研究成功解决了全再生粗骨料混凝土的水化热控制难题,通过有效的温控技术体系,证实了该材料在大体积高强度工程中应用的可行性。案例实践为绿色建材的规模化应用提供了可靠范例,对推动建筑业可持续发展具有重要实践价值。

基金项目

南宁市低碳环保建筑材料与结构工程研究中心; 2023XWJD02 瑞真造价实践基地; 20240860 外墙流态成形保温材料性能及施工技术研究。

参考文献

- [1] 张晓婷. 高性能混凝土施工技术在公路工程中的应用[J]. 交通世界, 2022(SI): 207-208.
- [2] 王朝晖, 张艳涛, 邓洋. 大体积混凝土温度影响因素与控制措施研究[J]. 建筑施工, 2023, 45(9): 1910-1913.
- [3] 李洪恩. 大体积混凝土水化热及温控措施研究[J]. 智能建筑与工程机械, 2021, 3(11): 39-41.
- [4] 温海军. 大体积混凝土施工中的裂缝分析及防控措施[J]. 居业, 2020(8): 75-75.