

内养护技术和膨胀剂对钢管UHPC-CA界面黏结性能影响研究

肖明杰^{1,2}, 邓青山^{1,2}, 李迎昊^{1,2}, 马冰^{1,2}

(1. 桥梁智能与绿色建造全国重点实验室, 湖北 武汉 430034; 2. 中铁大桥科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430034)

摘要: 为研究钢管UHPC-CA界面黏结性能, 探究内养护技术和膨胀剂对破坏模式、荷载-滑移曲线和界面黏结性能的影响, 以内养护技术和膨胀剂种类为试验参数, 进行配合比优化设计, 分析其早期膨胀效应, 并选取最优配合比(IC-CaO)和常规配比(RE)进行界面黏结性能试验。结果表明: 单一内养护技术和膨胀剂可缓解UHPC-CA早期收缩, 两者协同作用能进一步改善其收缩性能, 其中内养护技术结合氧化钙类膨胀剂(IC-CaO)对早期膨胀效果的提升最为显著。界面黏结性能试验破坏模式均为核心混凝土与钢管交界处脱黏, 但IC-CaO组钢管内壁仍附着部分混凝土。试验测得RE组与IC-CaO组平均界面黏结强度分别为2.13、2.91 MPa, 表明内养护技术和氧化钙类膨胀剂的协同作用可增强UHPC-CA和钢管间界面黏结强度。

关键词: 黏结性能; UHPC-CA; 内养护技术; 膨胀剂; 配合比设计

中图分类号: TU398.9; TU528

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)06-0064-04

Study on Effect of Internal Curing Technology and Expansive Agent on Interfacial Bonding Properties of UHPC-CA Steel Pipe

XIAO Mingjie^{1,2}, DENG Qingshan^{1,2}, LI Yinghao^{1,2}, MA Bing^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Bridge Intelligent and Green Construction, Wuhan 430034, China; 2. China Railway Bridge Science Research Institute, Co., Ltd., Wuhan 430034, China)

Abstract: To study the interfacial bonding properties of UHPC-CA steel pipe, the effects of internal curing technology and expansive agent on failure mode, load-slip curve and interfacial bonding properties are explored. The internal curing technology and the type of expansion agent are used as the experimental parameters to carry out the mix proportion optimization design and analyze its early expansion effect, and the optimal mix proportion (IC-CaO) and the conventional ratio (RE) are selected for the interfacial bonding performance test. The results show that the single internal curing technology and expansive agent can alleviate the early shrinkage of UHPC-CA, and the synergistic effect of the two can further improve its shrinkage performance, in which the internal curing technology combined with calcium oxide expansive agent (IC-CaO) can improve the early expansion effect most significantly. The failure mode of interfacial bonding performance test is the debonding at the junction of core concrete and steel pipe, but some concrete is attached to the inner wall of steel pipe in IC-CaO group. The average interfacial bonding strengths of RE group and IC-CaO group are 2.13 MPa and 2.91 MPa respectively in the tests, which shows that the interfacial bonding strength between UHPC-CA and steel pipe can be enhanced by the synergistic effect of internal curing technology and calcium oxide-based expansive agent.

Keywords: bonding performance; UHPC-CA; internal curing technology; expansive agent; mix proportion design

0 引言

钢管超高性能混凝土(UHPC)凭借其优异的力

学性能与耐久性^[1], 在桥梁、建筑等工程领域展现出广阔应用前景^[2-3]。然而, 受超低水灰比影响, UHPC基体呈现较为明显的收缩变形特征^[4]。这一特征使UHPC与钢管间界面贴合度下降, 脱空风险上升, 同时难以有效发挥钢管对UHPC的约束作用, 最终影响了两者的协同工作性能^[5]。尽管现有研究^[6]采用在UHPC中掺入粗骨料的方式制备粗骨料超高性能混凝土(UHPC-CA), 借助粗骨料的骨架效应限制混

收稿日期: 2025-11-10

作者简介: 肖明杰(1999—), 男, 学士, 助理工程师, 从事桥梁设计工作。

通信作者: 李迎昊(1998—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁设计工作。电子邮箱: 13971095202@163.com

凝土收缩来避免钢管与核心混凝土的脱空现象,其能否满足钢管混凝土结构在长期服役条件下的力学性能要求,仍有待进一步论证。

针对高强混凝土体系水胶比低、渗透性差、传统外部养护水难以渗入内部、自收缩明显、材料开裂敏感性等问题^[7],内养护技术通过在混凝土中预埋高吸水性材料,利用其吸水—释水特性实现内部湿度补偿,已被证实是抑制混凝土自收缩的有效手段^[8]。与此同时,膨胀剂通过化学反应使混凝土体积膨胀,可主动补偿收缩变形,是控制混凝土收缩的另一关键技术^[9,10]。已有研究表明^[11],内养护材料与膨胀剂复掺可降低混凝土自收缩,其效果优于单一措施。相关学者^[12]通过试验发现,复掺方案在保持超高性能混凝土流动性与力学性能的同时,也可减少早期收缩变形。

此外,在钢管混凝土界面黏结性能研究领域,当前学者多聚焦于钢管几何尺寸和核心混凝土强度的影响。薛立红等^[13]分析了核心混凝土强度、钢管内壁状态、养护条件及黏结界面长度对极限黏结强度的影响,发现核心混凝土强度是影响黏结性能的显著因素。美国钢结构协会^[14]以截面几何参数为唯一变量,提出了适用于低水平黏结应力的极限黏结强度计算公式。部分研究^[15]则通过统计分析和数据拟合,构建了以钢管几何尺寸和混凝土强度为主要参数的计算公式,但参数标定依赖大量试验数据。值得注意的是,现有的预测公式大多仅适用于低水平界面黏结强度情况,存在较为明显的局限性。且多数公式在构建过程中,未能充分考虑混凝土膨胀应力对黏结强度的影响,尤其是微膨胀混凝土提升界面性能的因素尚未充分研究。

基于此,本研究以内养护技术和市场常见膨胀剂种类为切入点,通过优化UHPC-CA配合比设计,研究内养护技术与不同膨胀剂下UHPC-CA的膨胀性能;开展钢管UHPC-CA界面黏结性能试验,分析内养护技术和膨胀剂对界面破坏模式、荷载—滑移曲线和界面黏结强度的影响。

1 配合比优化设计

1.1 单一内养护技术和膨胀剂

为研究单一内养护技术和膨胀剂对UHPC-CA早期膨胀效应的影响,以UHPC-CA的常规配合比为基础,从市场中选取常见的膨胀剂种类,分别开展UHPC-CA早期收缩变形量测试。

UHPC-CA常规配合比为水泥:硅灰:微珠:石英砂:碎石:减水剂:钢纤维:水=600:150:50:750:650:10:40:147,水胶比0.18。内养护材料选用陶砂,按体积分数30%的比例取代石英砂,同时将预湿水量设定为总水量的18%。此外,所有膨胀剂均采用外掺法,掺量均为胶凝材料的9%。

图1为单一内养护技术和膨胀剂下UHPC-CA的早期膨胀效应,其中RE为基准组,IC为内养护组,CSA为硫铝酸钙类膨胀剂,MgO/M为镁系膨胀剂,CaO为氧化钙类膨胀剂,HCSA为硫铝酸钙—氧化钙复合型膨胀剂。

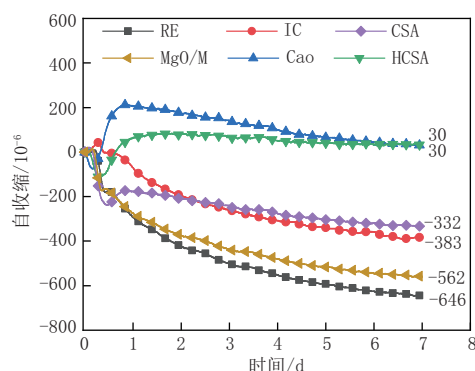


图1 单一内养护技术和膨胀剂下UHPC-CA的早期膨胀效应

试验数据显示,RE、IC、CSA和MgO/M组的7 d自收缩量分别为 -646×10^{-6} 、 -383×10^{-6} 、 -332×10^{-6} 和 -562×10^{-6} ,而CaO和HCSA组的7 d自收缩均为 30×10^{-6} 。可以看出,单一内养护技术和选取的膨胀剂均可缓解UHPC-CA的早期收缩,而且CaO和HCSA组可实现UHPC-CA的早期微膨胀。

原因在于IC组通过预埋高吸水性材料,利用其吸水—释水特性实现内部湿度补偿,从而缓解收缩。CSA组膨胀剂因需水量较大,在UHPC-CA低水胶比(通常低于0.2)体系中水分迁移受阻,难以充分水化,导致膨胀率较低。MgO/M组则因膨胀效能不足,对收缩的补偿作用有限。相比之下,氧化钙系膨胀剂(CaO和HCSA组)膨胀效能显著且需水量较低,能够完全补偿UHPC的早期自收缩。

1.2 内养护技术结合膨胀剂

上述结果表明,单一采用CaO与HCSA组膨胀剂时,UHPC-CA的7 d自收缩量均小于 50×10^{-6} 。考虑到UHPC-CA低水胶比体系下的缺水环境会抑制膨胀剂的效能,在掺入膨胀剂的基础上同步引入内养护技术,进一步研究内养护技术和膨胀剂协同作用对UHPC-CA早期膨胀效应的影响。

图2为内养护技术结合不同膨胀剂时UHPC-CA

的早期膨胀效应,其中 RE 为基准组,IC-CSA 为内养护技术结合硫铝酸钙类膨胀剂,IC-MgO/M 为内养护技术结合镁系膨胀剂,IC-CaO 为内养护技术结合氧化钙类膨胀剂,IC-HCSA 为内养护技术结合硫铝酸钙-氧化钙复合型膨胀剂。

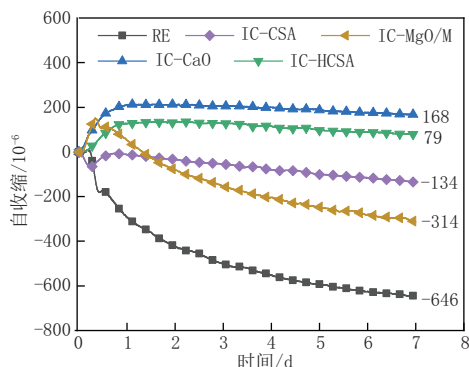


图2 内养护结合不同膨胀剂下 UHPC-CA 的早期膨胀效应

试验数据显示, IC-CSA、IC-MgO/M、IC-CaO 和 IC-HCSA 组的 7 d 自收缩量分别为 -134×10^{-6} 、 -314×10^{-6} 、 79×10^{-6} 和 168×10^{-6} 。可以看出,采用内养护技术与膨胀剂的协同作用相较于单一使用内养护技术或膨胀剂时有明显改善,这表明二者的协同作用可有效缓解 UHPC-CA 的早期收缩效应。

内养护技术通过预湿轻集料为膨胀剂反应提供一定的水分,从而充分激发其膨胀效能。其中,IC-CSA 和 IC-MgO/M 组虽在内养护技术作用下收缩有所降低,但未实现微膨胀效果;而氧化钙系膨胀剂(IC-CaO 和 IC-HCSA 组)仍使 UHPC-CA 呈现早期微膨胀,且相较于单一膨胀剂组,其膨胀增量分别增至 4.6 倍和 1.6 倍。值得注意的是,IC-HCSA 组作为复合型膨胀剂,其膨胀效能依赖水分在胶凝材料中的迁移,而 UHPC-CA 的致密结构会阻碍水分扩散,易引发膨胀不均匀或不充分现象,故而其自收缩量低于 IC-CaO 组。鉴于此,在工程实践中,推荐采用内养护技术与氧化钙类膨胀剂(IC-CaO)相结合的方式,以有效降低 UHPC-CA 的早期收缩。

2 界面黏结性能试验

2.1 试验方案

为研究内养护技术与膨胀剂协同作用对 UHPC-CA 与钢管界面黏结性能的影响,设计、制作了两组对比试件:核心混凝土常规配合比的基准组 RE;核心混凝土采用内养护技术与氧化钙类膨胀剂协同作用的对照组 IC-CaO,每组包含两个试件。所有试件的钢管尺寸统一为 $140 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 420 \text{ mm}$,均选用

Q345 等级钢材。

本次试验在 MTS6 000 kN 万能试验机上进行。在试验机加载头端部布置两个位移计,用于测量试件荷载-滑移曲线中的位移,荷载读数由试验机数控显示。试验开始前,调整试件几何对中,随后进行预加载,确认仪器仪表正常后正式加载,加载示意如图 3 所示。加载初期采用力控制,速率为 20 kN/min 。加载至预期荷载的 60% 后转为位移控制,速率为 1 mm/min 。当界面黏结完全破坏或混凝土与钢管底部平齐时,试验停止。



图3 界面黏结性能试验

2.2 破坏模式

图 4 为试件界面黏结破坏后的状态。可以看出,试件的破坏形态基本相同,均为核心混凝土与钢管交界处出现脱黏现象。其中 RE 组核心混凝土与钢管交界处出现整体脱黏现象,其核心混凝土较为完整,而 IC-CaO 组呈现局部脱黏现象,部分混凝土附着在钢管内壁。此外,在核心混凝土与钢管滑移过程中,RE 组较为平稳,未出现响声;而 IC-CaO 组出现明显的振荡现象,伴随荷载波动出现响声,且反复出现。



图4 破坏模式

2.3 荷载-滑移曲线

图 5 为荷载-滑移曲线,主要分为 3 个阶段。(1) 弹性黏结阶段:当荷载较小时,钢管与混凝土界面处于弹性黏结状态,两者协同变形,相对滑移量极小,

此时界面未发生损伤,黏结力主要由化学胶结力、机械咬合力和摩擦力组成,足以抵抗外部荷载。(2)滑移发展阶段:随着荷载的增加,局部区域出现微滑移,化学胶结力逐渐失效,黏结力主要由机械咬合力提供。随着荷载继续增加,界面滑移量进一步增大,荷载-滑移曲线斜率逐渐增大。(3)破坏阶段:荷载达到峰值后,界面黏结力下降,滑移量增加,此时黏结力主要由摩擦力提供。RE 组的荷载-滑移曲线进入下降段,伴随滑移量的增加,荷载逐渐降低;而 IC-CaO 组出现震荡现象,伴随滑移量的增加,荷载反复波动,但荷载上升达到的最大力值逐渐减小。

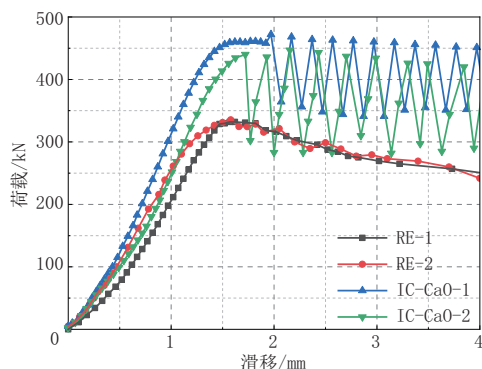


图5 荷载-滑移曲线

2.4 界面黏结强度

基于试验结果,采用下述公式对两组试件的平均界面黏结强度进行计算。

$$\tau_u = \frac{P_u}{\pi DL}$$

式中: P_u 为试验极限黏结荷载,kN; D 为钢管内径周长,mm; L 为界面长度,mm。计算显示,RE组和IC-CaO组的平均界面黏结强度分别达到了2.13 MPa和2.91 MPa,而相关研究^[16]对普通混凝土与钢管间的界面黏结强度设计要求为1.25 MPa。结果表明,常规配合比UHPC-CA与钢管间的界面黏结强度大于普通混凝土,而内养护技术与膨胀剂协同作用下UHPC-CA的平均界面黏结强度较常规配合比提升了36.6%。

具体而言,内养护技术与氧化钙类膨胀剂的协同作用不仅实现了UHPC-CA的早期膨胀,还有效提升了UHPC-CA与钢管间的界面黏结性能。这种提升主要归因于内养护技术与膨胀剂的共同作用下:UHPC-CA通过体积膨胀增大了界面摩擦力,从而提高了界面黏结强度。

3 结 论

(1)单一内养护技术和膨胀剂下RE、IC、CSA和

MgO/M组的7 d自收缩量分别为 -646×10^{-6} 、 -383×10^{-6} 、 -332×10^{-6} 和 -562×10^{-6} ,而CaO和HCSA组的7 d自收缩均为 30×10^{-6} 。单一内养护技术和选取的膨胀剂均可缓解UHPC-CA的早期收缩,而CaO和HCSA组可实现UHPC-CA的早期微膨胀。

(2)内养护技术结合不同膨胀剂下IC-CSA、IC-MgO/M、IC-CaO和IC-HCSA组的7 d自收缩量分别为 -134×10^{-6} 、 -314×10^{-6} 、 79×10^{-6} 和 168×10^{-6} 。内养护技术与膨胀剂的协同作用可有效缓解UHPC-CA的早期收缩效应,相较于单一使用内养护技术或膨胀剂时有明显改善。其中采用内养护技术结合氧化钙类膨胀剂(IC-CaO组)对UHPC-CA早期膨胀效果的提升最为显著。

(3)试件破坏模式均为核心混凝土与钢管交界处脱黏。其中RE组核心混凝土与钢管整体脱黏,核心混凝土基本完整;IC-CaO组为局部脱黏,部分混凝土附着在钢管内壁。此外,在试验过程中,IC-CaO组呈现震荡现象,伴随荷载波动出现响声,并不断反复。

(4)RE组与IC-CaO组的平均界面黏结强度分别为2.13 MPa和2.91 MPa,其中IC-CaO组较RE组平均界面黏结强度提升了36.6%。内养护技术与氧化钙类膨胀剂的协同作用,不仅实现了UHPC-CA的早期膨胀,还有效提升了UHPC-CA与钢管间的界面黏结性能。

参考文献:

- [1] 肖林,卫星,温宗意,等.钢-混组合结构桥梁2019年度研究进展[J].土木与环境工程学报(中英文),2020,42(5):168-182.
- [2] 郑纲,李迎昊,王康宁.UHPC加固钢筋混凝土梁抗弯承载力试验研究[J].城市道桥与防洪,2024(6):259-262.
- [3] 范科玮.UHPC-普通混凝土的界面抗剪性能试验研究[J].城市道桥与防洪,2025(6):342-345;352.
- [4] 郭绍霖.用于湿接缝连接的UHPC收缩控制研究[J].城市道桥与防洪,2022(7):219-222.
- [5] 刘瑞朝,董恩来,马先伟,等.超高性能混凝土收缩研究进展[J].建筑结构,2024,54(6):91-98.
- [6] 王康宁,高立强,彭旭民,等.粗骨料UHPC梁抗剪性能试验研究[J].桥梁建设,2025,55(3):105-112.
- [7] 刘路明.微膨胀超高性能混凝土的配制和性能及工程应用[D].长沙:湖南大学,2022.
- [8] 王立成,张磊.混凝土内养护技术研究进展[J].建筑材料学报,2020,23(6):1471-1478.
- [9] 徐辉,张成,刘佳钰,等.橡胶微膨胀混凝土抗压和抗折强度试验研究[J].城市道桥与防洪,2021(1):165-168;
- [10] 杨永胜,李建华,胡众,等.MgO膨胀剂在超高性能混凝土(UHPC)的膨胀效果及其机理研究[J].混凝土,2025(8):150-154;159.
- [11] 韩宇栋,李威,岳清瑞,等.内养护剂和膨胀剂组合对混凝土收缩

(下转第88)