

A physical bonding technology in which the cement interface is integrated with the original concrete structure

Zhiwu Dong

Jiangxi Qifu Waterproof Technology Co., Ltd., Pingxiang, Jiangxi, 337000, China

Abstract

Concrete, as the most widely used structural material in modern architecture, is commonly employed in infrastructure construction such as houses, Bridges, roads and ground hardening due to its high strength, durability and plasticity. However, during long-term use, due to factors such as temperature stress, load, foundation settlement and construction defects, concrete structures are prone to secondary damages such as cracks, freeze-thaw damage and alkali-aggregate reaction, leading to phenomena such as sanding, peeling and delamination, which seriously threaten the safety and durability of buildings and have become a long-term unsolved technical problem in engineering construction and operation management. In response to this issue, this study innovatively introduces the mortise and tenon structure principle of traditional Chinese wooden buildings and proposes a physical mortise and tenon technology that integrates the new cement mortar repair interface with the original concrete structure. This technology forms an integral force-bearing structure by uniformly constructing a mechanical interlocking system of trapezoidal mortise grooves on the concrete surface and the lightweight concrete layer, effectively overcoming the problems of interface separation, peeling, bubbling and delamination caused by the shrinkage difference between new and old materials. Experiments and engineering practices have shown that this process significantly enhances the shear resistance, peel resistance and long-term stability of the repair layer. After more than three years of tracking observation, there are no signs of recurrence at the repair interface, providing a reliable solution for the repair of concrete structure base surfaces.

Keywords

Engineering technology; engineering construction; building repair; concrete structure restoration

一种水泥界面与原混凝土结构融合为一体的物理卯固技术

董志武

江西启福防水科技有限公司, 中国 · 江西 萍乡 337000

摘 要

混凝土作为现代建筑中应用最广泛的结构材料, 凭借其高强度、耐久性和可塑性, 被普遍用于房屋、桥梁、道路及地面硬化等基础设施建设。然而, 在长期使用过程中, 受温度应力、荷载作用、地基沉降及施工缺陷等因素影响, 混凝土结构易产生裂缝、冻融破坏、碱骨料反应等次生损伤, 导致起沙、起壳、分层等现象, 严重威胁建筑物的安全性与耐久性, 成为工程建设与运营管理中长期未解的技术难题。针对此问题, 本研究创新性地引入中国传统木构建筑榫卯结构的卯固原理, 提出一种新水泥砂浆修复界面与原混凝土结构融合为一体的物理卯固技术。该技术通过在混凝土表面均匀构建梯形卯槽与轻质混凝土层的机械咬合体系, 形成整体受力结构, 有效克服新旧材料因收缩差异导致的界面分离、起壳、鼓泡及分层问题。实验与工程实践表明, 该工艺显著提升修复层的抗剪切、抗剥离性能及长期稳定性, 经三年以上跟踪观测, 修复界面无复发迹象, 为混凝土结构基面修复提供了可靠解决方案。

关键词

工程技术; 工程施工; 建筑修缮; 混凝土结构修复

1 引言

随着我国城市化进程加速推进, 大量既有建筑进入维护周期, 结构老化与损伤问题日益凸显。其中, 混凝土基面起沙、起壳及结构分层现象尤为普遍, 不仅影响建筑美观与使用功能, 更直接削弱结构承载能力, 引发安全隐患。据统

计, 我国现有建筑中约 35% 的混凝土结构存在不同程度的界面损伤, 年均修复成本高达数百亿元, 而传统修复方法如单纯水泥砂浆覆盖或化学粘结剂加固, 因新旧材料物理性能差异 (如弹性模量、热膨胀系数不匹配), 在环境温度变化或荷载作用下易产生界面脱粘、鼓泡及分层, 导致修复效果短暂且反复维修率高。究其根源, 新水泥砂浆在硬化过程中体积收缩, 与原混凝土基体变形不同步, 界面处累积剪切应力与剥离力, 最终引发粘结失效。这一技术瓶颈严重制约了建筑维护与结构加固领域的可持续发展。

【作者简介】董志武 (1977-), 男, 中国江西萍乡人, 工程师, 从事建筑工程防水研究。

基于此,本研究突破传统思维局限,从中国传统木构建筑智慧中汲取灵感。榫卯结构历经千年验证,以几何嵌合实现无金属连接的牢固结合,具备优异的整体性、稳定性和抗震性能。本研究将这一原理创新性地转化为现代混凝土修复工程技术,通过构建物理卯固体系,使新旧材料形成机械咬合而非依赖化学粘结,从而实现界面永久性融合。该技术不仅解决了材料收缩差异导致的界面失效问题,更契合绿色建筑与可持续发展理念,为混凝土结构修复开辟了新路径。本文系统阐述技术原理、施工流程及工程验证,旨在推动该工艺标准化应用,提升基础设施耐久性。

2 形成因素与技术难点分析

混凝土界面损伤的形成机制复杂。首要因素为材料结构差异:新水泥砂浆在水化硬化过程中产生约0.1%~0.3%的体积收缩,而原混凝土基体因龄期较长已趋于稳定,两者热膨胀系数差异(砂浆约 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,混凝土约 $8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) 在温度循环下引发界面剪切应力。当环境温度变化 10°C 时,界面剪切应力可达0.5~1.2 MPa,远超传统粘结层的抗剪强度(通常0.3~0.8 MPa)。其次,荷载作用下地基不均匀沉降导致结构变形,界面处产生剥离力;冻融循环中水分渗入微裂缝,结冰膨胀产生9%体积增量,加速起壳与分层;碱骨料反应则因内部膨胀应力使表层疏松起沙。这些因素综合作用,使界面成为结构最薄弱环节。

技术难点集中于三方面:其一,新旧材料界面粘结强度难以长期维持。化学粘结剂(如环氧树脂)初期粘结力强,但易受紫外线、湿度影响而老化降解,5年内粘结强度衰减率达40%~60%。其二,修复层整体性不足。传统工艺中砂浆层与基层仅靠表面摩擦力结合,抗变形能力弱,在温度应力下易产生微裂缝并扩展为宏观分层。其三,施工可控性差。现场环境多变,砂浆配比、养护条件等微小偏差即可导致界面失效,质量验收缺乏量化标准。现有解决方案如增设锚栓或纤维增强,虽能部分提升性能,但锚栓易锈蚀引发二次损伤,纤维分散不均则影响均匀性,且均未从根本上解决材料收缩差异问题。因此,亟需一种能实现新旧材料协同变形、具备自锚固能力的创新工艺,以突破界面失效的技术瓶颈。

3 技术原理与设计思路

本技术核心在于将榫卯结构的“以形锁力”理念转化为混凝土修复的物理卯固机制。榫卯结构通过凸榫与凹卯的几何嵌合实现空间锁定,其稳定性源于精确的尺寸配合与变形协调能力,而非依赖外部粘结剂。本研究据此设计梯形卯槽-轻质混凝土咬合体系:在原混凝土基体表面开凿梯形凹槽(卯眼),新浇筑水泥砂浆层(模拟榫头)嵌入其中,形成机械互锁。该设计基于三大原理:

首先,几何嵌合增强界面抗剪切能力。梯形槽口窄底宽(口宽4 cm、底宽8 cm、深4 cm),使砂浆在硬化收缩时被槽壁“楔紧”,产生径向压力。根据库仑摩擦理论,界

面抗剪强度 τ 可表示为 $\tau = c + \sigma \tan \phi$,其中 c 为粘聚力, σ 为正应力, ϕ 为摩擦角。卯槽结构将 σ 提升至0.8~1.5 MPa(传统方法仅0.2~0.5 MPa), ϕ 值因粗糙表面增至 $35^{\circ} \sim 40^{\circ}$,显著提高 τ 值。其次,变形协调机制。梯形槽的斜面设计允许新旧材料在温度变化时沿槽壁微滑移,吸收部分变形能量(力),避免应力集中。有限元分析显示,当温度变化 15°C 时,卯槽结构界面最大主应力降低62%,有效抑制裂缝萌生。最后,整体受力体系构建。通过均匀分布卯槽(间距 $60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$),修复层与原结构形成空间网格状协同工作体系,荷载通过机械咬合传递至基层,避免局部剥离。

设计思路强调“物理卯固为主、化学辅助为辅”。卯槽密度经优化计算:密度过高削弱基层强度,过低则咬合力不足。基于断裂力学模型,设定60 cm间距可平衡应力分布与结构完整性。轻质混凝土层选用LC30级以上材料,掺入 0.9 kg/m^3 聚丙烯抗裂纤维及5%防水剂,降低自重同时提升韧性。金属网格板与双层玻纤网的引入,进一步强化修复层整体性,使咬合力从单纯界面扩展至三维空间。该设计摒弃了传统对化学粘结的依赖,转而利用材料自身几何特性实现永久融合,从根本上解决了界面失效问题。

4 施工流程详解

本工艺严格遵循标准化流程,确保施工精度与质量可控,具体步骤如下:

4.1 勘察定位与卯槽开凿

施工前对损伤区域进行无损检测(如超声波探伤),确定起沙、起壳范围及基层强度。以 $60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ 网格为基准,用激光测距仪精确定位卯槽中心点,墨线标出轮廓。采用金刚石链式切割机开凿梯形凹槽,控制参数:长度20 cm、深度4 cm、底宽8 cm、口宽4 cm,槽壁倾斜角 15° 。开凿后高压水枪冲洗槽内浮尘,确保无松动颗粒,槽壁粗糙度 $R_a \geq 50 \mu\text{m}$ 以增强咬合。此步骤需严格监控,深度偏差 $\leq \pm 0.2 \text{ cm}$,否则影响咬合强度。

4.2 金属网格板安装与防腐处理

选用Q235镀锌网格板(丝径网孔 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$)或304不锈钢网格板,按修复区域尺寸裁剪,搭接长度 $\geq 10 \text{ cm}$,搭接处点锚钉固定。网格板以M8膨胀锚钉(间距30 cm)锚固于基面,确保平整无翘曲。关键创新点在于:在每个卯槽正上方网格板位置,用角磨机开18 cm长、2 cm宽的矩形送料口,便于砂浆流入槽内。随后进行防腐处理:先喷涂环氧富锌底漆(锌含量80%,厚度 $75 \mu\text{m}$),表干后涂覆聚氨酯面漆(厚度 $75 \mu\text{m}$),总涂层 $\geq 150 \mu\text{m}$ 。

4.3 玻纤网铺设与界面强化

在网格板上方平铺两层耐碱玻纤网(网孔 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,单位面积质量 165 g/m^2),层间错缝 45° 以避免薄弱面。采用刮刀涂刮水泥基胶粘剂,用量 1.2 kg/m^2 ,确保玻

纤网完全浸润、无气泡。胶粘剂渗透至网格板及卯槽底部，形成过渡层，提升新旧材料界面相容性。此步骤需在防腐涂层表干后2小时内完成，防止污染。

4.4 水泥砂浆浇筑与养护

选用LC30轻质水泥修复料（425标号水泥：砂：水=1:3.5:0.45），掺入0.9 kg/m³聚丙烯纤维（长度12 mm）及5%硅烷防水剂，搅拌至坍落度60~80 mm。浇筑时从区域一侧斜向推进，优先填充卯槽：通过送料口注入砂浆，振动棒轻振确保槽内密实无空洞。修复层总厚度按场景不同控制在2~5 cm，表面收光后立即覆盖湿麻袋。养护是关键环节：前3天每2小时洒水保湿，4~7天覆盖塑料薄膜，环境温度低于5℃时采用电热毯保温。终凝后7天内禁止荷载，强度达设计值90%后方可验收。全程采用物联网传感器监测温湿度，确保养护达标。

质量控制要点：卯槽尺寸用塞规检测，合格率≥95%；砂浆坍落度每批次检测；修复层28天抗压强度≥20 MPa，拉拔强度≥1.5 MPa。该流程标准化程度高，单人日均施工面积达15 m²，较传统方法效率提升30%，且质量偏差率低于5%。

5 技术优势分析

相较于传统修复方法（如纯砂浆覆盖、化学灌浆或纤维贴片），本工艺具备四大核心优势：

5.1 结构整体性显著增强

物理卯固机制使修复层与原结构形成刚性-柔性协同体系。梯形卯槽提供机械咬合力，界面抗剪强度提升至1.8~2.5 MPa（传统方法仅0.6~1.0 MPa）。在模拟地震荷载试验中，修复结构位移角达1/50时仍保持完整，无分层现象，而对照组在1/80时即发生界面剥离。金属网格板作为“骨架”，将局部应力分散至整个修复区域，抗裂强度提高98%，有效抑制裂缝扩展。

5.2 变形适应能力卓越

卯槽斜面设计赋予结构“自适应”特性。温度循环测试（-20℃~60℃）显示，修复层与基层变形差值从传统方法的0.15 mm/m降至0.04 mm/m，界面应力峰值降低65%。修复材料层安装金属抗裂网格板后，极限拉应强度达到百分之百，可吸收地基沉降产生的微变形。工程实测表明，在年温差30℃地区，修复层无温度裂缝产生。

5.3 施工可控性与经济性优化

工序高度标准化，各环节均有量化指标：卯槽定位误差≤±2 mm，砂浆坍落度波动范围±5 mm。施工质量通过数字化工具实时监控，验收一次合格率达98%，减少返工

成本。材料成本仅增加15%（主要源于网格板与玻纤网），但寿命延长至50年以上（传统方法平均5~8年），全生命周期成本降低55%。

5.4 绿色环保与可持续性

摒弃有机溶剂型粘结剂，减少VOC排放90%以上。轻质混凝土降低自重10%，减少资源消耗；金属网格板可回收利用，符合循环经济理念。经第三方检测，修复过程碳排放较传统工艺降低25%，获绿色建筑认证支持。该技术响应“双碳”目标，推动行业向低碳化转型。

6 应用前景与展望

本技术已在多个工程场景成功试点，验证了广泛适用性。在某南方城市商业综合体地下车库（面积1200 m²）应用中，针对严重起沙区域，采用本工艺修复后，经3年跟踪监测：修复层表面硬度提升至65 Shore D（原基层仅40），无起壳、分层现象；车辆荷载下挠度稳定在0.5 mm内，远优于规范限值。在北方某高速公路桥面（年温差45℃）修复项目中，修复层经历50次冻融循环后，质量损失率仅1.2%（传统方法达4.5%），抗滑系数保持0.7以上。此外，在老旧小区屋顶天台、工业厂房地面硬化等场景中，均实现一次性修复达标，用户满意度达100%。

未来发展方向明确：一是标准化推进，联合行业协会制定《混凝土结构物理卯固修复技术规程》，明确卯槽参数、材料配比等核心指标；二是模块化升级，开发预制卯槽模板与智能施工机器人，提升效率30%以上；三是功能拓展，结合自修复微胶囊技术，赋予修复层微裂缝自动愈合能力。预计5年内，该技术将在市政工程、交通基建及历史建筑保护领域规模化应用，市场潜力超百亿元。随着智能监测技术的融合，可构建“修复-监测-预警”一体化系统，实现混凝土结构全生命周期管理，为智慧城市基础设施维护提供关键技术支撑。

7 结语

本研究提出的基于榫卯原理的物理卯固技术，成功解决了混凝土基面结构修复中界面分离、起壳及分层等长期技术难题。通过构建梯形卯槽与修复层的机械咬合

参考文献

- [1] 吴思杉,田泽辉,王礼建,等.装配式混凝土建筑预制外墙接缝防水技术研究[J].四川建筑,2021,41(S1):141-143.
- [2] 张泉,孙媛.防水混凝土结构防渗漏施工技术[J].城市住宅,2021,28(8):255-256.
- [3] 王超.关于改善混凝土结构整体性能防水方法[J].大众标准化,2021(12):138-140.