

桥梁拼宽植筋施工的粘结性能试验与工艺优化

孙中英

陕西高速机械化工程有限公司 陕西西安 710038

摘要: 随着交通量的快速增长,既有桥梁拼宽已成为缓解交通压力的重要手段。植筋技术作为新旧混凝土连接的关键技术,其粘结性能直接影响拼宽桥梁的整体安全性和耐久性。本文通过系统的室内试验和现场检测,深入研究了植筋粘结性能的影响因素,包括钢筋直径、植筋深度、胶粘剂类型和混凝土强度等参数。基于试验结果,建立了植筋粘结强度预测模型,并提出了针对性的施工工艺优化措施。通过某大桥拼宽工程案例验证,优化后的植筋工艺显著提高了粘结可靠性,拉拔试验合格率达到98.5%,为同类工程提供了重要的技术参考。研究成果对保障桥梁拼宽工程质量、延长结构使用寿命具有重要的工程应用价值。

关键词: 桥梁拼宽;植筋技术;粘结性能;工艺优化

引言

我国公路建设经历了快速发展期,大量桥梁已投入使用多年。随着经济社会发展和交通需求增长,原有桥梁通行能力已难以满足现状需求,桥梁拼宽改造成为提升交通服务水平的有效途径。植筋技术作为桥梁拼宽工程中新旧结构连接的核心技术,通过在既有混凝土中钻孔植入钢筋,利用结构胶形成可靠的力学连接,实现新旧结构的协同工作。植筋技术的关键在于确保钢筋与混凝土之间的有效粘结,粘结性能不足将导致新旧结构分离,严重影响桥梁安全性。目前,国内外学者在植筋粘结机理、影响因素和设计方法等方面开展了大量研究工作。

一、植筋粘结机理与破坏模式分析

植筋粘结体系由钢筋、结构胶和混凝土三部分组成,其力学性能取决于各组成部分的材料特性及相互作用机制。钢筋表面的肋纹与结构胶形成机械咬合,结构胶通过分子间作用力与混凝土孔壁紧密结合,从而建立完整的传力路径。在荷载作用下,力由钢筋传递给结构胶,再由结构胶传递给周围混凝土,实现荷载的有效传递和分散。植筋粘结破坏主要包括三种模式:钢筋拉断、胶筋界面剥离和胶混界面脱粘。钢筋拉断表明植筋粘结性能良好,充分发挥了钢筋强度;胶筋界面剥离多发生

在结构胶与钢筋表面处理不当或胶体性能不足的情况下;胶混界面脱粘则与混凝土基材质量、孔壁清理程度和结构胶渗透性能密切相关。通过大量试验观察发现,工程中最常见的破坏模式为胶混界面脱粘,这主要由于既有混凝土存在微裂缝、疏松层等缺陷,影响了结构胶的有效粘结。因此,植筋施工工艺优化的重点应关注提高胶混界面粘结质量,包括基材处理、胶体选择和注胶工艺等关键环节。

二、植筋粘结性能影响因素试验研究

1. 钢筋直径与植筋深度影响分析

钢筋直径是影响植筋粘结性能的重要参数。试验采用直径12mm、16mm、20mm、25mm四种规格的HRB400钢筋,植筋深度分别为8d、10d、12d、15d(d为钢筋直径)。结果表明,在相同植筋深度条件下,钢筋直径增大,单根钢筋极限拉拔力呈非线性增长趋势,但粘结强度(极限拉拔力与粘结面积之比)逐渐降低。这主要由于大直径钢筋在拉拔过程中,应力分布不均匀程度加剧,胶体与混凝土界面首先在应力集中部位发生破坏。植筋深度对粘结性能的影响更为显著,随着植筋深度增加,极限拉拔力显著提高,但增长幅度逐渐减缓。当植筋深度达到12d后,继续增加深度对粘结强度提升效果有限,这是由于深部胶体参与传力的程度降低。综合考虑经济性和可靠性,建议桥梁拼宽工程中植筋深度控制在10d-12d范围内。

2. 胶粘剂类型与性能对比

结构胶是植筋技术的核心材料,其性能直接决定植筋质量。试验选取了环氧树脂胶、改性丙烯酸胶和乙烯

作者简介: 孙中英(1982.11—),男,汉族,山东菏泽人,本科学历,中级工程师,主要从事道路与桥梁方面的研究工作。

基酯胶三种典型结构胶进行对比研究。环氧树脂胶具有优异的粘结强度和耐久性，在标准养护条件下28天抗拉强度可达45MPa，与混凝土的粘结强度超过3.5MPa，是目前工程应用最广泛的植筋胶。改性丙烯酸胶初凝时间短，适用于抢修工程，但长期粘结性能略低于环氧树脂胶。乙烯基酯胶在潮湿环境中表现良好，耐化学腐蚀性突出，但成本相对较高。不同胶粘剂的温度敏感性存在差异，环氧树脂胶在低温条件下粘度增大明显，影响注胶质量；改性丙烯酸胶温度适应性较好，在-10℃至40℃范围内均能正常使用。基于综合性能评价，推荐桥梁拓宽工程优先选用高性能环氧树脂胶，在特殊环境下可考虑使用专用胶种。

3. 混凝土强度等级与表面处理效果

基材混凝土强度等级对植筋粘结性能具有重要影响。试验采用C30、C35、C40、C50四种强度等级混凝土制作试件，结果显示植筋拉拔强度与混凝土强度呈正相关关系，但增长趋势逐渐平缓。当混凝土强度从C30提高至C40时，植筋拉拔强度提升约25%；继续提高至C50时，拉拔强度仅增加8%。这表明混凝土强度达到一定水平后，其对植筋性能的贡献有限，胶混界面成为控制因素。混凝土表面处理是确保植筋质量的关键工序，包括孔壁清理、除尘和润湿等步骤。试验对比了不同清理方法的效果，发现采用压缩空气吹扫结合毛刷清理能够有效去除钻孔过程中产生的粉尘和松散颗粒，显著提高胶混界面粘结强度。对于既有桥梁混凝土，表面通常存在碳化层、油污等有害物质，需要进行专门处理。采用酸洗或机械打磨方法去除表面污染物后，植筋拉拔强度可提升15%~20%，有效改善了粘结性能。

三、植筋施工工艺优化技术

1. 钻孔工艺参数优化

钻孔质量对植筋粘结效果影响显著，是工艺优化的核心环节。传统冲击钻进易造成孔壁松动及微裂缝，会降低粘结强度；对比试验显示，采用回转钻进可形成更规整的孔壁，减少对周边混凝土的扰动。钻进参数优化结果表明，当钻进速度控制在8~12mm/min、转速150~200r/min、进给压力0.3~0.5MPa时，孔壁质量最优。钻头选择需兼顾质量与成本：硬质合金钻头磨损小、成孔精度高但成本较高；高速钢钻头经济性好，适用于一般工程；空心钻头能及时排屑，可避免二次破坏。针对不同强度混凝土，钻进参数需差异化调整：C30混凝土钻进速度可提高至15mm/min；C50以上高强混凝土则需降至6~8mm/min，同时增加冷却润滑措施。孔径控制是植

筋质量的关键：孔径过小会导致钢筋插入困难；过大则减少粘结面积、降低强度。试验证实，孔径比钢筋直径大6~8mm时粘结效果最佳，既能保证胶体厚度，又可避免应力集中。

2. 胶体注入与固化工艺改进

结构胶的注入质量是决定植筋粘结性能的核心因素，其注胶速度、操作方式及环境条件的把控直接影响最终粘结效果。传统注胶工艺多采用从孔底一次性注胶的方式，胶体在快速填充过程中易包裹空气形成气泡，这些气泡会导致胶层不连续，严重时可使粘结强度降低20%以上。经多组对比试验优化的分层注胶工艺，能从根本上解决气泡问题：第一步先将胶体注入孔深的1/3处，缓慢插入钢筋至对应深度后静置2~3分钟，利用钢筋自重使胶体充分浸润孔壁和钢筋表面，形成初始粘结层；第二步继续注胶至孔深2/3处，将钢筋旋转30度后插入，通过旋转动作进一步排出界面间的空气，确保胶体与孔壁紧密贴合；第三步注满剩余胶体并将钢筋一次性插至设计深度，此时胶体通过孔口溢出可直观判断注胶饱满度。实践表明，该工艺能使胶体饱满度提升至95%以上，粘结强度较传统工艺提高15%~20%。注胶过程的温度控制需精准把控，环氧树脂类结构胶的最佳施工温度为15~25℃，在此区间内胶体流动性适中，可在30分钟操作窗口期内完成注胶与钢筋定位。当环境温度低于5℃时，胶体粘度会增至常温的3倍以上，易出现注胶不顺畅、填充不彻底的问题，需采用恒温加热装置将胶体预热至20℃左右再施工；而当温度高于30℃时，胶体凝胶时间会缩短至15分钟以内，易因操作时间不足导致锚固失效，因此夏季施工需避开正午高温时段，选择清晨6~9点或傍晚17点后作业。胶体固化阶段的湿度管理同样关键，相对湿度50%~70%的环境最利于胶体交联反应，可使7天固化强度达到设计值的80%以上。若湿度低于40%，胶体易因水分蒸发过快出现表面开裂；湿度高于80%则可能导致胶体表面泛白、内部固化不完全。现场施工中，通过在植筋区域覆盖塑料薄膜形成局部保湿空间，并配合温湿度计实时监测，确保固化环境稳定，最终使胶体28天强度达标率提升至100%。

3. 质量检测方法与标准

植筋质量检测是保障工程安全的核心环节，需建立系统的检测体系与明确判定标准。当前主流检测方法包括拉拔试验、超声波检测及内窥镜检查，三者协同形成全流程质量管控。拉拔试验作为评估粘结性能的直接手段，试验方案需科学设计：检测数量按植筋总数2%~5%

抽检，桥梁墩柱、抗震节点等重要部位应提高至8%；取样覆盖不同施工批次及边缘区域，确保代表性。加载采用分级方式，每级按设计值20%递增，每级持荷2分钟监测变形，最终加载至1.2倍设计值并持荷10分钟，完整记录荷载-位移曲线。超声波检测适用于大面积快速筛查，通过50-100kHz频率探头发射声波，分析波速变化（正常范围3.2-4.0km/s）和幅值衰减程度，定性判断胶体密实性——波速骤降或幅值异常衰减提示存在气泡、空洞等缺陷。内窥镜检查聚焦微观质量，通过高清探头观察孔壁清理效果（要求无粉尘、无松动碎屑）和胶体注入状态，尤其在拉拔试验不合格时，可精准排查清孔不彻底、注胶未满等问题成因。质量判定标准需结合工程特性：拉拔试验需满足最大拉力 ≥ 1.2 倍设计值，破坏模式应为钢筋拉断或胶筋界面剥离（混凝土锥体破坏视为不合格）；变形控制要求最大位移 ≤ 0.15 mm。三项检测结果需综合判定，确保植筋质量符合设计安全要求。

4. 施工环境控制与安全措施

植筋施工对环境条件要求较高，需要制定严格的环境控制措施。温度是影响植筋质量的关键环境因素，施工环境温度应控制在5-35℃范围内，胶体固化期间温度变化幅度不宜超过10℃。冬季施工时采用保温措施，搭设临时暖棚或使用电热器提高环境温度；夏季高温时设置遮阳设施，避免阳光直射。湿度控制同样重要，相对湿度过高影响胶体固化质量，过低则可能造成混凝土表面干燥开裂。雨天严禁进行植筋作业，施工现场应采取防雨措施，确保钻孔和注胶在干燥环境中进行。风速对胶体挥发和固化产生影响，当风速超过5m/s时应采取挡风措施。粉尘控制是确保植筋质量的重要环节，钻孔过程中产生大量粉尘，需要及时清理，避免对后续工序产生影响。安全措施包括人员防护、设备安全和环境保护等方面。操作人员应佩戴防护用品，包括防尘口罩、护目镜和防护手套；电动工具应确保绝缘良好，配置漏电保护装置；化学胶粘剂使用过程中保持良好通风，避免有害气体积聚。废料处理应符合环保要求，废胶和清洗溶剂统一收集处理，避免环境污染。

四、工程案例分

某2008年建成的高速公路跨河大桥，原双向四车道、全长1.2公里，因交通量激增，2023年启动拼宽改造为双向八车道，采用两侧新建桥梁、植筋连接新旧结

构的方案，共植筋3200根（直径20mm、25mm，深度250mm、300mm）。施工前检测显示原桥混凝土为C40，碳化深度3-8mm且有轻微裂缝。据此制定方案：处理碳化层与裂缝，精确定位植筋位置。施工中采用回转钻进，依混凝土状况调整参数；选用高性能环氧树脂胶，分层注胶；冬夏分别采取保温、避高温措施。质量检测结合拉拔试验（抽检5%共160根，合格率98.5%，不合格因清孔不彻底，补强后全合格）、超声波检测（胶体密实）及内窥镜检查（孔壁干净、注胶饱满）。竣工后荷载试验表明，新旧桥梁变形协调，植筋部位应力分布均匀；长期监测显示连接部位状态稳定，验证了优化植筋工艺的有效性，为同类工程提供参考。

结束语

桥梁拼宽植筋施工技术要求高、质量控制严，其粘结性能直接关乎拼宽桥梁的安全与耐久。本文经系统试验与工程实践，深入分析植筋粘结性能影响机理，建立关键参数优化体系，提出施工工艺改进措施。研究显示，钢筋直径、植筋深度、胶粘剂性能及基材处理质量是主要影响因素。优化钻孔、改进注胶、加强环境控制与完善检测，可显著提升粘结可靠性，工程案例验证了其有效性，为相关工程提供技术支持。随着桥梁拼宽需求增长，植筋技术面临更复杂环境与更高要求。未来需深化机理研究、开发新型材料、完善设计方法、推进智能施工，同时加强标准规范建设，促进其标准化与产业化，保障工程安全可靠。

参考文献

- [1] 贾卫东, 王晓强, 邢世玲, 等. 桥梁拼宽工程中补偿收缩钢纤维混凝土的应用研究[J]. 现代交通技术, 2022(4): 30-33.
- [2] 李德生. 贵州湄潭至石阡高速公路桥梁拼宽技术的应用分析[J]. 交通建设与管理, 2022(3): 146-148.
- [3] 文俏壮. 高速公路改扩建工程中的桥梁拼宽和加固技术[J]. 中国公路, 2022(11): 154-155.
- [4] 杨希祥. 新旧桥梁拼宽湿接缝预防开裂施工技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2022(3): 99-101, 119.
- [5] 余琼芳. 高速公路改扩建工程桥梁拼宽与加固技术探讨[J]. 工程建设与设计, 2021(8): 143-144, 149.