

基于荷载试验的加固混凝土梁结构性能研究

何学明, 丘永聪

广东汇建检测鉴定有限公司, 广东 广州

收稿日期: 2025年11月1日; 录用日期: 2025年11月22日; 发布日期: 2025年12月3日

摘要

为评估粘贴钢板加固技术对既有混凝土梁结构性能的提升效果, 验证加固后梁体在变形控制与裂缝抑制方面的规范符合性, 本文以某典型受弯混凝土梁为研究对象, 开展了基于静力荷载试验的结构性能验证研究。首先依据《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367-2013)设计并制作了粘贴钢板加固试件, 明确了钢板规格、粘贴位置及锚固方式; 随后采用分级加载方式, 通过位移计及裂缝观测仪等设备, 对梁体跨中挠度及裂缝开展情况进行全程监测, 重点采集正常使用极限状态与设计组合工况状态下的关键数据。试验结果表明: 准永久组合荷载作用下, 梁跨中挠度为0.22 mm; 设计组合荷载作用下, 梁跨中挠度为0.91 mm, 挠度均满足规范和计算限值要求, 且未发现裂缝; 研究结论可为高度相似条件的混凝土梁加固工程质量验收提供试验依据, 也为粘贴钢板加固技术的工程应用可靠性评估补充了实测数据支撑。

关键词

混凝土梁加固, 粘贴钢板, 结构性能, 挠度

Study on Structural Performance of Strengthened Concrete Beams Based on Load Tests

Xueming He, Yongcong Qiu

Guangdong Huijian Testing and Appraisal Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

Received: November 1, 2025; accepted: November 22, 2025; published: December 3, 2025

Abstract

To evaluate the improvement effect of the steel plate bonding strengthening technology on the structural performance of existing concrete beams and verify the code compliance of the strengthened beams in terms of deformation control and crack suppression, this study took a typical flexural concrete beam

as the research object and carried out a structural performance verification study based on static load tests. First, in accordance with *Code for Design of Strengthening Concrete Structures* (GB 50367-2013), steel plate-bonded strengthened specimens were designed and fabricated, with the steel plate specifications, bonding positions and anchorage methods clearly defined. Subsequently, a step-by-step loading method was adopted, and displacement meters, crack observation instruments and other equipment were used to monitor the mid-span deflection of the beam and the development of cracks throughout the process, with a focus on collecting key data under the serviceability limit state and the design combination load condition. The test results show that: under the quasi-permanent combined load, the mid-span deflection of the beam is 0.22 mm; under the design combined load, the mid-span deflection of the beam is 0.91 mm. Both deflections meet the requirements of code and calculation limits, and no cracks are found. The research conclusions can provide experimental basis for the design optimization and quality acceptance of similar concrete beam strengthening projects, and also supplement the measured data support for the reliability evaluation of the engineering application of the steel plate bonding strengthening technology.

Keywords

Concrete Beam Reinforcement, Bonded Steel Plate, Structure Performance, Deflection

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

混凝土结构在建筑与基础设施领域中广泛应用, 其中混凝土梁作为重要受力构件, 承担着传递和承受荷载的关键作用, 对整个建筑结构的稳定性与安全性起着决定性影响。在实际工程中, 由于设计阶段的考虑不周, 例如对复杂工况下的荷载组合预估不足, 计算模型的简化不合理等, 导致梁体在正常使用过程中可能出现受力异常的情况; 施工过程中, 混凝土的浇筑质量不佳, 如振捣不密实、存在蜂窝麻面等缺陷, 以及钢筋的绑扎和锚固不符合规范要求, 都为梁结构的后期使用埋下隐患; 随着时间的推移, 结构老化使得混凝土材料性能逐渐劣化, 强度降低、韧性变差, 钢筋也会因长期受到腐蚀而削弱其承载能力。针对这些问题, 粘贴钢板加固法应运而生, 成为一种广泛应用的加固技术[1]。该方法是通过高性能的环氧类粘接剂将钢板牢固地粘结于混凝土构件的表面, 使钢板与混凝土协同工作, 形成一个共同受力的整体。钢板凭借其良好的抗拉强度, 能够有效地分担混凝土梁所承受的拉力, 从而增强构件的承载能力和刚度。同时, 粘贴的钢板还可以对混凝土梁起到约束作用, 抑制裂缝的进一步开展, 提高结构的耐久性。为了全面、准确地评估粘贴钢板加固后的混凝土梁的实际性能, 荷载试验显得尤为重要。通过荷载试验[2][3], 可以直接获取加固梁在不同荷载水平下的变形、裂缝开展等关键数据, 进而深入分析其受力性能和工作状态, 为工程实践提供可靠的技术依据[4]。

2. 国内外研究现状

2.1. 国内研究现状

我国自 20 世纪 80 年代开始积极研究和应用粘贴钢板加固技术。在规范制定方面, 陆续出台了一系列相关标准和规范, 如《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367-2013)等, 为该技术的工程应用提供了明确的设计和施工依据, 规范中对粘贴钢板加固混凝土梁的材料选用、设计计算方法、施工工艺以及质量检验等方面都做出了详细规定。在试验研究中, 众多学者针对不同工况下的混凝土梁开展了广泛而深入

的试验。研究内容涵盖了不同混凝土强度等级、不同配筋率以及不同环境条件对加固效果的影响。例如, 研究发现, 在相同加固条件下, 混凝土强度等级较高的梁, 其加固后的承载力提升幅度相对较小, 但变形性能和裂缝控制能力更好; 对于配筋率较低的梁, 粘贴钢板加固后承载力的提升效果更为显著; 在恶劣环境条件下, 如高温、潮湿或侵蚀性介质环境中, 加固梁的性能会受到一定程度的影响, 需要采取特殊的防护措施来保证加固效果的耐久性。此外, 国内还在不断探索新的加固技术和工艺, 如将粘贴钢板与其他加固方法相结合, 开发新型的粘结材料等, 以进一步提高加固效果和拓展应用范围[5]-[7]。

2.2. 国外研究现状

粘贴钢板加固混凝土梁技术起源于 20 世纪 60 年代, 瑞士和德国率先开发出采用粘贴钢板加固钢筋混凝土构件的方法, 即利用双组分环氧树脂粘接剂将钢板或其它钢质件粘贴在混凝土构件表面, 构建成混凝土 - 粘接剂 - 钢三相复合物系统。早期, 国外学者主要致力于理论与试验的初步探究。在理论研究方面, 建立了一些基本的力学模型, 用于分析加固梁的受力性能, 例如考虑钢板与混凝土之间粘结力的简化模型, 对加固梁的抗弯、抗剪承载力进行理论推导。在试验研究上, 开展了一系列不同工况下的试验, 研究钢板厚度、锚固方式等因素对加固效果的影响。如通过对比不同钢板厚度的加固梁试验, 发现随着钢板厚度的增加, 加固梁的抗弯承载力有显著提升, 但当钢板厚度超过一定值后, 加固效果的提升幅度逐渐减小。在锚固方式研究中, 对比了不同锚固长度和锚固形式的加固梁, 发现合理的锚固措施能够有效提高钢板与混凝土之间的协同工作性能, 防止钢板过早剥离, 充分发挥钢板的加固作用[8] [9]。

3. 试验方案设计

3.1. 试验参数

本次试验的混凝土梁为图 1 中暗红色梁, 其截面尺寸为 $300 \times 800 \text{ mm}$, 跨度为 9175 mm , 混凝土抗压强度设计值为 C30, 支座位置配筋分别为 4C25 和 2C25, 跨中底筋配筋为 3C22, 梁底及支座采用粘贴钢板加固, 钢材为 Q345, 梁底钢板厚度为 6 mm, 梁面钢板厚度为 8 mm, 混凝土梁加固模型如图 1 所示, 梁加固剖面图如图 2 所示, 试验梁涉及的① 板底增厚 50 mm, ② 板未加固, ①板和②板原楼板厚 120 mm。

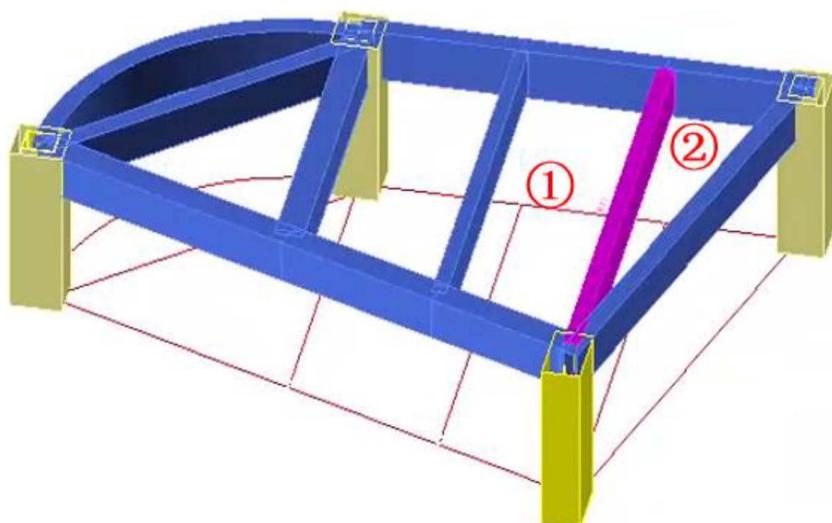


Figure 1. Strengthening model of concrete beams
图 1. 混凝土梁加固模型

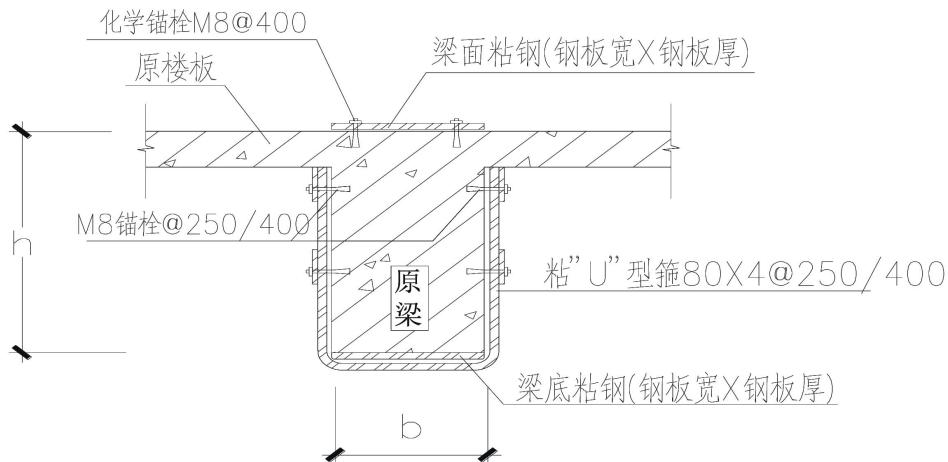


Figure 2. Cross-sectional view of strengthened concrete beams
图 2. 混凝土梁加固剖面图

3.2. 试验荷载计算

3.2.1. 单工况荷载

①板、②板和试验梁的活荷载、自重和附加荷载如表 1 所示:

Table 1. Load statistical table

表 1. 荷载统计表

荷载类型	荷载
活荷载(kN/m ²)	2.50
①板自重(kN/m ²)	4.25
②板自重(kN/m ²)	3.00
梁自重(kN)	55.05
附加恒荷载(kN/m ²)	3.50

3.2.2. 准永久组合荷载

在准永久组合下, ①板和②板作用荷载如下式所示, 其中 0.5 为准永久值系数[10]:

$$S_d = 0.5 \times 2.5 \text{ kN/m}^2 = 1.25 \text{ kN/m}^2 \quad (1)$$

3.2.3. 基本组合荷载

在基本组合荷载作用下, ①板和②板作用荷载如下式所示, 其中 1.3 为永久荷载分项系数, 1.5 为可变荷载分项系数[10], 荷载作用时, 楼板及混凝土梁自重已经存在, 因此组合计算后, 需扣除楼板及混凝土梁自重。

① 板

$$S_d = [1.3 \times (4.25 \text{ kN/m}^2 + 3.5 \text{ kN/m}^2) + 1.5 \times 2.5 \text{ kN/m}^2] - (4.25 \text{ kN/m}^2 + 3.5 \text{ kN/m}^2) = 6.075 \text{ kN/m}^2 \quad (2)$$

② 板

$$S_d = [1.3 \times (3.0 \text{ kN/m}^2 + 3.5 \text{ kN/m}^2) + 1.5 \times 2.5 \text{ kN/m}^2] - (3.0 \text{ kN/m}^2 + 3.5 \text{ kN/m}^2) = 5.7 \text{ kN/m}^2 \quad (3)$$

③ 梁

$$S_d = [1.3 \times (55.05 \text{ kN} + 3.5 \text{ kN/m}^2 \times 0.3 \text{ m} \times 9.175 \text{ m}) + 1.5 \times 2.5 \text{ kN/m}^2 \times 0.3 \text{ m} \times 9.175 \text{ m}] - (55.05 \text{ kN} + 3.5 \text{ kN/m}^2 \times 0.3 \text{ m} \times 9.175 \text{ m}) = 29.727 \text{ kN} \quad (4)$$

通过上式(2)和(3)乘以面积加上(4)式则可以得到本次加载总荷载为 $F = 233.9$ kN。

3.3. 测点布置

该混凝土梁跨中及支座各布置一个百分表, 如图 3 和图 4 所示, 其中 1 号测点及 3 号测点为支座, 2 号测点为跨中测点。

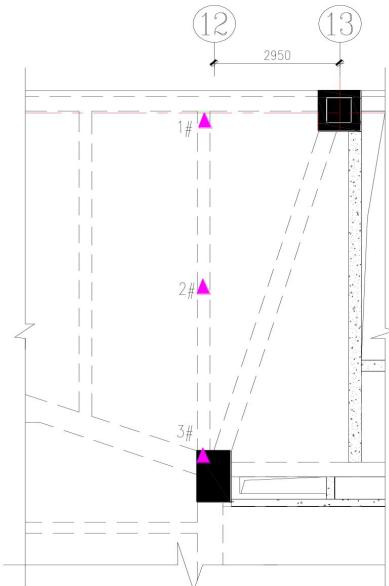


Figure 3. Layout diagram of measuring points on concrete beams
图 3. 混凝土梁测点布置图



Figure 4. On-site layout diagram of measuring points
图 4. 测点现场布置图

3.4. 加载荷载计算

结合该工程特点及附近可利用的材料, 荷载试验采用沙袋加载。试验前先制作好沙袋, 每袋沙袋重 50 kg, 即 0.5 kN。试验时, 均匀铺设在楼板上。①板和②板需要的沙袋数量 n 可通过下式计算求得:

$$n = F/0.5 \text{ kN} = 936 \text{ (袋)} \quad (5)$$

3.5. 试验方法[11]

3.5.1. 分级加载原则

本试验采用分级加载与分级卸载方式, 加载与卸载过程均分为五级进行, 加载分级标准按表 2 执行。卸载分级按总荷载的 20% 为每级卸载量, 确保荷载变化平稳, 避免因荷载突变对试验梁及测量设备造成冲击。

Table 2. Graded loading table of test loads

表 2. 试验荷载分级加载表

加载 级数	楼板区域	堆载(kN)	换算加载数量(袋)	
			每次加载袋数	每次加载袋数
一级	①	28.72	115	115
	②	17.72	71	71
二级	①	58.43	119	234
	②	36.05	73	144
三级	①	87.65	117	351
	②	54.08	72	216
四级	①	116.87	116	467
	②	72.11	72	288
五级	①	146.08	118	585
	②	87.82	63	351

说明: 第一级加载为准永久组合工况; 第五级为基本组合工况。

3.5.2. 设备安装与调试

试验开始前, 完成加载设备准备(如沙袋、千斤顶、反力架)、测量设备(如百分表等)的安装与调试, 确保设备运行正常、精度满足试验要求[2]。其中百分表安装位置及预读数操作详见图 3 和图 4, 预读数时需校准百分表零位, 记录初始状态数据。

3.5.3. 试验梁外观检查与标记

对加固后混凝土梁的表面(侧面、底面及表面)进行全面外观检查, 重点排查是否存在表面收缩裂缝、损伤裂缝等局部缺陷, 对发现的缺陷用蓝色铅笔详细描出裂缝走向与范围, 并记录缺陷位置、长度及宽度初始值, 作为试验后对比分析的基准。

3.5.4. 静载初读数准备

明确测量、读数及记录人员的职责分工, 在正式加载前进行零荷载初读数。由测量人员操作设备, 读数人员同步记录, 确保各测点零荷载状态下的数据准确采集, 初读数记录需经两人核对无误后签字确认, 作为后续加载数据计算的基准。

3.5.5. 分级加载

安排专人指挥加载, 严格按照方案预定级数加载(按表 2), 每级加载完后必须持荷 5~10 分钟, 准永久组合荷载及承载力检验荷载作用下持荷不少于 15 分钟, 且应每隔 3~5 分钟读数一次, 一般当数据增量小于上一次增量的 10% 时, 即可认为数据稳定可靠。读数时, 需两个技术人员一同读数, 确保读数准确。

3.5.6. 分级卸载

严格按照方案预定级数分五次卸载, 每级卸载为总荷载的 20%, 每级卸载完成 5~10 分钟后方可读数, 且应每隔 3~5 分钟读数一次, 一般当数据变化小于上一次的 10% 时, 即可认为数据稳定可靠。

4. 试验结果

试验正式开展前, 依据《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367-2013)及相关检测技术标准, 对粘贴钢板加固混凝土梁的关键性能指标进行预检测。其中, 加固所用钢板的截面尺寸(含厚度、宽度)、材料强度、钢板与混凝土界面的粘贴质量检测结果均满足本次试验的加固设计要求; 同时, 对混凝土梁本体进行外观检查与结构损伤排查, 未发现梁体存在明显裂缝、剥落、露筋等损伤现象, 确认试验对象初始状态符合试验条件。

Table 3. Test results of measuring points No. 1, 2, and 3 on strengthened concrete beams

表3. 加固混凝土梁1、2、3号测点试验结果

试验过 程	荷载级 别	1号测点测试结果(mm)		3号测点测试结果(mm)		2号测点测试结果(mm)	实际挠度
		变形测量值	变形测量值	变形测量值	变形测量值		
加载过 程	0	0.00		0.01		0.00	/
	1	0.03		0.02		0.24	0.22
	2	0.09		0.02		0.44	0.39
	3	0.13		0.02		0.57	0.50
	4	0.19		0.02		0.86	0.76
	5	0.24		0.01		1.04	0.91

试验阶段, 严格按照本文 2.5 节所述的“分级加载与卸载试验方法”(即加载分五级执行、每级持荷至数据稳定, 卸载按总荷载 20% 分级进行)对加固混凝土梁施加荷载, 每级加载完成后, 同步采集各测点的变形数据, 具体测点变形值详见表 3。五级卸载完成后, 对核心测点(2 号跨中挠度测点)的残余变形进行测量, 测得其残余变形值为 0.16 mm, 为后续分析加固梁的弹性恢复性能提供关键数据支撑。

5. 加固梁挠度计算

对该结构建立局部模型, 如图 1 所示, 并对本次研究的混凝土梁进行粘贴钢板加固, 钢材为 Q345, 梁底钢板厚度为 6 mm, 梁面钢板厚度为 8 mm, 梁侧 U 形箍为 4*80@250/400, 详见图 2, 加固梁挠度计算结果详见图 5 所示。

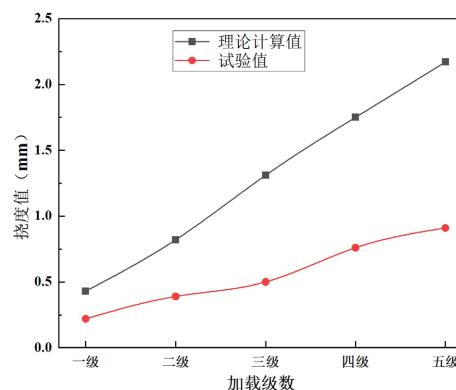


Figure 5. Curves of calculated and test deflection values at measuring point No. 2 (mid-span)
图5. 2号测点(跨中)挠度计算和试验值曲线

6. 试验结果分析

(1) 依据文献[12]及相关设计规范, 准永久组合荷载作用下混凝土梁的挠度限值设定为 $a_f = l_0/200$ (其中 l_0 为梁的计算跨度), 考虑荷载长期效应组合对挠度增大的影响, 引入长期效应影响系数 θ , 最终确定长期挠度限值为 $as = a_f/\theta = 24.6$ mm。在第二级加载(即准永久组合荷载工况)下, 2号测点测得梁体跨中最大挠度为 0.22 mm, 远小于规范限值, 且试验过程中未观察到混凝土梁出现开裂现象, 粘贴于梁底的加固钢板亦无剥离、变形等损伤现象, 表明加固梁在该工况下的挠度控制与抗裂性能均满足设计规范要求。

(2) 按照预设加载方案完成五级分级加载后, 加固混凝土梁所承受荷载达到设计荷载值。此时通过外观观测可知, 混凝土梁梁底未出现任何可见裂缝, 粘贴于梁底的加固钢板亦无剥离、变形等损伤现象; 同步测得梁跨中挠度为 0.91 mm, 将该实测值与基于加固设计参数计算得出的理论挠度值进行对比, 结果显示实测挠度值小于理论计算值, 验证了加固结构的刚度提升效果。

(3) 结合图 5 所示的挠度 - 荷载关系曲线分析可知, 无论是基于理论模型推导的计算曲线, 还是通过试验实测获取的挠度曲线, 均呈现出良好的线性特征。这一现象表明, 粘贴钢板加固后的混凝土梁在本次试验所施加的荷载范围内, 梁材料仍处于弹性工作阶段, 钢板与混凝土界面协同受力效果良好, 未出现非线性变形引发的刚度突变问题。

(4) 由图 5 的曲线对比结果可见, 各加载等级下的理论计算挠度值均大于对应的试验实测挠度值。经分析, 该差异主要源于理论计算模型建立时, 未考虑楼板与梁协同工作产生的刚度贡献。实际工程中楼板与加固梁形成整体受力体系, 楼板的约束作用有效提升了梁的整体刚度, 从而使得试验实测挠度值小于未考虑该因素的理论计算值, 此差异也反映了理论模型与实际结构受力状态的客观区别。

(5) 本试验严格按照预设方案完成五级卸载操作后, 2号跨中挠度测点的残余变形值为 0.16 mm, 残余变形为 17.6%, 小于文献[13]构件残余挠度不大于最大挠度的 20% 的要求。这一结果表明, 粘贴钢板加固混凝土梁在本次试验荷载作用下, 结构整体弹性恢复能力良好, 完全满足规范对混凝土梁构件力学性能的控制标准, 进一步验证了加固方案的有效性。

7. 结语

(1) 通过本次试验研究, 全面验证了粘贴钢板加固混凝土梁在挠度控制和抗裂性能方面的良好表现。在准永久组合荷载工况下, 梁跨中最大挠度仅为 0.22 mm, 远小于规范限值 24.6 mm, 充分展示了加固梁在长期荷载作用下出色的挠度控制能力, 确保了结构在正常使用阶段的变形处于可控范围内, 满足设计规范对挠度的严格要求。同时, 在整个试验过程中, 混凝土梁未出现任何开裂现象, 粘贴于梁底的加固钢板也保持完好, 无剥离、变形等损伤情况, 有力地证明了粘贴钢板加固混凝土梁具备良好的抗裂性能, 能够有效抵抗裂缝的产生, 提高了结构的耐久性和可靠性。

(2) 从挠度 - 荷载关系曲线可以看出, 无论是理论计算曲线还是试验实测曲线, 均呈现良好的线性特征。这一现象充分说明, 在本次试验所施加的荷载范围内, 粘贴钢板加固后的混凝土梁材料始终处于弹性工作阶段, 能够遵循弹性力学的基本规律, 保证了结构在正常使用荷载下的安全性和稳定性。同时, 钢板与混凝土界面协同受力效果良好, 两者之间的粘结牢固, 能够有效地传递应力, 共同协调变形, 未出现因非线性变形导致的刚度突变问题, 确保了加固梁在受力过程中的整体性和可靠性。

(3) 试验结果还揭示了理论模型与实际结构受力状态之间存在的客观区别。各加载等级下, 理论计算挠度值均大于试验实测挠度值, 主要原因是理论计算模型未考虑楼板与梁协同工作对刚度的贡献。在实际工程中, 楼板与加固梁形成了紧密的整体受力体系, 楼板的约束作用有效提升了梁的整体刚度, 从而使得试验实测挠度值小于理论计算值。

(4) 本次试验虽然取得了有价值的成果, 但仍存在一定的局限性。从样本数量来看, 仅对单一尺寸和

参数的混凝土梁进行了试验研究, 样本的多样性不足。实际工程中的混凝土梁在尺寸、配筋率、混凝土强度等级以及荷载工况等方面存在较大差异, 单一的试验样本难以全面涵盖这些变化因素, 可能导致研究结果的普适性受到一定限制。

参考文献

- [1] 中国建筑科学研究院. GB50367-2013 混凝土结构加固设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [2] 中国建筑科学研究院. GB/T50152-2012 混凝土结构试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [3] 中国建筑科学研究院. GB50204-2015 混凝土工程施工质量验收规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [4] 李彬. 简支 T 梁加固后受力性能分析[J]. 桥隧工程, 2024(10): 146-150.
- [5] 单成林. 粘贴钢板或碳纤维加固受弯构件效果对比试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(1): 36-43.
- [6] 任伟, 贺拴海, 袁旭斌. 粘贴纤维布、钢板加固钢筋混凝土 T 梁试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2008, 40(3): 323-330.
- [7] 高轩能, 周期源, 陈明华. 粘钢加固 RC 梁承载性能的理论和试验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(8): 38-44.
- [8] Rabinovitch, O. and Frostig, Y. (2003) Experiments and Analytical Comparison of RC Beams Strengthened with CFRP Composites. *Composites Part B: Engineering*, **34**, 663-677. [https://doi.org/10.1016/s1359-8368\(03\)00090-8](https://doi.org/10.1016/s1359-8368(03)00090-8)
- [9] Limam, O., Foret, G. and Ehrlacher, A. (2003) RC Beams Strengthened with Composite Material: A Limit Analysis Approach and Experimental Study. *Composite Structures*, **59**, 467-472. [https://doi.org/10.1016/s0263-8223\(02\)00286-6](https://doi.org/10.1016/s0263-8223(02)00286-6)
- [10] 中国建筑科学研究院. GB50009-2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [11] 黄新宇, 郝彬, 吴胤, 等. 钢筋桁架混凝土叠合板变形理论研究及试验分析[J]. 建筑结构, 2019, 49(S1): 650-654.
- [12] 中国建筑科学研究院. GB50204-2010 (2015 版)混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [13] 中国建筑科学研究院. GB50784-2013 混凝土结构现场检测技术标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.