

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.06.019

增大截面二次加固梁的正截面抗弯性能试验研究

郭盛¹, 黄金伟¹, 向福稳¹, 葛俊彤², 王佐才^{2,3}, 景月岭²

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063; 2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 3. 安徽建筑大学 土木水利学院, 安徽 合肥 230601)

摘要:为评估增大截面二次加固对钢筋混凝土梁正截面抗弯性能的提升效果,文章对未加固梁、粘钢首次加固梁以及增大截面二次加固梁进行系统的试验研究。通过荷载-挠度曲线、钢筋和混凝土的荷载-应变曲线、裂缝分布及破坏形态等数据,深入分析各类加固方式对梁承载力及变形性能的影响。结果表明:增大截面二次加固可显著提高梁的抗弯承载力和刚度,极限荷载比未加固梁提高了112%,且相比粘钢加固梁提高了49%;二次加固梁有效降低了原梁纵向钢筋的应力水平,原受拉钢筋的应变较未加固梁下降约75%;二次加固梁的混凝土截面应变沿高度呈线性分布,验证了平截面假定的适用性。基于试验结果,推导出增大截面二次加固梁的承载力计算公式,且公式计算值与试验结果吻合较好,为工程应用提供了可靠的设计依据。

关键词:增大截面;二次加固;试验研究;抗弯性能;混凝土梁

中图分类号:TU375.1

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2026)06-0849-08

Experimental study on flexural behavior of normal section of beams strengthened by secondary reinforcement with section enlargement

GUO Sheng¹, HUANG Jinwei¹, XIANG Fuwen¹, GE Juntong², WANG Zuocai^{2,3}, JING Yueling²

(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: To explore the improvement level of the flexural behavior of the normal section of the reinforced concrete beam strengthened by secondary reinforcement with section enlargement, experimental studies were conducted on unstrengthened beams, beams strengthened with bonded steel plates for the first time, and beams subjected to secondary strengthening by section enlargement. The effects of various strengthening methods on the bearing capacity and deformation performance of the beams were evaluated by analyzing the load-deflection curve, load-strain curve of steel bar and concrete, crack distribution and failure mode. The results show that the secondary strengthening by section enlargement can effectively enhance the flexural capacity and flexural stiffness of the beams. The ultimate load of the beams with secondary section enlargement increases by 112% compared to the unstrengthened beams, and by 49% compared to the steel-bonded strengthened beams. Additionally, this method effectively reduces the stress level in the longitudinal reinforcement of the original beams, with the strain in the original tensile reinforcement decreasing by 75% compared to the unstrengthened beams. The strain distribution across the normal section of the concrete in the beams subjected to secondary strengthening approximately follows a linear pattern, which is consistent with the plane section assumption. Finally, the bearing capacity formula of the beams strengthened by secondary reinforcement with enlarged section was deduced, and the calculated values from the bearing capacity formula show good agreement with the experimental results. This study offers reliable design references for engineering applications.

收稿日期:2025-07-02;修回日期:2025-10-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278301)

作者简介:郭盛(1979—),男,江西赣州人,中铁第四勘察设计院集团有限公司教授级高工;

黄金伟(1984—),男,江苏灌南人,中铁第四勘察设计院集团有限公司高级工程师,通信作者,E-mail:276551206@qq.com;

王佐才(1982—),男,湖南双峰人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

Key words: section enlargement; secondary reinforcement; experimental study; flexural behavior; concrete beams

目前,各类工程结构主要采用钢筋混凝土建造,随着结构使用年限的增加,材料性能不可避免会发生退化,同时由于各种使用条件的变化,需要对结构进行一次加固甚至二次加固,以提升结构的承载力水平。为提高钢筋混凝土梁的受力性能,一般采用在梁底部粘贴钢板、碳纤维复合材料,或者增加梁截面的方法进行加固。

针对碳纤维材料加固后的钢筋混凝土梁,众多学者^[1-6]开展了开裂性能、疲劳性能、耐久性、可靠度分析等方面的试验研究工作。针对锈蚀的钢筋混凝土梁桥构件,文献[7]分别采用粘贴碳纤维片材、粘贴玄武岩纤维复材片材、锚贴钢板法和增大截面法对其加固,并对比分析了 4 种不同方法的加固效果,其中,增大截面法由于提高承载力、刚度幅度大,受力合理,因此在结构加固中得到了广泛应用^[8]。文献[9]对粘钢法、粘碳纤维法、增大截面法对比研究,并选取增大截面法对受损框架梁进行加固修复设计;文献[10]采用增大截面法对京广中心的主梁进行加固改造;文献[11]对采用增大截面法加固的钢筋混凝土 T 型梁桥的可靠度进行研究;文献[12]考虑应力滞后对增大截面加固受弯构件的影响,提出了加固构件的承载力公式。基于建筑信息模型,文献[13]对增大截面法加固的混凝土框架梁进行了研究;文献[14]对钢筋混凝土悬挑梁增大截面,解决了其承载力不足的问题;文献[15]采用增大截面法加固钢筋混凝土梁,数值模拟结果表明,加固后能有效提高该梁的刚度和承载力。随着社会经济的快速发展,建筑结构行业逐渐进入加固改造新阶段,一些建筑结构在首次加固后因使用功能改变或需要延长其服役年限需要二次加固,文献[16]结合工程实际对一座曾经过抢修加固后利用引桥承担部分水平推力的刚架拱桥进行增大截面二次加固设计,经数值计算加固后桥梁刚度及整体性均得到提升。针对单排框架梁,文献[17]通过在梁的薄弱部位粘贴钢板对其加固,并讨论二次加固的设计原理;文献[18]开展了已有梁桥首次预应力加固,二次加固为箱梁内粘贴钢板,其荷载试验表明二次加固后桥的刚度有明显提升。然而目前关于二次加固的研究多局限于数值模拟方法,缺乏二次加固混凝土梁破坏性试验研究及承载力公式。

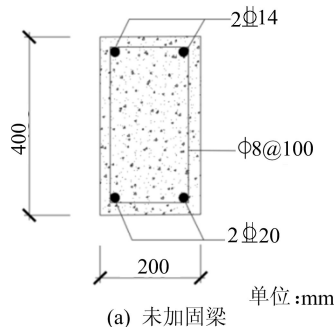
本文针对粘贴钢板首次加固梁,以应用广泛

的增大截面法进行钢筋混凝土梁的二次加固,开展二次加固梁的力学性能试验研究,着重研究增大截面二次加固梁的承载力提升水平,讨论增大截面二次加固梁混凝土、原有钢筋、新增钢筋的应变演化情况,并分析增大截面二次加固梁的裂缝发展规律,最后提出增大截面二次加固梁承载力公式,为相关研究及工程实践提供参考。

1 试验概况

1.1 试验设计

为研究增大截面二次加固梁的承载力提升水平,本研究制作试验梁 9 根。其中未加固梁 3 根(编号 LA1~LA3),使用 C30 混凝土浇筑,保护层厚为 30 mm,试验梁尺寸如图 1 所示。梁净长 2 400 mm;梁截面尺寸为 200 mm×400 mm,梁底受拉筋为 HRB400 的 2 Φ 14,箍筋型号为 HPB300,配置为 Φ 8@100。未加固梁配筋图如图 1a 所示。在 3 根未加固梁基础上制作首次采用钢板加固梁(编号 LB1~LB3),钢板采用 Q235B。梁加固的钢板宽、厚分别为 100、3 mm,沿梁的轴线方向使用专用钢粘剂粘于梁底并在梁的截面设置钢箍板进行锚固,其宽度为 40 mm,高度为 250 mm,厚度为 3 mm,间距为 150 mm,梁粘贴钢板加固截面示意图如图 1b 所示。在 3 根首次粘钢加固梁基础上制作增大截面二次加固梁(编号 LC1~LC3),加固前对既有钢板与新混凝土界面进行清洁处理,在既有钢板的表面焊接栓钉,栓钉沿钢板中心轴线通长布置,间距为 200 mm,新增混凝土受力筋为 HRB400 的 2 Φ 18,新增箍筋型号为 HPB300,配置为 Φ 8@100,箍筋植入混凝土里,植入深 100 mm,并与原箍筋搭接,新增 100 mm 厚混凝土,新增混凝土使用 C40 混凝土,梁底新增截面尺寸如图 1c 所示。



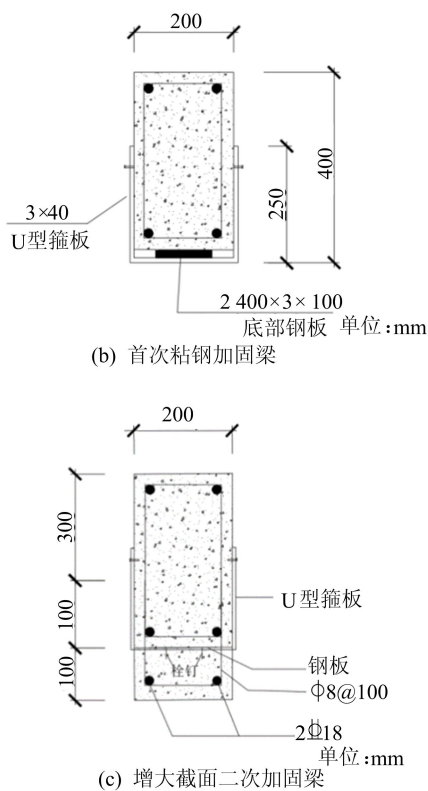


图1 试验梁尺寸

1.2 材料性能

实测所用混凝土强度等级为 C30,立方体试块抗压强度为 32.7 MPa,弹性模量为 3.1×10^4 MPa;混凝土强度等级为 C40,立方体试块抗压强度为 42.2 MPa,弹性模量为 3.1×10^4 MPa。通过试验确定 Q235B 钢板屈服强度为 210 MPa,抗拉强度为 360 MPa,弹性模量为 2.04×10^5 MPa。钢筋力学性能测试结果见表 1 所列。

表1 钢筋力学性能参数

钢筋直径/mm	屈服强度/(N/mm ²)	极限抗拉强度/(N/mm ²)	弹性模量/(N/mm ²)
14	355	560	2.11×10^5
20	355	520	2.09×10^5

1.3 试验加载

试验采用的 12 000 kN 多功能结构试验系统加载,通过分配梁将加载系统的荷载转化为三分点正位对称加载,加载制度为单调静力加载制度,预加载值为 20 kN,共施加 2 级,正式加载时,根据梁破坏荷载预估值的大小进行分级加载,每级荷载稳定 10 min 再开始下一级加载。试验中主要测量梁加载点及跨中位移,测点布置如图 2 所示,原梁纵筋及新增加固纵筋的跨中应变测点位

置如图 3 所示。

原梁及加固梁跨中横截面混凝土的应变分布及位置测点位置如图 4 所示,钢板底部应变分布及测点位置如图 5 所示。

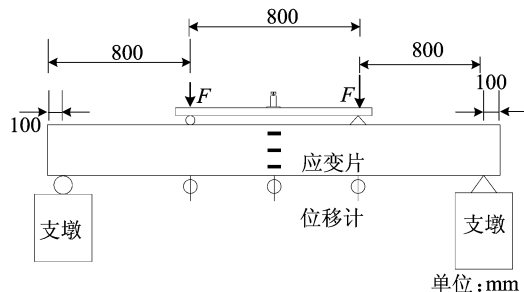


图2 梁加载示意图

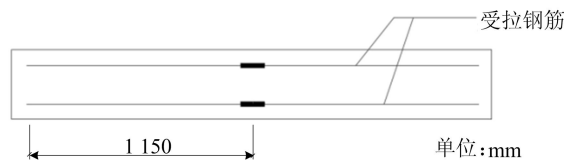


图3 梁受拉钢筋应变片位置示意图

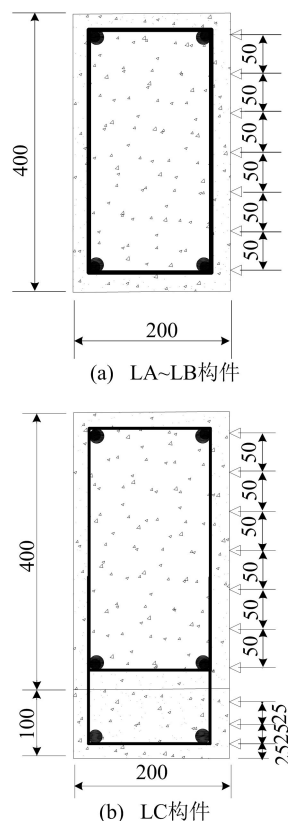


图4 梁应变片位置示意图

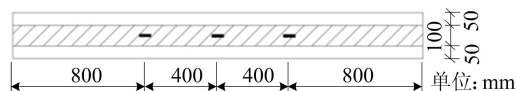


图5 梁钢板底部应变片位置示意图

2 试验结果与分析

2.1 承载能力

在加载过程中,配置的箍筋充分发挥作用,各试验梁均未发生剪切破坏。LA 组梁为典型的适筋梁破坏;LB 组梁均表现为钢板先屈服,梁顶混凝土压碎,最后达到极限荷载;LC 组梁均表现为新增受拉钢筋先屈服,梁顶混凝土压碎,最后达到极限荷载。实测梁的承载能力见表 2 所列。

由表 2 可知,对比未加固梁、粘钢加固梁,增大截面二次加固梁的开裂荷载、屈服荷载、极限荷载均有显著的提升。

相较于未加固梁,粘钢加固梁开裂荷载提升了 34% 左右,屈服荷载约提升了 44%,极限荷载提升 42%。相较于未加固梁,增大截面二次加固梁开裂荷载提升了 81%,屈服荷载约提升了 103%,极限荷载提升 112%。

相较于首次粘钢加固梁,增大截面二次加固

梁开裂荷载提升了 35%,屈服荷载约提升了 41%,极限荷载提升 49%。

表 2 试验梁承载力结果 单位:kN

试件编号	开裂荷载	屈服荷载	极限荷载
LA-1	52.21	244.88	272.65
LA-2	48.40	224.60	248.69
LA-3	52.28	231.15	266.69
平均值	50.95	233.54	262.68
LB-1	68.80	338.32	376.52
LB-2	67.26	332.31	369.35
LB-3	69.13	336.01	373.35
平均值	68.40	335.55	373.07
LC-1	92.57	477.53	567.91
LC-2	91.26	454.31	555.35
LC-3	93.13	486.91	539.36
平均值	92.32	472.92	557.21

2.2 荷载-挠度曲线

不同梁的荷载-挠度曲线如图 6 所示。

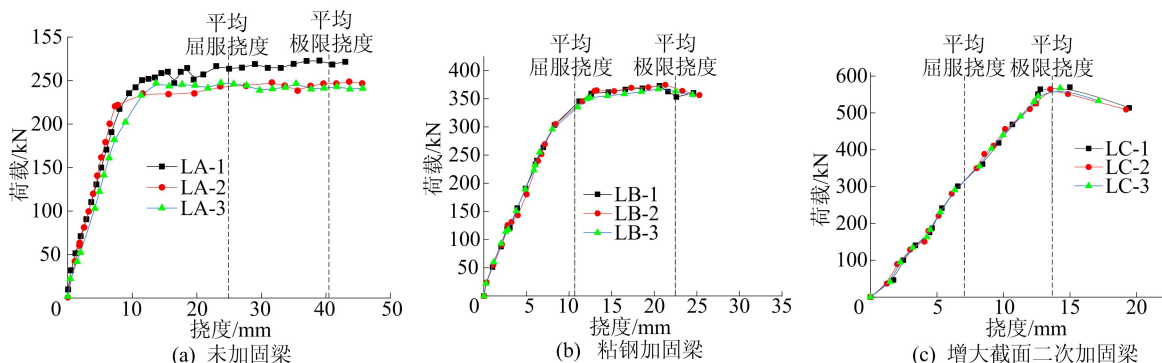


图 6 不同梁的荷载-挠度曲线

从图 6a 可以看出:未加固梁受拉筋屈服时的平均挠度为 26.93 mm,而极限荷载时的平均挠度为 40.65 mm;粘贴钢板加固梁钢板屈服时的平均挠度为 10.67 mm,极限荷载时的平均挠度为 22.47 mm;增大截面二次加固梁新增受拉筋屈服时的平均挠度为 7.09 mm,极限荷载时的平均挠度为 13.64 mm。

从图 6b 可以看出,粘钢加固梁的荷载-挠度曲线与未加固梁的大致相似,其破坏时挠度在 23.00 mm 左右,比未加固梁下降了 91%,并表现出一定的延性。

从图 6c 可以看出,增大截面二次加固梁破坏时,虽然极限荷载显著提升,但对应的挠度较未加固梁、粘钢加固梁的挠度减小,并在达到极限荷载后承载力快速下降,这是由于增大截面二次加固

后,相较于未加固梁、粘钢加固梁,底部的新增受拉钢筋承担的拉应变更大,更易先屈服,使钢筋退出后期负载工作转而由混凝土承担荷载,使加固梁具有较小的挠度。

2.3 混凝土正截面应变分布与发展

为探究粘钢加固后再次增大截面加固条件下混凝土应变沿截面高度的变化情况,在试验前对增大截面二次加固梁沿截面高度方向粘贴混凝土应变片,LC-1、LC-2、LC-3 沿截面高度在不同荷载状态下应变分布如图 7 所示。由图 7 可知,在钢筋混凝土梁新增钢筋屈服之前应变随梁截面高度变化而变化。

混凝土中和轴以上为混凝土受压区,应变值为负值;中和轴以下为混凝土受拉区,应变值为正值。随着荷载的逐渐变大,中和轴逐渐上移,受压

区高度降低,混凝土应变逐渐增大,混凝土截面应变沿高度分布近似呈线性。因此可以认为增大截

面二次加固梁截面混凝土的应变分布符合平截面假定。

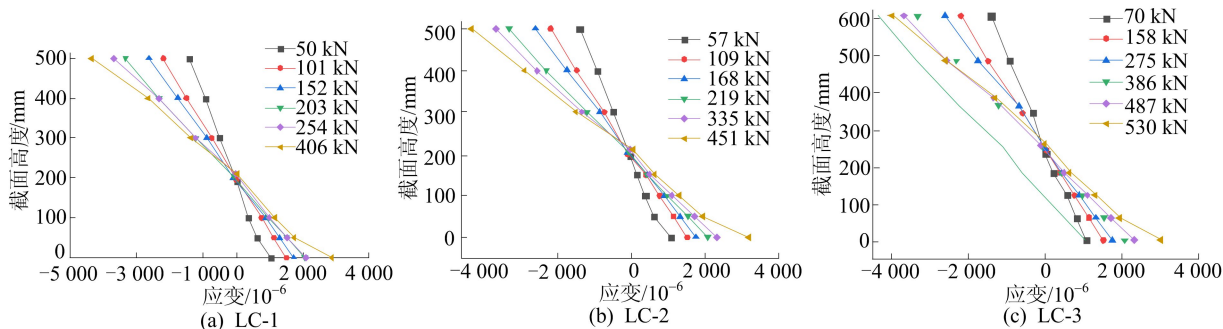


图7 LC组梁混凝土截面应变分布

2.4 受拉钢筋应变分析

不同梁的荷载-应变曲线如图8所示。

从图8a~图8c可以看出,未加固梁与粘钢加固梁受拉钢筋应变随荷载变化趋势相似,但未加固梁受拉钢筋应变更大,试验后期受拉钢筋应变接近极限应变 $10\,000 \times 10^{-6}$,而粘钢加固梁受拉钢筋在极限荷载时应变约为 $3\,600 \times 10^{-6}$,比未加固梁减少了64%,钢板应变约在 $5\,700 \times 10^{-6}$,说明粘贴钢板加固很好地保护了原梁受拉钢筋,分担了部分应力,粘贴钢板加固后改变了原梁中和轴,使梁受压区高度增大。

从图8d~图8f可以看出,二次加固梁极限荷

载时原受拉钢筋、钢板以及新增受拉钢筋应变值依次变大,原受拉钢筋应变值约为 $2\,500 \times 10^{-6}$,钢板应变约为 $5\,500 \times 10^{-6}$,新增受拉钢筋应变约为 $7\,000 \times 10^{-6}$;相较于未加固梁原受拉钢筋应变下降75%,相较于粘钢加固梁原受拉钢筋应变下降了30%,钢板应变下降4%。

从图8g可以看出,原受拉钢筋、钢板、新增受拉钢筋荷载-应变曲线近似平行,在钢筋未屈服前呈线性增长,说明钢板、新、旧混凝土三者之间未发生明显滑移,能够很好地与原梁共同承担荷载。试件梁LC-2、LC-3荷载-应变对比曲线与LC-1基本相同,不再赘述。

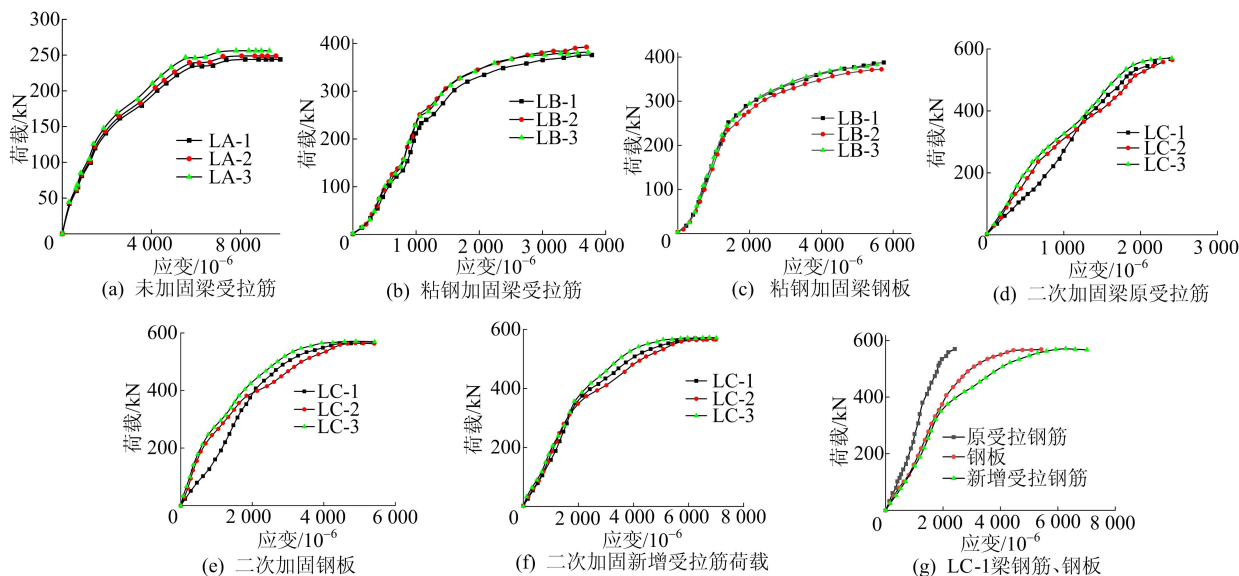


图8 不同梁的荷载-应变曲线

2.5 裂缝分布及破坏形态

本文LA和LB组梁中的第1根梁为例描述试验过程。LA-1梁裂缝分布如图9所示。从

图9可以看出:当荷载为52.21 kN时,在LA-1梁跨中与左支座间出现第1条细裂缝;然后继续加载至160.00 kN,梁自跨中向两支座方向出现数

条裂缝;当荷载为 244.98 kN 时,受拉钢筋屈服,裂缝继续向上延伸,裂缝数量增多,此后力加载变为位移加载;当 LA-1 梁荷载为 272.65 kN 时,梁受压区压碎,LA-1 梁被破坏。

LB-1 梁裂缝分布如图 10 所示,可以看出 LB-1 梁出现第 1 条裂缝时荷载为 67.26 kN;当荷载为 332.31 kN 时,钢板开始屈服;LB-1 梁极限荷载为 369.35 kN,此时混凝土受压区压碎,钢板和钢箍板未剥离或脱落。

LC-1 梁裂缝分布如图 11 所示,可以看出: LC-1 梁出现第 1 条裂缝时荷载为 91.26 kN;当荷载达到 454.31 kN 时新增受拉钢筋开始屈服;LC-1 梁达到极限荷载 505.35 kN 时,受压区混凝土压碎,钢箍板未剥离或脱落。值得注意的是,LC-1 试验梁在破坏状态时新增混凝土区域与原梁仍保持紧密连接,未出现交界面开裂现象,说明本试验采用植入箍筋加钢板焊接栓钉的加固连接新增混凝土的方式是可靠的。



图 9 LA-1 梁裂缝分布

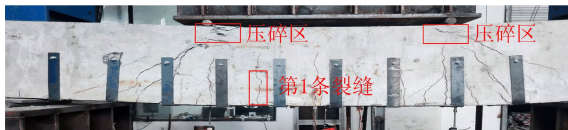


图 10 LB-1 梁裂缝分布

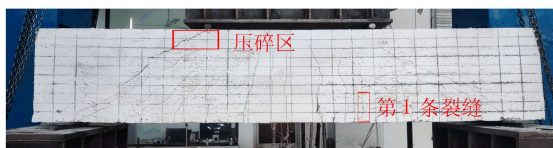


图 11 LC-1 梁裂缝分布

3 增大截面二次加固梁抗弯承载力公式

3.1 基本假定

根据试验结果与《混凝土结构加固设计规范》^[19]对增大截面二次加固钢筋混凝土梁极限受弯承载力计算公式推导作出如下基本假定:① 钢筋混凝土梁截面假定为平截面;② 不考虑混凝土的拉应力;③ 假定钢板与新旧混凝土、新旧混凝土之间粘结良好,不存在相对滑移。

混凝土应力-应变关系为:

$$\sigma_c = f_c \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right], \quad 0 < \epsilon_c < \epsilon_0 \quad (1)$$

$$\sigma_c = f_c, \quad \epsilon_0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} \quad (2)$$

其中: σ_c 为混凝土应力; ϵ_c 为混凝土应变; ϵ_0 为混凝土峰值应力时对应的应变,取 $2\,000 \times 10^{-6}$; ϵ_{cu} 为混凝土极限压应变,取 $3\,300 \times 10^{-6}$; f_c 为峰值应力。

钢筋应力-应变关系为:

$$\sigma_s = E_s \epsilon_s, \quad \epsilon_s < \epsilon_{sy} \quad (3)$$

$$\sigma_s = f_y, \quad \epsilon_{sy} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{su} \quad (4)$$

其中: ϵ_s 为钢筋应变; ϵ_{sy} 为钢筋屈服时应变; f_y 为受拉钢筋屈服时应力; ϵ_{su} 为受拉钢筋极限应变,取 $10\,000 \times 10^{-6}$ 。

钢板应力-应变关系为:

$$\sigma_p = E_p \epsilon_p, \quad \epsilon_p < \epsilon_{py} \quad (5)$$

$$\sigma_p = f_{py}, \quad \epsilon_{py} \leq \epsilon_p \leq \epsilon_{pu} \quad (6)$$

其中: σ_p 为钢板应力; ϵ_{py} 为钢板屈服时应变; E_p 为钢板屈服前弹模; f_{py} 为钢板屈服时应力; ϵ_{pu} 为钢板极限应变,取 $10\,000 \times 10^{-6}$ 。

3.2 受弯承载力理论推导

分析试验结果可知,增大截面二次加固梁截面混凝土受压区仍在原混凝土区域。受压区等效应力计算模型如图 12 所示,将受压区混凝土的应力分布等效为矩形应力图形。

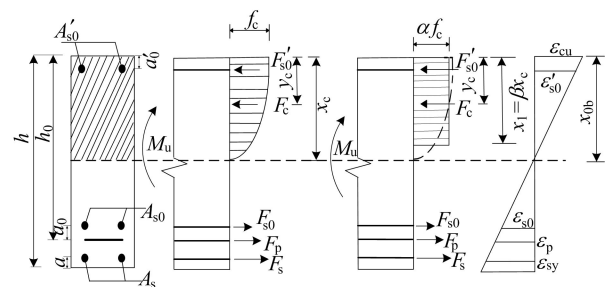


图 12 受压区等效应力计算模型

1) 当 $0 < \epsilon_c \leq \epsilon_0$ 时,对混凝土压应力沿受压区高度积分,并利用式(1)的混凝土本构关系,可得 RC 梁受压区合力 F_c 为:

$$F_c = \int_0^{x_c} \sigma_c b dy = \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} - \frac{\epsilon_c^2}{3\epsilon_0^2} \right) f_c b x_c \quad (7)$$

其中: x_c 为混凝土理论受压区高度; b 为截面宽度。

对受压区边缘取矩,根据力矩等效原则,受压区合力点到混凝土受压区边缘的距离 y_c 为:

$$y_c = x_c - \frac{\int_0^{x_c} f_c \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_c y}{\epsilon_0 x_c} \right)^2 \right] b y dy}{F_c} = \frac{4\epsilon_0 - \epsilon_c}{12\epsilon_0 - 4\epsilon_c} x_c \quad (8)$$

2) 当 $\epsilon_0 < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu}$ 时, 同理可推 RC 梁受压区合力为:

$$F_c = \left(1 - \frac{\epsilon_0}{3\epsilon_c} \right) f_c b x_c \quad (9)$$

$$y_c = \left[1 - \frac{6 - \frac{\epsilon_0^2}{\epsilon_c^2}}{12 - \frac{\epsilon_0}{\epsilon_c}} \right] x_c \quad (10)$$

其中, x_0 为混凝土应力最大时对应受压区高度。

由合力形心到受压区边缘距离 y_c 可以为等效应力矩形高度 x_1 的 1/2, 即

$$\beta = 2y_c/x_c \quad (11)$$

将受压区混凝土的应力分布等效为矩形应力图形时, 由于合力大小不变, 则有:

$$\alpha = \frac{F_c}{f_c \beta x_c b} \quad (12)$$

根据上述公式选取不同混凝土压应变 ϵ_c , 计算得到对应的混凝土受压区应力转换系数 α 、受压区高度转换系数 β , 至此 RC 梁受压区等效矩形应力转换系数 α 、 β 推导完成。当 $\epsilon_c = 0.0033$ 时, 由式(11)、式(12)计算得到 $\alpha = 0.965$, $\beta = 0.815$ 。由平面假定得到增大截面二次加固梁受弯承载力公式为:

$$M_u = \alpha f_c b \beta x_c \left(h_0 - \frac{x_c}{2} \right) + \sigma_{s0}' A_{s0}' (h_0 - a_0') + f_y A_s (h - h_0 - a) - \sigma_{s0} A_{s0} a_0 \quad (13)$$

截面平衡方程为:

$$\alpha f_c b \beta x_c + \sigma_{s0}' A_{s0}' = \sigma_{s0} A_{s0} + f_y A_s + \sigma_p A_p \quad (14)$$

$$2a_0' \leq x_c \leq \xi_b h_{01} \quad (15)$$

其中: M_u 为二次加固后梁的极限受弯承载力; h 、 h_0 分别为二次加固前、后截面高度; x_c 为混凝土受压高度; A_{s0}' 、 A_{s0} 、 A_s 、 A_p 分别为原受压钢筋、原受拉钢筋、新增受拉钢筋的截面面积和钢板截面面积; σ_{s0}' 为受压钢筋应力; σ_{s0} 为原受拉钢筋应力; σ_p 为钢板应力; f_y 为新增受拉钢筋的屈服强度; a_0' 、 a_0 分别为原梁纵向受压钢筋合力点到混凝土受压区边缘距离、纵向受拉钢筋合力点到混凝土受拉区边缘距离; a 为新增受拉钢筋合力点到混凝土受拉区边缘距离; ξ_b 为相对临界受压区高度; 当混凝土受压区边缘到达极限压应变 ϵ_{cu} , 新增受拉筋恰好达到屈服强度, 此时为临界状态,

界限受压区高度为 x_{0b} , 实际计算中, 对于界限状态, 用矩形应力图形的计算高度 x_b 代替 x_{0b} , 即 $x_b = \beta x_{0b}$ 。 ξ_b 计算公式为:

$$\xi_b = \frac{\beta}{1 + \frac{f_y}{\epsilon_{cu} E_s}} \quad (16)$$

其中, h_{01} 为二次加固后截面有效高度, $h_{01} = h - a$ 。

试验值 P_u 与理论计算值 P_t 的对比见表 3 所列。虽然试验数据较少, 但从表 3 可知 P_u 与 P_t 比值的平均数为 1.01, 变异系数为 0.009, 这表明理论计算值与试验值吻合度较高。

表 3 荷载试验值与理论计算值对比

试件编号	P_u /kN	P_t /kN	P_u/P_t
LC-1	567.91	551.25	1.03
LC-2	555.35	551.25	1.01
LC-3	539.36	551.25	0.98

4 结 论

1) 所有加固梁从加载开始到试件破坏都经历了混凝土开裂、受拉钢筋屈服、钢筋混凝土梁受压破坏 3 个阶段, 其中粘钢加固与增大截面二次加固均能有效提高梁的极限承载力, 在粘钢加固后, 采用梁底植筋, 钢板焊接栓钉后增大截面二次加固的方法切实有效, 交界面未出现开裂情况。

2) 粘钢加固梁极限荷载比未加固梁提高了 42%, 增大截面高度 100 mm 的二次加固梁极限荷载比未加固梁提高了 112%, 比粘钢加固梁提高了 49%。

3) 在试验过程中通过对粘贴混凝土应变片获取混凝土梁截面高度上的应变数据, 经过分析增大截面二次加固梁的混凝土截面应变分布符合平面假定, 并基于平面假定得到了增大截面二次加固梁的承载力公式, 承载力的公式计算值与试验值较为接近。

4) 对比二次加固梁的钢筋、荷载-应变的曲线可知, 在试件施加荷载的全过程, 受拉钢筋与钢板均能共同承受荷载, 协同受力效果较好。

5) 从加固方式来看, 粘钢加固与增大截面二次加固均可提高梁刚度, 粘钢加固能保持钢筋混凝土梁的延性, 增大截面二次加固可以有效抑制裂缝发展。

[参 考 文 献]

[1] 黄培彦, 邓腊, 刘瀚庭, 等. 碳纤维板增强钢筋混凝土梁开裂性状

- 试验研究[J]. 实验力学, 2003, 18(3): 301-307.
- [2] 姚国文, 黄培彦, 牛鹏志, 等. 循环荷载下碳纤维薄板增强 RC 梁的疲劳性能试验研究[J]. 实验力学, 2005, 20(3): 349-353.
- [3] 唐义军. 碳纤维布加固高温作用后的连续梁试验研究和可靠度分析[J]. 实验力学, 2006, 21(3): 265-270.
- [4] 路森, 蔡建林, 张庆宗, 等. 碳纤维布加固钢筋混凝土吊车梁疲劳刚度研究[J]. 实验力学, 2007, 22(5): 472-476.
- [5] 彭晖, 王浩, 付俊俊, 等. 冻融循环下预应力 CFRP 板加固钢筋混凝土梁的耐久性研究[J]. 实验力学, 2014, 29(3): 344-352.
- [6] 周云, 王廷彦, 张军伟. CFRP 加固钢筋混凝土短梁抗弯刚度计算方法[J]. 土木工程学报, 2020, 53(11): 9-20, 35.
- [7] 王知乐, 袁学锋, 姜荣斌. 侵蚀环境下多维修方式加固混凝土梁桥受力性能研究[J]. 工业建筑, 2020, 50(11): 174-177, 183.
- [8] 沈华. 增大截面加固梁的正截面抗弯性能试验[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2013, 32(12): 1639-1645.
- [9] 陈大川, 胡海波. 某商业楼重大火灾后检测鉴定与加固修复设计[J]. 建筑结构, 2010, 40(12): 105-108, 121.
- [10] 钟聪明, 朱岩松, 王福安. 京广中心加固改造设计[J]. 建筑结构, 2014, 44(24): 89-94.
- [11] 罗育明, 彭建新, 张建仁. 在役钢筋混凝土 T 型梁桥增大截面加固后可靠度研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(增刊 1): 611-616.
- [12] 蒋济同, 张琪. 应力滞后对增大截面加固受弯构件抗弯承载力的影响研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(增刊 1): 862-869.
- [13] 杜德润, 江生煌. 基于 BIM 的混凝土框架梁增大截面法加固设计研究[J]. 四川建材, 2020, 46(7): 60-61, 63.
- [14] 罗永成, 谯旭东, 郭川, 等. 组合加固混凝土悬挑梁力学性能研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(16): 97-101.
- [15] 李妍, 李冬一. 二次受力下绿色纤维增强水泥基复合材料加固 RC 梁抗弯性能数值仿真模拟[J]. 建筑结构, 2022, 52(增刊 1): 2114-2119.
- [16] 王华, 陈翀. 利用引桥承担部分水平推力加固的刚架拱桥二次加固设计[J]. 广东公路交通, 2021, 47(4): 130-133.
- [17] 李越, 滕志功. 粘贴钢板加固法在钢筋混凝土梁二次加固中的设计原理[J]. 甘肃冶金, 2021, 43(3): 76-79, 84.
- [18] 李双, 吴熠哲, 朱慈祥. 预应力混凝土连续梁桥二次加固及效果分析[J]. 桥梁建设, 2019, 49(5): 113-118.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构加固设计规范: GB 50367—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013: 21-23.

(责任编辑 吴 亮)

(上接第 848 页)

- [9] ZHU X, WANG X, LEI L, et al. The influence of roadside green belts and street canyon aspect ratios on air pollution dispersion and personal exposure[J]. Urban Climate, 2022, 44: 101236.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市道路工程设计规范: CJJ 37—2012[S]. 北京: 建筑工业出版社, 2016: 1-50.
- [11] ZHANG L, ZHANG Z, MCNULTY S, et al. The mitigation strategy of automobile generated fine particle pollutants by applying vegetation configuration in a street-canyon[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 274: 122941.
- [12] 中华人民共和国建设部. 城市道路绿化规划与设计规范: CJJ 75—97[S]. 北京: 中国城市规划设计研究院, 1998: 1-13.
- [13] GROMKE C, BUCCOLIERI R, DI-SABATINO S, et al. Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations-evaluation of CFD data with experimental data[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42: 8640-8650.
- [14] LALIC B, MIHAILOVIC D. An empirical relation describing leaf-area density inside the forest for environmental modeling[J]. Journal of Applied Meteorology, 2004, 43: 641-645.
- [15] ZHANG L, ZHANG Z, FENG C, et al. Impact of various vegetation configurations on traffic fine particle pollutants in a street canyon for different wind regimes[J]. Science of the Total Environment, 2021, 789: 147960.
- [16] KATUL G, MAHRT L, POGGI D, et al. One-and two-equation models for canopy turbulence[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2004, 113: 81-109.
- [17] HANG J, XIAN Z, WANG D, et al. The impacts of viaduct settings and street aspect ratios on personal intake fraction in three-dimensional urban-like geometries[J]. Building and Environment, 2018, 143: 138-162.
- [18] DU Y, MAK C, LI Y. Application of a multi-variable optimization method to determine lift-up design for optimum wind comfort[J]. Building and Environment, 2018, 131: 242-254.
- [19] SHEN X, ZHANG G, BJERG B. Investigation of response surface methodology for modelling ventilation rate of a naturally ventilated building[J]. Building and Environment, 2012, 54: 174-185.
- [20] NG K, KADIRGAMA K, NG E. Response surface models for CFD predictions of air diffusion performance index in a displacement ventilated office[J]. Energy and Buildings, 2008, 40: 774-781.

(责任编辑 吴 亮)