

表层内嵌 CFRP 筋加固组合梁负弯矩区抗弯承载力分析

李鑫恺, 宫唯康, 杨国涛*

(青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525)

摘要: 基于表层内嵌 (Near-Surface Mounted, NSM) CFRP 筋加固钢-混凝土组合梁负弯矩区抗弯试验, 分析了加固后组合梁负弯矩区的失效模式、截面应变分布以及 CFRP 筋应变发展规律, 并通过理论计算推导了加固后组合梁跨中截面的应变和挠度变形, 提出了表面内嵌 CFRP 筋加固组合梁负弯矩区抗弯承载力计算方法。分析结果表明, CFRP 筋在组合梁受弯过程中没有表现出明显的应变滞后行为, 加固后组合梁跨中截面应变分布几乎呈线性; 基于平面变形理论得出的加固组合梁负弯矩区抗弯承载力与试验结果吻合较好, 计算结果偏于安全, 二者误差不超过 13%。

关键词: 钢-混凝土组合梁; 负弯矩区; 表层内嵌 CFRP 筋; 失效模式; 应变分布; 抗弯承载力

中图分类号: TU375.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2025)05-0001-11

Flexural capacity analysis of the hogging-moment region of the composite beams strengthened with NSM-CFRP rods

LI Xinkai, GONG Weikang, YANG Guotao*

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: Based on the flexural test of the hogging-moment region of steel-concrete composite beams strengthened with near-surface mounted (NSM) CFRP rods, the failure modes in the hogging-moment region of strengthened composite beams, the cross-section strain distributions and the laws of strain development in CFRP rods were analyzed. The strain of the midspan cross-section of the strengthened composite beams and the midspan deflection are deduced through theoretical calculation, and the method is proposed for calculating the load-carrying capacity of the hogging-moment region of the composite beams strengthened with NSM-CFRP rods. The results indicate that the CFRP rods did not show apparent strain hysteresis behavior in the bending process of composite beams, and the strain distribution in the midspan section of the strengthened composite beams was almost linear. The derived flexural capacities of the hogging-moment region of the strengthened composite beams based on the plane deformation theory are in good agreement with the test results, and the calculation results are on the safe side, with an error of no more than 13%.

Key words: steel-concrete composite beams; hogging-moment regions; NSM-CFRP rods;

收稿日期: 2024-04-04

基金项目: 国家自然科学基金(51978351)

作者简介: 李鑫恺(1999—), 男, 山东潍坊人。硕士, 研究方向为结构加固。E-mail: lixinkai2022@126.com。

* 通信作者: 杨国涛(1986—), 男, 山东青州人。博士, 教授, 主要从事组合结构与结构稳定性等方面的研究。
E-mail: yangguotao@qut.edu.cn。

failure modes; strain distribution; flexural capacity

钢-混凝土组合梁因承载力高、自重低,在建筑和桥梁领域得到了广泛的应用^[1]。然而,由于材料的劣化和交通运输量的增加,许多现有桥梁和建筑中组合梁的结构性能已无法满足使用要求,对组合梁进行加固以改善其抗弯性能成为一个紧迫的问题。

碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber-Reinforced Polymer, CFRP)具有抗拉强度高、质量轻、耐腐蚀、抗疲劳等优异的力学性能^[2],因此在结构加固领域被广泛应用。目前,CFRP 加固大多使用外表面粘贴法^[3-6],这种方法操作简便且施工效率高,但在不施加锚具的情况下极易出现脱胶现象^[7-9],造成材料浪费,甚至丧失加固效果。相比于表面粘贴,表层内嵌(Near-Surface Mounted, NSM)技术^[10-14]不仅具有良好的黏结性能,还可以避免由于环境和人为等不确定因素导致材料性能损失。

目前,在组合梁加固中,大量研究使用了外部粘贴(External bonding, EB)技术。El-ZOHAIRY 等^[4]通过试验和有限元分析发现,在组合梁的混凝土翼板表面粘贴 CFRP 薄板,可以缓解混凝土表面的拉伸裂缝,提升组合梁的截面刚度和抗弯能力,并且极限弯矩的提升随着 CFRP 板粘贴长度和组合梁剪切连接程度的增加而更加显著;SHARIF 等^[6]研究了 CFRP 布加固对完全组合作用下的连续组合梁弯曲性能的影响,结果表明:在负弯矩区使用 CFRP 布可以有效地保持组合梁钢-混凝土界面的组合作用,提升组合梁的初始弯曲刚度。表层内嵌(NSM)技术主要应用在普通钢筋混凝土(RC)梁中,BILOTTA 等^[10]讨论了相同条件下 EB 技术和 NSM 技术加固 RC 梁的效果,证明了 NSM 技术相比于 EB 技术不容易发生脱胶,FRP 材料的利用率得到了提升;此外,在均布加载条件下,NSM 技术加固 RC 梁往往出现的是混凝土的剪切破坏。SHARAKY 等^[11]测试了部分和整体粘贴的 NSM-FRP 加固的 RC 梁,研究了粘贴长度、锚固措施和 FRP 特性对抗弯性能的影响,结果表明:采用全长粘贴加固的 RC 梁具有更大的刚度和承载能力,而且附加锚固对极限承载力提升效果明显。ABDALLAH 等^[13]进一步探究了 NSM-FRP 技术加固连续 RC 梁抗弯行为的影响,包括整体承载力、破坏模式、力矩再分布和延性状态,结果表明:NSM-FRP 对于连续梁的加固效果受到 FRP 脱胶和混凝土覆盖层剥离的限制,FRP 比例、粘贴长度以及黏合剂类型同时影响着连续梁的脱胶荷载以及力矩重分配能力。

综上,相比于 EB 技术,NSM 技术具有更好的黏结性能,可以显著提升加固后组合梁的承载力和刚度。因此,本文基于表层内嵌 CFRP 筋加固组合梁负弯矩区试验结果,进一步分析了加固后组合梁负弯矩区的失效模式、截面应变以及 CFRP 筋应变分布等,并基于平面变形理论提出了表层内嵌 CFRP 筋加固组合梁负弯矩区抗弯承载力计算方法。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验采用 4 根长度为 3000 mm 的钢-混凝土组合梁,H 型钢梁规格为 H 244 mm×175 mm×7 mm×11 mm,其中翼缘和腹板的厚度分别为 11 和 7 mm。为了避免出现腹板屈曲破坏,在支座和加载点处分别焊接厚度为 8 mm 的加劲肋。混凝土板的强度等级为 C50,截面尺寸为 500 mm×100 mm,混凝土板中纵筋配置 5 ϕ 10@100,箍筋配置 22 ϕ 10@140。组合梁剪力连接度为 0.84,连接件采用 ML15 型号的 4.8 级圆柱头栓钉,栓钉直径 13 mm、高度 80 mm。栓钉沿梁长度方向和宽度方向间距分别为 250 和 100 mm,共布置 2 排,试件构造如图 1 所示。

1.2 加固方案

首先,使用切割机在混凝土板表面切割 15 mm×18 mm 的沟槽,沟槽间距为 60 mm,如图 2 所示。随后将直径 8 mm 的 CFRP 筋嵌入混凝土板顶部并填充环氧树脂黏合剂进行固定。CFRP 筋的抗拉强度和弹性模量分别为 2400 MPa 和 160 GPa,极限伸长率为 1.5%;环氧树脂的抗拉强度和弹性模量分别为 30 MPa 和 5300 GPa,泊松比为 0.23。内嵌加固完成后,在混凝土板端部粘贴 U 型 CFRP 布进行锚固。

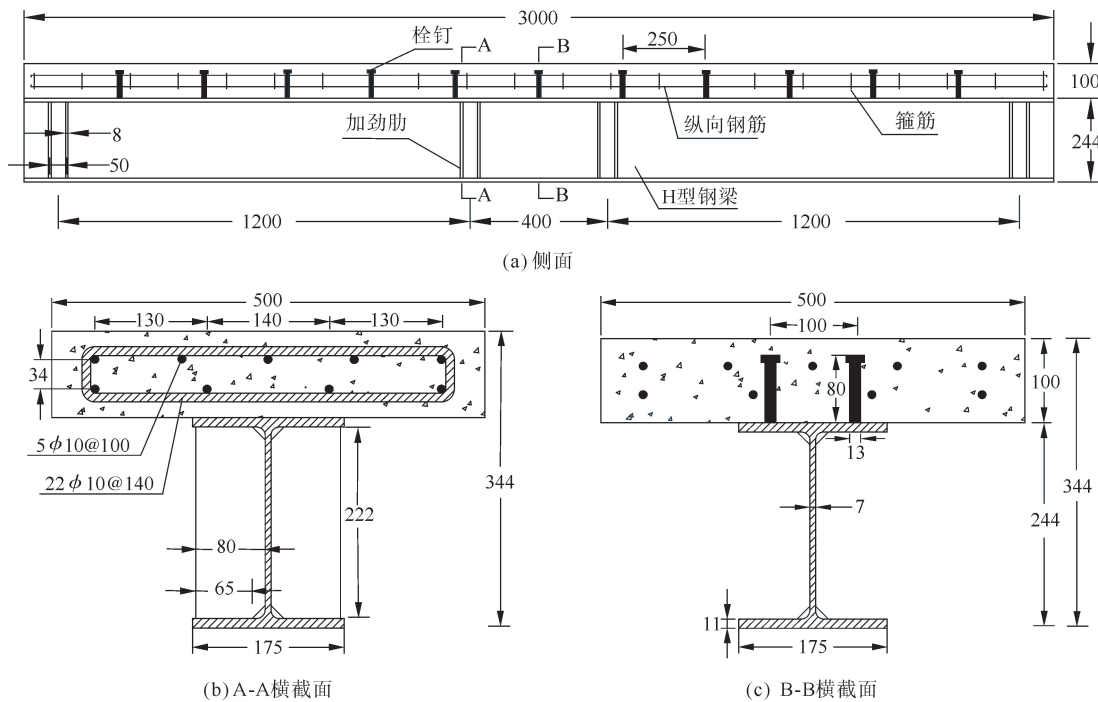


图 1 试件构造与配筋(单位:mm)

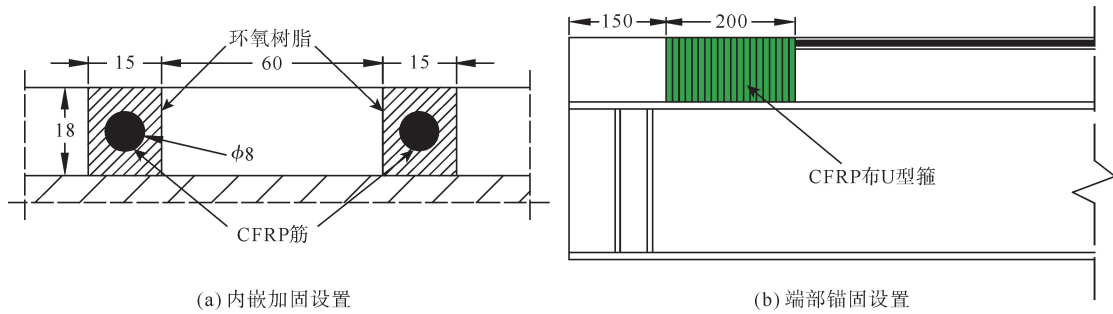


图 2 加固方案(单位:mm)

组合梁加固参数如表 1 所示,C 为未加固的组合梁,C-2 和 UA-2 分别为 2 根 CFRP 筋加固的组合梁,UA-4 为 4 根 CFRP 筋加固的组合梁,字母“UA”表示在混凝土板端部粘贴 CFRP 布 U 型箍。CFRP 布沿其纤维方向的抗拉强度为 4300 MPa,材料弹性模量为 260 GPa。

1.3 试验结果

1.3.1 失效模式和承载力

未加固的组合梁表现为典型的弯曲失效,在受拉钢筋和受压翼缘达到屈服强度后,跨中截面产生塑性铰,挠度急剧增加,但并未出现翼缘屈曲现象;而使用 CFRP 筋加固的组合梁均出现了受压翼缘屈曲的现象,如图 3 所示。

表 2 汇总了组合梁的试验结果,通过对比 4 根组合梁屈服荷载和极限荷载,发现使用 CFRP 筋加固后,组合梁截面屈服刚度和后屈服刚度均得到提升,其中 UA-2 和 UA-4 的屈服荷载比未加固梁 C 分别提升了 8.4%和 13.4%,而极限荷载分别提升 9.0%和 19.2%。然而,加固后组合梁的延性有所下降,UA-2

表 1 加固设置

试件编号	CFRP 筋数量	加固长度/mm	端部锚固情况
C	0	0	无锚固
C-2	2	2700	无锚固
UA-2	2	2700	CFRP 布 U 型锚固
UA-4	4	2700	CFRP 布 U 型锚固

和 UA-4 的延性指标相比于未加固梁 C 分别降低了 14.8% 和 19.5%，但 C-2 由于过早达到屈服荷载而没有表现出明显的延性下降。



图3 试验现象

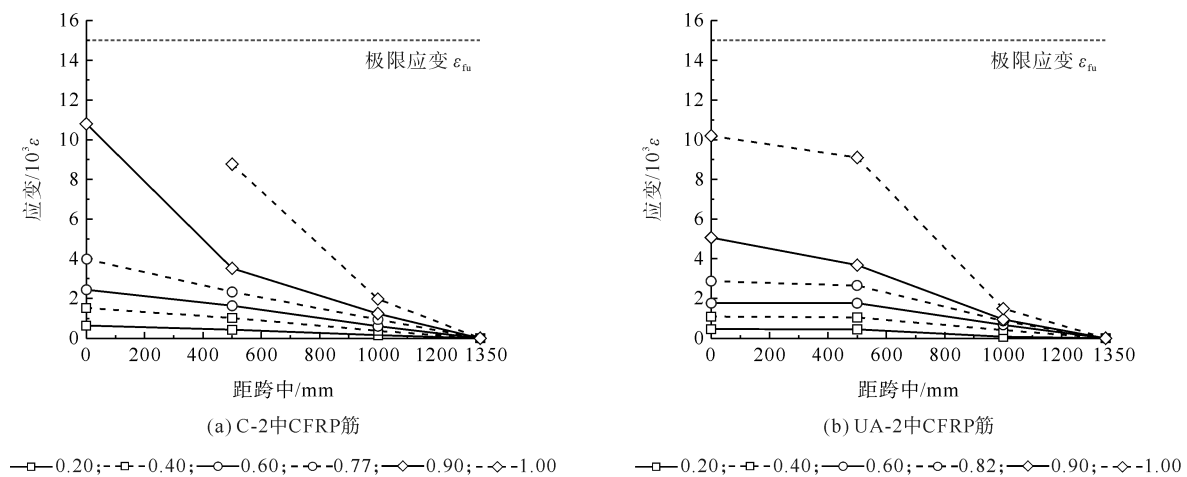
表2 试验结果^[15]

试件编号	P_y/kN	$R_y/\%$	P_u/kN	$R_u/\%$	Δ_y/mm	Δ_u/mm	μ	失效模式
C	211.4	—	255.3	—	15.6	59.2	3.79	弯曲失效
C-2	213.3	1.0	276.4	8.3	14.6	55.6	3.81	屈曲失效
UA-2	229.1	8.4	278.3	9.0	19.5	62.9	3.23	屈曲失效
UA-4	237.9	13.4	304.5	19.2	20.6	63.0	3.05	屈曲失效

注： P_y 、 P_u 分别为屈服荷载和极限荷载； R_y 、 R_u 分别为屈服荷载和极限荷载提升率； Δ_y 、 Δ_u 分别为屈服挠度和极限挠度； μ 为延性系数，数值上等于极限挠度与屈服挠度的比值。

1.3.2 CFRP 筋应变分布

CFRP 筋应变通过表面粘贴应变片进行监测，测点布置在跨中、距跨中 1/3 和 2/3 位置处。CFRP 筋不同荷载等级下 ($P/P_u=0.20\sim 1.00$) 的应变分布如图 4 所示，根据不同测点的应变值可以看出，在整个加载段中 CFRP 筋跨中位置的应变最大；在加载初期 ($P/P_u=0.20$)，CFRP 筋应变主要集中在跨中位置，而靠近组合梁端部区域，CFRP 筋应变几乎为 0；随着荷载增大 ($0.40 < P/P_u < 0.60$)，CFRP 筋应变逐渐趋于线性发展，组合梁端部和剪跨段的 CFRP 筋应变显著增长；达到屈服荷载后 ($P/P_u > 0.60$)，跨中位置 CFRP 筋应变增长最快，应变发展表现出非线性特征；而达到极限荷载时 ($P/P_u=1.00$)，所有加固组合梁中 CFRP 筋跨中位置的应变均超过了其极限应变的 60%。



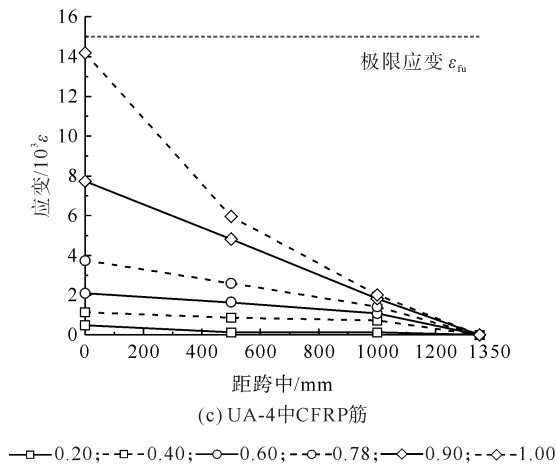


图 4 不同荷载等级下 CFRP 筋应变分布

1.3.3 跨中截面应变

在跨中沿梁高度方向以 80 mm 的等间距粘贴应变片监测截面应变。不同荷载等级下($P/P_u=0.20\sim 1.00$)加固组合梁跨中截面应变分布如图 5 所示。在加载初期($0.20 < P/P_u < 0.40$),组合梁跨中截面应变沿高度方向几乎呈线性,符合平面变形的假设;达到屈服荷载后($P/P_u > 0.60$),中性轴表现出上移趋势;接近极限荷载时($P/P_u > 0.90$),截面应变迅速增大,高度方向上的应变分布开始出现非线性特征。在整个加载过程中,CFRP 筋应变没有出现较为明显的变形滞后行为,表明 CFRP 筋与混凝土翼板的黏结情况良好,相对滑移对组合梁受弯性能的影响在理论分析中可以忽略。

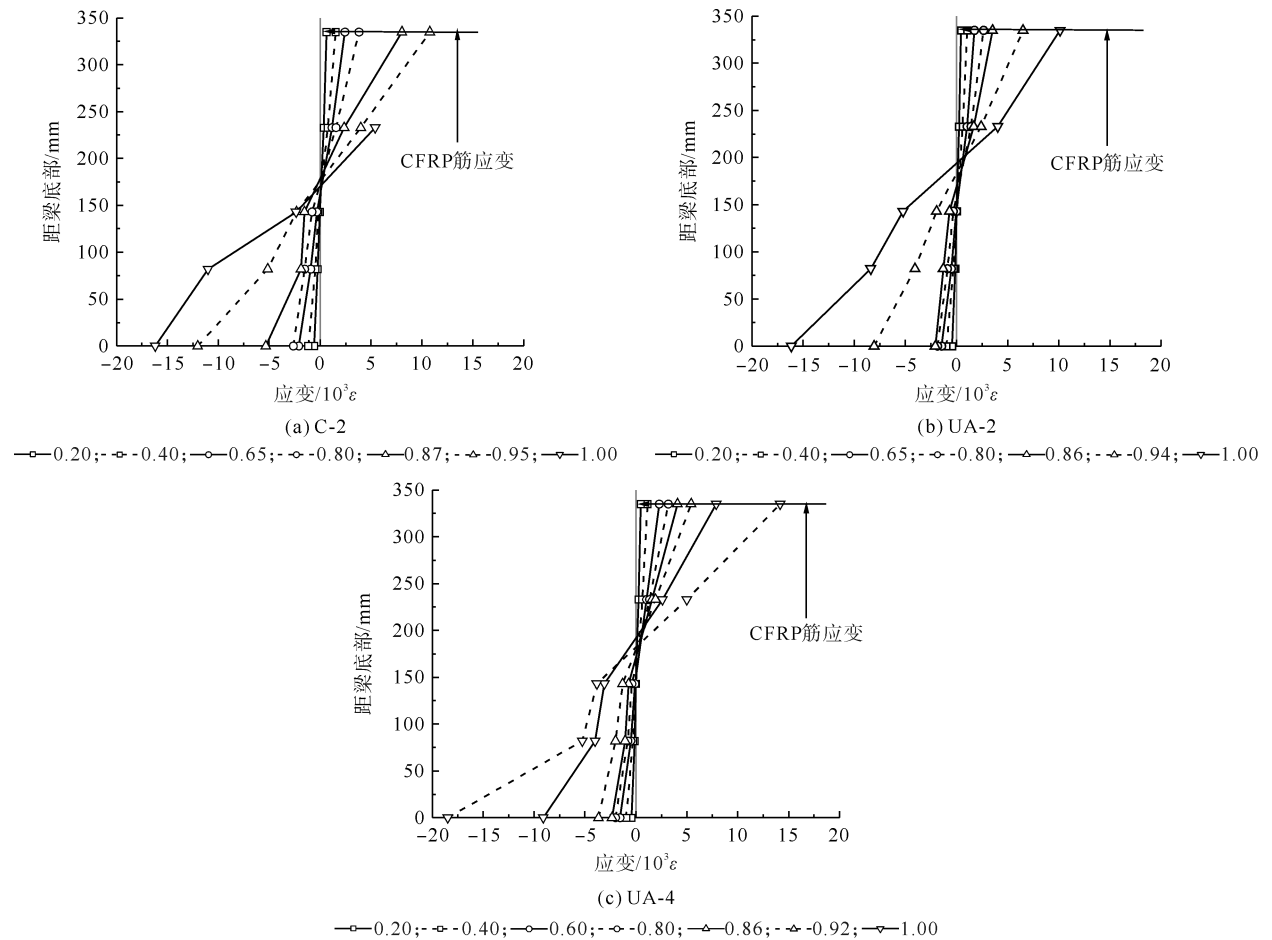


图 5 不同荷载等级下跨中截面应变

2 理论计算与分析

在 CFRP 表面内嵌加固 RC 梁的大量研究中,通常将变形后的截面假定为平面^[11,16],将钢-混凝土界面相对滑动的影响忽略。因此,本节中的计算模型基于以下假设:①组合梁截面应变沿高度方向线性分布。②混凝土翼板不承担拉力。③CFRP 筋与混凝土之间完全黏结。④钢材均为理想弹塑性材料,应力由胡克定律求得,当 $|\epsilon_s| < f_s/E_s$ 时, $\sigma_s = E_s \epsilon_s$; 当 $|\epsilon_s| \geq f_s/E_s$ 时, $\sigma_s = f_s$ 。⑤完全塑性状态下钢筋达到屈服强度,钢梁受压区和受拉区均达到屈服强度,应力呈矩形分布。⑥CFRP 筋为理想线弹性体,其应力 $\sigma_{cf} = E_{cf} \epsilon_{cf}$, 完全塑性状态下达到极限抗拉强度。

2.1 极限承载力计算模型

在完全塑性状态下,组合梁截面中性轴可能出现 3 种情况:中性轴位于混凝土翼板内,中性轴位于钢梁翼缘内,中性轴位于钢梁腹板内。

由于忽略混凝土拉力作用,并且纵向钢筋的截面面积远小于钢梁的截面面积,所以在组合梁负弯矩区,中性轴通常位于钢梁腹板内。另外,当 CFRP 筋承受较大拉力时,中性轴会出现一定程度上移,这时中性轴可能位于钢梁翼缘内。根据中性轴位置分 2 种情况进行塑性承载力计算。

2.1.1 截面类型 I (中性轴位于钢梁腹板内)

组合梁中性轴位于钢梁腹板内时,即 $x > h_c + h_f$,跨中纯弯段的应力分布如图 6 所示,其中, h 为组合梁高度, h_c 和 h_e 分别为混凝土板厚度和环氧树脂胶层厚度, b_f 和 h_f 分别为钢梁翼缘宽度和厚度, h_s 和 t_w 分别为钢梁高度和腹板厚度。

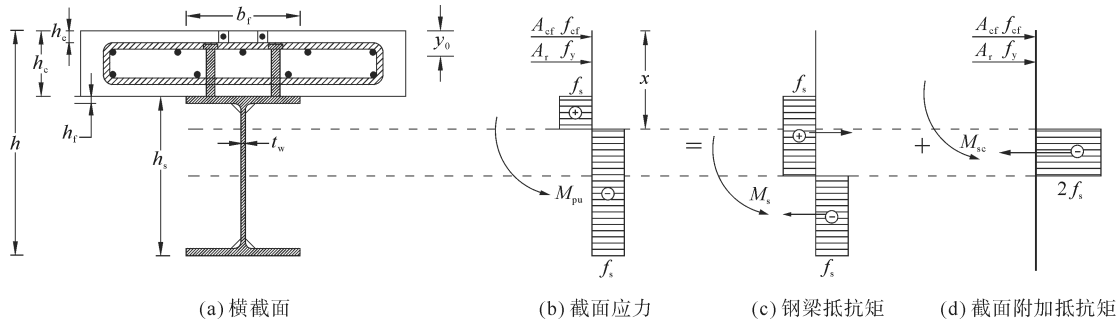


图 6 极限承载力计算图式(第 I 类截面)

中性轴位置判断条件为

$$A_{cf} f_{cf} + A_r f_y + 2b_f h_f f_s < f_s A_s \quad (1)$$

式中: A_{cf} 、 A_r 分别为 CFRP 筋截面面积和钢筋截面面积; f_{cf} 为 CFRP 筋抗拉强度标准值; f_y 、 f_s 分别为钢筋和钢梁的屈服强度; A_s 为钢梁截面面积。

根据合力平衡关系,建立关于中性轴高度 x 的方程:

$$2t_w(x - h_c - h_f) f_s = f_s A_s - A_{cf} f_{cf} - A_r f_y - 2b_f h_f f_s \quad (2)$$

化简上式,可得中性轴高度 x 的表达式:

$$x = h_c + h_f + \frac{f_s A_s - A_{cf} f_{cf} - A_r f_y - 2b_f h_f f_s}{2t_w f_s} \quad (3)$$

为了简化计算,将图 6(b)应力分布等效为图 6(c)和(d)叠加的形式,将极限抗弯承载力表示为

$$M_{pu} = M_s + M_{sc} \quad (4)$$

$$M_s = (S_1 + S_2) f_s \quad (5)$$

$$M_{sc} = \frac{1}{2} A_{cf} f_{cf} \left(x + h_c + \frac{h_s}{2} - h_e \right) + \frac{1}{2} A_r f_y \left(x + h_c + \frac{h_s}{2} - 2y_0 \right) \quad (6)$$

式中: M_{pu} 为截面极限抗弯承载力理论值; M_s 为钢梁自身的抵抗力矩; S_1 、 S_2 分别为钢梁受拉区和受压区对

钢梁截面形心轴的面积矩; M_{sc} 为 CFRP 筋与钢筋引起的截面附加抵抗力矩; y_0 为钢筋合力点至混凝土板顶部的距离。

将式(3)求得的中性轴高度 x 带入式(6)中,求得 M_{sc} ;再将 M_s 和 M_{sc} 带入式(4)得到加固后组合梁负弯矩截面极限抗弯承载力。

2.1.2 截面类型 II (中性轴位于钢梁翼缘内)

组合截面塑性中性轴位于钢梁翼缘内,即 $h_c < x < h_c + h_f$,截面应力分布如图 7 所示。

中性轴位置判断条件为

$$A_{cf}f_{cf} + A_r f_y < f_s A_s \leq A_f f_f + A_r f_y + 2b_f h_f f_s \quad (7)$$

根据合力平衡关系,建立关于中性轴高度 x 的方程:

$$f_s A_s = A_{cf}f_{cf} + A_r f_y + 2b_f(x - h_c)f_s \quad (8)$$

化简上式,可得中性轴高度 x 的表达式:

$$x = h_c + \frac{f_s A_s - A_{cf}f_{cf} - A_r f_y}{2b_f f_s} \quad (9)$$

极限抗弯承载力可用式(4)表示,其中, M_{sc} 为

$$M_{sc} = \frac{1}{2} A_{cf}f_{cf} \left(2x + h_0 - h_f - h_c + \frac{h_s}{2} \right) + \frac{1}{2} A_r f_y \left(2x + h_0 - h_f + \frac{h_s}{2} - 2y_0 \right) \quad (10)$$

式中: h_0 为翼缘受压区换算高度, $h_0 = (h_c + h_f - x)/t_w$;其他符号意义同前。

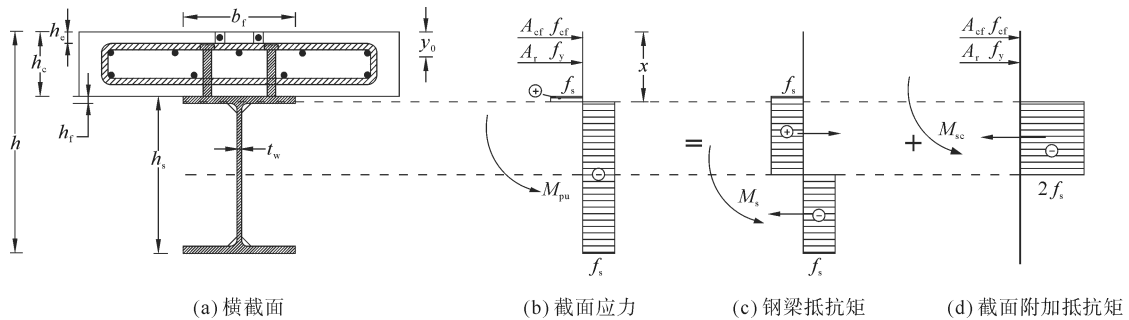


图 7 极限承载力计算图式(第 II 类截面)

2.2 屈服承载力计算模型

组合梁达到屈服状态的标志有:钢梁下翼缘受压屈服,纵向钢筋受拉屈服,钢筋与钢梁同时屈服。

需要说明的是,弹性阶段 CFRP 筋变形较小,一般不会达到极限强度,故不将其破坏情况作为屈服承载力的计算依据。

根据平截面假定,3 种屈服状态的应变分布如图 8 所示。 x_c 为钢筋与钢梁下翼缘同时屈服时的中性轴高度; ϵ_{ct} 为混凝土拉应变; ϵ_{ru} 和 ϵ_{su} 分别为钢筋和钢梁翼缘的屈服应变,当 ϵ_{ru} 和 ϵ_{su} 同时发生时,有

$$\frac{\epsilon_{ru}}{\epsilon_{su}} = \frac{x_c}{h - x_c} \quad (11)$$

$$x_c = \frac{h\epsilon_{ru}}{\epsilon_{su} + \epsilon_{ru}} \quad (12)$$

显然,屈服状态的标志可以根据中性轴位置判断,当 $x < x_c$ 时,翼缘先发生受压屈服;当 $x > x_c$ 时,钢筋先发生受拉屈服;当 $x = x_c$ 时,则钢筋受拉与翼缘受压同时达到屈服。

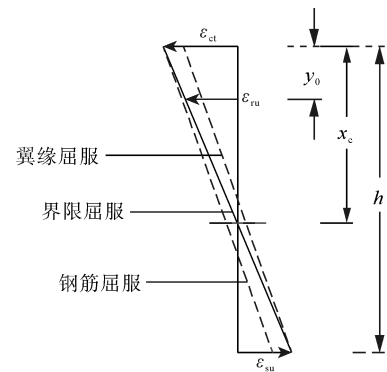


图 8 屈服标志

当组合梁处于屈服阶段时,混凝土翼板中 CFRP 筋的应变相比于其极限应变较小,相应产生的拉应

力较小,拉应力主要由钢筋和钢梁承担,截面中性轴通常位于钢梁内。图9和图10分别为翼缘屈服和钢筋屈服发生时的截面应变分布情况。

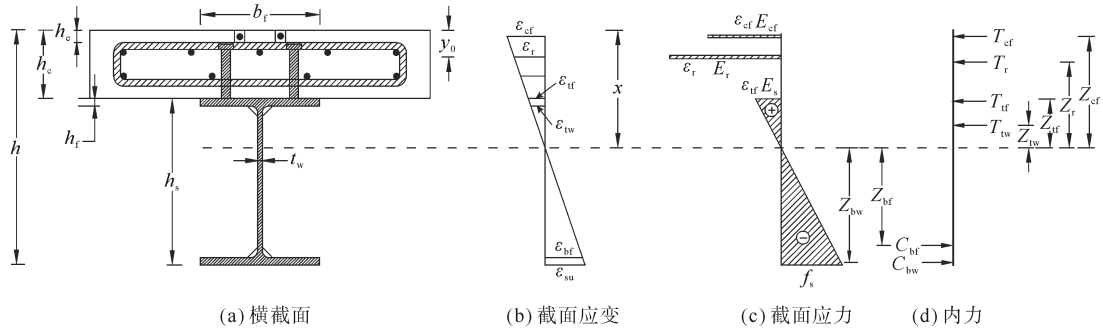


图9 翼缘屈服状态

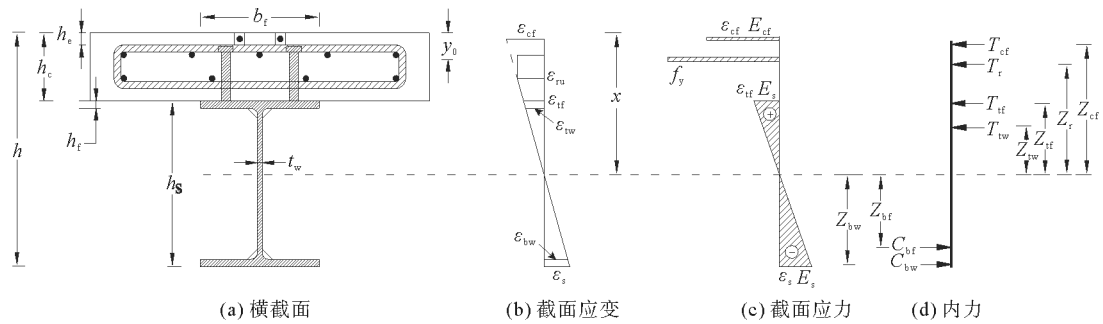


图10 钢筋屈服状态

根据合力平衡关系:

$$T_{cf} + T_r + T_{tf} + T_{tw} = C_{bf} + C_{bw} \quad (13)$$

式中: T_{cf} 、 T_r 分别为 CFRP 筋和钢筋产生的拉力, 见式(14)(15); T_{tf} 、 T_{tw} 分别为钢梁受拉区翼缘和腹板产生的拉力; C_{bf} 、 C_{bw} 分别为钢梁受压区翼缘和腹板产生的压力。

对于线性分布的截面应变, 内力的计算方法见式(16)~(19):

$$T_{cf} = A_{cf} E_{cf} \epsilon_{cf} \quad (14)$$

$$T_r = A_r E_r \epsilon_r \quad (15)$$

$$T_{tf} = h_f b_f E_s (\epsilon_{tf} + \epsilon_{tw}) / 2 \quad (16)$$

$$T_{tw} = t_w (x - h_c - h_f) E_s \epsilon_{tw} / 2 \quad (17)$$

$$C_{bf} = h_f b_f E_s (\epsilon_s + \epsilon_{bf}) / 2 \quad (18)$$

$$C_{bw} = t_w (h - x - h_f) E_s \epsilon_{bf} / 2 \quad (19)$$

式中: E_{cf} 、 E_r 和 E_s 分别为 CFRP 筋、钢筋和钢梁的弹性模量。

求解式(13)~(19)可得中性轴高度 x , 再将各个合力对中性轴取矩, 得到屈服抗弯承载力:

$$M_{eu} = T_{cf} Z_{cf} + T_r Z_r + T_{tf} Z_{tf} + T_{tw} Z_{tw} + C_{bf} Z_{bf} + C_{bw} Z_{bw} \quad (20)$$

式中: M_{eu} 为屈服抗弯承载力理论值; Z_{cf} 、 Z_r 分别为 CFRP 筋合力点和钢筋合力点至中性轴距离, 见式(21)(22); Z_{tf} 、 Z_{tw} 分别为翼缘和腹板受拉合力点至中性轴距离, 见式(22)(23); Z_{bf} 、 Z_{bw} 分别为翼缘和腹板受压合力点至中性轴距离, 见式(25)(26)。

$$Z_{cf} = x - h_c / 2 \quad (21)$$

$$Z_r = x - y_0 \quad (22)$$

$$Z_{tf} = x - h_c - h_f (2\epsilon_{tw} + \epsilon_{tf}) / 3 (\epsilon_{tw} + \epsilon_{tf}) \quad (23)$$

$$Z_{tw} = 2(x - h_c - h_f) / 3 \quad (24)$$

$$Z_{bf} = h - x - h_f(2\varepsilon_{bw} + \varepsilon_s)/3(\varepsilon_{bw} + \varepsilon_s) \quad (25)$$

$$Z_{bw} = 2(h - x - h_f)/3 \quad (26)$$

2.3 荷载-挠度验算

组合梁挠度计算的基本方法包括换算截面法、折减刚度法和组合系数法。现有的研究成果表明,对于完全剪力连接的组合梁,上述 3 种方法所得计算结果的离散性较小^[17]。因此,在本节计算中忽略了钢-混凝土界面滑移引起的刚度折减,使用换算截面法,并考虑了混凝土翼板开裂导致的刚度衰减,采用开裂后组合截面有效惯性矩代替初始惯性矩。

组合梁在某一弯矩作用下,当混凝土翼板和钢梁完全共同作用时,其截面曲率相同,本文将曲率 ϕ 分为 2 段,分别为弹性阶段和后屈服阶段,其表达式为

$$\phi = \begin{cases} M/E_s I_{\text{eff}}, & M \leq M_y \\ \varepsilon_{cf}/x - \frac{h_c}{2}, & M > M_y \end{cases} \quad (27)$$

式中: M_y 为屈服荷载对应的截面弯矩; $E_s I_{\text{eff}}$ 为换算截面的有效抗弯刚度, I_{eff} 为组合截面的有效惯性矩^[18],其表达式为

$$I_{\text{eff}} = \left(\frac{M_{\text{cr}}}{M}\right)^3 I_0 + \left[1 - \left(\frac{M_{\text{cr}}}{M}\right)^3\right] I_{\text{cr}} \quad (28)$$

式中: I_0 为混凝土开裂前完整截面对其重心轴的换算截面惯性矩; I_{cr} 为混凝土开裂后由 CFRP 筋、纵向钢筋以及钢梁组成的复合截面惯性矩; M_{cr} 为加固后组合梁的开裂弯矩,根据文献^[19]给出的组合梁开裂弯矩计算方法:

$$M_{\text{cr}} = \frac{f_{\text{tk}} I_0 n_{\text{sc}}}{z_0} \quad (29)$$

式中: f_{tk} 为混凝土抗拉强度标准值; z_0 为混凝土板形心至组合截面形心的距离; $n_{\text{sc}} = E_s/E_c$ 。

对等截面的组合梁,当受到 2 个大小相等的对称荷载时,跨中截面挠度 δ 的计算公式为

$$\delta = \phi \frac{3l^2 - 4a^2}{24} \quad (30)$$

式中: l 为组合梁的计算跨度; a 为组合梁剪跨段的长度。

2.4 理论结果验证

依据 2.1 节和 2.2 节中计算模型得出的承载力理论值与试验结果进行了比对,从表 3 中试验值与理论值的比值可以看出,二者最大误差为 13%。相比于屈服承载力,极限承载力的理论结果与试验结果差距略大,这种差距是由于钢材进入应力强化阶段,极限强度提升所导致的。总体而言,采用理论方法得到的承载力值是偏于安全的。在实际工程中,建议采用极限承载力计算模型对加固后组合梁负弯矩区的抗弯承载力进行计算,而屈服承载力的计算结果较极限承载力相对保守,仅可以为桥梁安全储备设计提供参考。

表 3 承载力理论值与试验结果对比

试件	试验值 ^[15] /(kN·m)		理论值/(kN·m)		试验/理论	
	极限荷载 M_{pu}	屈服荷载 M_{eu}	极限荷载 M_{pu}	屈服荷载 M_{eu}	极限	屈服
C	306.4	253.7	278.3	239.0	1.10	1.06
C-2	331.7	255.9	295.4	259.9	1.12	0.98
UA-2	334.0	274.9	295.4	259.9	1.13	1.06
UA-4	365.4	285.5	327.9	264.5	1.11	1.08

图 11 中绘制了基于 2.3 节挠度理论计算公式与试验得到的 CFRP 筋加固组合梁负弯矩区的荷载-跨中挠度曲线,通过理论模型预测的荷载-挠度曲线在后屈服刚度和极限荷载方面与试验的吻合度较高,整个加载过程的变形响应情况与试验结果保持一致,证实了使用 CFRP 筋内嵌加固对后屈服阶段中组合梁

截面刚度的提升作用。然而,理论结果的弹性阶段刚度均略高于实际情况,说明理论模型相较于试验更加理想化,忽略了组合梁的几何变形和界面滑移对截面刚度的影响。

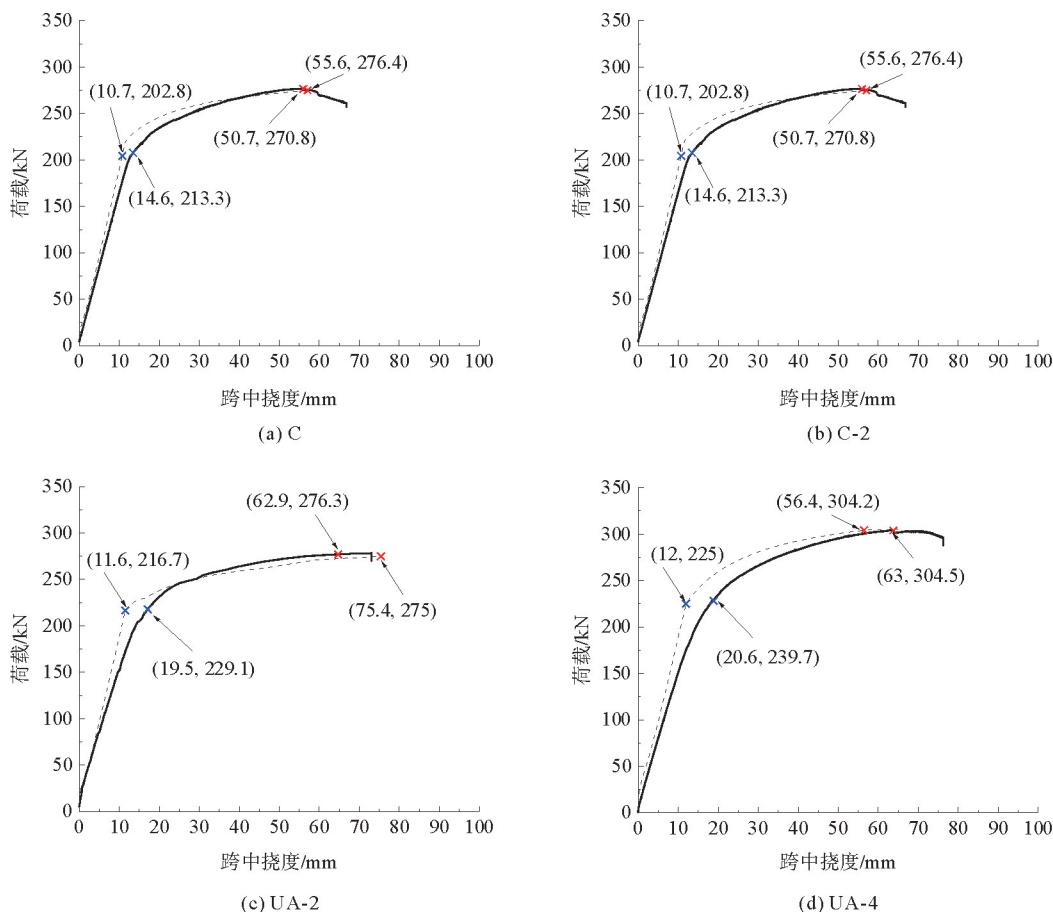


图 11 挠度理论值与试验结果对比

— 试验^[19]; ---- 理论; × 屈服荷载; × 极限荷载

3 结论

1) CFRP 筋应变在跨中纯弯段的增长速度最快,且发展随荷载增加表现出明显的非线性,其主要在组合梁后屈服阶段中承担拉应力,增强了组合梁负弯矩区的抗弯能力。

2) 表层内嵌 CFRP 筋加固组合梁在整个加载过程中的跨中截面应变基本呈线性变化,CFRP 筋未出现明显的应变滞后行为,其与组合梁的协同工作能力可以得到保证。

3) 基于平面变形理论得出的表层内嵌 CFRP 筋加固组合梁负弯矩区屈服承载力和极限承载力与试验吻合程度较高,且极限承载力的理论值相比于试验结果偏于安全。

4) 利用截面有效惯性矩方法建立的加固组合梁负弯矩截面挠度表达式可以较好地预测加固梁在整个受弯过程中负弯矩截面的变形响应情况,其变化趋势与实测结果基本一致。

参考文献 (References):

- [1] 樊健生, 聂建国. 钢-混凝土组合桥梁研究及应用新进展[J]. 建筑钢结构进展, 2006, 8(5): 35-39.
FAN Jiansheng, NIE Jianguo. Progress in research and application of composite steel-concrete bridges[J]. Progress in Steel Building Structures, 2006, 8(5): 35-39.
- [2] CHOWDHURY M, HOSSAIN S. A review on tensile and flexural properties of fiber-reinforced polymer composites[J]. IOSR Journal of Polymer and Textile Engineering, 2020, 7(5): 16-26.

- [3] DENG J, LEE M M K. Behaviour under static loading of metallic beams reinforced with a bonded CFRP plate[J]. *Composite Structures*, 2007, 78(2): 232-242.
- [4] EL-ZOHAIRY A, SALIM H, SHAABAN H, et al. Experimental and FE parametric study on continuous steel-concrete composite beams strengthened with CFRP laminates[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 157: 885-898.
- [5] IBRAHIM A, SALEM S, KHALIL A, et al. Experimental investigation for moment redistribution in continuous RC beams top strengthened with CFRP and steel plates[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 809(1): 012007.
- [6] SHARIF A M, SAMAANEH M A, AZAD A K, et al. Use of CFRP to maintain composite action for continuous steel-concrete composite girders[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2016, 20(4): 04015088.
- [7] TENG J G, SMITH S T, YAO J, et al. Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs[J]. *Construction and Building Materials*, 2003, 17(6/7): 447-462.
- [8] ARAM M R, CZADERSKI C, MOTAVALLI M. Debonding failure modes of flexural FRP-strengthened RC beams[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2008, 39(5): 826-841.
- [9] WANTANASIRI P, LENWARI A. Intermediate crack-induced debonding analysis for RC beams strengthened with FRP plates[J]. *Structural Engineering and Mechanics: An International Journal*, 2015, 56(3): 473-490.
- [10] BILOTTA A, CERONI F, NIGRO E, et al. Efficiency of CFRP NSM strips and EBR plates for flexural strengthening of RC beams and loading pattern influence[J]. *Composite Structures*, 2015, 124: 163-175.
- [11] SHARAKY I A, TORRES L, SALLAM H. Experimental and analytical investigation into the flexural performance of RC beams with partially and fully bonded NSM FRP bars/strips[J]. *Composite Structures*, 2015, 122: 113-126.
- [12] CHENNAREDDY R, TAHA M M R. Effect of combining near-surface-mounted and U-wrap fiber-reinforced polymer strengthening techniques on behavior of reinforced concrete beams[J]. *ACI Structural Journal*, 2017, 114(3): 719-728.
- [13] ABDALLAH M, AL MAHMOUD F, KHELIL A, et al. Assessment of the flexural behavior of continuous RC beams strengthened with NSM-FRP bars, experimental and analytical study[J]. *Composite Structures*, 2020, 242: 112127.
- [14] ELSANADEDY H M, ABBAS H, ALMUSALLAM T H, et al. Hybrid UHPC/NSM CFRP strips vs. traditional systems for flexural upgrading of RC beams: Experimental and FE study[J]. *Composite Structures*, 2021, 261: 113291.
- [15] GONG W K, LI X K, GE Z J, et al. Steel-concrete composite beams strengthened with NSM CFRP systems at the hogging-moment regions[J]. *Engineering Structures*, 2023, 292: 116576.
- [16] RASHEED H A, HARRISON R R, PETERMAN R J, et al. Ductile strengthening using externally bonded and near surface mounted composite systems[J]. *Composite Structures*, 2010, 92(10): 2379-2390.
- [17] 陈德权, 陈强, 范俊. 钢-混凝土组合梁的挠度计算方法研究[J]. *建筑结构*, 2019, 49(8): 85-90.
CHEN Dequan, CHEN Qiang, FAN Jun. Study on deflection calculation method of steel-concrete composite beam[J]. *Building Structure*, 2019, 49(8): 85-90.
- [18] DAN E B, HEINRICH T. Unified procedures for predicting the deflection and centroidal axis location of partially cracked nonprestressed and prestressed concrete members[J]. *ACI Journal Proceedings*, 1982, 79(2): 119-130.
- [19] 樊健生. 钢-混凝土连续组合梁的试验及理论研究[D]. 北京: 清华大学, 2003.
FAN Jiansheng. Experiments and research on continuous composite beams of steel and concrete[D]. Beijing: Tsinghua University, 2003.

(责任编辑 张晓靖; 英文校审 程文华)