

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2017.07.002

复合加固钢筋混凝土梁抗弯性能试验

曹芙波,尹润平,王晨霞

(内蒙古科技大学 土木工程学院,内蒙古 包头 014010)

摘要:对7根钢筋混凝土梁拉区粘贴CFRP,压区粘贴角钢,分析不同加固量和不同加固历史对钢筋混凝土梁抗弯性能的影响;绘制受拉钢筋、CFRP的应力-应变曲线及荷载-挠度曲线。结果表明:CFRP与角钢加固的试验梁极限承载力提高明显,同时,外部加固材料可有效延迟或抑制试件裂缝的开展;对持荷加固和卸荷加固的钢筋混凝土梁,加固材料存在不同程度的应变滞后,且卸荷加固梁的CFRP、角钢利用率明显优于不卸荷加固梁;试验得到的极限承载力计算结果与试验值吻合较好。

关键词:复合加固;抗弯承载力;二次受力;应变滞后

中图分类号:TU375.4

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2017)07-009-10

Experiments on the bending performance of composite reinforced concrete beam

CAO Fubo, YIN Runping, WANG Chenxia

(Institute of Architecture and Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, P.R.China)

Abstract: The effect of different reinforcement quantities and strengthening history on the bending performance of concrete beam was analyzed by pasting CFRP in the tension zone and angle steel in the compressive zone of 7 reinforced concrete beams. The stress-strain curves and the load deflection curves of the steel and the CFRP were obtained. The results show that the ultimate bearing capacity of test beams reinforced by CFRP and angle steel increases significantly, and external reinforcement material can effectively delay or inhibit the development of cracks. For the loading and unloading reinforcement of reinforced concrete beams, there are varying degrees of strain hysteresis in reinforcement materials. And the utilization rate of the CFRP and the angle steel on the unloading reinforced beams is better than that on the no-unloading reinforcement beam. Calculation results of ultimate bearing capacity obtained by experiment agree well with the test values.

Keywords: composite reinforcement; bending bearing capacity; secondary stress; strain lag

收稿日期:2016-12-19

基金项目:包头市科技计划项目(2015X2003-2)。

Supported by the Baotou Science and Technology Plan Projects(2015X2003-2).

作者简介:曹芙波(1976-),男,博士,副教授,主要从事结构检测及加固研究,(E-mail)yinrunping0413@163.com。

包头市某车管所地上两层,为整体现浇混凝土框架结构,由于驾考人数逐年上升,规模已不能满足当前需求。而拆除重建工期较长,决定对此建筑物进行增层改造,即在原结构基础上增加一层。经计算原结构的各主要构件已不能负担增层所带来的“额外”荷载,故需要对此建筑物进行加固维修。在作出加固方案前,一个困难的原因是业主要求在加固维修的同时,要保证此建筑物正常运行。同时,由于此建筑物地板已铺设地暖及各种管道,为了不影响正常驾考和保护原有地板,只能在拉区进行加固。

在实际工程中,加固此类建筑物,为了避免破坏已铺设好的地板,大部分加固方法也只是对拉区进行加固^[1-2],而压区很少进行加固,这样就容易造成超筋梁,这在实际工程中是不允许的^[3]。笔者结合工程实际与传统加固方案,设计适合此类工程的加固方法,为了验证此方案的加固效果,在应用于工程实际前,制作了与此建筑物相同的 7 根普通混凝土梁进行试验研究。

通过查阅相关资料,大部分加固钢筋混凝土梁的试验研究主要是针对无损伤梁^[4-6],但实际工程中的混凝土梁往往存在一定程度的原始损伤或裂缝^[7-9],同时还在继续承受荷载,与试验研究具有一定差异。研究表明,不同加固历史对混凝土梁加固的极限承载力影响较大^[10-13],前期损伤程度越大,加固效果越差。试验分别对比了一次与二次加固梁的加固效果,以此为基础进行了钢筋混凝土梁抗弯承载力计算方法的探究,并用试验结果对文中提出的计算方法进行了验证。

1 试验简介

1.1 试验材料和试件设计

采用 P.O42.5 级水泥;砂为天然河砂,属中砂;水为自来水;混凝土梁设计强度等级 C30,标准立方体养护 28 d 实测平均抗压强度为 32.7 MPa;角钢采用 Q235,尺寸分别为 L50×4、L63×4;CFRP 采用北京凯信建研科技有限公司生产的 CFS-I-300g,配套胶包括底胶和浸渍胶;混凝土梁所有试件采用 HRB400 级钢筋,受拉主筋和受压钢筋分别配置 2 根,直径分别为 20 mm、8 mm,箍筋直径为 8 mm,加密区间距 100 mm,非加密区 200 mm。试验各材料性能见表 1、表 2;试验梁尺寸及配筋见图 1。

表 1 各材料力学性能指标

Table 1 The material mechanics performance index

| 材料 | 直径或 厚度/mm | 屈服强 度/MPa | 极限强 度/MPa | 弹性模 量/GPa |
|------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 钢筋 | 8 | 410 | 515 | 210 |
| | 20 | 443 | 540 | 210 |
| 角钢 | 4 | 310 | 420 | 205 |
| CFRP | 0.167 | 3600 | 4300 | 232 |

表 2 结构胶的力学性能

Table 2 The mechanical properties of structural adhesive MPa

| 抗弯性能 | 抗压强度 | 拉伸剪 切强度 | 正拉粘 结强度 |
|------|------|------------|------------|
| 56.7 | 78.3 | 25.7 | 6.5 |

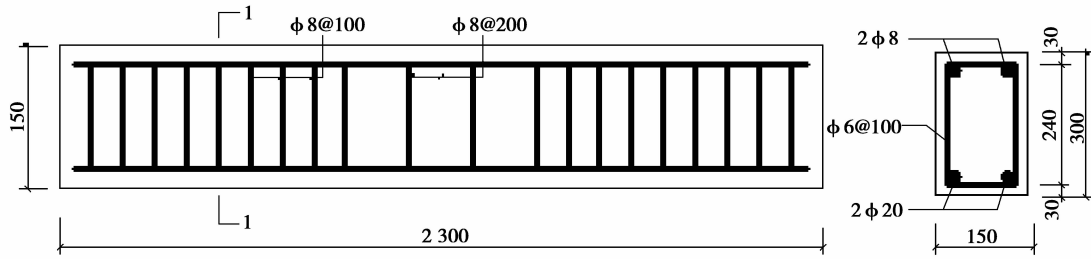


图 1 试件尺寸及配筋(单位 mm)

Fig.1 Specimen size and reinforcement

1.2 加固方案

试验共设计矩形截面简支梁 7 根,尺寸为 150 mm×300 mm×2 300 mm。其中 1 根为未加固对比梁 L-1,L-2 和 L-3 为无损梁加固,L-4、L-5 为卸荷加固后再次加载,而 L-6、L-7 为持荷状态下加固再次加载;所有加固梁都为梁底部粘贴 CFRP 与梁顶侧面粘贴角钢,试件加固方案见表 3。

表 3 试件加固方案

Table3 Specimens reinforced scheme

| 编号 | 加固形式 | CFRP 尺寸/mm ³ | 加载历史 |
|-----|-----------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| L-1 | 未加固 | | 0 |
| L-2 | 拉区粘贴 2 层 CFRP,压区两侧粘贴角钢,角钢为 L50×4。 | | 0 |
| L-3 | 拉区粘贴 2 层 CFRP,压区两侧粘贴角钢,角钢为 L63×4。 | | 0 |
| L-4 | 拉区粘贴 2 层 CFRP,压区两侧粘贴角钢,角钢为 L50×4。 | 2 100×120×0.167 | 加载到 50%P _u 卸荷加固 |
| L-5 | 拉区粘贴 2 层 CFRP,压区两侧粘贴角钢,角钢为 L50×4。 | | 加载到 80%P _u 卸荷加固 |
| L-6 | 拉区粘贴 2 层 CFRP,压区两侧粘贴角钢,角钢为 L50×4。 | | 加载到 50%P _u 持荷加固 |
| L-7 | 拉区粘贴 2 层 CFRP,压区两侧粘贴角钢,角钢为 L50×4。 | | 加载到 80%P _u 持荷加固 |

对于直接抗弯加固的梁在粘贴 CFRP 前,要对粘贴部位进行预先打磨处理以除去表层浮浆,在粘贴 U 型箍的部位把棱角打磨为半径约 20 mm 的圆弧,加固部位水洗后进行丙酮擦拭,待自然风干后涂抹底胶,并将 CFRP 粘贴于加固部位,最后在 CFRP 表面涂刷一层保护胶,使 CFRP 与混凝土梁更好的结合。对于压区混凝土梁两侧粘贴角钢,要预先打磨处理角钢与混凝土粘贴部位,为了防止角钢与混凝土发生黏结滑移破坏,在角钢与混凝土粘贴的同时采用高强螺栓穿过混凝土压区对拉角钢进行锚固。试验梁加固如图 2 所示。

1.3 试验方案

加载装置由反力架、压力传感器以及分配梁等组成,对梁进行两点加载,如图 3 所示。裂缝出现前,每级增量 2 kN;裂缝出现后,每级增量 1 kN。用 TDS-530 高速静态数据采集仪对多通道数据实时采集。

1.4 测点布置及量测内容

每组试件共布置 5 个百分表,用来测量试验梁挠度变化,布置如图 4 所示。受拉钢筋、CFRP 布及角钢重

心距在加载点及跨中对应位置分别粘贴应变片,用来量测加固材料应力-应变曲线,具体粘贴位置见图 4。加载过程中,观察了试件裂缝、荷载及百分表的变化,并记录有关试验现象及裂缝的开展情况。

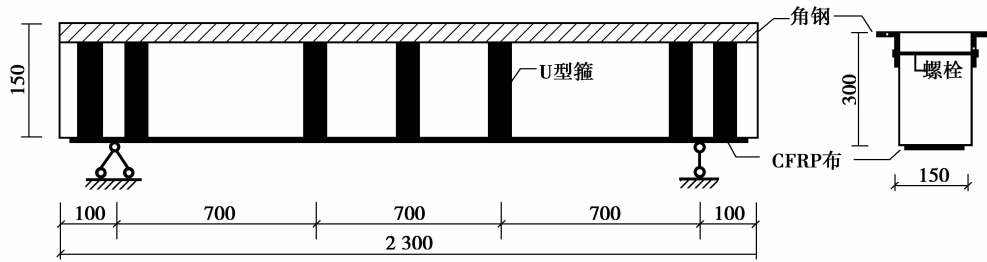


图 2 加固示意图(单位 mm)

Fig.2 Reinforce the way

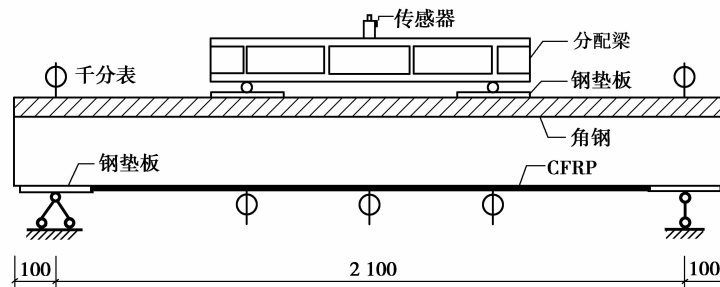


图 3 加载方式示意图

Fig.3 Loading way

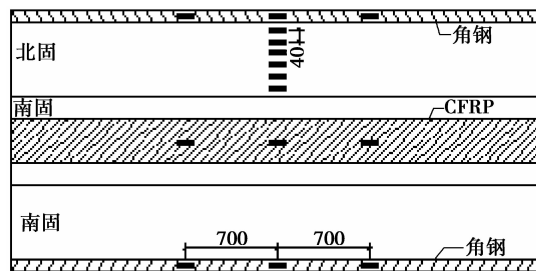


图 4 应变片粘贴位置

Fig.4 Strain gauge paste position

2 试验现象及结果

2.1 破坏形态及裂缝分析

当荷载增至 19.1 kN 时,梁 L-1 纯弯段区首先出现细微的裂缝,荷载持续增加,不断出现新裂缝,且裂缝向上延伸;当钢筋屈服后,裂缝与挠度发展迅速直至破坏,表现为明显的弯曲破坏模式。梁 L-2 在荷载达到 27.9 kN 时裂缝出现,随着荷载的增加,主裂缝周围形成若干细裂缝,并在梁高 1/3 处与主裂缝汇交,当荷载增至 112.1 kN 时,最先出现的主裂缝已贯通整个梁截面,荷载增至 252.7 kN 时,最大裂缝宽度达 0.75 mm,且混凝土梁与 CFRP 结合处开始出现连续的“噼啪”声,相同荷载等级下加固梁裂缝宽度及裂缝平均间距要比 L-1 梁小,说明加固后的混凝土梁可明显延迟或抑制裂缝的开展,梁最终破坏时表现为 CFRP 拉断,压区混

凝土破碎,如图 5 所示。

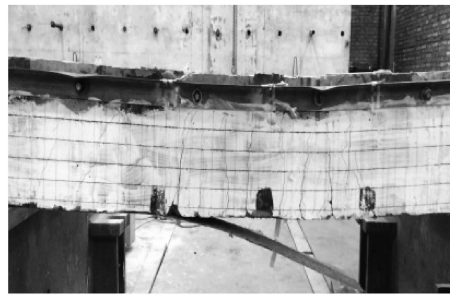
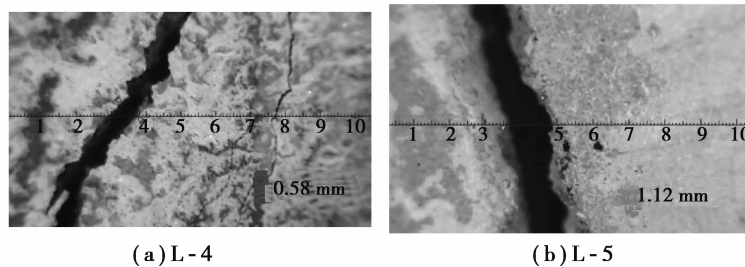


图 5 破坏状态

Fig.5 Damage state

梁 L-5 加固前开裂较严重,二次加载时几乎不产生新的裂缝,随着荷载的增加,原有闭合裂缝变宽且向上延伸,最终破坏时裂缝宽度和高度均大于加固前的最大值,裂缝间距和梁 L-1 基本相同,主要原因是初始裂缝的分布直接影响了加固后应力沿梁分布造成的,但极限荷载比 L-2 降低。梁 L-4 由于加固前损伤程度较轻,梁最终破坏时裂缝宽度及间距与 L-1 相似,极限荷载较 L-2 降幅不大。梁初次加载裂缝宽度见图 6。

梁 L-6、L-7 由于是持荷状态下加固,加固前混凝土与受拉钢筋出现应变“超前”,CFRP 与角钢加固后极限承载力较其它加固梁显著降低,且最终破坏形式为压区混凝土压碎,而 CFRP 没有拉断的破坏模式。



(a)L-4

(b)L-5

图 6 裂缝宽度

Fig.6 Crack width

表 4 试验结果

Table4 The test results

| 编号 | p/kN | P_u/t | f_u/mm | 破坏形态 |
|-----|--------|---------|----------|------------------|
| L-1 | 0 | 192.3 | 17.2 | 压区混凝土压碎 |
| L-2 | 0 | 316.3 | 27.3 | CFRP 拉断,压区混凝土压碎 |
| L-3 | 0 | 324.6 | 26.4 | CFRP 拉断,压区混凝土压碎 |
| L-4 | 0 | 291.9 | 27.8 | CFRP 拉断,压区混凝土压碎 |
| L-5 | 0 | 273.2 | 28.3 | CFRP 拉断,压区混凝土压碎 |
| L-6 | 9.6 | 261.3 | 25.1 | 压区混凝土压碎,CFRP 未拉断 |
| L-7 | 15.4 | 239.6 | 31.2 | 压区混凝土压碎,CFRP 未拉断 |

注: p 为持荷值, P_u 为极限荷载值, f_u 为极限挠度。

2.2 荷载-挠度曲线

由图 7 可知:CFRP 与角钢加固后可有效抑制挠度的发展。加载初期,各试验梁的荷载-挠度曲线相差不大,而二次加载梁,前期损伤程度越小,挠度增加幅度越小;随着荷载的增加,试验梁荷载-挠度曲线开始出现分离;当纵向钢筋屈服后,在同一荷载等级下,梁 L-1 跨中挠度急剧增加,而加固梁由于外部加固材料的作用,挠度增加较缓,说明外部加固材料可有效提高混凝土梁的刚度。

与对比梁 L-1 相比,极限荷载提高幅度显著。其中 L-2、L-3、L-4、L-5、L-6 和 L-7 分别提高了 64.4%、71.5%、50.5%、42.1%、32.3%和 22.6%,说明加固条件相同时,加固历史对梁的承载力影响较大;卸荷与持荷加固梁,前期损伤程度越大,承载力提高幅度越小;对相同损伤程度的梁,持荷条件下加固承载力提高幅度较卸荷时低;且前期损伤程度越大,持荷加固的极限承载力提高幅度越低。

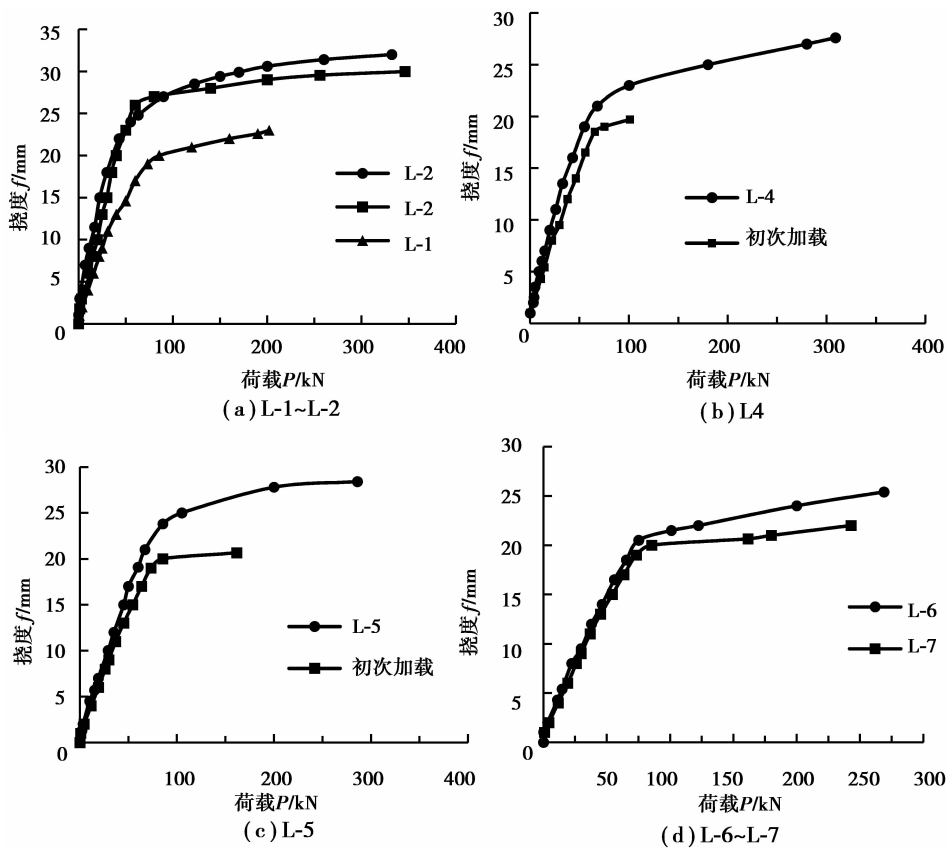
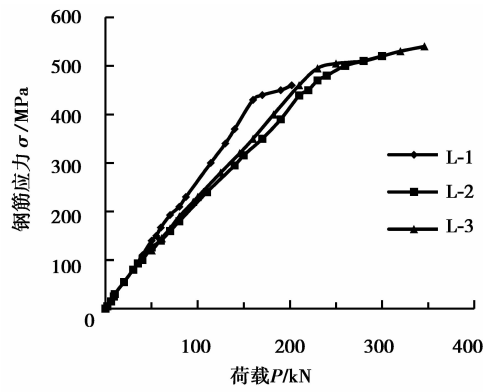


图 7 荷载-挠度曲线

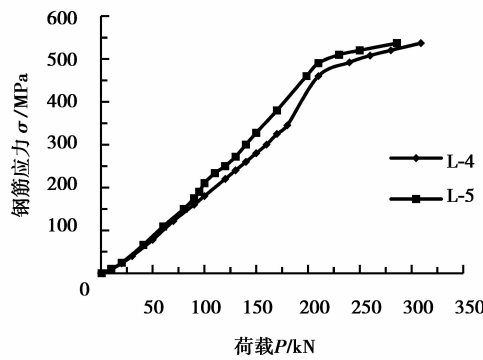
Fig.7 Load deflection curve

2.3 纵向钢筋应力增量

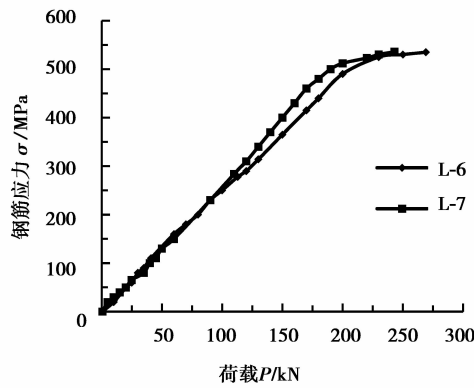
由图 8 可知:荷载为 0~5 kN,梁 L-2 和 L-3 斜率相对其它加固梁较小,说明 CFRP 应变滞后较二次受力梁降低;随着荷载持续增加,钢筋应力增量差距加大;在同一荷载等级下,所有加固梁钢筋应力都小于未加固梁,说明 CFRP 布与角钢复合加固后可有效发挥作用,降低钢筋的应力负担;与持荷加固梁相比,卸荷对混凝土梁加固效果显著;梁 L-6 和 L-7 在粘贴 CFRP 和角钢后,钢筋应力同样增长放缓,说明 CFRP 和角钢承受了部分荷载,致使钢筋承受的应力得到部分分担。但梁 L-7 由于前期损伤程度较大,虽然后期进行了加固,但钢筋应力储备几乎“耗尽”,导致钢筋应力分担能力降低,荷载-应力曲线几乎与 L-1 梁重合;对比同条件下卸荷加固梁 L-5,同一荷载等级下钢筋应力低于对比梁 L-1;说明在实际工程中对已承受荷载的混凝土梁应先卸荷后加固,这样才能充分发挥加固材料的作用。



(a) L-1~L-3



(b) L-4~L-5



(c) L-6~L-7

图 8 钢筋荷载-应力曲线

Fig.8 Reinforcement load stress curve

2.4 CFRP 应力增量

由图 9 所示可知:加载初期,CFRP 布斜率明显小于钢筋荷载-应力曲线,说明对于加固梁而言,外部加固材料 CFRP 有明显的应变滞后;其中试验梁 L-6 和 L-7 加固前已经产生了很大的应力应变,此时粘贴 CFRP 和角钢,本身并不受力,只有再次加载时加固材料才受力。二次受力梁由于前期不同的损伤程度导致 CFRP 相对于钢筋产生了不同的滞后应变,且前期损伤程度越大,滞后应变越严重,在参与梁的受力过程中,发挥的作用就越小,导致最终承载力提高幅度越低。由卸荷梁 L-4 和 L-5 可看出,在同一荷载等级下,前期损伤程度越小,CFRP 承受的应力越大,最终极限承载力提高幅度就越大;对比卸荷与持荷条件下的加固梁,持荷加固梁应变滞后明显大于卸荷加固梁,且持荷荷载越大,CFRP 利用率越低,钢筋混凝土梁最终破坏模式转化为压区混凝土压碎,而外部加固材料没有充分利用的情况。

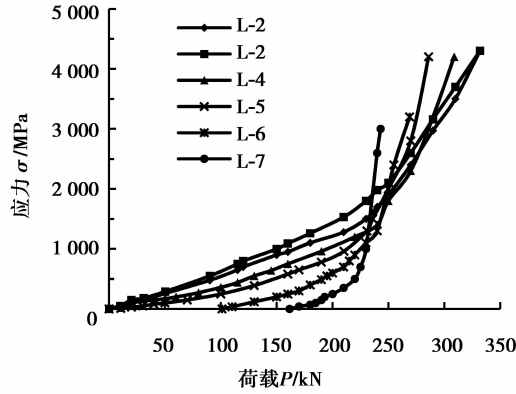


图 9 CFRP 荷载-应力曲线

Fig.9 CFRP load stress curve

3 加固梁抗弯承载力的计算

3.1 直接加固梁抗弯承载力的计算

结合文献[15]正截面极限承载力应符合下列规定:

$$M_u = k_m f_t A_f (h - z_o) + f_y A_s (h_o - z_o) - \partial_1 f_c b x \left(\frac{x}{2} - z_o \right) - f'_y A'_s (a_s - z_o), \quad (1)$$

$$\partial_1 f_c b x + f'_y A'_s + f_{ao} A_{ao} = k_m f_t A_f + f_y A_s, \quad (2)$$

$$k_m = 1.16 - \frac{n_f E_f t_f}{308\,000}, \quad (3)$$

式中: k_m 为碳纤维厚度折减系数; z_o 为角钢重心距, mm; f_t 为碳纤维抗拉强度, MPa; A_f 为碳纤维复合材的截面面积, mm^2 ; f_y, f'_y 为实测受拉钢筋和受压钢筋的抗拉、抗压强度值, MPa; A_s, A'_s 为原截面受拉钢筋和受压钢筋的截面面积, mm^2 ; f_{ao} 为实测角钢抗拉强度值, MPa; A_{ao} 角钢截面面积, mm^2 ; n_f 为碳纤维层数; E_f 为碳纤维弹性模量, MPa; t_f 为碳纤维单层厚度; a_s 为保护层厚度。

3.2 卸荷状态下加固梁抗弯承载力的计算

试验的加固材料与混凝土梁粘结完好, 没有发生界面滑移或剥离破坏。结合试验数据, 推导出滞后应变值和承载力计算采用如下公式:

$$M_u = k_m \varphi_f f_t A_f (h - z_o) + f_y A_s (h_o - z_o) - \partial_1 f_c b x \left(\frac{x}{2} - z_o \right) - f'_y A'_s (a_s - z_o), \quad (4)$$

$$\partial_1 f_c b x + f'_y A'_s + f_{ao} A_{ao} = k_m \varphi_f f_t A_f + f_y A_s, \quad (5)$$

$$\varphi_f = \frac{\frac{0.8 \epsilon_{cu} h}{x} - \epsilon_{cu} - \epsilon_{fo}}{\epsilon_{fu}}, \quad (6)$$

$$\epsilon_{fo} = \frac{a_f M_i}{E_s A_s h_o}, \quad (7)$$

式中: φ_f 为碳纤维强度利用系数; ϵ_{fo} 为碳纤维前期作用弯矩下的滞后应变; ϵ_{cu} 混凝土极限拉应变; ϵ_{fu} 碳纤维极限拉应变; E_s 钢筋弹性模量, N/mm^2 ; a_f 为计算系数, 取 1.19。

3.3 持荷状态下加固梁抗弯承载力的计算

对于持荷加固梁, 应分别计算混凝土能继续承受的压应力和钢筋能继续承受的拉应力, 然后结合式(8)进行计算:

$$M_u = M_1 + \sigma_s A_s (h_0 - z_0) + k_m f_f A_s (h - z_0) - \sigma_c b x \left(\frac{x}{2} - z_0\right) - \sigma'_s A'_s (a_s - z_0), \quad (8)$$

$$x = \frac{\sigma_s A_s + \sigma_f A_f - \sigma_a A_{a0} - \sigma'_s A'_s}{\sigma_c b}, \quad (9)$$

$$\sigma_c = f_c - E_c \frac{\epsilon_{ci}}{2} = f_c - \frac{M_i}{2bh_0^2}, \quad (10)$$

$$\sigma_s, \sigma'_s = f_y - \sigma_{si} = f_y - \frac{M_i}{\gamma_s A_s h_0}, \quad (11)$$

$$\zeta = \frac{\beta_E p_s}{0.2 + 6\beta_E p_s}, \quad (12)$$

式中: σ_c 为试件破坏前压区混凝土继续承受的压应力, MPa; σ_s, σ'_s 为试件破坏前受拉钢筋和受压钢筋继续承受的拉、压应力, MPa; M_i 为持荷弯矩值, N·m; ϵ_{ci} 为持荷状态下受压区边缘混凝土压应变; σ_{si} 为持荷时钢筋拉应力, MPa; E_c 为混凝土弹性模量, N/mm²; γ_s 为截面内力臂长度系数, 取 0.7; β_E 为钢筋与混凝土弹性模量比值; p 为截面配筋率。

3.4 理论结果与试验结果的对比

根据以上推导公式, 计算结果与试验结果见表 5。

表 5 试验值与理论值对比

Table 5 Test value compared with the theoretical value

| 编号 | 试验值/kN | 理论值/kN | 误差/% |
|-----|--------|--------|------|
| L-1 | 192.3 | 202.1 | 4.8 |
| L-2 | 316.3 | 332.5 | 4.9 |
| L-3 | 324.6 | 346.5 | 6.3 |
| L-4 | 291.9 | 309.1 | 5.9 |
| L-5 | 273.2 | 286.3 | 4.8 |
| L-6 | 261.3 | 268.9 | 2.9 |
| L-7 | 239.6 | 244.4 | 2.0 |

由表 4 可知: 计算结果与试验结果的极限荷载值相差较小, 且误差均在 5% 内, 说明文中推导的极限承载力计算公式可较好的应用于 CFRP 和角钢复合加固下的钢筋混凝土梁受弯承载力计算中。

4 结 论

1) 混凝土梁加固后, 极限荷载提高明显; 与 L-1 相比, L-2、L-3、L-4、L-5、L-6 和 L-7 极限荷载分别提高了 64.4%、71.5%、50.5%、42.1%、32.3% 和 22.6%。

2) 二次受力加固梁存在加固材料应变滞后的现象, 随着荷载持续增加, 钢筋应力增量差距加大; 在同一荷载等级下, 所有加固梁钢筋应力都小于未加固梁, 说明 CFRP 布与角钢复合加固后可有效发挥作用, 降低钢筋的应力负担。

3) 对比卸荷与持荷条件下的加固梁, 持荷加固梁应变滞后明显大于卸荷加固梁, 且持荷荷载越大, CFRP 利用率越低。

4) 基于试验数据与理论公式, 建立了复合加固混凝土梁在各条件下加固后的正截面极限承载力计算公式, 结果表明: 计算值与试验值吻合较好, 说明了试验推导公式的准确性。

参考文献:

- [1] 徐凌, 宇翔, 邸振禹. 高效利用 CFRP 加固预裂混凝土梁[J]. 沈阳工业大学学报, 2015, 37(2): 220-222.
XU Ling, YU Xiang, DI Zhenyu. Pre-splitting concrete beams with efficient use of CFRP reinforcement[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2015, 37(2): 220-222. (in Chinese)
- [2] 周建庭, 李志刚, 刘思孟. 二次受力 RC 梁增大截面加固配筋限值研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2015, 34(1): 30-33.
ZHOU Jianting, LI Zhigang, LIU Simeng. Reinforcement Boundary of Steel in the Reinforcing Layer of RC Beam under the Secondary Load[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2015, 34(1): 30-33. (in Chinese)
- [3] 罗素蓉, 吴文达, 陈彪. 二次受力下自密实混凝土加固 RC 梁受弯性能研究[J]. 工程力学, 2015, 32(4): 63-65.
LUO Surong, WU Wenda, CHEN Biao. A study on flexural behavior of RC beams strengthened by self-compacting concrete under secondary load[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(4): 63-65. (in Chinese)
- [4] 中华人民共和国建设部. GB 50010-2002 混凝土结构设计规范[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. GB50010-2010 Design code for concrete structure[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [5] 许峰, 徐礼华, 丁健, 等. 体外预应力 CFRP 筋加固 T 型截面混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(6): 44-47.
XU Feng, XU Lihua, DING Jian, et al. Experimental study on flexural behavior of concrete T-beams strengthened with externally prestressed CFRP tendons[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(6): 44-47. (in Chinese)
- [6] 吴波, 房帅, 冯伟. 采用地聚物粘帖碳纤维布加固混凝土梁试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(1): 111-114.
WU Bo, FANG Shuai, FENG Wei. Experimental study on concrete beams strengthened with carbon fiber sheet using geopolymer[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(1): 111-114. (in Chinese)
- [7] 张智梅, 孙志洋. 内嵌 CFRP 板加固已损伤 RC 梁抗弯性能的试验研究[J]. 四川建筑, 2012, 10(6): 67-71.
ZHANG Zhimei, SUN Zhiyang. Experimental study on the flexural behavior of damaged reinforced concrete beams strengthened with near-surface mounted CFRP laminates[J]. Sichuan Building Science, 2012, 10(6): 67-71. (in Chinese)
- [8] Sundararaja M C, Rajamohan S. Strengthening of RC beams in shear using GFRP inclined strips - An experimental study [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23: 856-864.
- [9] Macdougall C, Green M, Amato L. CFRP tendons for the repair of post-tensioned, unbonded concrete buildings[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2010, 25(3): 149-157.
- [10] 刘高国, 徐德新, 袁崇菊. 低强度钢筋混凝土梁组合加固试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(Sup1): 130-132.
LIU Gaoguo, XU Dexin, YUAN Chongju. Experimental study on combination reinforcement of low strength reinforced concrete beam[J]. Engineering Structure, 2012, 42(Sup1): 130-132. (in Chinese)
- [11] 李翔, 顾祥林. 碳纤维布加固低强度混凝土梁的抗弯承载力[J]. 土木工程学报, 2012, 45(1): 22-29.
LI Xiang, GU Xianglin. Bending bearing capacity of low strength reinforced concrete beam strengthened with carbon fiber composite sheets[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(1): 22-29. (in Chinese)
- [12] 陈东辉, 叶旭, 张力滨. 预应力 CFRP 布加固荷载混凝土梁力学性能分析[J]. 土木工程学报, 2013, 46(Sup1): 320-325.
CHEN Donghui, YE Xu, ZHANG Libin. Research of mechanical properties on loaded concrete beam reinforced with prestressed CFRP sheets[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(Sup1): 320-325. (in Chinese)
- [13] 赵璟. 考虑二次受力的 BFRP 加固钢筋混凝土梁抗弯性能的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
ZHAO Jing. Study on bending behavior of RC beams strengthened with BFRP considering thesecondare loading [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [14] 董江峰, 王清远, 何东, 等. 碳纤维布加固钢筋混凝土梁受力性能的试验研究[J]. 应用力学学报, 2011, 28(5): 523-524.
DONG Jiangfeng, WANG Qingyuan, HE Dong, et al. Experimental research on structural behaviour of RC beams strengthened with CFRP sheets[J]. Chinese Journal of applied mechanics, 2011, 28(5): 523-524. (in Chinese)
- [15] 四川省建筑科学研究院. 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.
Sichuan Institute of building Reserch. GB50367-2013. Design code for strengthen in concrete structure[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2013. (in Chinese).