

超载下预应力 CFRP 布加固腐蚀钢梁抗弯性能试验

侯雯峪, 王连广

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 为研究预应力 CFRP 布加固腐蚀钢梁静载、超载的抗弯性能,进行了 7 根钢梁的抗弯试验,研究了加固梁在静载及超载下的破坏形态、承载力和刚度。结果表明,加固钢梁可以提高钢梁的承载力与刚度,预应力的存在,可以显著提高 CFRP 布的利用率;腐蚀程度影响钢梁的刚度与极限承载力,腐蚀程度增加 1 倍,钢梁的承载力降低 50% 左右。超载次数增加,钢材发生时效硬化,钢梁刚度可提高 13% 左右,但承载力有所降低;超载下,预应力的施加可提高钢梁的延性。建立了预应力 CFRP 布加固腐蚀钢梁的承载力计算公式,理论计算结果与试验结果吻合良好。

关 键 词: 超载;预应力 CFRP 布;腐蚀钢梁;时效硬化;刚度

中图分类号: TU 398

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2018)09-1342-06

Flexural Behavior of Corroded Steel Beams Strengthened with Prestressed CFRP Sheets Under Overloading

HOU Wen-yu, WANG Lian-guang

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: WANG Lian-guang, E-mail: wanglianguang@mail.neu.edu.cn)

Abstract: In order to investigate the flexural behavior of corroded steel beams strengthened with prestressed CFRP sheets under static loading or overloading, the bending tests of seven steel beams were carried out to study the failure mode, bearing capacity and stiffness of the corroded steel beams. The results showed that the CFRP sheets could improve the stiffness and bearing capacity, and adding prestress to the steel beam could remarkably improve the use of CFRP sheets. The corrosion could influence both the stiffness and bearing capacity. The bearing capacity decreased by about 50% when the corrosion degree increased by 1 times. The improvement of the overloading numbers can improve the stiffness by 13% because of the steel's age hardening, but the bearing capacity can reduce. And the prestress can improve the ductility of the steel beam. The formula of ultimate bearing capacity was established, and the calculated results agreed well with the experimental results.

Key words: overloading; prestressed CFRP sheets; corroded steel beam; age hardening; stiffness

钢结构桥梁受到环境等因素的影响易发生腐蚀,导致其承载力与耐久性降低,已有的对钢结构加固的方法有预应力加固、底部焊接或锚固钢板加固、外包钢加固等。近年来,碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)由于质量轻、强度高、耐腐蚀性良好等优点,得到了业界的青睐^[1-3]。加固后的钢结构桥梁由于车流量的增加会处于超载工作状态,根据美国公路运输部

(AASHTO)规定^[4],正常使用极限状态下桥梁构件内部钢筋应力不超过钢筋屈服应力的 0.6,当超过这一限值则视为超载运营。许多专家、学者对 CFRP 材料加固钢结构、超载下的混凝土结构进行了研究^[5-10],但对加固腐蚀钢梁的超载研究很少。本文对预应力 CFRP 布加固腐蚀钢梁的静载、超载的受力性能进行了试验研究,考虑了预应力、超载次数等参数对试件的影响。

收稿日期: 2017-06-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51504125); 辽宁省自然科学基金资助项目(20170540303)。

作者简介: 侯雯峪(1987-),女,辽宁本溪人,东北大学博士研究生;王连广(1964-),男,辽宁鞍山人,东北大学教授,博士生导师。

1 试验概况

1.1 试件制作

试验中共制作 7 根受弯试验构件. 其中, 1 根为对比钢梁, 3 根为静载作用的加固腐蚀钢梁, 3 根为超载作用的加固腐蚀钢梁. 试件长 1.6 m, 计算长度 1.5 m, CFRP 布的粘贴长度为 1.3 m. 用钢梁下翼缘切除宽度的百分比来模拟钢梁的腐蚀程度. CFRP 布沿钢梁下翼缘受拉区长度方向粘贴, 并在 CFRP 布的两端采用 100 mm 宽的 U 型箍进行锚固. 试件的几何尺寸, 见图 1. 试件的主要参数, 见表 1.



图 1 试件几何尺寸及加固方式 (mm)
Fig. 1 Dimension of the specimens and strengthened method

表 1 试件的设计参数
Table 1 Parameters of specimens

试件编号	预应力度/%	腐蚀程度/%	超载幅值	超载次数	CFRP 层数
SB0	—	50	—	—	—
CFSB1	13	50	—	—	1
CFSB2	—	50	—	—	1
CFSB3	13	100	—	—	1
CFSB4	—	50	0.7P _u	100	1
CFSB5	13	100	0.7P _u	100	1
CFSB6	13	50	0.7P _u	100	1

注: P_u 为试件的极限承载力.

1.2 材料性能

钢梁采用 I14 号工字钢, 其屈服强度与极限抗拉强度分别为 256, 423 MPa. CFRP 布的主要力学性能, 见表 2.

表 2 CFRP 布的主要力学性能
Table 2 Mechanical properties of CFRP sheet

厚度/mm	宽度/mm	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa
0.167	50	3 456	2.5 × 10 ⁵

1.3 预应力的施加

施加预应力的装置, 见图 2. 将 CFRP 布粘贴在工字钢两端的固定钢板上, 再将可移动钢板放在固定钢板上并用 4 个螺栓与固定钢板锚固; 调整装置中的螺杆使其两端高度一致, 将 CFRP 布

撑起并处于紧绷状态; 通过螺杆升起高度来确定预应力大小, 并在 CFRP 布上贴应变片确保预应力施加准确, 当达到设定预应力时, 停止扭动螺帽.

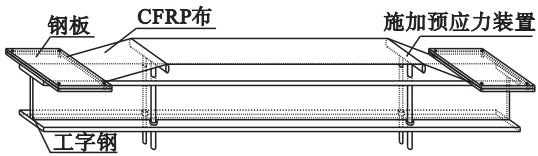


图 2 施加预应力装置
Fig. 2 Equipment for prestressing CFRP sheet

1.4 加载方案

在 5 MN 压力机上分别进行超载与静载试验, 超载加载过程采用荷载控制, 需要在压力机上分别设定荷载的上下限及超载次数; 静载加载过程采用分级单调加载. 试验加载装置, 见图 3.

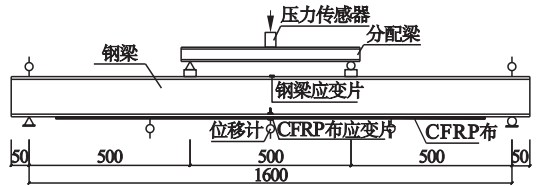


图 3 加载装置图 (mm)
Fig. 3 Loading device of experiment

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

对比试件 SB0: 在荷载作用的初始阶段, 试验构件的变形很小; 当加载到 30% P_u 左右时, 钢梁的下翼缘屈服; 当加载到 70% P_u 左右时, 钢梁的上翼缘屈服; 当加载到 136.6 kN 时, 钢梁的上翼缘失稳, 试件发生破坏; 钢梁破坏时, 下翼缘切口宽度由原来的 3 mm 扩展到 7 mm, 见图 4a.

试件 CFSB1 ~ CFSB3 (静载试件): 加载的初始阶段, 试验构件变形均较小, CFRP 布与钢梁均处于弹性受力工作阶段; 当加载到 35% P_u 左右时, 钢梁下翼缘屈服; 当加载到 65% P_u ~ 85% P_u 时, 钢梁上翼缘屈服; 荷载达到 95% P_u 左右时, CFRP 布接连有清脆声音发出, 继续加载, 试件破坏. 破坏时, 试件 CFSB1 的 CFRP 布与钢梁下翼缘部分剥离、拉断, 下翼缘切口宽度由原来的 2 mm 扩展为 6 mm; 试件 CFSB2 的部分 CFRP 布断裂, 钢梁上翼缘失稳, 下翼缘切口宽度由原来的 2 mm 扩展到 3.1 mm; 试件 CFSB3 的部分 CFRP 布剥离, 钢梁下翼缘断裂, 下翼缘切口宽度由原来的 2.5 mm 扩展到 18 mm, 并且深入腹板 30 mm. 试件的破坏形态, 见图 4b ~ 图 4d.

试件 CFSB4 ~ CFSB6(超载试件):试件均超载 100 次,最后一次加载,加载的初始阶段,试验构件变形均较小,CFRP 布与钢梁均处于弹性受力工作阶段;荷载达到 55% P_u 左右时,钢梁下翼缘屈服;荷载达到 70% P_u ~ 85% P_u 时,钢梁上翼缘屈服;荷载达到 95% P_u 左右时,CFRP 布接连发出清脆响声;继续加载,试件破坏.破坏时,试件 CFSB4 的钢梁上翼缘失稳,下翼缘切口宽度由原来的 1.5 mm 扩展到 4.2 mm;试件 CFSB5 的 CFRP 布拉断,下翼缘切口宽度由原来的 4.4 mm 扩展到 11.5 mm,并且深入腹板 24 mm;试件 CFSB6 的 CFRP 布拉断,下翼缘切口宽度由原来的 2.7 mm 扩展为 5 mm.试件的破坏形态,见图 4e ~ 图 4g.

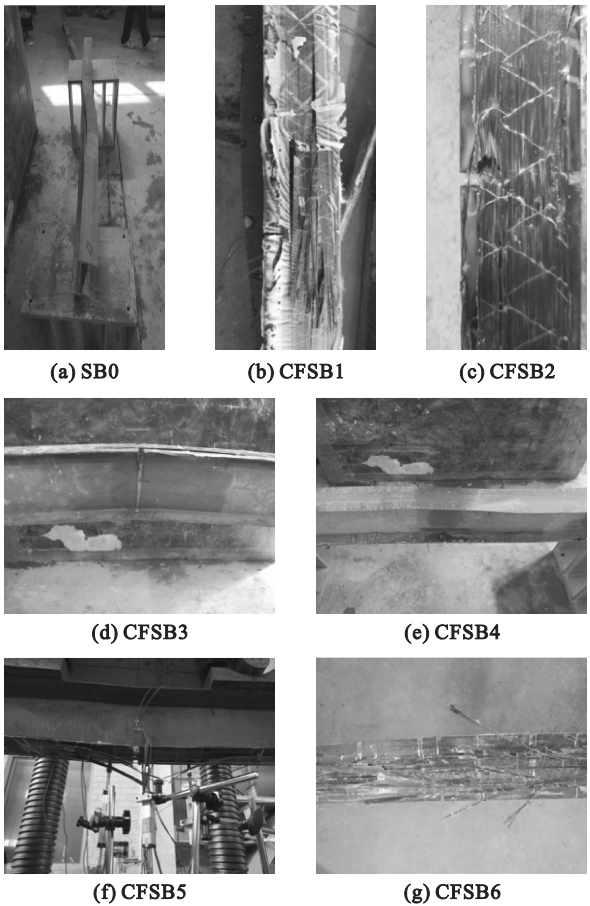


图 4 试件破坏图

Fig. 4 Failure patterns of specimens

2.2 参数影响

图 5 ~ 图 10 是由试验得到预应力 CFRP 布加固腐蚀钢梁在静载、超载作用下的变形随荷载发展的曲线.由图可知,曲线呈初始直线、弹塑性微弯及强化直线三个阶段.在加载初期,曲线呈线性增长趋势,初始直线段结束后,变形增加速度加快,试验构件的刚度降低,曲线出现微弯曲段,加

固钢梁处于弹塑性工作状态,持续加载,曲线继续呈线性增长.

1) CFRP 布加固的影响,见图 5.由图可知,在荷载作用的初始阶段,试件 SB0 与 CFSB2 的刚度相差不大,继续加载至初始直线段结束前,试件 CFSB2 的刚度比 SB0 提高 19.5%,最终其极限荷载比 SB0 提高 15.8%.说明,CFRP 布可以充分发挥其高强度作用,明显提高试件的刚度与极限承载力.

2) 腐蚀程度的影响,见图 6.由图可知,腐蚀程度从试件加载的初始阶段影响就较大,腐蚀程度为 50% 的试件 CFSB1 的刚度比腐蚀程度为 100% 的试件 CFSB3 提高 55.6%,极限荷载比 CFSB3 提高 58.7%.说明,钢梁的腐蚀程度增加 1 倍,试件的刚度与极限承载力均可降低 50% 左右.

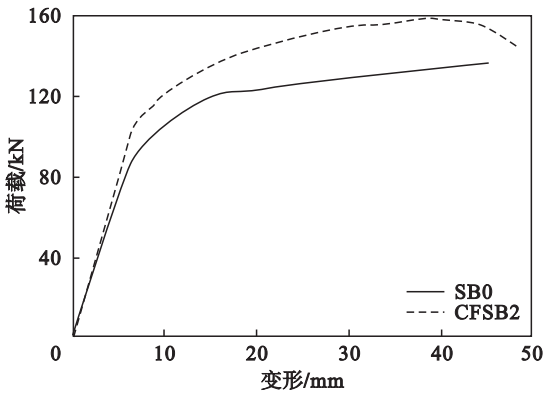


图 5 CFRP 布加固的影响

Fig. 5 Influence of strengthening with CFRP sheets

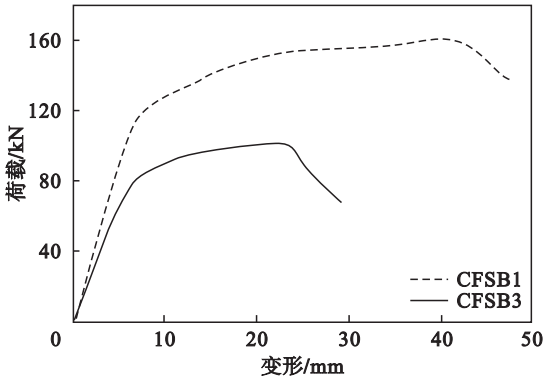


图 6 腐蚀程度的影响

Fig. 6 Influence of corrosion

3) 预应力的影响.从图 7 可以看出,荷载作用的初始阶段,预应力已经开始发挥作用了,试件 CFSB1 的刚度比 CFSB2 提高 16.1%,极限荷载比 CFSB2 提高 1.1%.说明,预应力在加载的初始阶段已经发挥作用,其对刚度有着较大的影响,但对极限承载力影响较低.

4) 超载次数的影响,见图 8. 由图可知,由于 CFSB6 进行超载 100 次,钢材发生时效硬化,所以曲线在初始直线段结束前,试件 CFSB6 的刚度比 CFSB1 提高 13.2%,极限荷载比 CFSB1 降低 5.4%. 说明,超载次数的增多,试件的刚度会有所提高,但极限承载力会有一定程度的降低.

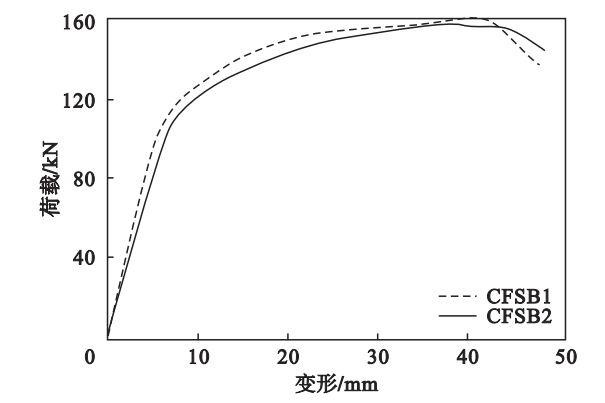


图 7 预应力的影响
Fig. 7 Influence of prestress

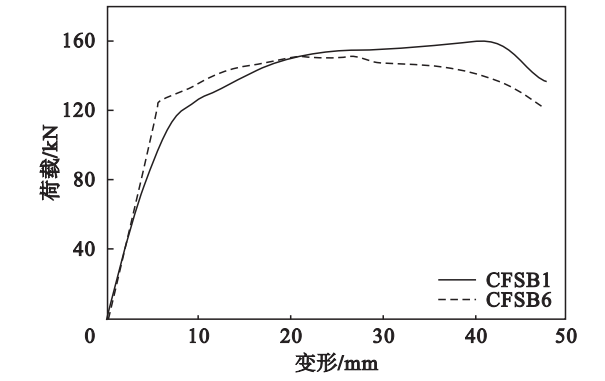


图 8 超载次数的影响
Fig. 8 Influence of overloading number

5) 超载下预应力的影响. 从图 9 可以看出,初始直线段结束前,试件 CFSB6 的刚度比 CFSB4 提高 2.7%,极限荷载比 CFSB4 提高 1.6%. 说明,预应力对超载一定次数的试件的刚度与极限承载力有着比较小的影响,但施加预应力的试件 CFSB6 的延性有明显提高.

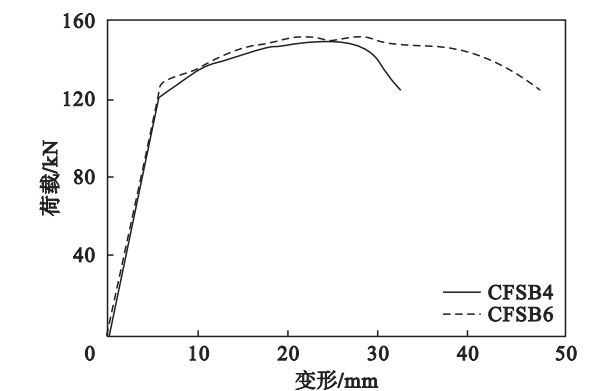


图 9 超载下预应力的影响
Fig. 9 Influence of prestress under overloading

6) 超载下腐蚀程度的影响. 从图 10 可以看出,腐蚀程度小的试件 CFSB6 的刚度比 CFSB5 提高 83.1%,极限荷载比 CFSB5 提高了 59.8%. 说明,超载一定次数的试件的腐蚀程度增加 1 倍,其刚度与极限承载力可降低 50% 以上.

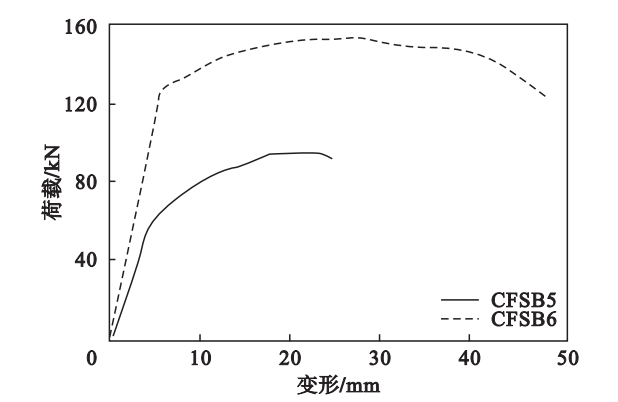


图 10 超载下腐蚀程度的影响
Fig. 10 Influence of corrosion under overloading

2.3 应变分析

1) CFRP 布和钢梁的下翼缘应变. CFRP 布和钢梁的下翼缘的应变随荷载发展的曲线,见图 11. 在加载初期曲线呈线性增长,当加载到静载作用下试件的 30% P_u ~ 36% P_u (试件 SB0 为 30% P_u ,试件 CFSB1 为 33% P_u ,试件 CFSB2 为 34% P_u ,试件 CFSB3 为 36% P_u),超载作用下试件的 55% P_u ~ 57% P_u (试件 CFSB4 为 57% P_u ,试件 CFSB5 为 55% P_u ,试件 CFSB6 为 55% P_u)时,钢梁下翼缘屈服. 说明,超载一定次数,钢材发生时效硬化,下翼缘的屈服强度有所提高. 继续加载,试件 CFRP 布的荷载与应变关系曲线出现拐点,随后应变增加速率加快. 预应力 CFRP 布的最大拉应变为 1.7×10^{-4} 左右,接近其极限拉应变,而非预应力 CFRP 布的最大拉应变约为 1.0×10^{-4} . 说明施加预应力能够有效提高 CFRP 布的利用率.

2) 钢梁上翼缘的应变. 钢梁上翼缘的应变随荷载发展的曲线,见图 11. 在加载初期曲线呈线性增长,当加载到静载作用下试件的 65% P_u ~ 85% P_u (试件 SB0 为 70% P_u ,试件 CFSB1 为 70% P_u ,试件 CFSB2 为 66% P_u ,试件 CFSB3 为 72% P_u),超载作用下试件的 70% P_u ~ 85% P_u (试件 CFSB4 为 83% P_u ,试件 CFSB5 为 70% P_u ,试件 CFSB6 为 84% P_u)时,钢梁上翼缘屈服,此时曲线出现拐点. 说明,超载一定次数,钢材发生时效硬化,上翼缘的屈服承载力有所提高.

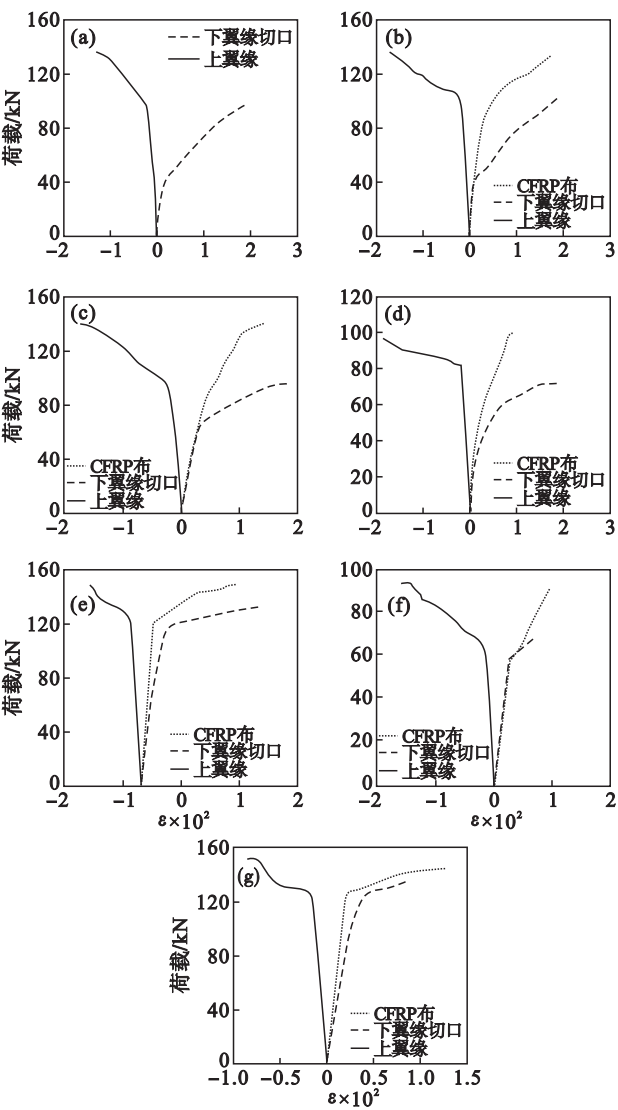


图 11 试件的荷载与应变关系曲线
Fig. 11 Relationship between load and strain

(a)—SB0; (b)—CFSB1; (c)—CFSB2;
(d)—CFSB3; (e)—CFSB4; (f)—CFSB5; (g)—CFSB6.

3 承载力计算

根据试验研究,以及钢梁的内力平衡,可得加固腐蚀钢梁的承载力 M_u 为

$$M_u = f_y t_w (h - t_y - x) [(h - x - t_y) / 2 + x + z] + f_y A_s (h - z_1 - z) + E_f \varepsilon_f A_f (h - z).$$

式中: f_y 为钢材的抗拉强度设计值; t_w, t_y 分别为钢梁腹板、翼缘的厚度; x 为钢梁受压区高度; z, z_1 为钢梁腹板受压区及钢梁上翼缘形心高度; h 为钢梁截面高度; A_s, A_f 分别为钢梁下翼缘及 CFRP 布的截面面积; E_f 为 CFRP 布的弹性模量; ε_f 为 CFRP 布拉应变。

根据上述承载力计算公式,得到极限荷载的理论值与试验值对比结果,见表 3。

表 3 理论结果与试验结果对比
Table 3 Comparisons between theoretical and experimental results

试件编号	P_u^c/kN	P_u^e/kN	P_u^c/P_u^e
SB0	139.1	136.6	1.018
CFSB1	152.7	160	0.954
CFSB2	152.7	158.2	0.965
CFSB3	102.1	100.8	1.012
CFSB4	152.7	149.4	1.022
CFSB5	102.1	95	1.074
CFSB6	152.7	151.8	1.006

注: P_u^c 和 P_u^e 分别为极限荷载理论计算值和试验值。

由表 3 可见,公式计算的承载力理论值与试验值符合较好,两者之比的平均值、标准差、变异系数分别为 1.007,0.039,0.038,说明计算公式是可靠的,可以用于实际工程计算。

4 结 论

- 1) 预应力 CFRP 布加固腐蚀钢梁在静载及超载下的荷载与变形关系曲线均呈现初始直线、弹塑性微弯及强化直线三个阶段. 试件破坏模式主要有钢梁失稳破坏、CFRP 布拉断、CFRP 布拉断并且钢梁失稳及 CFRP 布与钢梁部分分离 4 种形式。
- 2) 静载作用下,钢梁加固后,刚度与极限承载力分别提高了 19.5% 与 15.8%; 腐蚀程度小的钢梁的刚度与极限承载力比腐蚀程度大的钢梁分别提高 55.6% 与 58.7%; 施加预应力可提高钢梁的刚度. 超载作用下,超载次数的增加,钢材发生时效硬化,能够将刚度提高 13.2%; 施加预应力可提高钢梁的延性; 腐蚀程度小的钢梁的刚度与极限承载力比腐蚀程度大的钢梁分别提高 83.1% 与 59.8%。

- 3) 超载一定次数后,钢材发生时效硬化,钢梁的上、下翼缘的屈服承载力均有所提高并且施加预应力能够有效提高 CFRP 布的利用率。
- 4) 建立了加固腐蚀钢梁的抗弯承载力公式,计算结果与试验结果吻合良好,计算公式是合理的,可用于实际工程计算。

参考文献:

[1] Ahmed M K. Flexural performance of RC beams strengthened with near surface mounted CFRP strips [J]. Alexandria Engineering Journal, 2016, 55 (2): 1497 – 1505.
[2] 霍君华,王连广,张海伏,等. 预应力 CFRP 布加固腐蚀钢梁试验研究[J]. 建筑结构学报,2015, 36 (11): 72 – 77.

(Huo Jun-hua, Wang Lian-guang, Zhang Hai-fu, et al. Experimental research on prestressed CFRP sheets strengthened corroded steel beams [J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(11) : 72 – 77.)

[3] Aidoo J, Harries K A. Fatigue behavior of CFRP strengthened reinforced concrete bridge girders [J]. *Journal of Composites in Construction*, 2004, 6(7) : 501 – 518.

[4] 辛济平, 万国朝, 张文, 等. 美国公路桥梁设计规范 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1994: 43 – 44.
(Xin Ji-ping, Wan Guo-chao, Zhang Wen, et al. Bridge design manual [M]. Beijing: China Communication Press, 1994: 43 – 44.)

[5] Colombi P, Poggi C. Strengthening of tensile steel members and bolted joints using adhesively bonded CFRP plates [J]. *Construction and Building Materials*, 2006, 20(1) : 22 – 33.

[6] Schnerch D. Strengthening of steel structures with high modulus carbon fiber reinforced polymer (CFRP) materials [D]. Raleigh: North Carolina State University, 2005: 123 – 132.

[7] Kim Y J, Harries K A. Fatigue behavior of damaged steel beams repaired with CFRP strips [J]. *Engineering Structures*, 2011, 33(5) : 1491 – 1502.

[8] Tomas S, Juozas V. Design method for calculating load-carrying capacity of reinforced concrete beams strengthened with external FRP [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 50(15) : 577 – 583.

[9] Tavakkolizadeh M, Saadatmanesh H. Fatigue strength of steel girders strengthened with carbon fiber reinforced polymer patch [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(2) : 186 – 196.

[10] 孙晓燕, 徐冲, 王海龙, 等. CFRP 加固前后桥梁构件超载疲劳试验研究 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2012, 46(9) : 1585 – 1591.
(Sun Xiao-yan, Xu Chong, Wang Hai-long, et al. Overloading simulation fatigue experiment of bridge member with and without CFRP reinforcement [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2012, 46(9) : 1585 – 1591.)

(上接第 1341 页)

3) 搅拌强度对浮选机内部混合区和分离区固相体积分数分布影响较大, 上升区影响较小; 相同搅拌强度条件下, 混合区和上升区各相体积分数与其粒径呈正比关系, 分离区呈反比关系。

参考文献:

[1] 沈政昌. 浮选机理论与技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012: 1 – 40.
(Shen Zheng-chang. Principle and technology of flotation machine [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012: 1 – 40.)

[2] Koh P T L, Schwarz P, Zhu Y, et al. Development of CFD models of mineral flotation cells [C] // Proceedings of the 3rd International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries. Melbourne, 2003: 171 – 175.

[3] Sarhan A R, Naser J, Brooks G. CFD simulation on influence of suspended solid particles on bubbles' coalescence rate in flotation cell [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2016, 146: 54 – 64.

[4] Abdel-Halim S, Fayed H, Ragab S. CFD simulation of a Dorr-Oliver flotation cell [C] // Proceedings of the SME Annual Meeting and Exhibit. Denver, 2011.

[5] Wang G C, Nguyen A V, Subhasish M, et al. A review of the mechanisms and models of bubble-particle detachment in froth flotation [J]. *Separation and Purification Technology*, 2016, 170: 155 – 172.

[6] Meng J, Erico T, Xie W G, et al. A review of turbulence measurement techniques for flotation [J]. *Minerals Engineering*, 2016, 95: 75 – 95.

[7] Wang A, Yan X K, Wang L J, et al. Effect of cone angles on single-phase flow of a laboratory cyclonic-static micro-bubble flotation column: PIV measurement and CFD simulations [J]. *Separation and Purification Technology*, 2015, 149: 308 – 314.

[8] Shi S X, Zhang M, Fan X S, et al. Experimental and computational analysis of the impeller angle in a flotation cell by PIV and CFD [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2015, 142: 2 – 9.

[9] Manjunath B, Sanja M. Investigation of gas dispersion characteristics in stirred tank and flotation cell using a corrected CFD-PBM quadrature-based moment method approach [J]. *Minerals Engineering*, 2016, 96: 161 – 184.

[10] 沈政昌, 陈建华. 浮选机流场模拟及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 10 – 60.
(Shen Zheng-chang, Chen Jian-hua. Flotation machine flow field simulation and its application [M]. Beijing: Science Press, 2012: 10 – 60.)

[11] 牛福生, 王学涛, 张晋霞. 颗粒粒径对浮选机固 – 液两相流场分布特征影响研究 [J]. 中国矿业, 2016, 25(10) : 138 – 141.
(Niu Fu-sheng, Wang Xue-tao, Zhang Jin-xia. Influence of particle size on the flow characteristics for solid liquid two phases in flotation machine [J]. *China Mining*, 2016, 25(10) : 138 – 141.)

[12] Ferziger J H. Computational methods for fluid dynamics [M]. 3rd ed. Beijing: World Book Inc, 2012: 20 – 50.