

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201706090



PSJ 加固 T 形 RC 梁钢板箍 有效预应力的计算方法

王超¹, 刘阳^{1,2}, 陈海¹, 郭子雄^{1,2}, 陈大琅¹

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 华侨大学 福建省结构工程与防灾重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: 为确定不同加固阶段预应力钢板箍(PSJ)的有效预应力计算方法,对加固过程中和加固之后 PSJ 的实际应变进行监测.通过对原型试件加固过程的监测,提出螺栓预紧扭矩和 PSJ 有效应变之间的关系.对 10 个加固后的 PSJ 进行 200 h 的应变监测,研究不同预应力水平下 PSJ 应变随时间的变化规律.研究结果表明:预应力水平较低时,PSJ 有效应力随时间有一定波动,预应力未出现明显衰减;预应力水平较高时,PSJ 有效预应力随时间衰减,最大衰减比为 35%.

关键词: 预应力钢板箍; T 形梁; 有效预应力; 预应力损失

中图分类号: TU 375.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2018)03-0360-05

Calculation Method for Effective Prestress of PSJ Strengthening T-Shaped RC Beams

WANG Chao¹, LIU Yang^{1,2}, CHEN Hai¹,
GUO Zixiong^{1,2}, CHEN Dalang¹

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Key Laboratory for Structural Engineering and Disaster Prevention of Fujian Province,
Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to develop the calculation method of the effective prestress of prestressed steel jackets (PSJ), the experiment to monitor the strain of PSJ during and after the strengthening was carried out. The relationship between the prestress torque of the anchor bolt and the effective strain of PSJ was proposed based on the experimental data during the strengthening. The strain of 10 PSJ in 200 hours was also monitored after strengthening, to investigate the relationship between the PSJ strain and time for different prestress levels. It is indicated that; for the low prestress level, the effective stress doesn't obviously degrade, only fluctuates with the time; for the high prestress level, the effective stress degrades with the time, the maximal degradation ratio is 35%.

Keywords: prestressed steel jacket; T-shaped beam; effective prestress; prestress loss

由于工程结构的加固需求,使得钢筋混凝土(RC)梁的抗剪加固越来越受重视.近年来,国内外学者对梁的加固进行大量的试验研究. Panigrahi 等^[1]对玻璃纤维增强材料(GFRP)加固 T 形梁的抗剪性能

收稿日期: 2017-06-30

通信作者: 刘阳(1982-),男,副教授,博士,主要从事工程结构抗震减灾研究. E-mail: lyliuyang@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2014J05061, 2015J01208); 福建省高校青年自然科学基金重点项目(JZ160410)

开展试验研究;林于东等^[2]研究了粘贴 U 形钢板箍加固普通钢筋混凝土梁的抗剪性能;郭子雄等^[3]对闭合预应力钢丝绳加固 RC 梁的抗剪性能开展试验研究;文献[4-6]分别考虑碳纤维增强材料(CFRP)配置率和 CFRP 加固长度对 RC 梁抗剪承载力的影响;荀勇等^[7]对织物增强混凝土加固 RC 梁的斜截面抗剪承载力展开研究.为进一步改进加固技术的效率^[8-12],本文提出预应力钢板箍(PSJ)加固技术,探讨螺栓预紧扭矩和 PSJ 有效应变之间的关系及不同预应力水平下 PSJ 应变随时间的变化规律.

1 钢板箍应变分布情况

试验所用钢板箍由 U 形箍板与端部带直螺纹的钢筋焊接而成,钢板箍的细部构造和布置,如图 1 所示. PSJ 由钢板箍、倒角垫片、套筒垫片与套筒组成,通过扭矩扳手旋紧套筒对钢板箍施加预应力.加工精度与施工误差均可能造成螺杆拉力偏离箍板轴线,最终形成附加弯矩使得钢板箍截面应变非均匀分布,如图 2 所示.图 2 中: F_t 为拉力; T 为施加扭矩; $q(x)$ 为拉应力; e 为偏心距;

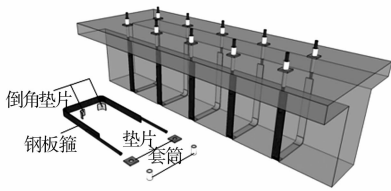


图 1 PSJ 加固 T 形梁示意图
Fig. 1 T-beam strengthened with PSJ

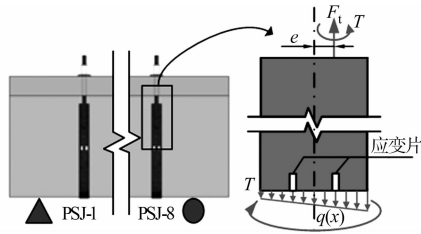
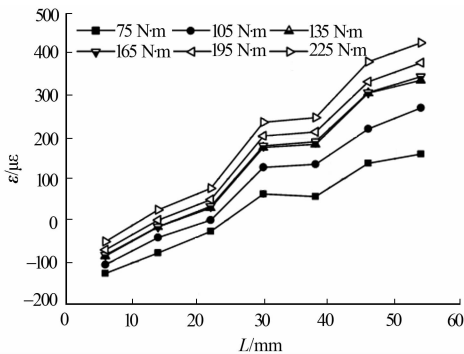
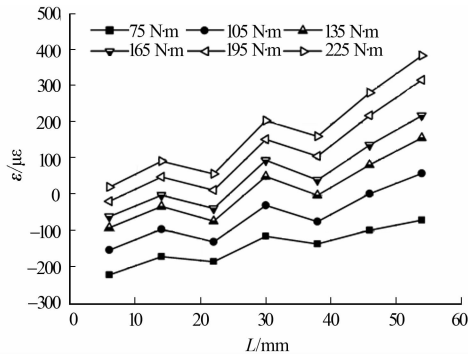


图 2 钢板箍受力示意图
Fig. 2 Forces applying on PSJ

为明确钢板箍截面的应力分布情况,在钢板箍 PSJ-1,PSJ-2 中部沿 U 形箍板宽度方向等间距粘贴 7 个电阻应变片.对钢板箍顶端分别施加 75,105,135,165,195,225 N·m 扭矩,实时量测钢板箍截面的应变(ϵ)随钢板箍宽度(L)变化的分布情况,如图 3 所示.



(a) PSJ-1



(b) PSJ-2

图 3 箍板应变沿箍板宽度变化情况
Fig. 3 Strain along jacket width of PSJ

由图 3 可知:由于钢板箍的初始缺陷,造成钢板箍安装完成后在箍板中部呈拱形,使得在预应力加载初期,箍板和 T 形梁未严密贴合,造成钢板箍初始量测结果为负值;随着施加预应力水平的增加箍板的应变也随着增大,且沿着箍板截面呈线性变化,其试验结果和理论分析相吻合.由此,取钢板箍两侧箍板中部对称放置两个电阻应变片的平均应变代替整个箍板截面应变的合理性得到验证.

2 钢板箍预应力施加试验

为明确对套筒所施加扭矩与最终有效预应力的关系,试验分为两个阶段:1) 预应力施加阶段,主要量测不同扭矩与钢板箍应变的关系;2) 预应力施加完成阶段,主要监测箍板预应力随时间的发展规律.在不同预应力水平下,进行 200 h 的应变监测,以明确施加预应力后钢板箍预应力的损失情况.

2.1 试验概况

试验参数为套筒扭矩施加值和钢板箍预应力水平, T 分别为 60,120,180,240,300,360 N·m.其

中,套筒扭矩施加值由钢板箍截面应变(ϵ)表示;钢板箍预应力水平由预应力度(α)表示, α 为加固时,对钢板箍张拉产生的应变与屈服应变的比值^[10].

2.2 试验材料

钢板箍钢材力学性能指标,如表 1 所示.表 1 中: D 为钢板箍厚度; d 为螺杆直径; f_y 为屈服强度; f_u 为峰值强度; E_s 为初始弹性模量; ϵ_y 为屈服应变;钢板箍采用 Q235B 级普通碳素钢.

表 1 钢材材料性能
Tab. 1 Mechanical properties of steel

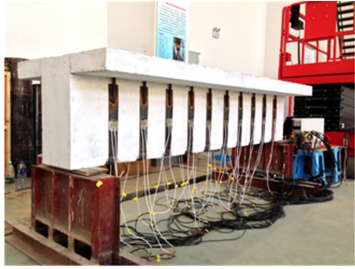
钢材类型	f_y /MPa	f_u /MPa	E_s /TPa	$\epsilon_y/\mu\epsilon$
钢板箍($D=4\text{ mm}$)	316	461	0.206	1 533
螺杆($d=16\text{ mm}$)	450	590	0.200	2 250

2.3 钢板箍安装及量测

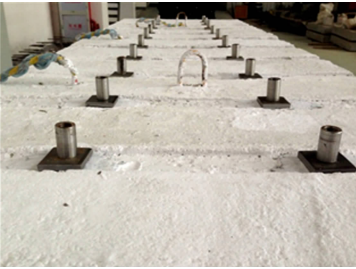
钢板箍加固有如下 3 个步骤.1) RC 板钻孔及梁底倒角.为防止梁底部角部的局部应力集中,对梁底部角部进行倒角处理,并粘贴倒角垫片以减小局部摩擦.2) 箍板就位.由梁底将钢板箍上所焊接的钢筋穿过孔洞,并向上提升使钢板箍与梁表面贴合,在板顶放置套筒垫片,初步拧紧套筒.3) 预应力施加.用两个扭矩扳手同时旋紧同一箍板两侧的套筒,提升钢板箍以实现预应力的施加.图 4 为施工步骤.



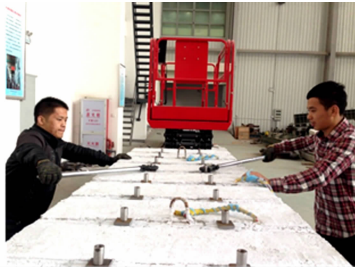
(a) 倒角处理



(b) 钢板箍就位



(c) 初步固定



(d) 施加预应力

图 4 PSJ 加固 T 形梁实施步骤

Fig. 4 Procedure of T-beam strengthened with PSJ

在 PSJ 的 U 形箍板每侧各对称放置 2 个电阻应变片,对钢板箍预应力施加过程及预应力施加完成后,腹板两侧箍板的竖向应变进行监测,如图 5 所示.试验数据均由 DH3816N 数据采集仪记录,前 2 h 采集频率为 $1\text{次}\cdot\text{s}^{-1}$,之后,2 h 后采集频率为每 3 min 采集 1 次.

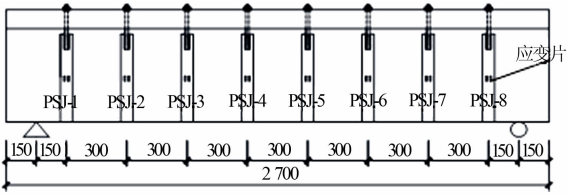


图 5 应变测点布置

Fig. 5 Strain gauge locations

2.4 施加扭矩与对应应变的关系

在钢板箍完成安装,通过数显扭矩扳手对钢板箍施加预应力.为明确对套筒所施加扭矩与等效预应力的关系,试验采用预应力钢板箍加固技术(图 1),在加固过程中对 T 状态下对应的钢板箍应变(ϵ)进行量测,对应关系如图 6 所示.

由图 6 可知:在不同扭矩作用下,对应的应变呈一定的离散性;随着扭矩的增加,对应应变的离散性也随着增加,但施加扭矩与对应应变之间基本呈正相关.通过对边界离散点与全部离散点分别作线性拟

合,可得到 $\epsilon_{\max}(T)$, $\epsilon_{\text{nom}}(T)$, $\epsilon_{\min}(T)$ 共 3 条直线,它们的相关系数(R^2)分别为 0.945 7,0.601 6,0.942 9,表现出良好的拟合相关性.各表达式分别为

$$\epsilon_{\max} = 2.50T + 61.25, \tag{1}$$

$$\epsilon_{\text{nom}} = 1.90T - 77.18, \tag{2}$$

$$\epsilon_{\min} = 1.18T - 170.33. \tag{3}$$

采用式(2)计算钢板箍扭矩和对应应变的关系.

3 钢板箍预应力损失监测

3.1 应变损失监测结果

以剔除异常点后的钢板箍截面平均应变作为预应力随时间衰减的依据.钢板箍预应力施加完成后,钢板箍应变(ϵ)随时间(t)衰减规律,如图 7 所示.图 7 中:图 7(a)为图 7(b)虚线区域的放大图.由图 7 可知:在完成预应力施加后的初期(约 10 min),各钢板箍应变发生较为显著的降低,其衰减幅值约为总衰减量的 40%;在之后 200 h 的预应力损失监测中,钢板箍应变相对稳定,文中取预应力施加后 200 h 的预应力度作为有效预应力度 α_e 的取值.

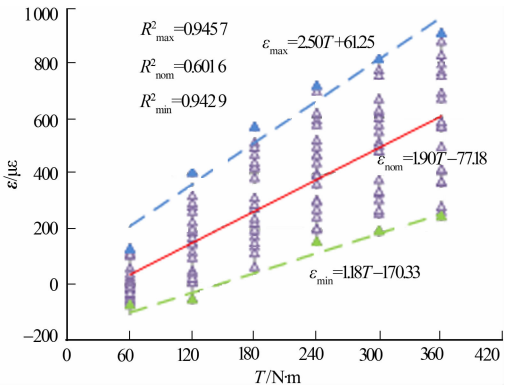
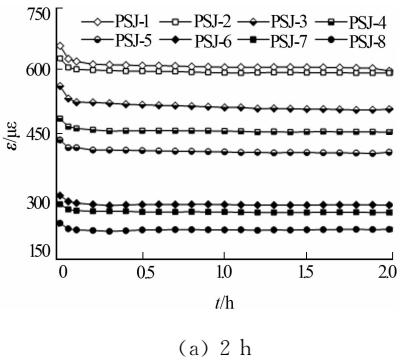


图 6 扭矩-应变关系曲线

Fig. 6 Torque-strain curves

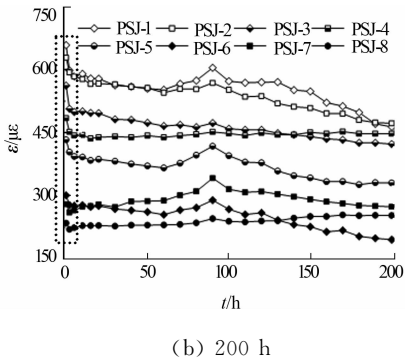


图 7 PSJ 应变-时间关系曲线
Fig. 7 Strain-time curves of PSJ

钢板箍应变损失结果,如表 2 所示.表 2 中: ϵ_0 为钢板箍初始应变; σ_0 为钢板箍初始应力; α_0 为钢板箍初始预应力度; σ_{200} 为 200 h 钢板箍的应力; α_{200} 为 200 h 钢板箍预应力度.预应力度衰减量 $\Delta=\alpha_{200}-\alpha_0$,反映了 200 h 后预应力的损失情况;预应力衰减比 $\delta=\Delta/\alpha_0$.由表 2 可知:预应力度平均衰减量 $\bar{\Delta}$ 约为 0.06,平均衰减比 $\bar{\delta}$ 为 16.4%.

表 2 预应力钢板箍应变
Tab. 2 Strain of PSJ

试件	$\epsilon_0/\mu\epsilon$	σ_0/MPa	α_0	σ_{200}/MPa	α_{200}	Δ	$\delta/\%$
PSJ1	660	136	0.43	96	0.30	0.13	30.2
PSJ2	631	130	0.41	97	0.31	0.10	24.4
PSJ3	563	116	0.37	87	0.28	0.09	24.4
PSJ4	485	100	0.32	92	0.29	0.03	9.4
PSJ5	432	89	0.28	68	0.22	0.06	21.4
PSJ6	301	62	0.20	40	0.13	0.07	35.0
PSJ7	282	58	0.18	56	0.18	0	0
PSJ8	233	48	0.15	52	0.17	-0.02	-13.3

3.2 有效预应力计算公式

综合上述,施加扭矩与钢板箍应变的关系、钢板箍应力应变关系和预应力损失规律,可推导施加扭矩与对应有效预应力的关系.结合式(2)和 PSJ 预应力度的定义计算式为

$$\alpha_0 = E \cdot \epsilon_0 / f_y = 6.52 \times 10^{-4} \cdot (1.90T - 77.18). \tag{4}$$

式(4)中: E 为钢板箍弹性模.

结合表 2 数据得,各试件初始预应力度(α_0)与预应力度衰减比(δ)的关系曲线,如图 8 所示,其线性回归方程为

$$\delta = 133.4\alpha_0 - 27. \tag{5}$$

综合式(2),(4)及(5),PSJ 有效预应力度与扭矩的关系为

$$\alpha_e = -2.05 \times 10^{-6} T^2 + 1.74 \times 10^{-3} T - 0.067. \tag{6}$$

4 结 论

- 1) 施加扭矩与钢板箍截面应变分布满足线性关系,可以由钢板箍截面上粘贴两个应变片的平均应变来代替整截面的应变分布.
- 2) 钢板箍在完成预应力施加的初期衰减较快,衰减量约为总衰减量的 40%,之后,趋于平稳.
- 3) 基于对钢板箍应变的监测,得出施加扭矩与有效预应力度的关系式.据此式,由预应力度求其所需施加的扭矩,也可由扭矩反算其有效预应力度,实现在实际工程中对预应力度较为便捷的控制.

参考文献:

[1] PANIGRAHI A K,BISWAL K C,BARIL M R. Strengthening of shear deficient RC T-beams with externally bonded GFRP sheets[J]. Construction and Building Materials,2014,57(5): 81-91. DOI:10. 1016/j. conbuildmat. 2014. 01. 076.

[2] 林于东,宗周红,陈宏磊. 粘钢加固混凝土梁受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2011,32(8): 90-98. DOI:10. 14006/j. jzjgxb. 2011. 08. 011.

[3] 郭子雄,杨军民,叶勇,等. 闭合预应力钢丝绳加固 RC 梁抗剪性能试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2015, 46(7):2590-2597. DOI:10. 11817/j. issn. 1672-7207. 2015. 07. 028.

[4] BOUSSELHAM A,CHAALLAL O. Behavior of reinforced concrete T-beams strengthened in shear with carbon fiber-reinforced polymer-an experimental study[J]. Aci Structural Journal,2006,103(3):339-347.

[5] BOUSSELHAM A,CHAALLAL O. Effect of transverse steel and shear span on the performance of RC beams strengthened in shear with CFRP[J]. Composites Part B Engineering,2006,37(1):37-46. DOI:10. 1016/j. compos- itesb. 2005. 05. 012.

[6] LEE H K,CHEONG S H,HA S K, *et al.* Behavior and performance of RC T-section deep beams externally strengthened in shear with CFRP sheets[J]. Composite Structures,2011,93(2): 911-922. DOI:10. 1016/j. comp- struct. 2010. 07. 002.

[7] 荀勇,尹红宇,肖保辉. 织物增强混凝土加固 RC 梁的斜截面抗剪承载力试验研究[J]. 土木工程学报,2012,45(5): 58-64. DOI:10. 15951/j. tmgcxb. 2012. 05. 019.

[8] 郭子雄,曾建宇,黄群贤,等. 预应力钢板箍加固 RC 柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2012,33(11):124-131. DOI:10. 14006/j. jzjgxb. 2012. 11. 015.

[9] 郭子雄,张杰,李传林. 预应力钢板箍加固高轴压比框架柱抗震性能研究[J]. 土木工程学报,2009,42(12):112-117. DOI:10. 15951/j. tmgcxb. 2009. 12. 020.

[10] 郭子雄,吴毅彬,曾建宇. 预应力钢板箍加固 RC 短柱抗剪承载力试验研究[J]. 工程力学,2010,27(3):138-144.

[11] 黄群贤,郭子雄,赖有泉,等. 一种钢筋混凝土桥梁与桥面板的新型加固装置: 中国,201310201050[P]. 2016-01-06.

[12] 陈大琅. 预应力钢板箍加固 T 形 RC 梁抗剪性能试验研究[D]. 厦门:华侨大学,2016.

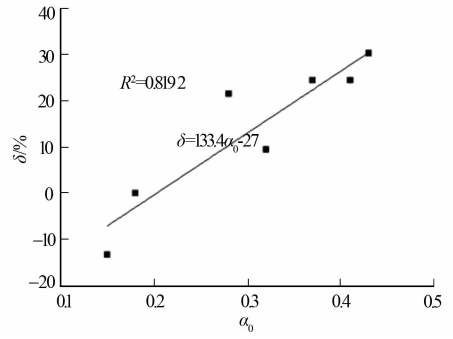


图 8 初始预应力度与
预应力度衰减比的关系
Fig. 8 Relationship between
initial prestress level and
prestress degradation ratio

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)