

文章编号:1671-6833(2011)04-0004-04

损伤状态下混凝土梁钢板加固试验研究

张哲, 张龔, 赵卓

(郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要:为研究受损钢筋混凝土梁采用粘贴钢板加固方法后承载力的变化, 制作了2根混凝土梁试件。首先将试验梁加载开裂至正常损伤状态并测量对应的最大裂缝宽度, 然后将其中一根梁按照规范设计方法进行加固处理, 随后对试验梁进行抗弯承载力试验。在试验中通过采集应变、挠度和裂缝宽度等数据, 综合评价钢板加固方法的效果。并通过比较各种材料应变随荷载的发展曲线, 分析钢筋应变与钢板应变变化协同关系, 验证平截面假定是否成立, 最后通过各规范所提供的设计方法, 将计算结果与试验结果进行对比分析。结果证明: 粘贴钢板加固方法对提高受损钢筋混凝土梁的抗弯承载力具有显著效果, 加固梁相对于未加固梁承载力提高58.2%; 通过试验数据与规范计算结果的对比, 可认为现有设计方法具有一定的安全性。研究内容和结果可以为规范公式的使用提供理论依据, 也为实际工程钢板加固设计和施工提供参考。

关键词: 抗弯承载力; 混凝土梁; 钢板; 加固; 应变; 平截面假定

中图分类号: TU746.3

文献标志码: A

0 引言

由于混凝土材料的特点和优点, 其在土木工程领域的使用非常普遍, 其中, 混凝土梁桥结构在桥梁结构中也占有重要地位。但是, 由于设计、施工的缺陷, 或者结构使用过程中的损伤、劣化以及灾害影响, 导致混凝土梁桥结构可能出现各种病害, 将影响到结构的可靠性。对于受损的梁桥结构, 如果能够研究其损伤规律, 结合科学的评估方法, 并采取适当的加固处理措施, 可使结构在一定程度上恢复原有的可靠度, 延长其使用寿命^[1], 这样做无疑具有较大的社会效益和经济效益。

目前, 国内外对混凝土结构加固补强的方法包括: 加大截面法、粘贴纤维复合材法、粘贴钢板法等。其中, 粘钢加固法是以结构胶作为胶粘剂, 在混凝土构件表面粘结一定厚度的钢板, 使之与原结构形成整体协同受力, 从而提高结构承载力及变形能力的一种方法。与其它几种加固方法相比, 粘贴钢板加固方法具有施工周期短, 有效提高构件刚度和抗裂能力等优点^[2]。对于粘贴钢板加固技术的研究成果可以总结如下:

Solomon^[3]采用外粘钢板加固素混凝土受弯

梁取得成功, 这是该技术的首次应用。R. Jones^[4]、R. K. L. Su^[5]、L. Alex^[6]、B. B. Adhikary 等^[7]分别通过试验和理论推导的方法研究了粘贴钢板加固试验梁的破坏形式、延性特征, 并分析粘结剂厚度和钢板厚度等因素对加固梁抗弯和抗剪强度的影响。国内方面, 黄勤等^[8]通过计算及试验对比研究, 对粘钢加固受力机理、强度、刚度等一系列指标进行研究。吴耀辉等^[9]通过试验探讨分析粘贴滑移、破坏状态、锚固长度等性能指标。刘祖华等^[10]采用弹性塑性梁理论及有限元法对粘钢加固梁进行分析。

目前我国针对外粘钢板加固的设计规范有GB50367^[11]、JTG/TJ122^[12], 但其中仍有一些问题需进一步研究, 如规范中没有给定控制构件变形和裂缝开展的措施, 对计算方法的研究现在还处于探讨阶段。

1 钢板加固荷载试验

1.1 试验方案

本次试验制作了2根普通钢筋混凝土试验梁, 编号为SRB-1和SRB-2。试验梁截面尺寸均为200 mm × 400 mm × 3 800 mm, 混凝土强度

收稿日期: 2011-02-08; 修订日期: 2011-04-19

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51008284)。

作者简介: 张哲(1977-), 男, 河南南阳人, 郑州大学讲师, 博士, 主要从事结构工程方面的研究。

等级为 C30. 为模拟实际使用过程中可能存在的损伤状态,首先对 2 片试验梁进行损伤模拟,在试验设备上使其受力开裂,裂缝开展至正常使用极限损伤状态所允许的最大裂缝宽度,卸载后对 SRB-2 进行加固处理. 拟通过加固梁 SRB-2 与未加固梁 SRB-1 的对比试验,观察钢板加固方法的效果,并全程测量混凝土、钢板的应变变化和梁的裂缝、挠度发展情况,并验证平截面假定.

依据 GB50367,钢筋混凝土结构构件加固设计时相对界限受压区高度为加固前的 0.9 倍,且正截面承载力提高幅度不超过 40%. 笔者按承载力提高 40% 设计加固方案,在梁底粘贴 4 mm 厚的 Q235 钢板,宽度为 110 mm,沿梁底通长布置. 同时布置 U 型钢板箍,避免受剪破坏先于受弯破坏.

1.2 试件材料及几何尺寸实测结果

试验梁中纵筋采用安阳钢铁股份有限公司生产的 B18, 根据 GB/T228^[13], 对其力学性能和物理性能进行检测, 结果如下: 强度标准值 $f_{yk} = 426.3 \text{ MPa}$, 极限强度 $f_{uk} = 596.3 \text{ MPa}$, 弹性模量 $E_s = 2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$. 混凝土采用 C30 商品混凝土, 振捣方式为人工振捣, 混凝土材性具体指标: $f_{cu,k} = 43.3 \text{ MPa}$, $f_{c,28} = 28.95 \text{ MPa}$, $f_{t,28} = 2.78 \text{ MPa}$, $E_c = 3.31 \times 10^4 \text{ MPa}$. 所采用的 Q235 级钢板的主要性能为: 极限强度 $f_{uk} = 450 \text{ MPa}$, 屈服强度 $f_y = 335 \text{ MPa}$, 伸长率为 36%. 所采用的结构加固用胶粘剂的各项强度指标经检测均满足要求.

1.3 试验装置

本次试验采用三分点加载, 利用 $5 \times 10^5 \text{ N}$ 手动液压千斤顶及反力架施加荷载, 采用压力传感器控制加载的大小. 试验数据除百分表人工读数外, 其它均用 CM-2B 静态应变测量仪自动采集. 为避免混凝土试验梁的局部受压破坏, 加载点及支座处垫宽 200 mm, 厚 20 mm 左右的钢板.

试验中主要测量的数据包括: (1) 在跨中及跨中两边各 1/4 处钢板、钢筋的纵向受拉应变; (2) 梁顶面跨中混凝土压应变; (3) 梁跨中截面等间距的混凝土应变; (4) 梁跨中挠度; (5) 梁裂缝宽度等.

本次试验拟定如下破坏准则: (1) 受拉主钢筋应力达到屈服强度, 受拉应变达到 0.01 或受拉主钢筋拉断; (2) 受拉主钢筋最大垂直裂缝宽度达到 1.5 mm; (3) 挠度达到计算跨度的 1/50; (4) 受压区混凝土压坏; (5) 碳纤维拉断; (6) 结构胶脱粘; (7) 钢板受拉应变达 0.01 或拉断.

1.4 试验现象及结果

1.4.1 SRB-1 试验梁

首先, 将 SRB-1 试验梁压至正常使用极限损伤状态, 并对试验梁的裂缝情况进行全面的观测, 发现在纯弯段出现弯曲裂缝, 裂缝宽度大约为 0.2 mm. 卸载后, 重新加载进行破坏试验, 得到的荷载挠度曲线及破坏形态分见图 1 和图 2.

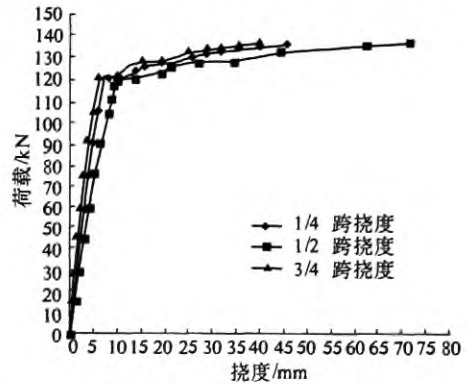


图1 SRB-1 荷载-挠度曲线

Fig.1 The load-deformation curve of SRB-1



图2 SRB-1 破坏形态

Fig.2 The failure mode of SRB-1

SRB-1 跨中荷载挠度曲线如图 1 所示, 其破坏过程分为 2 个阶段. 第 1 阶段为带裂缝工作阶段, 在此工作阶段, 试验梁截面裂缝不明显, 随着荷载的增加, 裂缝条数增多, 宽度、高度也逐渐变大, 挠度、钢筋应变、混凝土应变的变化均呈线性特征. 在接近钢筋屈服时, 上述各参数表现出的非线性发展趋势. 此时认为试验梁达到了屈服弯矩 $M_y = 75.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$.

第 2 阶段为破坏阶段, 梁纵向受力钢筋屈服以后, 试验梁跨中挠度、钢筋及混凝土应变变化速率加快. 临近破坏荷载时, 钢筋应变急剧发展, 在钢筋屈服的位置形成一条宽度较大且向梁顶发展的临界裂缝, 最后, 当梁受弯弯矩增加到极限弯矩 $M_u = 81.4 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 时, 试验梁破坏, 其破坏形态如图 2 所示. 破坏时, 裂缝高度为 370 mm, 裂缝宽度

$\delta_{\max} = 1.50\text{ mm}$, 跨中挠度 $f = 23.27\text{ mm}$, 混凝土的压应变 $\varepsilon = 1.268 \times 10^{-3}$.

1.4.3 SRB-2 试验梁

对 SRB-2 试验梁进行的破坏试验得到的荷载-挠度曲线和破坏形态见图 3 和图 4.

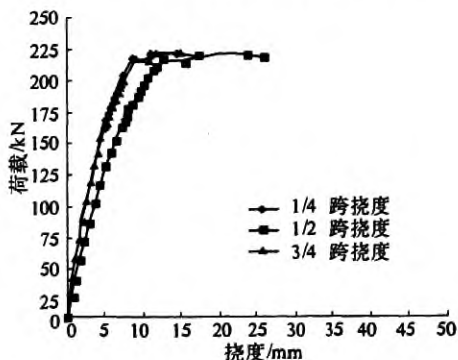


图 3 SRB-2 跨中荷载-挠度曲线

Fig.3 The load-deformation curve of SRB-2

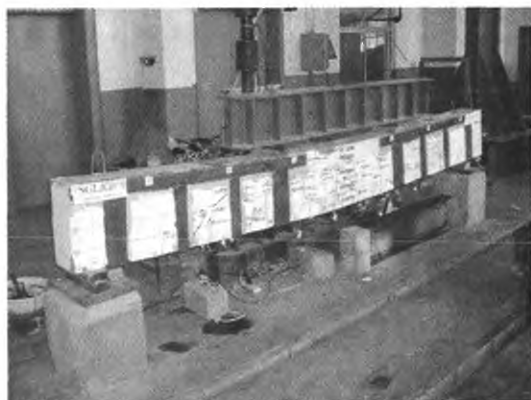


图 4 SRB-2 破坏形态

Fig.4 The failure mode of SRB-2

SRB-2 的破坏过程可分为 2 个阶段. 第 1 阶段为带裂缝工作阶段, 在受力初期, 试验梁挠度发展, 钢筋、混凝土、钢板应变随荷载的增长呈线性特征. 钢筋与钢板共同受力, 随着荷载的增大, 裂缝数目增加、宽度及高度也逐渐增大, 在接近钢筋屈服前, 其裂缝等间距分布齐全, 钢筋、混凝土、钢板应变发展稳步增加, 裂缝基本沿老裂缝发展.

第 2 阶段为破坏阶段, 受力钢筋屈服后, 试验梁挠度、钢筋、混凝土及钢板应变随荷载变化曲线发生较大转折, 此时, 钢筋应力增加较小而应变变化较快. 钢板与混凝土试验梁一起工作, 裂缝处拉力大部分由钢板承受. 最后, 当钢板应变超过拉应变极限值时, SRB-2 试验梁达到极限弯矩, 此时, $M_u = 128.8\text{ kN} \cdot \text{m}$. 其破坏形态如图 4 所示. 最终试验梁的裂缝宽度 $\delta_{\max} = 1.00\text{ mm}$, 跨中挠度 $f = 17.06\text{ mm}$, 混凝土的压应变 $\varepsilon = 1.580 \times 10^{-3}$,

钢板的最大拉应变 $\varepsilon > 0.01$.

观察混凝土梁的跨中截面不同高度的平均应变在加载过程中的变化情况可知, 当荷载从 0 ~ 90 kN 时, 在整个横截面内, 混凝土、钢筋、钢板的应变按直线变化, 较好地符合平截面假定. 随荷载进一步增加, 在钢筋达到屈服之前, 钢板应变变化与钢筋应变变化较协同, 故从开始受力到钢板屈服, 整个构件近似符合平截面假定. 当钢板屈服后, 钢板应变急剧增加, 试验梁破坏. 但从整个破坏过程来看, 钢板加固试验梁采用平截面假定是可以接受的.

2 试验结果分析

试验梁的屈服弯矩和极限弯矩等试验结果汇总如表 1 所示.

表 1 试验梁试验结果

Tab.1 Test results

试件 编号	屈服 弯矩/ (kN · m)	极限 弯矩/ (kN · m)	裂缝 宽度/ mm	跨中 挠度/ mm
SRB-1	75.3	81.4	1.5	21.06
SRB-2	121.7	128.8	1.0	15.33

根据规范 GB50367 和 JTG/T J12, 计算得到 SRB-2 的极限弯矩分别为 128.8 kN · m 和 129.3 kN · m. 通过与表 1 的试验结果进行对比, 可以得到下述结论.

(1) 钢板加固方法能够有效提高损伤状态下梁的承载力, SRB-2 相对于 SRB-1 的承载力提高 58.2%. 承载力提高幅度超过了原设计方案, 原因在于, 设计过程中采用 Q235 加固钢板的设计强度, 而钢板的实测强度远高于设计强度. 挠度及裂缝方面方面, 采取加固措施的 SRB-2 均小于未加固梁, 说明钢板加固措施能够提高受弯构件的抗弯刚度及抗裂能力.

(2) JTG/TJ122 计算承载力 M_u 略大于正常使用极限损伤状态下加固梁的试验结果. 按 GB50367 计算承载力 M_u 数值上和钢板加固试验梁的极限承载力几乎一致. 说明基于规范 GB50367 和 JTG/T J12 的设计方法, 具有一定的合理性和安全性.

(3) 由试验现象分析可知, 钢板的应变与钢筋接近, 说明在设计和分析过程中采用平截面假定是可以接受的.

3 结论

(1)通过加固梁与未加固梁的对比试验,观察分析了粘贴钢板加固方法的加固效果,全程测量记录了混凝土、钢板的应变变化和梁的裂缝、挠度发展情况,认为钢板加固方法在提高承载力、构件刚度和抗裂性能方面均具有较好的效果。

(2)研究钢板加固试验梁的试验现象,并重点分析钢筋应变与钢板应变关系,认为两者变化较协同,平截面假定基本接受。

(3)通过规范设计结果与试验值的对比,认为现有规范在对钢板加固的梁承载力计算方面具有较为合理和安全的估值。

笔者研究内容和结论可为实际工程加固设计计算及应用提供实际参考和理论依据。

参考文献:

- [1] 黄兴棟,田炜,王永维. 建筑物鉴定加固与增层改造[M]. 北京:北京中国建筑工业出版社,2008:65-78.
- [2] 李文盛. 粘钢加固钢筋混凝土梁的试验研究与理论分析[D]. 武汉:武汉理工大学土木工程与建筑学院,2002
- [3] SOLOMON S K, SMITH D W, CUVEN A R. Flexural tests of steel-concrete-steel Sandwiches [J]. Magazine of Concrete Research. 1976, 28(94):1320-1328.
- [4] JONES R, SWAMY R N, ANG T H. Under and over reinforced concrete beams with glued steel plates[J]. The international Journal of cement composites and light weight concrete. 1982; 4(1):1932-1940.
- [5] SU R K L, SIU W H, SMITH S T. Effects of bolt-plate arrangements on steel plate strengthened reinforced concrete beams [J]. Engineering Structures, 2010,32(6): 1769-1778.
- [6] ALEX L, TCHAO A, YVES D. Influence of the adhesive thickness and steel plate thickness on the behaviour of strengthened concrete beams [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2000, 14(13): 1639-1656.
- [7] ADHIKARY B B, MUTSUYOSHI H. Artificial neural networks for the prediction of shear capacity of steel plate strengthened RC beams [J]. Construction and Building Materials, 2004, 18(6): 409-417.
- [8] 黄勤. 粘钢加固钢筋混凝土梁受力机理的研究[D]. 上海:同济大学土木工程学院,1996.
- [9] 吴耀辉. 粘钢加固梁的试验研究[D]. 徐州:中国矿业大学建工学院,1997.
- [10] 刘祖华,朱伯龙. 粘钢加固梁的解析分析[J]. 同济大学学报:自然科学版,1994,22(1):21-26.
- [11] 中华人民共和国建设部. GB 50367—2006. 混凝土结构加固设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [12] 中华人民共和国交通运输部. JTG/T J22—2008. 公路桥梁加固设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2008.
- [13] 中华人民共和国. GB 228—2002. 金属材料室温拉伸试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2002.

Experiment Research on Damaged Concrete Beams Reinforced by Steel Plate

ZHANG Zhe, ZHANG Yan, ZHAO Zhuo

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To study the reinforcement effect and the flexural capacity changing of damaged concrete beams, two concrete beams were made. Firstly, they were bended to be cracked, then one of them was reinforced by steel plate according to standard. By the jack and reaction frame, two beams were tested to failure. During the tests, the strains of concrete, rebar and steel plate were recorded, as well as the crack and deformation of beams. Based on the test data, the strengthening effects were assessed comprehensively. Comparing the strain of rebars and steel plates, plane hypothesis was verified. Finally, the test results were compared with the values from various standards. From the research results, sticking steel plate can improve bearing capacity effectively by 50%, and the design methods in standards possess reasonable security. The research content and results can provide the theoretical basis for the using of design formulas, and they can be used as reference for the practical strengthening project.

Key words: bending bearing capacity; concrete beam; steel plate; reinforcement; strain; plane hypothesis