

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.01.015

锚贴钢板加固锈蚀钢筋混凝土梁试验研究

彭建新, 李 炬, 唐 皇, 张建仁

(长沙理工大学桥梁安全控制省部共建教育部重点实验室, 长沙 410114)

摘 要:为了研究锈蚀钢筋混凝土梁采用钢板锚贴加固后的力学性能,设计了 12 根钢筋混凝土梁,以设计锈蚀率为 10% 进行电化学快速锈蚀。在锚贴钢板加固前进行预压试验,裂缝宽度控制为 0.2 mm。按保护层厚度分为 3 组,每组 1 根对比梁,其余 3 根分别按钢板厚度 3、4、5 mm 进行锚贴钢板加固。加载对比试验研究表明:锚贴钢板加固锈蚀钢筋混凝土梁的跨中截面应变基本符合平截面假定,正常使用性能得到明显改善,且极限承载力亦有明显提高。锚贴钢板有效地减小了锈蚀钢筋混凝土梁的裂缝宽度和裂缝延伸高度,在相同保护层和锈蚀率相近时,钢板厚度增加 3~5 mm 导致其挠度减小,且减小幅度为 13%~51%。保护层厚度对加固梁的极限承载力影响不明显。

关键词:钢筋混凝土梁;钢板;加固;裂缝;挠度;承载力

中图分类号:TU375.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)01-0088-08

Experimental analysis of strengthening effect of corroded reinforced concrete beams strengthened with bolted steel plates

Peng Jianxin, Li Ju, Tang Huang, Zhang Jianren

(Key Lab for Safety Control of Bridge Engineering by Hunan Province and Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, P R China)

Abstract: In order to study the mechanical behavior of corroded reinforced concrete beams strengthened with bolted steel plates, this paper designed 12 reinforced concrete beams. These beams were corroded by using accelerated electrochemical corrosion method with a designed corrosion ratio of 10%. The pre-compression experiments were performed for all RC beams before strengthening and the maximum crack width was controlled as 0.2 mm. According to the thickness of concrete cover, the beams were divided into 3 groups. Each group was composed of one comparative beam and three tested beams strengthened by steel plates bolted with study according to the

收稿日期:2014-07-29

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 项目)(2015CB057706);国家自然科学基金(51178060、51378081);交通运输部主干学科应用基础研究项目(2014319825160);中国博士后科学基金(2014M552127);长沙理工大学桥梁工程湖南省高校重点实验室开放基金(13K04)

作者简介:彭建新(1978-),男,副教授,博士(后),主要从事混凝土桥梁结构劣化、维修加固及可靠度研究,(E-mail)719698432@qq.com.

Received:2014-07-29

Foundation item:Key Basic Research Development Program of China(973 Program)(No. 2015CB057706);National Natural Science Foundation of China(No. 51178060、51378081);Application Basic Research of Major Subject of Ministry of Transportation(No. 2014319825160);China Postdoctoral Science Foundation(No. 2014M552127);Open Fund of Key Laboratory of Bridge Engineering at Changsha University of Science & Technology of Hunan Province(No. 13K04)

Author brief:Peng Jianxin(1978-),PhD, associate professor,main research interest:concrete bridge structural deterioration, repair and reliability,(E-mail)719698432@qq.com.

thickness of steel plates which were 3 mm, 4 mm and 5 mm, respectively. It was shown that the strain distributions along the height of the strengthened beams at middle-span were in good agreement with the plain section assumption basically. The serviceability performances of corroded RC beams were significantly improved and these ultimate bearing capacities increased obviously. The steel plate bolted with stud effectively reduced the crack width and the extension height of reinforced concrete beams. It was indicated that an increase of steel plates with 3~5 mm resulted in a decrease of deflection by 13%~51% when beams had the same thickness of concrete cover and corrosion ratio. Influence of the thickness of concrete cover on the ultimate bearing capacity was not obvious.

Key words: corroded reinforced concrete beam; steel plate; strengthening; crack; deflection; bearing capacity

在桥梁长期运行过程中,车辆轴重的增加、雨水的侵蚀都会导致钢筋的锈蚀、混凝土的开裂,使得桥梁承载力降低、耐久性不足。学者们在钢筋混凝土梁的锈蚀和加固方面做了大量研究。牛荻涛等^[1]认为钢筋锈蚀程度对梁的承载力有明显影响,钢筋锈蚀率越大,承载力越小。金伟良等^[2]给出了锈蚀钢筋混凝土梁(以下简称锈蚀 RC 梁)受弯承载力计算模型,通过试验数据验证了模型的正确性。张建仁等^[3]结合 48 片钢筋混凝土梁的抗弯试验数据,探讨了不同锈蚀率的钢筋混凝土矩形梁极限抗弯承载力的变化规律,推导出了锈蚀钢筋混凝土正截面抗弯承载力的计算公式。Goitseone 等^[4]通过试验研究了锈蚀 RC 梁在不同持续荷载下的结构行为。

目前钢筋混凝土梁加固方法主要有加大截面法、外粘型钢法、粘贴纤维复合材料法、粘贴钢板法和锚贴钢板法,研究较多的主要是后两种加固方法。已有试验研究^[5-11]通过对加固梁的裂缝、应变、破坏模式和钢板宽厚比等因素进行分析,发现梁底粘贴钢板不仅能明显提高梁的极限抗弯承载力,而且可以明显减小构件的挠度和裂缝宽度。而梁底锚贴钢板是通过锚栓固定钢板使得梁除了具有粘刚加固的特点外,还能有效地防止钢板脱落^[12-14]。Sabahattin 等^[15]对 13 根梁进行了锚贴钢板加固的试验研究,研究表明加固梁的极限承载力有显著提高,其延性随着钢板厚度的减小而增加。宋一凡等^[16]的研究表明锚贴钢板加固法可明显提高 RC 梁的承载力、改善抗变形能力,通过理论分析,提出了锚贴钢板加固钢筋混凝土梁的计算方法。

由于目前关于锚贴钢板加固的研究大部分都是在梁未锈蚀的情况下进行的,锈蚀 RC 梁加固后的力学行为以及加固效果的报道相对较少。因此,笔者在考虑锈蚀的条件下进行锚贴钢板加固的对比试验研究,通过对裂缝、破坏模式、钢板厚度等来验证锚贴钢板法对锈蚀 RC 梁的加固效果。

1 试验概况

1.1 试验设计

采用的 12 根试验梁按保护层厚度不同分为 3

组,混凝土强度为 C25,每组中 1 根梁只锈蚀不加固。12 根梁的尺寸以及配筋均相同,其中截面尺寸为 300 mm×150 mm,长度为 1.8 m。梁底主筋配 2 根直径 22 mm 的螺纹钢,架立筋直径为 14 mm,箍筋直径为 8 mm,箍筋间距 100 mm,如图 1 所示。实测梁底所配受拉钢筋的屈服强度(f_y)为 335 MPa,极限屈服强度 441 MPa,弹性模量为 2.0×10^5 MPa。锈蚀后的钢筋强度也可由此换算得到。由标准试块试验测得混凝土轴心抗压强度(f_c)为 18~25.8 MPa。试验中纵向受拉钢筋的锈蚀采用电化学腐蚀方法,先将钢筋混凝土梁浸泡在浓度 5% 的 NaCl 溶液中,以不锈钢板作为阴极,钢筋作为阳极,用恒定的直流电源通电腐蚀到设计的锈蚀率 10%,电流密度为 0.2 mA/cm^2 ,通电时间按法拉第定律计算。待试验全部完成后,从试验梁中取出锈蚀钢筋,用稀盐酸除去钢筋表面的铁锈,测定钢筋的实际锈蚀率。为了模拟实际工程中锈蚀 RC 梁受荷载作用存在裂缝的受力状态,在钢筋锈蚀后对梁进行预压试验。采用单点加载方式,以最大裂缝宽度不超过 0.2 mm 来加以控制。卸载后对梁进行加固,加固钢板为 Q235,长 1 400 mm,宽 100 mm,厚度分别为 3、4、5 mm,加固所用钢板的屈服强度为 235 MPa。锚栓采用固特邦公司的 JN-S 锚栓,参数如表 1 所示,结构胶采用固特邦公司的 JN 建筑结构胶。加固情况如表 2 所示。试验所测参数及试验梁的其他参数列入表 3。

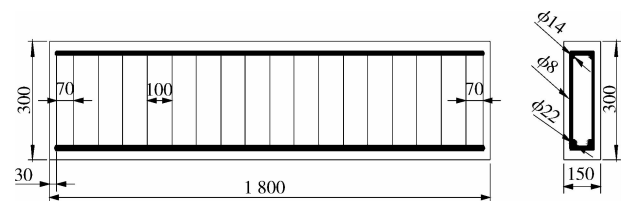


图 1 试验梁尺寸及配筋图(单位:mm)

Fig. 1 The dimension and reinforcing bars of test beams

表 1 锚栓的参数
Table 1 Parameters of anchor bolts

螺杆尺寸	螺杆应截面积/mm ²	设计抗拉力/kN	设计抗剪力/kN	破坏锚固力/kN	孔径直径 D/mm	钻孔深度 h/mm	最大安装厚度 t/mm
M12×160	84.3	17.4	17.8	≥43.8	14	110	25

表 2 试验梁的加固参数
Table 2 The situation of test beams strengthening

试验分组	梁号	保护层厚度/mm	设计锈蚀率/%	加固钢板厚度/mm	实际锈蚀率/%
第 1 组	B1	25	10	3	9.60
	B2	25	10	4	11.20
	B3	25	10	5	11.60
	BX	25	10	0	12.10
第 2 组	B4	30	10	3	7.43
	B5	30	10	4	10.30
	B6	30	10	5	10.94
	BY	30	10	0	9.20
第 3 组	B7	35	10	3	9.15
	B8	35	10	4	10.35
	B9	35	10	5	10.40
	BZ	35	10	0	10.93

表 3 试验梁参数
Table 3 The parameters of test beams

梁号	h_0 /mm	x /mm	f_c /MPa	f_{yc} /MPa	f_{yp} /MPa	A_{sc} /mm ²	A_{yp} /mm ²
B1	264	96.52	19	332.3	235	687	300
B2	264	101.35	19	331.7	235	674.9	400
B3	264	105.11	20	331.6	235	671.8	500
B4	259	98.87	18	332.9	235	703.5	300
B5	259	106.85	18	332	235	681.7	400
B6	259	115.37	18	331.8	235	676.9	500
B7	254	77.52	25.8	332.4	235	690.5	300
B8	254	99.81	20	332.1	235	681.3	400
B9	254	111.03	19	332	235	681	500

1.2 锈蚀梁的加固及加载方案

使用的锚贴钢板加固方法是将事先钻孔的钢板在梁底就位,用电钻对准钢板孔并垂直梁底面往混凝土中打孔,接着清除孔内灰尘,将玻璃管锚固包推入孔底,为了防止钢板脱落以及钢板与混凝土产生滑移,用建筑结构胶将钢板粘结在 RC 锈蚀梁上,最后用锚栓将钢板固定,使得 RC 锈蚀梁、钢板和锚栓三者成为一个整体。其施工快捷、方便,施工质量容易得到保证。

实验梁采用单点分级加载,先进行的是对比梁

的加载。首先以规范^[17]计算出的未锈蚀梁的开裂荷载和极限荷载为依据对对比梁的两值进行预估,然后将对比梁加载至预压开裂值,随即以 5 kN 一级加载至极限荷载预测值的 80%,再以 2.5 kN 一级加载至梁体破坏。加固梁的加载以加固前梁的预压试验的开裂荷载为控制点,加固后每 5 kN 为一级加载到加固前的开裂荷载值,然后采用 2 kN 一级加载直到开裂,裂缝出现后每级增量为 5 kN 加载到对比梁的极限荷载的 80%,随即以每级增量不超过 2.5 kN 加载,直至梁最终破坏。在梁跨中的侧面布置 6 个应

变片测量混凝土应变,在钢板上布置 12 个应变片测量钢板应变,在梁的两端支座、跨中加载点以及梁的 1/4 和 3/4 位置各布置 1 个百分表测量梁的挠度。

试验重点测量以下内容:跨中混凝土的应变、钢板的应变、各级荷载下挠度、裂缝的发展情况,采用裂缝观测仪测定裂缝的宽度等。加载装置及仪表布置如图 2 所示。

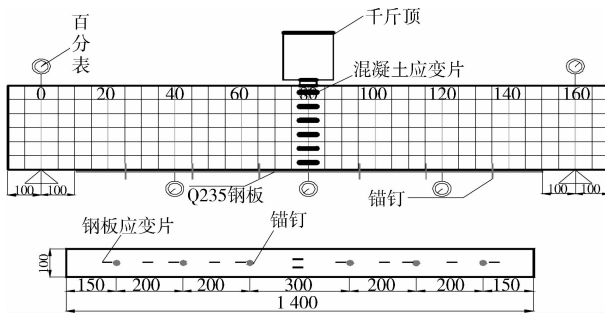


图 2 加载装置及仪表布置

Fig. 2 Loading fixture and instruments collocation

2 试验结果及分析

2.1 加固前后荷载的对比

从表 4 中可以看出,加固后梁的开裂荷载比加固前的要大,达到控制裂缝宽度的荷载提高了 43%~98%。由此可知,该加固方法可以有效地改善锈蚀 RC 梁的正常使用性能,并且能很好地抑制裂缝的扩展。

表 4 加固前后的荷载

Table 4 The load before and after strengthening

梁号	加固前		加固后		加固后的破坏荷载 P_u /kN
	开裂荷载/kN	裂缝 0.2 mm 时的荷载/kN	开裂荷载/kN	裂缝 0.2 mm 时的荷载/kN	
B1	15	63	25	110	165
B2	20	64	35	100	155
B3	17	70	30	100	160
BX	20	70			85
B4	20	70	35	120	170
B5	22	67	30	125	160
B6	30	73	30	110	175
BY	18	70			142
B7	20	75	30	110	160
B8	30	65	45	115	145
B9	20	63	50	125	175
BZ	25	75			137

2.2 试验梁破坏特征分析

2.2.1 保护层影响 破坏时未加固梁 BX 是支座附近的斜裂缝扩展导致的斜拉破坏,主要是由于其保护层厚度较小,对梁的保护作用小,而锈蚀会造成混凝土脱落,导致梁的截面积和抗剪能力减小,而梁截面减小对抗剪能力的影响大于锈蚀对梁抗弯能力的影响。如图 3(a)所示, BY 和 BZ 顶部混凝土被压碎,是典型的适筋受弯破坏,加固后的梁均为斜裂缝迅速变宽导致的斜拉破坏。如图 3(b), B5 和 B6 的斜拉破坏都是支座处的斜裂缝导致的破坏。如图 3(c),其余的加固梁与 B8 一样都是位于钢板端部对应位置的斜裂缝导致的破坏。钢板厚度相同时,保护层越厚的梁的临界斜裂缝的宽度越宽,破坏时的承载力却无很大差别。

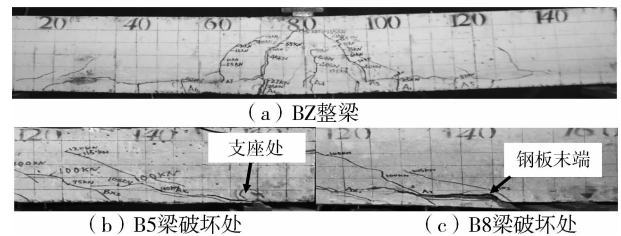


图 3 部分试件梁的破坏特征

Fig. 3 The failure features of part of test beams

2.2.2 钢板影响 保护层厚度相同时,加固钢板越厚的梁自临界斜裂缝出现后到梁破坏,能承受加载的时间更久,挠度越小,即抗变形能力更大,破坏斜裂缝沿水平方向的延伸越长。钢板加固改变了锈蚀 RC 梁的破坏模式是因为随着荷载的增加,临界斜裂缝迅速往荷载垫板方向伸展,左右两端对称的临界斜裂缝宽度急剧增大,使梁体混凝土裂通,将梁与钢板整体撕裂成两部分,丧失承载力。梁破坏时,钢板与锚栓均未脱落与移动,说明此种加固方法通过结构胶和锚栓将钢板与混凝土梁有效地凝结为了一个整体。同时为了防止斜拉破坏以及使钢板更有效地与混凝土的协同工作,建议以后的研究中在弯剪区进行 U 型箍加固。

2.3 裂缝分析

与对比梁相比,加固梁侧面的裂缝出现得较晚且发展缓慢,锚贴钢板加固梁的开裂荷载比未加固梁提高了 50%~150%。由图 4 可知,构件开裂后在同一荷载作用下,加固梁的裂缝宽度和裂缝延伸高度对比梁的小,说明钢板加固能很好地抑制裂缝的扩展。加固后梁的垂直裂缝基本在预裂裂缝基础上发展,裂缝沿梁长分布较均匀。在加载后期,斜裂缝出现且发展迅速,使得少许垂直裂缝的宽度变

窄甚至消失不见。由于是采用单点加载方式,梁的所有裂缝都有向加载点倾斜延伸的趋势。保护层厚度相同且锈蚀率相近时,加固所用钢板厚度越小的锈蚀 RC 梁,裂缝越细密,表明钢板对梁的箍紧作用越明显。锚贴钢板加固锈蚀 RC 梁不仅可以提高构件的开裂荷载,还可以有效地减缓裂缝的扩展,弥补了锈蚀对裂缝的不利影响。因此,加固所用的钢板不宜太厚,宽厚比要适中。

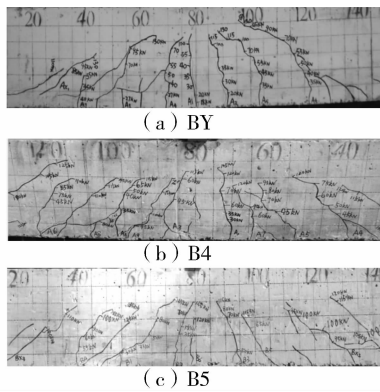


图 4 试验梁裂缝分布图

Fig. 4 Cracking distributions of test beams

2.4 加固效果影响参数分析

2.4.1 钢板厚度对加固效果的影响 由于梁的实际锈蚀率与设计值有偏差,对梁的极限承载力与挠度均有影响,因此在分析中着重对比锈蚀率最相近的梁。由图 5 可以看出,与相应的对比梁相比可知,同一荷载作用下,加固梁的平均挠度明显小于对比梁,即加固梁具有更好的抵抗变形的能力。

1) 保护层厚度为 25 mm 的加固梁的极限挠度有明显减小,平均减小幅度为 22%。保护层厚度为 30 mm 的加固梁,极限挠度减小幅度为 26%~35%,平均减小 29%。保护层厚度为 35 mm 的加固梁极限挠度减小幅度为 13%~51%,平均减小 32%。

2) 由图 5 分析可知,在加载初期,钢板与混凝土协调变形,挠度曲线呈线弹性增长;在正常使用阶段,加固梁的挠度基本呈线性增长,发展平缓;加固梁的钢板及钢筋屈服时,曲线有明显的拐点。保护层厚度相同且锈蚀率相近时,同一荷载作用下,加固梁的挠度明显小于对比梁,有效地提高了梁的刚度,但加固梁的延性却降低了,加固钢板越厚的梁降低幅度越大。随着钢板厚度的增加,加固梁的跨中挠度越小,刚度增大,极限承载力增大。由此表明,锚贴钢板加固可以有效提高锈蚀 RC 梁的抗弯性能,亦要选择厚度适宜的钢板以便保证其得到充分利用。

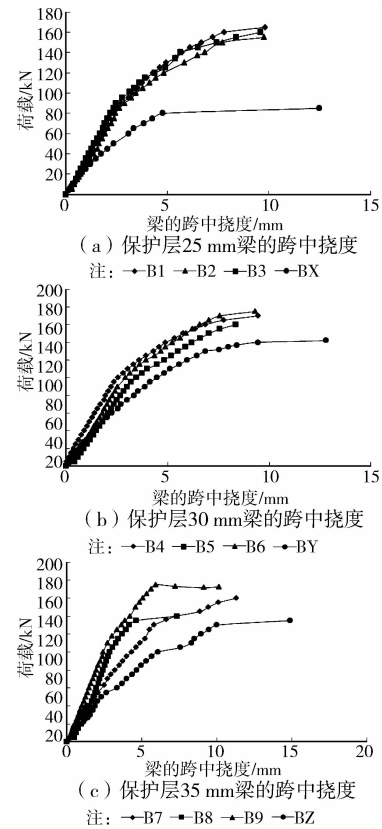


图 5 荷载-挠度曲线

Fig. 5 Load versus mid-span deflection curves of specimens

2.4.2 保护层对加固效果的影响 由图 6 可知,钢板厚度为 3 mm 的梁的极限承载力相差很小;钢板厚度为 4 mm 的梁,从初始到加载至 100 kN 时,梁的挠度曲线基本一致,100 kN 以后,保护层厚度越大的梁挠度略小一些;钢板厚度为 5 mm 的梁加载到 90 kN 时,挠度曲线基本一致,随着荷载的增加,保护层厚度越大,挠度越小,抗弯刚度更大,但极限承载力亦相差不大。由此可见,钢板厚度相同且锈蚀率相近的情况下,保护层厚度越大,加固梁的开裂荷载越高,极限承载力相差较小。表明保护层厚度对梁的正常使用性能影响较大,但对极限承载力影响较小,主要是因为加固梁的锈蚀率对承载力的影响大于保护层对承载力的影响。

2.5 应变分析

由图 7 可知,加固梁与对比梁的跨中截面应变随着荷载的增加,沿梁截面高度基本呈线性分布,符合平截面假定。随着荷载的增加,对比梁的中性轴上升较快;加固梁由于先进行了预压试验,因此加固后梁带裂缝工作,初始加载阶段,荷载主要由钢筋承担,中性轴上升较快;荷载增大,钢板开始与混凝土协同工作,一起承担荷载,使得中性轴有所下移。随后裂缝宽度增大与延伸,钢板得到更多的利用,梁有

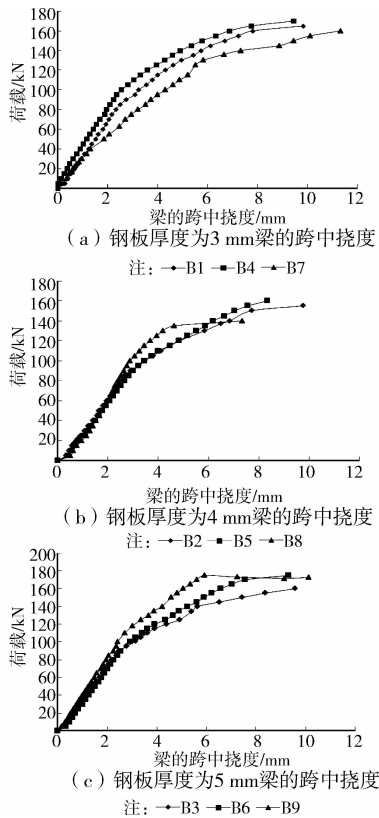


图 6 荷载-挠度曲线

Fig. 6 Load versus mid-span deflection curves of specimens

了更大的变形能力,造成中性轴的上移,受压区减小。在加载后期,由于斜裂缝的扩展以及钢板的局部屈服,曲线逐渐变得不规则,钢板与梁的协调性也慢慢变差。

2.6 承载力分析

已有研究表明,钢筋锈蚀使钢筋截面面积减小,削弱钢筋与混凝土间的粘结,从而对结构的承载力产生显著影响。由表 4 可知,较对比梁而言,锈蚀 RC 梁加固后的承载力有了明显的提高。保护层为 25 mm 的梁极限承载力明显提高,B1、B2 和 B3 提高幅度分别为 94%、82% 和 88%,B1 的承载力比 B2 和 B3 的大是因为 B1 的实际锈蚀率相对小一些;保护层 30 mm 的梁极限承载力提高 13%~23%,保护层 35 mm 的梁极限承载力的提高幅度为 6%~28%。钢板越厚的加固梁,极限承载力提升越多,而不同保护层的梁的极限承载力大致相同。

由于锚栓的横截面积满足要求且受压区高度未超过界限受压高度,钢板和受拉纵筋能达到屈服强度,因此锚贴钢板加固锈蚀 RC 梁受弯承载力可以采用类似文献[17]的计算方法,其中,由于架立筋主要是用来定位受拉主筋的位置以及混凝土强度满足要求,不考虑其受力。而试验加入了锈蚀因素,锈蚀

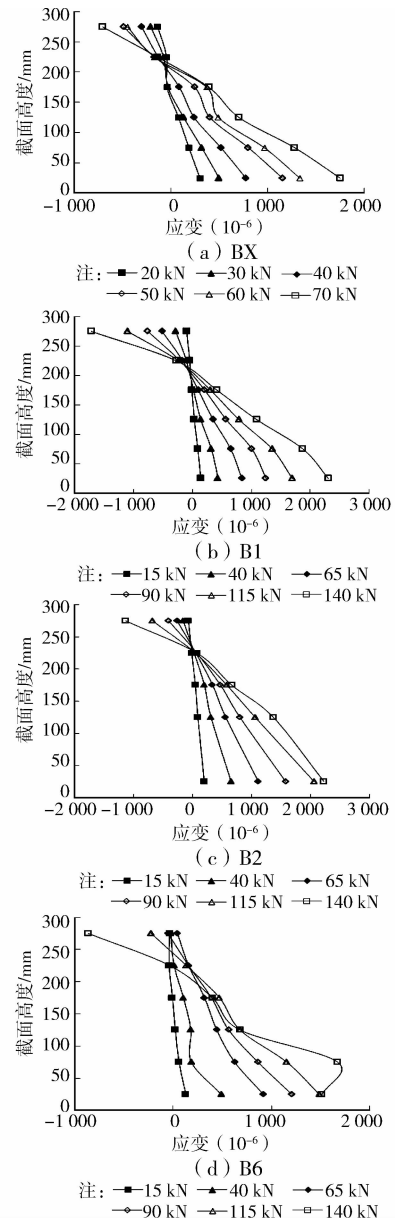


图 7 试验梁跨中沿截面高度应变的变化

Fig. 7 Strain profile at mid-span cross-section of specimens

钢筋与混凝土的协同作用减弱,需要对锈蚀钢筋强度的利用率进行折减,因此引入文献[18-19]的锈蚀钢筋强度利用参数来模拟钢筋因锈蚀导致作用的减弱。由试验结果可知,混凝土梁的变形符合平截面假定。此外,为了公式的推导,作如下假定:1)不考虑混凝土的抗拉强度;2)钢板和钢筋均为理想弹塑性材料;3)钢板、结构胶和混凝土变形协调,未发生相对滑移。按文献[17]计算简图可以表示图 8。

由平衡条件可得

$$\alpha_{sc} f_{yc} A_{sc} + f_{yp} A_{yp} = \alpha_1 f_c b x \quad (1)$$

$$M_u = \alpha_1 f_c b x \left(h - \frac{x}{2} + \frac{t_p}{2} \right) - \alpha_{sc} f_{yc} A_{sc} \left(a_s + \frac{t_p}{2} \right) \quad (2)$$

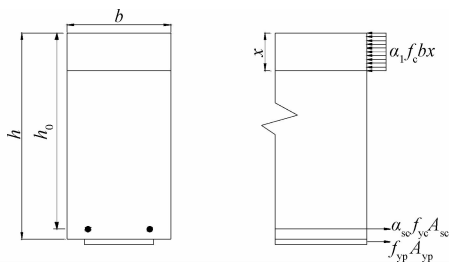


图 8 承载力计算简图

Fig. 8 Calculation of bearing capacity

式中： α_{sc} 为锈蚀钢筋的强度利用系数； t_p 为钢板厚度； a_s 为钢筋截面重心到受拉边缘的距离； f_{yc} 和 f_{yp} 分别为锈蚀钢筋和加固钢板的抗拉强度设计值； A_{sc} 和 A_{yp} 分别为锈蚀钢筋和钢板的截面面积。

由文献[18]可得，锈蚀钢筋的强度利用系数 α_{sc}

可分 3 种方式确定。由于试验结果所测得的钢筋锈蚀深度大于 0.3 mm，故取第 2 种方式。

$$\alpha_{sc} = \begin{cases} 1.449 - 1.822\beta_{0c}, & (\beta_{0c} \leq 0.444) \\ 0.922 - 0.634\beta_{0c}, & (\beta_{0c} > 0.444) \end{cases} \quad (3)$$

式中：当 α_{sc} 计算大于 1.0 时，取 1.0。

锈蚀钢筋混凝土梁的截面配筋指标由文献[19]得到为

$$\beta_{0c} = \frac{f_{yc}A_{sc}}{f_c b h_0} \quad (4)$$

其中： $A_{sc} = (1 - \delta)A_s$ (5)

$$f_{yc} = \frac{(1 - 1.077\delta)}{(1 - \delta)} f_y \quad (6)$$

式中 δ 为钢筋锈蚀率。

计算结果及试验值以及两者的比值在表 5 列出。由表 5 可知，计算值与试验值符合良好。

表 5 试验结果

Table 5 The tested results

梁号	锈蚀钢筋强度利用系数 α_{sc}	受压区高度 x /mm	P_u /kN	P_u 提高幅度/%	试验值 M_u^t /(kN·m)	计算值 M_u^c /(kN·m)	M_u^c/M_u^t	极限挠度/mm	极限挠度减小幅度/%	破坏模式
B1	0.89	96.52	165	94.1	66	61.90	1.07	9.82	21.3	斜拉破坏
B2	0.9	101.35	155	82.3	62	64.92	0.96	9.77	21.7	斜拉破坏
B3	0.94	105.11	160	88.2	64	70.80	0.90	9.59	23.1	斜拉破坏
BX			85					12.48		斜拉破坏
B4	0.84	98.87	170	19.7	68	58.94	1.15	9.45	26.2	斜拉破坏
B5	0.86	106.85	160	12.7	64	63.34	1.01	8.34	34.8	斜拉破坏(支座)
B6	0.86	115.37	175	23.2	70	67.82	1.03	9.31	27.3	斜拉破坏(支座)
BY			142					12.80		受弯适筋破坏
B7	1.00	77.52	160	16.8	64	67.92	0.94	11.32	13.5	斜拉破坏
B8	0.91	99.81	145	5.8	58	63.56	0.92	7.34	50.7	斜拉破坏
B9	0.88	111.03	175	27.7	70	68.51	1.02	10.13	30.9	斜拉破坏
BZ			137					14.88		受弯适筋破坏

3 结论

根据试验结果和数据分析，可以得出以下结论：

1) 锚贴钢板加固锈蚀 RC 梁可以有效地提高极限承载力，提高幅度可达 6%~94%，幅度跨度大的原因是对比梁 BX 的锈蚀率超出设计锈蚀率 2.1%，导致其极限承载力明显比 BY 和 BZ 的小。极限挠度明显减小，减小幅度为 13%~51%。

2) 加固梁至始至终没有发生钢板剥离破坏，而是发生的斜拉破坏，说明锚栓与结构胶共同锚贴钢板能够很好地保证钢板与梁的协同作用。梁破坏时没有明显的预兆，加固梁的延性较差。

3) 锚贴钢板加固锈蚀 RC 梁的跨中截面应变随荷载的增加仍基本符合平截面假定。

4) 保护层厚度相同且锈蚀率相近时，钢板厚度越大，加固梁的承载力越高，但提高幅度不大，故需选择合适厚度的钢板以保证其有效利用；同一荷载下，钢板厚度越大，梁挠度越小。锈蚀率较大且钢板厚度相同时，保护层厚度对加固后的锈蚀 RC 梁影响不大。

5) 给出了锚贴钢板加固锈蚀钢筋混凝土梁的承载力计算方法。另外，为了保证钢板能更有效地与混凝土协同工作，建议以后研究中在梁弯剪区用 U 型钢板箍加固。

参考文献：

[1] 牛荻涛, 翟彬, 王林科, 等. 锈蚀钢筋混凝土梁的承载力分析[J]. 建筑结构, 1999, 29(8): 23-25.

- Niu D T, Zhai B, Wang L K, et al. Analysis for bearing capacity of RC beam with rusting steel-bar [J]. Building Structure, 1999, 29(8): 23-25. (in Chinese)
- [2] 金伟良, 夏晋, 蒋遨宇, 等. 锈蚀钢筋混凝土梁受弯承载力计算模型[J]. 土木工程学报, 2009, 42(11): 64-70.
Jin W L, Xia P, Jiang A Y, et al. Flexural capacity of corrosion-damaged RC beams [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(11): 64-70. (in Chinese)
- [3] 张建仁, 张克波, 彭晖, 等. 锈蚀钢筋混凝土矩形梁正截面抗弯承载力计算方法[J]. 中国公路学报, 2009, 22(3): 167-173.
Zhang J R, Zhang K B, Peng H, et al. Calculation method of normal section flexural capacity of corroded reinforced concrete rectangular beams [J]. Journal of Highway and Transport, 2009, 22(3): 167-173. (in Chinese)
- [4] Malumbela G, Moyo P, Alexander M. Behaviour of RC beams corroded under sustained service loads [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(11): 3346-3351.
- [5] Bouazaoui L, Perrenot G, Delmas Y, et al. Experimental study of bonded steel concrete composite structures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(9): 1268-1278.
- [6] 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.
- [7] Haskett M, Oehlers D J, Ali M S. Design for moment redistribution in RC beams retrofitted with steel plates [J]. Advances in Structural Engineering, 2010, 13(2): 379-392.
- [8] Meaud C, Jurkiewicz B, Ferrier E. Steel-concrete bonding connection: An experimental study and non-linear finite element analysis [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014, 54: 131-142.
- [9] Arslan G, Sevuk F, Ekiz I. Steel plate contribution to load-carrying capacity of retrofitted RC beams [J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(3): 143-153.
- [10] Lei D, Chen G Y, Chen Y Q, et al. Experimental research and numerical simulation of RC beams strengthened with bonded steel plates [J]. Science China: Technological Sciences, 2012, 12: 3270-3277.
- [11] 高轩能, 周期源, 陈明华. 粘钢加固 RC 梁承载性能的理论 and 试验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(6): 38-44.
- Gao X N, Zhou Q Y, Chen M H. Theoretical and experimental research on bearing behavior of RC beams strengthened by bonded steel plates [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(6): 38-44. (in Chinese)
- [12] 李英民, 韩大刚, 林文修. 锚栓钢板加固法抗弯性能试验及设计方法[J]. 工程抗震与加固改造, 2006, 28(5): 68-71.
Li Y M, Han D G, Lin W X. Experiment study of flexural strengthening reinforced concrete beams by bolting steel plates and design method [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2006, 28(5): 68-71. (in Chinese)
- [13] Jones R, Swamy R N. Plate separation and anchorage of reinforced concrete beams strengthened by epoxy bonded steel plate [J]. The Structural Engineer, 1988, 66(5): 85-94.
- [14] 杨根喜, 濮志锋, 张学宏. 用钢板膨胀螺栓加固钢筋混凝土梁的研讨[J]. 建筑结构, 2001, 31(3): 36-37.
Yang G X, Pu Z F, Zhang X H. Strengthening concrete beam with steel plate and expanding screw [J]. Journal of Building Structure, 2001, 31(3): 36-37. (in Chinese)
- [15] Aykac S, Kalkan I, Aykac B, et al. Strengthening and repair of reinforced concrete beams using external steel plates [J]. Journal of Structural Engineering, 2013, 139(6): 929-939.
- [16] 宋一凡, 贺拴海. 锚栓钢板法加固 RC 梁桥的计算方法[J]. 西安公路交通大学学报, 2000, 20(3): 45-48.
Song Y F, He S H. Calculation method of upgrading reinforced concrete beams by bolting steel plates [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2000, 20(3): 45-48. (in Chinese)
- [17] 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
- [18] 孙彬, 牛荻涛, 王庆霖. 锈蚀钢筋混凝土梁抗弯承载力计算方法[J]. 土木工程学报, 2008, 41(11): 1-6.
Sun B, Niu D T, Wang Q L. Calculation method for flexural capacity of corroded RC beams [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(11): 1-6. (in Chinese)
- [19] 牛荻涛, 卢梅, 王庆霖. 锈蚀钢筋混凝土梁正截面受弯承载力计算方法研究[J]. 建筑结构, 2002, 32(10): 14-17.
Niu D T, Lu M, Wang Q L. Research on calculation method of the bending capacity of corrosive reinforced concrete beams [J]. Building Structure, 2002, 32(10): 14-17. (in Chinese)