

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.090

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 不同钢板加固方式对锈蚀钢筋混凝土梁承载性能的影响

唐皇<sup>1,2a</sup>, 彭建新<sup>2b</sup>, 王晗<sup>3</sup>

(1. 湖南城市学院 土木工程学院, 湖南 益阳 413000; 2. 长沙理工大学 a. 交通基础设施安全风险管理工作重点实验室; b. 土木工程学院, 长沙 410114; 3. 国网湖南省电力公司益阳供电分公司, 湖南 益阳 413000)

**摘要:**为了研究不同钢板加固方式对锈蚀钢筋混凝土梁承载性能的影响,探索不同钢板加固方式的加固效果,通过静力荷载试验对比研究了钢板抗弯加固、抗剪加固和抗弯-抗剪组合加固锈蚀RC梁在承载力、变形、破坏模式和延性等方面的特点,分析了不同加固方式的优缺点。研究结果表明:组合加固效果最明显,其极限承载力比锈蚀梁提高了107.7%;对于抗弯加固锈蚀梁,钢板厚度分别为3、4、5 mm时,厚度每增加1 mm,其极限承载力增加7~18 kN;组合加固锈蚀梁的抗变形能力最强,其次是抗弯加固锈蚀梁,且钢板厚度增加对抗弯加固锈蚀梁的抗变形能力有积极作用;组合加固较其他两种加固方式能更有效地提高锈蚀梁的延性,其延性相比锈蚀梁提高了320.4%,其次是抗剪加固锈蚀梁;抗弯加固锈蚀梁的延性比其他两种加固梁小,且随着钢板厚度增加,其延性先增加后减小。评价抗弯和抗剪加固锈蚀梁的加固效果时,需综合考虑抗变形能力和延性。

**关键词:**钢筋混凝土梁;锈蚀;承载力;钢板;加固

中图分类号:TU375.1 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2020)06-0103-09

## Influences of different steel plate strengthening methods on the bearing capacity of corroded reinforced concrete beams

Tang Huang<sup>1,2a</sup>, Peng Jianxin<sup>2b</sup>, Wang Han<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, Hunan, P. R. China; 2a. Industry Key Laboratory of Transportation Infrastructure Security Risk Management; 2b. School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, P. R. China; 3. State Grid Yiyang Power Supply Company, Yiyang 413000, Hunan, P. R. China)

**Abstract:** In order to explore the influence of different steel plate strengthening methods on the bearing capacity of corroded RC beams, the strengthening effect of different strengthening schemes is explored. The characteristics in the bearing capacity, deformation, failure mode and ductility of corroded RC beams

**收稿日期:**2020-03-30

**基金项目:**国家重点基础研究发展计划(973计划)(2015CB057705);湖南省自然科学基金(2019JJ50023);湖南省自然科学基金(2018JJ2438);湖南省教育厅科学研究项目(18A136、18C0855);长沙理工大学桥梁工程领域开放基金(18KF01)

**作者简介:**唐皇(1988-),男,博士,主要从事桥梁时变可靠度评估,E-mail: tanghuang\_123@163.com。  
彭建新(通信作者),男,博士,教授,E-mail: jianxinpeng@csust.edu.cn。

**Received:**2020-03-30

**Foundation items:** National Basic Research Development Program (973 Program) of China (No. 2015CB057705); Natural Science Young Foundation of Hunan Province (No. 2019JJ50023); Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 2018JJ2438); Scientific Research Project of Education Department of Hunan Province (No. 18A136, 18C0855); Open Fund of Bridge Engineering of Changsha University of Science and Technology (No. 18KF01).

**Author brief:** Tang Huang (1988-), PhD, main research interest: time-dependent reliability evaluation of bridge, E-mail: tanghuang\_123@163.com.

Peng Jianxin (corresponding author), PhD, professor, E-mail: jianxinpeng@csust.edu.cn.

strengthening by steel plate with flexural strengthening schemes, shear strengthening scheme, and flexure-shear combination strengthening scheme are compared, respectively, and the advantages and disadvantages of different strengthening schemes are analyzed. The results show that for the flexure-strengthened corroded beam which steel plate thickness are 3 mm, 4 mm and 5 mm, respectively, the ultimate bearing capacity increased by 7~18 kN with 1 mm increases of steel plate thickness. The effect of combined strengthening is most significant, and the ultimate bearing capacity increased by 107.7% compared with corroded beams. Combined strengthened corroded beams have the strongest deformation resistance, the following is flexure-strengthened corroded beams, and the increases of steel plate thickness has a positive effect on the deformation resistance of flexure-strengthened corroded beam. The combined strengthening scheme is more effective in improving the ductility of corroded beam than the other two strengthening schemes, the ductility of which is improved by 320.4% compared with corroded beam, followed by shear strengthened corroded beams. The ductility of flexure-strengthened corroded beam is smaller than other two kinds of strengthened beams, and it increases in the beginning and then decreases with the increases of steel plate thickness. The deformation resistance and ductility should be considered comprehensively when evaluating the strengthening effect of flexural and shear-strengthened corroded beams.

**Keywords:** reinforced concrete beam; corrosion; load-carrying capacity; steel plate; strengthening

钢筋锈蚀是引起钢筋混凝土(RC)结构承载性能退化的主要原因之一。中国现有公路桥梁中,超过15%的RC桥梁由于钢筋锈蚀导致了保护层剥落、混凝土开裂和钢筋断裂等病害<sup>[1]</sup>。因此,需要合理的维修加固方式对桥梁进行加固处理,以保持其服役性能。

作为一种施工方便、经济和效果明显的加固方法,钢板加固已经在RC结构加固工程中广泛应用,其中,主要加固方式分为抗弯加固、抗剪加固和抗弯-抗剪组合加固。学者们对于抗弯加固、抗剪加固和抗弯-抗剪组合加固不锈蚀RC梁的承载力、破坏模式和变形性能等力学指标进行了一系列研究<sup>[2-8]</sup>,获得了许多有意义的成果。Aykaç等<sup>[2]</sup>通过试验研究了外贴钢板组合加固RC梁的抗弯性能,分析了钢板厚度、锚钉锚固和侧贴钢板锚固对试验梁性能的影响。Chang等<sup>[3]</sup>提出了基于应变局部化机理的新加固体系来解决钢板抗弯加固后脱落的问题。吴振丽等<sup>[4]</sup>以4根侧面锚固钢板加固RC梁(BSP梁)受剪性能试验研究为基础,基于有限元软件Opensees建立了BSP梁的非线性有限元模型,模拟了构件加载全过程和受剪破坏时的受力性能。刘阳等<sup>[5]</sup>采用U形预应力钢板箍对T形截面RC梁进行受剪加固,研究U形钢板箍间距和预应力水平对加固RC梁受剪性能的影响。上述研究都未考虑钢筋锈蚀对加固效应的影响,然而钢板加固往往是在钢筋锈蚀引起承载性能退化后进行,对RC结构锈蚀后加固

的力学性能研究是有意义的<sup>[9]</sup>。Peng等<sup>[9]</sup>通过试验研究了锚贴钢板抗弯加固锈蚀RC梁承载性能,分析了保护层厚度、钢板厚度和锈蚀率对极限承载力和挠度的影响。张建仁等<sup>[10-11]</sup>利用桁架原理和微元法建立了钢板抗弯加固锈蚀RC梁的极限承载力和荷载-挠度曲线的理论计算方法。Tang等<sup>[12]</sup>和张建仁等<sup>[13]</sup>研究了二次锈蚀对于抗剪加固锈蚀RC梁承载性能的影响。上述研究主要针对单一加固方式对锈蚀RC梁加固后承载性能的影响,没有对比分析不同加固方式之间的加固效果。对比不同加固方式的锈蚀RC梁的力学性能,揭示不同加固方式的优缺点,可为实际工程中桥梁加固方案选择和设计提供依据。

笔者通过静力荷载试验研究锈蚀RC梁在不同钢板加固方式作用下的承载性能,对比分析了抗弯、抗剪和抗弯-抗剪组合加固锈蚀RC梁的破坏模式、裂缝分布、挠度、承载力和延性等力学指标,比较了不同加固方式的优缺点。

## 1 试验研究

### 1.1 试件设计

共设计8片RC梁,其设计参数如表1所示。表中梁P1为不锈蚀梁,P2为锈蚀梁,梁PSC-1、PSC-2和PSC-3为抗弯加固锈蚀梁,梁PUC为抗剪加固锈蚀梁,梁PSU为抗弯-抗剪组合加固锈蚀梁。所有梁的混凝土设计抗压强度均为30MPa,通过混

混凝土抗压强度标准实验获得实际抗压强度为 30.2 MPa。梁保护层厚度均为 25 mm。加固钢板采用 Q235 级钢板。试验梁制作时,根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)<sup>[14]</sup>,梁内钢筋采用 HRB335 级钢筋,试验梁极限承载力和变形满足规范要求。根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)<sup>[15]</sup>,建议钢筋混凝土桥梁不再使用 HRB335 级钢筋,而使用 HRB400 级钢筋,不会影响试验梁的加固效果。通过材料性能试验,试验梁中的箍筋、架立筋和受拉钢筋的屈服强度分别为 335、334.8、334 MPa。试验梁配筋图如图 1 所示。试验采用实验室电化学快速腐蚀方法使所有试验梁的受拉纵向钢筋锈蚀,腐蚀装置如图 2 所示。3 种加固方式如图 3 所示。

表 1 试验试件设计参数

Table 1 Properties of the tested beams

试验梁编号	加固前设计锈蚀率/%	实际锈蚀率/%	加固钢板厚度/mm	加固钢板宽度/mm
P1	0	0	无	无
P2	10	8.5	无	无
PSC-0	0	0	5	100
PSC-1	10	7.4	3	100
PSC-2	10	10.3	4	100
PSC-3	10	10.9	5	100
PUC	10	10.4	3(U型箍)	50(U型箍)
PSU	10	10.3	3(U型箍)、5(底钢板)	50(U型箍)、100(底钢板)

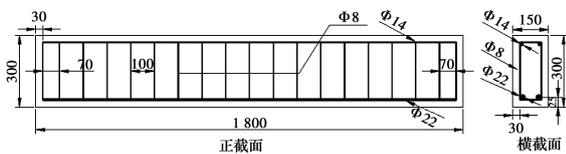


图 1 试验梁配筋图(单位:mm)

Fig. 1 Reinforcement layout of the tested beams (units: mm)

### 1.2 试验梁加载程序

试验梁制作完毕后,在标准养护条件下养护 7 d,然后利用 500 kN 千斤顶进行加载。试验中,分别在梁支座、1/4 点处和跨中处安装百分表测量试验梁挠度。混凝土应变由沿梁高粘贴的 6 个电阻应变片测得,应变片间距为 50 mm。钢板的应变由两锚钉之间的应变片测得。试验梁加载如图 4 所示。加

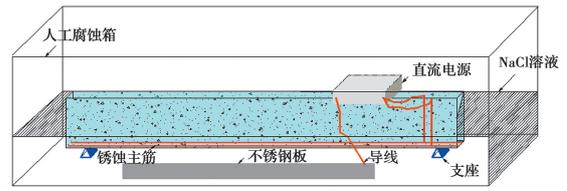
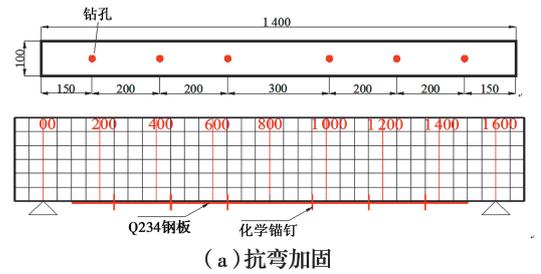
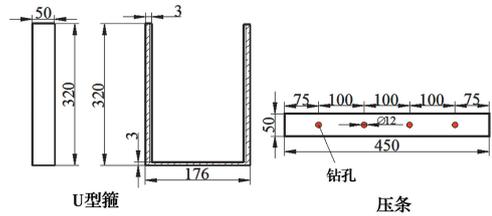


图 2 试验梁电化学腐蚀

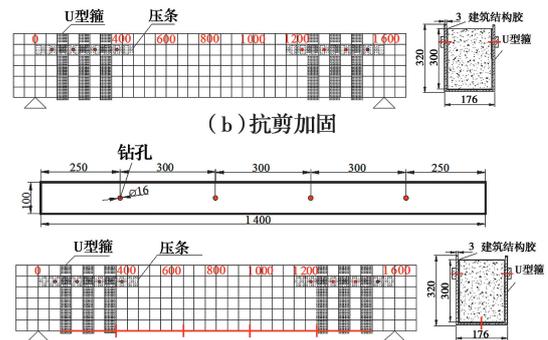
Fig. 2 Electrochemical corrosion of RC beam



(a) 抗弯加固



(b) 抗剪加固



(c) 组合加固

图 3 不同钢板加固方式(单位:mm)

Fig. 3 Different strengthening schemes (units: mm)

载开始后,加载荷载每级 2 kN,直到试验梁出现裂缝。当试验梁开裂后,荷载调至 10 kN 一级,每一级测量裂缝宽度,用签字笔描绘裂缝发展情况,并记录应变和挠度数据。

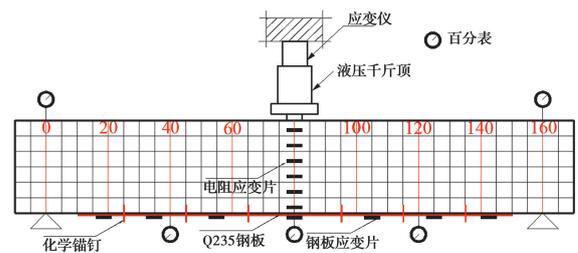


图 4 试验梁加载程序(单位:cm)

Fig. 4 Loading set-up of beam specimen (units: cm)

## 2 试验结果分析

所有试验梁的试验结果见表 2。表中  $P_{cf}$ 、 $P_{cd}$  和  $P_u$  分别表示出现弯曲裂缝时的荷载、出现斜裂缝时的荷载和极限荷载,  $P_{ul}$  为试验梁理论极限荷载,  $D_u$  为极限荷载对应的跨中极限挠度。依据文献[1]中钢板抗剪和组合加固锈蚀 RC 梁承载力计算方法, 以及文献[11]中钢板抗弯加固锈蚀 RC 梁承载力计算模型, 获得了各加固梁的承载力理论值, 对比梁的承载力理论值采用《混凝土结构设计规范》<sup>[16]</sup> 中的计算方法。文献[1, 11]中的计算模型根据试验梁的破坏模式进行受力分析, 由于篇幅有限, 仅列出抗弯加固锈蚀 RC 梁的计算方法, 见式(1)。另外, 根据《混凝土结构加固设计规范》<sup>[17]</sup> 中钢板加固 RC 梁抗弯和抗剪承载力计算公式, 反推了极限荷载值。在规范中并没有考虑钢筋的锈蚀, 锈蚀钢筋截面积

和屈服强度采用文献[11]中的理论模型。

$$\frac{\tau}{f_{cu}} = v \left[ \sqrt{\frac{2\gamma}{v} + \alpha^2} - \alpha \right]$$

$$\alpha = a/h_{sp}; \tau = \frac{V}{bh_{sp}}; v = \frac{P_y}{bf_{cu}}; \gamma = \frac{T_y}{bh_{sp}f_{cu}} \quad (1)$$

式中:  $f_{cu}$  为立方体抗压强度;  $b$  为梁的宽度;  $P_y$  为箍筋的屈服强度;  $h_{sp}$  为梁的有效高度;  $a$  为加载处到梁端的距离;  $V$  为极限破坏荷载。

由于抗弯加固梁是斜拉破坏, 极限荷载由抗剪承载力控制, 文献[11]中运用桁架理论, 并将钢板粘结剂和钢板作为桁架一部分来考虑抗剪作用, 但加固规范中抗剪承载力并没有考虑钢板作用, 只考虑了混凝土和箍筋的作用, 因此, 表 2 中所有抗弯加固梁的抗剪规范值相等, 并小于文献[11]中模型的计算值  $P_{ul}$ 。

表 2 试验梁试验结果

Table 2 Test results of the tested beams

试验梁	$P_{cf}/\text{kN}$	$P_{cd}/\text{kN}$	$P_u/\text{kN}$	$P_{ul}/\text{kN}$	抗弯规范值/ $\text{kN}$	抗剪规范值/ $\text{kN}$	$P_u/P_{ul}$	提高量/%	$D_u/\text{mm}$	破坏模式
P1	22	90	140	130	130	165	1.07		5.7	F
P2	20	65	117	120	120	165	0.98		5.1	F
PSC-0	70	105	215	220	307	165	0.98	53.6	8.7	DT
PSC-1	40	100	165	169	271	165	0.98	41.0	9.8	DT
PSC-2	50	90	172	177	289	165	0.97	47.0	10.2	DT
PSC-3	55	90	190	196	304	165	0.97	62.4	9.0	DT
PUC	20	85	171	168	125	343	1.01	46.2	11.6	F
PSU	56	80	243	256	303	343	0.94	107.7	9.1	SF

注: F 表示弯曲破坏; DT 为斜拉破坏; SF 为支座破坏

对于梁 PUC 和梁 PSU, 文献[1]中极限荷载计算模型是根据《混凝土加固设计规范》<sup>[17]</sup> 抗弯承载力计算方法改进而来, 并考虑 U 型箍对抗弯承载力的作用。梁 PUC 抗弯极限荷载规范值比  $P_{ul}$  小, 这是因为规范值没有考虑 U 型箍对抗弯性能的影响。梁 PSU 极限荷载计算模型还考虑了支座处由于钢筋锈蚀导致混凝土提前破坏时的钢板受力情况, 但规范中并没有考虑, 因此, 表 2 中的规范计算值比  $P_{ul}$  大。

从表 2 中可以看出, 文献[1, 11]中的理论模型能够更精确地预测加固梁的极限荷载。加固梁的极限荷载试验值和理论值之间比值在 0.94~1.01 之间, 说明 3 种加固方式的加固效果达到了理论预期。

### 2.1 破坏模式

图 5 展示了部分试验梁的破坏模式。从图 5 可

以看出, 梁 P1 和梁 P2 的破坏模式是由受拉钢筋屈服和顶部混凝土压碎所引起的受弯破坏, 属于正常的普通简支梁破坏模式。抗弯加固梁 PSC-0、PSC-1、PSC-2 和 PSC-3 的破坏模式为斜拉破坏, 而且抗弯加固锈蚀梁钢板边缘处受拉区混凝土与钢板一起脱落。此破坏模式由以下原因造成: 在钢板边缘与支座之间存在未加固区域, 底面钢板加固显著增强了梁的抗弯性能, 这可以从表 2 中的抗弯和抗剪极限荷载看出, 抗弯和抗剪承载力差值较大导致加固钢板与未加固区域边缘容易出现斜裂缝, 在未加固区抗剪能力没有增强的情况下, 钢板抑制了弯曲裂缝的发展。对于未锈蚀梁 PSC-0, 斜裂缝出现后, 斜裂缝迅速向斜上方约 45° 发展, 最终导致了斜拉破坏。对于锈蚀加固梁 PSC-1、PSC-2 和 PSC-3 而言, 钢筋锈蚀导致钢筋与受拉区混凝土之间的粘结作用

降低,斜裂缝沿着纵向钢筋与混凝土接触面发展,最终导致混凝土随钢板脱落。

从图 5(c)可看出,在梁 PUC 跨中底面存在较宽的抗弯裂缝,说明梁 PUC 的破坏模式同样为受弯破坏。与对比梁 P2 相比,梁 PUC 顶部混凝土没有明显的压碎,但在梁底面出现了宽度大于规范中规定的界限宽度 0.2 mm 的受拉裂缝,此裂缝与梁前后两面弯曲裂缝相连。引起梁 PUC 受弯破坏的原因是:U 形箍加固能够明显提高锈蚀梁支座附近的抗剪性能(表 2 中梁 PUC 抗弯极限荷载规范值明显小于抗剪极限荷载规范值),并且 U 型箍锚固力能够提高加固部位锈蚀钢筋和混凝土之间的粘结力,同时,跨中由于钢筋锈蚀,混凝土和锈蚀钢筋的粘结力降低,使得钢筋对混凝土的锚固效应降低,最终导致混凝土抗开裂能力降低。另外,U 形箍被压条固定,避免 U 形箍末端从梁上剥落,使其能够更好地发挥抗剪效应。

在图 5(f)中,梁 PSU 的破坏模式为支座附近破坏,此破坏模式为脆性破坏模式。组合加固同时提高了锈蚀梁抗剪和抗弯承载性能,抗剪极限荷载规范值略大于抗弯极限荷载规范值(见表 2)。支座附近钢筋锈蚀较为严重,钢筋的锚固能力明显减低,另外,U 形箍和底面钢板同时加固部位的刚度和强度明显提高,导致支座附近混凝土的破碎。梁 PSU 也存在较为明显的斜拉裂缝,此裂缝是底面钢板脱离后混凝土从脱离末端起逐渐延伸的。

## 2.2 混凝土和钢板应变

图 6 为混凝土沿梁高的应变分布情况。从图中可以看出,梁 P1、P2 和 PUC 底部混凝土应变明显大于梁 PSC-0、PSC-3 和 PSU,说明底面钢板能够较明显地抑制混凝土的应变增长。另外,对于不锈蚀加固梁 PSC-0,在荷载作用下,钢板、混凝土、胶层和钢筋之间组合成整体,因此,沿梁高的应变成线性,如图 6(a)、(c)。但是,在图 6(b)、(d)~(f)中,混凝土沿梁高的应变是非线性的。这是因为锈蚀导致钢筋和混凝土之间相对滑移加大,致使受拉区混凝土应变增大。其次,锈蚀产物引起的锈胀裂缝进一步提高了混凝土应变。从图中也可以看出,不锈蚀梁的中和轴高度基本在距离梁底 175 mm 左右,钢筋锈蚀导致平截面假定不成立,中和轴上移,锈蚀梁

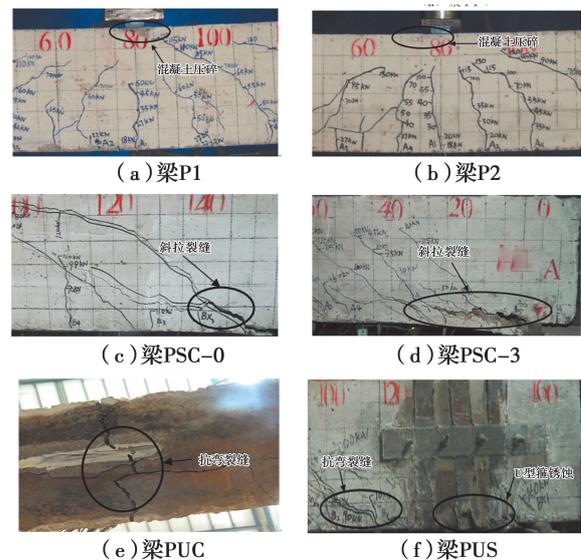


图 5 试验梁的破坏模式

Fig. 5 Failure modes of the beam specimens

P2 的中和轴大约在距梁底 225 mm 处,锈蚀加固梁 PSC-3、PUC 和 PSU 中和轴大约在 200 mm 处。

图 7 为试验梁底面钢板应变。图 7(a)为跨中处钢板应变,图 7(b)为不同荷载下钢板各个部位应变平均值。从图 7(a)可以看出,在斜裂缝出现前,同一荷载下,所有抗弯加固锈蚀梁的钢板应变比梁 PSC-0 大。这是由于锈蚀使得钢筋与混凝土之间的滑移随着粘结力降低而增大,钢板应变随着混凝土应变增大而增大。斜裂缝出现后,斜裂缝处的钢板由于应力集中使其与混凝土之间出现剥离,斜裂缝引起的斜拉破坏是脆性的,致使钢板应变呈现突然下降的情况。图 7(b)中,梁 PSU 底面钢板应变整体上小于抗弯加固锈蚀梁,说明增加 U 形箍加固能充分发挥底面钢板的抗变形能力,同时,由于 U 形箍的对底面钢板的紧固效应,底面钢板两端的应变小于中间钢板应变。

## 2.3 开裂荷载和裂缝分布

从表 2 试验梁的开裂荷载可以看出,锈蚀梁出现抗弯裂缝的荷载比不锈蚀梁的略微降低。除梁 PUC 外,所有锈蚀加固梁出现抗弯裂缝的荷载比锈蚀梁的弯曲开裂荷载提高了 100%~180%,同时,抗弯加固锈蚀梁的弯曲开裂荷载随着钢板厚度的增加而增加。梁 PUC 的弯曲开裂荷载与梁 P2 相同,这是因为梁 PUC 底面无钢板加固,荷载作用区域裂缝发展与锈蚀梁相似。

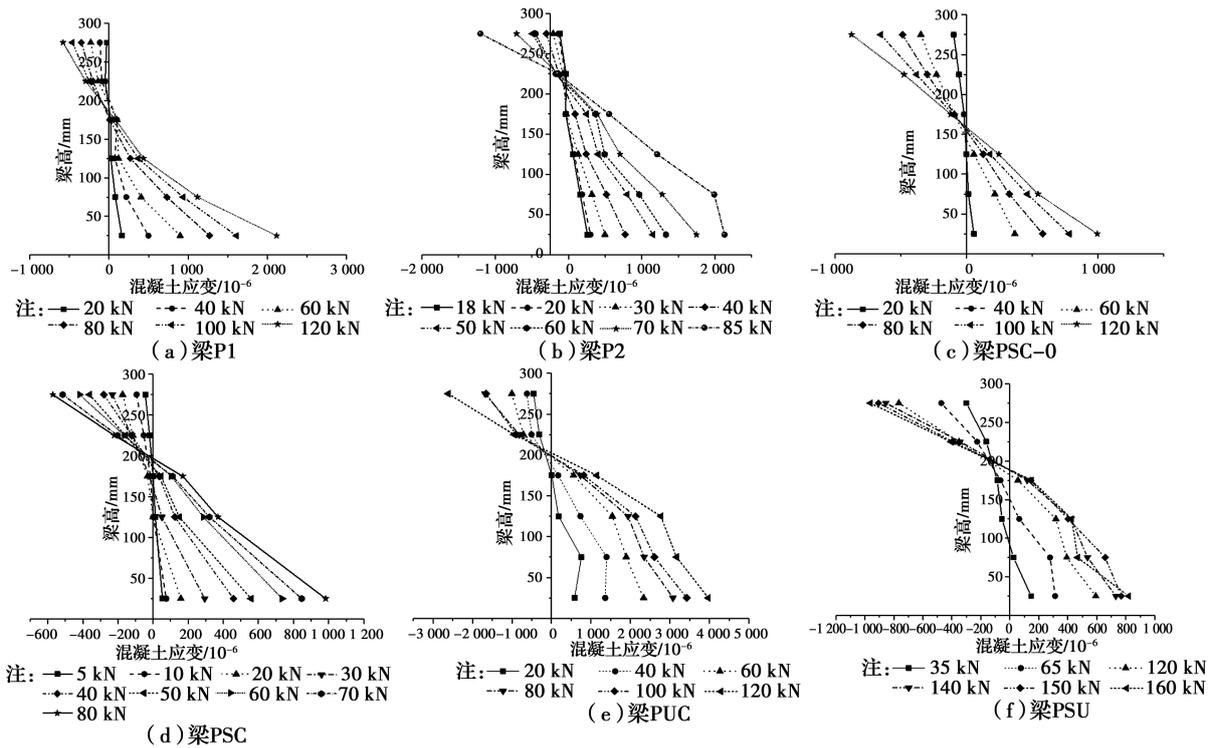


图 6 试验梁沿梁高混凝土应变

Fig. 6 Concrete strain along the beam height of tested beams

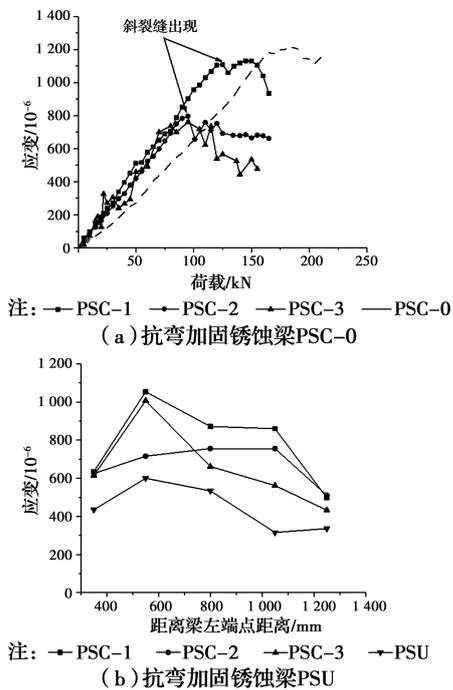


图 7 试验梁底面钢板应变

Fig. 7 Steel plate strain of tested beams on the bottom

图 8 为部分试验梁裂缝分布。AX 表示斜裂缝, A1-A10 表示主要弯曲裂缝。在所有试验梁中, 抗弯加固梁的裂缝数量最多, 间距最小, 这是因为底面钢板的加固效应使得试验梁的抗裂性能提高, 然

而, 由于 U 形箍的锚固作用, 梁 PUC 没有斜裂缝出现。对于梁 PSU, 底面钢板和 U 形箍共同限制了试验梁裂缝的发展, 并且其破坏模式为提前破坏, 裂缝在荷载较低的情况下不发展。

### 2.4 荷载-挠度曲线

图 9(a) 为抗弯加固试验梁跨中荷载-挠度曲线。从图 9(a) 和表 2 中可以看出, 梁 PSC-0 的极限荷载比试验梁 P1 大 53.6%, 对应的极限跨中挠度比梁 P1 大 3 mm。对于抗弯加固锈蚀梁, 钢板厚度每增加 1 mm, 其极限强度也随之增大 7~18 kN, 梁 PSC-1、PSC-2 和 PSC-3 的极限强度值分别比对比梁 P2 大 41%、47% 和 62.4%, 而且与对比梁 P2 相比, 有更强的抗变形能力。荷载小于极限荷载时, 在同一荷载作用下, 梁 PSC-3 的挠度比梁 PSC-1 和梁 PSC-2 的小, 其极限挠度也比梁 PSC-1 和 PSC-2 分别小了 0.8、1.2 mm, 说明随着钢板厚度的增加, 抗弯加固锈蚀梁的抗变形能力有所增加, 但是钢板厚度增加并不利于梁的整体延性。

图 9(b) 为不同加固方式试验梁跨中荷载-挠度曲线, 从图中可以看出, 每种加固方式都能有效提高锈蚀梁的承载性能和抗变形性能。与对比梁 P2 相

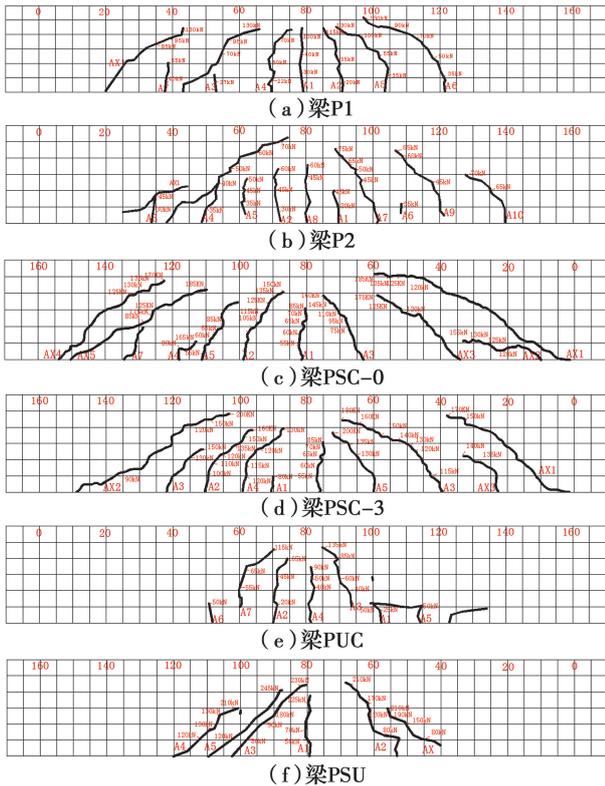


图8 试验梁裂缝分布

Fig. 8 Crack distribution of tested beams

比,梁 PSU 的极限承载力提高了 107.7%,梁 PSC-3 和 PUC 极限承载力分别提高了 62.4%和 46.2%,组合加固方式能够有效提高极限承载力。当荷载小于极限荷载时,同一荷载作用下,梁 PSU 的抗变形能力大于 PSC-3 和梁 PUC,这也可由图 7(b)底面钢板应变分布证明。

## 2.5 试验梁延性

Keheyroddin 等<sup>[18]</sup>指出,对于双点加载的试验梁,在加载过程中塑性铰由于如下原因会发生范围和位置的变化:

1)加载过程中,试验误差会引起加载点微小的变化。

2)整个加载过程,左右两加载点的微小不均匀性。

3)曲率在纯弯矩区变化,存在波动,由于拉伸-刚度效应,曲率峰值在离散开裂处不能精确确定。

上述原因导致纯弯段曲率的量测受塑性铰的影响,用纯弯段曲率来衡量试验梁之间的延性存在问题,特别是当钢筋屈服后进入塑性阶段,曲率更加难以确定。另一个方面,梁跨中挠度曲线反映的是沿

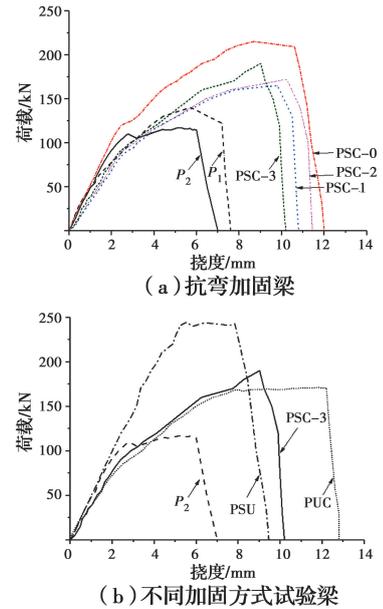


图9 试验梁荷载-挠度曲线

Fig. 9 Load-deformation curves of tested beams

梁长曲率的集合,使用荷载-挠度曲线评价试验梁延性更为可靠。

表 3 列出了所有试验梁的韧性模量(modulus of toughness-MOT),此值是试验梁荷载-挠度曲线与坐标轴形成的封闭区域面积。此值的计算需利用整条荷载-挠度曲线,能够包含材料弹性和塑性范围内的能量吸收,比曲率能更好地展现试验梁能量吸收能力和延性<sup>[2]</sup>。从表 3 可以看出,与锈蚀梁和不锈钢梁相比,钢板加固后梁的整体延性都有所提高,提高量在 107.1%~320.4%,梁 PSU 的延性甚至大于梁 PSC-0。对于抗弯加固锈蚀梁,随着钢板厚度的增加,梁的延性先增加后降低,梁 PSC-3 的延性甚至比 PSC-1 延性低 10.2 kN·mm,这是因为梁 PSC-3 的极限挠度比前两者都小,同时,其抗弯和抗剪极限荷载相对差值比梁 PSC-1 和 PSC-2 的大。梁 PUC 和梁 PSU 的延性比抗弯加固锈蚀梁都高,梁 PSU 的延性最高,其韧性模量大约是梁 PSC-3 的两倍,其原因是在极限挠度相近的情况下,梁 PSU 的极限承载力远大于梁 PSC-3。同时,其抗弯与抗剪极限荷载的差值比抗剪和抗弯加固梁的都小,这也保证了其延性高于其他两种加固梁。梁 PUC 的极限荷载虽然低于梁 PSC-3,但其极限挠度却大于梁 PSC-3,而且挠度在达到极限挠度后还有一定的增长。

表 3 试验梁延性

Table 3 Ductility of the tested beams

试验梁	韧性模量/(kN·mm)	比对比梁提高量/%
P1	738.0	
P2	589.4	
PSC-0	1 811.4	145.4
PSC-1	1 230.9	108.8
PSC-2	1 359.6	130.7
PSC-3	1 220.7	107.1
PUC	1 660.9	181.8
PSU	2 477.8	320.4

结合荷载-挠度分析结果可以看出,虽然同一荷载下,梁 PUC 的抗变形能力低于梁 PSU 和梁 PSC-3,但其整体延性比梁 PSC-3 要大。另外,钢板厚度的增加对抗弯加固锈蚀梁的抗变形能力有积极作用,但整体延性却是随钢板厚度增加先增后减。因此可以表明,对于抗变形能力弱的抗剪加固锈蚀梁,其整体延性并不一定比其他加固梁弱,钢板厚度增加并不能始终有利于抗弯加固锈蚀梁的承载性能,评价其加固效果时需综合考虑抗变形能力和延性。

### 3 结论

通过静力荷载试验对比分析了钢板抗弯加固、抗剪加固和抗弯-抗剪组合加固锈蚀 RC 梁在承载力、变形、破坏模式和延性等方面的特点,分析了不同加固方式的优缺点,根据试验和分析结果,得到如下结论:

1)与锈蚀梁和不锈蚀梁相比,钢板加固能有效提高梁的极限承载力。组合加固效果最明显,其极限承载力比锈蚀梁提高了 107.7%。抗弯加固锈蚀梁钢板厚度分别为 3、4、5 mm 时,厚度每增加 1 mm,其极承载力增加 7~18 kN。

2)每种加固方式都能提高锈蚀梁的抗变形性能,组合加固锈蚀梁的抗变形能力最强,其次是抗弯加固锈蚀梁,同时,钢板厚度的增加对抗弯加固锈蚀梁的抗变形能力有积极作用。

3)组合加固比其他两种加固方式能更有效地提高锈蚀梁的延性,相比锈蚀梁延性提高达 320.4%,其次是抗剪加固锈蚀梁。抗弯加固锈蚀梁的延性相比前两种梁都要小,并且随着钢板厚度的增加先增

加后减小。评价抗弯和抗剪加固锈蚀梁的加固效果时需综合考虑抗变形能力和延性。

### 参考文献:

- [1] 唐皇. 钢板加固锈蚀 RC 梁承载性能试验研究和理论分析 [D]. 长沙, 长沙理工大学, 2017.  
TANG H. Experimental research and theoretical analysis of bearing capacity of corroded RC beams strengthened by steel plate [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [2] 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.
- [3] CHANG X, WU Y F. An analytical model for predicting the response of RC beams strengthened with strain localized steel plate [J]. Construction and Building Materials, 2015, 74: 140-150.
- [4] 吴振丽, 陆洲导, 李凌志, 等. 梁侧锚固钢板法加固混凝土梁的非线性有限元分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(7): 906-913.  
WU Z L, LU Z D, LI L Z, et al. Non-linear finite element analysis of bolted side-plated beams [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(7): 906-913. (in Chinese)
- [5] 刘阳, 陈海, 郭子雄, 等. U形预应力钢板箍加固 T形截面钢筋混凝土梁受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(9): 113-121.  
LIU Y, CHEN H, GUO Z X, et al. Experimental study on shear performance of T-shaped RC beams strengthened with U-shaped prestressed steel jackets [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(9): 113-121. (in Chinese)
- [6] 任伟, 贺拴海, 赵小星, 等. 黏贴钢板加固持荷钢筋混凝土 T型梁模型试验[J]. 中国公路学报, 2008, 21(3): 64-68.  
REN W, HE Q H, ZHAO X X, et al. Model test on preloaded RC T-beam strengthened by bonded steel plates [J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(3): 64-68. (in Chinese)
- [7] 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.

- LIN Y D, ZONG Z H, CHEN H L. Experimental study on shear performance of concrete beams strengthened with steel plates [J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(8): 90-98. (in Chinese)
- [8] 刘来君, 秦煜, 张艳, 等. 二次受力对粘贴钢板加固梁承载力的影响[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2011, 31(1): 46-50.
- LIU L J, QIN Y, ZHANG Y, et al. Effects of re-force on steel-strengthened reinforced beam's capacity [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2011, 31(1): 46-50. (in Chinese)
- [9] PENG J X, TANG H, ZHANG J R. Structural behavior of corroded reinforced concrete beams strengthened with steel plate [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2017, 31(4): 04017013.
- [10] 张建仁, 唐皇, 彭建新, 等. 钢板加固锈蚀 RC 梁短期挠度计算方法和试验[J]. *中国公路学报*, 2015, 28(10): 41-50.
- ZHANG J R, TANG H, PENG J X, et al. Calculating method and test research of short-term deflection of corroded RC beam strengthened by steel plate [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(10): 41-50. (in Chinese)
- [11] 张建仁, 唐皇, 彭建新, 等. 锚贴钢板加固 RC 锈蚀梁承载力计算方法与试验研究[J]. *工程力学*, 2015, 32(3): 97-103.
- ZHANG J R, TANG H, PENG J X, et al. Calculation method and experimental study on corroded RC beams strengthened by steel plant anchored with stud [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(3): 97-103. (in Chinese)
- [12] TANG H, PENG J X, ZHANG J R. Influence of further corrosion on structural behavior of corroded reinforced-concrete beam strengthened with steel plate using different strengthening schemes [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2020, 34(2): 04019117.
- [13] 张建仁, 肖林发, 彭建新, 等. U型箍加固锈蚀 RC 梁的抗弯性能试验研究及数值分析[J]. *工程力学*, 2018, 35(8): 111-121.
- ZHANG J R, XIAO L F, PENG J X, et al. Experimental study and numerical analysis of corroded RC beams strengthened with U-shaped plate [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(8): 111-121. (in Chinese)
- [14] 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG D 62—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- Code for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts: JTG D 62-2004 [S]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese)
- [15] 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- Specifications for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts: JTG 3362-2018 [S]. Beijing: China Communications Press, 2018. (in Chinese)
- [16] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Code for design of concrete structures: GB 50010-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [17] 混凝土结构加固设计规范: GB 50367—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- Code for design of strengthening concrete structure: GB 50367-2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [18] KHEYRODDIN A, NADERPOUR H. Plastic hinge rotation capacity of reinforced concrete beams [J]. *International Journal of Civil Engineering*, 2007, 5(1): 30-47.

(编辑 胡英奎)