

文章编号:1671-8879(2018)02-0078-09

# 弯剪加固锈蚀梁抗弯性能试验

肖林发,彭建新,唐 皇,张健仁

(长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

**摘要:**为探究锈蚀 RC 梁弯剪加固前后的力学行为,通过外加恒电流加速腐蚀的方法制作 7 根锈蚀梁,进行锚贴钢板弯剪加固后受弯试验,分析保护层厚度、二次锈蚀以及弯剪加固对试验梁的变形、应变以及承载力的影响。在此基础上,利用 Combin39 单元考虑钢筋与混凝土的黏结退化,对加固梁进行有限元数值模拟,并将变形、应力的计算值与试验值进行比较分析。结果表明:弯剪加固能有效提高锈蚀梁刚度以及承载力,二次锈蚀和保护层厚度对早期刚度的影响较小;各片试验梁加固前的承载力相差较大,经弯剪加固后,其承载力较为接近;二次锈蚀对加固梁的影响主要体现在锈蚀程度和不均匀性,锈蚀不均匀性会改变破坏形态并影响其使用性能;刚度的退化以及极限承载力的降低主要受锈蚀率影响,而保护层的作用较小;加固前后梁的应变基本表现为线性趋势,保护层厚度对中性轴高度的影响较弱;锈蚀严重时锚固作用较弱,导致梁底应变略有滞后,中性轴高度降低,而轻微锈蚀则能使钢板性能更好地发挥;基于黏结滑移降低系数所建立的有限元模型能够较好地模拟其试验值。

**关键词:**桥梁工程;锈蚀 RC 梁;有限元法;锚栓钢板;弯剪加固;二次锈蚀

**中图分类号:**U442.55 **文献标志码:**A

## Experiment on flexural behavior of corroded beam with flexural and shear strengthening

XIAO Lin-fa, PENG Jian-xin, TANG Huang, ZHANG Jian-ren

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

**Abstract:** In order to explore the mechanical behavior of corroded RC beam before and after flexural and shear strengthening, 7 corroded beams produced by applying constant current accelerated corrosion method were subjected to bending test after flexural and shear strengthening by bolting steel plates, and effects of the thickness of concrete cover, the secondary corrosion and flexural and shear strengthening on the deformation, strain and bearing capacity of test beams were analyzed. On this basis, the bond degradation of reinforcement and concrete was considered by adopting Combin39. Finite element numerical simulation for the strengthened beams were carried out, and the deformation and stress of model were compared with the experimental results. The results show that the flexural and shear strengthening can effectively improve the stiffness and bearing capacity of corroded beams, the secondary corrosion and the thickness of

收稿日期:2017-12-12

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2015CB057706);国家自然科学基金项目(51178060);

交通运输部应用基础研究(主干学科)项目(2014319825160);湖南省教育厅科学研究项目(15B015)

作者简介:肖林发(1989-),男,江西赣州人,工学博士研究生,E-mail: xlf.7878@foxmail.com。

通讯作者:彭建新(1978-),男,江西安福人,副教授,工学博士,E-mail: jianxin\_peng78@163.com。

concrete cover had little influence on stiffness in early period. The difference of bearing capacity of the test beam before reinforcement is larger, but after the flexural and shear strengthening, the differences become relatively close. The main effects of the secondary corrosion on reinforced beams are corrosion degree and inhomogeneity which may change the failure mode and affect performance. The degradation of stiffness and reduction of the ultimate bearing capacity are mainly influenced by corrosion rate, while the protective layer has little influence on it. The strain of front and back beams before and after reinforcement is basically presented as linear trend, and the impact of thickness of protective layer on the neutral axis is weak. Weak anchoring effect caused by severe corrosion leads to a slight lag of the strain at the bottom of beam and lower neutral axis, while slight corrosion can make the steel plate play better performance. A finite element model based on reduction factor of bond slip can well simulate the experimental results. 2 tabs, 17 figs, 26 refs.

**Key words:** bridge engineering; corroded RC beam; finite element method; bolting steel plate; flexural and shear strengthening; secondary corrosion

## 0 引言

受氯盐侵蚀的影响,钢筋混凝土结构受力性能发生退化,主要表现为钢筋的力学性能降低和截面面积减小、钢筋与混凝土间的黏结性发生退化、保护层脱落等,国内外学者在锈蚀钢筋混凝土结构的承载力、刚度等方面做了大量研究<sup>[1-5]</sup>。

对性能退化的锈蚀 RC 结构进行维修加固是延长其使用寿命的有效方法,其中锚栓钢板加固法由于其优异的性能被广泛采用。许多学者对仅采用钢板抗弯加固或抗剪加固梁做了较多研究,在受力机理、承载力性能等方面取得了较多成果<sup>[6-8]</sup>。林于东等基于对 U 形箍加固 RC 梁和预应力梁的研究,探讨了剪跨比、钢板箍间距等因素对粘贴钢板加固梁受剪性能的影响<sup>[9]</sup>;鲍安红等提出 U 形箍的剥离会影响加固梁的抗剪承载力,并采用有限元和试验相结合的方法确定了考虑钢板剥离的修正系数<sup>[10]</sup>;Adhikary 等通过侧面通长加固的试验和有限元模拟指出,通长加固能有效提高梁的抗剪承载力,承载力与加固钢板的厚度和高度密切相关<sup>[11]</sup>;张延年等考虑混凝土强度、U 形箍间距的影响,对加固箱梁的受弯性能进行了分析,认为钢板加固可以较明显地提高屈服荷载和极限荷载,但对开裂荷载的影响较小<sup>[12]</sup>;Li 等基于梁侧锚栓钢板试验,提出加固梁的抗弯承载力和韧性更容易受钢板厚度的影响,梁纵、横向的滑移同时受钢板与混凝土的刚度比和锚栓的力-滑移曲线影响<sup>[13]</sup>。

以上钢板加固研究主要是针对未锈蚀梁,且采用单一的抗弯加固或抗剪加固,而对于弯剪加固锈

蚀梁的研究较少;同时,锈蚀加固梁继续服役以后还会受到氯盐锈蚀作用,而考虑二次锈蚀影响的研究较少。基于此,本文设计 7 片试验梁,考虑二次锈蚀、保护层厚度因素,对试验梁的变形、应变以及承载力进行了分析,探讨了二次锈蚀、保护层厚度以及弯剪加固形式对锈蚀梁力学性能的影响,在试验基础上对弯剪加固梁进行 ANSYS 有限元模拟,以进一步研究弯剪加固对锈蚀梁性能的改善。

## 1 试验设计

### 1.1 试验梁设计

共设计 7 片截面尺寸为 150 mm×300 mm 钢筋混凝土梁,混凝土梁长为 1 800 mm,保护层厚度因试验分析需要采用 25、30、35 mm 这 3 种,混凝土设计强度为 C25,受拉钢筋采用 HRB335 钢筋,加固所采用的钢板为 Q235,梁体尺寸及配筋如图 1 所示。

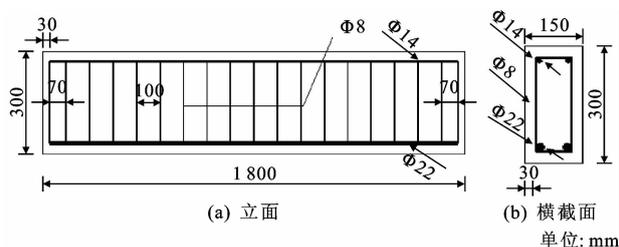


图 1 梁体尺寸与配筋

Fig. 1 Beam size and reinforcement

由于自然条件下的锈蚀十分缓慢,故采用电化学腐蚀的方法来加速试验梁腐蚀。将完好的试验梁放进锈槽内,注入质量分数为 5% 的 NaCl 溶液直到淹没钢筋混凝土梁的主筋,将恒定电源的阳极与梁

顶的露出钢筋相连接,阴极则与高出溶液的不锈钢板相连,通过 NaCl 溶液形成了电化学腐蚀通路,如图 2 所示。为维持氯离子浓度的稳定以达到设计锈蚀,可通过定时添加盐酸溶液,使其 pH 值保持在 7 左右。由于本次试验仅设计为主筋的锈蚀,因此需在箍筋与主筋的接触部位涂环氧树脂,以确保箍筋与主筋绝缘。

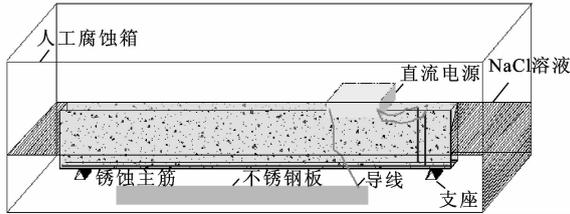


图 2 加速锈蚀原理

Fig. 2 Principle of accelerated corrosion

## 1.2 加固与加载方案

7 片试验梁具体参数如表 1 所示,达到设计的 10% 锈蚀率(质量分数,下同)后,取出锈蚀梁进行锚

表 1 试验梁加固参数

Tab. 1 Reinforcement parameters of test beams

试验梁编号	保护层厚度/mm	锈蚀率/%	加固钢板厚度/mm	加固后二次锈蚀率/%	U 形箍厚度/mm	钢板压条厚度/mm	混凝土强度/MPa
N25	25	15					24
SU25C	25	10	5	5	3	2	24
N30	30	15					23
SU30C	30	10	5	5	3	2	23
N35	35	15					23
SU35C	35	10	5	5	3	2	23
SU35	35	10	5		3	2	23

注:编号中 SU 为弯剪加固;N 为无加固措施;25、30、35 为保护层厚度;C 为二次锈蚀。

## 1.3 锈蚀率测定

在试验梁加载完成后,从锈蚀梁中取出钢筋,将钢筋表面的浮锈和混凝土清洗之后,再用质量分数为 12% 的稀盐酸进一步清洗铁锈,随后用氢氧化钙中和,烘干以测定钢筋的质量,由此计算钢筋的锈蚀率,试验梁的锈蚀率统计如表 2 所示。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 弯剪加固效果

试验梁采用弯剪加固后,其变形、应变以及承载力有显著变化。加固梁与未加固梁的变形曲线如下页图 4 所示,可见保护层相同且锈蚀率相近的试验梁采用弯剪加固以后,其挠度显著提高,刚度和极限承载力较大。相比未加固梁,弯剪加固梁早期挠度增长速率较慢,对应屈服点的挠度更大,这说明弯剪加固可有效提高梁的刚度,并延迟屈服。加固前各

固工作。对试验梁梁底采用厚度为 5 mm 的 Q235 钢板进行锚贴加固,在受剪区用厚度为 3 mm 的 U 形箍及厚度为 2 mm 的钢板压条进行加固,加固后对钢板进行防锈处理。防锈处理完成后将加固梁再次放入腐蚀箱中,进行二次锈蚀,锈蚀率为 5%。当主筋达到设计锈蚀率后,取出试验梁进行单点加载试验。选取保护层厚度为 35 mm 的 1 片梁不进行二次锈蚀,以对比二次锈蚀对加固梁性能的影响。

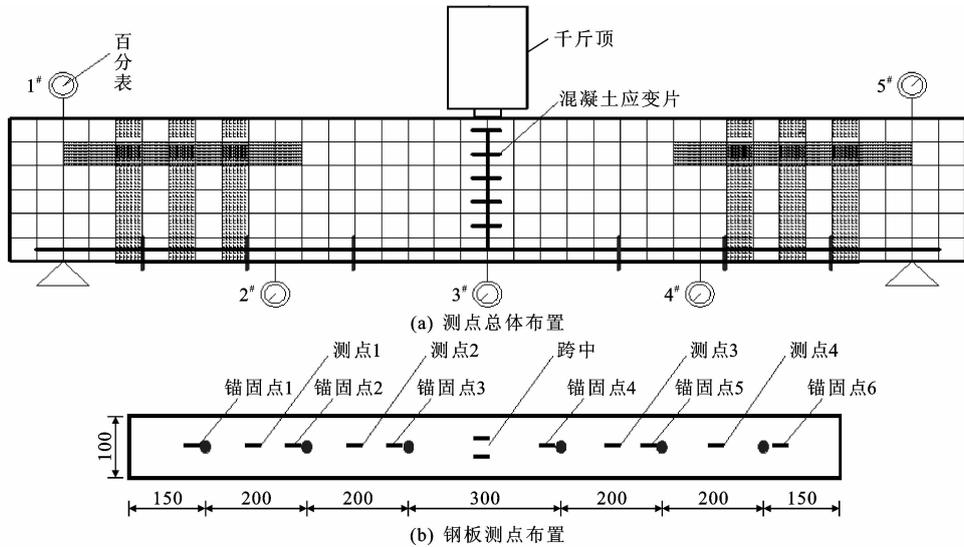
试验梁采用单点加载方式,加载布置如下页图 3 所示。将液压千斤顶置于跨中截面的梁顶位置,用压力传感器连接千斤顶以控制载荷。在支座中心位置、 $L/4$ 、跨中以及  $3L/4$  位置安置百分表, $L$  为梁长,以测定这 5 个位置的挠度。在梁的跨中截面沿梁高方向等间距布置 6 个应变片,以测定混凝土的应变。在两锚钉之间、靠近锚钉位置以及钢板的跨中截面位置布置应变片,以测定钢板的应变。将应变箱和测力计与电脑相连,利用 TDS3815 静态应变测试系统记录每级荷载下的应变。

表 2 锈蚀率统计

Tab. 2 Corrosion rate statistics

试验梁编号	加固前设计锈蚀率	加固后设计锈蚀率	实际锈蚀率
N25	15		15.34
SU25C	10	5	12.99
N30	15		11.92
SU30C	10	5	12.81
N35	15		14.50
SU35C	10	5	6.08
SU35	10		10.32

片试验梁的承载力受保护层厚度以及锈蚀程度的影响较大。试验梁加固以后,氯盐的腐蚀扩散由二维变为一维,保护层被箍紧,有效地阻碍了裂缝发展,增加的钢板使得梁有足够的抵抗力,故承载力较为接近。加固前后承载力如下页图 5 所示,除 N30 与 SU30C 外,弯剪加固梁的承载力均比未加固梁大,



单位: mm

图 3 试验梁测点布置

Fig. 3 Measurement points layout of test beams

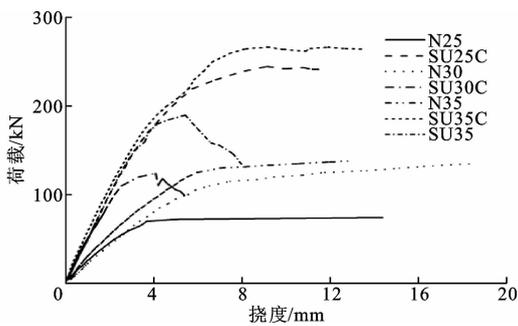


图 4 变形曲线

Fig. 4 Deformation curves

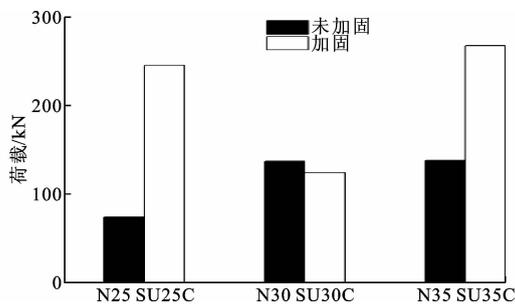


图 5 加固前后承载力对比

Fig. 5 Comparisons of bearing capacities before and after reinforcement

加固梁 SU25C、SU35C 的承载力比未加固梁 N25、N35 分别提高了 231%、93.5%。由于试验条件不确定因素以及锈蚀不均匀性的影响,导致 SU30C 支座处锈蚀严重,并在该处出现了较宽的裂缝如图 6 所示,而其余部位裂缝特别稀少,这表明该梁的承载力并未正常发挥,极限承载力比无加固梁 N30 低。N25 由于锈蚀严重,使得钢板与混凝土在较低荷载

下便发生了剥离,其破坏形态如下页图 7 所示,这也使得 SU25C 比 N25 的承载力提高幅度大很多。弯剪加固对构件的应变也有一定影响,如下页图 8~图 14 所示。加固梁的中性轴高度比未加固梁的中性轴高度低,这说明采用弯剪加固以后提高了梁的抗拉能力,受压区高度因此增大,其原因是钢板提供了抗拉抵抗力,补偿了锈蚀钢筋的作用。各试验梁的荷载与应变曲线基本表现为线性趋势,梁底的应变略有滞后的趋势,这可能是因为锈蚀较为严重时,锈胀开裂严重,U 形箍的锚固作用减弱<sup>[14]</sup>。

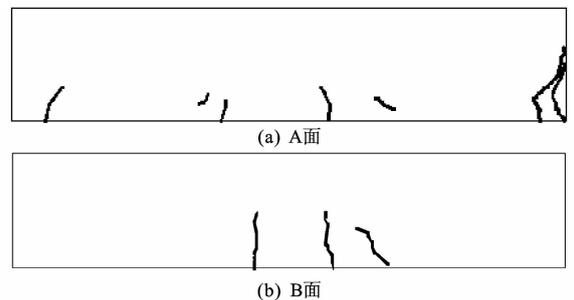


图 6 SU30C 破坏形态

Fig. 6 Failure modes of SU30C

## 2.2 保护层作用

由图 4 可知,构件的变形在前期增长速率几乎是一致的,这说明保护层厚度对早期变形的影响可以忽略。相同加固形式不同保护层厚度的试验梁,其挠度增长规律相差不大,除支座破坏的梁外,其余试验梁的极限承载力比较接近,其偏差是由锈蚀率控制的。由图 8~图 14 可知,锈蚀率相近的 SU25C 和 SU30C 这 2 片梁的中性轴高度相差无几,而锈蚀

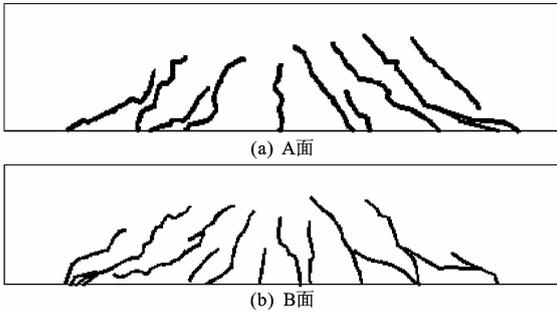


图7 N25破坏形态  
Fig.7 Failure modes of N25

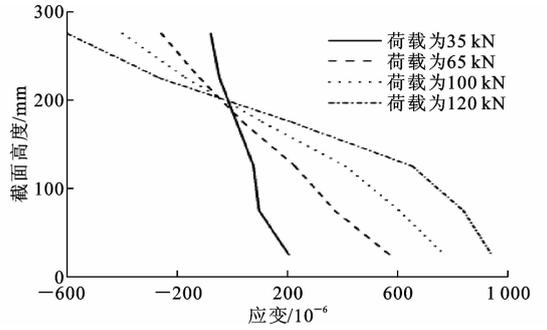


图11 SU30C应变曲线  
Fig.11 Strain curves of SU30C

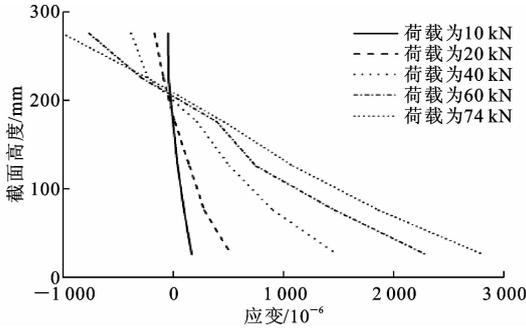


图8 N25应变曲线  
Fig.8 Strain curves of N25

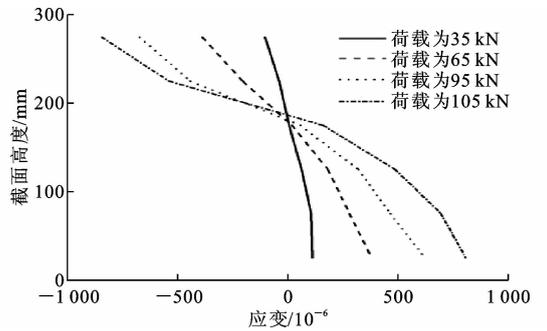


图12 N35应变曲线  
Fig.12 Strain curves of N35

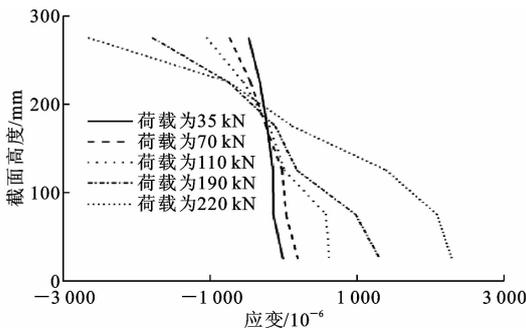


图9 SU25C应变曲线  
Fig.9 Strain curves of SU25C

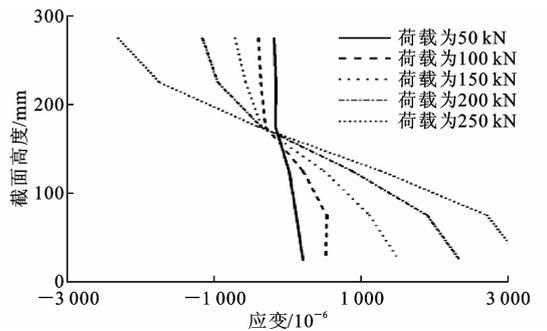


图13 SU35C应变曲线  
Fig.13 Strain curves of SU35C

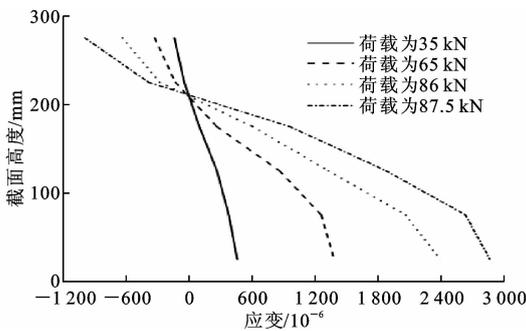


图10 N30应变曲线  
Fig.10 Strain curves of N30

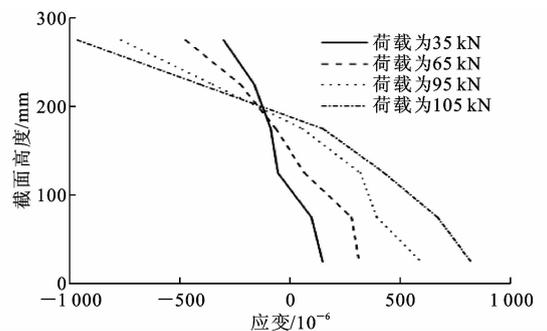


图14 SU35应变曲线  
Fig.14 Strain curves of SU35

率较低的SU35C中性轴高度较低,这说明保护层厚度对中性轴高度影响不大,受压区高度主要受锈蚀率影响。

### 2.3 二次锈蚀影响

SU30C与SU25C锈蚀率接近,但SU30C的荷载在130 kN左右突然下降,之后维持了一小段的

变形(图 4),这是由于支座严重锈蚀导致构件变形突然增大,荷载迅速降低。可见,锈蚀不均匀性会改变梁的破坏形态以及使用性能,也影响了保护层作用的发挥。SU35C 的锈蚀率比 SU25C 低 6.91%,这使得 SU35C 的刚度太大,保护层厚度的增加并未表现出显著作用,较低的锈蚀率使得梁的刚度退化更不明显。SU35 的变形曲线突然下降也是受锈蚀不均匀性的影响,SU35C 虽然经历二次锈蚀,但锈蚀程度低,因而其极限承载力较高,并表现出显著的延性特征。图 13、图 14 是其二次锈蚀前后的应变曲线,可知,锈蚀较为严重的二次锈蚀梁的受压区高度较小。SU35C 和 SU35 底部钢板应变如图 15 所示,可知,SU35C 的应变要比 SU35 的密集,相同荷载下的应变曲线要比 SU35 应变曲线低,原因为轻微的锈蚀可加强黏结作用,U 形箍的锚固进一步使各部分协调工作,更好地分担了钢板拉应力<sup>[15-16]</sup>。由此可见,二次锈蚀的影响主要体现在锈蚀程度以及不均匀性上。

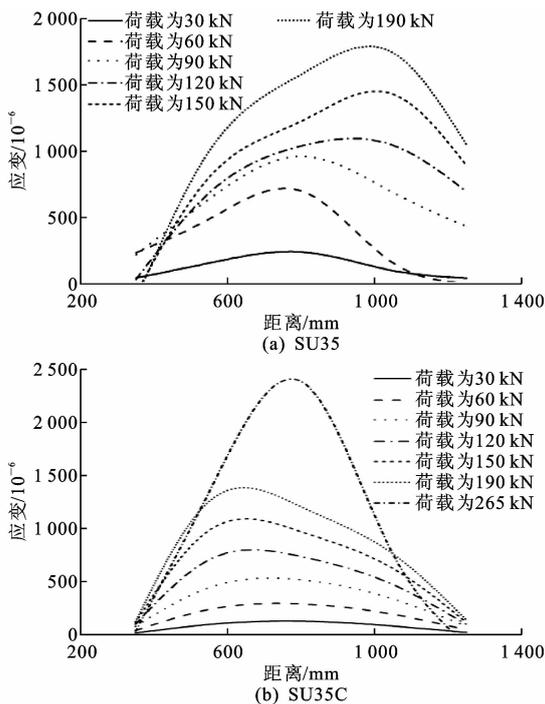


图 15 SU35 与 SU35C 钢板应变对比

Fig. 15 Comparisons of plate strains of SU35 and SU35C

### 3 弯剪加固锈蚀梁受弯性能数值模拟

采用数值模拟的方法对加固梁进行分析可对弯剪加固的作用机理展开更深入的研究,为弯剪加固锈蚀梁的变形性能和承载力计算提供评估基础。

#### 3.1 有限元模型

本文选用三维八节点的 Solid65 单元来定义混

凝土材料,采用 William-Warnke 五参数破坏准则;钢筋选用 Link180 单元,采用双线性随动强化(BKIN)模型;钢板采用三维八节点的 Solid185 单元模拟其受拉特性。对钢板的锚固采用结构胶和锚栓双重加固方式,锚栓在试验过程中并未发生变形或破坏,同时本文主要是探究加固梁的整体性能,故不考虑锚栓的作用<sup>[17]</sup>。二次锈蚀对加固梁的影响主要体现在锈蚀率和不均匀性上。因此,对二次锈蚀考虑锈蚀率和锈蚀面积对锈蚀纵筋的截面面积和屈服强度进行折减;针对支座锈蚀破坏梁,则采取实际的锈后截面面积,以考虑支座处钢筋的严重锈蚀情况。锈后钢筋的截面面积  $A'_s = (1 - \eta_s) A_s$ , 其中  $A_s$  为受拉纵筋截面面积;  $\eta_s$  为锈蚀率。根据张伟平等对锈蚀钢筋本构关系的研究,锈后钢筋的本构关系及屈服强度为<sup>[18]</sup>

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_{sc} & \varepsilon_{sc} \leq f_{yc} / E_s \\ f_{yc} & f_{yc} / E_s < \varepsilon_{sc} \leq \varepsilon_{shc} \end{cases} \quad (1)$$

$$f_{yc} = \frac{1 - 1.196 \eta_s}{1 - \eta_s} f_{y0} \quad (2)$$

式中:  $\sigma_s$  为锈蚀钢筋的应力;  $E_s$  为弹性模量;  $\varepsilon_{sc}$  为锈蚀钢筋的应变;  $f_{y0}$ 、 $f_{yc}$  分别为锈前后的屈服强度;  $\varepsilon_{shc}$  为锈蚀钢筋的强化应变,其值按文献<sup>[13]</sup>确定。

在钢筋混凝土有限元模型中,把钢筋与混凝土的节点合并且不考虑黏结滑移是较常见的有限元建模手段。由于氯离子的侵蚀作用,造成了钢筋的截面面积减小并产生了有一定润滑作用的锈胀产物,这使得钢筋与混凝土之间黏结性并不理想,存在不容忽视的滑移<sup>[19-20]</sup>。因此,有必要采用分离式建模,并寻找模拟黏结性的单元。参照已有研究<sup>[21-24]</sup>,可选用 Combin39 弹簧单元来模拟这种黏结滑移。采用黏结力-钢筋直径( $F-d$ )曲线来描述 Combin39 单元的性能, $F-d$  曲线则由黏结滑移本构黏结应力-滑移量( $\tau-s$ )曲线来确定。相对于纵向滑移,垂直于钢筋方向的滑移是微小的,不予考虑,并采用耦合方式处理。钢筋与混凝土之间的纵向黏结滑移模型采用 Houde 等<sup>[25]</sup>提出的公式

$$\tau_0(s) = (5.3 \times 10^2 s - 2.52 \times 10^4 s^2 + 5.87 \times 10^5 s^3 - 5.47 \times 10^6 s^4) \sqrt{\frac{f_c}{40.7}} \quad (3)$$

式中:  $\tau_0(s)$  为未锈蚀钢筋与混凝土的黏结应力(MPa);  $s$  为滑移量(mm);  $f_c$  为混凝土轴心抗压强度(MPa)。

对于锈蚀钢筋与混凝土的黏结,徐善华则认为应考虑黏结滑移降低系数  $\beta$ <sup>[26]</sup>,即

$$\tau(s) = \beta \tau_0(s) \quad (4)$$

$$\beta = \begin{cases} 1 + 0.5625\eta_s - 0.3375\eta_s^2 + 0.055625\eta_s^3 - \\ 0.003\eta_s^4 & \eta_s \leq 7\% \\ 2.0786^{-1.0369}\eta_s & \eta_s > 7\% \end{cases} \quad (5)$$

最终可得出 Combin39 单元的 ( $F-d$ ) 公式为

$$F = \pi d l \tau(s) \quad (6)$$

式中:  $l$  为单元沿钢筋纵向间距;  $\tau(s)$  为锈蚀钢筋与混凝土的黏结应力。

通过以上手段对锈蚀钢筋的力学性能以及钢筋与混凝土的黏结滑移进行处理,就可以较准确地模拟钢筋混凝土梁的锈蚀行为。由于采用分离式模型,故采用切分的方法将钢筋位置切出,对混凝土划分钢筋以后,再建立受拉钢筋,并用弹簧单元连接。钢板以及 U 形箍按设计位置建立,压条的作用是对 U 形箍进行固定,由于对 U 形箍采用的是与混凝土共节点的方法,故可以不考虑压条的贡献。为了防止应力集中,在支座处添加垫块。

### 3.2 有限元结果分析

模型求解完成以后,提取变形与应力,并与试验值进行对比,以验证模型的准确性并进一步探讨弯剪加固效果。

各梁荷载-挠度曲线如图 16 所示。对比有限元计算值和试验值可知,有限元模拟的变形曲线与试验值有小幅度的差距,变形曲线试验值部分位置存在小折角。这是因为有限元模拟主要考虑整体性能,并未对锚栓的紧固作用和钢板的滑移进行精细化模拟,这可能使得模型刚度较大;同时,质量锈蚀与坑蚀的关系模型和实际情况也存在一定的偏差;在计算过程中的迭代收敛也会造成小折角。总的来说,基于 Combin39 单元考虑黏结滑移所得变形曲线有限元计算值与试验值十分接近,能够较好地模拟实际情况。

为了对弯剪加固梁的有限元模型有更全面的认识,以梁 SU25C 有限元模型为例,对其钢板及钢筋的应力进行分析(下页图 17)。可知,跨中部位的钢板已经达到了理论屈服强度,U 形箍的最大应力为 201.58 MPa,尚未屈服。故底部钢板已经屈服,而 U 形箍并未屈服,仍有足够的抗剪承载力,因而可初步判定梁的破坏模式为受弯破坏。基于钢筋应力可知,钢筋也达到了锈后理论屈服强度,最终混凝土被压碎破坏。

## 4 结 语

(1) 弯剪加固能有效提高锈蚀梁刚度,延缓屈

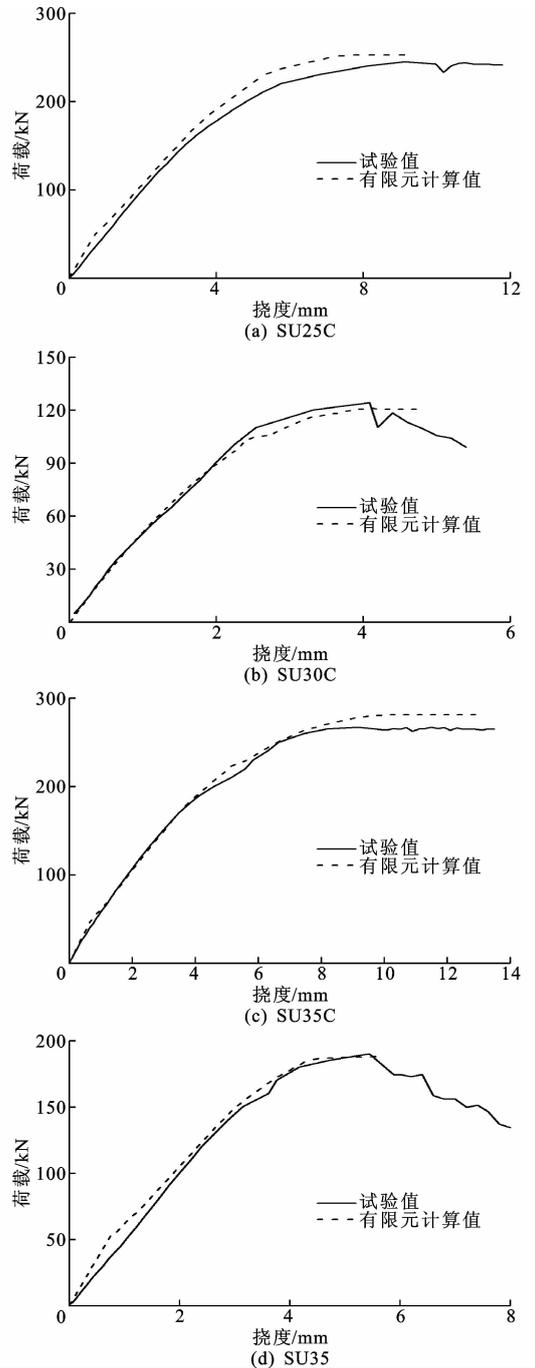


图 16 跨中变形曲线对比

Fig. 16 Comparisons of mid-span deflection curves

服,承载力增加显著。钢板对钢筋的受拉性能补偿,使加固梁的中性轴高度降低。加固前后梁的应变基本呈线性趋势,锈蚀严重时因锚固作用较弱,梁底应变略有滞后。

(2) 保护层厚度对试验梁中性轴高度以及刚度退化的影响较小,不同保护层厚度试验梁的挠度增长规律较为一致。

(3) 二次锈蚀的影响主要体现在锈蚀程度和不均匀性上。严重的锈蚀不均匀性将改变梁的破坏形

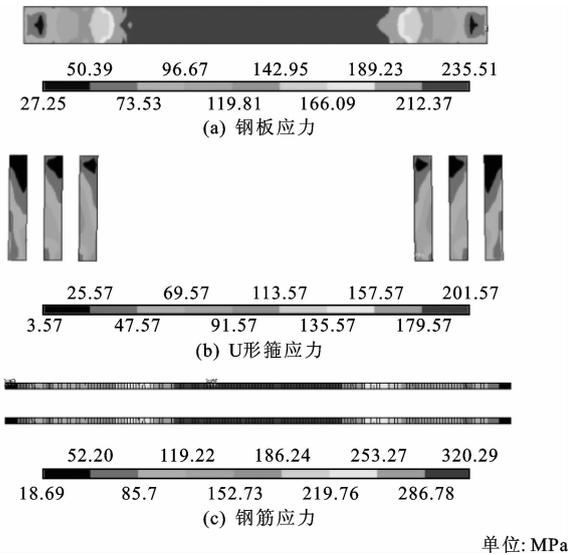


图 17 SU25C 有限元模型应力

Fig. 17 Stress of finite element model of SU25C

态;刚度退化以及极限承载力的降低主要受锈蚀率影响;轻微锈蚀则体现出延性特征,并且可以更好地发挥钢板性能。

(4)基于黏结滑移降低系数得出  $F-d$  曲线,并建立了有限元模型。变形与应力有限元计算值和试验值吻合良好,表明有限元模型能较好考虑黏结退化效应。

(5)本文研究是以质量锈蚀率来分析的,而氯盐的侵蚀具有随机性和空间变异性,考虑这些因素对结构性能退化的影响更贴合实际,是下一步的研究方向。

## 参考文献:

## References:

- [1] 孙俊祖,黄 侨,任 远. 锈蚀疲劳后混凝土中钢筋力学性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2016,48(3): 89-94.  
SUN Jun-zu, HUANG Qiao, REN Yuan. Test for mechanical behavior of steel reinforcing bar after corrosion fatigue[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(3): 89-94.
- [2] ALI M S, JI C H, MIRZA M S. Durable design of reinforced concrete elements against corrosion[J]. Construction and Building Materials, 2015, 93: 317-325.
- [3] JUAREZ C A, GUEVARA B, FAJARDO G, et al. Ultimate and nominal shear strength in reinforced concrete beams deteriorated by corrosion[J]. Engineering Structures, 2011, 33(12): 3189-3196.
- [4] 张建仁,刘 彬,王 磊,等. 箍筋锈蚀的配斜筋混凝土梁抗剪试验[J]. 中国公路学报,2013,26(6):

73-79.

ZHANG Jian-ren, LIU Bin, WANG Lei, et al. Test on shear behavior of diagonal reinforcement of RC beams with corroded stirrup[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(6): 73-79.

- [5] 彭建新,胡守旺,张建仁. 考虑空间变量的氯盐环境下 RC 简支梁桥失效概率分析[J]. 土木工程学报,2014, 47(12): 115-121.  
PENG Jian-xin, HU Shou-wang, ZHANG Jian-ren. Analysis on failure probabilities of RC simply-supported beam under chloride environment with spatial variables considered[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(12): 115-121.
- [6] 彭建新,徐 鹏,唐 皇,等. “锈蚀-加固-锈蚀”RC 梁力学行为及承载力试验[J]. 中国公路学报,2016, 29(9): 82-89.  
PENG Jian-xin, XU Peng, TANG Huang, et al. Experiment on mechanical behavior and bearing capacity of reinforced concrete beam based on “corrosion-strengthening-corrosion”[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(9): 82-89.
- [7] 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 Jian-ren, TANG Huang, PENG Jian-xin, et al. Calculation method and experimental study on corroded RC beams strengthened by steel plate anchored [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(3): 97-103.
- [8] 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 Jian-ren, TANG Huang, PENG Jian-xin, 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.
- [9] 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 Yu-dong, ZONG Zhou-hong, CHEN Hong-lei. Experimental study on shear performance of concrete beams strengthened with steel plates [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(8): 90-98.
- [10] 鲍安红,殷学纲. 考虑钢板剥离影响的加固混凝土梁抗剪承载力研究[J]. 应用力学学报,2005, 22(4): 613-617.  
BAO An-hong, YIN Xue-gang. Resist-shearing capacity of concrete beam bonded by steel-sheets [J].

- Chinese Journal of Applied Mechanics, 2005, 22(4): 613-617.
- [11] ADHIKARY B B, MUTSUYOSHI H, SANO M. Shear strengthening of reinforced concrete beams using steel plates bonded on beam web; Experiments and analysis [J]. Construction and Building Materials, 2000, 14(5): 237-244.
- [12] 张延年, 李朝阳, 刘金升, 等. 钢板加固箱型混凝土梁受弯性能研究 [J]. 应用力学学报, 2015, 32(6): 1031-1037.  
ZHANG Yan-nian, LI Chao-yang, LIU Jin-sheng, et al. Experimental study on flexural performance of box type concrete beams strengthened with steel plate [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2015, 32(6): 1031-1037.
- [13] LI L Z, LO S H, SU R K L. Experimental study of moderately reinforced concrete beams strengthened with bolted-side steel plates [J]. Advances in Structural Engineering, 2013, 16(3): 499-516.
- [14] 张伟平, 王晓刚, 顾祥林. 碳纤维布加固锈蚀钢筋混凝土梁抗弯性能研究 [J]. 土木工程学报, 2010, 43(6): 34-41.  
ZHANG Wei-ping, WANG Xiao-gang, GU Xiang-lin. Flexural behavior of corroded reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber composite sheets [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(6): 34-41.
- [15] ALMUSALLAM A A, AL-GAHTANI A S, AZIZ A R, et al. Effect of reinforcement corrosion on bond strength [J]. Construction and Building Materials, 1996, 10(2): 123-129.
- [16] CABRERA J G. Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion [J]. Cement and Concrete Composites, 1996, 18(1): 47-59.
- [17] 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.
- [18] 张伟平, 商登峰, 顾祥林. 锈蚀钢筋应力-应变关系研究 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34(5): 586-592.  
ZHANG Wei-ping, SHANG Deng-feng, GU Xiang-lin. Stress-strain relationship of corroded steel bars [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(5): 586-592.
- [19] 张燕. 冻融循环和氯盐腐蚀作用下钢筋与混凝土粘结锚固性能的试验研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2007.  
ZHANG Yan. Experimental research on the bond-anchoring performance between reinforcing bars and concrete during freeze-thaw cycle and chloride corrosion [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2007.
- [20] 何世钦. 氯离子环境下钢筋混凝土构件耐久性性能试验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2004.  
HE Shi-qin. Experimental study on durability of reinforced concrete members in chloride environment [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004.
- [21] 彭建新, 胡守旺, 宋波, 等. 锈蚀 RC 梁抗弯性能试验与数值分析 [J]. 中国公路学报, 2015, 28(6): 34-41.  
PENG Jian-xin, HU Shou-wang, SONG Bo, et al. Experimental and numerical analysis of flexural performance for corroded RC beams [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(6): 34-41.
- [22] 王依群, 王福智. 钢筋与混凝土间的黏结滑移在 ANSYS 中的模拟 [J]. 天津大学学报, 2006, 39(2): 209-213.  
WANG Yi-qun, WANG Fu-zhi. Simulation of bond-slip relationship between concrete and reinforcing bar in ANSYS [J]. Journal of Tianjin University, 2006, 39(2): 209-213.
- [23] 瞿伟廉, 王仪. 考虑钢筋锈蚀的 RC 梁承载力的非线性有限元分析 [J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(6): 73-75.  
QU Wei-lian, WANG Yi. Investigation on force-bearing capacity of corroded reinforced concrete beam by using nonlinear finite element analysis [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(6): 73-75.
- [24] 徐宁, 陈全红, 赵建昌. 纵向非均匀锈蚀梁的非线性有限元分析方法 [J]. 兰州理工大学学报, 2008, 34(3): 122-126.  
XU Ning, CHNE Quan-hong, ZHAO Jian-chang. Nonlinear finite element analysis of longitudinally and non-uniformly corroded beams [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2008, 34(3): 122-126.
- [25] HOUDE J, MIRZA M S. Study of bond-slip relationship in reinforced concrete [J]. ACI Journal, 1979, 76(1): 19-46.
- [26] 徐善华. 混凝土结构退化模型与耐久性评估 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003.  
XU Shan-hua. The models of deterioration and durability evaluation of reinforced concrete structure [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2003.