

文章编号: 1001-4888(2019)06-1061-07

## 锈蚀槽钢梁受弯性能研究\*

徐善华<sup>1</sup>, 张海江<sup>1</sup>, 白焯<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 东岭地产, 陕西 宝鸡 721000)

**摘要:** 通过 7 根锈蚀槽钢构件的受弯试验, 研究了锈蚀对槽钢梁受弯性能的影响。试验研究表明: 锈蚀槽钢梁的承载力与残余翼缘厚度具有良好的线性关系, 残余翼缘厚度可以用来表征锈蚀程度的大小。锈蚀槽钢梁的荷载—挠度曲线和弯矩—曲率曲线可大致分为两个阶段: 弹性阶段和弹塑性阶段; 有些试件的曲线在加载初期有较小的斜率。在试验研究的基础上, 提出了锈蚀槽钢梁基于残余翼缘厚度和锈蚀率的承载力计算公式; 计算公式具有较好的可靠度。

**关键词:** 锈蚀; 槽钢梁; 受弯试验; 承载力计算

**中图分类号:** TU511.3      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.7520/1001-4888-18-073

### 0 引言

长期暴露在野外的钢构件, 随着表面防腐涂层的老化和失效, 会发生严重的锈蚀<sup>[1]</sup>。锈蚀使钢板的有效厚度减小, 钢构件的截面发生削弱, 并导致钢材的屈服强度、极限强度、伸长率等参数下降, 使钢材的静力性能、疲劳性能均发生一定程度的退化<sup>[2,3]</sup>。均匀锈蚀和点蚀两种腐蚀形式的叠加会使钢构件产生很复杂的表面形貌, 而锈蚀后钢材的表面形貌特征是影响其力学性能的关键因素。因此, 国内外的学者定义了很多的参数来描述锈蚀钢材的表面<sup>[4]</sup>, 并以此为基础来研究各参数与钢构件残余强度的相关关系。在数值模拟方面, 已经可以通过扫描仪和逆向工程软件的结合使用, 将锈蚀后的钢构件在有限元模型中更加真实、形象地重现出来<sup>[5]</sup>。

目前, 国内外已经有不少学者对锈蚀后钢梁的力学性能进行了研究。文献[6,7]用机械在钢梁的腹板上人为制造出一系列圆锥形锈坑, 来研究点蚀对钢梁受弯性能和受剪性能的影响; 文献[8—10]以自然环境中发生严重锈蚀的槽钢梁为研究对象, 研究不同截面尺寸、跨度、剪跨比和锈蚀程度槽钢梁的承载性能; 文献[11]则以点蚀因子为主要参数来研究锈蚀导致的承载力损失。本文在此基础上, 以锈蚀槽钢梁的残余翼缘厚度为代表值, 来研究锈蚀对槽钢受弯承载力的影响, 并提出相应的承载力计算公式, 进一步丰富了在役锈蚀钢结构剩余承载能力的评定依据。

### 1 试验概况

#### 1.1 试件设计和材料性能

编号为 1~7 且型号相同的 7 根槽钢试件取自某一暴露在野外三年且发生严重锈蚀的钢框架, 如图 1(a) 所示; 除锈后的试件如图 1(b) 所示, 可以看出锈蚀后的表面变得粗糙不平, 分布有许多大大小小的锈坑。槽钢长度大于 600mm, 型号为 5#, 横截面尺寸 50mm×37mm×4.5mm, 平均腿厚 7mm, 如图 2 所示。在梁集中荷载和支座处设置加劲肋, 板厚为 5mm。

\* 收稿日期: 2018-04-10; 修回日期: 2018-09-01

基金项目: 国家十三五重点研发计划课题(2016YFC0701305)

通讯作者: 徐善华(1963—), 男, 教授, 博导。研究方向为工程结构耐久性。

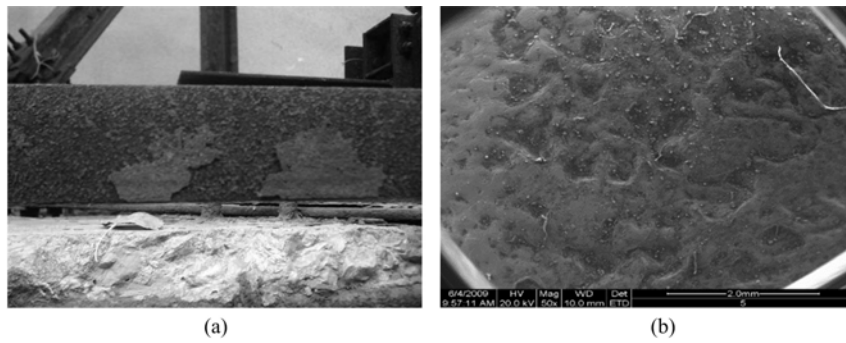


图1 锈蚀槽钢试件

Fig.1 Corroded channel steel members

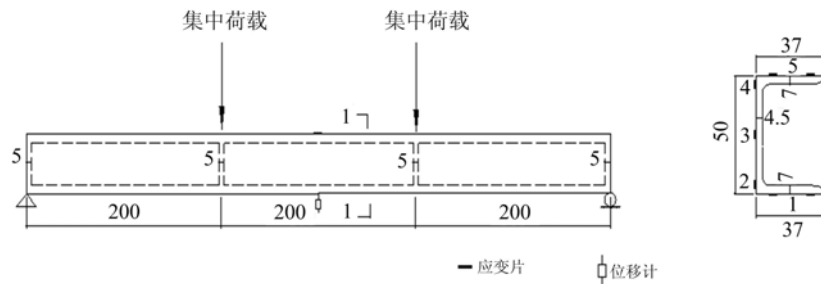


图2 试件尺寸及测点布置(单位:mm)

Fig.2 Specimen size and measuring point layout (unit: mm)

从锈蚀槽钢腹板上截取宽度为 30mm 的矩形平板,用于制作单向拉伸试件,以测取钢材的基本性能,试验结果如表 1 所示。由于试件的锈蚀程度存在差异,测得的参数也有一定的波动。

表1 材料性能

Tab.1 The material properties

试件编号	1	2	3	4	5	6	7	8
屈服强度/MPa	534.1	529.3	567.5	558.0	529.8	551.6	550.0	545.2
弹性模量/GPa	204	190	188	200	198	187	208	204
伸长率/%	14.7	15.5	16.5	13.8	15.1	15.3	13.5	15.8

注:表中屈服强度按照受拉试件的平均残余横截面积  $A_{u,w}$  计算,  $A_{u,w}$  取多次测量结果的平均值。

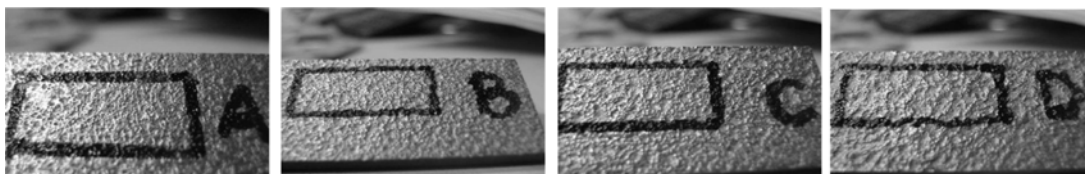


图3 锈蚀等级

Fig.3 Corrosion level

### 1.2 试件表面锈蚀形貌测量

采用在机械领域广泛使用的粗糙度检测仪对锈蚀表面进行测量。由于受弯槽钢的承载力主要取决于翼缘,而且在相近的腐蚀程度下,腹板的锈蚀对槽钢梁受弯承载力的影响远不如翼缘显著<sup>[12]</sup>,因此本文试验仅对梁的上下翼缘进行测量,分别测量一个区域,每个区域测取 8 条轨迹曲线。通过轨迹线的原始数据可以获得表面上各个点与基准点之间的距离,以此反映试件的相对锈蚀深度。锈蚀表面形貌的测量在受弯试验前进行,从每根槽钢上分别截取相应的扫描件,截取部位为试件标准尺寸以外多余的部分。为方便讨论,将每个测量区域的平均锈蚀深度分为 A、B、C、D 四个等级,每个等级代表的锈蚀深度分别为  $50\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ 、 $150\mu\text{m}$  和  $200\mu\text{m}$ ,见图 3。轨迹线见图 4,其中, X 方向为粗糙度检测仪探针滑动

的方向, Y 方向为翼缘的厚度方向; 面积等值线两侧与轨迹线围成的轮廓面积相等。各个试件的翼缘锈蚀等级和相对平均锈蚀深度见表 2。

表 2 试件锈蚀程度和残余翼缘厚度  
Tab. 2 Specimen corrosion degree and residual flange thickness

试件 编号	上翼缘			下翼缘			残余翼缘 厚度 T/mm
	参考点处翼缘 厚度 $t_r$ /mm	锈蚀 等级	相对平均锈 蚀深度/mm	参考点处翼 缘厚度 $t_r$ /mm	锈蚀 等级	相对平均锈 蚀深度/mm	
1	5.58	BC	0.25	5.62	AD	0.25	10.70
2	5.55	BD	0.30	5.59	AB	0.15	10.69
3	5.77	AC	0.20	5.71	AB	0.15	11.13
4	4.48	CC	0.30	5.23	CD	0.35	9.06
5	5.66	BC	0.25	5.68	BD	0.30	10.79
6	5.52	AC	0.20	5.58	BD	0.30	10.60
7	5.65	BB	0.20	5.64	CD	0.35	10.74

注: 锈蚀等级 AB 指翼缘上表面锈蚀等级为 A, 下表面锈蚀等级为 B, 其他同理; 锈蚀深度为翼缘上、下表面锈蚀深度总和, 即本文 2.1 节式(1)中  $t_1 + t_2$  的测量值; 残余翼缘厚度为上、下翼缘残余厚度总和。

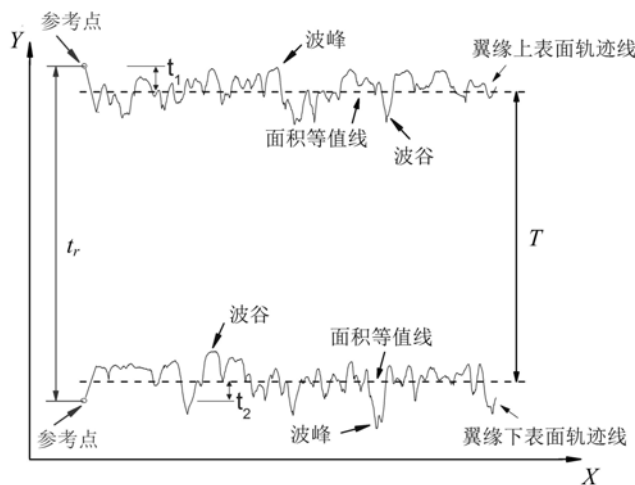


图 4 锈蚀表面轮廓和残余翼缘厚度计算原理  
Fig. 4 The corrosion surface profile and calculation principle of residual flange thickness

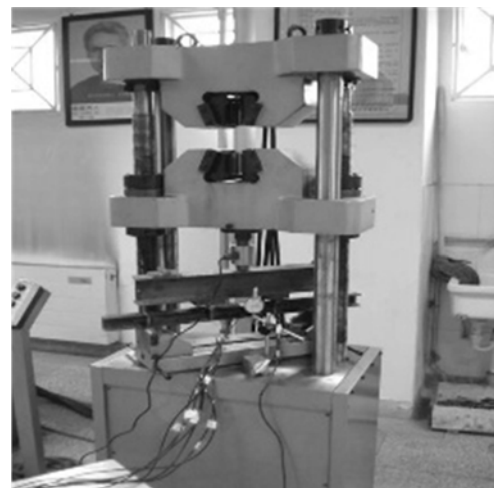


图 5 试验装置  
Fig. 5 Testing equipment

### 1.3 锈蚀槽钢的受弯承载力试验

试验通过分配梁在槽钢的三分点处进行两点对称加载, 加载点位置如图 2 所示, 两个加载点之间为纯弯段。加载装置采用 YE-200A 压力试验机, 其最大量程为 2000kN, 试验装置如图 5 所示。在跨中设置百分表, 测量该处的垂直位移; 应变片处于槽钢梁的跨中位置, 测点布置如图 2 所示。

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 槽钢翼缘的残余厚度

由于槽钢梁的受弯承载力主要由翼缘部分提供, 而且锈蚀导致材料损失大部分在离中性轴最远的上下翼缘表面, 因此, 锈蚀导致的翼缘厚度减少是槽钢梁抗弯承载力减少的主要原因<sup>[11,12]</sup>。综上, 本

文以槽钢梁锈蚀后的平均残余翼缘厚度  $T$  为代表值来探究锈蚀对其抗弯承载力的影响。

残余翼缘厚度  $T$  的计算原理见图 4。由轨迹曲线获得面积等值线距离参考点的高度  $t_1$ 、 $t_2$  后,  $T$  可由下式计算:

$$T = t_r - (t_1 + t_2) \quad (1)$$

其中,  $t_r$  为上下表面两个参考点之间的翼缘厚度。计算结果列于表 2。

## 2.2 受弯试验结果讨论

槽钢梁受弯承载力的试验结果见表 3。图 6 为残余翼缘厚度  $T$  与极限承载力  $F_u$  的散点图; 为反映锈蚀影响, 图 6 引用了文献[11]中相同尺寸的未锈蚀槽钢梁受弯承载力作为对比。从图中可以看出, 随着  $T$  的减少,  $F_u$  逐渐减小, 且二者之间基本呈线性关系。

表 3 锈蚀槽钢梁受弯试验结果

Tab. 3 The bending test results of the corroded channel steel beams

试件编号	翼缘厚度损失百分率 $\rho/\%$	屈服荷载 $F_y/\text{kN}$	极限荷载 $F_u/\text{kN}$	$F_y/F_u$	弯矩承载力 $M_u/(\text{kN} \cdot \text{m})$	极限荷载时跨中挠度 $f/\text{mm}$
1	23.57	24.18	33.34	0.73	3.33	15.00
2	23.64	27.83	33.41	0.83	3.34	19.92
3	20.50	25.65	35.41	0.72	3.54	18.80
4	35.29	17.47	28.88	0.61	2.89	14.90
5	22.93	22.88	34.36	0.67	3.44	15.20
6	24.29	23.83	33.12	0.72	3.31	17.10
7	23.29	25.01	34.01	0.74	3.40	16.10

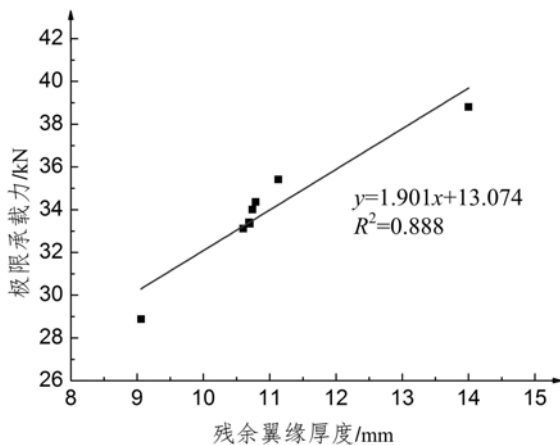


图 6 极限承载力—残余翼缘厚度关系图

Fig. 6 Diagram of the relationship between ultimate bearing capacity and residual flange thickness

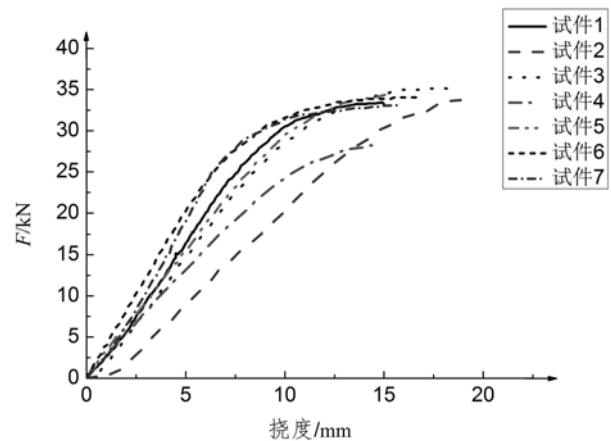


图 7 荷载—挠度关系曲线

Fig. 7 Load-deflection curves of all specimens

槽钢梁的荷载—挠度关系曲线见图 7。从图中可以看出, 在整个加载过程中, 荷载—挠度关系曲线可以分为两个阶段: 第一阶段为弹性阶段, 荷载—挠度大致呈线性关系; 第二阶段为弹塑性阶段, 挠度增长速度快于荷载增长速度, 曲线斜率逐渐减小, 最终接近水平。试件 2 和试件 3 在刚开始加载时曲线有一小段斜率较小, 原因为: (1) 槽钢梁下翼缘表面锈层的脱落导致跨中挠度的急剧增加<sup>[8]</sup>; (2) 由于压力的作用使支座产生微小位移, 导致跨中挠度的增加。试件 6、7 的荷载—挠度曲线斜率较早地发生改变, 即较早地进入弹塑性阶段, 原因可能是在翼缘处存在较大的点蚀坑, 产生应力集中, 导致该处钢材较早地达到屈服。

图 8(a) 为试件 3 的荷载—应变关系曲线(跨中应变), 其中曲线 1、5 分别是上、下翼缘两个应变片

所测数据的平均值,见图 2。由图 8(a)可以看出,在整个加载过程中,应变片 3 的位置应变基本为 0,说明中性轴仍位于腹板的形心处。加载初期,槽钢梁处于弹性阶段,曲线基本为斜直线;随着荷载的增大,曲线斜率慢慢变小,最后接近水平,说明该应变片处的钢材达到塑性屈服状态。中性轴两侧对称位置处的应变大致相等,基本满足平截面假定,离中性轴最远的地方材料最先屈服。其余试件的应变分布特征类似。

图 8(b)为试件 3 的弯矩—曲率关系曲线(跨中曲率),A 点之前曲线为斜直线,A 点之后曲线斜率慢慢变小,最后接近水平。A 点标志着槽钢梁翼缘边缘开始屈服,A 点以上塑性区逐渐向内深入,塑性区面积越来越大。其余试件曲线特征类似。

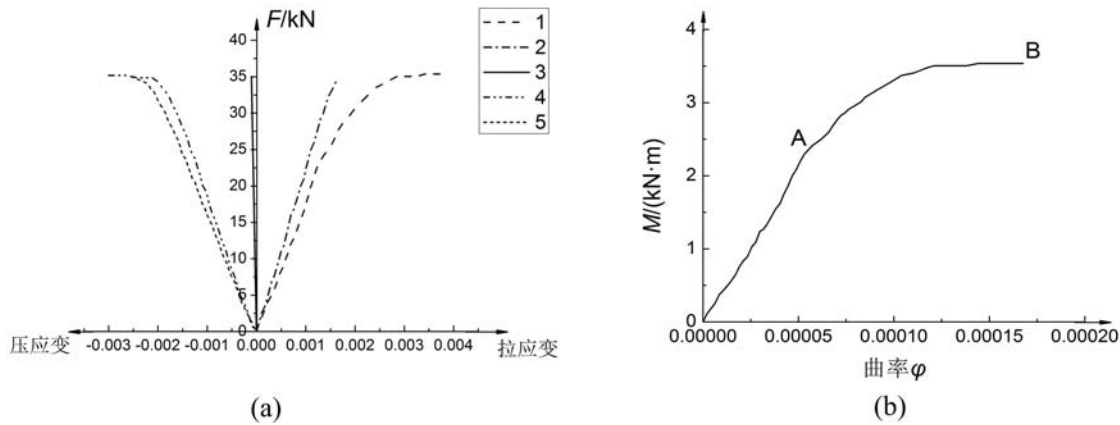


图 8 试件 3 应变分布和弯矩—曲率关系曲线

Fig. 8 Strain distribution characteristics and bending moment-curvature curve of specimen 3

### 3 锈蚀槽钢梁抗弯承载力的计算方法

#### 3.1 基于锈蚀后翼缘残余厚度的计算模型

锈蚀后槽钢梁的极限弯矩计算公式如下：

$$M_u = \gamma_x W_n f_y \tag{2}$$

其中,  $\gamma_x$  为截面塑性发展系数;考虑到锈蚀的随机性以及锈蚀表面的不规则性,  $\gamma_x$  取 1.0,即不考虑翼缘的塑性发展;  $W_n$  为按锈蚀后实际残余翼缘厚度计算的净截面模量;  $f_y$  为钢材的屈服强度。

对于  $f_y$  的取值,这里采用在经验模型中广泛使用的有效厚度  $t_e$  的概念,即

$$t_e = \frac{F_y}{W f_{y,0}} \tag{3}$$

其中,  $F_y$  为锈蚀试件屈服荷载;  $W$  为受拉试件宽度;  $f_{y,0}$  为未锈蚀钢材屈服强度,取 1.1 中实测屈服强度的平均值。将上文中计算的残余翼缘厚度  $T$  作为有效厚度,可以得到：

$$F_y = TW f_{y,0} \tag{4}$$

因此,锈蚀后翼缘钢材的名义强度  $f_y$  为：

$$f_y = \frac{F_y}{TW} = \frac{T}{T_0} f_{y,0} \tag{5}$$

其中,  $T_0$  为翼缘的初始厚度。计算结果及相对误差列于表 4,可见上述模型具有不错的计算精度。

#### 3.2 基于锈蚀率的计算模型

由于锈蚀导致的翼缘材料损失是受弯构件承载力下降的主要因素,因此可将锈蚀率  $\rho_c$  定义如下：

$$\rho_c = \frac{T_0 - T}{T_0} \tag{6}$$

其中,  $T_0$  和  $T$  分别为翼缘的初始厚度和锈蚀后的残余厚度。

对图 9 中锈蚀率  $\rho_c$  与  $M_{u,corr}/M_{u,uncorr}$  关系进行拟合,可以得到经验计算模型如下：

$$M_{u,corr} = M_{u,uncorr}(-0.686 \rho_c + 1.02289), R^2 = 0.888 \quad (7)$$

其中,  $M_{u,corr}$  和  $M_{u,uncorr}$  分别为锈蚀后和未锈蚀受弯构件的极限承载力。

计算结果及相对误差列于表 4,可见上述经验模型对本文试验结果的预测具有较好的精度。是否适用于其他腐蚀环境、其他受弯试验结果仍需要进一步验证。

表 4 锈蚀槽钢梁受弯承载力计算值与试验结果比较

Tab. 4 Comparison between the calculated value and the test results of the corroded channel beam bearing capacity

试件 编号	$M_u$ 试验值 /(kN·m)	基于残余翼缘厚度 $T$ 的计算模型			基于锈蚀率 $\rho_c$ 的计算模型		
		$W_n$ /(mm <sup>3</sup> )	$M_u$ 计算值 /(kN·m)	试验值/ 计算值	$\rho_c$ /%	$M_u$ 计算值 /(kN·m)	试验值/ 计算值
1	3.33	8051.7	3.36	0.992	23.57	3.34	0.997
2	3.34	8098.1	3.37	0.990	23.64	3.34	1.000
3	3.54	8331.8	3.61	0.979	20.50	3.42	1.034
4	2.89	7152.4	2.53	1.144	35.29	3.03	0.954
5	3.44	8088.7	3.40	1.011	22.93	3.36	1.024
6	3.31	7953.6	3.29	1.007	24.29	3.32	0.996
7	3.4	8006.6	3.35	1.014	23.29	3.35	1.015

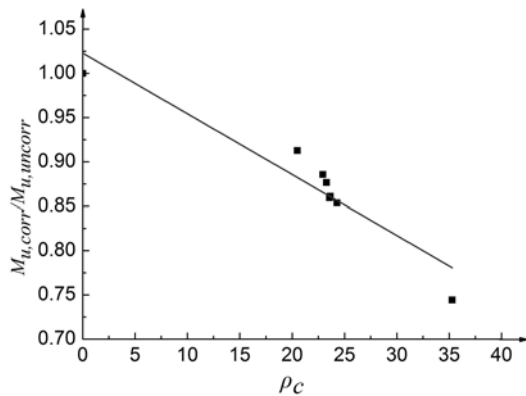


图 9 锈蚀率—承载力损失关系图

Fig. 9 Diagram of the relationship between corrosion ratio and loss of carrying capacity

态;第二阶段曲线斜率逐渐减小,最后接近水平,标志着塑性区的出现并且不断向内发展。一部分试件在加载初期曲线斜率较小,原因可能是锈层剥落导致的挠度急剧增加。

(4) 在试验研究的基础上,提出了基于残余翼缘厚度的锈蚀槽钢梁受弯承载力计算方法,建立了基于锈蚀率的承载力计算模型。

#### 参考文献:

- [1] 尹英杰. 带涂层钢结构的锈蚀特征及其材料力学性能退化规律研究[D]. 西安建筑科技大学, 2011 (YIN Yingjie. Coated steel corrosion characteristics and deterioration of mechanical properties of materials[D]. Xi'an University of Architecture and Technology, 2011 (in Chinese))
- [2] WANG Youde, XU Shanhu, WANG Hao, et al. Predicting the residual strength and deformability of corroded steel plate based on the corrosion morphology[J]. Construction and Building Materials, 2017(152):777-793.
- [3] XU Shanhu, WANG Youde. Estimating the effects of corrosion pits on the fatigue life of steel plate based on the 3D profile[J]. International Journal of Fatigue, 2015(72):27-41.
- [4] XU Shanhu, WANG Youde, XUE Qifeng. Evaluation indicators and extraction method for pitting corrosion of

## 4 结论

本文对 7 根暴露在野外三年的锈蚀槽钢梁承载性能进行研究,主要得出以下结论:

(1) 锈蚀导致的翼缘厚度减少是槽钢梁承载力下降的主要原因,残余翼缘厚度可以作为代表值来反映槽钢梁的锈蚀程度和剩余承载力的大小。

(2) 极限荷载随着残余翼缘厚度的减少而减少,二者大致呈线性关系。

(3) 锈蚀槽钢梁的荷载—挠度(跨中)曲线和弯矩—曲率(跨中)曲线基本上分为两个阶段:第一阶段曲线为斜直线,全截面材料处于弹性状态;

- structural steel[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 22(3):15-21.
- [5] 徐善华, 张宗星, 秦广冲. 考虑腐蚀钢板表面形貌的三维逆向重建及力学性能退化分析[J]. 材料科学与工程学报, 2017, 35(1):81-86 (XU Shan-hua, ZHANG Zongxing, QIN Guangchong. Three-dimensional reconstruction and degradation of mechanical properties based on real surface of corrosion steel [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2017, 35(1):81-86 (in Chinese))
- [6] Nakai T, Matsushita H, Yamamoto N. Effect of pitting corrosion on strength of web plates subjected to patch loading[J]. Thin-Walled Structures, 2006(44):10-19.
- [7] Nakai T, Matsushita H, Yamamoto N. Effect of pitting corrosion on ultimate strength of web plates subjected to shear loading[J]. Key Engineering Materials, 2007(340/341):489-494.
- [8] 武萍, 于峰. 锈蚀槽钢梁承载性能研究[J]. 钢结构, 2014, 29(6):22-27 (WU Ping, YU Feng. Study on bearing capacity of corroded channel steel beams[J]. Steel Construction, 2014, 29(6):22-27 (in Chinese))
- [9] 于峰, 黎德光, 徐国土, 等. 锈蚀槽钢梁荷载-挠度关系研究[J]. 钢结构, 2013, 28(2):78-81 (YU Feng, LI Deguang, XU Guoshi, et al. Study on load-deflection relationship of corroded channel steel beams[J]. Steel construction, 2013, 28(2):78-81 (in Chinese))
- [10] 武萍, 于峰. 锈蚀槽钢梁弯矩-曲率关系研究[J]. 钢结构, 2015, 30(204):101-103 (WU Ping, YU Feng. Study on the moment-curvature relationship of corrosive channel steel beams[J]. Steel construction, 2015, 30(204):101-103 (in Chinese))
- [11] 徐善华, 任松波, 崔焕平, 等. 锈蚀槽钢受弯承载力试验研究[J]. 实验力学, 2014, 29(4):506-512 (XU Shan-hua, REN Songbo, CUI Huanping, et al. Experimental study of bending capacity of corroded channel steel member[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(4):506-512 (in Chinese))
- [12] 白焱. 锈蚀槽钢受弯性能试验研究与理论分析[D]. 西安建筑科技大学, 2009:35-36 (BAI Ye. Experimental study and theoretical analysis on the bending behavior of the corroded channel steel[D]. Xi'an University of Architecture and Technology, 2009:35-36 (in Chinese))

## Study on bending performance of corroded channel steel beams

XU Shan-hua<sup>1</sup>, ZHANG Hai-jiang<sup>1</sup>, BAI Ye<sup>2</sup>

(1. Xi'an University of Architecture and Technology, Civil Engineering, Xi'an 710055, Shanxi, China;

2. Dongling Real Estate Agency, Baoji 721000, Shanxi, China)

**Abstract:** The effects of corrosion on bending performance of channel steel beams were studied through the bending test of 7 corroded channel steel members. The experimental results show that the bearing capacity of corroded channel steel beam has a good linear relationship with the residual flange thickness, and the residual flange thickness can be used to characterize the degree of corrosion. The load-deflection curves and moment-curvature curves can be roughly divided into two stages: elastic stage and elastic-plastic stage. The curves of some specimens have small slopes at the beginning of loading. According to the experimental study, the formula of bearing capacity based on residual flange thickness and corrosion ratio is proposed. The formula has enough reliability.

**Keywords:** corrosion; channel steel beam; bending test; calculation of bearing capacity