

不同锈蚀程度下 Q235 钢框架梁恢复力模型研究

郑山锁[†], 刘晓航, 张晓辉, 贺金川, 刘毅
(西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:为研究不同锈蚀程度下 Q235 钢框架梁的力学性能, 基于 Q235 钢框架梁抗震性能试验, 通过对 6 根锈蚀程度不同钢框架梁试件的低周反复荷载试验, 根据试验结果得到其滞回曲线、骨架曲线及刚度退化规律, 分析试验数据得到不同锈蚀程度对钢框架梁抗震性能的影响。引入循环退化指数, 拟合了具有累计损伤效应的特征点(屈服点、极限点、破坏点)公式, 提出了适用于锈蚀钢框架梁的滞回规则, 进而建立了考虑锈蚀作用的钢框架恢复力模型。其中 3 根试件进行模拟曲线与试验曲线的对比, 另 3 根试件进行模拟曲线与有限元分析的对比, 对比结果表明恢复力模型有较高的精度, 吻合情况良好, 所建恢复力模型可为不同锈蚀程度的钢框架梁分析提供理论依据, 为钢框架梁在不同锈蚀程度下的弹塑性分析奠定了基础。

关键词:低周反复加载; 钢框架梁; 锈蚀; 重复荷载; 循环退化; 恢复力模型
中图分类号:TU391; TU317.1 **文献标志码:**A

Study on Restoring Force Model of Q235 Steel Frame Beam in Different Corrosion Degrees

ZHENG Shansuo[†], LIU Xiaohang, ZHANG Xiaohui, HE Jinchuan, LIU Yi
(College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: To study the mechanical properties of Q235 steel frame girder in different corrosion degrees, low frequency cyclic loading test on steel frame girders of six trusses in different corrosion degrees was carried out on the basis of seismic performance test of steel frame girders. The hysteresis curve, skeleton curve and rigidity degeneration rule were obtained based on the text results. The effect of different corrosion degrees on seismic performance of steel frame beams was acquired by analyzing text data. The cyclic degradation index was introduced, and the characteristic point (yield point, limit point and breaking-down point) formula with cumulative damage effect was fitted. The hysteretic rule applied to rusted steel frame girders was put forward, and then the restoring force model of steel frame with the consideration of corrosive action was established. The comparison between the simulation curve and text curve for the samples of three trusses was performed, and the comparison between the simulation curve and finite element analysis for other samples of three trusses was implemented. The comparison results show that the restoring force model has high precision and better tally, the established restoring force model can provide theoretical basis for

* 收稿日期:2018-11-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678475), National Natural Science Foundation of China(51678475); 陕西省重点研发计划资助项目(2017ZDXM-SF-093), Key Research and Development Plan of Shaanxi Province(2017ZDXM-SF-093); 陕西省教育厅产业化资助项目(18JC020), Shaanxi Provincial Department of Education Industrialization Project (18JC020); 西安市科技计划资助项目(19KJ016), Xi'an Science and Technology Plan Project(19KJ016)

作者简介:郑山锁(1960—),男,陕西渭南人,西安建筑科技大学博士生导师,博士

[†] 通讯联系人, E-mail:zhengshansuo@263.net

the analysis on steel frame girders in different degree of corrosion and lay a foundation for elastic-plastic analysis steel frame girder in different degree of corrosion

Key words: low cyclic loading; steel frame girder; corrosion; cyclic loading; cyclic degradation; restoring force model

钢结构在地震作用下发生一系列非线性反应,如钢材的屈服、结构内力的变化以及结构的变形等。为了更充分地研究地震过程中结构力学性能的变化过程,必须构建在反复荷载作用下截面或材料性能变化的准确本构关系,即恢复力模型^[1]。恢复力模型是在结构或构件弹塑性反应分析时,为能更准确地反映结构的宏观动力特性,而基于大量试验数据和理论分析结果建立的分析模型^[2]。恢复力模型是结构在地震反复荷载作用下展现的定量数学关系,可以是弯矩和曲率的关系,也可以是荷载和位移的关系。恢复力模型能够直观地反映结构或构件的某些关键性能,如强度的退化和刚度的衰减,结构或构件在耗能和延性方面的变化等^[3]。

目前,对完好结构或构件的恢复力已进行了大量的试验及研究,建立了相应的恢复力模型^[4-6]。由于实际钢结构或构件普遍存在不同程度的侵蚀情况,导致与完好结构或构件的变化规律有所区别,不同锈蚀程度结构或试件的滞回曲线存在明显的差异。目前的研究成果未考虑到钢框架梁锈蚀后结构不同锈蚀程度的影响和结构锈蚀后钢框架梁刚度退化的影响。基于此,本研究对不同锈蚀程度下 Q235 钢框架梁试件进行试验和分析建模,建立考虑锈蚀影响的钢框架梁的恢复力模型,准确地描述锈蚀钢框架梁各项性能的退化情况,为研究不同锈蚀程度下钢框架梁的刚度变化及滞回性能提供理论依据。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

本试验参考《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010,采用 1:2 的缩尺比例设计了 6 根钢框架梁试件,锈蚀程度分为 6 个级别。试件均采用热轧 H 型钢制作,材料为 Q235B,钢框架梁规格为 300 mm × 150 mm × 6.5 mm × 9 mm,并在钢梁底端安置相对刚度较大的底梁,起到固定支座的作用,试件详细尺寸如图 1 所示。选择钢材锈蚀时间作为控制变量,以失重率作为量化指标,试件具体设计参数见表 1。

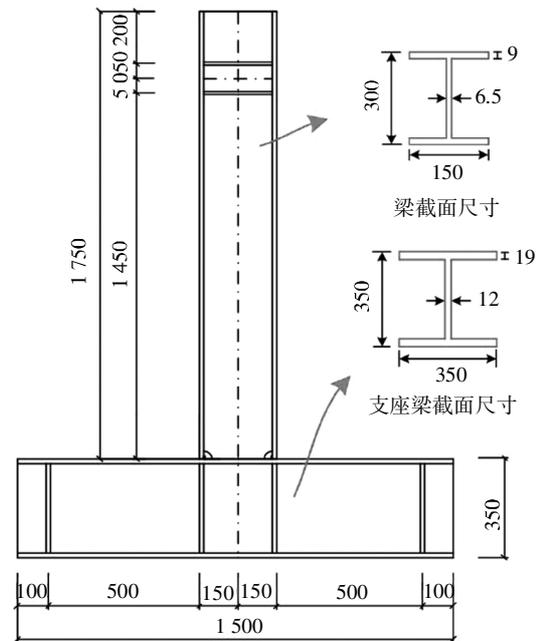


图 1 试件详细尺寸(单位:mm)

Fig.1 Detailed size of specimen(Unit:mm)

表 1 试件相关参数

Tab.1 Test parameters

试件编号	H/mm	B/mm	t_f /mm	t_w /mm	锈蚀时间/h	失重率/%
B-1	300	150	9	6.5	0	0
B-2	300	150	9	6.5	480	2.11
B-3	300	150	9	6.5	960	4.30
B-4	300	150	9	6.5	1 920	7.5
B-5	300	150	9	6.5	2 400	9.5
B-6	300	150	9	6.5	2 880	11.28

1.2 试验装置及加载制度

试验在本校的结构工程与抗震教育部重点实验室进行,采用悬臂梁式加载方案,30 t 电液伺服作动器在梁端施加水平往复荷载。在试验开始前用压梁固定底梁的梁端限制其平面内自由度,同时在底梁两端分别安设顶梁及千斤顶,这样可以有效地避免因滑移造成的侧向失稳,在试件两侧设置侧向支撑用以防止试件发生平面外失稳。钢框架梁的荷载-位

移试验数据由 MTS 系统自动采集,在试件主要控制截面的翼缘及腹板上布置电阻应变片以考察整个受力过程中应变的发展规律. 试验加载装置如图 2 所示.

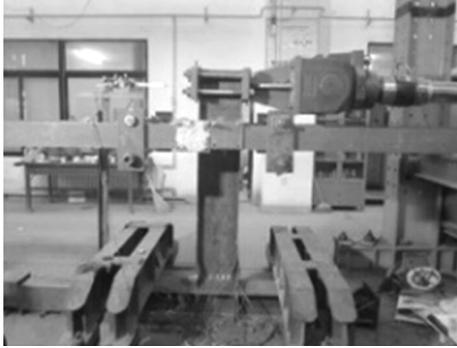


图 2 电液伺服作动器加载装置图

Fig.2 Electrohydraulic servo actuator loading device

考虑到数据采集和后期处理的工作量,为了更准确地获得试件的屈服点、峰值点和破坏点及其各自对应的荷载和位移等信息,综合考虑到每种加载方法的优劣性,最终采取基于位移的加载制度,如图 3 所示. 在试件正式加载前,应先将试件进行预加载,目的是减少试件内部的不均匀性,使荷载与变形关系趋于稳定,同时检查试验装置及仪器仪表工作是否正常.加载过程中每级位移 5 min 内循环加载 2 次,预加反复荷载值不应超过试件屈服点理论计算值的 30%^[7].

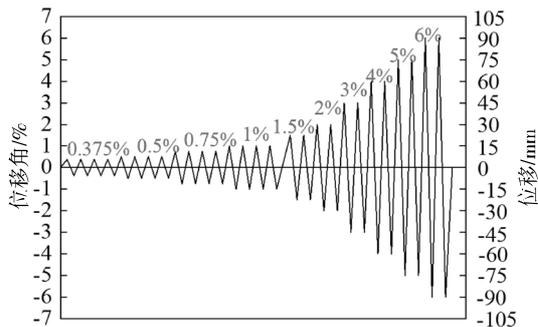


图 3 位移加载制度图

Fig.3 Displacement loading system

1.3 现象及破坏模式

在低周往复荷载作用下,不同锈蚀时间的试件均经历了弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段.前三级位移,试件均处于弹性阶段.位移级别加载到 15 mm 左右时试件进入弹塑性阶段;位移级别加载到 60 mm 时,试件 B-1~B-5 达到最大承载力,试件 B6 相对于 B-1~B-5 的最大承载力位移点下降 25.18%,为 44.89 mm;当位移级别加载到 90 mm 正向第一圈

时试件发生破坏.在弹塑性阶段试件均为左右翼缘屈曲后发生腹板屈曲,梁底部形成塑性铰,承载力开始下降.随后出现不同程度的构件裂缝、铁锈层脱落直至试件破坏,试件发生破坏过程较为缓慢且耗能性较好,属于延性破坏,如图 4 所示.

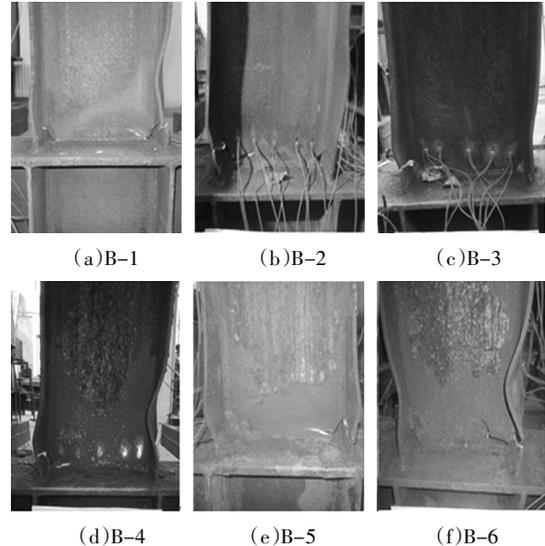


图 4 试件破坏形态

Fig.4 Specimen destruction

此外,由于锈蚀程度不同,各试件加载破坏过程又有所差异,具体表现为:随锈蚀程度增大,处于弹性阶段的加载位移下降,试件最大承载力及其位移下降.发生翼缘屈曲时,屈曲位置与梁底距离增大,试件破坏程度随锈蚀程度的增大逐渐增高.

1.4 滞回曲线

滞回曲线能够充分反映试件加载过程中结构承载力和各个特征点的变化情况;同时滞回曲线的饱满度可以反映结构的耗能能力,从而反映其抗震性能的优劣性,总的来说滞回曲线越饱满,结构的耗能性与抗震能力越好^[8-9].

图 5 给出了各试件荷载-位移滞回曲线,可知:

1)位移级别在 15 mm 内时试件处于弹性阶段,加载过程中试件没有明显变化,卸载后基本没有残余变形.

2)在加载中期,随着位移级别和循环次数的增加,翼缘、腹板等部位逐渐屈服且塑性变形逐渐增大,试件刚度发生不同程度的退化,荷载卸为零时,试件呈现残余变形.反映在荷载-位移滞回曲线上则是曲线包围面积逐渐增大.

3)试件 B-1~B-6的荷载-位移曲线均较为饱满,未出现捏缩现象,呈明显的纺锤形,且滞回曲线包围的面积较大,由此可以看出,钢梁拥有较好的延性与

耗能能力,同时随着锈蚀程度的增大,试件的峰值荷载及其曲线饱满度有所下降。

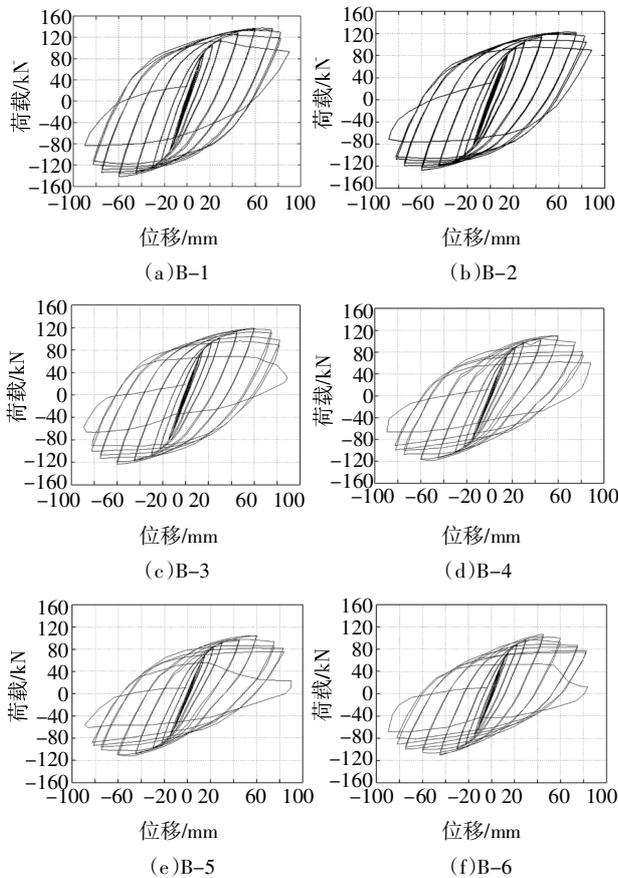


图 5 试件滞回曲线

Fig.5 Hysteresis curve of test piece

1.5 骨架曲线

骨架曲线在弹塑性分析中占据非常重要的地位,能够集中反映试件的屈服位移、屈服荷载、峰值位移、峰值荷载、极限位移和极限承载力的变化。对比不同锈蚀程度骨架曲线可得出一般性规律^[10],不同锈蚀程度钢框架梁的骨架曲线见图 6。

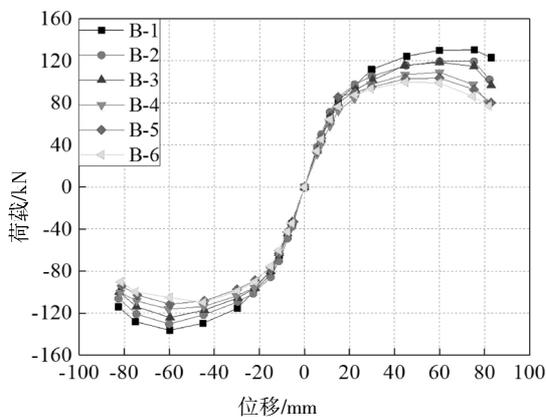


图 6 试件骨架曲线

Fig.6 Specimen skeleton curve

试件的屈服荷载、屈服位移、极限荷载和极限位移等性能指标可以从试件的骨架曲线上获取,采用通用屈服弯矩方法的原理确定屈服点,如图 7 所示^[11]。

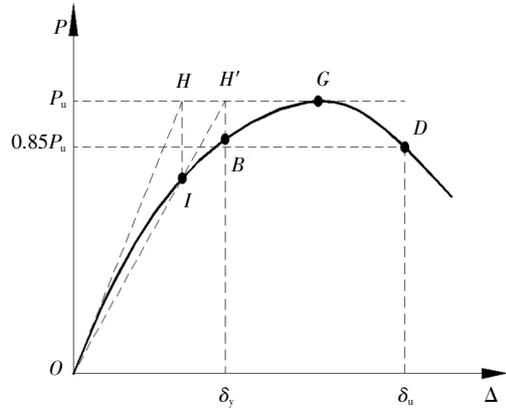


图 7 通用屈服弯矩法

Fig.7 General yield bending moment method

由图 7 可以得到以下结论:

1)在低周往复荷载作用下,钢框架梁基本经历了三个阶段,分别为弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段。试件在加载初期处于弹性阶段时,骨架曲线符合线性发展。随着加载位移级别的增大,骨架曲线呈现非线性发展趋势,达到屈服点且出现了拐点,试件的抗侧移刚度降低,进入弹塑性阶段。当加载位移级别进一步增大时,加载荷载达到峰值,随后曲线开始出现下降段,继续加载至试件发生破坏。

2)不同锈蚀程度的试件,骨架曲线在加载初期基本重合,因为加载初期试件处于弹性阶段。但随着加载位移的增大,试件出现了不同程度的刚度退化,骨架曲线开始出现了差异,且锈蚀程度越大差异越明显,试件的屈服荷载、峰值荷载、极限承载力均有所下降。

表 2 试件实测特征值及延性系数

Tab.2 Tested eigenvalues and ductility coefficients

试件 编号	屈服点		峰值点		极限点		延性 系数 μ
	P_y/kN	δ_y/mm	P_m/kN	δ_m/mm	P_u/kN	δ_u/mm	
B-1	97.77	17.42	130.04	75.07	110.53	83.00	4.76
B-2	93.87	17.13	122.42	75.02	102.24	81.21	4.74
B-3	87.65	16.99	118.69	60.07	100.89	80.03	4.71
B-4	81.75	16.86	109.14	56.42	92.77	78.73	4.67
B-5	81.57	16.70	103.67	51.28	88.12	77.82	4.66
B-6	80.53	16.30	99.79	44.89	84.82	75.77	4.65

对比表2中的6个试件可以看出,不同锈蚀程度试件的承载力均发生了变化.锈蚀程度越大,耗能能力下降越大,同时下降速率增大.锈蚀对试件刚度也产生了影响,锈蚀程度越大,试件的屈服点、峰值点、极限点的位移和荷载,以及延性系数越小,试件抗变形能力减弱,延性变差.

1.6 刚度退化

位移级别和循环次数的增加也会造成试件的刚度退化,刚度退化和强度退化都是衡量与评价结构或构件抗震性能指标^[12].根据《建筑抗震试验方法规程》(JGJ 101—96)^[13]中所述方法,定义试件滞回曲线中原点和某次循环中峰值荷载点连线的斜率来表征试件的退化.分析图8所示的刚度退化曲线,可以得到如下结论:

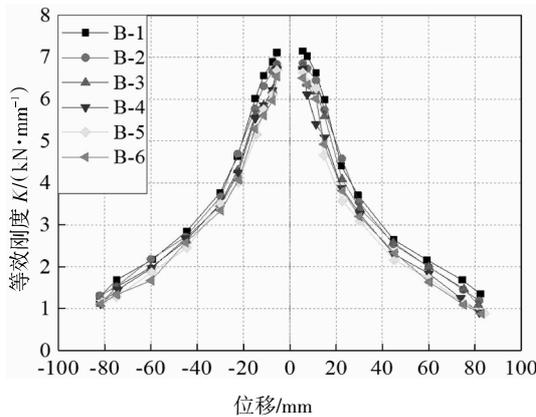


图8 等效刚度退化曲线

Fig.8 Equivalent stiffness degradation curve

1)由图8得到不同锈蚀程度的钢框架梁的刚度退化规律,在加载初期,不同锈蚀程度试件的等效刚度存在一定的差异,这是因为锈蚀导致钢材损伤进而降低试件的初始刚度,但是刚度的差异是非常小的;随着加载位移幅值的增大,不同锈蚀程度试件的刚度退化也出现了明显的差异,且锈蚀程度越大,同等加载位移下刚度的退化也越大,这一现象在B-4、B-5和B-6较为明显.这是因为试件达到屈服荷载后,随着位移幅值的增加,锈蚀引起钢材的损伤大大加剧.

2)左右两侧的刚度退化曲线并不完全对称,正向比负向大,究其原因除上述原因外,由于包辛格效应正向循环加载产生的损伤导致负向加载时试件的刚度变小.

2 恢复力模型

2.1 骨架曲线参数的确定

确定钢框架梁骨架曲线的参数是建立不同锈蚀程度下钢框架梁恢复力模型的基础.本文采取三折线骨架模型,并且假定正、负向骨架曲线对称.因试件构造相同,加载方式与破坏过程相近,未进行无量纲化处理,如图9所示.

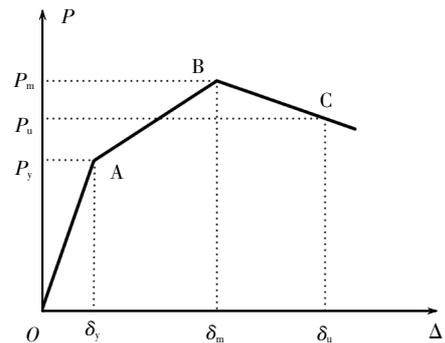


图9 骨架曲线简化模型

Fig.9 Skeleton curve simplified model

特征点计算方法如下:

屈服点(A点)

钢框架梁不同截面弯矩的确定:

$$M_y = -(L - y)P \quad (1)$$

式中: M_y 为试件截面弯矩; y 为截面距试件底部距离; L 为试件长度; P 为梁端荷载.

$y = 0$ 时试件底部屈服荷载为:

$$P_y = \frac{M_y}{L} \quad (2)$$

可得梁端屈服位移为:

$$\delta_1 = \frac{P_y L^3}{3EI} \quad (3)$$

在实际试验过程中,底梁通常会出现松动或变形等情况,导致所测得的试验位移明显大于理论位移,达不到理论刚度,故需对试验位移进行修正,取:

$$\delta_y = 1.1\delta_1 \quad (4)$$

屈服荷载与屈服位移的比值即为弹性刚度,参考结构力学中悬臂梁侧移刚度表达式的形式,弹性刚度可以表示为^[14]:

$$K_e = \frac{P_y}{\delta_y} = \frac{30EI}{11L^3} \quad (5)$$

式中: E 为弹性模量; I 为钢梁截面惯性矩.

峰值点(B点)

当梁端荷载大于弹性极限荷载时,弯矩分布依

然服从式(1),设开始进入塑性状态的截面在 $x = \xi$,则:

$$M_y = -(L - \xi)P = -M_e \quad (6)$$

以底部截面腹板发生屈服作为塑性极限:

$$M_p = W_p f_y \quad (7)$$

$$W_p = B t_f (H - t_f) + \frac{1}{4} (H - 2t_f)^2 t_w \quad (8)$$

式中: W_p 为钢框架梁全塑性截面模量; t_f 为钢框架梁翼缘板厚; B 为钢框架梁截面宽度; t_w 为钢框架梁腹板厚度; H 为钢框架梁截面高度。

在实际试验过程中,钢材屈服后出现应变硬化现象,导致所测得的试验弯矩明显大于理论弯矩,故结合试验结果取为:

$$M_{max} = 11M_p \quad (9)$$

试件理论峰值荷载为:

$$P_{max} = \frac{M_{max}}{L} \quad (10)$$

极限点(C点)

取峰值荷载的 85%作为极限荷载:

$$P_u = 0.85P_{max} \quad (11)$$

对 6 个不同锈蚀程度的试件在低周往复荷载下的试验结果进行了统计分析,并将其特征点与锈蚀率进行拟合,拟合关系如图 10 所示。

对图 10 回归统计后得到锈蚀试件的计算式为:

$$\text{屈服荷载: } P'_y/P_y = (0.775 + 0.224e^{-13.72D_w})$$

$$\text{屈服位移: } \Delta'_y/\Delta_y = 1.002 - 0.784 2D_w$$

$$\text{峰值荷载: } P'_m/P_y = (0.776 + 0.223e^{-13.95D_w})$$

$$\text{峰值位移: } \Delta'_m/\Delta_y = 3.565 - 0.001 65e^{53.98D_w}$$

$$\text{破坏位移: } \Delta'_u/\Delta_y = 4.634 + 0.219e^{-6.69D_w}$$

式中: D_w 为试件的锈蚀率。

利用拟合的公式可以得到不同锈蚀程度的试件的特征点值,其结果如表 3 所示。

从表 3 可以看出,骨架曲线上的特征点吻合较好,拟合的公式可以作为考虑锈蚀的因素进而近似确定锈蚀构件的特征点。

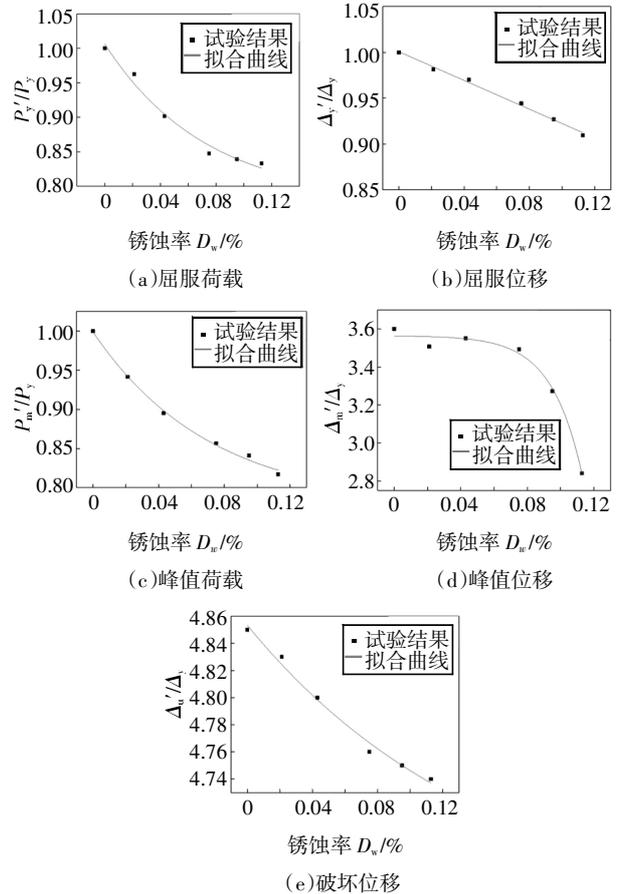


图 10 荷载、位移与锈蚀率的拟合曲线

Fig.10 Fitting curve of load, displacement and corrosion rate

表 3 计算特征点

Tab.3 Calculate feature points

试件编号	P_y /kN	P'_y /kN	P_m /kN	P'_m /kN	P_u /kN	P'_u /kN	δ_y /mm	δ'_y /mm	δ_m /mm	δ'_m /mm	δ_u /mm	δ'_u /mm
B-1	97.77	95.32	130.04	126.38	110.53	118.37	17.42	17.03	75.07	58.78	83.00	81.56
B-2	93.87	91.25	119.42	115.26	102.24	100.21	17.13	16.58	75.02	58.56	81.21	79.86
B-3	87.65	85.86	118.69	114.23	100.89	97.68	16.99	16.28	60.07	57.96	80.03	78.23
B-4	81.75	79.25	109.14	105.28	92.77	90.27	16.86	15.89	56.42	53.46	78.73	75.38
B-5	81.57	78.98	103.67	100.23	88.12	86.12	16.70	15.59	51.28	49.56	77.82	76.28
B-6	80.53	78.26	99.79	95.37	84.82	81.38	16.30	15.26	44.89	42.56	75.77	73.29

注:上标带'为计算值,其余为试验值。

2.2 滞回规则的确定

为了建立不同锈蚀程度下钢框架梁的恢复力模型,还需要考虑不同腐蚀程度下钢框架梁的滞回规则.选用顶点指向型的滞回规则,与修正 Clough 模型的滞回规则类似^[5],以此为基础建立了考虑不同锈蚀程度的钢框架梁在往复荷载作用下的强度和刚度退化规律.参照锈蚀损伤的有关假定:锈蚀钢梁同未锈蚀钢梁的滞回规则一致,不同之处在于二者在往复荷载作用下的相关性能退化程度不同,进而导致模型相关参数出现差异.在往复加载的过程中,试件会产生累积损伤效应,进而导致试件的刚度和强度的退化.与此同时,锈蚀的构件又加重了这一过程,因此锈蚀的试件与未锈蚀的试件的退化参数有所不同.本章在 Ibarra-Krawinkler(IK)模型的基础上建立试件的滞回规则.

1)循环退化指数

为了有效体现锈蚀钢框架梁试件力学性能的循环退化效应,本文引入 Rahnama 等^[6]提出的循环退化指数,即:

$$\beta_i = [E_i / (E_1 - \sum_{j=1}^i E_j)]^c \quad (12)$$

式中: c 为循环退化速率($1 \leq c \leq 2$),本试验取值为 1.5; E_i 为第 i 次循环加载时试件聚散的能量; $\sum_{j=1}^i E_j$ 为第 i 次循环加载前试件累积聚散能量; E_1 为试件能量聚散能力.

$$E_1 = \lambda f_y \delta_y \quad (13)$$

这种退化在加载初期不明显,随着耗能的累计, β_i 趋近于 1.结合名义钢材屈服强度退化规律,可得考虑锈蚀影响的循环退化指数.

2)强度退化规则

试件进入弹塑性阶段后,其屈服荷载随着位移幅值及循环次数的增加而逐级递减;并且同一位移幅值下滞回环峰值荷载亦随着循环次数的增加而不断降低,其退化规律可定义为:

$$P_i = (1 - \beta_i)P_{i-1} \quad (14)$$

式中: P_i 为第 i 次循环加载时试件的屈服荷载, P_{i-1} 为第 $i-1$ 次循环加载时试件的屈服荷载.

点 1、4、7、10 为同一位移级别第一次循环,点 2、5、8、11 为第二次循环,点 3、6、9、12 为下一位移级别的第一次循环.点 1、2、3 代表正向加载的峰值荷载点,点 7、8、9 代表负向加载的峰值荷载点,点 4、5、6 代表负向加载的屈服荷载,点 10、11、12 代表

正向加载的屈服荷载.可以看到相同位移级别第二次循环小于第一次循环的峰值荷载和屈服荷载,不同位移级别下一位移级别小于上一位移级别的峰值荷载和屈服荷载,如图 11 所示.

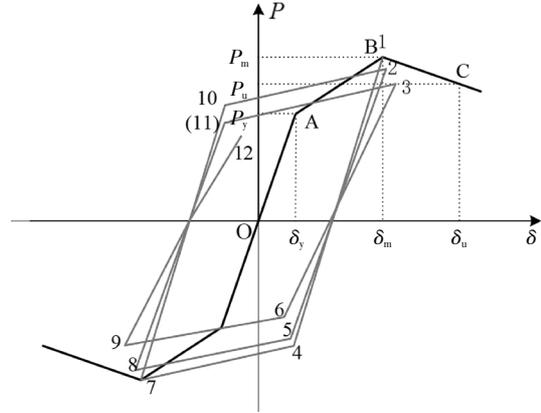


图 11 强度退化规则示意图

Fig.11 Schematic diagram of intensity degradation

3)刚度退化规则

在往复荷载作用下,试件的卸载与再加载刚度亦不断退化,可用下式描述:

$$K_i^r = (1 - \beta_i)K_{i-1}^r \quad (15)$$

$$K_i^u = (1 - \beta_i)K_{i-1}^u \quad (16)$$

式中: K_i^r 为第 i 次循环加载时试件的刚度; K_{i-1}^r 为第 $i-1$ 次循环加载时试件的刚度; K_i^u 为第 i 次循环卸载时试件的刚度; K_{i-1}^u 为第 $i-1$ 次循环卸载时试件的刚度.

K_{12} 为第一次卸载刚度, K_{23} 为第一次加载刚度, K_{45} 为第二次卸载刚度, K_{56} 为第二次加载刚度,它们的大小关系为 $K_{56} < K_{45} < K_{23} < K_{12}$,构件刚度退化规则示意图,如图 12 所示.

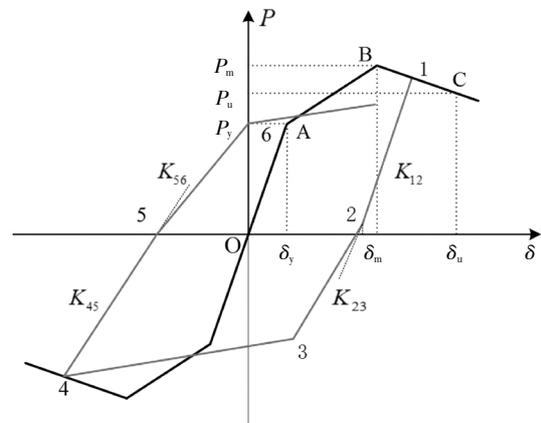


图 12 刚度退化规则示意图

Fig.12 Schematic diagram of stiffness degradation

2.3 锈蚀试件恢复力模型的确定

不同锈蚀程度试件的恢复力曲线行走路径:1)沿骨架曲线完成正向和反向各进行一次加载和卸载。2)屈服前(0-1段)加、卸载路径重合。3)屈服后从峰值荷载开始卸载,卸载刚度取为初始弹性刚度 K_e ;继续反向加载至负向屈服点 4,屈服荷载和再加载刚度由式(14)和式(16)确定。加载至骨架曲线上负向目标点 5 卸载,此时,卸载刚度按式(15)确定;而正向再加载时(6-7段),屈服荷载及再加载刚度由式(14)和式(16)重新确定。4)峰值荷载后:每个加载级别路径的计算方法与步骤 3)类似,区别在于滞回环存在累计损伤,例如 11-13 段,正向骨架曲线峰值荷载点退化至 12 点,其荷载值可按式(14)计算。如图 13 所示。

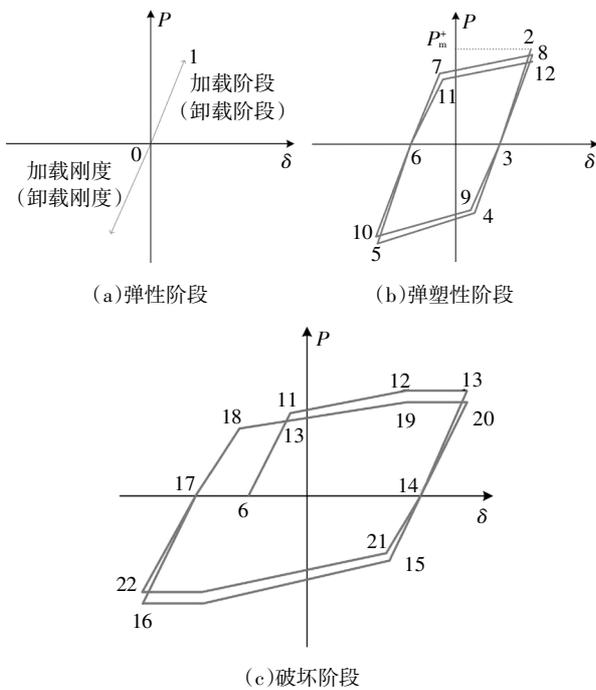


图 13 锈蚀钢框架梁恢复力模型

Fig.13 Rust steel frame beam restoring force model

2.4 锈蚀试件恢复力模型的验证

为了验证基于本节提出的恢复力模型得到的不同锈蚀程度的钢梁的滞回曲线的正确性,分别与 3 根钢框架梁的试验滞回曲线、3 根钢框架梁的有限元曲线进行对比^[7],如图 14、图 15 所示:

由图 14 和图 15 可以看出,通过计算所得的滞

回曲线和试验结果、有限元分析有较高吻合度,可以近似反映出不同锈蚀程度试件的抗震性能。但是通过计算得到的滞回曲线正、反方向的偏差较大,与实际试验不符,这是因为在建立本文的恢复力模型中没有考虑正、反方向骨架曲线不对称而导致的。

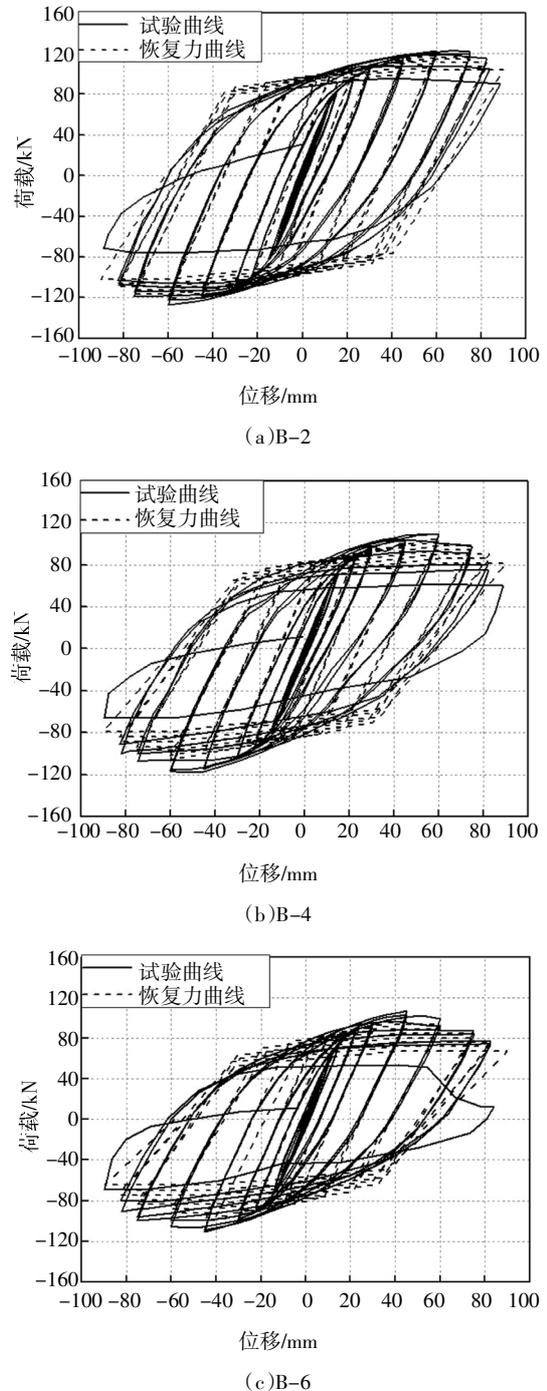


图 14 恢复力曲线与试验曲线对照图

Fig.14 Comparison of resilience curves and test curves

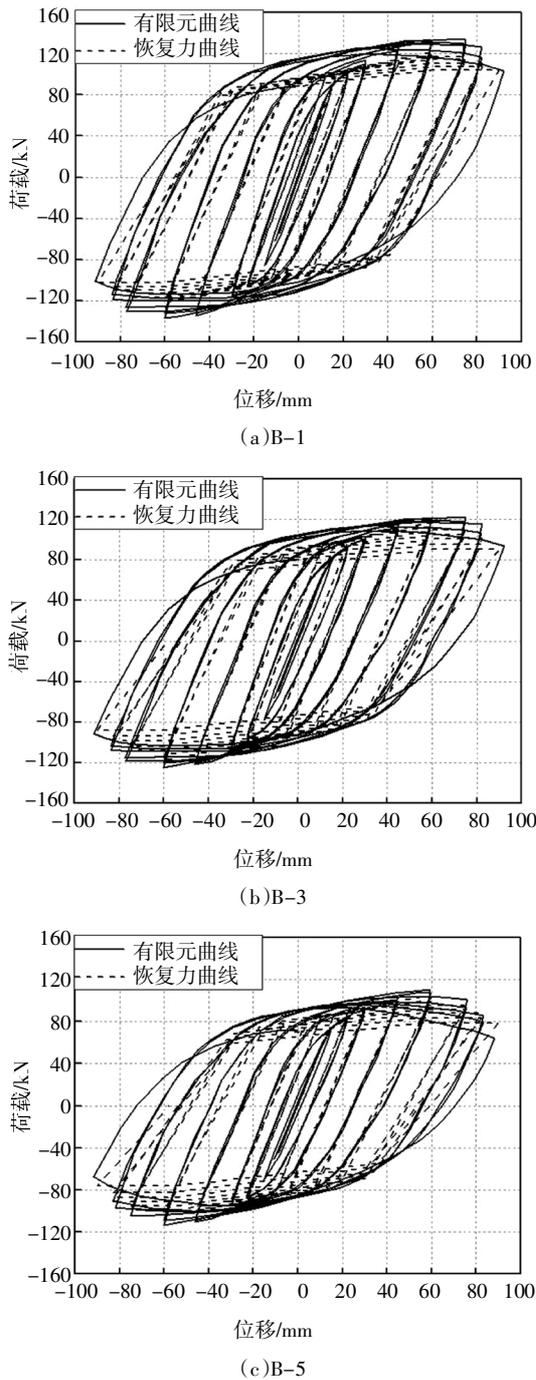


图 15 恢复力曲线与有限元曲线对照图

Fig.15 Comparison of resilience curve and finite element curves

3 结论

本文以 6 根不同锈蚀程度的 Q235 钢框架梁作为研究对象,采用现有骨架曲线特征点计算方法拟合了不同锈蚀程度试件的计算特征点公式.在 Ibarra-Krawinkler(IK)滞回模型基础上建立了考虑锈蚀

因素的恢复力模型,并进行验证.结果表明该恢复力模型可以描述试件在低周反复荷载下的材料的非线性特性,为此种试件不同锈蚀程度的弹塑性分析奠定了基础.基于以上研究得到以下结论:

1)将完好的钢框架梁试件的骨架曲线简化为考虑下降段的三折线模型,结合该模型给出了试件三个特征点的理论推导公式.

2)恢复力模型的特征点计算值与试验数据及其有限元分析吻合较好,故而该恢复力模型可以用来模拟此类试件.

3)基于 Ibarra-Krawinkler(IK)模型并考虑不同锈蚀程度的恢复力模型既能较为准确地描述由于循环加载引起的强度、刚度的循环退化,又能考虑由于锈蚀损伤引起的退化速率的变化.

4)引入循环退化指数,建立了能够考虑循环退化效应的锈蚀钢框架梁恢复力模型.计算滞回曲线与试验滞回曲线吻合较好,能够真实反映锈蚀钢框架梁的滞回性能,在一定程度上验证了该恢复力模型的适用性.研究成果为在役钢框架结构非线性地震反应分析提供了理论依据.

参考文献

- [1] 党争,梁兴文,代洁,等.考虑损伤的纤维增强混凝土剪力墙恢复力模型研究[J].工程力学,2016,33(5):124—133.
DANG Z,LIANG X W,DAI J, *et al.* Study on restoring force model of fiber reinforced concrete shear wall considering damage index [J]. Engineering Mechanics,2016,33(5):124—133.(In Chinese)
- [2] 郭子雄,杨勇.恢复力模型研究现状及存在问题[J].世界地震工程,2004,20(4):47—51.
GUO Z X,YANG Y. State-of-the-art of restoring force models for RC structures [J]. World Earthquake Engineering,2004,20(4):47—51.(In Chinese)
- [3] 唐昌辉,倪佳,程明慧.无黏结部分预应力砼梁恢复力模型的研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2016,43(11):55—60.
TANG C H,NI J,CHENG M H. Research on restoring force model of unbonded partially prestressed concrete beams [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2016,43(11):55—60. (In Chinese)
- [4] 冉红东,赵道程,梁文龙,等.延性交错桁架钢框架双槽钢组合 H 型截面弦杆恢复力模型研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2017,49(1):56—63.
RAN H D,ZHAO D C,LIANG W L, *et al.* Study on restoring force model of steel double-channel built-up chords of special staggered

- truss steel frame structure [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2017, 49(1): 56—63. (In Chinese)
- [5] 过镇海. 钢筋混凝土原理 [M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2013: 104—114.
GUO Z H. Reinforced concrete principle [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 104—114. (In Chinese)
- [6] 郑山锁, 朱揽奇, 牛丽华, 等. 酸雨腐蚀砖墙抗震性能试验及恢复力模型研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(4): 21—31.
ZHENG S S, ZHU L Q, NIU L H, *et al.* Experiment and restoring force model research on seismic behavior of brick walls affected by acid rain corrosion [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(4): 21—31. (In Chinese)
- [7] JGJ/T 101—2015 建筑抗震试验规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 10—16.
JGJ/T 101—2015 Specifying of testing methods for earthquake resistant building [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015: 10—16. (In Chinese)
- [8] 郑山锁, 左英, 张晓辉, 等. 酸性大气环境下多龄期平面钢框架结构抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2017, 34(9): 73—82.
ZHENG S S, ZUO Y, ZHANG X H, *et al.* Experimental research on the seismic behavior of multi-aged planar steel frames under acidic atmospheric environment [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(9): 73—82. (In Chinese)
- [9] 汪梦甫, 杨冕. 端部带肋方钢管混凝土柱抗震试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(11): 31—37.
WANG M F, Y M. Experimental study on seismic behavior of square concrete-filled steel tube column with end ribs [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(11): 31—37. (In Chinese)
- [10] 齐岳, 郑文忠. 低周反复荷载下核心高强混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2009, 36(12): 6—12.
QI Y, ZHENG W Z. Experimental study of the seismic behavior of concrete columns with high strength core under low cyclic loading [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2009, 36(12): 6—12. (In Chinese)
- [11] 姚谦峰. 土木工程结构试验[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 224—245.
YAO Q F. Civil engineering structure test [M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008: 224—245. (In Chinese)
- [12] 郑山锁, 张晓辉, 王晓飞, 等. 近海大气环境下多龄期钢框架柱抗震性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(4): 69—77.
ZHENG S S, ZHANG X H, WANG X F, *et al.* Experimental research on seismic behaviors of multi-aged steel frame columns in the offshore atmospheric environment [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(4): 69—77. (In Chinese)
- [13] JGJ 101—96 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997: 9—16.
JGJ 101—96 Architectural seismic test method procedure [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997: 9—16. (In Chinese)
- [14] 殷小波, 吕西林, 卢文胜. 配置十字型钢的型钢混凝土柱恢复力模型[J]. 工程力学, 2014, 31(1): 97—103.
YIN X W, LÜ X L, LU W S. Resilience model of src columns with cross-shaped encase steel [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(1): 97—103. (In Chinese)
- [15] 施炜, 陆新征, 叶列平, 等. 建筑结构倒塌分析的单自由度模型[J]. 工程力学, 2012, 29(10): 5—12.
SHI W, LU X Z, YE L P, *et al.* Single-degree-of-freedom hysteretic model for collapse analysis of building structures [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(10): 5—12. (In Chinese)
- [16] RAHNAMA M, KRAWINKLER H. Effects of soft soil and hysteresis model on seismic demands [R]. Palo Alto: Stanford University, Blume Earthquake Engineering Center, 1993: 34—37.
- [17] 郑山锁, 张晓辉, 黄威曾, 等. 近海大气环境下锈蚀平面钢框架抗震性能试验研究及有限元分析 [J]. 工程力学, 2018, 35(7): 62—73.
ZHENG S S, ZHANG X H, HUANG W C, *et al.* Experimental research and finite element analysis of the seismic behavior of corroded plane steel frames under offshore atmospheric environment [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(7): 62—73. (In Chinese)