

文章编号: 1000-4750(2017)11-0077-12

酸性大气环境下锈蚀钢框架结构振动台试验研究

郑山锁, 石磊, 张晓辉, 郑捷, 王晓飞, 左英

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西, 西安 710055)

摘 要: 为研究酸性大气环境下锈蚀钢框架结构的整体抗震性能, 设计了 2 个不同锈蚀程度(S1、S2)的 5 层空间钢框架结构。利用气雾腐蚀箱对酸性大气环境进行人工模拟并对 S2 进行加速腐蚀(S1 未锈蚀作为对比)。分别对 2 个结构进行振动台试验, 测定了不同锈蚀程度钢框架结构的动力特性及加速度、位移、应变反应和破坏特征, 研究了钢框架结构的地震响应随钢材锈蚀程度增大的变化规律。试验结果表明: 锈蚀对整体结构的影响主要表现为: 结构自振频率下降 7.46%~9.76%, 阻尼比、位移、应变增大, 加速度反应、剪力响应明显降低; S1 与 S2 的破坏形式基本相同, 均为钢框架梁端部发生局部屈曲破坏, S2 塑性变形程度较 S1 增大; 8 度多遇时, S1、S2 地震响应相差不显著, 随地震强度的增大, 两者地震响应差异越明显; 研究成果可为进行锈蚀钢框架的安全性评估提供试验支持。

关键词: 酸性大气环境; 锈蚀钢框架; 振动台试验; 地震反应; 失重率

中图分类号: TU391 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.06.0455

SHAKING TABLE TEST OF CORRODED STEEL FRAME STRUCTURE UNDER ACIDIC ATMOSPHERE ENVIRONMENT

ZHENG Shan-suo, SHI Lei, ZHAN Xiao-hui, ZHENG Jie, WANG Xiao-fei, ZUO Ying

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Shaanxi, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to study the seismic performance of corroded steel frame structures under the acidic atmosphere environment, two five-layer steel frame structures (S1, S2) with different corrosion ratios were designed. The test of S2 was implemented accelerated corrosion by aerosol corrosion box (S1 as the contrast test with no corrosion), and then shaking table tests were carried out. The dynamic properties, acceleration, displacement, strain responses and failure characteristics of two structures were obtained. The rules of seismic performance of steel frame structures with different degree of steel corrosion were also studied. The results reveal the effect of corrosion on the structure, as natural frequency of the structure is decreased by 7.46%~9.76%, while the damping ratio, displacement, and strain increase and the acceleration and shear force reduce. The failure mode of S1 and S2 is similar, as the structure has local buckling failure modes at end of beams, and the degree of plastic deformation of S2 is larger than that of S1. Under the frequent earthquake with an intensity of 8, the seismic response of S2 and S1 is similar, as the difference of seismic response between two structures is more obvious with the increase of the seismic intensity. The research results can provide experimental support for the safety

收稿日期: 2016-06-12; 修改日期: 2016-11-16

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAJ08B03); 国家自然科学基金项目(51678475); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20136120110003)

通讯作者: 石磊(1990-), 男, 湖北人, 硕士生, 主要从事防灾减灾工程与工程抗震方面研究(E-mail: 409467650@qq.com).

作者简介: 郑山锁(1960-), 男, 陕西人, 教授, 博士, 博导, 从事结构工程与工程抗震研究(E-mail: zhengshansuo@263.net);

张晓辉(1989-), 男, 陕西人, 博士生, 主要从事结构工程与工程抗震研究(E-mail: 2250232594@qq.com);

郑捷(1988-), 女, 陕西人, 硕士生, 主要从事建筑结构优化设计研究(E-mail: julie1314fl@126.com);

王晓飞(1987-), 女, 山东人, 博士生, 主要从事结构抗震与工程抗震研究(E-mail: 1046526896@qq.com);

左英(1991-), 女, 山东人, 硕士生, 主要从事结构工程与工程抗震研究(E-mail: 1329703762@qq.com).

assessment of corroded steel frame.

Key words: acidic atmosphere environment; corroded steel frame; shaking table test; seismic response; weight loss rate

钢结构具有轻质高强和建造工业化的优点。但同时也有着耐腐蚀性差的问题。近年来的工程调查实践表明, 钢结构在酸性大气环境中服役时会因钢材的锈蚀引起结构承载能力与刚度的降低。当锈蚀结构遭遇地震作用时, 其安全性会降低。据统计, 全国每年因钢结构锈蚀所造成的损失约占国民生产总值的 2%~4.2%^[1]。因此, 对经过大气腐蚀后的结构进行的损害评估是十分必要的。

目前对钢结构锈蚀的研究主要集中在锈蚀钢材力学性能的研究^[2-11], 研究表明, 随着锈蚀程度的加剧, 钢材的失重率逐渐增大, 其极限强度、屈服强度、伸长率等基本力学性能指标急剧降低。陈露^[12]针对钢结构使用的不同环境, 建立了不同腐蚀条件下钢材各项力学性能指标与锈蚀率的退化关系。沈德建等^[13]对一般大气环境下锈蚀钢筋混凝土梁中不同腐蚀程度的钢筋进行试验研究, 得出了锈蚀一级、二级钢筋屈服强度、极限强度和伸长率与失重率的关系式。

上述研究已基本揭示了不同环境下腐蚀钢筋或钢材力学性能的退化规律。但目前我国学者对腐蚀钢构件及结构层面的研究几乎是空白, 迫切需要进行这方面的研究。鉴于此, 本文设计了 2 个不同锈蚀程度(S1、S2)的 5 层空间钢框架结构, 其中 S1 为对比试件, 不进行腐蚀, S2 采用室内大气环境模拟的方法对其进行腐蚀。通过对 S1、S2 进行地震模拟振动台试验, 研究结构的动力特性以及结构在各水准地震作用下的动力反应和破坏形态, 分析锈蚀损伤对钢框架结构地震响应的影响。

1 试验概况

1.1 结构简介与模型设计

S1、S2 的原型结构相同, 均为一单跨单开间 5 层空间钢框架结构(按 8 度抗震设防设计), 平面尺寸为 6.0 m×4.5 m。首层层高为 4.2 m, 其余各层高度均为 3.6 m。梁、柱钢材均采用 Q235B, 1 层~2 层框架柱记为 GZ1, 3 层~5 层框架柱记为 GZ2。试验模型结构的缩尺比例为 1/3。模型平面布置情况如图 1 所示, 钢材采用与原型结构相同的 Q235B 钢材, 考虑所用材料不变而模型应力需相似的情况,

按钢结构构件刚度等效的原则进行设计。得到原型与模型结构的截面尺寸情况见表 1。模型总高度为 6.2 m。

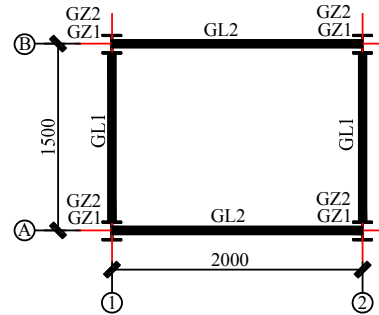


图 1 模型平面布置图

Fig.1 Model plan layout

表 1 钢框架原型和模型截面尺寸

Table 1 Dimensions of test model

构件编号	原型结构截面尺寸	模型结构截面尺寸
GZ1	H500×500×16×18	HW150×150×7×10
GZ2	H400×400×14×16	HW125×125×6.5×9
GL1、GL2	H450×220×10×12	HN126×60×6×8

钢框架原型结构的总质量为 212.885 t, 根据相似理论, 有 $S_m = S_E S_L^2$, 其中 $S_L = 1/3$, $S_E = 1$, 则 $S_m = 1/9$ 。换算得到模型的质量应为 23.65 t, 综合考虑振动台的台面尺寸、最大承载力等因素, 模型采用欠质量(配重)模型^[14]。模型实际总质量为 8.3589 t(结构自重 1.299 t; 混凝土配重: 1 层~4 层均为 1.661 t, 5 层为 0.415 t), 故模型结构与原型结构的正应力相似比 $S_\sigma = 0.353$ 。为了消除模型质量达不到设计要求所引起的与原型结构在受力性能上的差异, 采用改变输入加速度峰值及时间缩尺比等措施。试验的相似常数见表 2。

表 2 模型相似常数

Table 2 Similitude scale factors

物理参数	相似常数	物理参数	相似常数
弹性模量 E	1.000	时间 t	0.343
竖向压应力 σ	0.353	积分步长 Δt	0.343
竖向压应变 ϵ	0.353	反应加速度 a'	2.830
几何尺寸 L	0.333	位移 X	0.333
质量 m	0.039	位移角 θ	1.000
面积 S	0.111	地震作用 F	0.111
刚度 K	0.333	剪力 V	0.111
剪应力 τ	1.000	输入加速度 a	2.830
频率 f	2.910	阻尼比 ζ	0.500

1.2 酸性大气环境模拟试验

1.2.1 试件设计

根据国家标准《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》(GB/T2975-1998)^[15], 分别从柱的腹板、翼缘和梁的腹板切取试样, 试样尺寸规格如图 2 所示。

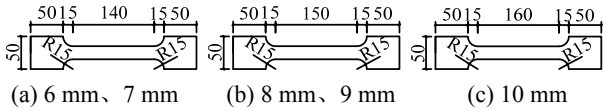


图 2 不同部位的切样尺寸

Fig.2 Cutting sample size of the different parts

1.2.2 室内加速腐蚀试验方案

为缩短腐蚀试验时间并较真实的模拟酸性大气环境, 试验在西安建筑科技大学耐久性试验室采用室内加速腐蚀方法进行。综合考虑构件和人工气候室的空间大小, 以及保证材性试件与钢框架结构具有相同的腐蚀环境, 故将标准材性试件连同全部框架梁、框架柱一起放置于气雾模拟试验室进行模拟酸性大气环境试验。为防止构件连接部位因腐蚀后影响施焊质量, 在进行室内加速腐蚀试验之前将梁柱焊接部位用塑料包住。腐蚀完成后, 将各腐蚀构件焊接成整体。

为模拟酸性大气环境, 依据 GB/T24195-2009《金属和合金的腐蚀酸性盐雾、“干燥”和“湿润”条件下的循环加速试验》^[12]配制酸性盐雾试验溶液, 具体配制方法如下:

1) 5%中性氯化钠溶液, 在温度为 $25^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 时电导率不高于 $20\ \mu\text{s}/\text{cm}$ 的蒸馏水或者去离子水中溶解 NaCl, 配制成浓度为 $50\ \text{g}/\text{L}\pm 5\ \text{g}/\text{L}$ 的溶液。 25°C 时, NaCl 溶液的密度范围为 $1.029\sim 1.036$ 。如果制备溶液在 $25^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 的 PH 值超过 $6.0\sim 7.0$ 的范围, 应检测水中杂质的含量。

2) 酸化, 在 $25^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$, 溶液 PH 值应调整至 3.5 ± 0.1 , 向 10 L, 5%中性氯化钠溶液中添加下列试剂: a) 12 mL 硝酸溶液(HNO_3 , $\rho=1.42\ \text{g}/\text{m}^3$); b) 17.3 mL 硫酸溶液(H_2SO_4 , $\rho=1.84\ \text{g}/\text{m}^3$); c) 10% 的氢氧化钠溶液($\rho=1.84\ \text{g}/\text{m}^3$), 调整溶液的 PH 值为 3.5 ± 0.1 (大约需要 300 mL 氢氧化钠溶液)。

依据文献^[12]模拟干湿循环, 单个循环的试验时间为 8 h, 气候模拟试验的具体试验条件如表 3 所示。

1.2.3 锈蚀后的试件与结构

在对材性试件和模型结构 S2 同步加速腐蚀 60 天后, 试件腐蚀前后对比照片见图 3, 未锈蚀模型

结构与锈蚀模型结构对比照片见图 4。

表 3 模拟酸性大气环境试验条件

Table 3 Simulated test conditions of acidic atmosphere

内容	试验条件
酸性盐雾条件	$35^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ PH 值为 3.5 ± 0.1 ; 盐浓度为 $50\ \text{g}/\text{L}\pm 5\ \text{g}/\text{L}$
“干燥”条件	温度: $60^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ 湿度: $<30\%\text{RH}$
“湿润”条件	温度: $50^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ 湿度: $>95\%\text{RH}$ 总试验时间 8 h
单循环时间和具体内容	酸性盐雾 2 h “干燥”条件 4 h “湿润”条件 2 h
试验状态转换时间间隔	盐雾-干燥: $<30\ \text{min}$ 干燥-湿润: $<15\ \text{min}$ 湿润-盐雾: $<30\ \text{min}$



(a) 腐蚀前 (b) 腐蚀后

图 3 腐蚀前后试件对比

Fig.3 The comparison of two specimens



(a) 未锈蚀结构 (b) 锈蚀结构

图 4 未锈蚀结构与锈蚀结构对比

Fig.4 The comparison of two models

1.2.4 锈蚀试件的处理

以失重率 D_w 来定量表示钢材材性试件的锈蚀程度^[12], 具体计算式为:

$$D_w = (W_0 - W_1) / W_0 \quad (1)$$

式中: W_0 为锈蚀前钢片质量; W_1 为除锈后的钢片质量, 失重率越大, 表示钢材锈蚀越严重。为获得锈蚀试件的失重率, 采用稀释盐酸溶液浸泡试件对其除锈。除锈后的试样, 如图 5 所示。



(a) 除锈后板材 (b) 除锈后板材表面锈坑

图 5 除锈后试件

Fig.5 The specimen after removing rust

根据试验的要求, 在对钢材试件进行腐蚀之后测量其失重率, 取平均值结果如表 4 所示。

表 4 失重率平均值
Table 4 The average of weight loss rate

锈蚀天数/d	试件厚度				
	6 mm	7 mm	8 mm	9 mm	10 mm
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
60	0.1826	0.1522	0.1395	0.1210	0.1078

1.2.5 锈蚀钢材拉伸试验及力学性能退化规律

按《金属材料室温拉伸试验方法》(GB/T 228.1-2010)^[16]的有关规定进行单向拉伸试验。试验在西安建筑科技大学材料试验室完成, 仪器采用万能试验机, 应变采集器采用 DH3818 静态应变仪。拉伸试验过程如图 6 所示。



(a) 试件机械打点 (b) 拉伸试件
图 6 单向拉伸试验

Fig.6 Uniaxial tension test

由于锈蚀钢材的实际强度(实际屈服强度和实际极限强度)与其锈蚀后的钢材截面和坑蚀形态有关, 从而导致实际强度与钢材锈蚀率之间的关系离散性较大, 因此本文采用名义强度进行研究。名义强度是实际荷载与相应钢材截面面积(假定腐蚀前后钢材截面面积没有改变)的比值。锈蚀后钢材的屈服应力、极限强度、伸长率以及弹性模量随失重率增大的衰变规律如图 7 所示。

锈蚀后钢材力学性能指标拟合公式, 见下式所示:

$$\begin{cases} f'_y / f_y = 1 - 0.802D_w \\ f'_u / f_u = 1 - 0.955D_w \\ \delta' / \delta = 1 - 1.390D_w \\ E'_s / E_s = 1 - 0.836D_w \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_y 、 f'_y 分别为锈蚀前后的钢材屈服强度; f_u 、 f'_u 分别为锈蚀前后的钢材极限强度; δ 、 δ' 分别为锈蚀前后的钢材伸长率; E_s 、 E'_s 为锈蚀前后钢材的弹性模量; D_w 为钢材失重率。

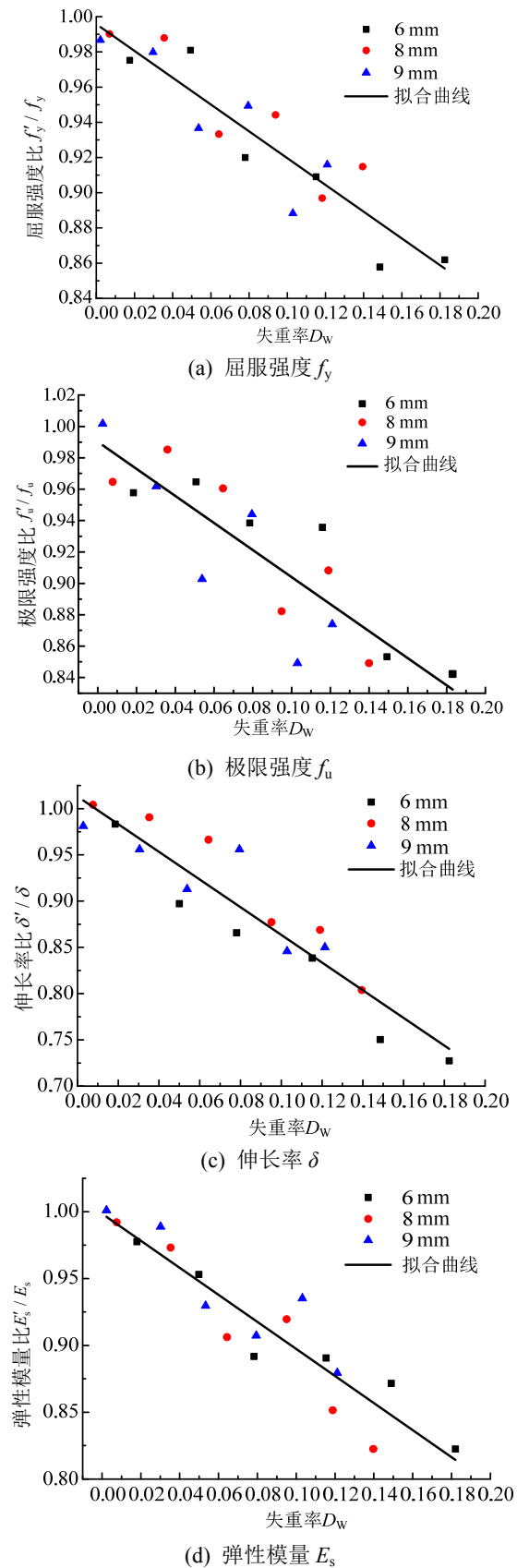


图 7 钢材力学性能与失重率的回归关系
Fig.7 Regression relationship of mechanical properties of the steel and weight loss rate

1.3 加载方案

1.3.1 试验振动装置

振动台试验在西安建筑科技大学结构工程与抗震教育部重点实验室进行, 振动台的台面尺寸为 4.1 m×4.1 m。试验模型及加载装置见图 8。



(a) 未锈蚀结构 (b) 锈蚀结构

图 8 试验模型及加载装置

Fig.8 Test model and loading device

1.3.2 试验输入地震波

本次试验采用三向地震波输入, 综合考虑试验模型特点及试验目的等因素, 选取两条实际强震记录——EL Centro 波(时间为 53.44 s)、Taft 波(时间为 54.26 s)和一条人工合成地震波——兰州波(16.6 s)作为输入振动台台面激励。从图 9 所示的三条地震波的反应谱包络来看, 三条波的反应谱曲线在结构相应周期内与设计反应谱吻合较好, 因此可以用这三条波的反应均值对结构在地震作用下的抗震性能进行分析。

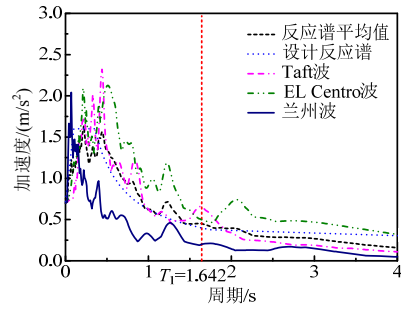


图 9 地震波加速度反应谱与设计反应谱对比

Fig.9 Comparison of acceleration spectra between earthquake waves and design specification

1.3.3 试验方法

考虑到试验结构安全和性能等因素, 采用逐步增大地震波峰值加速度的加载方法。试验加载工况按照 8 度多遇、8 度基本和 8 度罕遇的顺序分三个阶段对模型结构进行地震模拟振动台试验。在每个试验阶段, 由台面依次输入 Taft 波、EL Centro 波和兰州波。地震波的持续时间按相似关系压缩为原地震波时间的 0.34 倍。前两个阶段为三向地震动输入, 且 x 向、y 向、z 向峰值加速度大小之比为 1 : 0.85 : 0.65。第三阶段为双向水平地震动输入, x 向、y 向峰值加速度大小之比为 1 : 0.85, 各试验工况下, 均按有关规范的规定及模型试验相似关系的要求对台面输入的加速度峰值进行调整, 在不同阶段地震波输入前后, 分别对模型进行白噪声扫频, 测量模型的自振频率、阻尼比和振型等动力特性参数。试验加载工况如表 5 所示。

表 5 试验工况和主要试验结果
Table 5 Test cases and main test results

试验工况	烈度	地震波	主震方向	地震输入值/g						备注
				模型 x 向		模型 y 向		模型 z 向		
				设定值	实际值	设定值	实际值	设定值	实际值	
1	—	WN	—	0.05	—	0.05	—	0.05	—	三向白噪声
2	8 度多遇	TE	x 向	0.198	0.221(0.215)	0.168	0.184(0.179)	0.129	0.145(0.133)	三向地震
3		EL	x 向	0.198	0.206(0.202)	0.168	0.197(0.171)	0.129	0.132(0.148)	三向地震
4		LE	x 向	0.198	0.226(0.220)	0.168	0.201(0.187)	0.129	0.151(0.137)	三向地震
5	—	WN	—	0.05	—	0.05	—	0.05	—	三向白噪声
6	8 度基本	TE	x 向	0.566	0.588(0.569)	0.481	0.521(0.488)	0.368	0.437(0.388)	三向地震
7		EL	x 向	0.566	0.572(0.581)	0.481	0.530(0.491)	0.368	0.411(0.391)	三向地震
8		LE	x 向	0.566	0.594(0.577)	0.481	0.531(0.479)	0.368	0.398(0.351)	三向地震
9	—	WN	—	0.05	—	0.05	—	0.05	—	三向白噪声
10	8 度罕遇	TE	x 向	1.132	1.277(1.189)	0.962	1.120(0.995)	—	—	双向地震
11		EL	x 向	1.132	1.096(1.138)	0.962	1.011(1.031)	—	—	双向地震
12		LE	x 向	1.132	1.035(1.141)	0.962	0.947(0.959)	—	—	双向地震
13	—	WN	—	0.05	—	0.05	—	0.05	—	三向白噪声

注: 1) WN 为白噪声, TE 为 Taft 波, EL 为 EL Centro 波, LE 为兰州波;

2) 输入地震波的实际值有两项: 括号外的为未锈蚀结构实际值, 括号内的为锈蚀结构实际值。

1.4 测点布置及量测内容

根据试验模型结构特点以及试验条件,沿模型结构分层布置各种传感器,分别用于测试试验模型的动力特性、各楼层的位移、加速度与应变反应。各传感器的布置情况详见图 10。具体如下:

1) 位移传感器布置在每个楼层楼板的中心位置,用于测量结构 x 向、 y 向的整体位移响应。

2) 加速度传感器共 20 个。其中在各楼层梁柱节点位置处布置 x 向和 y 向加速度计(12 个)。在台面中心位置处布置 3 个,分别用于测量输入台面 3 个方向的加速度大小。在各楼层中心位置处分别布置一个(5 个),用于测量各楼层的 z 向加速度响应。

3) 应变片传感器共 26 个,其中 12 个布置在 1 层~3 层 x 向、 y 向梁端上下翼缘处,14 个布置在 1 层~3 层柱上下端的内外翼缘处。

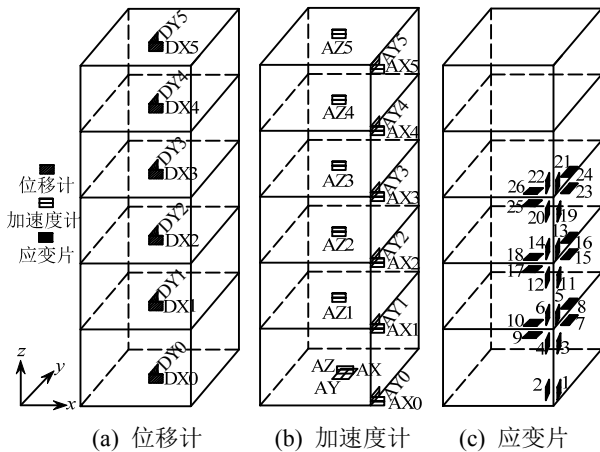


图 10 试验测点布置图

Fig.10 The layout of measuring points

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

试验过程中,对未锈蚀结构 S1 和锈蚀结构 S2 的位移响应和结构屈曲破坏情况进行观察,主要试验现象总结如下:各工况下, S2 的振动明显大于 S1,说明锈蚀使结构刚度发生退化,位移响应增大。

1) 8 度多遇地震作用下,两个模型结构整体有轻微晃动,位移响应较小,白噪声扫频试验结果表明结构自振频率基本不变,可认为该阶段结构处于弹性工作状态。工况 4 完成后,分别对 S1、S2 的构件屈曲情况进行观察,无异常现象出现。

2) 在 8 度基本地震作用时,输入 Taft 波过程中,未锈蚀与锈蚀模型结构位移反应均有所增大,但持续时间较短。输入 EL-Centro 波过程中,两结构晃动十分明显且可以观察到的振动时间明显延长,顶

层混凝土配重块开始出现竖向振动且有小块混凝土脱落。地震波加载结束后,由白噪声扫频结果知模型结构自振频率减小,说明模型结构开始出现轻微损伤,进入了非线性反应阶段。工况 8 完成后,分别对 S1、S2 的构件屈曲情况进行观察,发现 S1 在 2 层 x 向梁靠近梁柱节点的梁根部上下翼缘出现轻微屈曲。S2 则同时在 2 层 x 向与 y 向梁,靠近梁柱节点的梁根部上下翼缘出现局部屈曲且 S2 楼层 1、楼层 2 的框架梁节点域加劲肋处及附近腹板处的锈层开始脱落(图 11(a))。

3) 在 8 度罕遇地震作用时, S1、S2 对三条地震波的位移反应均非常强烈,且振动的的时间进一步增加,并伴随强烈的吱吱声。各层混凝土与钢框架之间的碰撞也越发剧烈,破碎脱落的小块混凝土增多。白噪声扫频试验结果亦表明结构损伤增大,刚度退化较大,结构处于弹塑性状态,但结构整体未倒塌。工况 12 完成后,分别对 S1、S2 的构件屈曲情况进行观察,发现原有的局部屈曲进一步发展,同时也出现了新的局部屈曲(图 11(b)),即 S1 在 3 层 x 向梁靠近梁柱节点的梁根部上下翼缘出现轻微屈曲。S2 则同时在 3 层 x 向与 y 向梁,靠近梁柱节点的梁根部上下翼缘出现局部屈曲且 S2 在框架柱靠近梁柱节点的翼缘处及梁端腹板处锈层脱落范围增大。



(a) 锈层脱落

(b) 梁翼缘处局部屈曲

图 11 试验现象

Fig.11 Phenomena of model structure

2.2 动力特性

不同水准地震作用前后,均用白噪声对模型进行扫频试验。通过对各加速度测点的频谱特性、传递函数以及时程反应的分析,得到模型结构 x 向在不同水准地震作用前后的自振频率、阻尼比见表 6。

由表 6 可以看出:

1) 随着输入地震动强度的增大,模型结构自振频率逐渐减小,阻尼比逐渐增大;8 度小震后,结构自振频率与震前基本相同,说明结构在小震下基本保持弹性;8 度中震后,结构频率略有下降,说

明结构部分构件进入塑性。

2) 与未锈蚀模型结构相比, 锈蚀结构刚度退化较大。由第一次白噪声可知, 锈蚀模型结构比未锈蚀结构刚度退化 14.4%, 第 3 次、第 4 次白噪声后锈蚀结构相比未锈蚀结构刚度退化分别为 16.5%、18.6%。说明锈蚀损伤对结构刚度影响较大。

3) 对比未锈蚀与锈蚀模型第 1 次、第 3 次、第 4 次白噪声扫描的结果, 可以看出, 锈蚀对钢框架结构的动态性能有较大影响, 对于结构的自振频率, 锈蚀结构比未锈蚀结构分别减小了 7.46%、8.66%、9.76%。以上现象说明: 锈蚀使钢框架结构刚度减小, 进而导致结构自振频率降低。且随着输入地震动强度的增大, 结构自振频率降低幅度有增大的趋势。

表 6 未锈蚀、锈蚀模型结构自振频率、阻尼比

Table 6 The vibration frequency and damping ratios of two models

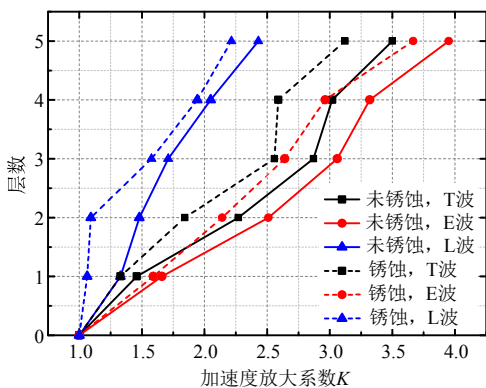
白噪声	未锈蚀结构		锈蚀结构	
	频率/Hz	阻尼比	频率/Hz	阻尼比
第1次	1.8013	0.0116	1.667	0.0218
第2次	1.8013	0.0136	1.667	0.0231
第3次	1.6412	0.0245	1.499	0.0377
第4次	1.4661	0.0417	1.323	0.0498

2.3 加速度反应

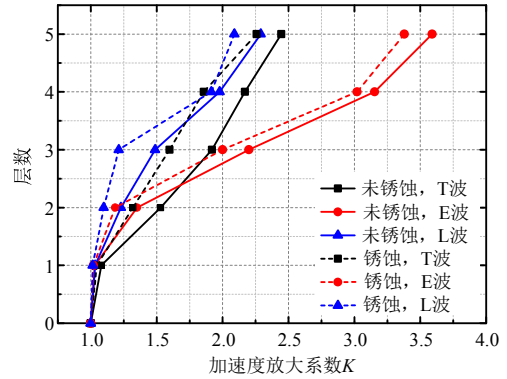
在相同工况作用下, 模型结构各楼层加速度反应的最大值与模型底部相应方向输入加速度最大值之比, 为该工况下该层加速度反应的放大系数 K , K 是描述结构地震反应的重要指标^[17]。具体可通过下式求得:

$$K = |a|_{\max} / |A|_{\max} \quad (3)$$

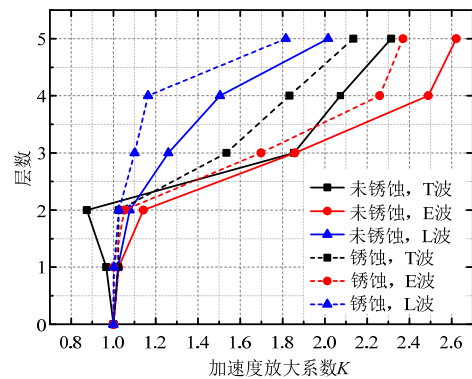
式中: $|a|_{\max}$ 为楼层最大绝对加速度反应; $|A|_{\max}$ 为台面输入最大绝对加速度反应。通过对试验数据的整理, 可得到模型结构在各水准地震作用下的加速度放大系数包络图如图 12~图 13。



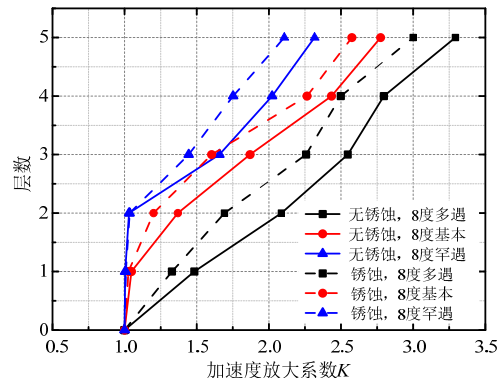
(a) 8 度多遇



(b) 8 度基本



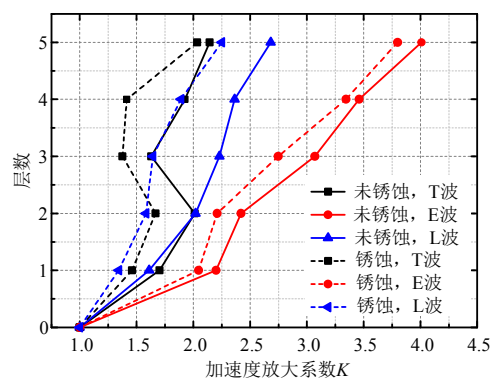
(c) 8 度罕遇



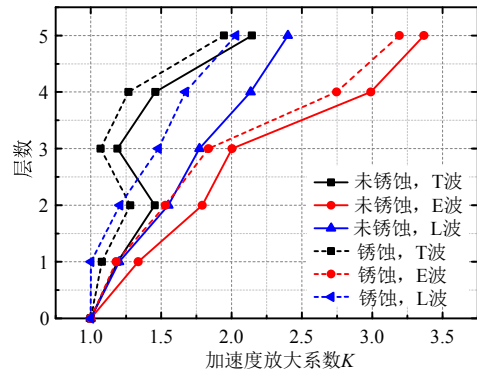
(d) 三条地震波平均值

图 12 未锈蚀与锈蚀钢框架结构 x 向楼层最大加速度放大系数对比

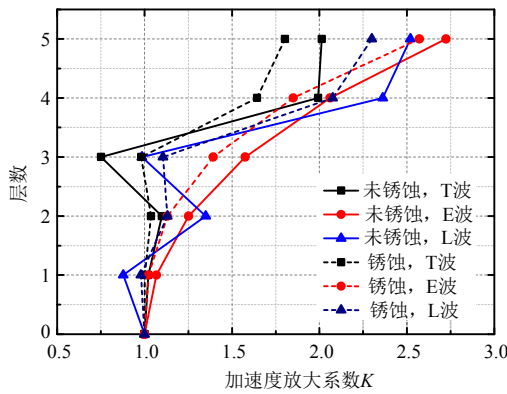
Fig. 12 The comparison of x -axis maximum floor acceleration amplification factors between two specimens



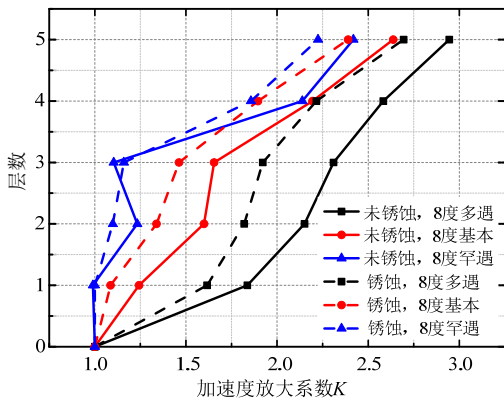
(a) 8 度多遇



(b) 8度基本



(c) 8度罕遇



(d) 三条地震波平均值

图 13 未锈蚀与锈蚀钢框架结构 y 向楼层最大加速度放大系数对比

Fig.13 The comparison of y-axis maximum floor acceleration amplification factors between two models

由图 12~图 13 可以看出:

1) 总体而言,对未锈蚀和锈蚀模型结构,在各工况下,加速度反应放大系数随着楼层高度的增加,两者变化规律基本一致。同时结构 x 向的加速度反应大于 y 向,这是因为结构设计时 x 向抗侧移刚度大于 y 向。

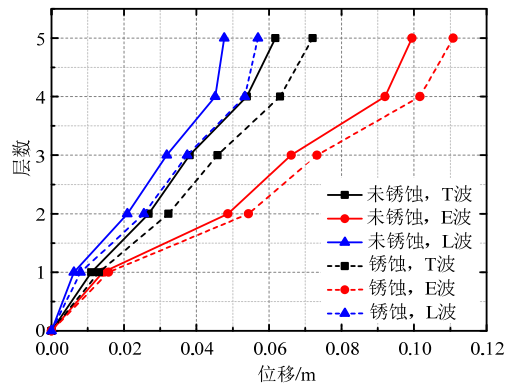
2) 随着输入地震波加速度峰值的增大,未锈蚀与锈蚀结构的钢材非线性逐渐开展并产生损伤,造

成结构刚度的退化及阻尼比的增大,加速度放大系数有所降低。

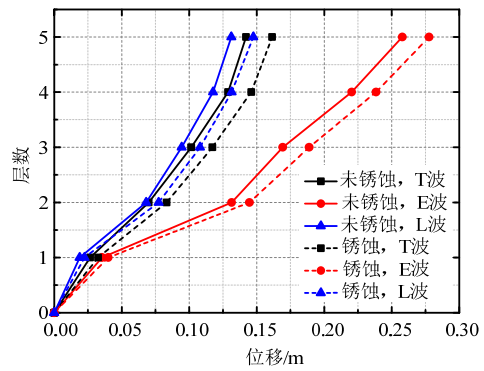
3) 锈蚀结构的加速度放大系数比未锈蚀结构减小 9%~28%。产生这种现象的原因是,在对结构进行地震波加载前,相比未锈蚀结构,锈蚀结构已经具有锈蚀损伤,这种损伤造成了结构一定的刚度退化。

2.4 位移反应

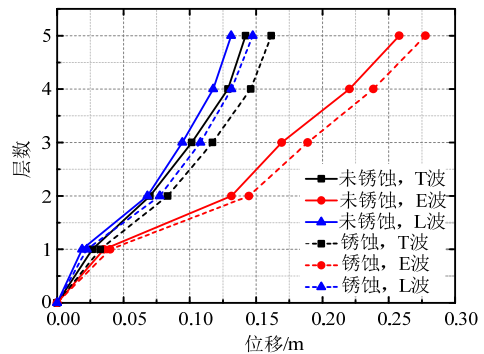
模型位移反应值可从两个方面获得:一方面由 ASM 位移传感器获得,另一方面由加速度值积分获得。本文从各试验工况作用下的结构各层位移相对于振动台台面位移的最大值来描述模型结构位移反应。不同水准地震作用下模型结构各层相对于振动台台面的位移包络图见图 14、图 15。



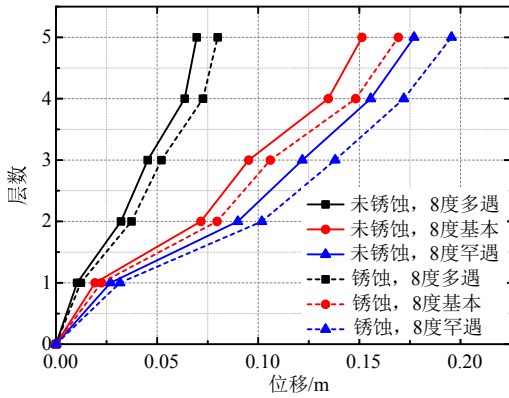
(a) 8度多遇



(b) 8度基本



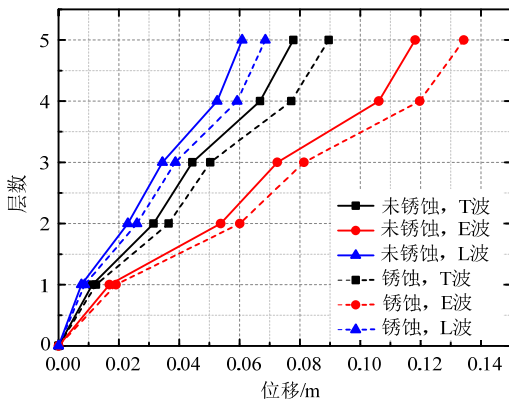
(c) 8度罕遇



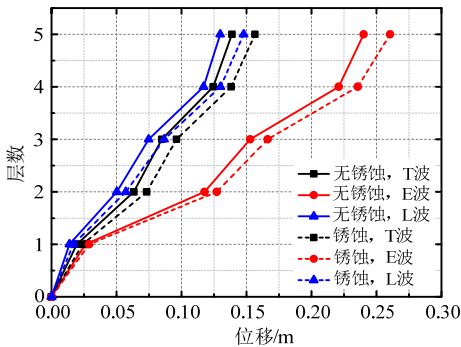
(d) 三条地震波平均值

图 14 未锈蚀与锈蚀钢框架结构 x 向楼层最大位移对比

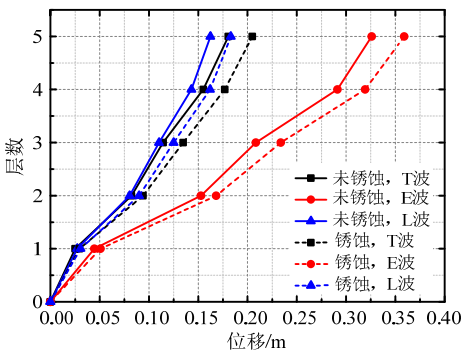
Fig.14 The comparison of x-axis maximum floor displacement between two models



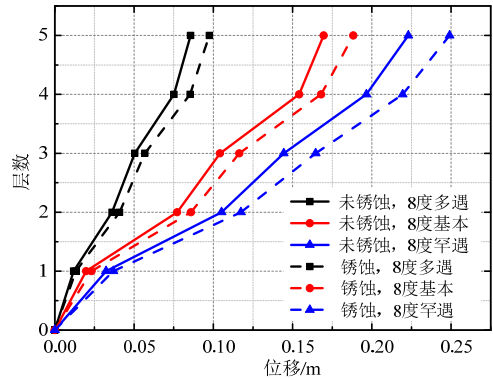
(a) 8 度多遇



(b) 8 度基本



(c) 8 度罕遇



(d) 三条地震波平均值

图 15 未锈蚀与锈蚀钢框架结构 y 向楼层最大位移对比

Fig.15 The comparison of y-axis maximum floor displacement between two models

从图14、图15可以看出：

1) 各工况下，结构x向的位移反应小于y向。这是因为：三向地震波在输入时，虽然x向输入的加速度峰值大于y向，但结构设计时y向的抗侧移刚度明显小于x向，刚度差异造成的结构位移反应差异明显大于输入加速度差异造成的位移反应差异。

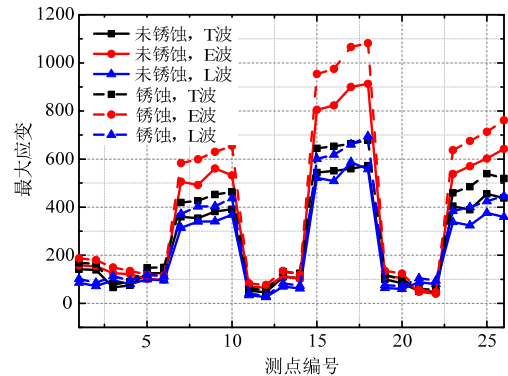
2) 不同地震波输入时，多以EL Centro波输入时模型结构的位移反应最大。这说明结构的最大位移反应与地震波的频谱特性及结构自振特性有关。

3) 锈蚀钢框架结构的位移反应比未锈蚀结构增大。由三条地震波x向位移反应平均值可以看出，在8度多遇、基本、罕遇地震作用下，相比未锈蚀结构，锈蚀结构位移反应分别增大了16.3%、12.5%、11.8%。

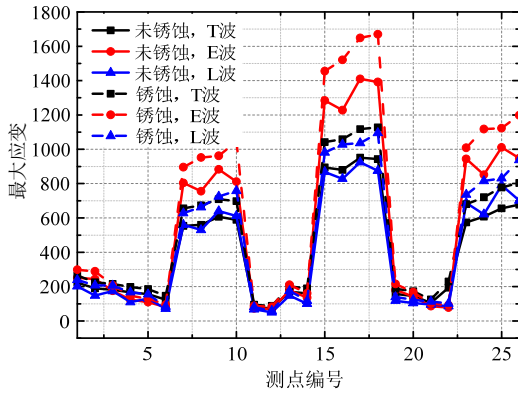
由结构各楼层的相对位移可以计算出各层的层间位移角，对未锈蚀与锈蚀钢框架结构，无论x向还是y向，第2层的最大层间位移角均为最大，说明第2层为结构的薄弱层。

2.5 应变反应

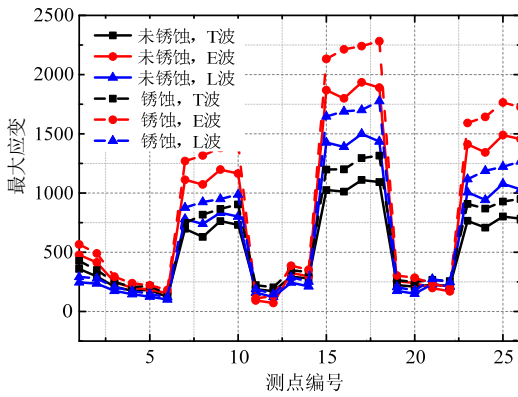
不同水准地震作用下，各测点应变幅值最大值见图 16。



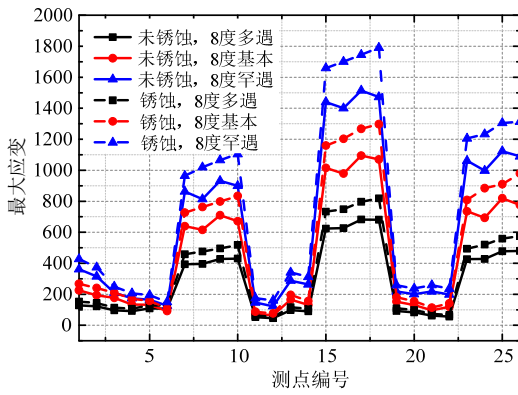
(a) 8 度多遇



(b) 8度基本



(c) 8度罕遇



(d) 三条地震波平均值

图 16 不同水准地震作用下各测点最大应变值

Fig.16 The maximum strain under different earthquake standards

由图 16 可以得到以下结论:

1) 对未锈蚀和锈蚀结构, 在 8 度多遇时, 结构各处应变值较小, 基本处于弹性阶段; 在 8 度基本时, 结构部分位置应变达到屈服应变, 已部分进入弹塑性阶段; 8 度罕遇时, 构件的屈曲变形更为普遍。

2) 锈蚀结构各处的应变值较未锈蚀结构增大了 10%~18%。这是由于锈蚀引起钢材弹性模量减小, 导致相同应力作用下锈蚀钢构件截面的应变增大。

3) 两个模型结构梁上下翼缘处的应变都明显大于柱翼缘处的应变, 这体现出结构具有良好的强柱弱梁的特性。

4) 在各水准地震作用下, 测点 15、测点 16、测点 17、测点 18 的应变值均较大, 在结构上对应的位置分别为第 2 层 y 向梁下、上翼缘, x 向梁下、上翼缘。说明结构会在第 2 层 x 向梁上或下翼缘首先出现屈服、破坏, 其次是第 2 层 y 向梁上或下翼缘。

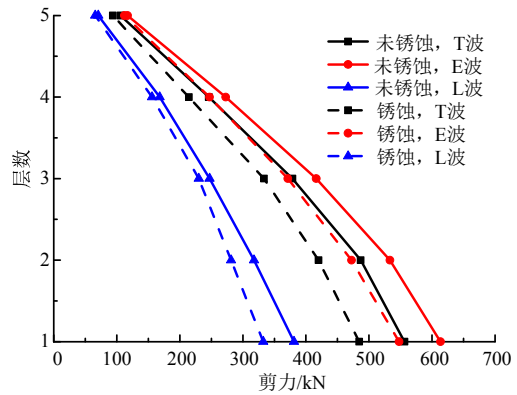
2.6 结构剪力

由模型结构的加速度时程反应及相似关系可以得到原型结构的加速度时程反应, 再结合原型结构楼层的质量分布, 可以得到不同水准地震作用下相应楼层的惯性力, 进而可以得到原型结构的层间剪力分布。

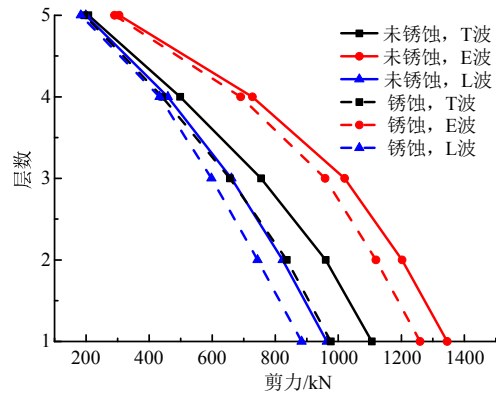
层间剪力具体可通过下式求得:

$$V_i(t) = \sum_{j=i}^5 m_j a_j(t), \quad i=1,2,3,4,5 \quad (4)$$

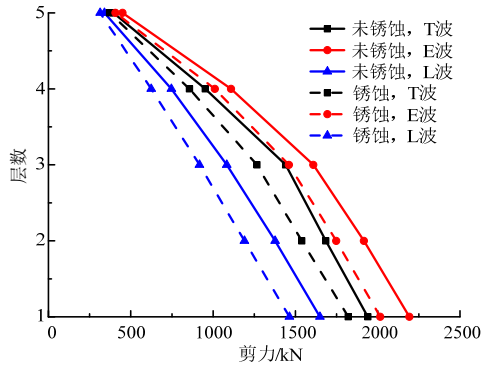
式中: $V_i(t)$ 表示第 i 层剪力时程; m_j 表示第 j 层楼层质量; $a_j(t)$ 表示第 j 层楼层相对加速度时程。由此可以计算得到在各地震波作用下, 原型结构 x 向、 y 向层间剪力沿楼层的分布如图 17、图 18。



(a) 8度多遇



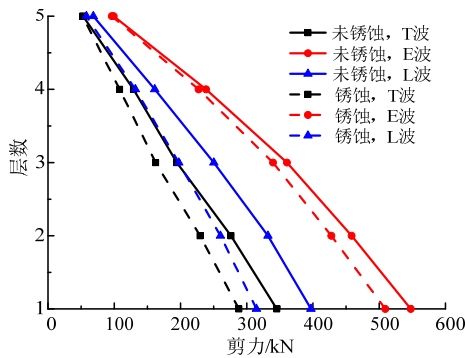
(b) 8度基本



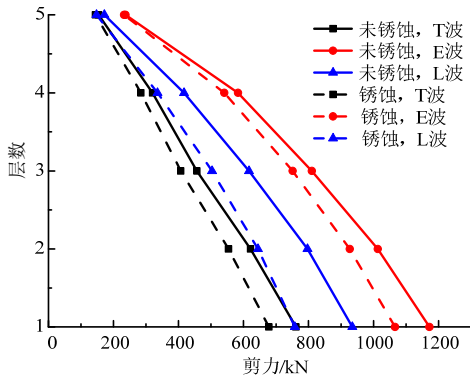
(c) 8度罕遇

图 17 不同水准地震作用下原型结构 x 向层间剪力包络图

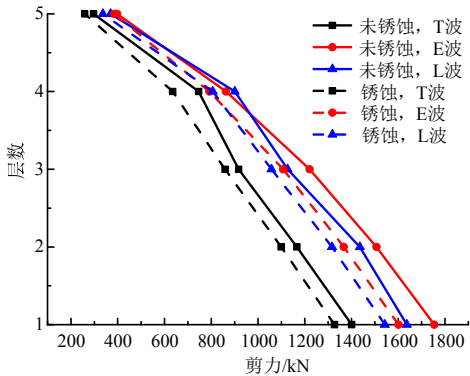
Fig.17 x-axis story shear force response envelopes of prototype structure under different earthquake standards



(a)



(b)



(c)

图 18 不同水准地震作用下原型结构 y 向层间剪力包络图

Fig.18 y-axis story shear force response envelopes of prototype structure under different earthquake standards

由图 17、图 18 可以看出：

1) 锈蚀结构比未锈蚀结构底部剪力大小减小了 10.23%~21.64%，两个结构层间剪力分布规律基本相同，层间剪力分布较均，沿楼层从上到下逐渐增大，大致呈三角形分布，最大值出现在底层。

2) 相同地震波作用下，同一楼层处的剪力随着台面输入加速度峰值的增大而增大；相同加速度峰值、不同波形的地震波作用时的层间剪力不同，EL Centro 波作用下剪力最大，Taft 波次之，兰州波最小，这表明层间剪力的大小与地震波的波形有关。

另外，考虑到结构的薄弱层为底层、第 2 层，对 EL Centro 波作用下结构底层及第 2 层的剪重比进行计算如表 7，均满足规范要求且随着输入地震动幅值的增大，剪重比逐渐增大。

表 7 不同水准地震作用下原型结构剪重比

Table 7 Shear-gravity ratio of prototype structure

位置	锈蚀程度	8度多遇		8度基本		8度罕遇	
		x	y	x	y	x	y
底层	未锈蚀	0.197	0.176	0.431	0.376	0.704	0.563
	锈蚀	0.176	0.163	0.403	0.341	0.647	0.515
2层	未锈蚀	0.236	0.205	0.579	0.460	0.913	0.692
	锈蚀	0.211	0.192	0.544	0.426	0.829	0.629

3 基于结构整体层次的结构损伤评估

结构损伤是指结构在多种不同因素(地震、腐蚀、疲劳、火灾、爆炸等)作用下，其物理力学性能发生的退化。建筑物的破坏通常是结构产生损伤并累积到一定程度后引起的，通过结构损伤累积模型计算结构损伤累积变量，可以预测结构的剩余使用寿命，进而为结构的修复或重建提供科学依据。参考顾祥林^[18]的损伤模型，定义结构在多次地震作用下，整体结构的地震损伤累积指标为：

$$D = 1 - f_i^2 / f_0^2 \quad (5)$$

式中： D 为结构地震损伤累积指标， f_i 为第*i*次地震作用后结构的基本自振频率； f_0 为结构初始状态的基本自振频率。损伤指标越大表示结构损伤程度越严重， $D=0$ 时表示结构完好无损； $D=1$ 时表示结构发生完全破坏或倒塌。对两个结构在不同水准地震作用下结构损伤累积指标计算如表8。

若将式(5)变形为：

$$D_i = 1 - f_{i2}^2 / f_{i1}^2 \quad (6)$$

式中： f_{i2} 为锈蚀结构在第*i*次地震作用后结构的基

本自振频率; f_{i1} 为未锈蚀结构在第 i 次地震作用后结构的基本自振频率; 可认为 D_i 为结构第 i 次地震作用后因锈蚀引起的结构损伤指标。计算得各工况作用后由锈蚀引起的结构损伤指标见表 9。由表 9 可知, 地震作用强度越大, 锈蚀对结构地震响应的影响越发明显。

表 8 不同水准地震作用下结构损伤指标 D

锈蚀程度	结构损伤指标 D		
	8度多遇	8度基本	8度罕遇
未锈蚀结构	0.000	0.165	0.330
锈蚀结构	0.000	0.191	0.370

表 9 不同水准地震作用后结构损伤指标 D_i

工况	加载前	8度多遇	8度基本	8度罕遇
结构损伤指标 D_i /(%)	14.35	14.35	16.60	18.57

4 结论

本文通过对钢框架结构在酸性大气环境下的锈蚀进行模拟, 并对不同锈蚀程度的钢框架进行振动台试验, 得出如下结论:

(1) 酸性大气环境下锈蚀后钢材的基本力学性能指标随锈蚀程度的增大而显著退化, 该退化规律与失重率近似呈线性关系。钢材的锈蚀程度越大, 其材料力学性能退化的越严重。

(2) 锈蚀与未锈蚀钢框架结构的破坏形式基本相同, 仍主要是钢框架梁在靠近梁柱节点处的上下翼缘发生局部屈曲破坏, 但锈蚀钢框架屈曲更严重。随着锈蚀程度的增加, 锈蚀钢框架结构梁柱翼缘处的应变较未锈蚀结构增大 10%~18%。

(3) 锈蚀钢框架结构与未锈蚀钢框架结构相比, 振型形态基本相同, 自振频率显著降低, 加速度反应减小 9%~28%, 同时位移响应增大 11.8%~16.3%, 底部剪力减小了 10.23%~21.64%。

(4) 8度多遇地震作用时, 锈蚀与未锈蚀结构地震响应相差不明显, 随地震作用强度增大, 两结构的地震响应差异逐渐增大, 即锈蚀对结构地震响应的影响越发明显。

(5) 对钢框架结构进行考虑锈蚀作用的地震反应分析对抗震设计及加固维护都是非常必要的, 本文也可为城市多龄期建筑的易损性研究提供试验依据。

参考文献:

- [1] 赵贞欣. 作为文物保护的经典煤气柜检测、安全评估和再利用[D]. 上海: 同济大学, 2006.
Zhao Zhenxin, Detection, Saefy Assessment and Reuse for classical gas tank as a historical relic under protection [D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese)
- [2] 张春涛, 范文亮, 李正良. 腐蚀环境中 Q345 等边角钢构件拟静力试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(11): 53—62.
Zhang Chuntao, Fan Wenliang, Li Zhengliang. Quasi-static test of Q345 equal-angles in corrosion environment [J]. China Civil Engineering Mechanics, 2014, 31(11): 53—62. (in Chinese)
- [3] 郑山锁, 孙龙飞, 杨威, 等. 锈蚀 RC 框架结构抗地震倒塌能力研究[J]. 建筑结构, 2014, 44(16): 59—63.
Zheng Shansuo, Sun Longfei, Yang Wei, et al. Study on seismic collapse resistance ability of the corroded RC frame structures [J]. Building Structure, 2014, 44(16): 59—63. (in Chinese)
- [4] 张春涛, 范文亮, 李正良. 腐蚀方式对 Q345 等边角钢疲劳性能的影响[J]. 工程力学, 2013, 30(10): 211—218.
Zhang Chuntao, Fan Wenliang, Li Zhengliang. Effects of corrosion on fatigue property of Q345 equal-angles [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(10): 211—218. (in Chinese)
- [5] 吴庆, 袁迎曙. 锈蚀钢筋力学性能退化规律试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(12): 42—47.
Wu Qing, Yuan Yingshu. Experimental study on the deterioration of mechanical properties of corroded steel bars [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(12): 42—47. (in Chinese)
- [6] Apostolopoulos C A, Papadakis V G. Consequences of steel corrosion on the ductility properties of reinforcement bar [J]. Construction & Building Materials, 2008, 22(12): 2316—2324.
- [7] Batis G, Rakanta E. Corrosion of steel reinforcement due to atmospheric pollution [J]. Cement & Concrete Composites, 2005, 27(2): 269—275.
- [8] Zitrou E, Nikolaou J, Tsakiridis P E, et al. Atmospheric corrosion of steel reinforcing bars produced by various manufacturing processes [J]. Construction & Building Materials, 2007, 21(6): 1161—1169.
- [9] 易伟建, 孙晓东. 锈蚀钢筋混凝土梁疲劳性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(3): 6—10.
Yi Weijian, Sun Xiaodong. Experimental investigation on the fatigue behavior of corroded RC beams [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(3): 6—10. (in Chinese)
- [10] Nakai T, Matsushita H, Yamamoto N, et al. Effect of pitting corrosion on local strength of hold frames of bulk carriers (1st report) [J]. Marine Structures, 2004, 17(5): 403—432.

(参考文献[11]—[18]转第 108 页)

- force-balance method [J]. *Journal of Building Structures*, 2000, 21(4): 55—61. (in Chinese)
- [11] 顾明, 周印, 张锋, 项海帆, 江欢成. 金茂大厦风致振动的实验研究[J]. *振动工程学报*, 2000, 13(2): 188—194.
Gu Ming, Zhou Yin, Zhang Feng, Xiang Haifan, Jiang Huancheng. Experimental studies on wind loads and wind-induced vibration of Jin Mao building [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2000, 13(2): 188—194. (in Chinese)
- [12] 李晓娜, 陆煜, 刘庆宽, 马文勇, 刘小兵. 圆形截面烟囱风致干扰效应试验研究[J]. *工程力学*, 2015, 32(增刊): 159—162, 166.
Li Xiaona, Lu Yu, Liu Qingkuan, Ma Wenyong, Liu Xiaobing. Experimental study on wind-induced interference effects of circular section chimneys [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(Suppl): 159—162, 166. (in Chinese)
- [13] 沈国辉, 张坚, 刘显群, 吴建国, 姚旦. 工程常见塔间距下大型冷却塔的双塔干扰效应[J]. *空气动力学学报*, 2015, 33(3): 433—439.
Shen Guohui, Zhang Jian, Liu Xianqun, Wu Jianguo, Yao Dan. Interference effects on two adjacent large cooling towers with commonly used tower distances [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2015, 33(3): 433—439. (in Chinese)
- [14] GB50009-2012, 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
GB50009-2012, Load code for the design of building structures [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [15] GB50016-2014, 建筑设计防火规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
GB50016-2014, Code of design on building fire protection and prevention [S]. Beijing: China Planning Press, 2014. (in Chinese)

(上接第 88 页)

- [11] Chen G, Hadi M N S, Gao D, et al. Experimental study on the properties of corroded steel fibres [J]. *Construction & Building Materials*, 2015, 79: 165—172.
- [12] 陈露. 腐蚀后钢材材料性能退化研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
Chen Lu. Study on the deterioration properties of corroded steel [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010. (in Chinese)
- [13] 沈德建, 吴胜兴. 大气环境锈蚀钢筋混凝土梁力学性能试验研究及分析[J]. *土木工程学报*, 2009, 42(8): 75—82.
Shen Dejian, Wu Shengxing. Experimental study and analysis on the mechanical performance of corroded reinforcement concrete beams in atmospheric environment [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(8): 75—82. (in Chinese)
- [14] 郑山锁, 杨勇, 赵鸿铁. 底部框剪砌体房屋抗震性能的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2004, 37(5): 23—31.
Zheng Shansuo, Yang Yong, Zhao Hongtie. Experimental study on aseismic behavior of masonry building with frame-shear wall structure at lower stories [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2004, 37(5): 23—31. (in Chinese)
- [15] GB/T2975-1998, 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
GB/T2975-1998, Steel and steel products-Location and preparation of test pieces for mechanical testing [S]. Beijing: China Standard Press, 1999. (in Chinese)
- [16] GB/T 228.1-2010, 金属材料室温拉伸试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
GB/T 228.1-2010, Metallic materials-Tensile testing at ambient temperature [S]. Beijing: China Standard Press, 2010. (in Chinese)
- [17] 吕西林, 程海江, 卢文胜, 等. 两层轻型木结构足尺房屋模型模拟地震振动台试验研究[J]. *土木工程学报*, 2007, 40(10): 41—49.
Lü Xilin, Cheng Haijiang, Lu Wensheng, et al. Shake table tests of a two-storey light wood framed house [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, 40(10): 41—49. (in Chinese)
- [18] Gu Xianglin, Shen Zuyan. Damage analysis on reinforced concrete structure under earthquake series [C]. *Proceedings of ICCBE-VII*, Seoul, Korea, 1997: 35—40.