

锈蚀钢筋混凝土框架地震反应分析

陈新孝¹, 牛荻涛²

(1. 西京学院 陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安 710123; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 在锈蚀混凝土框架结构耐久性损伤分析的基础上, 对锈蚀钢筋混凝土压弯试件的抗震性能的试验结果进行了探讨, 分析了锈蚀试件滞回曲线和骨架曲线的特点, 建立了锈蚀钢筋混凝土框架结构动力反应分析模型, 用 Wilson- θ 法编制锈蚀混凝土框架结构计算程序, 对钢筋混凝土框架在不同的钢筋锈蚀率及不同锈蚀层数下的地震反应进行了对比分析, 计算结果表明, 钢筋锈蚀将导致混凝土框架结构的抗震性能降低严重、地震反应加大, 并指出底层柱的钢筋锈蚀对混凝土框架结构抗震性能的影响至关重要。

关键词: 锈蚀混凝土框架; 耐久性损伤; 钢筋锈蚀率; 地震反应; 抗震性能

中图分类号: TU4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)03-0361-07

Earthquake response analysis on corroded reinforced concrete frame

CHEN Xinxiao¹, NIU Ditao²

(1. Shaanxi Key Laboratory of Safety and Durability of Concrete Structures, Xijing University, Xi'an 710123, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. and Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Base on the analysis of damage durability for corrosion concrete frame structure, compression and bending corroded reinforced concrete specimen seismic performance were studied, analyzed the characteristics of corrosion of the hysteretic curve and skeleton curve, the a dynamic compute model of corroded reinforced concrete frame structure has been established. The calculation program of the concrete plane frame has been compiled with the Wilson- θ method, and the comparative analysis for different frame of reinforced concrete has been calculated in earthquake response under different bar corrosion rates and different corrosion layers. The calculation results show that the seismic performance of concrete frame structure reduce serious and earthquake response increased in the wake of Re-bar corrosion. And pointed out that the bottom column reinforced concrete frame structure is very important for seismic performance.

Key words: corroded concrete frame; durability damage; Re-bar corrosion rate; earthquake response; seismic performance

在混凝土结构耐久性研究中, 钢筋的锈蚀是分析混凝土结构产生耐久性损伤所考虑的最主要因素, 钢筋锈蚀除直接影响钢筋本身的力学性能、钢筋与混凝土粘结性能以及构件静承载力之外, 还将导致混凝土结构抗震性能的下降^[1]。建筑结构抗震能力的不足不仅影响居住者的舒适性, 还直接影响既有结构的安全性和耐久性^[2]。近年来, 混凝土结构产生耐久性损伤后的抗震性能成为工程界研究的热点和难点问题。自上世纪 90 年代 Kyoshi Okada 等^[3](1988 年)通过锈蚀钢筋混凝土梁的低周反复荷载试验开始, 国内外学者对锈蚀钢筋混凝土结构的抗震性能进行了大量的研究, 其中, 具有代表性的是牛荻涛课题组开展的锈蚀

钢筋混凝土结构的抗震性能研究^[4]。混凝土框架结构在各类建筑中应用较广, 特别是近年来在近海及岛礁等高腐蚀环境地区工程建设中被大量采用, 而这些地区建筑结构面临的耐久性问题主要是钢筋锈蚀问题。因此, 研究锈蚀钢筋混凝土框架结构的抗震性能, 对于了解其质量现状, 进行抗震加固与维修决策等均具有重要的指导意义。

目前有关锈蚀混凝土框架结构的动力性能研究工作大多集中在混凝土压弯构件、框架节点的抗震性能、结构加固及抗震性能评估等方面。比如文献^[5]开展的锈蚀钢筋混凝土压弯构件抗震性能试验研究, 研究发现: 与未损构件相比, 锈蚀混凝土压弯构件(柱)在低周反复荷载作用下会过

早进入塑性状态,特别是当钢筋锈蚀率较大时,其抗震性能的退化尤为明显.文献[6]研究了锈蚀RC框架节点的抗震性能,结果表明:与无锈蚀试件相比,当锈蚀率为10%时,十字形钢筋混凝土梁柱节点试件的承载力下降达40%,延性下降达20%,这说明钢筋混凝土框架节点的抗震性能随着纵筋锈蚀率的增大、构件承载力和延性的降低而严重下降.但迄今为止,对于混凝土框架整体结构在钢筋锈蚀劣化下的抗震性能与地震反应研究还不多见,这使得处于高腐蚀环境地区的各类既有钢筋混凝土框架结构存在较大的抗震安全问题.因此,本文以锈蚀混凝土框架结构为研究对象,采用文献[7]建立的锈蚀钢筋混凝土压弯构件恢复力模型,结合现有的有关研究成果,采用时程分析法计算锈蚀混凝土框架的地震反应,对比分析不同部位框架柱的钢筋锈蚀对整体结构地震反应的影响,从而为损伤混凝土框架结构抗震性能评估提供理论基础.

1 恢复力模型与结构动力参数的损伤分析

混凝土结构的耐久性损伤主要表现在三个方面:混凝土碳化或腐蚀、钢筋锈蚀、钢筋与混凝土的粘结退化.锈蚀混凝土框架结构抗震性能和地震反应分析主要探讨上述诸要素对结构抗震性能(如:滞回性能、延性、动力参数等)与动力反应(如:周期、位移等)的影响.本文主要探讨钢筋锈蚀对锈蚀混凝土框架结构抗震性能指标和地震反应的影响.

1.1 锈蚀钢筋的属性

实际工程中钢筋的锈蚀主要表现为非均匀锈蚀(坑蚀),且具有一定的离散性,但经过大量的试验统计分析,仍然可以得到锈蚀钢筋的力学模型.钢筋锈蚀将导致其截面几何尺寸减小和力学性能指标的退化(屈服强度、极限强度以及极限延伸率的降低).锈蚀钢筋截面几何尺寸减小一般用锈蚀率来表示(如:截面损失率、质量损失率、锈蚀深度等);而力学性能指标的退化则通过腐蚀试验,在未损钢筋本构关系基础上引入力学性能降低系数而得到的^[8].为了计算简便,本文对锈蚀钢筋的属性进行合理简化:(1)钢筋锈蚀按均匀锈蚀考虑;(2)假设箍筋与纵筋锈蚀率相同.

本文在计算时,锈蚀钢筋的屈服强度采用袁迎曙等^[9]建立的锈蚀钢筋屈服强度下降模型:

$$\begin{cases} f_{yc} = f_{y0}(1 - 0.029\eta), 0 \leq \eta \leq 5\% \\ f_{yc} = f_{y0}(1.175 - 0.064\eta) \quad \eta > 5\% \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_{yc} 、 f_{y0} 和 η 分别为钢筋锈蚀后的屈服强度、未锈蚀屈服强度、截面损失率.

锈蚀钢筋的弹性模量按照Lee等^[10]建议的锈蚀钢筋弹性模量的削弱模型进行计算:

$$E_{sc} = E_s(1 - \frac{1.13\eta_m}{100}) \quad (2)$$

式中: E_{sc} 、 E_s 和 η_m 分别为钢筋锈蚀后的弹性模量、未锈蚀弹性模量、质量损失率.

有关锈蚀钢筋与混凝土间的粘结滑移问题在通过低周往复加载试验建立恢复力模型时,已经根据试验结果的拟合分析中予以考虑.

1.2 恢复力模型

由于混凝土框架结构层数不多,结构的高宽比也都不大,对其进行动力反应分析时,采用层间剪切模型能较好地反映混凝土框架结构的变形特点,一般也能得到比较满意的分析结果^[11].当采用层间剪切模型分析锈蚀混凝土框架的地震反应时,结构刚度矩阵的建立主要取决于结构柱的恢复力滞回特性、骨架曲线和滞回曲线的数学模型.

1.2.1 滞回特性和骨架曲线

我们曾对锈蚀混凝土压弯构件在低周反复荷载作用下的恢复力性能进行了模型试验,图1为相同钢筋锈蚀率(6%)下不同轴压比情况时的滞回曲线(n 为轴压比);图2为按其滞回曲线每一循环中正反方向的位移和力的平均值做出的各试件的平均骨架曲线.主要特点如下:

(1) 锈蚀混凝土压弯构件在低周反复荷载作用下的滞回曲线在形状上与未损伤构件大体相似,基本上呈现捏拢梭形,主筋锈蚀量越大、轴压比越高,这种现象越比较明显.从图1、图2可以看出,在试件开裂前,滞回曲线和骨架曲线均呈直线形态.试件开裂后至屈服,骨架曲线逐渐弯曲,但弯曲总量不是很大.试件屈服后直至破坏,骨架曲线中的变形量在迅速增加.

(2) 同一锈蚀率下,轴压比越大,试件滞回曲线的丰满程度、滞回环的圈数和滞回环的面积等均明显减少,表明试件的耗能能力和延性在降低.同一轴压比下,锈蚀率越大,试件的耗能能力和延性降低的趋势愈加明显.因此,主筋的锈蚀率和轴压比是影响锈蚀混凝土压弯构件恢复力骨架曲线上特征点的主要因素.

(3) 由图1、图2可知,锈蚀混凝土压弯构件

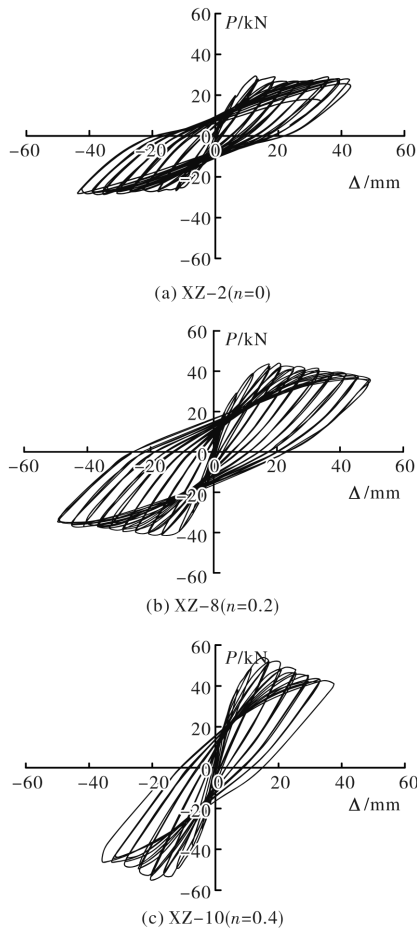


图1 滞回曲线

Fig. 1 Hysteresis curve

的刚度在屈服前衰减较快,而当进入屈服后,刚度衰减逐步趋于平缓;同一锈蚀率下,轴压比小的构件的刚度衰减主要发生在屈服前,而轴压比大的构件的刚度沿整个加载过程呈现衰减的趋势.同一轴压比下,钢筋锈蚀率越大,构件刚度的衰减幅度也越大.

由以上锈蚀混凝土压弯构件滞回性能特点的分析可以看出,锈蚀混凝土压弯构件骨架曲线的特征符合三线型恢复力模型的特点.

理论上可利用未损混凝土构件三线型恢复力模型的计算方法,再通过引入耐久性损伤降低系数计算得到图3模型中锈蚀构件恢复力模型的关键点参数^[13].但在周期性荷载作用下,如何合理确定锈蚀钢筋和混凝土的滑移问题也是影响计算结果的一个重要因素,这是制约计算过程的收敛性和计算结果合理性的主要障碍.为了实用和方便,我们通过对2批共17组的锈蚀混凝土压弯构件在低周反复荷载作用下的试验结果进行了整理,通过回归分析建立了锈蚀混凝土压弯构件基于锈蚀率和轴压比的三线型恢复力模型,并给出模型中六个特征参数点的取值的方法,详见文献^[14].

需要说明的是该模型在钢筋屈服前按完全弹性考虑,即卸载后无残余变形.当构件进入塑性阶段后,滞回刚度退化规则为:卸载后反向加载则指向反向位移最大点,次滞回规则与主滞回规则保持一致.

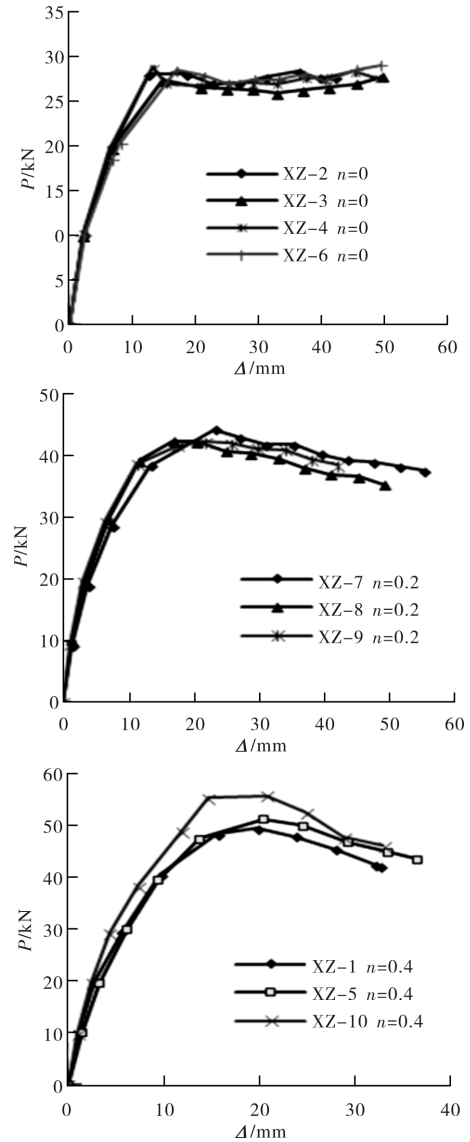


图2 平均骨架曲线

Fig. 2 Average skeleton curve

1.2.2 滞回曲线的数学模型

钢筋混凝土结构非线性分析中通常采用刚度退化三线型(D-TRI)模型^[12],如图3所示.由上节的试验结果分析可以看出,锈蚀混凝土压弯构件的恢复力模型具有三线型恢复力模型的特点,因而可以采用刚度退化三线型(D-TRI)模型.

1.3 钢筋锈蚀对结构固有频率的影响分析

锈蚀混凝土框架结构的动力微分方程可表示为^[7]

$$[M^*]\{\ddot{x}\} + [C^*]\{\dot{x}\} + [K^*]\{x\} = \{P(t)\} = [M^*]\{I\}a_g(t) \quad (3)$$

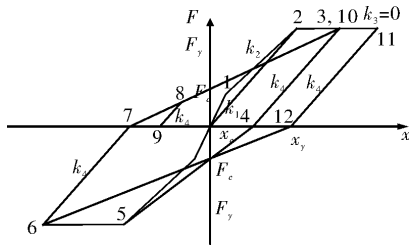


图3 滞回曲线数学模型

Fig. 3 Hysteresis curve mathematical model

式中: $[M^*]$ 、 $[C^*]$ 和 $[K^*]$ 为锈蚀混凝土框架的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; 与之对应的未损伤的混凝土框架的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵表示为 $[M]$ 、 $[C]$ 和 $[K]$; $\{\ddot{x}\}$ 、 $\{\dot{x}\}$ 和 $\{x\}$ 为锈蚀混凝土框架结构体系的加速度、速度和位移; $a_g(t)$ 为地面地震动的加速度。

对于式(3), 当锈蚀混凝土结构材料耐久性损伤值确定后, 即可计算出结构体系的 $[M^*]$ 、 $[C^*]$ 和 $[K^*]$ 。若令方程(3)的右项为零, 则可以计算出锈蚀混凝土框架结构体系的固有频率及振型, 即:

$$([K^*] - \omega^{*2}[M^*])[\phi^*] = 0 \quad (4)$$

当混凝土结构中钢筋发生锈蚀后, 对应于未损伤时混凝土框架结构的 $[K]$ 和 $[M]$ 将出现微小变化 $[\Delta K]$ 、 $[\Delta M]$

$$[\Delta K] = [K] - [K^*] \quad (5)$$

$$[\Delta M] = [M] - [M^*] \quad (6)$$

此时未损时混凝土框架的频率 ω^2 和振型矩阵 $[\phi]$ 也会发生变化, 记为 $\Delta\omega$ 和 $[\Delta\phi]$, 且

$$\Delta\omega = \omega - \omega^* \quad (7)$$

$$[\Delta\phi] = [\phi] - [\phi^*] \quad (8)$$

则式(4)可改写为

$$([K] - [\Delta K]) - (\omega - \Delta\omega)^2([M] - [\Delta M])][\phi] - [\Delta\phi] = 0 \quad (9)$$

当忽略结构体系质量矩阵 $[M^*]$ 的变化, 即, $[\Delta M]=0$, 并在式(9)中剔除二阶各项后, 可得:

$$\Delta\omega^2 = \frac{[\phi]^T[\Delta K][\phi]}{[\phi]^T[M][\phi]} \quad (10)$$

对于其中某一个振型 $\{\phi_i\}$, 则可求出结构体系刚度的变化对固有频率变化的影响, 即

$$\Delta\omega_i^2 = \frac{\{\phi_i\}^T[\Delta K]\{\phi_i\}}{\{\phi_i\}^T[M]\{\phi_i\}} \quad (11)$$

由此可以看出: 对于发生钢筋锈蚀的混凝土框架结构体系, 若忽略结构体系质量的变化, 当体系刚度损伤变化量确定后, 某一振型下结构固有频率的变化量也随之确定。

1.4 阻尼矩阵

对于式(3)中阻尼矩阵 $[C^*]$ 的处理, 本文采用

框架结构非线性动力分析中的 Rayleigh 阻尼模型^[15], 即结构阻尼与质量和刚度矩阵成正比关系

$$[C^*] = \alpha[M^*] + \beta[K^*] \quad (12)$$

式中: α 和 β 是利用对结构体系前二阶圆频率及阻尼比进行模态分析得到的参数

$$\alpha = \frac{2(\omega_j^{*2}\omega_i^*\xi_i^* - \omega_i^{*2}\omega_j^*\xi_j^*)}{(\omega_j^{*2} - \omega_i^{*2})} \quad (13)$$

$$\beta = \frac{2(\omega_j^*\xi_j^* - \omega_i^*\xi_i^*)}{(\omega_j^{*2} - \omega_i^{*2})} \quad (14)$$

式中: ω_i^* 、 ω_j^* 分别为锈蚀混凝土框架第 i 、 j 振型频率; ξ_i^* 、 ξ_j^* 分别为结构第 i 、 j 振型的阻尼比。

从结构动力学可知, 结构阻尼比主要与结构刚度的变化有关。文献[16]根据大量混凝土结构模型的振动台试验结果, 总结了结构阻尼比随刚度的变化规律, 提出了下列计算公式:

$$\frac{\xi_i^*}{\xi_i} = \frac{2 - DD_i}{(1 - DD_i)} \quad (15a)$$

$$\frac{\xi_j^*}{\xi_j} = \frac{2 - DD_j}{(1 - DD_j)} \quad (15b)$$

式中: ξ_i 、 ξ_j 为未损结构第 i 、 j 振型的阻尼比。我国抗震规范规定对于钢筋混凝土结构, 取阻尼比 $\xi_i = \xi_j = 0.05$ 。 DD_i 、 DD_j 分别为按结构第 i 、 j 振型频率计算出的基于频率变化的结构耐久性损伤指数($DD = \Delta\omega/\omega$), $\Delta\omega$ 可按(11)求出。

2 地震反应分析

锈蚀混凝土框架的地震反应分析可参照未损混凝土框架结构的计算模型、方法和步骤进行。当确定了钢筋的锈蚀量和构件的承载力损伤指标值后, 分别对未损结构动力方程中相对应的动力参数进行修正处理, 用时程分析法计算锈蚀混凝土框架结构的地震反应。

2.1 动力方程的求解

具体计算时, 首先用已建立的锈蚀压弯试件的恢复力模型, 计算得到锈蚀框架柱构件恢复力模型中的承载力值和位移坐标特征点, 进而建立锈蚀混凝土框架结构的刚度矩阵模型和阻尼模型。在未损混凝土结构非线性动力分析方法^[17]的基础上, 采用 Wilson- θ 法编制锈蚀结构非线性全过程分析程序。具体的单元模型、结构建模、滞回规则等的算法、求解过程等详见文献[7]。计算分析过程中做了如下假定和调整:

(1) 钢筋锈蚀沿构件单元长度方向发生均匀锈蚀;

(2) 混凝土材料不发生损伤, 即按现行规范取值; 忽略锈蚀混凝土框架结构体系的质量变化;

不考虑荷载及地震作用的折减;

(3)对式(1)求解时,用“Wilson- θ 法”取 $\theta=1.4$, $\Delta t=(1/15)T$.在步长内 $\theta\Delta t$,质点加速度呈线性变化,且结构的刚度、阻尼、地面运动加速度在步长内也均无改变.

2.2 实例计算

某单榀锈蚀钢筋混凝土框架为七层,框架的几何尺寸、截面尺寸见图 4(a),图 4(b)为主筋的配筋面积;考虑设防烈度为 8 度,Ⅱ类场地土,第一组地震分组;1~6 层质量 57.68 t,顶层质量 28.72 t;梁、柱的主受力筋等级均为Ⅱ级,梁的

混凝土强度等级为 C25、柱的混凝土强度等级为 C30.按文献[7]编制的锈蚀结构非线性全过程分析程序进行计算,选用 El-Centro 地震波(峰值地震加速度取值为 0.2 g).

当框架柱钢筋的截面损失率分别为 2.5%、5%、7.5%、10%、12.5%和 15%时,锈蚀混凝土框架基本周期的计算结果见表 1.

当混凝土框架各层柱钢筋全部锈蚀与五层、四层、三层、二层以下及底层柱钢筋发生局部锈蚀时各楼层层间位移角的对比变化结果见图 5.

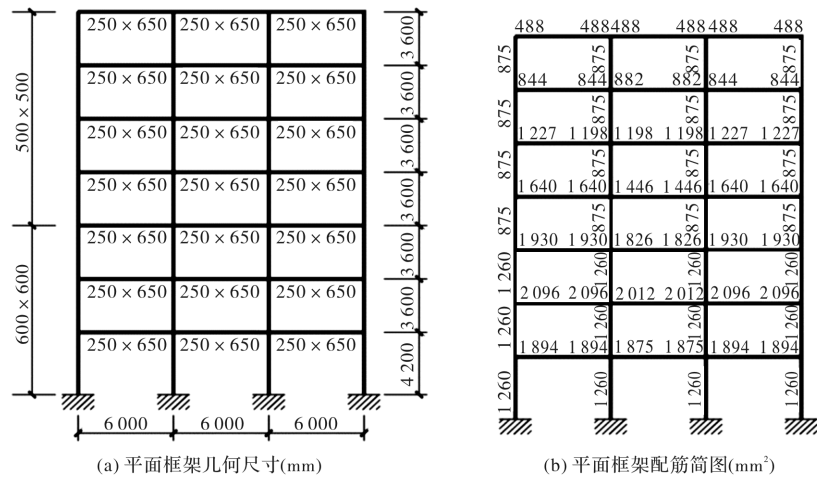


图 4 平面框架简图
Fig. 4 The simple figure of concrete frame

表 1 锈蚀率对混凝土框架基本周期的影响

锈蚀率/%	0.0	2.5	5	7.5	10	12.5	15
基本周期/s	1.41	1.42	1.44	1.48	1.54	1.65	1.87

2.3 结果讨论

从表 1 中的计算结果可以看出:当钢筋锈蚀率 $<5\%$ 时,结构基本自振周期和未损结构相比差别不大;而当钢筋锈蚀率 $>5\%$ 时,结构基本自振周期会显著增加.比如钢筋锈蚀率为 15%时,结构基本自振周期将增大 32.6%.

由图 5(a)可知,未损混凝土框架第二层的层间位移角最大,当钢筋锈蚀率 $>10\%$ 时,第三层的层间位移角在逐渐增大,这种趋势将在图 5(b)~图 5(f)中尤为突出.这是因为在地震作用下钢筋锈蚀使结构抗侧刚度的降低,导致结构内力的重新分配所致.

对比图 5(a)~图 5(f)可以看出,随着钢筋锈蚀率的增加,锈蚀层的层间位移角也明显增大,特别是从框架底层开始,考虑锈蚀层的层数越少,

锈蚀层的层间位移角的增加趋势愈加显著,比如,图 5(f)仅考虑底层柱钢筋锈蚀时,锈蚀率为 15%时,底层的层间角位移增大了 1.41 倍;当考虑框架下部整层柱钢筋发生锈蚀时,也将导致框架上部未锈蚀层的层间位移角的增加,而且考虑锈蚀层的层数越少,对框架上部未锈蚀层的层间位移角的影响就越大.由此可见,钢筋的锈蚀将导致混凝土框架结构抗震性能的降低、地震反应的明显加大,并可能发生薄弱层位置的转移以及导致结构从底层发生倒塌的危险.

3 结论

(1) 锈蚀混凝土框架结构的地震反应随着柱主筋的锈蚀率增加到一定程度时(钢筋锈蚀率 $>5\%$),将会发生明显的变化,表现在结构的基本

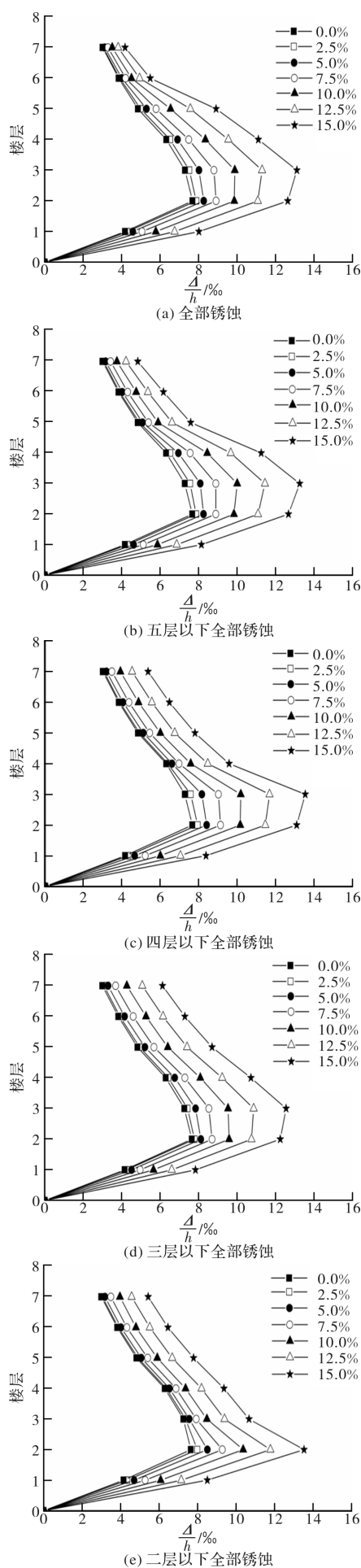


图5 钢筋锈蚀率对层间位移角的影响

Fig. 5 Influence of steel corrosion rate on inter-layer displacement angle

自振周期和层间位移角的明显增大。

(2) 随着混凝土框架结构柱主筋锈蚀损伤程度的增加,可能导致结构主体发生薄弱层位置的变化和转移,从而增加了结构发生倒塌破坏的不确定性,这与文献[18]、[19]所描述的震灾现场情况基本一致,因此在今后的抗震修复加固决策中应引起高度重视。

(3) 当钢筋锈蚀率 $>10\%$ 时,锈蚀混凝土框架的层间位移角超过规范规定的弹塑性层间位移角限值的数量显著增加,这在结构的底层表现的特别明显。因此,混凝土框架结构钢筋的锈损愈严重,从结构底层发生倒塌性破坏的可能性就愈突出。

(4) 若仅考虑框架下部整层柱钢筋发生锈蚀时,考虑的锈蚀层数越少,对框架上部未锈蚀层的层间位移角的影响就越大。由此可以推断,对于混凝土框架结构而言,底层柱钢筋的锈蚀对结构抗震性能和抗倒塌能力的影响至关重要。

参考文献 References

- [1] 薛斌,孙启荣,王辰宇,等. 腐蚀钢筋混凝土结构研究现状及展望[J]. 能源与环境, 2017, 39(4): 174-179.
XUE Bin, SUN Qirong, WANG Chenyu, et al. Recent research and prospect on corroded reinforced concrete structure [J]. China Energy and Environmental Protection, 2017, 39(4): 174-179.
- [2] LIU Tiejun, LI Jilong, OU Jinping. High damping concrete and seismic behavior[C]//Third International Conference on Construction Materials. Vancouver, Canada; 2005:365-373.
- [3] KYIOSHI Okada, KAZUO Kobayashi, TOYOAKI Miyagawa. Influence of longitudinal cracking due to reinforcement corrosion on characteristics of rein-

- forced concrete members[J]. ACI Structural Journal, 1988,85(2):134-140.
- [4] 邢国华, 罗大明, 牛荻涛. 锈蚀钢筋混凝土柱的强度-变形分析模型[J]. 地震工程与工程振动, 2016, 36(1):91-100.
- XING Guohua, LUO Daming, NIU ditiao. Strength and deformation analysis model of corroded reinforced concrete columns [J]. Earthquake Engineering and EngineeringVibration, 2016,36 (01): 91-100.
- [5] 牛荻涛, 陈新孝, 王学民. 锈蚀钢筋混凝土压弯构件抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2004, 34(10): 36-38.
- NIU Ditao, CHEN Xinxiao, WANG Xuemin. Experimental study on seismic performance of corroded reinforced concrete members wih flexure and compression [J]. Building structure, 2004, 34(10): 36-38.
- [6] 周静海, 李飞龙, 王凤池, 等. 锈蚀钢筋混凝土框架节点抗震性能[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32(3):428-436.
- ZHOU Jinghai, LI Feilong, WANG Fengchi, et al. Research on seismic behavior of corroded reinforced concrete frame joints [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science Edition), 2016, 32(3): 428-436.
- [7] 陈新孝. 既有混凝土框架结构抗震性能和评估[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2011.
- CHEN Xinxiao. Study and evaluation on seismic performance of existing reinforced concrete frame [D]. Xi'an; Xi'an Univ. of Arch. and Tech., 2011.
- [8] 梁岩, 罗小勇. 耐久性损伤钢筋混凝土结构抗震性能研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(2): 113-119.
- LIANG Yan, LUO Xiaoyong. Research progress in seismic behavior of durability decrease RC structures [J]. Earthquake Engineering and EngineeringVibration, 2014,34(2): 113-119.
- [9] 袁迎曙, 贾福萍, 蔡跃. 锈蚀钢筋混凝土梁的结构性能退化模型[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3):47-52.
- YUAN Yingshu, JIA Fuping, CAI yue. The structural behavior deterioration model for corroded reinforced concrete beams [J]. China Civil Engineering Journal, 2001,34(3): 47-52.
- [10] LEE H S, NOGUCHI T, TOMOSAWA F. FEM analysis for structure performance of deteriorated RC structures due to rebar corrosion [C]//Proceeding of the International Concrete under Several Conditions Proceeding of the 2nd International Conference on Concrete Under Severe Conditions. Tromso, Norway: E & FN Spon, 1998: 327-336.
- [11] 沈聚敏, 周锡元, 高小旺, 等. 抗震工程学[M]. 第一版, 北京:中国建筑业出版社, 2000.
- SHEN Jumin, ZHOU Xiyuan, GAO Xiaowang, et al. Resistance to earthquake engineering [M]. 1st ed, Beijing: Building Industry Press of China, 2000.
- [12] MWAIFY A M, ELNASHAI A S. Static pushover versus dynamic collapse analysis of RC buildings [J]. Engineering structures, 2010,23:407-424.
- [13] MOSTAFAEI H, VECCHIO F J, KABEYASAWA T. Deformation capacity of reinforced concrete columns [J]. ACI Structural Journal, 2009,106(2):187-195.
- [14] 陈新孝, 牛荻涛, 王学民. 锈蚀钢筋混凝土压弯构件的恢复力模型[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2005, 37(2):155-159.
- CHEN Xinxiao, NIU Ditao, WANG Xuemin. The restoring force model of corroded reinforced concrete columns [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2005, 37(2): 155-159.
- [15] 张新培. 钢筋混凝土抗震结构非线性分析[M]. 第一版, 北京:科学出版社, 2003.
- ZHANG Xinpei. Nonlinear analysis of reinforced concrete structure [M]. 1st ed, Beijing: Science Press of China, 2003.
- [16] 顾祥林, 孙飞飞. 混凝土结构的计算机仿真[M]. 第一版, 上海:同济大学出版社, 2002.
- GU Xianglin, SUN Feifei. Computer simulation to concrete structures [M]. 1st ed, Shanghai: Tongji University Press of China, 2002.
- [17] 江见鲸, 傅德炫, 王立翔. 建筑结构计算机分析及程序[M]. 第一版, 北京:中国建筑业出版社, 2000.
- JIANG Jianjing, FU Dexuan, WANG Lixiang. Computer analysis of building structures and procedures [M]. 1st ed, Beijing: Building Industry Press of China, 2000.
- [18] 叶列平, 陆新征, 赵世春. 框架结构抗地震倒塌能力的研究——汶川地震极震区几个框架结构震害案例分析[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(6):67-76.
- YE Lieping, LU Xinzhen, ZHAO Shichun. Research on concrete frame of seismic collapse resistance—analysis on a few case of meizoseismal area in Wenchuan's earthquake damage [J]. Journal of Building Structures, 2009,30(6): 67-76.
- [19] 李乔, 赵世春. 汶川大地震工程震害分析[M]. 成都:西南交通大学出版社, 2010.
- LI Qiao, ZHAO Shichun. Damage analysis of wenchuan earthquake engineering[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press of China, 2010.