

杨建华,彭立顺.基于滞回曲线以及结构动力方程的混凝土结构抗震稳定性分析[J].地震工程学报,2018,40(3):444-449.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.444

YANG Jianhua, PENG Lishun. Seismic Stability Analysis of Concrete Structures Based on Hysteretic Curves and Structural Dynamic Equations[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(3): 444-449. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.444

基于滞回曲线以及结构动力方程的混凝土 结构抗震稳定性分析

杨建华¹, 彭立顺²

(1. 江苏城乡建设职业学院, 江苏 常州 213147; 2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 为准确全面地量化分析研究土木工程建筑中混凝土结构抗震稳定性, 提出基于滞回曲线以及结构动力方程的混凝土结构抗震稳定性分析方法。首先采用滞回曲线描述混凝土结构在地震作用下的损伤情况, 对滞回曲线模型拐点进行有效操作, 确保动力方程对混凝土结构抗震稳定性进行有效分析。其次采用基于混凝土结构动力方程的抗震稳定性分析方法, 对地震地面运动模型以及结构分析模型来分析混凝土结构的随机地震反应情况, 得到混凝土结构随机反应的汇总量, 在此基础上通过双参数的结构破坏模型, 基于结构稳定性原理, 获取运算混凝土结构抗震稳定性的概率表达式, 再基于该表达式分析混凝土结构的抗震稳定性情况。实验结果说明, 所提方法能够对土木工程建筑中不同类型混凝土构件抗震稳定性进行有效分析, 分析结果准确且全面。

关键词: 土木工程建筑; 混凝土结构; 抗震稳定性; 非线性动力反应; 滞回曲线; 破坏损伤

中图分类号: TB123; TU352

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)03-0444-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.03.444

Seismic Stability Analysis of Concrete Structures Based on Hysteretic Curves and Structural Dynamic Equations

YANG Jianhua¹, PENG Lishun²

(1. Jiangsu Urban and Rural Construction College, Changzhou 213147, Jiangsu, China;

2. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: To accurately and comprehensively analyze the seismic stability of concrete structures in civil engineering buildings, a method for seismic stability analysis of concrete structures based on hysteretic curves and structural dynamic equations is proposed. A hysteretic curve is first used to describe the damage of concrete structures under an earthquake, and the inflection point of the hysteretic curve model is operated effectively to ensure an effective analysis of the seismic stability of concrete structure by using a dynamic equation. Then the seismic stability analysis method based on the dynamic equation of concrete structure is adopted. Based on the earthquake ground motion model and structural analysis model, the random seismic response of concrete structures is analyzed, and the total amount of the random seismic response is obtained. Then the probabili-

收稿日期: 2017-08-20

基金项目: 国家档案局科技项目(2017-X-43)

作者简介: 杨建华(1965-), 女, 江苏常州人, 硕士, 土木工程学院院长、副教授, 研究方向: 建筑工程管理、建筑材料研究等。

E-mail: ypengcw@126.com。

ty expression for calculating the seismic stability of concrete structures is derived based on the principle of structural stability. Based on this expression, the seismic stability of concrete structures is analyzed. The experimental results are accurate and comprehensive, indicating that the proposed method can effectively analyze the seismic stability of different types of concrete members in civil engineering buildings.

Key words: civil engineering construction; concrete structure; seismic stability; nonlinear dynamic response; hysteresis curve; damage

0 引言

随着经济的快速发展,土木工程建筑行业也呈现日益繁荣的发展态势,土木工程建筑中混凝土的应用价值也逐渐提升。地震会导致土木工程建筑被破坏以及坍塌,使得人民群众的生命安全受到威胁,财产损失提高。土木工程建筑中混凝土结构规划过程中对荷载进行控制时应充分考虑地震作用^[1]。传统方法大都基于有限元模型,对土木工程建筑中混凝土结构抗震稳定性进行分析,但是该方法缺乏量化分析过程,存在抗震稳定性分析结果不准确、过于片面等问题^[2]。因此本文提出基于滞回曲线以及结构动力方程的混凝土结构抗震稳定性分析方法,从混凝土结构从非线性动力反应以及震后破坏损伤两个角度,综合分析土木工程建筑中混凝土结构抗震稳定性情况。

1 土木工程建筑中混凝土结构抗震稳定性分析

1.1 结构振动作用下的滞回曲线

1.1.1 滞回曲线概念

滞回曲线描述混凝土结构在地震作用下的损伤情况,用于分析结构的抗震稳定性^[3]。滞回曲线是稳定时期荷载影响下检测到的土木工程建筑中混凝土结构应力闭合曲线^[4],其描述了混凝土结构应力波动的动态性和滞后性(图 1)。混凝土结构的耗能能力用滞回环面积描述,二者直接具有正相关性。图 1 中虚线表示的是骨架曲线,是连接首次加载曲线同滞回曲线在不同最高点的线^[5]。土木工程建筑中混凝土结构在地震作用下产生大幅度剪切以及钢筋黏结滑移等问题,此时骨架曲线低于单调加载情况下的变形曲线。恢复力曲线包括滞回曲线以及骨架曲线,混凝土结构在地震后恢复初始变形能力可用恢复力曲线表示。

1.1.2 滞回曲线模型拐点操作

求解过程中,混凝土结构刚度是常数,由于受到时间步长分段点无法同滞回曲线模型拐点保持高度匹配的影响,导致拐点在时间步长中,使得相同时间

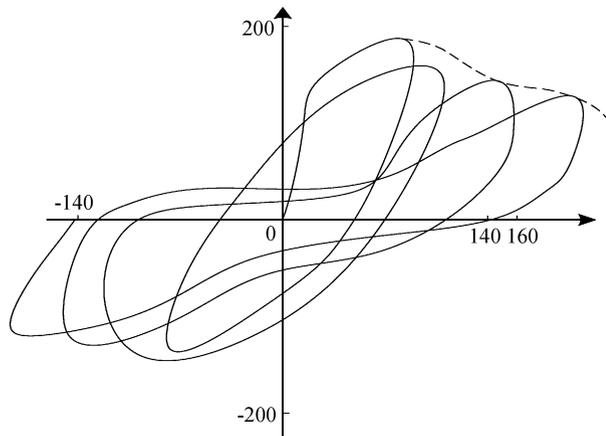


图 1 滞回曲线示意图

Fig.1 Schematic diagram of hysteresis curves

步长混凝土结构刚度存在波动性^[6]。为了采用动力方程对混凝土结构抗震稳定性进行有效分析,应对滞回曲线模型拐点进行有效操作。文章将拐点当成分界点,对时间步长进行调控,确保各时间步长结构以及构件刚度的稳定性^[7]。将拐点当成边界点,对存在拐点的时间步长 Δt 实施分割,获取两个下级步长 $\Delta t'$ 以及 $(\Delta t - \Delta t')$ 。依次实施求解过程中,将 δ_i 当成起始点,分别基于 $\Delta t'$ 以及 $(\Delta t - \Delta t')$ 通过刚度 k_1 以及 k_2 实施运算,再通过 Δt 实施后续运算。该过程的关键是获取合理的 $\Delta t'$ 。土木工程建筑中混凝土结构的拐点包括通过弹性进入塑性的拐点以及通过塑性进入卸载的拐点^[8]。针对两种类型拐点,需要进行两种处理:第 i 步通过拐点到第 $i+1$ 步过程中,确保速度符号的稳定;第 i 步通过拐点到第 $i+1$ 步过程中,速度符号调整^[9]。则第一种拐点的表达式是:

$$\Delta t' = \frac{F_s - F_i}{F_{i+1} - F_i} \Delta t \quad (1)$$

式中:拐点恢复力用 F_s 表示;运算获取的第 i 步和第 $i+1$ 步恢复力用 F_i 以及 F_{i+1} 表示。

通过速度的线性插值对第二种类型拐点进行操作^[10],则有:

$$\Delta t' = \frac{\delta_i}{\dot{\delta}_i} \quad (2)$$

式中:混凝土结构变形的速度以及加速度用 $\dot{\delta}_i$ 和 δ_i 描述。

1.2 基于混凝土结构动力方程的抗震稳定性分析

文章基于 1.1 节滞回曲线分析的混凝土结构在地震作用下的损伤情况,以及对滞回曲线模型拐点的操作过程,确保采用动力方程对混凝土结构抗震稳定性进行有效分析后,采用基于混凝土结构动力方程的抗震稳定性分析方法,实现混凝土结构抗震稳定性的准确、全面分析。

1.2.1 地震运动模型和混凝土结构分析模型

式(3)表示的是地震发生时地面极限加速度的平均数值同地震烈度相互作用:

$$a_{\max} = 10^{(I_{\text{lg}} - 0.01)} \text{ (cm/s}^2\text{)} \quad (3)$$

式中: a_{\max} 表示地面极限加速度的平均数值; I 表示地震烈度。

以不同层次包含唯一的水平自由度的剪切梁结构模型对多层非线性钢筋混凝土结构实施仿真^[11],得到的运动微分方程可用式(4)表示:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + g(x, z) = -m\ddot{x}_a,$$

$$C = \begin{bmatrix} c_1 & -c_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & c_2 & -c_3 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & c_n - 1 & -c_n \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & c_n \end{bmatrix},$$

$$g(x, z) = \begin{cases} g_1(x_1, z_1) - g_2(x_2, z_2) \\ g_2(x_2, z_2) - g_3(x_3, z_3) \\ \vdots \\ g_{n-1}(x_{n-1}, z_{n-1}) - g_n(x_n, z_n) \\ g_n(x_n, z_n) \end{cases}, \quad (4)$$

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \cdots & 0 \\ m_2 & m_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_n & m_n & \cdots & m_n \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, m = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_n \end{bmatrix}.$$

式中: x_i 、 m_i 、 c_i 、 $g(x, z)$ 、 z_i 和 \ddot{x}_a 分别表示 i 层同 $i-1$ 层两者的相对位移、 i 层的质量和 i 层的黏滞阻尼系数、 i 层滞变恢复力、 i 层滞变位移以及水平地震地面加速度。

1.2.2 混凝土结构抗震稳定性评估

(1) 结构破坏规范

地震情况下土木工程建筑混凝土结构破坏受到

最高位移反应以及汇总滞变能耗的干扰^[12],则混凝土结构的双参数破坏规范是:

$$D = x_m/x_u + \beta E_h/f_y x_u \quad (5)$$

式中: D 表示破坏指数;地震时以及单调荷载时混凝土结构的最高位移分别是 x_m 以及 x_u 。混凝土结构层间屈服剪力以及汇总滞变耗能分别用 f_y 以及 E_h 表示^[13];重复荷载干扰系数是 β 。

(2) 结构地震稳定性分析

式(6)表示受给定烈度(I)的影响,依照设计烈度(I_d)设计的结构全部组成部分受到 j 级损毁的可能性 D_j :

$$p_i = p(D_j | I_d, I) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_{fi}) \quad (6)$$

式中: p_{fi} 表示结构 i 层受地震损毁的可能性,其为通过式(7)计算得到的:

$$p_{fi} = \int_0^{\infty} f_s(x_i | I_d, I) F_R(x_i | D_j) dx_i = \int_0^{\infty} [1 - F_s(x_i | I_d, I)] f_R(x_i | D_j) dx_i \quad (7)$$

式中: $f_s(x_i | I_d, I)$ 表示产生地震效应的可能性比例; $F_s(x_i | I_d, I)$ 函数表示可能产生地震效应的位置; $f_R(x_i | D_j)$ 表示结构抗力的可能性比例; $F_R(x_i | D_j)$ 函数表示结构可能产生抗力的位置; x_i 表示 i 层损毁程度。

式(8)表示以极值 I 型为前提的地震效应可能产生抗力的位置^[14]:

$$F_s(x_i | I_d, I) = \exp\{-\exp[-c(x_i - d)]\},$$

$$c = \pi/\sqrt{6}\sigma_{x_i},$$

$$d = \mu_{x_i} - \sqrt{6}\gamma\sigma_{x_i}/\pi,$$

$$\mu_{x_i} = \frac{\bar{x}_{mi}}{x_{ui}} + \frac{\beta E_{hi}}{f_{yi} x_{ui}}, \quad (8)$$

$$\sigma_{x_i}^2 = \frac{\sigma_{x_{mi}}^2}{x_{ui}^2} + \frac{2\beta}{f_{yi} x_{ui}} \sigma_{x_{mi}} \sigma_{E_{hi}} + \frac{\beta^2}{f_{yi}^2 x_{ui}^2} \sigma_{E_{hi}}^2.$$

式中: $\gamma \approx 0.6011$ 是 Euler 常数; μ_{x_i} 表示结构 i 层损毁程度的平均值^[15]; σ_{x_i} 表示结构 i 层损毁程度的均方差; \bar{x}_{mi} 表示极限位移反应的平均值; $\sigma_{x_{mi}}^2$ 表示极限位移反应的方差; E_{hi} 表示累积滞变耗能的平均值; $\sigma_{E_{hi}}^2$ 表示累积滞变耗能的方差; x_{ui} 表示结构 i 层极限位移。

式(9)表示以对数正态为前提的结构抗力产生位置可能性比例函数:

$$f_R(x_i | D_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{In x_i x_i}} \cdot \exp\left[-(In x_i - \mu_{In x_i})^2 / 2\sigma_{In x_i}^2\right],$$

$$\mu_{In x_i} = In[\mu_{x_i} / \sqrt{1 + (\sigma_{x_i} / \mu_{x_i})^2}],$$

$$\sigma_{In x_i} = \sqrt{In[1 + (\sigma_{x_i} / \mu_{x_i})^2]}.$$

(9)

式中,根据表 1 对取决于损毁等级的 μ_{x_i} 表示的损毁程度平均值与 σ_{x_i} 表示的损毁程度均方差进行设置。

表 1 不同损毁等级的损毁程度平均值和均方差

Table 1 Average value and mean square deviation of damage at different damage degree

损毁等级	μ_{x_i}	σ_{x_i}
D_1	0.04	0.014
D_2	0.14	0.064
D_3	0.24	0.164
D_4	0.64	0.364
D_5	0.99	0.499

2 实验分析

2.1 实例一分析

通过实验对本论述提出的土木工程建筑中建筑混凝土结构抗震稳定性分析情况进行实例分析,实验所选用的钢筋混凝土结构处于 II 类场地土,是依照 8 度标准规划的 6 层结构构架。使用本文算法对 II 类场地土、各烈度下相关的谱强度 S_0 进行计算,计算结果见表 2 所列。

表 2 地震地面运动功率谱强度

Table 2 Power spectral intensity of earthquake ground motion

I	$S_0 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-3})$
6	3.86
7	14.78
8	62.42
9	243.06
10	1 005.06

设置地震地面运动的参数,应用本论述方法分别对受地震烈度差异影响后,结构的层间极限位移反应、不同层的累积滞变耗能与损坏程度进行计算,其后对结构不同层的地震损毁可能性求解,通过运算得到结构综合的地震损毁可能性,在此基础上得到结构的地震损毁可能性矩阵,结果见表 3。

分析上述实例说明,本文提出的土木工程建筑中混凝土结构抗震稳定性分析方法是可行的。

表 3 8 度规划烈度条件下地震损毁可能性矩阵

Table 3 Earthquake damage possibility matrix under 8 degree planning intensity

I	D_j				
	基本完好	轻微损坏	中等损坏	严重损坏	倒塌
6	0.848 7	0.030 9	0.000 1	0	0
7	0.534 6	0.136 7	0.084 9	0.009 9	0.000 9
8	0.365 5	0.298 5	0.055 7	0.027 8	0.007 9
9	0.079 9	0.112 9	0.220 5	0.121 7	0.091 2
10	0.030 9	0.097 9	0.079 8	0.170 3	0.367 6

2.2 实例二分析

实验为了检测本论述分析方法对不同类型土木工程建筑中混凝土构件的抗震稳定性分析的有效性,设置了 10 种类型土木工程建筑型钢混凝土构件,这些混凝土构件具有不同的剪跨比、骨料替代率、轴压比以及体积配箍率。采用式 $n = N / (f_c A_c + f_a A_a)$ 获取轴压比,设置的轴压比是 N ,混凝土轴心抗压强度用 f_c 表示,型钢屈服强度用 f_a 表示,混凝土截面面积以及型钢截面面积用 A_c 和 A_a 表示,详细情况如表 4 所列。将实腹式普通热轧工字型钢当成实验型钢,其型号是 I15。

表 4 实验混凝土构件设计参数

Table 4 Design parameters of experimental concrete components

构件序号	骨料替代率 $r/\%$	剪跨比 λ	轴压比 n	体积配箍率 $\rho_{sv}/\%$
QEU4	99	1.38	0.5	1.25
QEU9	99	1.74	0.5	1.25
QEU10	99	2.24	0.5	1.25
QEU11	0	3.14	0.5	1.25
QEU12	88	3.14	0.5	1.25
QEU13	99	3.14	0.5	1.25
QEU14	99	3.14	0.2	1.25
QEU15	99	3.14	0.8	1.25
QEU16	99	3.14	0.5	0.99
QEU17	99	3.14	0.5	1.98

如图 2 所示,通过本论述分析方法得到的不同实验混凝土构件的滞回曲线图中, P 表示柱顶水平荷载、 Δ 表示柱顶水平位移。分析该图得到型钢再生混凝土柱构件的滞回曲线特征如下:

(1) 当构件处于负荷提升的开始阶段(未损毁):滞回曲线涵盖的区域少,荷载同位移表现为线性关系,曲线大致叠加在一起;构件表现出较小的刚度改变状态,对构件进行卸载后,构件变形可大致还原,此时的构件能够弹性工作,构件抗震性能佳。

(2) 当构件处于负荷提升的中期,构件滞回环涵盖区域持续扩展,其表现为曲线样式,并且斜率以位移轴为目标进行倾斜下落。使得构件表现出大幅度的刚度退化现象;进行卸载后构件的水平位移未

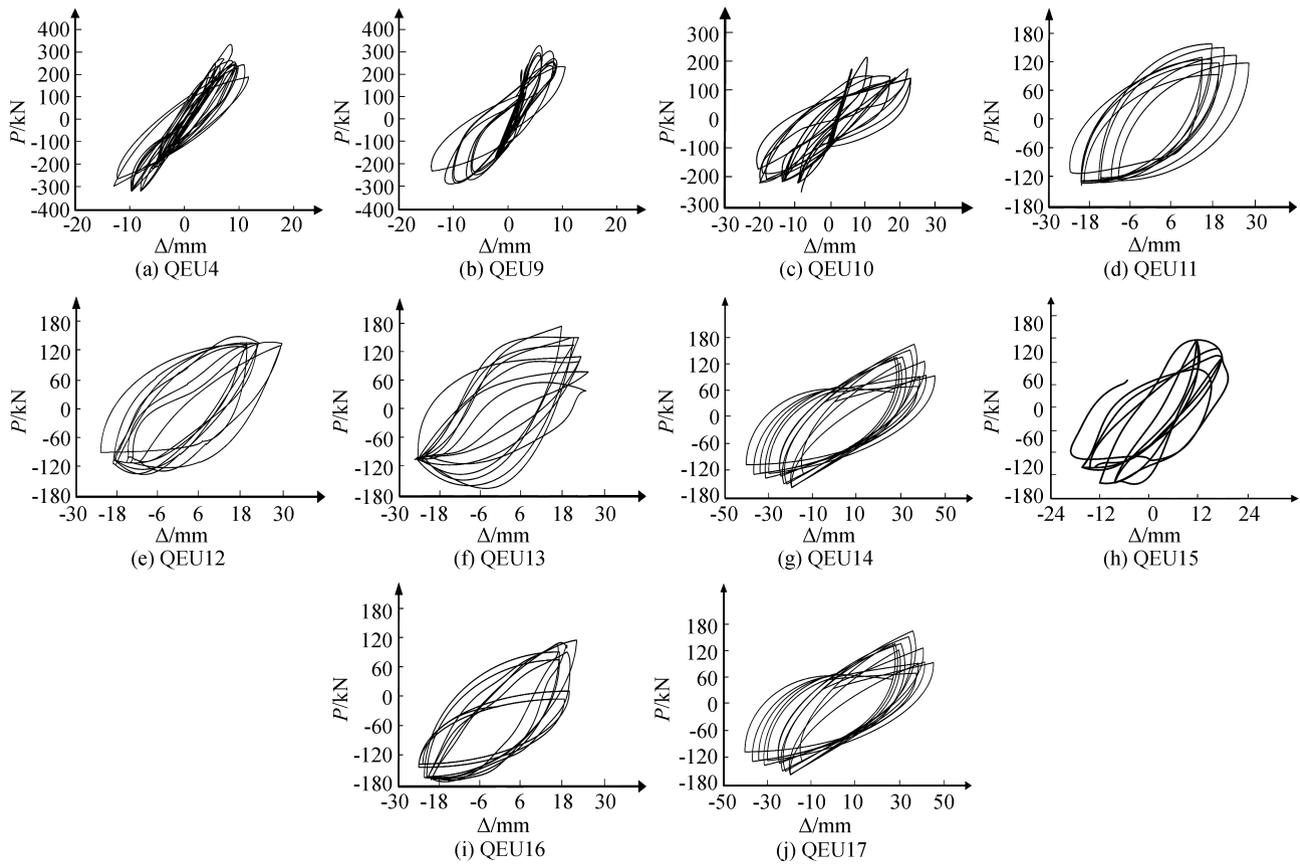


图2 混凝土结构滞回曲线

Fig.2 Hysteretic curves of concrete structure

还原,表示构件残余变形程度高,此时的构件可以弹塑性工作,构件具备较佳的抗震性能。

(3) 当构件处于位移控制期,滞回环涵盖区域处于位移级数相等情况时,重复次数同滞回环面积间具有正相关关系,滞回环的饱满度同位移级数间也具有正相关性;荷载达到构件承受极限时,构件水平承载力慢慢减弱,短时间内变形显著提升,此时混凝土构件的抗震稳定性较弱。

(4) 不考虑低剪跨比构件以及高轴压比构件,剩余实验混凝土构件的滞回曲线表现出饱满的梭形,存在较高的变形问题,可以看出实验混凝土构件的耗能性能较强,抗震稳定性差。

(5) 具有低值的剪跨比($\lambda < 1.5$)实验混凝土构件的滞回曲线拥有较低的饱满度,变形性能和承载力也对应降低,会出现过高的刚度退化率,说明剪跨比低的混凝土构件的短柱延性和耗能性弱,这些构件的抗震稳定性性能较低。具有高值的剪跨比($\lambda > 2.35$)实验混凝土构件的滞回曲线拥有较高的饱满度,变形性能和承载力提升,构件具备较强的延性,抗震稳定性性能较高。

(6) 分析实验混凝土构件 QEU11~QEU13 的滞回曲线能够得出,这些构件的滞回曲线都是梭形。由于构件的再生粗骨取代率逐渐提升,构件滞回曲线的饱满度存在细微的减弱趋势,说明取代率会干扰混凝土构件的延性变形程度,然而综合分析可以看出,实验混凝土构件都具备较强的抗震稳定性性能。

(7) 分析实验混凝土构件 QEU13~QEU15 的滞回曲线能看出,如果轴压比低,则混凝土构件滞回环是梭形,饱满度较高,高于最高水平荷载后,构件滞回曲线的稳定性提升,构件强度和刚度减弱的趋势逐渐降低,具有较高的延性以及耗能性能,混凝土构件的抗震稳定性性能强;如果轴压比高,则混凝土构件滞回曲线的饱满度逐渐减弱,相应的极限变形能力也降低,构件强度以及刚度减弱趋势快速提升,具有较低的延性以及耗能性能,构件抗震稳定性性能较差。综合分析可得,混凝土构件的延性和耗能性同轴压比具有负相关性。为了提高土木工程建筑中混凝土结构的抗震稳定性,应选用轴压比低的混凝土构件。

(8) 分析实验混凝土构件 QEU13、QEU16 以及 QEU17 的滞回曲线能够得出, 体积配箍率对滞回曲线具有较大的干扰性, 实验混凝土构件的体积配箍率提升, 导致构件滞回曲线的饱满度提升, 极限变形也逐渐增强, 混凝土构件的抗震稳定性能同构件体积配箍率间具有正相关性。为了提高土木工程建筑中混凝土结构的抗震稳定性, 应选用体积配箍率高的混凝土构件。

3 结论

文章为了提高土木工程建筑中混凝土结构抗震稳定性, 提出基于滞回曲线以及结构动力方程的混凝土结构抗震稳定性分析方法, 设置地震地面运动的参数, 对受地震烈度差异影响后, 结构的层间极限位移反应、不同层的累积滞变耗能与损坏程度进行计算, 可准确得到混凝土结构的抗毁性结果。通过测试不同实验混凝土构件的滞回曲线图, 对混凝土结构损伤情况以及抗震稳定性情况进行分析, 提高土木工程建筑混凝土结构稳定性分析结果的准确性和全面性。

参考文献(References)

[1] 冯川川. 建筑基础设计中考虑风和地震荷载作用的设计方法探讨[J]. 工程建设与设计, 2017(3): 27-30.
FENG Chuanchuan. Discussion on Design Method of the Role of Wind and Earthquake Loads in the Design of Building Foundation[J]. Construction & Design for Project, 2017(3): 27-30.

[2] 袁康, 白宏思, 李英民. 超高层建筑结构整体稳定性分析方法研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2016, 38(3): 7-12.
YUAN Kang, BAI Hongsi, LI Yingmin. Study on Analytical Methods for Overall Stability of Super High-rise Building[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(3): 7-12.

[3] 李宁波, 钱稼茹, 叶列平, 等. 竖向钢筋套筒挤压连接的预制钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(1): 31-40.
LI Ningbo, QIAN Jiaru, YE Lieping, et al. Tests on Seismic Behavior of Precast RC Shear Walls with Vertical Rebar Splicing by Pressed Sleeve[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(1): 31-40.

[4] 黄强, 李东彬, 邵弘, 等. 轻钢轻混凝土结构多层足尺模型抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(4): 10-17.
HUANG Qiang LI Dongbin, SHAO Hong, et al. Seismic Capacity Evaluation of Lightweight Steel and Lightweight Concrete Structure Based on Quasi-static Cyclic Test of a Multi-story Full Scale Model[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(4): 10-17.

[5] 赵海涛, 骆勇军, 王潘绣, 等. 高耸钢筋混凝土进水塔结构抗震稳定性分析与安全评估[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(6): 106-109.
ZHAO Haitao, LUO Yongjun, WANG Panxiu, et al. Seismic Stability Analysis and Safety Assessment for Reinforced Concrete Intake Tower Structure[J]. Journal of Water Resources Architectural Engineering, 2012, 10(6): 106-109.

[6] 胡好, 赵作周, 钱稼茹. 高烈度地区框架-核心筒结构中美抗震设计方法对比[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(2): 1-9.
HU Yu, ZHAO Zuozhou, QIAN Jiaru. Comparison of Chinese and American Seismic Design Methods for Frame-core Wall Structures in High Seismic Zone[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(2): 1-9.

[7] 余细东, 任志刚, 付应兵, 等. 钢框架-混凝土核心筒结构的抗震性能分析[J]. 武汉理工大学学报, 2016, 38(9): 77-84.
YU Xidong, REN Zhigang, FU Yingbing, et al. Seismic Performance Analysis of Steel Frame-concrete Core Tube Structure[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2016, 38(9): 77-84.

[8] XIAO J, GONG W, II J R M, et al. Probabilistic Seismic Stability Analysis of Slope at a Given Site in a Specified Exposure-time[J]. Engineering Geology, 2016(212): 53-62.

[9] 占昌宝, 罗川, 丁振坤, 等. 高层建筑抗震性能预测仿真研究[J]. 计算机仿真, 2016, 33(8): 397-402.
ZHAN Changbao, LUO Chuan, DING Zhenkun, et al. Research on Seismic Performance Prediction of High-rise Buildings[J]. Computer Simulation, 2016, 33(8): 397-402.

[10] ELSHAER A, MOSTAFA H, SALEM H. Progressive Collapse Assessment of Multistory Reinforced Concrete Structures Subjected to Seismic Actions[J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2017, 21(1): 184-194.

[11] 贺强, 文艳芳, 苏三庆. 带屈曲约束支撑的 V 型偏心支撑钢框架抗震性能分析[J]. 钢结构, 2016, 31(6): 18-22.
HE Qiang, WEN Yanfang, SU Sanqing. Seismic Performance Analysis of V-shaped Eccentrically Braced Frames with Buckling-restrained Braces[J]. Steel Construction, 2016, 31(6): 18-22.

[12] TITI A, BIONDINI F. Probabilistic Seismic Assessment of Multistory Precast Concrete Frames Exposed to Corrosion[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2014, 12(6): 2665-2681.

[13] BAI J W, HUESTE M B D, GARDONI P. Seismic Vulnerability Assessment of Tilt-up Concrete Structures[J]. Structure & Infrastructure Engineering, 2015, 11(9): 1131-1146.

[14] 李冰冰. 土木工程中混凝土结构的施工技术分析[J]. 山西建筑, 2016, 42(16): 114-115.
LI Bingbing. Analysis on Concrete Structure Construction Technologies in Civil Engineering[J]. Shanxi Architecture, 2016, 42(16): 114-115.

[15] KIM D K. Seismic Response Analysis of Reinforced Concrete Wall Structure Using MacroModel[J]. International Journal of Concrete Structures & Materials, 2016, 10(1): 99-112.