

杜娅妮. 横向地震波冲击下建筑结构稳定性变化分析[J]. 华南地震, 2019, 39(1): 104–109. [DU Yani. Stability Analysis of Building Structures Subjected to Transverse Seismic Waves[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(1): 104–109]

横向地震波冲击下建筑结构稳定性变化分析

杜娅妮

(上海城建职业学院, 上海 200483)

摘要: 高层 EPS 法分析横向地震波冲击下建筑结构稳定性变化时, 未进行横向地震波随机过程数学模拟, 获取的横向地震波与实测不符, 提出一种新的横向地震波冲击下建筑结构稳定性变化分析方法, 采用三角级数型非平稳随机过程模型函数, 模拟横向地震波非平稳性特征, 得到横向地震波模拟曲线, 根据该曲线建立建筑结构稳定性动力运动方程, 运用 Hilber–Hughes–Taylor 递推格式求解该方程的安全系数, 安全系数越高建筑结构稳定性越强。为研究建筑结构在横向地震波反复荷载作用下的稳定性状态, 运用弹塑性损伤模型模拟建筑结构核心筒墙体混凝土, 得到用于分析建筑结构稳定性的最大、最小特征值。实验结果表明, 所提方法能够分析建筑结构稳定性变化, 横向地震波冲击前 5 s 对建筑结构稳定性影响最大。

关键词: 横向地震波; 建筑结构; 稳定性; 结构动力; 运动方程; 损伤模型

中图分类号: U443 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662(2019)01-0104-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2019.01.017

Stability Analysis of Building Structures Subjected to Transverse Seismic Waves

DU Yani

(Shanghai Urban Construction Vocational College, Shanghai 200483, China)

Abstract: When the high-level EPS method is used to analyze the stability changes of the building structure under the impact of horizontal seismic waves, no mathematical simulation of the random process of the horizontal seismic waves has been carried out. The obtained horizontal seismic waves are inconsistent with the actual measurements, and a new method for analyzing the stability of the building structure under the impact of horizontal seismic waves is proposed. Using the trigonometric series non-stationary random process model function to simulate the non-stationary characteristics of transverse seismic waves, the transverse seismic wave simulation curve is obtained. According to the curve, the dynamic motion equation of building structure stability is established, and the safety coefficient of the equation is solved by Hilber–Hughes–Taylor recursive push format. The higher the safety factor, the stronger the stability of the building structure. In order to study the stability of the structure under the repeated load of transverse seismic waves, the ElastoPlastic damage model is used to simulate the core wall concrete of the building structure, and the maximum and minimum characteristic

收稿日期: 2018-08-03

作者简介: 杜娅妮(1982-), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事工程管理研究。

E-mail: 247758371@qq.com.

values used to analyze the stability of the building structure are obtained. The experimental results show that the proposed method can analyze the structural stability of buildings, and the effect of 5 seconds before transverse seismic wave impact on structural stability is greatest.

Keywords: Transverse seismic wave; Building structure; Stability; Structural dynamics; Equation of motion; Damage model

0 引言

近些年地震频繁发生,特别是大地震会造成大面积房屋倒塌、交通受阻、水电工程设施破坏等问题,给国家和人民的生命财产造成巨大损失。建筑物整体结构的稳定性在地震中发挥着关键作用,而横向地震波在所有类型的地震波中破坏力最强^[1],因此在横向地震波冲击下对建筑物整体结构的稳定性的变化进行分析就显得极为重要。

横向地震波的特性非常复杂,由于震源、震中距以及地形条件的不同而展现出不同的特性^[2]。国内外对横向地震波特性的研究早已展开,但因为资料的匮乏和所用方法的局限,目前对横向地震波冲击下建筑结构稳定性变化的研究成果并不丰富^[3]。文献[4]提出的高层 EPS 格构式混凝土墙体地震响应分析方法,未对横向地震波进行模拟,所用横向地震波与实测不符。文献[5]提出的考虑场地条件的高层建筑长周期地震反应特征分析方法,未构建动力运动方程,对建筑结构稳定性分析效果差。因此,提出新的横向地震波冲击下建筑结构稳定性变化分析方法,深入研究横向地震波对建筑结构的影响,为地震波的破坏性研究提供有效的理论依据。

1 横向地震波冲击下建筑结构稳定性变化分析

1.1 横向地震波随机过程的数学模拟

横向地震波冲击是一个随机过程,它具有显著非平稳性^[6]。为能够全面反映横向地震波这一特点,研究其对建筑结构稳定性的作用,引入博格丹诺夫等人提出的三角级数型的非平稳随机过程模型函数,模拟横向地震波非平稳性特征,即:

$$g(t) = \sum_{k=1}^m b_k t^{-b_k} \cos(v_k t + u_k) \quad (1)$$

式中 b_k 、 v_k 、 u_k 为正实数, t 为特征变量。

当 $v_1 < v_2 < L < \dots < v_n$ 时, u_1, u_2, L, \dots, u_n 为 n 个分散在 $0 \sim 2\pi$ 上的随机变量, f 表示横向地震波的波动频率, $g(t)$ 的 Laplace 函数为:

$$G(t) = \sum_{k=1}^m b_k \frac{[(t+b_k)^2 - v_k^2] \cos u_k - 2v_k(t+b_k) \sin u_k}{[(t+b_k)^2 + v_k^2]^2} \quad (2)$$

采用线性同余法产生随机变量^[7],并依据随机过程模拟规则、实地特征(地形、力学形态等)和实测地震动特征(加速度、频谱等)确定正实数 b_k 、 v_k 、 u_k 。

由此能够得到横向地震波模拟曲线,如图 1 所示。根据图 1 可知,横向地震波模拟曲线与实测曲线表现特征较为接近。

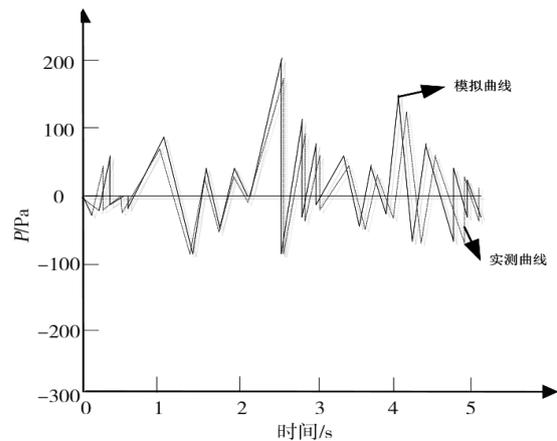


图 1 非平稳随机横向地震波模拟曲线

Fig.1 Simulation curve of non-stationary random transverse seismic wave

1.2 建筑结构的稳定性动力运动方程安全系数分析

根据横向地震波模拟曲线,建立横向地震波冲击下建筑结构稳定性的动力运动方程:

$$[N]\{\ddot{v}\} + [D]\{\dot{v}\} + [L]\{v\} = -[N]\{J\}\ddot{v}_h \quad (3)$$

式(3)中, $[N]$ 为建筑结构质量矩阵; $[D]$ 为建筑结构阻尼矩阵; $[L]$ 为建筑结构刚度矩阵; $\{v\}$ 为节点位移; $\{\dot{v}\}$ 为节点速度; $\{\ddot{v}\}$ 为节点加速度向量; \ddot{v}_h 为地面运动加速度; $\{J\}$ 为元素是 1 的

向量。其中的阻尼采用瑞利阻尼。

为计算出建筑结构动力运动方程的安全系数,这里运用 Hilber-Hughes-Taylor 递推格式求解式(3)。该格式以 Newark 方法为基础^[9],具体递推公式如下:

$$\{\dot{v}\}_{i+1} = \{\dot{v}\}_i + [(1-\lambda)\Delta k]\{\ddot{v}\}_i + (\lambda\Delta k)\{\dot{v}\}_{i+1} \quad (4)$$

$$\{v\}_{i+1} = \{v\}_i + (\Delta k)\{\dot{v}\}_i + [(0.6-\alpha)(\Delta k)^2]\{\ddot{v}\}_i + [\alpha(\Delta k)^2]\{\dot{v}\}_{i+1} \quad (5)$$

式(5)中 $\{v\}_i$ 、 $\{\dot{v}\}_i$ 、 $\{\ddot{v}\}_i$ 分别为第*i*时刻建筑结构的位移矢量、速度矢量和加速度矢量^[10];λ为判断因子;Δ*k*为非线性变量;α为安全系数。

与 Newark 法的区别在于式(5)中的安全系数α和判断因子λ的取值中引入了参数δ,即

$$\alpha = \frac{1}{3}(1-\delta)^2, \lambda = \frac{1}{5} - \delta(-\frac{1}{2} \leq \delta \leq 0) \quad (6)$$

参数δ的引入令上述递推公式具有计算阻尼的能力,同时δ令计算阻尼有了新的形式:针对低频部分,阻尼增加缓慢;针对高频部分,阻尼增加迅速^[11]。因此,微小的阻尼能够很好的抑制高频噪声,同时对低频噪声的求解没有影响^[12]。这里令δ为-0.06。将式(6)通过 Newark 法计算可得:

$$\Delta k \leq \frac{\{v\}_i}{\pi} \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{2} + \lambda - 4\alpha}} \quad (7)$$

由此可知, Hilber-Hughes-Taylor 递推格式是恒常稳定的,能够求解建筑结构稳定性动力运动方程的安全系数,安全系数越高建筑结构稳定性越强^[13]。

1.3 建筑结构的稳定性变化分析

为进一步研究建筑结构的稳定性,还需进行横向地震波冲击下建筑结构弹塑性时程响应分析。为此,运用弹塑性损伤模型模拟建筑结构核心筒墙体混凝土,以研究建筑结构混凝土在横向地震波反复荷载作用下的状态^[14]。弹塑性损伤模型能够适应建筑材料拉压强度的改变、刚度的变化以及拉压循环的刚度复原。弹塑性损伤模型的屈服函数通过有效力表达为:

$$G(\bar{\tau}, \bar{\zeta}^{qu}) = \frac{1}{1-\alpha} [\bar{r} - 3\theta\bar{q} + \sigma(\bar{\zeta}^{qu}) < \bar{\tau}_{max} > - \sigma < -\bar{\tau}_{max} >] - \bar{\tau}_r(\bar{\zeta}^{qu}) \leq 0 \quad (8)$$

式(8)中, \bar{r} 为有效应力, \bar{q} 为有效静水压力, $\bar{\tau}_{max}$ 为有效应力张量的最大特征值, $\sigma(\bar{\zeta}^{qu})$ 为拉压塑性函数, θ 与 σ 为建筑结构材料常数,尖括号为

算子,代表 $\langle x \rangle = (|x| + x)/2$ 。

弹塑性损伤模型的塑性是定义在有效应力空间中,运用 Druck-Prager 函数得到:

$$H = \sqrt{(\epsilon \eta_0 \tan \Phi)^2 + r^2} - \bar{q} \tan \Phi \quad (9)$$

式中, Φ 为水平高压下的膨胀角, η_0 为单轴受压力度, ϵ 为势函数偏离渐近线程度的参数。塑性流动由流动势函数*H*控制。

建筑结构受横向地震波拉伸和压缩的稳定性情况,由受拉与受压时等效塑性应变的两个硬化变量表示^[15]。等效塑性应变率表达式为:

$$\bar{\zeta}_i^{qu} = r[\hat{\eta}] \bar{\zeta}_{max}^{qu} \quad (10)$$

$$\bar{\zeta}_d^{qu} = -[1-r[\hat{\eta}]] \bar{\zeta}_{min}^{qu} \quad (11)$$

式中 $\bar{\zeta}_{max}^{qu}$ 与 $\bar{\zeta}_{min}^{qu}$ 分别为塑性应变率张量 ζ^{qu} 的最大和最小特征值。

最大、最小特征值能够反映出建筑结构的稳定性,最大特征值越大,说明建筑结构受横向地震波拉伸越大,稳定性越差;最小特征值越小,说明建筑结构受横向地震波压缩越严重,稳定性越差。

2 实验分析

为了验证本文方法对横向地震波冲击下建筑结构稳定性变化的准确性,实验采用本文方法对某实际建筑工程在横向地震波重建下的建筑结构变化情况进行分析,同时进一步分析了本文方法对实验建筑的动力稳定分析结构,进而验证本文方法可对横向地震波重建下的建筑结构变化情况以及稳定性进行准确分析。

2.1 算例分析

某建筑地上11层,其建筑结构为预制混凝土板墙结构,每层高3.0m,梁柱混凝土为C20,地下一层采用天然地基,深度2.5m,建筑平面96.5m×11.2m,抗震烈度为7度,设置基本横向地震波加速度值为0.25g,场地类别为II类。

实验运用结构动力运动方程,计算在横向地震波冲击下该建筑的地基整体稳定性安全系数。并以该建筑为参照,假设建筑基础埋深加大(二层地下室)、有侧限减弱(建筑旁有河道)两种情况进行对比实验。目的是为了研究横向地震波作用下,不同基础埋深、有无侧限减弱(如基础在河、湖等边缘的建筑物)条件对建筑结构整体稳定性的影响,其计算简图如图2所示。

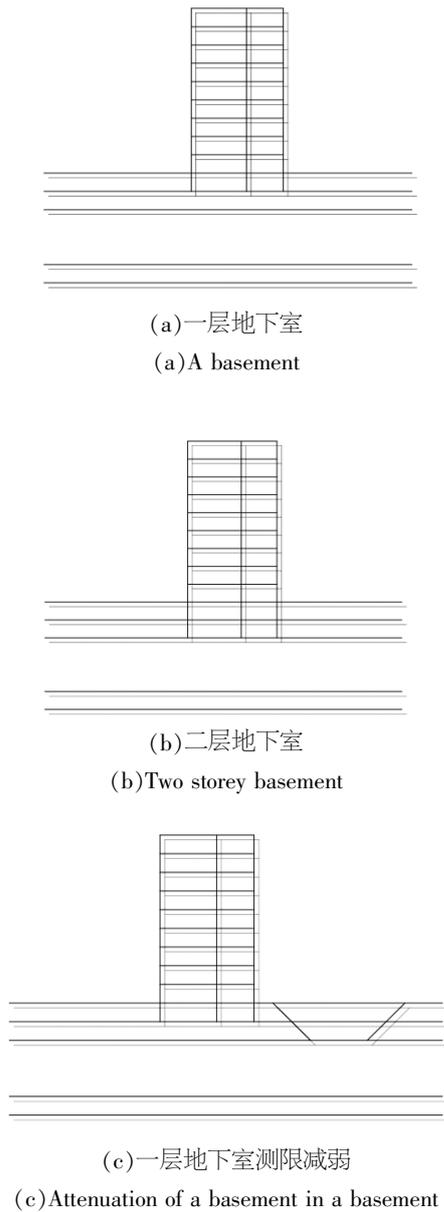


图 2 计算算例简图

Fig.2 Calculation example diagram

弹塑性时程响应分析分别选取近 50 年强度为 2%、10%的横向地震波进行计算,详细过程为:

计算静力作用下建筑的受力和形变,以模仿正常使用时建筑的结构状态,再施加横向地震波加速度,以计算建筑结构在横向地震波冲击下的受力和形变,通过分析动力作用时间内建筑顶部和基础处水平加速度、基础沉降曲线、相对位移(如图 3、4、5),可发现建筑结构状态最差的时刻。在此时刻采用结构动力运动方程求解出建筑结构整体动力稳定安全系数。由图 3 可知,第 31s 时建筑结构水平加速度最高,此时建筑结构状态最差。由图 4 可知,第 23s 建筑结构左侧基础沉降

最高,为-0.023。由图 5 可知,第 32s 建筑结构水平位移最多,为 0.018 m。

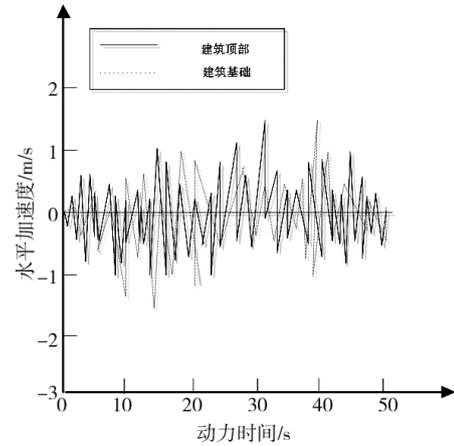


图 3 横向地震波冲击下建筑结构水平加速度反应曲线
Fig.3 Horizontal acceleration response curves of building structures subjected to transverse seismic waves

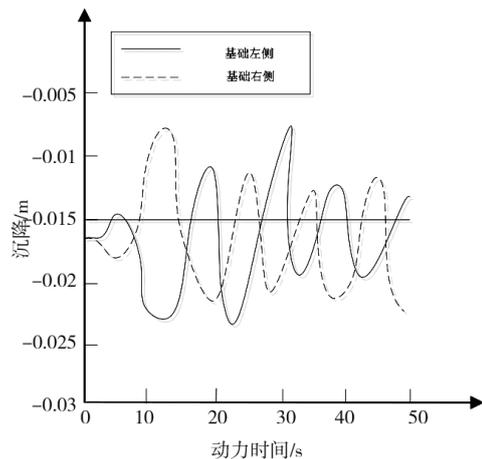


图 4 横向地震波冲击下建筑结构基础沉降曲线
Fig.4 Settlement curve of building structure foundation subjected to transverse seismic wave

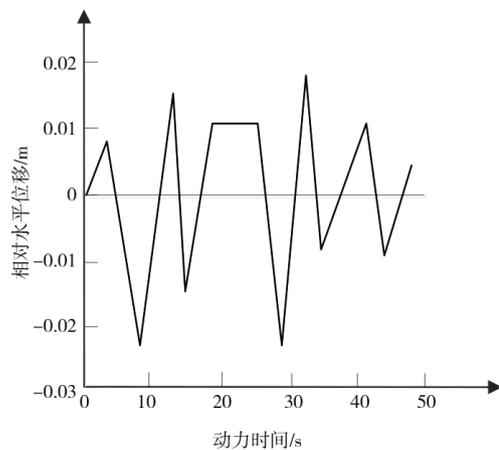


图 5 横向地震波冲击下建筑结构相对水平位移曲线
Fig.5 Relative horizontal displacement curves of building structures subjected to transverse seismic waves

实验中检测建筑结构基底角点处沉降，沉降曲线如图 6 所示，由图 6 可以看出，相同地质状态下，建筑物二层地下室的基底角点处在横向地震波冲击下的位移变化比一层地下室的位移变化幅度小，从 29 mm(一层地下室)减小到 25 mm(二层地下室)，说明随着建筑物的基础埋深加大，侧墙外土体对整体建筑的控制加大，在横向地震波冲击下，建筑结构的基础位移波动较小。表 1 为横向地震波冲击下建筑结构稳定性计算结果，从该表可以看出，随着建筑物的基础埋深加大，稳定性安全系数从 1.92(一层地下室)增加到 2.17(二层地下室)，建筑结构稳定性增强。

比较一层地下室有无侧限减弱两个计算结果，由表 1 可以看出，由于侧限减弱，土地对建筑结构的控制减弱，导致在横向地震波冲击下，建筑结构基础位移波动加大，其稳定性安全系数也从 1.92 减小到 1.52。

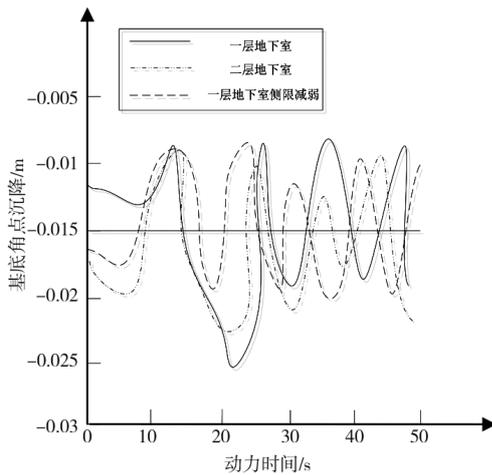


图 6 横向地震波冲击下建筑结构基底角点沉降曲线
Fig.6 Base angle settlement curve of building structure subjected to transverse seismic waves

表 1 横向地震波冲击下建筑结构稳定性计算结果

Table1 Calculation results of stability of building structures subjected to transverse seismic waves

序号	地震波类型	计算方案	水平加速度最大时刻	地震动稳定性安全系数
1		一层地下室	13.28	1.59
2	2%横向地震波	一层地下室 侧限减弱	14.77	1.31
3		二层地下室	13.69	1.85
4		一层地下室	27.32	1.92
5	10%横向地震波	一层地下室 侧限减弱	28.57	1.52
6		二层地下室	27.81	2.17

2.2 动力稳定分析结果

为进一步研究横向地震波冲击下建筑结构稳定性变化，运用弹塑性损伤模型提取实验建筑在横向地震波冲击下的动态特征值，从特征值曲线和屈曲状态分析横向地震波冲击下建筑结构的动力稳定性。实验分为 4 个工况，每个工况代表从不同方向激励的横向地震波，每个工况都经过数次循环计算，令其特征值曲线的最小值接近 1，计算此时横向地震波系数和峰值加速度，由此可得建筑结构的动力屈曲荷载。工况 3 动力稳定的动态特征值曲线如图 7 所示，4 种工况的屈曲荷载如表 2 所示。

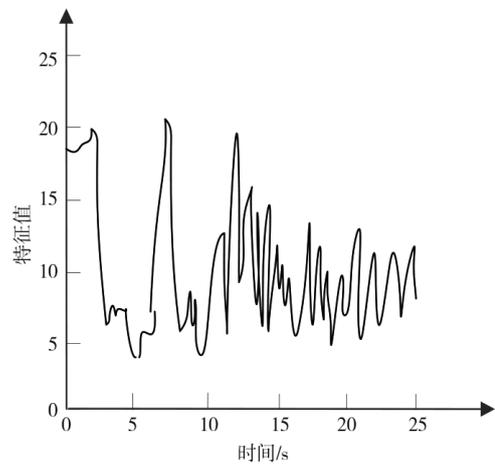


图 7 工况 3 下的特征值曲线

Fig.7 Eigenvalue curves under working condition 3

表 2 动力失稳荷载

Table2 Dynamic instability load

工况号	荷载/g	发生时刻/s	失稳状态
工况 1	1.7	3.01	悬挑结构屈曲
工况 2	1.69	3.02	悬挑结构屈曲
工况 3	0.48	3.53	底部钢梁屈曲
工况 4	0.46	3.52	底部钢梁屈曲

由表 2 可以看出，建筑在受到工况 1 横向地震波冲击时的荷载为 1.7，稳定性高于其他工况，并且横向地震波正面激励时建筑顶部悬挑结构屈曲，侧面激励时则是建筑底部钢梁屈曲。其原因是受到侧面横向地震波激励时，建筑结构底部钢梁产生较大轴力，进而影响刚度导致建筑结构底部钢梁屈曲。由图 7 可知，横向地震波激励的前 5 秒对建筑结构的动态特征值影响最大，工况 3 下建筑结构的最大特征值为 23，最小特征值为 4.4，说明工况 3 下建筑结构被横向地震波拉伸和压缩

的程度较大,稳定性差。上述实验表明,运用本文方法能够有效分析横向地震波冲击下建筑结构的稳定性变化。

3 结论

为研究横向地震波冲击下建筑结构的稳定性变化,模拟横向地震波随机过程,获得横向地震波的数学曲线,根据该曲线建立建筑结构稳定性的动力运动方程,采用 Hilber-Hughes-Taylor 递推格式求解动力运动方程的安全系数,安全系数越大代表建筑结构的稳定性越好。运用弹塑性损伤模型得到建筑结构在横向地震波冲击下的最大、最小特征值,该特征值能够进一步反映建筑结构的稳定性,最大特征值越大、最小特征值越小代表建筑结构稳定性越差。实验结果表明:横向地震波冲击下建筑结构整体稳定安全系数随基础埋深的增加而增加,随侧限减弱而减小;横向地震波从侧面冲击时建筑结构的最大、最小特征值分别为 23、4.4;因此,所提方法能够有效分析横向地震波冲击下建筑结构的稳定性。

参考文献:

- [1] 温树杰,李红卫,傅鹤林,等. 地震作用下三维边坡最小势能稳定性分析[J]. 中国安全科学学报,2016,26(4): 114-118.
- [2] 郭平功,童丽萍. 横向地震对黄土窑洞稳定性的影响[J]. 地震工程与工程振动,2015,01(6):56-63.
- [3] 焦驰宇,龙佩恒,李士铎,等. 地震作用下中小跨度梁桥横向碰撞参数影响分析[J]. 振动与冲击,2014,33(8): 48-53.
- [4] 曹启坤,解瑞,沈燕梅. 高层 EPS 格构式混凝土墙体地震响应分析[J]. 工程抗震与加固改造,2017,39(5):18-25.
- [5] 杨笑梅,陈宇庭. 考虑场地条件的高层建筑长周期地震反应特征分析[J]. 工程抗震与加固改造,2016,38(6): 18-23.
- [6] 王亚勇,岳茂光,朱立刚,等. 高层建筑场地边坡的地震稳定性分析和工程实践[J]. 建筑结构学报,2016,37(4): 165-172.
- [7] 赵作周,胡好,钱稼茹. 中美规范关于地震波的选择与框架-核心筒结构弹塑性时程分析[J]. 建筑结构学报,2015,36(2):10-18.
- [8] 易伟建,孙雯. 近场地震下框架剪力墙高层结构地震易损性分析[J]. 建筑科学与工程学报,2015,32(5):17-24.
- [9] 程艳秋,商效瑀,郑山锁,等. 考虑结构与地震动双重不确定性的混凝土框架建筑地震易损性研究[J]. 工业建筑,2017,47(1):68-72.
- [10] 赵益彬,吕西林. 高层隔震结构在长周期地震动作用下的响应分析[J]. 结构工程师,2016,32(3):77-85.
- [11] 何政,张昊强. 超高层建筑结构竖向地震响应的谱单元分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2014,46(8):72-77.
- [12] 焦驰宇,龙佩恒,李士铎,等. 地震作用下中小跨度梁桥横向碰撞参数影响分析[J]. 振动与冲击,2014,33(8):48-53.
- [13] 陈学前,沈展鹏,何琴淑,等. 主机装置靶场建筑结构的易损性分析[J]. 强激光与粒子束,2016,28(10): 57-62.
- [14] 施成,蔺鹏臻,刘应龙,等. 一致激励下大跨度连续钢桁架柔性拱桥空间地震响应分析[J]. 铁道建筑,2017,57(11):38-40.
- [15] 舒林,谭继可,贾善坡. 高层建筑结构抗震性能评估实例[J]. 建筑技术,2016,47(4):371-374.