

地震作用的相关性对结构瞬态响应的影响

郭秀秀, 徐兴华, 黄 举, 史庆轩

(西安建筑科技大学土木工程学院, 西安 710055)

摘 要: 地震作用一般分解为水平运动分量和竖向运动分量, 在这两个运动分量的作用下, 结构发生大变形时, 可能会经历由地震运动分量演变的外部激励和参数激励过程。由于运动分量间的相关性, 推导出实际上这两个激励过程也是相关的, 而且是完全相关的, 但在过去的研究中, 为了简化分析, 常常假设这两个激励过程是完全独立的。该文以高斯白噪声和过滤高斯白噪声过程模拟地震动过程, 以某一单层框架结构为研究对象, 采用累积矩截断法, 分析高斯白噪声和过滤高斯白噪声这两种地震动激励下单层框架结构的非平稳地震响应。同时考虑地震动分量间的相关性, 得到更为精细化的结构随机地震响应, 并分析这种相关性对结构响应的影响。结果表明: 将地震动作用模拟为更接近实际的过滤高斯白噪声过程时, 地震作用相关性对结构响应的影响更为明显, 更为不可忽略。

关键词: 过滤高斯白噪声; 地震作用相关性; 累积矩截断法; 结构地震响应; 场地条件

中图分类号: TU311.3 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2018.05.0261

THE TIME INFLUENCE OF CORRELATED SEISMIC ACTION ON STRUCTURAL RESPONSE

GUO Siu-siu, XU Xing-hua, HUANG Ju, SHI Qing-xuan

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

Abstract: Seismic action is generally decomposed into horizontal motion components and vertical motion components. Under the action of these two motion components, external excitation and parametric excitation processes may be experienced when the structure undergoes large deformation. Although these two incentive processes are completely related, it is often assumed that the two incentive processes are completely independent in the past research in order to simplify the analysis. A single-layer frame structure is studied. The correlation between external excitation and parameter excitation is considered, and a more accurate structural random seismic response is obtained. The influence of this correlation on the structural response is analyzed. Starting from the vibration equation of the structure, the cumulative moment truncation method is used to solve the non-stationary seismic response of a single-layer frame structure under the excitation of Gaussian white noise and filtered white noise. The results show that when the simulated ground motion is closer to the actual Gaussian white noise process, the influence of seismic correlation on the structural response is more obvious.

Key words: filtered white noise; correlation of earthquake action; cumulant-neglect method; structural response; site conditions

收稿日期: 2018-05-18; 修改日期: 2018-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(11502187, 51478382); 陕西省教育厅专项科研项目(16JK1440); 陕西省自然科学基金基础研究基金青年人才项目(Z20180115); 西安建筑科技大学人才基金项目(RC1609)

通讯作者: 史庆轩(1963—), 男, 山东人, 教授, 博士, 博导, 主要从事高层结构抗震方面的研究(E-mail: shi_qx@xauat.edu.cn).

作者简介: 郭秀秀(1985—), 女, 山西人, 副教授, 博士, 主要从事随机振动方面的研究(E-mail: siusiuguo@hotmail.com);

徐兴华(1994—), 男, 浙江人, 硕士生, 主要从事结构随机振动方面的研究(E-mail: xxh19940619@163.com);

黄 举(1992—), 男, 陕西人, 硕士生, 主要从事结构随机振动方面的研究(E-mail: huangju1992@126.com).

框架结构受力明确、空间布置灵活,是工程中常用的一种结构体系。准确预测框架结构在地震作用下的随机响应,对工程设计有着重要意义。由于地震活动发生的时间、空间和强度的不确定性,以随机过程描述地震地面运动更为合理^[1]。随机激励广泛存在,高斯白噪声过程常被用来模拟这些随机过程,这是一种理想状态的模拟方式。实际中大部分的随机激励都不能单纯地简化为高斯白噪声过程。以地震动作用为例,实际上 90% 以上的地震震源都发生在地壳中,地壳中的土质和岩石种类复杂多变,地震波在传播的过程中不断的被削弱和过滤。因此,采用过滤高斯白噪声模拟作用于结构上的地震作用,更具代表性。1960 年,日本著名学者 Kanai 和 Tajimi 提出了金井清模型^[2],这是首次用过滤高斯白噪声模拟地震动作用的模型。随后 Ruiz 和 Penzien^[3]、欧进萍等^[4]、杜修力等^[5-6]学者提出的过滤高斯白噪声模型,均是对金井清模型的改进。金井清模型考虑了均匀场地土层对地震波的过滤作用,在结构随机振动理论研究方面得到了广泛的应用。

相对于高斯白噪声,过滤高斯白噪声过程通常称为彩噪声。在彩噪声的激励下,结构的响应并不是马尔科夫过程,这样传统的 Fokker-Planck (FPK) 方程不再适用。通常的做法是把彩噪声作为辅助状态变量,通过马尔科夫增广状态向量的方式来研究。但是这种做法会增大初始系统的维数,产生多维的 FPK 方程。FPK 方程的求解比较困难,精确解只存在于低维的 FPK 方程并且在非常严格的条件下,而且很多近似方法或者数值法最多只对二维的 FPK 方程有效,只有极少数的近似法或数值法可以用于求解多维的 FPK 方程^[7-9]。Xie 等学者^[10-13]用响应统计矩法研究了不同噪声激励下的系统响应; Paola 和 Floris^[14]用高斯矩截断法和 Itô 随机微分法,研究了过滤高斯白噪声激励下非线性系统的非高斯响应统计规律; Su 和 Falzarano^[15]用累积矩截断法解决了多维 FPK 方程难于求解的问题; Floris^[16]用累积矩截断法分别研究了 1 阶、2 阶过滤高斯白噪声参数激励下的系统响应。累积矩截断法可以解决过滤高斯白噪声激励下系统响应难于求解的问题,不仅为非平稳振动提供理论分析方法,还推动了过滤高斯白噪声在结构工程领域的应用^[17]。

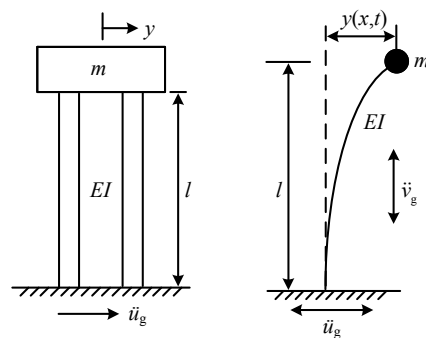
另一方面,实际地震不仅有水平振动分量,而且还有竖向振动分量。但目前关于结构的水平随机

地震响应分析,常常仅研究水平地震作用,而忽略了竖向地震作用的影响。其原因一方面是问题的复杂性,另一方面是竖向加速度往往小于重力加速度,其产生的惯性力小于结构自重。但研究表明,竖向地震对结构水平振动的参激作用将使响应进一步增大,加剧结构的破坏。近年来,国内外学者在结构同时受到水平和竖直地震作用方面的研究相对较多,如: Lin 等^[18]建立了单自由度结构在水平和竖直地震作用下的随机分析模型及数值解法;李创第等^[19]在 Lin 的研究基础上,推导了同时承受水平和竖向地震作用的悬臂梁构件的振动方程,方程中两个方向的地震激励分别采用外部激励和参数激励表示,获得了结构 1 阶和 2 阶响应矩渐近稳定条件的解析判别式; Dimentberg^[20]用过滤高斯白噪声研究了两个自由度系统在不完全周期参数激励下组合共振的均方稳定性条件。但以上研究,均认为模拟竖直和水平地震作用的参数激励和外部激励是相互独立的。实际上,水平和竖直两个方向的地震激励是地震作用的两个分量,他们不仅是相关的,而且是完全相关的。Guo 等^[21-22]研究了外部激励和参数激励相关性的影响,得到了非零均值的响应和不对称的概率密度函数。

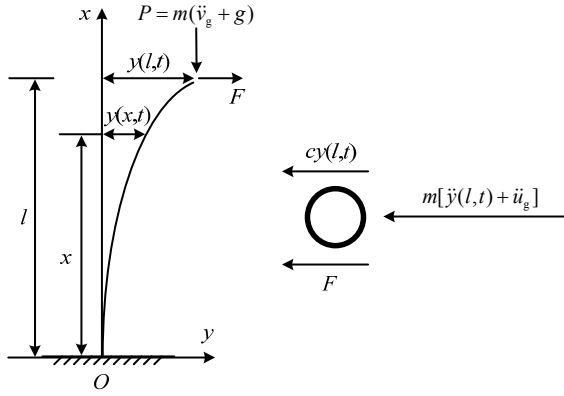
基于以上研究,为得到更精细化的结构随机地震响应,需要考虑水平和竖向地震动分量间的相关性。本文分别以高斯白噪声、过滤白噪声过程模拟地震动作用,采用累积矩截断法,研究单层框架结构在地震动作用下的随机响应,并讨论地震动作用分量间的相关性对结构响应的影响。

1 结构分析模型

如图 1(a)所示无质量结构体系,质点质量为 m ,水平阻尼系数为 c ,杆的长度和抗弯刚度分别为 l 和 EI ,水平作用力为 F ,竖直作用力为 P ,在水平地震动 $u_g(t)$ 和竖向地震动 $v_g(t)$ 的作用,结构发生水



(a) 结构简图和运动模型



(b) 杆件和质点受力分析

图 1 结构构件的建模过程

Fig1 Modeling the structural system

平位移为 $y(x, t)$, 如果结构的竖向刚度与水平刚度的比值较大, 并仅考虑竖向荷载作用对质点水平响应的影响时, 质点 m 的水平运动方程^[23]为:

$$EIy_{xx} = p[y(l, t) - y(x, t)] + F(l - x) \quad (1)$$

$$m\ddot{y}(l, t) + c\dot{y}(l, t) + F = -m\ddot{u}_g(t) \quad (2)$$

参考文献[23-24], 经过一系列推导, 得:

$$F = k_1 y + k_2 y^3 - k_3 y v_g(t) \quad (3)$$

式中: k_1 、 k_2 、 k_3 是关于结构特性的参数, 而且 $k_1 > 0$ 、 $k_2 > 0$ 、 $k_3 > 0$ 。

无量纲化处理后, 推导得结构在水平和竖向荷载作用下振动方程为:

$$\ddot{y} + 2\xi_1 \omega_1 \dot{y} + \omega_1^2 y + \varepsilon_1 y^3 = \eta \omega_1^2 V_2(t) y + V_1(t) \quad (4)$$

式中, $V_1(t)$ 和 $V_2(t)$ 分别代表水平和竖向地震动过程。

本文分别采用高斯白噪声和过滤高斯白噪声过程模拟地震作用, 考虑地震动作用分量间的相关性对结构随机响应的影响。

2 累积矩截断法

2.1 高斯白噪声激励下框架结构的响应

设 W_1 表示非零均值的高斯白噪声过程, W_1 表示外部激励过程, W_2 表示参数激励过程, 其自相关函数和互相关函数分别为:

$$E[W_1(t)W_1(t+\tau)] = S_{11}\delta(\tau),$$

$$E[W_2(t)W_2(t+\tau)] = S_{22}\delta(\tau),$$

$$E[W_1(t)W_2(t+\tau)] =$$

$$S_{12}\delta(\tau) = S_{12}\delta(-\tau) = \rho\sqrt{S_{11}S_{22}}\delta(\tau). \quad (5)$$

式中: $E[\cdot]$ 表示均值; $\delta(\tau)$ 是 Dirac δ 函数; ρ 表示外部激励和参数激励的相关性系数, $|\rho| \leq 1$ 。

设 Duffing 系统在相关的外部激励和参数激励

作用下运动方程为:

$$\ddot{x} + \alpha\dot{x} + \beta x + \varepsilon x^3 = \eta\beta W_2 x + W_1 \quad (6)$$

令式(6)中 $x = x_1$, $\dot{x} = x_2$, 将系统的运动方程写成 Itô 型得:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -2\alpha x_2 - \beta x_1 - \varepsilon x_1^3 + \eta\beta W_2(t)x_1 + cW_1(t) \end{cases} \quad (7)$$

在高斯白噪声激励下, 系统响应 $\{x_1, x_2\}$ 是马尔科夫矢量, 其满足如下联合矩方程:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} E[M_k] &= E\left[x_2 \frac{\partial M_k}{\partial x_1}\right] - E\left[(2\alpha x_2 + \beta x_1 + \varepsilon x_1^3) \frac{\partial M_k}{\partial x_2}\right] + \\ &\frac{1}{2}(\eta\beta)^2 S_{22} E\left[x_1^2 \frac{\partial^2 M_k}{\partial x_2^2}\right] + \frac{1}{2}c^2 S_{11} E\left[\frac{\partial^2 M_k}{\partial x_2^2}\right] + \\ &\eta\omega_1^2 c\rho\sqrt{S_{11}S_{22}} E\left[x_1 \frac{\partial^2 M_k}{\partial x_2^2}\right] \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $M_k = x_1^i x_2^j$ ($i + j = k$)。当外部激励和参数激励完全独立时, 其联合矩方程降低为:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} E[M_k] &= E\left[x_2 \frac{\partial M_k}{\partial x_1}\right] - E\left[(2\alpha x_2 + \beta x_1 + \varepsilon x_1^3) \frac{\partial M_k}{\partial x_2}\right] + \\ &\frac{1}{2}(\eta\beta)^2 S_{22} E\left[x_1^2 \frac{\partial^2 M_k}{\partial x_2^2}\right] + \frac{1}{2}c^2 S_{11} E\left[\frac{\partial^2 M_k}{\partial x_2^2}\right] \end{aligned} \quad (9)$$

采用经典的四阶龙格—库塔法求解式(8)微分方程组, 可以得到系统响应的统计规律。

2.2 过滤高斯白噪声激励下框架结构的响应

设 $V(t)$ 限宽度功率谱密度函数 $S(\omega)$ 的彩噪声过程, 可以采用二阶滤波器模型得到:

$$\ddot{V}(t) + 2\xi_g \omega_g \dot{V}(t) + \omega_g^2 V(t) = W(t) \quad (10)$$

其中: $\dot{(\cdot)}$ 是 $(\cdot)$ 对时间的导数; $W(t)$ 是均值为零的高斯高斯白噪声过程, 其相关函数为 $E[W(t)W(t+\tau)] = S_0\delta(\tau)$; $\delta(\tau)$ 表示 Dirac-delta 函数; S_0 是高斯白噪声的功率谱密度。

根据式(10), 可得过滤高斯白噪声 $V(t)$ 的功率谱密度函数为:

$$S_V(\omega) = \frac{S_0}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \quad (11)$$

当将式(10)应用于建筑结构地震动分析时, $\ddot{V}(t)$ 是地震地面相对于基岩的加速度; ξ_g 和 ω_g 分别为单自由度体系的地表土层阻尼比和固有频率; 是地震基岩加速度, 其均值为 0、谱密度为 S_0 。于是作用于结构基底的绝对地震加速度 $a_g(t)$ 为:

$$a_g(t) = W(t) + \ddot{V}(t) \quad (12)$$

由式(10)和式(12)可得平稳谱密度为:

$$S_{a_g}(\omega) = \frac{\omega_g^4 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2} S_0 \quad (13)$$

相对于理想高斯白噪声而言, 过滤高斯白噪声模拟地震动作用更加合理。假设单自由度结构在地震动作用下发生的水平侧移为 x , 其运动方程可以表示为:

$$\ddot{x} + 2\xi_1 \omega_1 \dot{x} + \omega_1^2 x = \eta \omega_1^2 [\ddot{V}_2(t) + W_2(t)]x + c[\ddot{V}_1(t) + W_1(t)] \quad (14)$$

式中, 各参数的物理意义同式(4), 地震动作用的水平分量 V_1 和竖向分量 V_2 由地震作用 W_1 和 W_2 通过地表土层的过滤后得到, 即:

$$\begin{cases} \ddot{V}_2(t) + 2\xi_g \omega_g \dot{V}_2(t) + \omega_g^2 V_2(t) = -W_2(t) \\ \ddot{V}_1(t) + 2\xi_g \omega_g \dot{V}_1(t) + \omega_g^2 V_1(t) = -W_1(t) \end{cases} \quad (15)$$

将二阶过滤高斯白噪声作为扩充的状态变量进行分析计算, 则式(14)的状态空间矢量 $\gamma(y, t) = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T$, 其中 $x_1 = x$, $x_2 = \dot{x}$, $x_3 = V_2$, $x_4 = \dot{V}_2$, $x_5 = V_1$, $x_6 = \dot{V}_1$, 令 $\alpha_g = 2\xi_g \omega_g$, $\beta_g = \omega_g^2$ 。则联合式(14)与式(15)转化为 Itô 型得:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -2\xi_1 \omega_1 x_2 - \omega_1^2 x_1 + \eta \omega_1^2 (\alpha_g x_4 + \beta_g x_3) x_1 + c(\alpha_g x_6 + \beta_g x_5) \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = -\alpha_g x_4 - \beta_g x_3 - W_2(t) \\ \dot{x}_5 = x_6 \\ \dot{x}_6 = -\alpha_g x_6 - \beta_g x_5 - W_1(t) \end{cases} \quad (16)$$

则系统式(14)的联合矩方程为:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} E[M_k] = & E\left[x_2 \frac{\partial M_k}{\partial x_1}\right] - E\left[(2\xi_1 \omega_1 x_2 + \omega_1^2 x_1 - \right. \\ & \left. \eta \omega_1^2 \alpha_g x_1 x_4 - \eta \omega_1^2 \beta_g x_1 x_3 - c\alpha_g x_6 - c\beta_g x_5) \frac{\partial M_k}{\partial x_2}\right] + \\ & E\left[x_4 \frac{\partial M_k}{\partial x_3}\right] - E\left[(\alpha_g x_4 + \beta_g x_3) \frac{\partial M_k}{\partial x_4}\right] + \\ & E\left[x_6 \frac{\partial M_k}{\partial x_5}\right] - E\left[(\alpha_g x_6 + \beta_g x_5) \frac{\partial M_k}{\partial x_6}\right] + \frac{1}{2} S_{zz} E \cdot \\ & \left[\frac{\partial^2 M_k}{\partial x_4^2}\right] + \frac{1}{2} S_{zz} E \left[\frac{\partial^2 M_k}{\partial x_6^2}\right] + \rho \sqrt{S_{zz} S_{zz}} E \left[\frac{\partial^2 M_k}{\partial x_4 \partial x_6}\right] \end{aligned} \quad (17)$$

其中, $M_k = x_1^i x_2^j$ ($i+j=k$)。当外部激励和参数激励完全独立时, 其联合矩方程降低为:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} E[M_k] = & E\left[x_2 \frac{\partial M_k}{\partial x_1}\right] - E\left[(2\xi_1 \omega_1 x_2 + \right. \\ & \left. \omega_1^2 x_1 - \eta \omega_1^2 \alpha_g x_1 x_4 - \eta \omega_1^2 \beta_g x_1 x_3 - \right. \\ & \left. c\alpha_g x_6 - c\beta_g x_5) \frac{\partial M_k}{\partial x_2}\right] + E\left[x_4 \frac{\partial M_k}{\partial x_3}\right] - \\ & E\left[(\alpha_g x_4 + \beta_g x_3) \frac{\partial M_k}{\partial x_4}\right] + E\left[x_6 \frac{\partial M_k}{\partial x_5}\right] - \\ & E\left[(\alpha_g x_6 + \beta_g x_5) \frac{\partial M_k}{\partial x_6}\right] + \frac{1}{2} S_{zz} E\left[\frac{\partial^2 M_k}{\partial x_4^2}\right] + \\ & \frac{1}{2} S_{zz} E\left[\frac{\partial^2 M_k}{\partial x_6^2}\right] \end{aligned} \quad (18)$$

3 数值分析

3.1 Duffing 系统在外激励和参数激励下的响应

考虑 Duffing 系统式(6), 参数取值为: $a=0.5$, $\beta=10$, $\varepsilon=0.5$, $\eta=0.238$, 高斯白噪声谱密度强度分别为 $S_{11}=0.1$, $S_{22}=0.05$, 其中 $\rho \in [-1, 1]$ 。将以上参数代入式(8), 将累积矩二阶截断进行响应求解。为了检验计算结果的准确性, 采用等价线性化法, 对比结构体系在高斯白噪声激励下的平稳地震响应, 如图 2 所示, 证明了累计矩截断法的有效性。

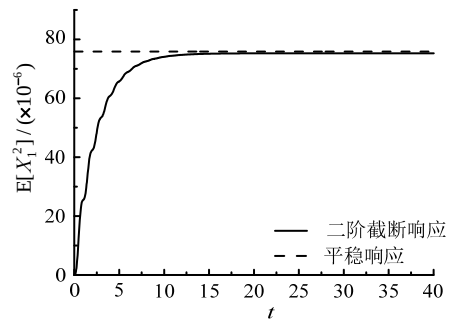


图 2 二阶截断响应与平稳响应对比

Fig.2 Comparison between two-order truncation response and stationary response

图 3 为参数激励和外部激励相关性对系统响应均方值的影响。由图 3(a)可知: 参数激励和外部激励相关性对均方响应有影响, 随着相关系数的变化, 结构位移稳态响应变化规律呈开口向下的抛物线, 当参数激励和外部激励完全不相关时, 位移响应均方值最大, 完全相关时最小。图 3(b)为 5 种相关激励作用下系统在平稳化过程中的位移均方响应, 从图中可以看出, 激励间的相关性在平稳化过程中对 Duffing 系统响应的影响不大。讨论外部激

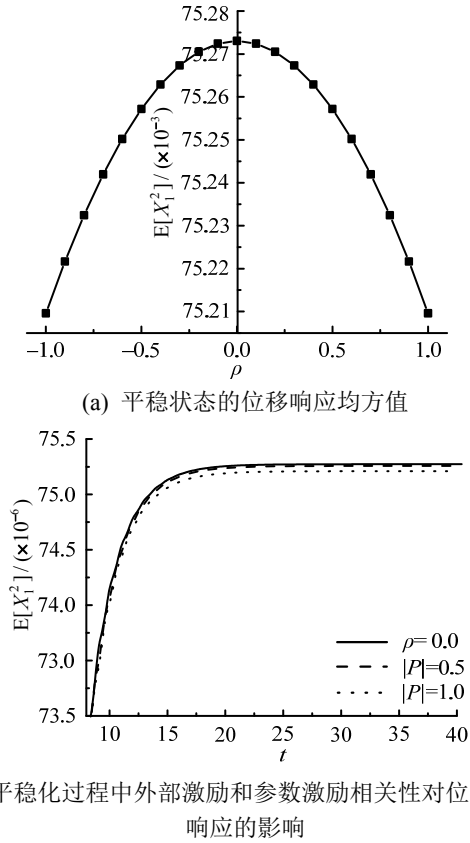


图 3 外部激励和参数激励的相关性对位移均方响应的影响
Fig.3 The influence of correlation between external excitation and parametric excitation on mean square value of displacement response

励和参数激励间的相关性对系统随机响应的影响，其结果列于表 1。由表 1 可知，外部激励和参数激励间的相关性使得系统响应偏离其初始的位置，重新建立平衡位置，且相关性越强，偏离的程度越大。

图 4 为外部激励和参数激励间的相关性对系统平衡位置的影响。图 4(a)表明：随着参数激励和外部激励相关性的增大，位移随机响应过程偏离平衡位置的值越来越大，因此，当相关性比较强时，其对系统响应的影响是不可忽略的。图 4(b)为 5 种相关激励作用下系统的位移均方响应，从图中可以看出，正、负相关激励下系统一阶位移响应的平稳化过程是关于初始平衡位置对称分布的。而对于速度响应则不存在此规律，对应的图形在此省略。

3.2 过滤高斯白噪声激励

设有一单自由度结构，其结构阻尼比为 $\zeta_1=0.05$ ，结构的修正自振频率为 $\omega_1=4\pi/s$ ，竖向地震作用强度取 $S_{22}=0.01m^2/s^3$ ，水平地震强度为 $S_{11}=0.02m^2/s^3$ ， $\rho\in[-1,1]$ ，考虑结构自重，取 $\mu=0.7$ ，则 $\eta=0.238$ 。二阶线性滤波器参数为：

表 1 外部激励和参数激励间的相关性对系统响应的影响
Table 1 System response with the change of correlation coefficient

相关性 ρ	$E[X_1]/(\times 10^{-6})$	$E[X_1^2]/(\times 10^{-3})$	$E[X_2^2]/(\times 10^{-3})$
-1.0	72.834	75.210	761.916
-0.9	65.561	75.222	761.966
-0.8	58.284	75.232	762.012
-0.7	51.004	75.242	762.052
-0.6	43.723	75.250	762.086
-0.5	36.439	75.257	762.116
-0.4	29.153	75.263	762.140
-0.3	21.866	75.267	762.158
-0.2	14.578	75.271	762.172
-0.1	7.289	75.272	762.180
0.0	0	75.273	762.182
0.1	-7.289	75.272	762.180
0.2	-14.578	75.271	762.172
0.3	-21.866	75.267	762.158
0.4	-29.153	75.263	762.140
0.5	-36.439	75.257	762.116
0.6	-43.723	75.250	762.086
0.7	-51.004	75.242	762.052
0.8	-58.284	75.232	762.012
0.9	-65.561	75.222	761.966
1.0	-72.834	75.210	761.916

注： $|\rho| \rightarrow 1$ 时，激励的相关性越强； $|\rho| \rightarrow 0$ 时，相关性越弱。

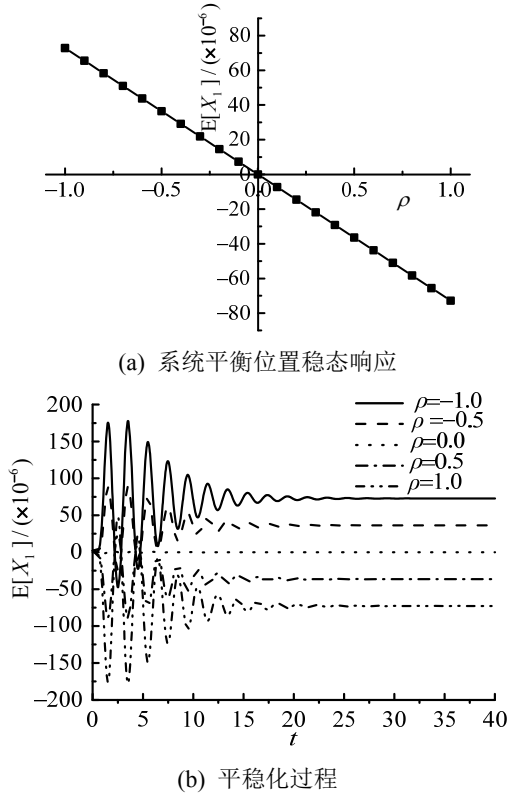


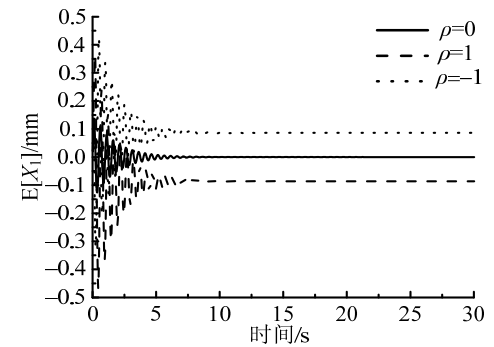
图 4 外部激励和参数激励间相关性对系统平衡位置的影响
Fig.4 The influence of the correlation between external and parametric excitations on the statistical mean of displacement

① I类场地: 覆盖土层的特征阻尼比 $\xi_g=0.64$, 覆盖土层的特征频率 $\omega_g=25.13\text{ s}^{-1}$;

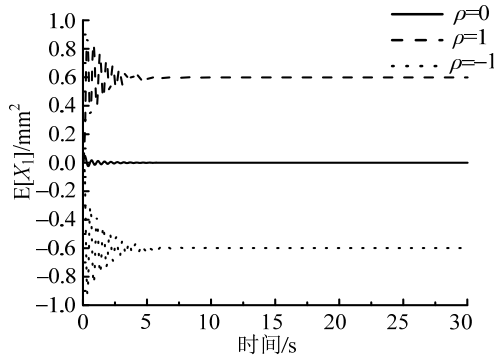
② IV类场地: 覆盖土层的特征阻尼比 $\xi_g=0.90$, 覆盖土层的特征频率 $\omega_g=9.67\text{ s}^{-1}$ 。将以上参数代入式(17)二阶展开的微分矩方程组进行求解, 结果见表 2。

表 2 考虑地震作用相关性的结构响应(过滤高斯白噪声)
Table2 Structural response considering seismic action correlation (Filter white noise)

场地 条件	相关性 ρ	$E[X_1]/\text{mm}$	$E[X_1^2]/(\times 10^3 \text{ mm}^2)$	$E[X_2^2]/(\times 10^3 \text{ mm}^2)$
I 类 第一组	-1	-0.086	0.451	71.705
	0	0	0.449	71.377
	1	0.086	0.451	71.705
IV 类 第一组	-1	-0.599	0.360	53.080
	0	0	0.348	51.433
	1	0.599	0.360	53.080



(a) I类场地



(b) IV类场地

图 5 地震作用相关性对结构地震响应平衡位置的影响

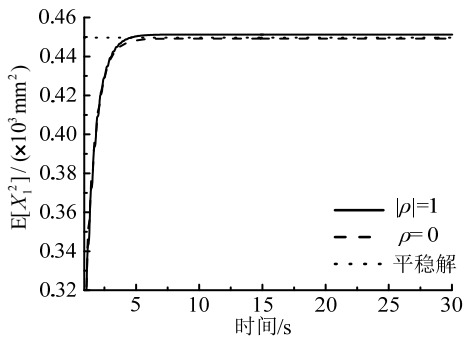
Fig.5 The influence of earthquake action correlation on the structural response equilibrium position

采用过滤高斯白噪声过程模拟地震动作用, 考虑了场地条件对地震的过滤作用, 结构响应更具代表性。实际上, 对于地震作用, 水平和竖直两个方向的地震激励是地震作用的两个分量, 他们不仅是相关的, 而且是完全相关的, 即完全正相关或完全负相关。表 2 为水平和竖向地震作用的相关性对系

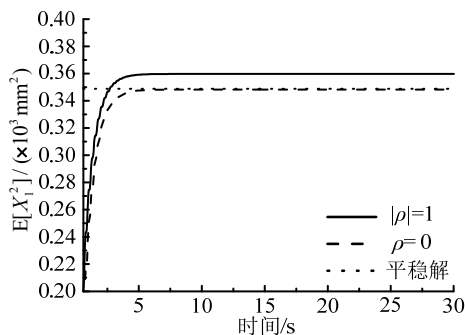
统响应的影响, 场地条件采用抗震设计第一组的 I 类和 IV 类场地土层。根据表 2 数据绘制图 5、图 6。

图 5 为过滤高斯白噪声激励相关性对结构地震响应平衡位置的影响。与理想高斯白噪声相比, 过滤高斯白噪声作用下的结构响应平衡位置受地震作用相关性的影响更显著, 即地基土对地震作用相关性的影响具有放大作用; 根据图 5 所示, I 类场地上结构地震一阶位移响应偏离初始平衡位置 0.086 mm, IV 类场地上偏离 0.599 mm, IV 类场地条件对地震作用相关性影响的放大效应大于 I 类场地条件的。

图 6 为地震动间相关性系数对位移均方响应的影响。由图 6 可知, 累积矩 2 阶截断的位移均方响应趋近于平稳解; 对比 I 类场地条件和 IV 类场地条件下结构的位移均方值, 地震作用相关性对结构响应的影响程度不同。如图 6(a)和图(b)所示, 坚硬地基上, 地震作用相关性使结构位移响应增大了 0.44%, 软弱地基上的增大了 2.00%, 软弱地基上的地震激励相关性对结构响应的影响更为明显。因此在抗震设计中, 地震作用相关性对结构随机响应的影响需要根据具体场地工况分析。



(a) I类场地



(b) IV类场地

图 6 相关性系数对系统位移均方响应的影响

Fig.6 The influence of correlation coefficient on the system displacement response

综上所述, 当结构所在场地被认为是理想刚体

时,地震作用相关性对结构响应的的影响理论存在但并不显著,但这种情况在现实中是不存在的。地震作用相关性的显著程度受场地条件的影响较大,过滤高斯白噪声考虑地基土层的过滤作用,较为全面的考虑了场地条件对地震响应的影响,更准确地模拟了作用于结构的地震作用,响应更具代表性。

4 结论

本文针对单自由度体系,考虑地震作用分量间的相关性,研究了地震作用下结构的随机响应。结果表明:

(1) 外部激励和参数激励间的相关性使得系统的响应偏离其初始的位置,且相关性越强,偏离的程度越大;

(2) 相较于高斯白噪声,过滤高斯白噪声作用下结构的位移响应受地震作用相关性的影响更为显著。地震作用的相关性放大了结构的位移响应,且放大的显著程度相对于不同场地条件是存在有差异的。因此在抗震设计中,地震作用相关性的影响不可忽略且需要根据具体工况分析。

对于多自由度结构体系,其相关性的影响规律还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Lanzotti A, Renno F, Russo M, et al. Design and development of an automotive magnetorheological semi-active differential [J]. *Mechatronics*, 2014, 24(5): 426—435.
- [2] Kanai K. Semi-empirical formula for the seismic characteristics of the ground [J]. *Earthquake Research Institute, the University of Tokyo*, 1957, 35(2): 309—325.
- [3] Ruiz P, Penzien J. Probabilistic study of the behavior of structures during earthquakes [R]. *Earthquake Engineering Research Center, UCB, CA, Report No. EERC 69-03*, 1969.
- [4] 欧进萍, 牛荻涛, 杜修力. 设计用随机地震动的模型及其参数确定[J]. *地震工程与工程振动*, 1991, 11(3): 45—54.
Ou Jinping, Niu Ditao, Du Xiuli. Random earthquake ground motion model and its parameter determination used in seismic design [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1991, 11(3): 45—54. (in Chinese)
- [5] 杜修力, 陈厚群. 地震动随机模型及其参数确定方法[J]. *地震工程与工程振动*, 1994, 14(4): 1—5.
Du Xiuli, Chen Houxiang. Random simulation and its parameter determination method of earthquake ground motion[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1994, 14(4): 1—5. (in Chinese)
- [6] 赖明, 叶天义, 李英民. 地震动的双重过滤白噪声模型[J]. *土木工程学报*, 1995, 28(6): 60—66.
Lai Ming, Ye Tianyi, Li Yingmin. Multi-filtered white noise model for ground motion [J]. *Chinese Journal of Civil Engineering*, 1995, 28(6): 60—66. (in Chinese)
- [7] Deng Weihua. Numerical algorithm for the time fractional Fokker-Planck equation [J]. *Journal of Computational Physics*, 2007, 227(2): 1510—1522.
- [8] 戚鲁媛, 徐伟, 高维廷. 色噪声激励 Rayleigh-Duffing 振子瞬态响应及最优有界控制[J]. *工程力学*, 2013, 30(12): 24—30.
Qi Luyuan, Xu Wei, Gao Weiting. Transient response and optimal bounded control of colored noise excited Rayleigh-Duffing oscillator [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(12): 24—30. (in Chinese)
- [9] 杨杰, 马萌璠, 王旭. 随机结构动力可靠度计算的条件概率方法[J]. *工程力学*, 2018, A01(增刊 1): 17—21.
Yang Jie, Ma Mengfan, Wang Xu. Conditional probability method for dynamic reliability calculation of random structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, A01(Suppl 1): 17—21. (in Chinese)
- [10] Xie W C. Moment Lyapunov exponents of a two-dimensional system under combined harmonic and real noise excitations [J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2007, 303(1): 109—134.
- [11] Xie W C. Moment Lyapunov exponents of a two-dimensional system under bounded noise parametric excitation [J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2002, 239(1): 139—155.
- [12] Loh C H, Ma M J. Reliability assessment of structure subjected to horizontal-vertical random earthquake excitations [J]. *Structural Safety*, 1997, 19(1): 153—168.
- [13] Bobryk R V, Chruszczek A. Stability regions for Mathieu equation with imperfect periodicity [J]. *Physics Letters A*, 2009, 373(39): 3532—3535.
- [14] Paola M D, Floris C. Iterative closure method for non-linear systems driven by polynomials of Gaussian filtered processes [J]. *Computers & Structures*, 2008, 86(11/12): 1285—1296.
- [15] Su Z, Falzarano J M. Gaussian and non-Gaussian cumulant neglect application to large amplitude rolling in random waves [J]. *International Shipbuilding Progress*, 2011, 58(2): 97—113.
- [16] Floris C. Mean square stability of a second-order parametric linear system excited by a colored Gaussian noise [J]. *Journal of Sound & Vibration*, 2015, 336(1): 82—95.
- [17] 刘章军, 王磊, 黄帅. 非平稳随机地震作用的结构整体可靠度分析[J]. *工程力学*, 2015(12): 225—232.
Liu Zhangjun, Wang Lei, Huang Shuai. Structural reliability analysis of non-stationary random earthquakes [J]. *Engineering Mechanics*, 2015(12): 225—232. (in Chinese)

Chinese)

- [18] Lin Y K, Shih T Y. Column response to horizontal-vertical earthquakes [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1980, 106(6): 1099—1109.
- [19] 李创第, 李墩. 结构在水平与竖向随机地震同时作用下的相关函数和谱密度[J]. 工程力学, 2008, 25(8): 156—163.
Li Chuangdi, Li Tun. Correlation function and spectral density of structures under horizontal and vertical random earthquakes [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25 (8): 156—163. (in Chinese)
- [20] Dimentberg M, Bucher C. Combinational parametric resonance under imperfectly periodic excitation [J]. Journal of Sound & Vibration, 2012, 331(19): 4373—4378.
- [21] Guo S S. Probabilistic solutions of stochastic oscillators excited by correlated external and parametric white noises [J]. Journal of Vibration & Acoustics, 2014, 136(3): 031003.
- [22] Guo S S, Er G K, Chi C L. Probabilistic solutions of nonlinear oscillators excited by correlated external and velocity-parametric Gaussian white noises [J]. Nonlinear Dynamics, 2014, 77(3): 597—604.
- [23] 李创第, 邹万杰, 黄天立, 等. 结构在水平与竖向地震同时作用的非平稳响应[J]. 土木工程学报, 2005, 38(6): 25—34.
Li Chuangdi, Zou Wanjie, Huang Tianli. The nonstationary response of structure to horizontal and vertical earthquakes [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(6): 25—34. (in Chinese)
- [24] Joseph Emans, Marian Wiercigroch. Cumulative effect of structural nonlinearities: chaotic dynamics of cantilever beam system with impacts [J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2005(23): 1661—1670.

(上接第 207 页)

- [11] Aalberg A, Larsen P K. Bearing strength of bolted connections in high strength steel [C]. Copenhagen: Nordic Steel Construction Conference Committee, 2001: 859—866.
- [12] Aalberg A, Larsen P K. The effect of steel strength and ductility on bearing failure of bolted connections [C]. Portuguese: The Third European Conference Committee, 2002: 869—878.
- [13] AISC. Specifications for Structural Steel Buildings. ANSI/AISC 360-10 [S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, Inc, 2010.
- [14] Kamtekar A G. On the bearing strength of bolts in clearance holes [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 79: 48—55.
- [15] 石永久, 潘斌, 施刚, 等. 高强度钢材螺栓连接抗剪性能试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(1): 56—61.
Shi Yongjiu, Pan Bin, Shi Gang. Experimental study on high strength steel-plate-bolted connections under shear force [J]. Industrial Construction, 2012, 42(1): 56—61. (in Chinese)
- [16] 潘斌, 石永久, 王元清. Q460 等级高强度钢材螺栓抗剪连接孔壁承压性能有限元分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(2): 48—54.
Pan Bin, Shi Yongjiu, Wang Yuanqing. Finite element analysis of bolted connection in Q460 grade high strength steels under static shear [J]. Journal of Architectural and Civil Engineering, 2012, 29(2): 48—54. (in Chinese)
- [17] 石永久, 潘斌, 王元清. 高强度钢材螺栓连接孔壁承压性能研究及设计建议[J]. 青岛理工大学学报, 2013, 34(1): 24—32.
Shi Yongjiu, Pan Bin, Wang Yuanqing. Investigation and proposed design rules on bolted connections for high strength steel [J]. Journal of Qingdao Technological University, 2013, 34(1): 24—32. (in Chinese)
- [18] Wang Yanbo, Lyu Yifan, Li Guoqiang. Behavior of single bolt bearing on high strength steel plate [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 137: 19—30.
- [19] GB/T 228.1—2010, 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
GB/T 228.1—2010, Metallic material-tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature [S]. Beijing: China Standard Press, 2010. (in Chinese)
- [20] Snijder H H, Ungermann D, Stark J W B, et al. Evaluation of test results on bolted connections in order to obtain strength functions and suitable model factors Part A: results [R]. Eurocode 3 Editorial Group, 1988.
- [21] Snijder H H, Ungermann D, Stark J W B, et al. Evaluation of test results on bolted connections in order to obtain strength functions and suitable model factors Part B: evaluations [R]. Eurocode 3 Editorial Group, 1988.
- [22] Snijder H H, Ungermann D, Stark J W B, et al. Evaluation of test results on bolted connections in order to obtain strength functions and suitable model factors Part C: Test data [R]. University of Technology Aachen, Institute for Steel Construction, 1988.
- [23] 施刚, 朱希. 国产高强度结构钢设计指标和可靠度分析[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(11): 144—159.
Shi Gang, Zhu Xi. Design indexes and reliability analysis of domestic high-strength structural steels [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(11): 144—159. (in Chinese)