

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220216004

随机地震作用下BRB加固既有结构的可靠度分析*

闫龙, 阮鑫鑫, 刘章军

(武汉工程大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 随着服役年限的增加, 既有结构会出现材料力学性能经时退化。为精细化分析随机地震作用下既有结构及其加固后的安全性, 利用非平稳地震动过程的降维模拟, 并结合基于概率密度演化理论和等价极值分布的首次超越破坏可靠度分析方法, 以层间位移角为评价指标, 制定了3种在不同位置布设人字形BRB的加固方案。根据随机地震作用下BRB加固既有结构的动力可靠度来确定3种方案中的较优者。同时, 依次用V字形和斜支撑替换较优方案中的人字形支撑, 并对比分析它们的动力可靠度, 以寻找最优随机非线性振动控制的BRB布设位置和支撑形式, 为维修加固及抗震设计提供更为合理的途径。结果表明: 本文方法为既有结构及其加固结构的抗震可靠度精细化计算提供了新途径, BRB的不同布设位置及支撑形式能在一定程度上提高既有结构的动力可靠性。

关键词: 既有结构; BRB加固; 材料性能经时退化; 随机地震作用; 概率密度演化; 动力可靠度

中图分类号: P315.9; TU375.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)03-0444-09

Reliability Analysis of Existing Structures Strengthened by BRB under Stochastic Earthquake

YAN Long, RUAN Xinxin, LIU Zhangjun

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: With the increase of service life, the mechanical properties of existing structures will deteriorate over time. To finely analyze the safety of existing structures and their reinforced structure under stochastic earthquake activity, the dimension reduction simulation of non-stationary ground motion process is used, and the first excursion failure reliability analysis method based on probability density evolution theory and equivalent extreme value distribution are combined. Taking the inter-story drift ratio as the evaluation index, three reinforcement schemes of herringbone BRB at different locations are formulated. According to the dynamic reliability of BRB strengthening existing structures under random earthquake, the better of the three schemes is determined. At the same time, V-shaped support and inclined support are used to replace the herringbone support in the better scheme, and their dynamic reliability is compared and analyzed to find the optimal BRB layout position and support form for random nonlinear vibration control, to provide a more reasonable way for maintenance, reinforcement and seismic design. The results show that the method proposed in this paper provides a new way for the refined calculation of seismic reliability of existing structures and their reinforced structures,

* 收稿日期: 2022-02-16; 修回日期: 2022-05-02

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51978543)、湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(T2020010)资助

作者简介: 闫龙(1988—), 男, 工程师, 博士研究生。主要从事工程结构抗震可靠性分析。E-mail: yanlong@stu.wit.edu.cn

通讯作者: 刘章军(1973—), 男, 特聘教授, 博士。主要从事工程结构抗灾可靠性研究。E-mail: liuzhangjun73@aliyun.com

and the different layout positions and support forms of BRB can improve the dynamic reliability of existing structures to a certain extent.

Keywords: existing structures; BRB reinforcement; material properties deteriorate over time; stochastic earthquake action; probability density evolution; dynamical reliability

0 引言

2020年7月20日国务院办公厅印发实施《关于全面推进城镇老旧小区改造工作的指导意见》^[1],建筑业跨入以现代化改造及维修加固的时代已然成为未来的发展方向。鉴于此,既有建筑在维修加固后受灾害性动力作用的响应成为土木工程领域的研究热点。相比于拆除重建,维修加固投资少、效果佳、影响小,对推进城市更新与开发建设方式转型、促进经济高质量发展具有重大意义。

既有结构的安全性不但受材料力学性能经时退化的影响,也可能受偶然地震灾害作用的威胁,结构加固是确保其安全可靠的重要手段,一般改进现存结构和增加单独的抗侧力结构两种加固方式。较常采用的加固方法有:增大截面法、外包型钢法、粘贴钢板法、碳纤维法、预应力法、BRB加固法等^[2]。2021年2月中国工程建设标准化协会批准发布《屈曲约束支撑应用技术规程》^[3],进一步规范了BRB在建筑工程中的应用。BRB可分为耗能型和承载型,其均具有自身刚度和承载力分离的显著特性,能够较好地克服普通支撑受压屈曲以及滞回性能差的桎梏^[3-5]。研究表明:采用BRB加固的结构在地震作用下具有饱满稳定的滞回耗能特性,且同等刚度条件下,其承载能力较普通钢支撑可高出2~10倍^[5]。BRB的抗震加固效果一般受布置位置和所选支撑形式的影响较大^[4],因此开展地震作用下较优BRB加固方案的评估意义重大。

工程结构可靠性分析理论,是现代工程结构设计的基础^[6]。1947年,前苏联然尼钦首次提出二阶矩方法来评价结构可靠度;同年,美国学者A.M. Freudenthal^[7]首次提出全概率方法来计算结构可靠度。近年来,以随机动力系统的概率守恒原理为基础,J.Li等^[8]提出了概率密度演化理论^[8],并发展了吸收边界法、等价极值事件法、物理综合法等结构整体可靠度分析方法^[6],这为复杂工程结构的动力可靠性分析提供了新的途径。

工程结构地震动输入方式通常分为确定性和

随机性两类。确定性方法一般选择少数条实测地震动记录或人工地震波进行分析,其优点是计算量小,但对地震动的随机性考虑不够充分。在随机性方法中,谱表示法^[9-10]因其理论完善、算法简单、计算精度高而被广泛应用。然而,传统Monte Carlo模拟的谱表示方法所需随机变量数量巨大,导致生成的样本数量庞大,并且样本集合概率信息不完备,难以用于复杂工程结构地震反应与动力可靠度的精细化分析^[8]。近年来,刘章军等^[11-13]提出了随机过程模拟的降维方法,实现了仅用1~2个基本随机变量即可精细地模拟平稳和非平稳地震动过程,从而极大地降低了地震灾害作用建模的难度。

基于上述研究进展,本文引用文献[12]提出的降维方法,经反应谱迭代,生成了144条与规范反应谱相容的地震动加速度时程集合。同时,结合概率密度演化理论对既有结构和不同BRB加固结构的动力可靠性进行了精细化分析,从而为加固结构抗震分析提供坚实基础。

1 一般环境下既有建筑材料经时变化规律

混凝土和钢筋是组成建筑结构的主要材料。然而,随着时间的推移,两种材料的力学性能均会出现不同程度的退化。

1.1 混凝土强度经时变化规律

在仅有CO₂、O₂、温度及湿度等作用的一般环境下,随着既有建筑服役龄期的增长,混凝土材料的力学性能会出现经时退化。文献[14]通过对回弹法采集的不同服役期龄的1923个样本以5年为单位进行数据归并,采用二次拟合模型得到了混凝土相对强度的如下确定性时间函数,如图1所示。

均值的二次多项式模型:

$$\mu(t) = -2.067 \times 10^{-4} t^2 + 8.957 \times 10^{-3} t + 0.8361 \quad (1)$$

标准差的线性模型:

$$\sigma_t(t) = 1.192 \times 10^{-3} t + 0.08012 \quad (2)$$

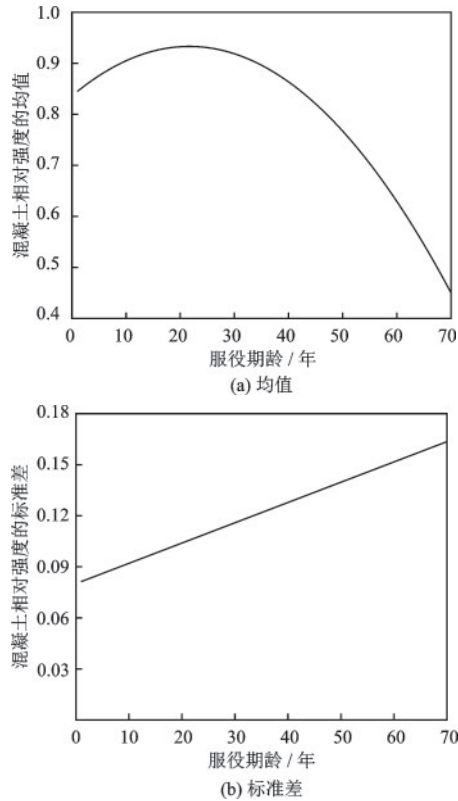


图1 混凝土相对强度均值、标准差和服役龄期的关系
Fig.1 Relationship between mean value, standard deviation, and service age of concrete relative strength

1.2 钢筋力学性能退化模型

受 CO_2 、 H_2O 等介质影响,混凝土中钢筋会产生锈蚀,钢筋的实际屈服强度与实际极限强度会发生退化,文献[15]通过人工气候环境加速试验得到锈蚀钢筋的名义屈服强度、名义极限强度与名义弹性模量和锈蚀率 ρ 的关系为:

当 $\rho\% \leq 5\%$ 时:

$$\begin{cases} f_{y,c} = f_{y0}(1 - 0.029\rho) \\ f_{u,c} = f_{u0}(1 - 0.026\rho) \\ E_{u,c} = E_{u0}(1 - 0.052\rho) \end{cases} \quad (3)$$

当 $\rho\% > 5\%$ 时:

$$\begin{cases} f_{y,c} = f_{y0}(1.175 - 0.064\rho) \\ f_{u,c} = f_{u0}(1.18 - 0.062\rho) \\ E_{u,c} = E_{u0}(0.895 - 0.031\rho) \end{cases} \quad (4)$$

式中, $f_{y,c}$ 、 $f_{u,c}$ 、 $E_{u,c}$ 依次为锈蚀钢筋的名义屈服强度、名义极限强度及名义弹性模量; f_{y0} 、 f_{u0} 、 E_{u0} 依次为未锈蚀钢筋的名义屈服强度、名义极限强度及名义弹性模量。

上述材料力学性能的经时退化是影响既有结

构安全性的一大因素。除此之外,偶然地震灾害作用也是影响既有结构安全可靠的另一大威胁。

2 非平稳地震动过程的降维模拟

2.1 非平稳地震动过程的演变功率谱

在地震工程中,时-频调制的非平稳地震动过程,其演变功率谱模型可表示为:

$$G_{\ddot{U}_g}(\omega, t) = |A(t, \omega)|^2 G(\omega) \quad (5)$$

式中, $G_{\ddot{U}_g}(\omega, t)$ 为 $\ddot{U}_g(t)$ 的单边演变功率谱密度函数; $A(t, \omega)$ 为时-频调制函数; $G(\omega)$ 为平稳地震动加速度过程的单边功率谱。

在式(5)中,时-频调制函数 $A(t, \omega)$,采用刘章军等^[12]改进的形式:

$$A(t, \omega) = \frac{\exp(-a \times t) - \exp[-(c|\omega - \omega_g| + b) \times t]}{\exp(-a \times t^*) - \exp[-(c|\omega - \omega_g| + b) \times t^*]} \quad (6)$$

其中,

$$t^* = \frac{\ln(c|\omega - \omega_g| + b) - \ln(a)}{c|\omega - \omega_g| + (b - a)} \quad (7)$$

平稳过程的单边功率谱 $G(\omega)$,采用Clough-Penzien谱^[16]:

$$G(\omega) = 2 \times \frac{\omega_g^4 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega^2 - \omega_g^2)^2 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \times \frac{\omega^4}{(\omega^2 - \omega_f^2)^2 + 4\xi_f^2 \omega_f^2 \omega^2} \times S_0 \quad (8)$$

其中,

$$S_0 = \frac{a_{\max}^2}{r^2 \left[\pi \omega_g \cdot \left(2\xi_g + \frac{1}{2\xi_g} \right) \right]} \quad (9)$$

式中, a 为调节地震动作用衰减速率的参数,场地为II类、设计地震分组为第一组时, $a = 0.20 \text{ s}^{-1}$; $b = a + 0.001$, $c = 0.005$; ω_g 和 ξ_g 分别表示场地土的卓越圆频率和阻尼比; ω_f 和 ξ_f 分别表示基岩的卓越圆频率和阻尼比,一般可取 $\omega_f = 0.1\omega_g$, $\xi_f = \xi_g$; a_{\max} 表示地震动峰值加速度; r 表示峰值调整系数。

2.2 非平稳地震动过程的降维模拟

非平稳随机地震动加速度过程 $\ddot{U}_g(t)$ 的模拟,可根据下式实现:

$$\ddot{U}_g(t) \approx \sum_{n=1}^N \sqrt{G_{\ddot{U}_g}(\omega_n, t) \Delta\omega} \times [X_n \cos(\omega_n t) + Y_n \sin(\omega_n t)] \quad (10)$$

式中, $\omega_n = n\Delta\omega$, $\Delta\omega$ 为频率间隔, 其越小精度越高; X_n 与 Y_n 代表了一组标准正交随机变量, 其满足的基本条件为:

$$\left. \begin{aligned} E[X_n] = E[Y_n] = 0, E[X_m Y_n] = 0 \\ E[X_m X_n] = E[Y_m Y_n] = \delta_{mn} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中, $E[\cdot]$ 代表数学期望; δ_{mn} 为 Kronecker-Delta 函数。

应用随机函数方法, 可将标准正交随机变量 X_n 与 Y_n 表示为如下形式^[12]:

$$X_n = \sqrt{2} \cos(\bar{n} \cdot \Theta + \alpha), Y_n = \sqrt{2} \sin(\bar{n} \cdot \Theta + \alpha) \quad (12)$$

式中, Θ 为均匀分布的基本随机变量, 定义域为 $[0, 2\pi)$; α 一般可取 $\pi/4$; $n, \bar{n} = 1, 2, \dots, N$, n 与 \bar{n} 可通过 MATLAB 工具箱中函数 `rand('state', 1)` 及 `randperm(N)` 进行实现, 即: $\bar{n} = \text{temp}(n)$ 。

通常经过上述方法生成的地震动加速度时程需要经迭代修正后才能拟合规范反应谱, 具体步骤参见文献[12]。需要说明的是, 以上步骤得到的地震动过程的随机性仅由一个基本随机变量 Θ 即可描述。

3 结构动力可靠度分析

为实现既有结构及其维修加固结构的精细化分析, 考虑将非平稳地震动过程的降维模拟与概率密度演化理论进行结合。

3.1 广义概率密度演化方程

一般地, 建筑结构在随机地震作用下的运动方程可表示为:

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + G(U) = -MI\ddot{U}_g(\Theta, t) \quad (13)$$

式中, M 和 C 分别为 $n \times n$ 阶质量与阻尼矩阵; \ddot{U} 和 \dot{U} 分别为 n 维加速度与速度; $G(\cdot)$ 为非线性恢复力向量; U 为 n 维位移; $I = [1, 1, \dots, 1]^T$; \ddot{U}_g 为地震动加速度; Θ 为基本随机变量。

假设结构系统中感兴趣的物理量 Z (例如: 位移、速度、加速度、变形等) 存在以及唯一, 且 (Z, Θ) 构成的增广系统的联合概率密度函数 $p_{Z\Theta}(z, \theta, t)$ 已知, 则结构响应的广义概率密度演化方程为^[17]:

$$\frac{\partial p_{Z\Theta}(z, \theta, t)}{\partial t} + \dot{Z}(z, \theta) \frac{\partial p_{Z\Theta}(z, \theta, t)}{\partial z} = 0 \quad (14)$$

式(14)的初始条件为:

$$p_{Z\Theta}(z, \theta, t) \Big|_{t=t_0} = \delta(z - z_0) p_{\Theta}(\theta) \quad (15)$$

其中, $\dot{Z}(\theta, t)$ 为 $Z(\theta, t)$ 的速度过程; $\delta(\cdot)$ 为 Dirac 函数; z_0 为确定性初始值, 若感兴趣的物理量为层间位移角, 则 $z_0 = 0$ 。

对广义概率密度演化方程进行求解, 可得到 $Z(t)$ 的联合概率密度函数 $p_Z(z, t)$ 为:

$$p_Z(z, t) = \int_{\Omega_{\Theta}} p_{Z\Theta}(z, \theta, t) d\theta \quad (16)$$

式中, Ω_{Θ} 为基本随机变量 Θ 的分布空间。

由式(13)可知, 式(14)中的随机性主要来源于随机地震动, 即基本随机变量 Θ 。因降维方法与概率密度演化理论的联合应用, 这极大地降低了结构非线性随机地震反应和结构整体可靠性分析的难度。

3.2 基于极值分布的可靠度分析

选择层间位移角 $\Phi_j(t)$ 为感兴趣的物理量作为动力可靠度的评价指标。于是, 根据极值事件原理^[18-19], 第 j 层的动力可靠度可以表示为:

$$R_{T,j}(\phi_0) = \Pr\{\Phi_{j,\max} < \phi_0\}, j = 1, 2, \dots, N_r \quad (17)$$

式中, ϕ_0 为由具体问题给定的阈值(界限值); T 为地震动持时; $\Phi_{j,\max}$ 为第 j 层的层间位移角极值, 可定义为:

$$\Phi_{j,\max} = \max_{0 \leq t \leq T} \{|\Phi_j(t)|\} \quad (18)$$

根据等价极值事件的概念^[18], 可进一步定义结构的整体动力可靠度, 即:

$$R_T(\phi_0) = \Pr\{\Phi_{\max} < \phi_0\} = \int_0^{\phi_0} p_{\Phi_{\max}}(\phi) d\phi \quad (19)$$

式中, Φ_{\max} 为结构所有楼层层间位移角的等价极值, 即:

$$\Phi_{\max} = \max_{1 \leq j \leq N_r} \{|\Phi_{j,\max}|\} \quad (20)$$

4 工程算例

4.1 工程概况及有限元建模

某六层既有钢筋混凝土结构办公楼, 有限元模型标准层如图 2 所示。横向柱间距为 6.9 m, 纵向柱间距为 7.2 m, 走廊宽为 2.7 m, 首层层高为 4 m, 2~6 层层高为 3.6 m。首层柱截面为 $600 \times 600 \text{ mm}^2$, 2~6 层柱截面为 $500 \times 500 \text{ mm}^2$, 主梁、次梁和连梁截面依次为 $300 \times 600 \text{ mm}^2$, $250 \times 500 \text{ mm}^2$ 及 $300 \times$

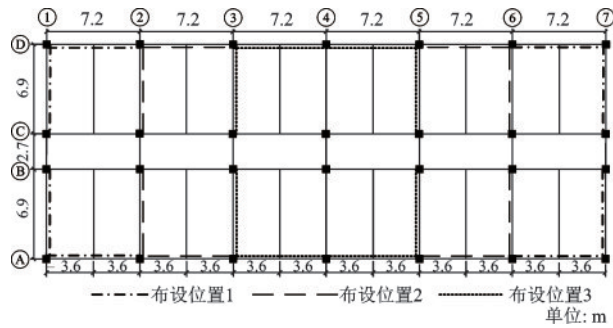


图2 既有结构标准层平面图及支撑布置位置

Fig.2 Standard floor plan of an existing structure and layout position of brace

450 mm²,板厚为 120 mm。柱混凝土强度为 C35,梁板混凝土强度为 C30,主筋与箍筋均采用 HRB400。

该既有建筑已服役年限取 50 年,考虑一般环境下材料力学性能的经时退化规律,参考式(1)和式(2),退化后柱混凝土强度取 C30,梁板混凝土强度取 C25;钢筋锈蚀率取 5%,屈服强度、极限强度和弹性模量按式(3)进行退化。地震作用的具体相关参数见表 1。

表 1 地震作用的相关参数

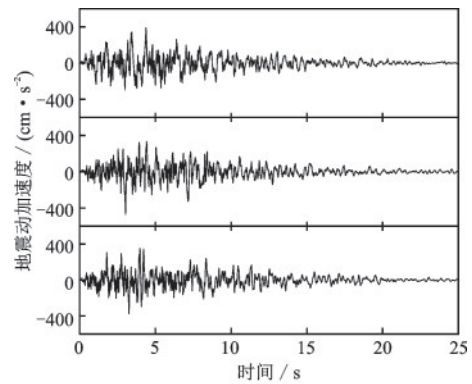
Table 1 Related parameters of earthquake action

编号	基本参数	数值
1	场地类别	II 类
2	抗震设防烈度	8 度
3	罕遇地震峰值加速度	0.40g
4	设计地震分组	第一组
5	场地特征周期	0.40 s

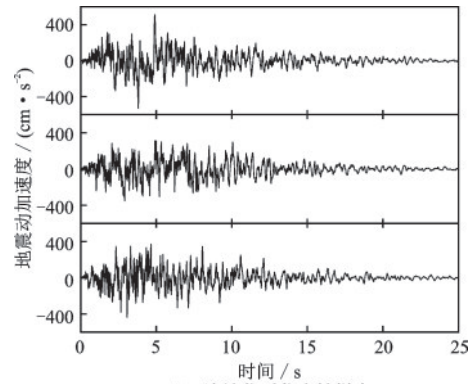
4.2 非平稳地震动过程代表性时程集合的生成

由于随机地震动模拟效果受基本随机变量选点影响较为显著,故可采用对模拟效果较好的数论选点法,以及与规范反应谱相容的非平稳地震动降维模拟法^[20],即式(5)~(12),生成 144 条代表性时程。

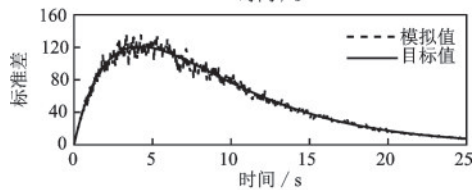
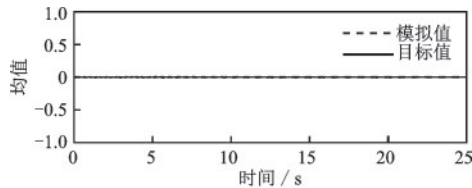
图 3(a)、(b)分别为初始代表性样本和 3 次迭代后代表性样本。图 3(c)为代表时程集合的均值、标准差与目标值的对比情况。经计算,模拟值与目标值的均值相对误差近乎为零,标准差相对误差为 4.68%,两者均小于 5%,能够很好地满足工程精度的要求。经 3 次迭代后,代表性样本的频率与幅值出现明显变化。这是由于调整了地震动过程功率谱的缘故。图 3(d)中,经过 3 次迭代及频率截断,反



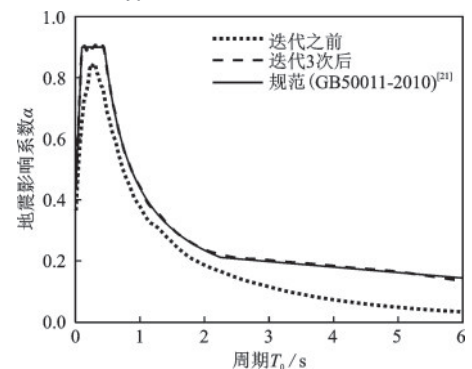
(a) 初始代表性样本



(b) 3 次迭代后代表性样本



(c) 模拟值与目标值的均值与标准差



(d) 迭代前后与规范反应谱的比较

图 3 初始计算与迭代后的对比

Fig.3 Comparison between initial calculation and iteration

应谱的拟合效果已经变的比较理想,近乎与规范^[21]反应谱重合,这表明所生成的地震动过程代表性时程集合在工程中具有可适用性。

图4为144条代表性样本峰值加速度的概率分布,模拟的随机地震动反映了幅值的随机性。

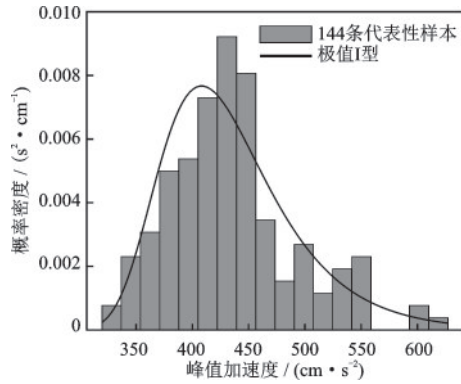


图4 代表性样本峰值加速度的概率分布

Fig.4 Probability distribution of representative samples peak acceleration

4.3 随机地震作用下不同BRB加固结构可靠度分析

考虑到既有结构受钢筋与混凝土材料力学性能退化的影响,其抗震性能随之也会降低,现采用等效截面面积为 $80\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ 、核心单元采用Q235钢材的BRB对其进行加固。

首先根据不同布置位置制定3种加固方案,即BRB加固结构1(在1-2/A,6-7/A,1-2/D,6-7/D,C-D/1,A-B/1,C-D/7,A-B/7轴布设);BRB加固结构2(在2-3/A,5-6/A,2-3/D,5-6/D,C-D/2,A-B/2,C-D/6,A-B/6轴布设);BRB加固结构3(在3-4/A,4-5/A,3-4/D,4-5/D,C-D/3,A-B/3,C-D/5,A-B/5轴布设)。具体布设位置如图2所示。在三种加固方案中均采用人字形支撑形式。图5为人字形BRB加固结构1的有限元模型。

图6~9仅展示了在随机地震动激励下,既有结构与BRB加固结构1结构响应(层间位移角)的概率信息。图6为加固前后结构响应均值与标准差的时程变化对比曲线。可明显看出,加固前后结构响应总体上均处于零均值状态,而既有结构响应的标准差却是BRB加固结构1的约2倍。这表明,加固后结构响应的离散化程度成倍降低。

对比图7~9,可从不同时刻的概率密度函数、某个时间段的概率密度演化曲面以及概率密度等值线三个不同视角观察既有建筑加固前后结构响应的显著变化。明显看出,BRB的增设使得层间位移角大幅减小且变的集中(离散化减小)、概率密度演化曲面明显趋于平滑。以上均说明随机地震动

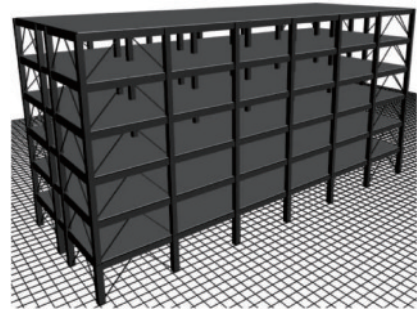


图5 人字形BRB加固结构1有限元模型

Fig.5 Finite element model of herringbone BRB reinforced structure 1

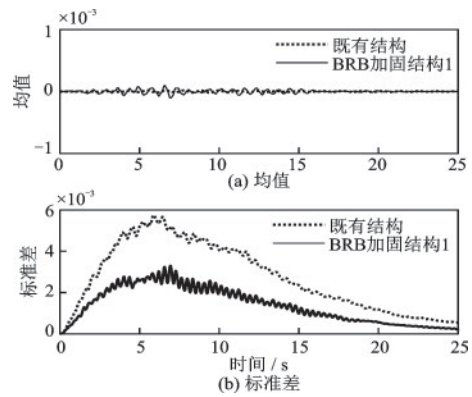


图6 BRB加固前后结构响应的均值和标准差

Fig.6 Mean and standard deviation of structural response before and after BRB reinforcement

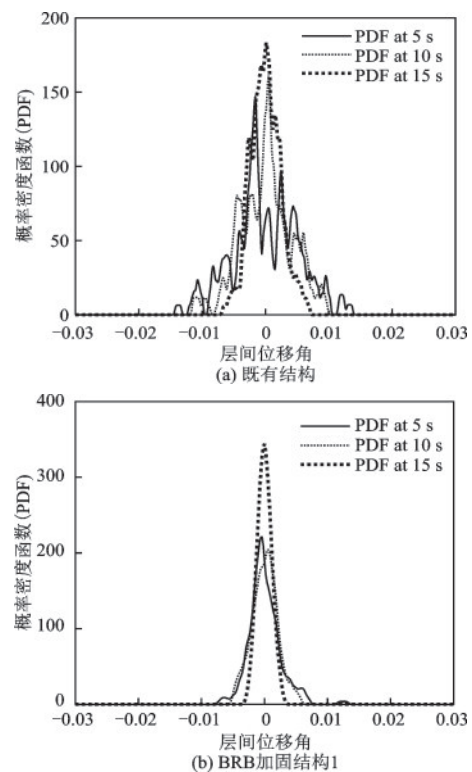


图7 3个不同时刻的概率密度函数

Fig.7 Probability density function at three different times

作用下BRB的布置使得结构响应减弱、结构振动得到了较好的控制。

取结构层间位移角 $1/120$ 作为阈值,该阈值对

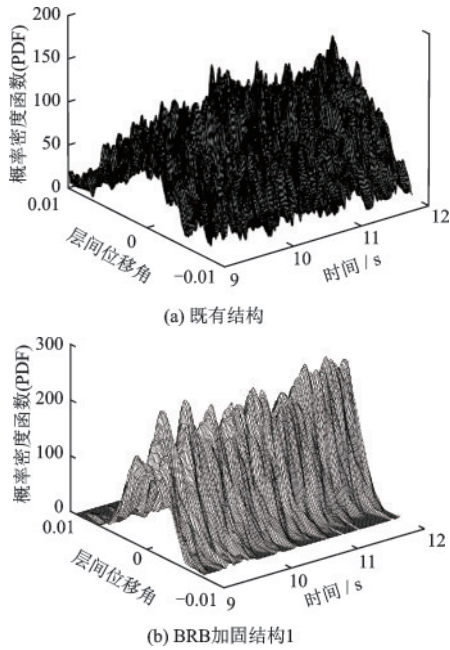


图8 9~12 s的概率密度演化曲面

Fig.8 Probability density evolution surface from 9 to 12 s

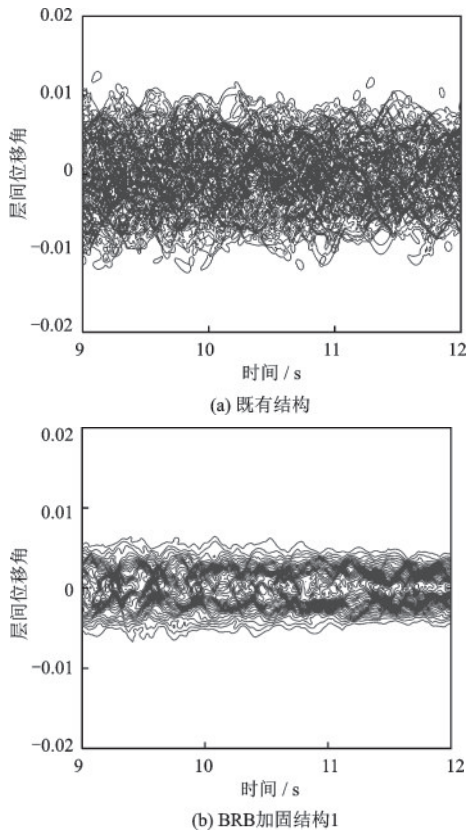


图9 9~12 s的概率密度等值线

Fig.9 Probability density isolines of 9~12 s

应规范^[21]抗震性能不同状态破坏控制目标中的中等破坏。进而运用基于概率密度演化理论的首次超越破坏可靠度分析方法,可分别计算出结构各楼层可靠度和结构整体可靠度。

图10和表2为既有结构与BRB加固结构1的各楼层可靠度。不难看出,既有建筑2~5层结构楼层可靠度均小于95%,最小可靠度楼层为第2层(即最大层间位移角出现的位置)。增设BRB后,各楼层可靠度大幅提升,且均达到95%以上,满足结构安全性要求。

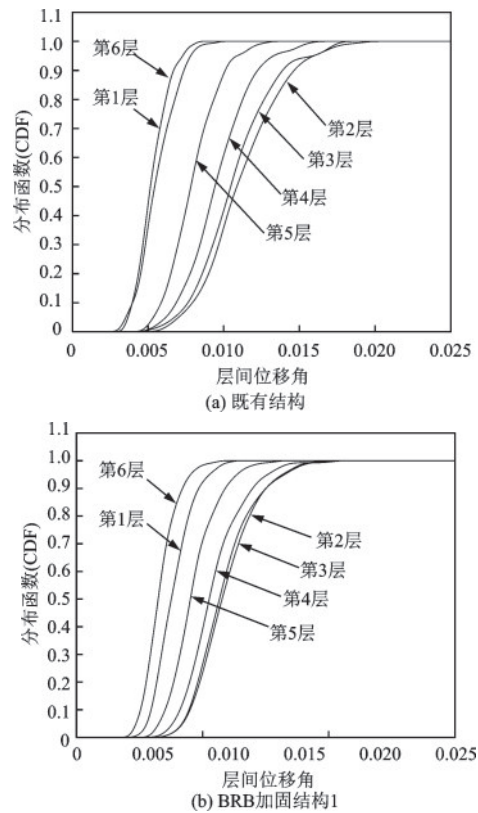


图10 结构各楼层可靠度

Fig.10 Reliability of each floor of the structure

表2 结构各楼层可靠度

Table 2 Reliability of each floor of the structure

楼层	弹塑性层间 位移角限值	既有结构楼层 可靠度	BRB加固1 楼层可靠度
1	1/120	0.981 1	1.000 0
2	1/120	0.130 4	0.955 0
3	1/120	0.169 6	0.959 4
4	1/120	0.283 4	0.986 2
5	1/120	0.624 7	1.000 0
6	1/120	0.997 5	1.000 0

由图 11(a)和表 3 可知,3 种 BRB 加固方案使得既有建筑的整体可靠度由 11.09% 分别提升至 95.23%、94.97%、94.99%,极大的增加了既有结构的安全性。虽然三种加固方案的效果相差甚小,但它们的周期比却有较为明显的差异,即:BRB 加固结构 1 的周期比 $T_t/T_1=0.477/0.719=0.66$ 、BRB 加固结构 2 的周期比 $T_t/T_1=0.60/0.717=0.84$ 、BRB 加固结构 3 的周期比 $T_t/T_1=0.676/0.735=0.92$ 。这说明,在外侧角柱位置布置 BRB 对控制结构扭转响应更加有利。

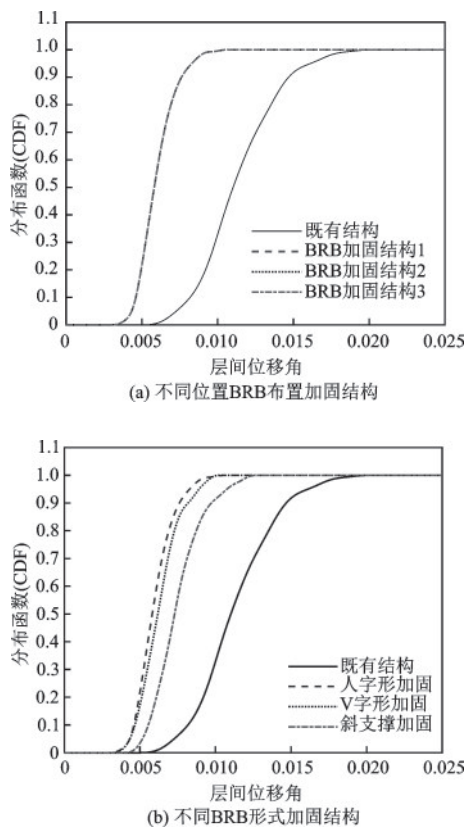


图 11 结构整体可靠度

Fig.11 Integrated reliability of structure

表 3 结构整体可靠度

Table 3 Integrated reliability of structure

既有结构	不同布设位置			BRB 加固结构 1 支撑形式		
	BRB 加固 1	BRB 加固 2	BRB 加固 3	人字形	V 字形	斜支撑
弹塑性层间位移角限值	1/120	1/120	1/120	1/120	1/120	1/120
整体可靠度	0.1109	0.9523	0.9497	0.9499	0.9523	0.9086 0.7378

考虑到仅在最外侧位置进行 BRB 布置的加固结构 1 整体可靠度大于 95% 且对控制结构扭转响应最为有利,故现将 BRB 加固结构 1 中的人字形支撑依次更换为 V 字形支撑和斜支撑。对比图 11(b) 中各条分布函数并结合表 3 数据可知,3 种形式支撑加固结构的整体可靠度为:人字形(95.23%)>V 字形(90.86%)>斜支撑(73.78%)。显然,BRB 形式的改变对结构整体可靠度的影响远大于本文中 BRB 位置改变对结构整体可靠度的影响。

5 结 论

为了考虑材料力学性能经时退化对既有结构抗震可靠度的影响,将非平稳地震动过程模拟的降维方法与概率密度演化理论相结合,对本文设计的 5 种 BRB 加固既有结构的动力可靠度进行了精细化分析。由工程算例得到以下结论:

(1)BRB 布设对提升既有结构薄弱楼层和整体结构可靠度效果明显。随着 BRB 布置从外侧角柱向中间移动,结构的整体可靠度变化甚小,但仅当 BRB 布置在外围角柱位置时,其对结构扭转响应的控制是最为有利的。

(2)依次选用 V 字形和斜支撑替换 BRB 加固结构 1 中的人字形支撑,并对三种加固结构进行对比,发现人字形支撑对改善既有结构脆弱性、提升既有结构抵抗随机地震作用破坏的效果更好。

(3)非平稳地震动过程的降维模拟可生成具有完备概率的地震动代表性时程集合。进而,结合概率密度演化理论,可以精细地评价既有结构及其 BRB 加固结构的动力可靠性,为既有结构的维修及加固抗震分析提供了新的途径。

参考文献:

[1] 刘李峰.《国务院办公厅关于全面推进城镇老旧小区改造工作的指导意见》解读[J]. 城乡建设, 2020(15): 14-17.

[2] 混凝土结构加固设计规范: GB50367—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

[3] 屈曲约束支撑应用技术规程: T/CECS817—2021 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.

[4] 张梓涵. BRB 布置方式对多层钢框架结构抗震性能的影响[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2020.

Zhang Z H. Effect of BRB layout on multilayer steel

- frame structure's seismic performance[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [5] 王静峰, 李贝贝, 胡宝琳, 等. 屈曲约束支撑结构设计方法与工程应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2022. Wang J F, Li B B, Hu B L, et al. Design method and engineering application of buckling-restrained brace frame structures [M]. Beijing: China Machine Press, 2022. (in Chinese)
- [6] 李杰. 工程结构可靠性分析原理[M]. 北京: 科学出版社, 2021. Li J. Fundamental of structural reliability analysis[M]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese)
- [7] Freudenthal A M. The safety of structures [J]. ASCE Transactions, 1947, 112: 125-180.
- [8] Li J, Chen J B. Stochastic dynamics of structures[M]. Singapore: John Wiley & Sons Pte Ltd., 2009.
- [9] Shinozuka M, Jan C M. Digital simulation of random processes and its applications [J]. Journal of Sound and Vibration, 1972, 25: 111-128.
- [10] Liang J, Chaudhuri S R, Shinozuka M. Simulation of nonstationary stochastic processes by spectral representation [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2007, 133: 616-627.
- [11] Liu Z J, Liu W, Peng Y B. Random function based spectral representation of stationary and non-stationary stochastic processes [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2016, 45: 115-126.
- [12] 刘章军, 刘增辉, 刘威. 全非平稳地震动过程的概率模型及反应谱拟合[J]. 振动与冲击, 2017, 36(2): 32-38. Liu Z J, Liu Z H, Liu W. Probability model of fully non-stationary ground motion with the target response spectrum compatible [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(2): 32-38. (in Chinese)
- [13] Liu Z J, Ruan X X, Liu Z X, et al. Probability density evolution analysis of stochastic nonlinear structure under non-stationary ground motions [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2019, 15(8): 1049-1059.
- [14] 高向玲, 颜迎迎, 李杰. 一般大气环境下混凝土经时抗压强度的变化规律[J]. 土木工程学报, 2015, 48(1): 19-26. Gao X L, Yan Y Y, Li J. Change law of time-dependent concrete compressive strength in the atmospheric environment [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(1): 19-26. (in Chinese)
- [15] 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 Q, Yuan Y S. Experimental study on the deterioration of mechanical properties of corroded steel bars [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(12): 42-47. (in Chinese)
- [16] Clough R W, Penzien J. Dynamics of structures [M]. New York: McGraw-Hill, 1975.
- [17] Li J. Probability density evolution method: background, significance and recent developments [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2016, 44: 111-117.
- [18] Li J, Chen J B, Fan W L. The equivalent extreme-value event and evaluation of the structural system reliability [J]. Structural Safety, 2007, 29(2): 112-131.
- [19] 刘章军, 陈建兵, 彭勇波. 结构动力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022. Liu Z J, Chen J B, Peng Y B. Dynamics of structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022. (in Chinese)
- [20] 刘章军, 姜云木, 刘子心, 等. 与规范反应谱相容的全非平稳地震动降维模拟平台 V1.0 [CP]. 著作权登记号: 2021SR0760902
- [21] 建筑抗震设计规范: GB50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

(本文编辑: 池营营)