

王群,关宏洁,张倩.基于数学去噪后模拟地震信号测试混凝土结构抗震性能的研究[J].地震工程学报,2019,41(1):36-41.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.036

WANG Qun, GUAN Hongjie, ZHANG Qian. Seismic Performance Test of the Concrete Structures Based on Seismic Analog Signals after Denoising[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(1): 36-41. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.036

基于数学去噪后模拟地震信号测试混凝土结构抗震性能的研究

王 群, 关宏洁, 张 倩

(西安欧亚学院, 陕西 西安 710065)

摘要: 针对当前混凝土结构建筑抗震性能测试方法存在的测试结果准确率较低的问题,提出一种新的测试方法,利用小波函数的伸缩平移操作得到一个函数族,对模拟地震信号进行小波变换。当函数族组成一个标准的正交基时,从连续小波变换中对地震信号进行重构,将去噪后的地震信号作为检测混凝土结构建筑抗震性能的信号样本。利用单自由度体系的动力平衡方程对地震的位移反应、速度反应加速度反应以及恢复力进行求解,通过强度折减系数计算公式和结构最大弹性反应计算公式,计算混凝土结构建筑的强度折减系数和结构最大弹性反应,最后在震动台上对混凝土结构建筑抗震性能进行测试。测试实验结果表明,所提方法可以实现对混凝土结构建筑抗震性能的测试,且测试结果准确程度较高。

关键词: 混凝土结构; 建筑; 抗震性能; 测试

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)01-0036-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.036

Seismic Performance Test of the Concrete Structures Based on Seismic analog Signals After Denoising

WANG Qun, GUAN Hongjie, ZHANG Qian

(Xi'an Eurasia University, Xi'an 710065, Shaanxi, China)

Abstract: In this study, a new test method is proposed to address the problem of low accuracy associated with the test results of the current seismic performance test methods with respect to concrete structures. A function family was obtained using the wavelet function, and a wavelet transform was carried out on the analog seismic signals. When the function family constituted a standard orthogonal basis, the seismic signal was reconstructed from the continuous wavelet transform. After denoising, the seismic signal was considered to be a signal sample for verifying the seismic performance of a concrete structure. The displacement response, velocity response, acceleration response, and restoring force were obtained using a dynamic equilibrium equation exhibi-

收稿日期:2018-04-30

基金项目:陕西省自然科学基金(KL-SEER-ME-201203)

第一作者简介:王 群(1982-),女,硕士研究生,讲师,研究方向为结构工程。E-mail:wangqun.only@163.com

ting a single degree of freedom. Further, the strength reduction coefficient and the maximum elastic response of the concrete structure were calculated. The experimental results exhibited that the proposed method can effectively test the seismic performance of concrete structures with a high accuracy.

Keywords: concrete structure; building; seismic performance; test

0 引言

大地震直接考验着建筑的抗震性能,设计不合理的建筑会因为地震而造成损毁或者倒塌。新中国成立以来几次大的地震对建筑物的破坏程度表明,地震对我们人类的生命和财产损失破坏是相当严重的。人类在面对地震等自然灾害时,应该应用已掌握的技术把破坏降到小程度,对当前不满足抗震要求的建筑进行抗震检测鉴定是必要和紧迫的。

影响建筑抗震性能的原因有很多种,比如建筑周期、建筑立面、建筑刚度分布以及建筑采用场地的软硬等^[1]。建筑在建设时通常采用混凝土结构,混凝土结构主要有素混凝土结构、预应力混凝土结构和钢筋混凝土结构三种,其中使用最多的是钢筋混凝土结构。在建筑的生命周期中,常因自然灾害造成建筑结构损伤而影响其抗震性能。当前方法多是构建抗震检测模型,如有随机振动下大跨度钢管混凝土柱结构的抗震性测试方法,此种方法是在等级多变强的基础上,对抗震测试模型进行设计,对振动信号作去噪处理,并结合振动信号的强度、后验密度以及权值系数等对振动信号进行预处理,获取单一寿命衰减参数,引入粒子群算法,求解大跨度钢管混凝土柱结构寿命衰减抑制周期,判断其抗震性,按照大跨度钢管混凝土柱结构寿命衰减抑制周期的判断方法,可实现对相关混凝土建筑结构在等级多变强随机振动下的抗震性测试,但是此种方法测试准确率稍低^[2];又如一种基于高阶振动模型的抗震性能检测方法,此种方法主要是利用无线传感振动信号,集结合此模型对突变信号进行检测,但是只有在突变型号较强时才可达到较高的检测准确度^[3]。当前的混凝土结构建筑抗震性能测试方法均不能满足用户对建筑抗震性能测试准确率的需求,因此设计一种能够准确测试混凝土结构建筑抗震性能的方法是非常重要的^[4]。

为了解决这个问题,本文提出了一种基于数学去噪后模拟地震信号测试混凝土结构抗震性能的研究方法。需要特别指出的是:本文只是对本方法进行

行了思路与方法的介绍,详细数值模拟及实验过程限于篇幅未能尽述,有关详细过程在项目研究报告中。

1 基于数学去噪后模拟地震信号的混凝土结构抗震性能测试方法

1.1 模拟地震信号数学方法去噪

模拟地震信号是经由模拟震源发出的模拟地震超声波,通过接收装置将超声波转换为电信号,最后通过数据采集系统获得模拟地震信号^[5-6],模拟地震信号 $f(t)$ 的强度为 D 。利用小波函数的伸缩平移操作得到了一个函数族,对模拟的地震信号进行小波变换,当函数族组成了一个标准的正交基时,从连续小波变换中对地震信号进行重构,实现对地震信号的噪声去除。

如果小波函数 $\Psi(t)$ 属于 $L^1(R) \cap L^2(R)$,且满足 $\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) dt = 0$ 时,函数在伸缩平移后得到了一个函数族:

$$\Psi_{a,b}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right), (a, b \in R, a \neq 0) \quad (1)$$

式中: a 和 b 分别表示伸缩因子和平移因子; $\{\Psi_{a,b}\}$ 表示连续小波。

设函数 $\Psi(t)$ 是基小波,地震信号 $f(t)$ 属于 $L^2(R)$,地震信号的连续小波变换方式如下:

$$(W_{\Psi} f)(a, b) \leq f, \Psi_{a,b} \geq |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (2)$$

由式(2)可知,对地震信号进行小波变换相当于采用多种宽度的时间窗口对地震信号在 b 处的频率成分进行分析。

如果 $\Psi(t)$ 满足 $C_{\Psi} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty$, 则

称 $\Psi(t)$ 是允许小波,其中 $\Psi(\omega)$ 是函数 $\Psi(t)$ 的傅里叶变换。将允许小波作为基小波^[7],从连续小波变换中对地震信号进行重构,重构公式如下:

$$f(t) = \frac{1}{C_\Psi} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} (W_\Psi f)(a, b) \cdot \left[|a|^{\frac{1}{2}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \right] \frac{1}{a^2} da db \quad (3)$$

通常利用离散小波变换的方式处理地震信号, 当 $a = a_0^m, b = nb_0 a_0^m$, 式(1) 可以改写成如下形式:

$$\Psi_{m,n}(t) = a_0^{-\frac{m}{2}} \Psi(a_0^{-m} t - nb_0) \quad (4)$$

这时称函数族 $\{\psi_{m,n}(t), m, n \in Z\}$ 是离散小波, 当 $a_0 = 2, b_0 = 1$ 时, 函数族组成了一个标准的正交基, 通过它可以完成对地震信号的重构。通过式(1) ~ 式(4) 完成了对地震信号的噪声去除。

1.2 结构运动方程与强度折减系数数值模拟的建立

模拟地震信号去噪有助于更准确地检测出混凝土结构建筑的抗震性能。将噪声去除后的地震信号作为检测混凝土结构建筑抗震性的信号样本, 利用结构运动方程对地震的位移、速度、加速度以及恢复力进行求解, 通过强度折减系数计算公式和结构最大弹性反应计算公式对混凝土结构建筑的强度折减系数和结构最大弹性反应进行计算, 实现对混凝土结构建筑抗震性能的测试^[8]。

在地震加速度作用下, 结构运动方程如下:

$$m\ddot{u}(t') + c\dot{u}(t') + F(x, t') = -m\ddot{u}_g(t') \quad (5)$$

其中: m 表示质量; c 表示阻尼系数; $u(t')$ 表示建筑的地震位移反应; $\dot{u}(t')$ 表示建筑的地震速度反应; 和 $\ddot{u}(t')$ 表示建筑的地震加速度反应; $F(x, t')$ 表示恢复力。

其中, 建筑的地震位移反应 $u(t')$ 的具体计算公式如下:

$$u(t') = \frac{-m\ddot{u}(t')(1+\mu)}{F_y} \quad (6)$$

式中: $F_y = ku_y$, k 表示初始刚度系数; μ_y 表示无量纲化的时间过程^[9]; μ 表示延性系数。

建筑的地震速度反应 $\dot{u}(t')$ 的具体计算公式如下:

$$\dot{u}(t') = 1 - \frac{N_{X',c}}{T_{X'}} \cdot Z_u \quad (7)$$

式中: $N_{X',c}$ 表示建筑框架位移距离; $T_{X'}$ 表示建筑框架移动平均时长; Z_u 表示建筑框架样本的总体数量。

建筑的地震加速度反应 $\ddot{u}(t')$ 的具体计算公式如下:

$$\ddot{u}(t') = \frac{\dot{u}(t')}{T_{X'}} \quad (8)$$

恢复力 $F(x, t')$ 的具体计算公式如下:

$$F(x, t') = P(IM) \left(\frac{\ln(m_c)}{\beta_c} \right) \quad (9)$$

其中: $P(IM)$ 表示建筑框架恢复力概率; m_c 代表建筑框架恢复力概率中位值; β_c 代表建筑框架恢复力概率对数标准差。

设 u_y 和 F_y 分别表示建筑的屈服位移和屈服力, 这时式(5) 可以改写成:

$$\ddot{u}(t') + 2\omega\xi\dot{u}(t') + \omega^2 \frac{F(u, t')}{F_y} = -\frac{\omega}{\eta} \frac{\ddot{u}_g(t')}{\max|\ddot{u}_g(t')|} \quad (10)$$

式中: $\omega = \sqrt{k/m}$ 表示圆频率; $\xi = c/(2\sqrt{mk})$ 表示阻尼比; $\eta = F_y/(m \cdot \max|\ddot{u}_g(t')|)$ 表示无量纲强度, 利用无量纲强度对地震反应的标准强度系数进行分析。

强度折减系数计算公式为:

$$R_\mu = \frac{F_{el}}{F_y} = \frac{F_{yl}}{F_{yi}} \quad (11)$$

在阻尼条件下, 建筑的最大弹性反应 F_{el} , 其计算公式为:

$$F_{el} = m\beta(\omega, \xi) \max|\ddot{u}_g(t')| \quad (12)$$

其中: $\beta(\omega, \xi)$ 表示建筑的地震动放大系数反应谱, 它由式(11)、式(12) 以及标准强度系数得:

$$\eta = \beta(\omega, \xi)/R_\mu \quad (13)$$

将上式带入到式(10) 中, 得出:

$$\ddot{u}(t') + 2\omega\xi\dot{u}(t') + \omega^2 \frac{F(u, t')}{F_y} = -\frac{\omega R_\mu}{\beta(\omega, \xi)} \frac{\ddot{u}_g(t')}{\max|\ddot{u}_g(t')|} \quad (14)$$

式(14) 是弹塑性反应谱方程。方程中 β 和 $F(u, t')/F_y$ 分别反映了地震振动的频谱特征与滞回特性。在自振周期、恢复力等数据给定的情况下, 利用数值分析的方式记录输入的地震加速度, 找到与位移延性系数对应的强度折减系数^[10-11]。

式(5)~(14) 完成了对混凝土结构建筑抗震性能的测试。通常来说, 所提测试方法适用于混凝土框架结构、剪力墙结构、预制结构等。其中相比于框架结构, 剪力墙结构是用钢筋混凝土墙板来代替框架结构中的梁柱, 能承担各类荷载引起的内力, 并能有效控制结构的水平力, 是目前建筑结构中抗震性能最好的, 因而所提方法对于剪力墙结构的应用性更为广泛, 预制结构通常是预制混凝土构件, 对所提方法也适用。

将 1.1 节和 1.2 节的地震波输入和结构动力验

算相结合,完成基于数学去噪后模拟地震信号的混凝土结构抗震性能测试方法。

2 混凝土结构建筑抗震性能实验测试前期准备

混凝土结构建筑在竣工后要对其进行验收,验收时需要确定建筑是否符合抗震设计要求:针对混凝土结构建筑,需要设计出一种能够准确测试出其抗震性能的方法,在建筑达到抗震等级极限时发出预警,使人们的生命财产安全得到保障。

(1) 首先对建筑进行弹性分析。

(2) 根据建筑的尺寸及配筋,计算梁、柱的弯矩、剪力和延性,将计算结果与弹性分析得到的梁、柱内力相结合,判断建筑的梁、柱抗地震破坏情况。

(3) 将建筑的每个半层切开一个断面,断面中每根柱子上都会连接着与梁或者柱接头的节点。通过这个节点可以判断梁、柱之间的抗震破坏先后顺序,运用结构运动方程求解梁、柱破坏时所承担的剪力及延性比。

(4) 利用各半层的剪力强度与弹性分析层剪力,计算当前半层的地面运动加速度。

(5) 利用当前半层的综合延性比,求得建筑的地震折减系数,将其与地面运动加速度做乘法运算,求得当前建筑半层的抗震能力,将其与其他半层的抗震能力进行对比,其中最小的抗震能力值是建筑的抗震性能参数。混凝土结构建筑的安全侧移值如表 1 所列。

混凝土结构建筑的性能水平描述如表 2 所列。

表 1 与建筑不同性能水平相对应的侧移角容许值

Table 1 Allowable values of drift angles corresponding to different performance levels of buildings

性能水平	建筑正常使用	建筑暂时使用	存在安全威胁	建筑趋于倒塌
剪切斜压破坏侧移角容许值	1/325	1/85	1/50	1/45
弯曲破坏侧移角容许值	1/500	1/160	1/80	1/50

表 2 混凝土结构建筑性能水平

Table 2 Performance levels of concrete structurebuilding

性能水平	现象描述	破坏程度	可否修复
建筑正常使用	梁柱基本完好;没有裂缝出现;建筑刚度未降低,处于弹性工作阶段	基本完好	无需修复
建筑暂时使用	墙体形成裂缝;框架主体梁柱未发生大规模破坏,仍可保持固有刚度,处于弹性工作阶段末期;	轻微破坏	修复容易
生命安全	墙体与框架脱落;新生裂缝较多;承载力达到最大值;混凝土保护层轻微脱落;	严重破坏	修复困难
建筑趋于倒塌	混凝土脱落;丧失大部分刚度;大部分构件遭到破坏;不适合人类居住;	临近倒塌	不可修复

3 测试实验结果及分析

3.1 实验环境

为验证基于数学去噪后模拟地震信号测试混凝土结构抗震性能的研究的有效性,在振动台上进行模拟实验。实验中将混凝土结构建筑试件作为实验样本,在振动实验台上对样本进行地震动力反应实验,通过振动实验台的台面对样本输入地震波,模拟地震对样本作用的过程,反映混凝土结构建筑的抗震性能。

混凝土结构建筑试件需要满足如下条件:

(1) 试件应满足原混凝土结构建筑的物理、力学、几何以及边界等相似条件。

(2) 试件尺寸要根据实验要求和现有设备设计。

(3) 当试件是建筑的柱或墙时,试件的上部荷载重量应为竖向外力。

(4) 当试件是构件时,同类构件应大于等于两个。

(5) 模拟的静力和动力实验试件与原型结构应符合相似关系。

当混凝土结构建筑试件满足上述条件时,开始进行混凝土结构建筑抗震性能的测试。为了准确测试混凝土结构建筑的抗震性能,所提方法首先利用小波分析方式,将获取到的模拟地震信号进行了噪声消除处理,然后采用基于数学去噪后模拟地震信号的混凝土结构抗震性能测试方法,对混凝土结构建筑抗震性能进行测试。

3.2 去噪的模拟地震信号选取与调试

为了验证地震信号噪声去除对混凝土结构建筑抗震性能测试的影响,对噪声去除前后的抗震性能测试准确率进行对比,这里的准确率是指计算机模拟得到的抗震性能测试结果与实际抗震性能结果相比的正确程度,即最大弹性反应数值模拟结果与实际结果的对比,实际抗震性能结果参照以往地震相关资料测试结果。利用图 1(a)描述含噪声地震信号,利用图 1(b)描述噪声去除后地震信号。

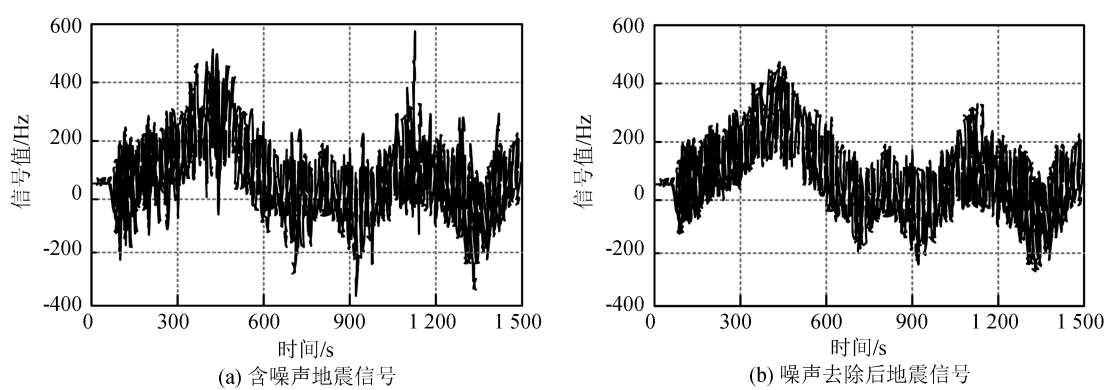


图 1 噪声去除前后信号形式对比图

Fig.1 Comparison between signal forms before and after denoising

由图 1 可知,对地震信号进行去噪可以将地震信号中的无用信息过滤掉,使地震信息的表现情况比去噪前更清晰。

钢筋与混凝土均属于弹塑性建筑材料,当施加荷载使建筑材料处于塑性阶段时,去除荷载后会给材料带来无法恢复的变形。从荷载出现到消失,混凝土建筑会形成弯曲位移。图 2 给出了建筑位移与强度折减系数之间的关系。

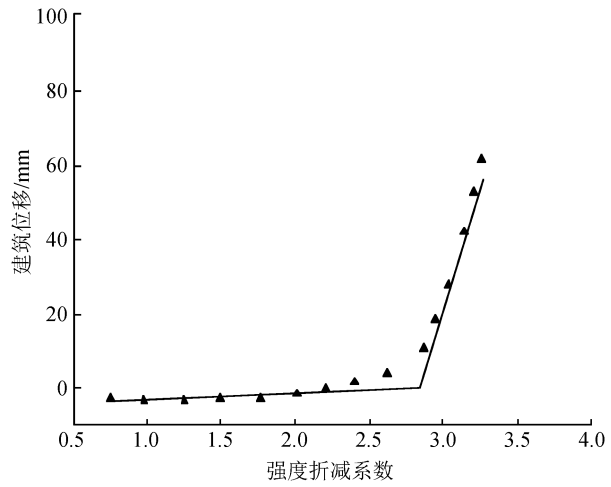


图 2 建筑位移与强度折减系数关系

Fig.2 Relationship between building displacement and strength reduction coefficient

分析图 2 可知,强度折减系数从 0.75 开始逐渐增加,在强度折减达到 2.5 之前,建筑位移随强度折减系数的增大缓慢增加,建筑位移与强度折减系数之间基本呈线性比例变化,说明在这一阶段,混凝土建筑属于弹塑性形变,可以继续承受荷载。当强度折减系数大于 2.7 时,混凝土建筑位移的变化趋势急剧增加,说明此时的混凝土建筑出现刚性形变,混凝土建筑材料开始出现脱落现象,容易形成坍塌。

对地震信号去噪前与去噪后的混凝土结构建筑抗震性能测试效果进行对比,分析利用本文方法模拟得到最大弹性反应数值与实际结果差异,进而得出本文方法的测试准确率。具体对比结果如表 3 所列。

表 3 混凝土结构建筑抗震性能测试效果对比

Table 3 Comparison between seismic performance test results of concrete structure buildings

样本量 /个	地震数据采样 周期/(s/次)	抗震性能测试准确率/%	
		地震信号去噪前	地震信号去噪后
300	30	93.65	98.64
600	30	93.87	98.75
900	30	93.92	98.92
1 200	30	94.15	99.17
1 500	30	94.23	99.45

由表 3 可知,混凝土结构建筑的地震数据采样周期为 30 s/次,采样数据量越多,混凝土结构建筑的抗震性能测试准确率就越高,且地震信号去噪后的混凝土结构建筑抗震性能的测试准确率要比地震信号去噪前好很多。当地震信号的样本量为 600 时,去噪前的混凝土结构建筑抗震性能测试准确率是 93.87%,去噪后的混凝土结构建筑抗震性能测试准确率是 98.75%;当地震信号的样本量为 1 200 时,去噪前的混凝土结构建筑抗震性能测试准确率是 94.15%,去噪后的混凝土结构建筑抗震性能测试准确率是 99.17%。地震信号去噪前,混凝土结构建筑抗震性能测试准确率的平均水平为 93.96%,地震信号去噪后,准确率的平均水平为 98.99%,两者相差 5.03%。上述数据充分说明,本文所提方法可以实现对混凝土结构建筑抗震性能的测试,并且准确率非常高。

4 结论

为了准确测试混凝土结构建筑的抗震性能,提

出了一种基于数学去噪后模拟地震信号的混凝土结构抗震性能测试方法,并对所提方法的有效性进行了验证。首先运用小波变换对模拟地震信号进行去噪处理,得到混凝土结构测试的输入波,再运用结构运动方程可以计算出地震的位移、速度、加速度以及恢复力等参数,再通过强度折减系数得出建筑结构半层的抗震能力,最后通过实验验证了本文所提方法测试混凝土建筑结构抗震能力的有效性。

实验结果证明所提方法对混凝土结构建筑的抗震性能的测试效果较好,较以前方法有所提高。

参考文献(References)

- [1] 周浩,李杰.基于不同本构模型的混凝土结构地震倒塌对比分析[J].建筑结构学报,2016,37(9):8-18.
ZHOU Hao, LI Jie. Comparison Study on Seismic Collapse of Concrete Structures with Different Constitutive Models[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(9): 8-18.
- [2] 付建.随机振动下大跨度钢管混凝土柱结构抗震性能测试方法[J].地震工程学报,2018,40(2):241-245.
FU Jian. Research on Seismic Performance Testing Method of Long-span Concrete-filled Steel Tubular Columns under Random Vibrations[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(2): 241-245.
- [3] 王成,王若雨.钢筋混凝土结构综合抗震能力评价[J].山西建筑,2017,43(2):54-56.
WANG Cheng, WANG Ruoyu. The Synthetic Evaluation of Seismic Capacity of Reinforced Concrete Structures[J]. Shanxi Architecture, 2017, 43(2): 54-56.
- [4] 余大新,耿冠世.利用背景噪声估计华北地区场地放大效应[J].地震工程学报,2017,39(4):719-724.
YU Daxin, GENG Guanshi. Estimation of Site Amplification Effect in North China from Ambient Seismic Noise[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(4): 719-724.
- [5] 芦苇,赵冬,王玉兰.基础刚度对砖石古塔地震响应影响研究[J].地震工程学报,2016,38(4):498-503.
LU Wei, ZHAO Dong, WANG Yulan. Impact of Foundation Stiffness on the Seismic Response of Ancient Masonry Pagoda [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(4): 498-503.
- [6] 梁岩,李杰,罗小勇,等.锈蚀钢筋混凝土构件抗震动力性能研究[J].振动工程学报,2016,29(1):140-147.
LIANG Yan, LI Jie, LUO Xiaoyong, et al. Study on Anti-seismic Dynamic Property of Corroded Reinforced Concrete Member[J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(1): 140-147.
- [7] 伊波松,杨勇,刘如月,等.屈曲中心支撑加固钢筋混凝土框架结构抗震性能试验研究[J].工业建筑,2016,46(4):8-11,17.
YI Bosong, YANG Yong, LIU Ruyue, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Concrete Frame Reinforced with Concentric Buckling-restrained Braces[J]. Industrial Construction, 2016, 46(4): 8-11, 17.
- [8] 马军卫,潘金龙,尹万云,等.全装配式钢筋混凝土框架-剪力墙结构抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2017,38(6):12-22.
MA Junwei, PAN Jinlong, YIN Wanyun, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Wholly Precast RC Frame-Shear Wall Structure[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(6): 12-22.
- [9] 黄维,钱江,周知.考虑混凝土不同约束效应的型钢混凝土柱抗震性能模拟研究[J].工程力学,2016,33(5):157-165.
HUANG Wei, QIAN Jiang, ZHOU Zhi. Numerical Simulation of the Seismic Performance of Steel Reinforced Concrete Columns with Various Confinement Effect[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(5): 157-165.
- [10] 刘程炜,曹万林,董宏英,等.半装配式再生混凝土低矮剪力墙抗震性能试验[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(6):35-39.
LIU Chengwei, CAO Wanlin, DONG Hongying, et al. Test on Seismic Behavior of Semi-assembled Low-rise Recycled Concrete Shear Walls[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(6): 35-39.
- [11] 熊清清,陈志华,陈敖宜,等.外包钢框架的预制 EPS 混凝土墙板抗震性能试验研究[J].地震工程与工程振动,2016,36(6):64-71.
XIONG Qingqing, CHEN Zhihua, CHEN Aoyi, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of the Prefabricated EPS Concrete Wallboard with Steel Frame[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2016, 36(6): 64-71.