

自复位钢桁框的强度折减系数概率模型

刘艳芝¹, 蓝雅云¹, 颜阳^{2*}, 柯珂³

(1. 湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082; 2. 中铁上海设计院集团有限公司, 上海 200070;
3. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 为提高钢桁框体系的抗震可恢复性, 提出了自复位钢桁框体系的概念, 并研究了其在脉冲地震下的强度折减系数。以等效单自由度体系表征具有三折线滞回特征的钢桁框体系, 选取182条脉冲型地震动对等效单自由度体系进行非线性动力分析, 得到一个包含约6 022万个强度折减系数的数据库, 揭示了不同滞回参数和脉冲型地震动对强度折减系数的影响规律。此外, 借助BP神经网络拟合强度折减系数在地震下的对数正态分布模型参数, 并建立了基于概率的钢桁框体系强度折减系数模型。结果表明所提出的模型具有较高的准确性。

关键词: 抗震可恢复性; 自复位; 桁框结构; 强度折减系数; 非线性动力分析; BP神经网络

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)03-0022-10

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20230927002

Probability Model for Strength Reduction Factors of Self-centering Steel Truss Moment Frames

LIU Yanzhi¹, LAN Yayun¹, YAN Yang^{2*}, KE Ke³

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. China Railway Shanghai Design Institute Group Co., Ltd., Shanghai 200070, China; 3. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

*Corresponding author: yanyang@sty.sh.cn

Abstract: In order to improve the seismic resilience of steel truss moment frame systems, the concept of self-centering steel truss moment frame system is proposed. The study focuses on the strength reduction factor of self-centering steel truss moment frame systems under pulse-like ground motions. The behavior of steel truss moment frame system with trilinear hysteretic rules is well studied using an equivalent single-degree-of-freedom (ESDOF) system. Nonlinear dynamic analysis are conducted on the ESDOF system with various hysteretic parameter combinations under 182 pulse-like ground motions, resulting in a database containing 60.22 million strength reduction factors. The study explores the influences of different hysteretic parameters and pulse-like ground motions on the strength reduction factor. Furthermore, the parameters of the log-normal distribution models for the strength reduction factors under earthquakes are fitted using BP neural networks. A probability-based model for the strength reduction factor of the self-centering steel truss frame system is established. The results demonstrate the accuracy of the proposed model.

Keywords: seismic resilience; self-centering; truss moment frame; strength reduction factor; nonlinear dynamic analysis; BP neural network

收稿日期: 2023-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(52178111)

作者简介:

刘艳芝(1982—), 女, 博士, 副教授, 主要从事新型钢结构与组合结构节点性能方面的研究。E-mail: liuyanzhi@hnu.edu.cn。

蓝雅云(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事钢桁框抗震方面的研究。

通信作者:

颜阳(1987—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事大跨钢结构方面的工作。E-mail: yanyang@sty.sh.cn。

钢桁框结构在建筑工程中被广泛应用,它具有显著的优点:用钢量少,经济性高,并且能够充分利用建筑空间,有利于内部空间的灵活布置。然而研究表明^[1],传统钢桁框结构在地震作用下桁架主梁斜腹板易发生屈曲,导致整体结构的刚度和强度急剧下降。为改善传统钢桁框结构耗能能力差、延性不足这一问题,GOEL等^[2]和BASHA等^[3]提出了延性桁框结构的概念,通过在桁架梁中设置剪切型耗能段,使钢桁框结构在地震作用下具有良好的非弹性响应和稳定的滞回特性。近年来,关于钢桁框结构的研究大多以提高结构延性和耗能能力为主,提出了空腹式、X形弱腹杆式、防屈曲支撑式等多种耗能形式的延性桁框结构^[4-8]。当仅追求钢桁框的延性与耗能能力时,震后结构的残余变形虽有所减小,但在结构功能快速恢复方面仍存在不足。

为提高结构的抗震可恢复性,有学者提出了自复位钢结构体系^[9-10],自复位结构通过预应力装置或高性能材料提供恢复力,在震后回到初始位置,使结构残余变形显著减小。PEKCAN等^[11]提出在延性桁框结构中引入自复位装置,并通过结构案例论证了该设计的可行性。目前自复位结构的实现手段主要是基于形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)或预应力(post-tensioned, PT)钢绞线^[12-13]。用于结构抗震时SMA的自复位能力主要来源于超弹性,即在荷载作用下材料发生马氏体相变并产生非线性变形,且在预期变形范围内卸载可完全恢复变形;PT钢绞线则提供初始预应力,在受到张拉后表现出良好的复位能力。虽然二者的实现手段不同,但可结合起来使用,有利于进一步提高结构的抗震可恢复性。

现行抗震设计规范采用强度折减系数来考虑结构在强震作用下的非弹性阶段,因此强度折减系数是抗震设计中的关键指标,对于结构的安全性具有重要意义。为确定各因素对强度折减系数的影响规律,国内外学者进行了大量研究。NEWMARK等^[14]首先提出单自由度体系的强度折减系数主要受延性系数和结构周期的影响;后续的研究表明^[15-16],强度折减系数同样对地震类型、滞回参数敏感。目前国内外对于强度折减系数的研究大多基于传统滞回模型^[17-18],例如理想弹塑性模型、双折线模型、旗形滞回模型等。当传统的滞回模型不能对结构进行精确设计和分析时,描述结构的非线性对滞回模型的精确性提出了更高要求,而现阶段较缺乏针对复杂结构建立精确滞回模型的强度折减系数研究。

本文通过在钢桁框节点区引入PT钢绞线与SMA棒,形成混合自复位节点,提出了自复位钢桁框体系的概念。通过研究自复位钢桁框在地震作用下的滞回响应,重点分析了抗震设计关键指标——强度折减系数 R 。使用等效单自由度(equivalent single-degree-of-freedom,

ESDOF)体系来表征自复位钢桁框,选取182条脉冲型地震动作为激励,对等效单自由度体系进行非线性动力分析,获得了包含6 022万个强度折减系数的数据库。在统计分析基础上,揭示了不同归一化周期 T/T_p (即结构周期 T 与脉冲周期 T_p 的比值)和滞回参数组合下强度折减系数的变化规律。通过分析强度折减系数在182条地震动下的概率密度分布,采用对数正态分布进行拟合,并以BP神经网络为工具,建立了强度折减系数对数正态分布的概率预测模型。

1 自复位钢桁框概念及滞回特性

1.1 自复位钢桁框概念

自复位钢桁框在钢桁框桁架梁的节点区配置PT钢绞线与SMA棒,构成自复位耗能梁段,其余非耗能段的桁架梁和柱构成主结构,如图1a)所示。混合自复位节点的构造如图1b)所示,其主要部件包括T形件、PT钢绞线、SMA棒和螺栓等。节点通过T形件与PT钢绞线进行弦杆和腹杆之间的连接,用高强度螺栓将弦杆翼缘与T形件紧固,其中弦杆翼缘设有长圆螺栓孔,用来实现与T形件之间的相对滑动,从而为节点提供摩擦耗能;SMA棒贯穿于T形件与弦杆锚固板的预设孔洞,用于实现自复位和耗能;PT钢绞线通过施加预压力加强节点的初始刚度,并在节点发生转动后提供自复位能力。自复位耗能梁段的工作原理是将弦杆的区段集中弯矩塑性耗能转化为节点构件的耗能行为。钢桁框呈现出多重耗能的特点,当结构受到地震作用时,T形件与弦杆翼缘之间的滑动摩擦在节点间隙打开时被触发,进入摩擦耗能阶段;随着地震作用加大,SMA棒的拉应力诱发其进入马氏体相变阶段,产生非线性变形,SMA棒与T形件协同耗能。当外力卸载时,PT钢绞线与SMA棒共同形成双重恢复力机制,使钢桁框恢复到初始位置。整个变形过程中,钢桁框结构的损伤集中在混合自复位节点,主结构基本保持弹性,便于震后结构功能的快速恢复。

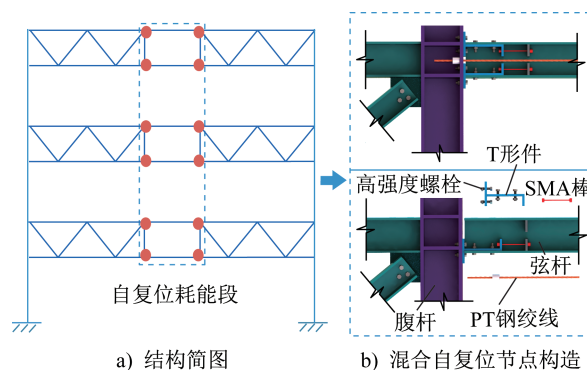


图1 自复位钢桁框结构

Fig. 1 Self-centering steel truss moment frame

1.2 自复位钢桁框的滞回特性

基于自复位钢桁框在地震作用下依照时序先后耗能并复位的特性,将其等效为具有三折线滞回特征的单自由度体系。虽然钢桁框属于多自由度体系,但许多研究表明将其简化为单自由度体系已能够满足精度要求。自复位钢桁框的理想滞回模型如图2所示,其中 μ 为延性系数, F_y 为弹塑性体系屈服承载力, $0\sim\delta_1$ 为初始弹性阶段, $\delta_1\sim\delta_2$ 为摩擦阶段, $\delta_2\sim\delta_3$ 为相变阶段。滞回模型的关键参数如下: K 为初始刚度; α_1 、 α_2 分别为第一屈服后刚度比和第二屈服后刚度比; δ_1 为第一屈服位移,表示T形件开始发挥摩擦耗能时的结构位移; δ_2 为第二屈服位移,即SMA棒发生相变时的结构位移; ζ 为屈服位移比,即第二屈服位移与第一屈服位移的比值; β 为能量耗散系数。通过对滞回参数合理取值,可实现结构自复位能力与耗能能力的平衡。混合自复位节点的试验滞回曲线^[19]与理想化模型如图3所示,试验曲线呈现出明显的三折线特征,表明节点充分发挥了耗能能力;同时观察到试验结果与理想化模型之间存在良好的一致性,证明了使用理想化模型能够准确描述配置混合自复位节点的钢桁框的滞回性能。

理想滞回模型的三折线骨架曲线如式(1)所示:

$$F = \begin{cases} K\delta & \delta \leq \delta_1 \\ \alpha_1 K\delta + (1 - \alpha_1)K\delta_1 & \delta_1 < \delta \leq \delta_2 \\ \alpha_2 K\delta + (\alpha_1 - \alpha_2)K\delta_2 + (1 - \alpha_1)K\delta_1 & \delta_2 < \delta \leq \delta_3 \end{cases} \quad (1)$$

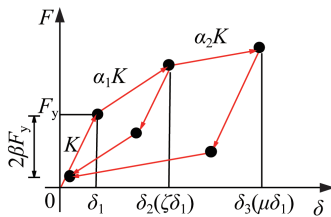


图2 ESDOF的滞回模型

Fig. 2 Hysteretic model of ESDOF

1.3 自复位钢桁框的强度折减系数

为了探究自复位钢桁框的抗震性能,以三折线滞回模型下的ESDOF体系为研究对象。根据CHOPRA^[20]提出的标准化方法,将具有三折线滞回特征的ESDOF体系的运动方程归一化如下:

$$\ddot{\mu}_s + 2\xi\omega\dot{\mu}_s + \omega^2\bar{F}(\mu, 1, \zeta, \alpha_1, \alpha_2, \beta) = -\omega^2 R \frac{\ddot{\delta}_g}{S_a} \quad (2)$$

式中: $\dot{\mu}_s$ 和 $\ddot{\mu}_s$ 分别为标准化速度和标准化加速度; ξ 为阻尼比; ω 为圆频率; S_a 为伪加速度; \bar{F} 为标准化恢复力; R 为强度折减系数。

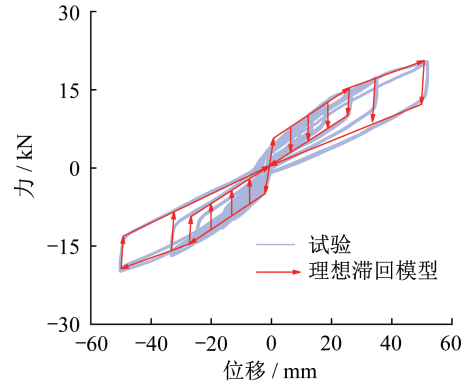


图3 混合自复位节点试验曲线与理想滞回模型

Fig. 3 Hybrid-self-centering connection test curve and idealized hysteretic model

R 作为抗震设计的关键指标,从承载力角度关联了弹性单自由度体系与弹塑性单自由度体系,定义如下:

$$R = \frac{F_c(T, \xi)}{F_y(T, \zeta, \alpha_1, \alpha_2, \mu, \beta)} \quad (3)$$

式中: F_c 为弹性单自由度体系在地震动作用下所达到的最大力。

本文采用等延性谱分析法得到强度折减系数,步骤如下:首先结合结构周期与脉冲周期确定归一化周期及滞回参数,给定ESDOF体系的目标延性系数 μ ,通过假定强度折减系数对体系进行非线性动力分析,求解假定 R 下的延性系数,若所得的延性系数在目标值范围内,则输出 R 值,建立结构的等延性强度需求谱;若所得的延性系数不符合要求,则重新设定 R 值继续迭代直到实际延性系数等于目标延性系数。

2 地震动与滞回参数的选取

研究表明^[21],脉冲型地震动作用下结构将发生严重破坏。本文根据SHAHI等^[22]提出的基于小波变换的脉冲识别算法,从PEER NGA-West2数据库^[23]中选取182条速度脉冲型地震波。总体样本震级介于5.0~7.6级,断层距范围较广,为0.1~92.7 km,其中超过70%的地震动断层距小于20 km。阻尼比为5%时总体样本的加速度反应谱如图4所示。

由于配置混合自复位节点的钢桁框具有不同元件和材料,而结构的屈服后刚度系数 α_1 、 α_2 和能量耗散系数 β 取决于耗能构件的物理性质和布置方案,因此在不同情况下滞回参数取值不同。结合以往研究中滞回参数的取值,滞回参数的取值范围如表1所示。此外,研究^[24]发现归一化周期 T/T_p 可表征脉冲型地震动的冲击效应,并有效降低数据的离散性。因此本文采用 T/T_p 作为变量,范围选取为0.05~2.00,增量为0.05,以探究短周期至长周

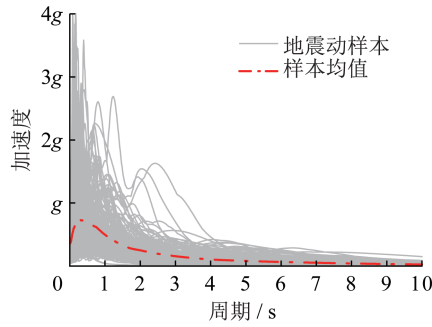


图4 地震动加速度反应谱

Fig. 4 Acceleration response spectrum of ground motions

期结构的地震响应。通过Matlab软件对具有不同归一化周期和滞回参数组合的ESDOF体系进行非线性动力分析,阻尼比为2%,共得到 $(2+4 \times 5) \times 40 \times 4 \times (22+21+19+17+15) \times 182 \approx 6\,022$ 万个强度折减系数。

表1 滞回参数取值

Table 1 Hysteretic parameter values

滞回参数	取值
ζ	4、5、6、7、8
α_1	0.1、0.3、0.5、0.7、0.9($\alpha_1 \geq \alpha_2$)
α_2	0.04、0.08、0.12、0.16、0.20
μ	4.5~15.0(增量为0.5,且 $\mu \geq \zeta$)
β	0.125、0.250、0.375、0.500

3 自复位钢桁框的强度折减系数谱分析

基于得到的强度折减系数数据库进行系统分析,研究不同滞回参数和脉冲型地震动对强度折减系数R的影响。

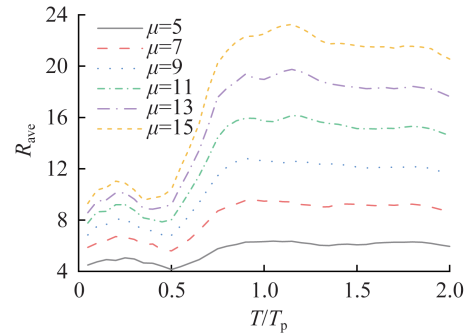
3.1 滞回参数及脉冲型地震动的影响

(1) 延性系数 μ 的影响

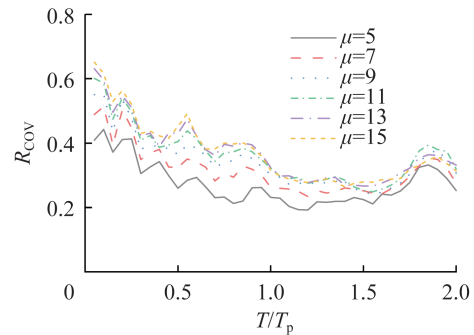
基于滞回参数组合为 $\zeta=4$ 、 $\alpha_1=0.5$ 、 $\alpha_2=0.08$ 、 $\beta=0.25$ 的ESDOF体系在182条脉冲型地震动下的强度折减系数谱,探讨 μ 对R的影响,如图5所示。强度折减系数均值 R_{ave} 响应如图5a)所示,当 $T/T_p < 1$ 时, R_{ave} 高度依赖于归一化周期; $T/T_p > 1$ 时, R_{ave} 趋于平缓;当 T/T_p 取定值时, μ 值越大 R_{ave} 越大。离散系数 R_{COV} 表示ESDOF体系在182条脉冲型地震动下R的离散程度,如图5b)所示,随着 μ 增大 R_{COV} 增大,表明 μ 的增大会使R的离散性增加。

(2) 第一屈服后刚度系数 α_1 的影响

滞回参数组合为 $\zeta=4$ 、 $\mu=8$ 、 $\alpha_2=0.08$ 、 $\beta=0.25$ 的ESDOF体系在脉冲型地震动下的R响应如图6所示。如图6c)所示,归一化 R_{ave} (即不同 α_1 对应的 R_{ave} 和 α_1 为



a) R_{ave} 均值响应



b) R_{COV} 离散性

图5 μ 对自复位钢桁框R的影响

Fig. 5 Effect of μ on R of self-centering steel truss moment frame

0.1时对应的 R_{ave} 之比,表示为 $R_{ave,\alpha_1}/R_{ave,\alpha_1=0.1}$),从图6a)、c)中可以看到: $T/T_p < 0.75$ 时 R_{ave} 随 α_1 增大而增大, $0.75 < T/T_p < 2.00$ 时 R_{ave} 随 α_1 增大而减小,同时 R_{ave} 随着 T/T_p 增大呈现出整体上升趋势。此外,当 α_1 较大时 R_{COV} 较小,如图6b)所示,表明 α_1 的增大使R的离散性降低。从图6a)中可以看到 $T/T_p=0.5$ 时 R_{ave} 值最小,为进一步了解 α_1 对自复位钢桁框在脉冲型地震动下滞回行为的影响,选取 $T/T_p=0.5$ 时ESDOF体系在地震动Coyote Lake下的滞回响应,如图6d)所示,滞回曲线呈现出明显的三折线特征。随着 α_1 增大,结构的最大位移减小,最大承载力显著提升。因此在结构设计时,应考虑 α_1 对结构承载力与位移的影响。

(3) 第二屈服后刚度系数 α_2 的影响

滞回参数组合为 $\zeta=4$ 、 $\mu=8$ 、 $\alpha_1=0.5$ 、 $\beta=0.25$ 的ESDOF体系在脉冲型地震动下的R响应如图7所示。由图7a)可知 α_2 对 R_{ave} 的影响并不显著,如图7c)所示,归一化 R_{ave} (即不同 α_2 对应的 R_{ave} 和 α_2 为0.04时对应的 R_{ave} 之比,表示为 $R_{ave,\alpha_2}/R_{ave,\alpha_2=0.04}$),更清晰地展示了 α_2 对 R_{ave} 的影响规律:当 $T/T_p < 0.4$ 时, R_{ave} 随着 α_2 增大而增大; $0.4 < T/T_p < 2.0$ 时, R_{ave} 随着 α_2 增大而减小。 α_2 对 R_{COV} 的影响总体较小,当 $0.5 < T/T_p < 1.5$ 时 α_2 对 R_{COV} 影响较为明显,随着 α_2 增大 R_{COV} 减小,如图7b)所示,表明 α_2 的增大使R的离散程度降低。 $T/T_p=0.5$ 时 α_2 对ESDOF体系在脉冲

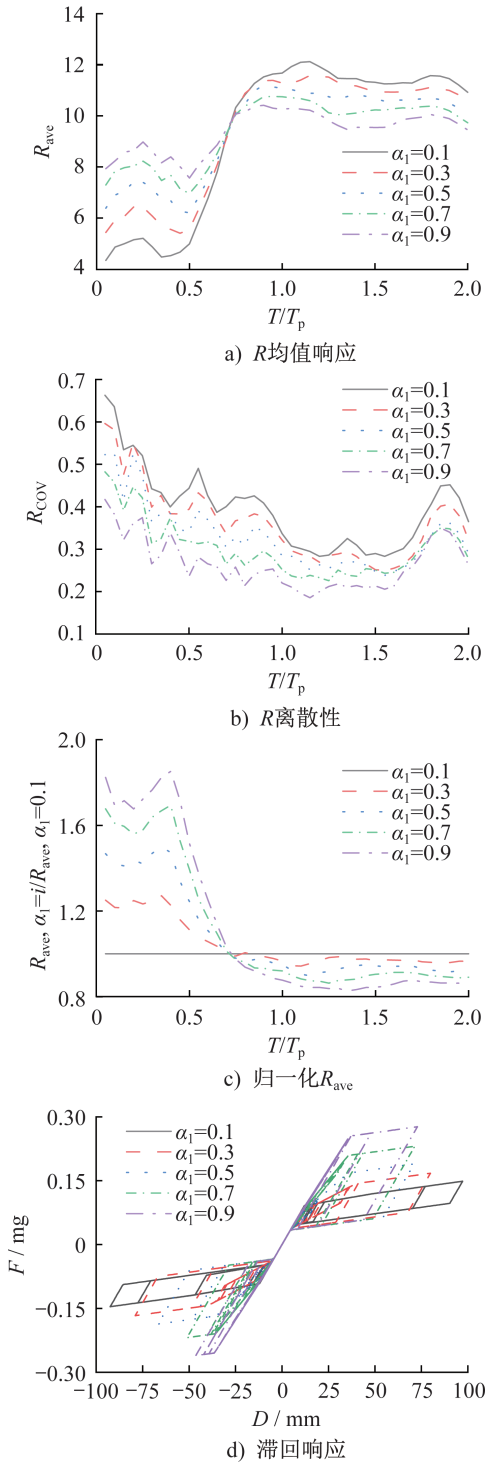


图6 α_1 对自复位钢桁框R及滞回行为的影响

Fig. 6 Effect of α_1 on R and hysteretic behaviour of self-centering steel truss moment frame

型地震动 Coyote Lake 下的滞回响应影响如图 7d) 所示, 可以发现当 α_2 增大时结构的最大承载力和最大位移也增大。

(4) 能量耗散系数 β 的影响

滞回参数组合为 $\zeta=4, \mu=8, \alpha_1=0.5, \alpha_2=0.08$ 的 ESDOF 体系在脉冲型地震动下的 R 响应如图 8 所示。

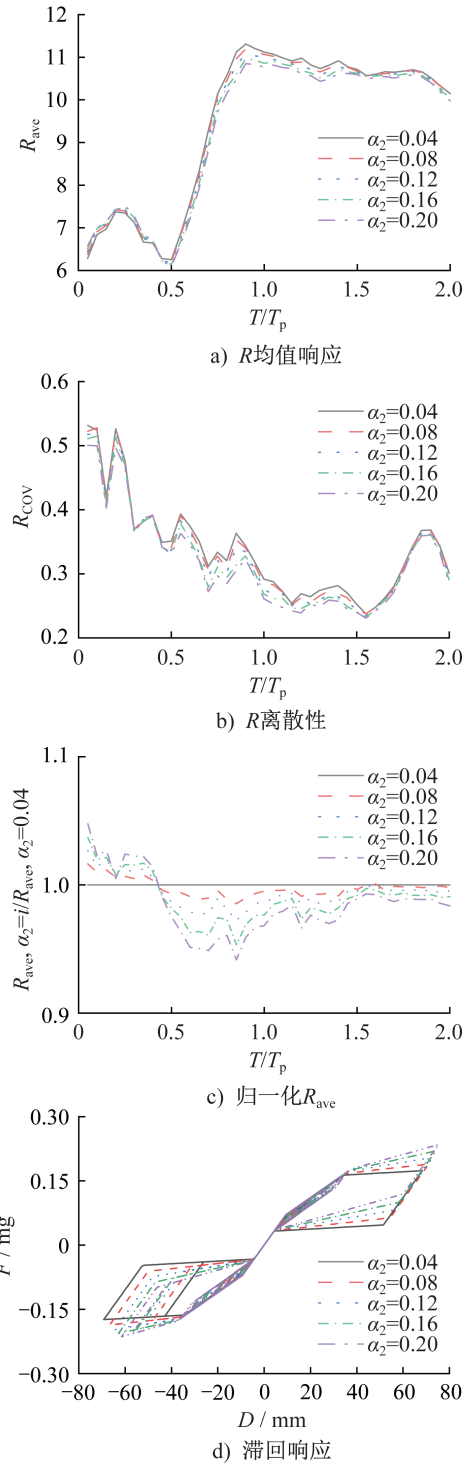


图7 α_2 对自复位钢桁框R及滞回行为的影响

Fig. 7 Effect of α_2 on R and hysteretic behaviour of self-centering steel truss moment frame

由图 8a) 可知 β 越大 R_{ave} 越大; 在离散性方面, 不同的 β 对 R_{COV} 的影响规律近乎一致, 如图 8b) 所示; 如图 8c) 所示, 归一化 R_{ave} (即不同 β 对应的 R_{ave} 和 β 为 0.125 时对应的 R_{ave} 之比, 表示为 $R_{ave,\beta}/R_{ave,\beta=0.125}$), 可以看到随着归一化周期增大, β 对于 R_{ave} 的影响程度逐渐减小。当 $T/T_p=0.5$ 时不同 β 的 ESDOF 体系在脉冲型地震动 Coyote

Lake下的滞回响应如图8d)所示,对比滞回曲线可以观察到:随着 β 增大结构的最大位移减小,最大承载力也减小。

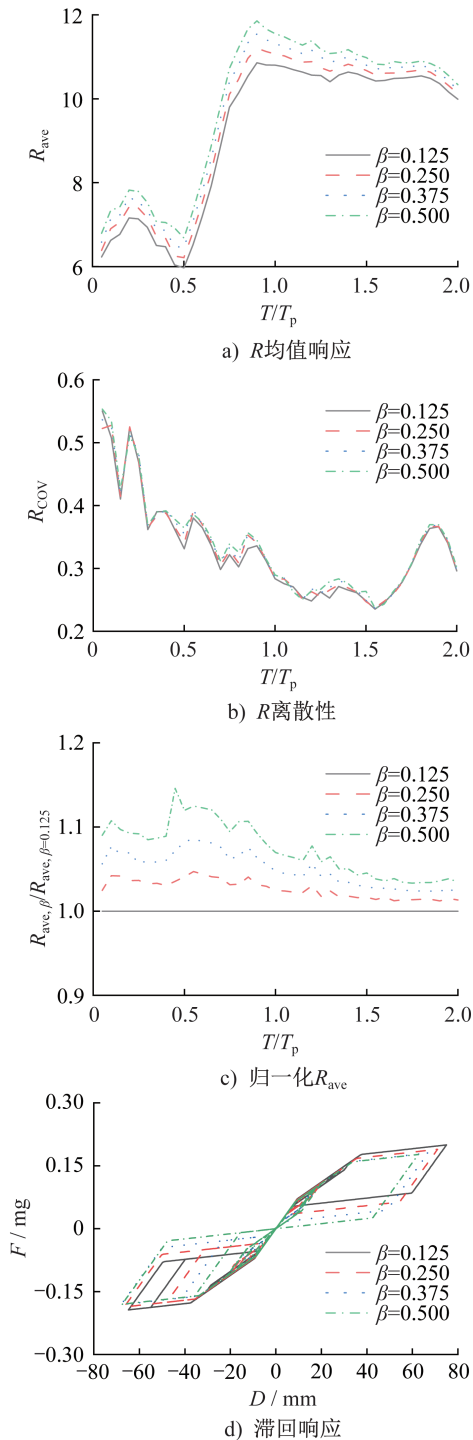


图8 β 对自复位钢桁框 R 及滞回行为的影响

Fig. 8 Effect of β on R and hysteretic behaviour of self-centering steel truss moment frame

(5) 屈服位移比 ζ 的影响

滞回参数组合为 $\mu=8, \alpha_1=0.5, \alpha_2=0.08, \beta=0.25$ 的ESDOF体系在脉冲地震动下的 R 响应如图9所示。由

图9a)可知 R_{ave} 随 ζ 增大而增大;由图9b)可知 ζ 对于 R 的离散性并无显著影响;如图9c)所示,归一化 R_{ave} (即不同 ζ 对应的 R_{ave} 和 ζ 为4时对应的 R_{ave} 之比,表示为 $R_{ave, \zeta} / R_{ave, \zeta=4}$),可以看到较大的 ζ 导致较大的归一化 R_{ave} ,随着 T/T_p 增加归一化 R_{ave} 整体变化不大; $T/T_p=0.5$ 时脉冲地震动Coyote Lake下 ζ 对结构的滞回影响如图9d)所示,可以得出:当 ζ 增大时,结构的最大承载力增大。

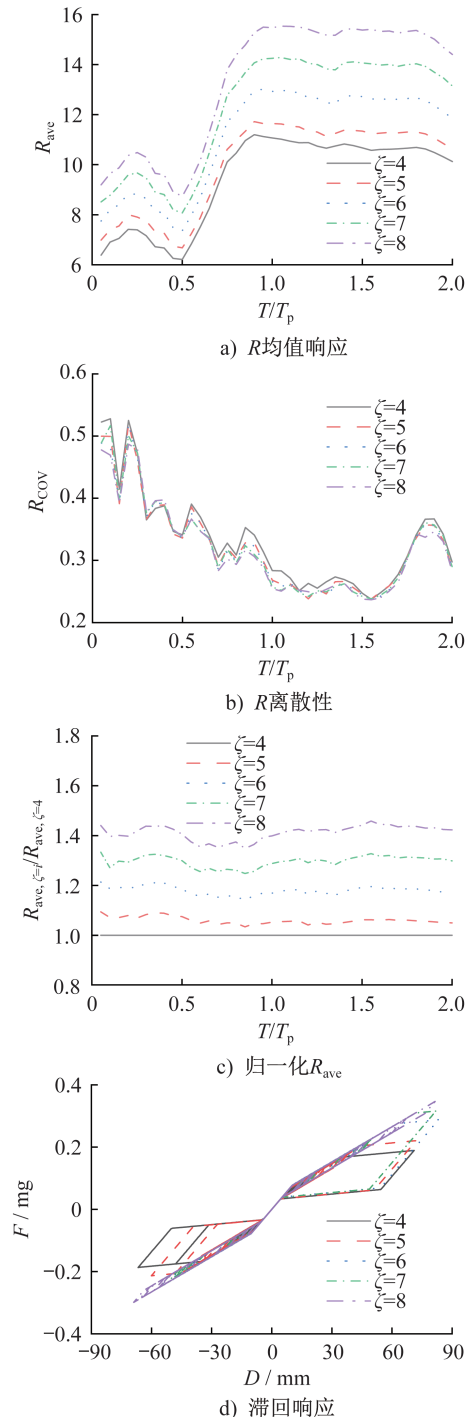


图9 ζ 对自复位钢桁框 R 及滞回行为的影响

Fig. 9 Effect of ζ on R and hysteretic behaviour of self-centering steel truss moment frame

(6) 脉冲型地震动的影响

为了独立评估脉冲型(pulse-like, PL)地震动对自复位钢桁框的影响,选取 KOHRANGI 等^[25]开发的包含 182 条谱等效普通(spectral-equivalent ordinary, SEO)地震动的集合与 PL 地震动形成对照。

选取滞回参数组合为 $\zeta=4, \alpha_1=0.5, \alpha_2=0.08, \beta=0.25, \mu=8$ 的 ESDOF 体系探究 PL 地震动对结构 R 值的影响。PL 地震动与 SEO 地震动下结构的 R_{ave} 响应如图 10a) 所示,可以看出 PL 地震动的 R_{ave} 明显小于 SEO 地震动的 R_{ave} ; 对于 R 离散性的影响,由图 10b) 可知相比于 SEO 地震动,整体上 PL 地震动下 R 的离散性更小。

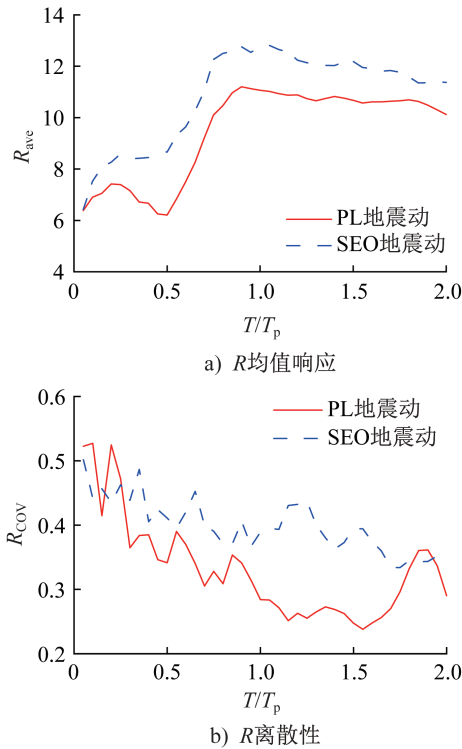


图 10 PL 地震动和 SEO 地震动对 R 的影响

Fig. 10 Influence of PL ground motion and SEO ground motion on R

3.2 强度折减系数概率谱模型

在抗震设计中,强度折减系数对于确定设计地震力起着关键作用,因此对其概率特征进行分析和评估是非常重要的。通过分析强度折减系数的概率特征,依据设计结构的重要程度选取相应概率,进而确定合适的强度折减系数,以此满足结构在给定概率下的安全性要求。

本文采用对数正态分布描述不同地震动下的 R 响应分布。对数正态分布的概率密度函数(probability density function, PDF)可表示为:

$$f(X, \rho, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma X} \exp\left[-\frac{(\ln X - \rho)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4)$$

式中: X 为变量 R ; ρ 和 σ 分别为变量 X 的对数均值及对数标准差。

选取滞回参数组合为 $\zeta=4, \alpha_1=0.5, \alpha_2=0.08, \beta=0.25$ 的自复位钢桁框的 ESDOF 体系,分别取归一化周期为 0.6、1.2、1.8 和延性系数为 6、10、14 对应的情况来绘制强度折减系数的代表性直方图以及 PDF 的拟合曲线,由图 11 可知 R 在 182 条脉冲型地震动下的概率密度分布与对数正态分布吻合较好,表明对数正态分布可以较为准确地描述 R 在不同地震动下的响应分布。

4 基于 BP 神经网络的 R 概率预测模型

4.1 BP 神经网络预测分析

本文采用 BP 神经网络分别对 R 概率密度函数的参数 ρ 和 σ 进行预测,每份样本总量均为 247 270 个,将样本的 75% 作为训练集,25% 作为测试集。训练集用于训练数据,进行参数学习,通过不断迭代训练集的样本达到模型优化;测试集用于评估训练结束的 BP 神经网络模型的性能;验证集用于模型的选择和参数调整。为了简化训练和验证的过程,避免对单一验证集的过度依赖,本模型中直接从训练集划分得到验证集,进行交叉验证。此外,模型采用均方根误差 e 和决定系数 R^2 评估数据的预测精度及模型的拟合能力和泛化性能。均方根误差和决定系数的计算式如下:

$$e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{X}_i - X_i)^2}{n}} \quad (5)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_i)^2} \quad (6)$$

式中: X_i 为测试数据; \hat{X}_i 为预测数据; \bar{X}_i 为测试集数据均值; n 为测试集数据总数。

本文建立的 BP 神经网络结构示意图如图 12 所示,输入层共有 6 个节点,分别是延性系数、第一屈服后刚度系数、第二屈服后刚度系数、能量耗散系数、屈服位移比和归一化周期;输出层为 1 个节点,即 R 对数均值或对数标准差;隐含层采用单隐层结构,包含 12 个神经元。在进行模型训练前,先对输入的数据进行归一化,消除数据之间的特征尺度差异。通过对样本进行训练,最终得到 ρ 和 σ 的相关性分析,如图 13 所示。图中 ρ 的相关系数 R 高达 0.999 36, σ 的相关系数 R 高达 0.983 56,可以看到线性回归曲线接近于输出值=目标值的曲线,这表明输出值与目标值之间具有较强的相关性。BP 神经网络通过构建有效的强度折减系数预测模型,准确地预测出 PDF 参数 ρ 和 σ 。

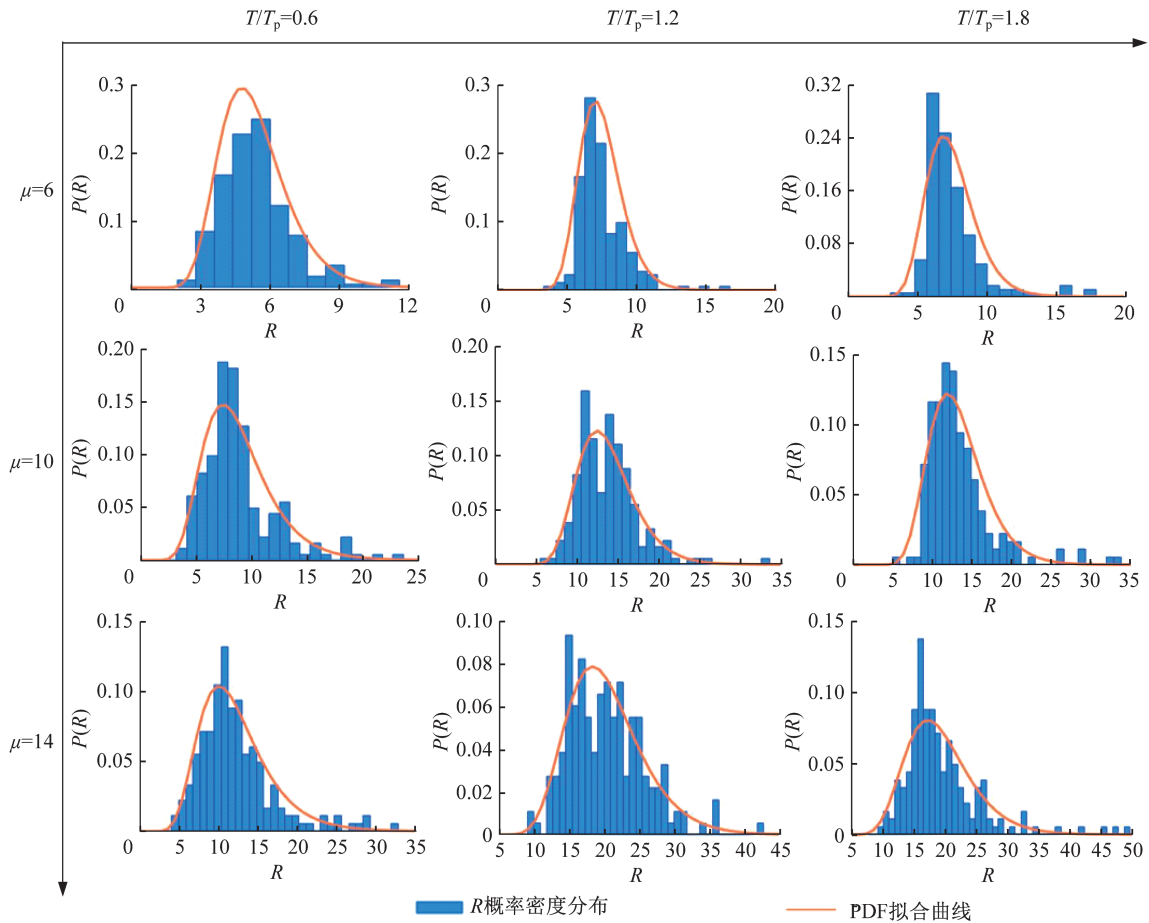


图 11 R 概率密度分布及 PDF 拟合曲线

Fig. 11 Probability density distribution of R and PDF fitting curves

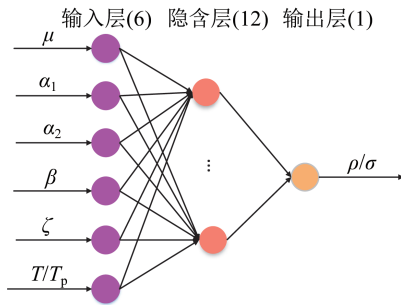


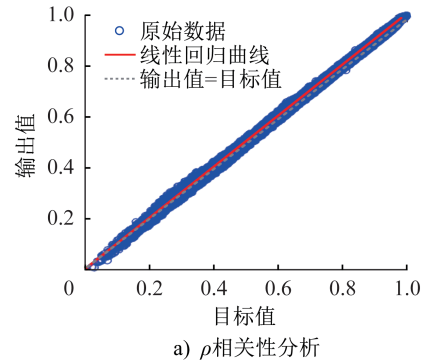
图 12 BP神经网络结构示意图

Fig. 12 BP neural network structure diagram

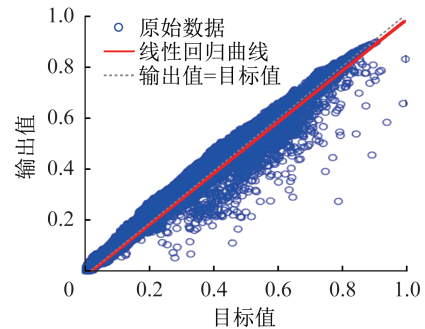
计算得到的均方根误差 e 与决定系数 R^2 体现了神经网络模型的拟合程度和预测能力,从表 2 中可以看出: ρ 和 σ 对应的 e 和 R^2 均小于 0.05 或大于 0.90,表明了采用神经网络算法训练得到的预测模型具有较高的准确性。

4.2 自复位钢桁框在 PL 地震动下的强度折减系数概率预测模型

基于前面的分析,本文通过 BP 神经网络建立了 R 的概率密度函数参数预测模型。进一步地,将概率密度函数进行积分,得到累积概率分布函数。结构设计中,可通



a) ρ 相关性分析



b) σ 相关性分析

图 13 PDF 参数相关性分析

Fig. 13 Correlation analysis of PDF parameters

表2 PDF参数对应的 R^2 和 e Table 2 R^2 and e corresponding to PDF parameters

PDF 参数	R^2		e	
	训练集	测试集	训练集	测试集
ρ	0.998 7	0.998 6	0.014 1	0.014 0
σ	0.967 4	0.967 7	0.016 7	0.016 6

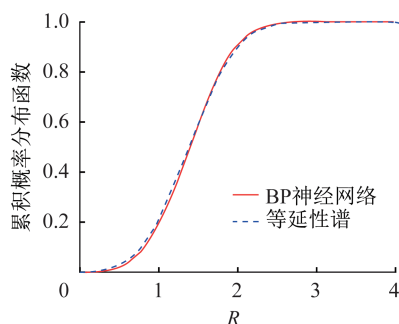
过考虑结构的重要性及所处环境选择预期的超越概率,分析累积概率分布函数得到预期超越概率对应的 R 值。

为检验 R 概率预测模型的准确性,随机选取滞回参数组合为 $\zeta=5, \alpha_1=0.1, \alpha_2=0.08, \beta=0.5, \mu=6, T/T_p=0.2$ 的ESDOF体系,分别通过BP神经网络预测模型和等延性反应谱法得到 ρ 和 σ ,将数据进行对比,如表3所示,二者数值相近,再次证明了BP神经网络模型的可靠性。对应的 R 累积分布曲线如图14所示,可知预测模型与等延性谱法得到的累积分布曲线具有较高的吻合度。

表3 预测值与有限元值对比

Table 3 Comparison of prediction and finite element results

PDF 参数	BP神经网络	等延性谱法
ρ	1.397 1	1.388 1
σ	0.459 9	0.477 9

图14 R 累积分布曲线Fig. 14 Cumulative distribution curve of R

5 结论

本文提出在钢桁框结构中配置混合自复位节点,使结构兼具多重耗能与复位性能。以等效单自由度体系表征自复位钢桁框,对体系进行动力反应谱分析,探究滞回参数及PL地震动对强度折减系数的影响。利用BP神经网络构建了结构强度折减系数概率预测模型。结论如下:

(1) 混合自复位节点具有先耗能后复位的三折线特征,其滞回曲线呈现出多阶段耗能、残余变形小的特点,体现了良好的耗能能力与自复位机制。因此在钢桁框中

配置混合自复位节点可提高其抗震可恢复性。

(2) 非线性谱分析表明强度折减系数对滞回参数和PL地震动敏感。其中, R 随 μ, β 和 ζ 增大而增大, α_1 和 α_2 对 R 的影响与 T/T_p 相关。同时, μ 与 α_1 对于 R 的离散性产生较大影响。相比于SEO震动,PL地震动下的 R 值更小, R 的离散性也更小。

(3) 采用BP神经网络可有效构建强度折减系数概率预测模型,根据预期的超越概率准确预测 R 值,可为自复位钢桁框的抗震设计和评估提供参考。

参考文献:

- [1] GOEL S C, ITANI A M. Seismic behavior of open-web truss-moment frames [J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(6): 1763-1780. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:6(1763).
- [2] GOEL S C, ITANI A M. Seismic-resistant special truss-moment frames [J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(6): 1781-1797. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:6(1781).
- [3] BASHA H S, GOEL S C. Special truss moment frames with Vierendeel middle panel [J]. Engineering Structures, 1995, 17(5): 352-358. DOI: 10.1016/0141-0296(95)00018-3.
- [4] 甘丹, 姚玉珊, 谭永超, 等. 两边连接钢板式延性钢桁框结构抗侧性能有限元分析 [J]. 建筑结构学报, 2018, 39(增刊2): 86-94. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.S2.013.
GAN Dan, YAO Yushan, TAN Yongchao, et al. Finite element analysis on special truss moment frames with two-sides connecting web plates subjected to lateral loads [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39 (Suppl. 2): 86-94. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.S2.013. (in Chinese)
- [5] ASLANI-AMOLI H O. Special truss moment frames (STMF) under combined gravity and lateral loads [M]. Ann Arbor: University of Michigan, 1998: 1-50.
- [6] GOEL S C, LEELATAVIWAT S. Seismic design by plastic method [J]. Engineering Structures, 1998, 20 (4/5/6): 465-471. DOI: 10.1016/S0141-0296(97)00147-8. DOI: 10.1016/S0141-0296(97)00147-8.
- [7] PEKCAN G, LINKE C, ITANI A. Damage avoidance design of special truss moment frames with energy dissipating devices [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(6): 1374-1384. DOI: 10.1016/j.jcsr.2008.08.012.
- [8] LINKE C. Damage avoidance design of special truss girder frames with energy dissipation devices [D]. Reno: University of Nevada, 2009.
- [9] 张国伟, 赵紫薇, 孙祚帅. 自复位结构抗震性能研究综述 [J]. 建筑结构, 2018, 48(增刊2): 463-470. DOI: 10.19701/j.jzjg.2018.S2.092.
ZHANG Guowei, ZHAO Ziwei, SUN Zuoshuai. Review on

- the seismic behavior of self-centering structure [J]. *Building Structure*, 2018, 48(Suppl.2): 463-470. DOI: 10.19701/j.zjzg.2018.S2.092. (in Chinese)
- [10] 邱灿星, 杜修力. 自复位结构的研究进展和应用现状[J]. *土木工程学报*, 2021, 54(11): 11-26. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2021.11.006.
- QIU Canxing, DU Xiuli. A state-of-the-art review on the research and application of self-centering structures [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2021, 54(11): 11-26. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2021.11.006. (in Chinese)
- [11] PEKCAN G, ITANI A M, LINKE C. Enhancing seismic resilience using truss girder frame systems with supplemental devices [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2014, 94: 23-32. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.10.016.
- [12] 钱辉, 徐艺文, 李宏男. 形状记忆合金自复位钢框架节点抗震性能数值模拟及参数分析[J]. *世界地震工程*, 2017, 33(3): 67-77.
- QIAN Hui, XU Yiwen, LI Hongnan. Numerical simulation and parameter analysis of seismic performance of self-centering steel frame joints with shape memory alloy tendons [J]. *World Earthquake Engineering*, 2017, 33(3): 67-77. (in Chinese)
- [13] 蔡小宁, 孟少平. 预应力自复位混凝土框架节点抗震性能数值模拟[J]. *工程力学*, 2016, 33(3): 143-151. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.08.0684.
- CAI Xiaoning, MENG Shaoping. Numerical analysis for seismic behavior of self-centering post-tensioned precast beam-to-column connections [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(3): 143-151. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.08.0684. (in Chinese)
- [14] NEWMARK N M, HALL W J. *Earthquake spectra and design* [M]. Berkeley: Earthquake Engineering Research Institute, 1982: 13-15.
- [15] AHMADI E, KHOSHNOUDIAN F. Near-fault effects on strength reduction factors of soil-MDOF structure systems [J]. *Soils and Foundations*, 2015, 55(4): 841-856. DOI: 10.1016/j.sandf.2015.06.015.
- [16] WU Y F, WANG H, LI A Q, et al. The strength reduction factors for seismic-isolated bridges characterized by SDOF bilinear systems in far-fault areas [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2019, 23(3): 404-421. DOI: 10.1080/13632469.2017.1326425.
- [17] LEE L H, HAN S W, OH Y H. Determination of ductility factor considering different hysteretic models [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1999, 28(9): 957-977. DOI: 10.1002/(sici)1096-9845(199909)28:9<957::aid-eqe849>3.0.co;2-k.
- [18] DONG H H, HAN Q, DU X L, et al. Strength reduction factor of self-centering structures under near-fault pulse-like ground motions [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2021, 24(1): 119-133. DOI: 10.1177/1369433220945055.
- [19] ZHANG H Y, ZHOU X H, KE K, et al. Hybrid self-centering connection employing energy dissipation sequences: experimental study and a structural seismic demand perspective [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2023, 149(11): 04023157. DOI: 10.1061/jsendh.steng-12306.
- [20] CHOPRA A K. *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering* [M]. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2001: 18-36.
- [21] 贾俊峰, 杜修力, 韩强. 近断层地震动特征及其对工程结构影响的研究进展 [J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(1): 1-12. DOI: 10.14006/j.zjgxb.2015.01.001.
- JIA Junfeng, DU Xiuli, HAN Qiang. A state-of-the-art review of near-fault earthquake ground motion characteristics and effects on engineering structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(1): 1-12. DOI: 10.14006/j.zjgxb.2015.01.001. (in Chinese)
- [22] SHAHI S K, BAKER J W. An efficient algorithm to identify strong-velocity pulses in multicomponent ground motions [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2014, 104(5): 2456-2466. DOI: 10.1785/0120130191.
- [23] ANCHETA T D, DARRAGH R B, STEWART J P, et al. NGA-west2 database [J]. *Earthquake Spectra*, 2014, 30(3): 989-1005. DOI: 10.1193/070913eqs197m.
- [24] RUIZ-GARCÍA J. Inelastic displacement ratios for seismic assessment of structures subjected to forward-directivity near-fault ground motions [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2011, 15(3): 449-468. DOI: 10.1080/13632469.2010.498560.
- [25] KOHRANGI M, VAMVATSIKOS D, BAZZURRO P. Pulse-like versus non-pulse-like ground motion records: spectral shape comparisons and record selection strategies [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2019, 48(1): 46-64. DOI: 10.1002/eqe.3122.