

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230710002

一种自复位摇摆墙的改进 Bouc-Wen 滞回模型*

苏 醒¹, 阎 石¹, 付江监¹, 孙祥磊²

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110068; 2. 中国石油华东设计有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要: Bouc-Wen 模型是一种可表征结构及构件刚度、强度退化等的多功能非线性光滑滞回模型, 可广泛应用于各类结构滞回行为的描述。自复位摇摆墙 (Self-centering rocking wall, SCRW) 结构由于其优越的抗震和自复位性能, 滞回曲线呈“旗帜型”。为了更好地表征这种“旗帜型”滞回特性, 在 Bouc-Wen 模型的基础上, 建立一种具有较高精度和较好实用性的改进 Bouc-Wen 滞回模型。改进的 Bouc-Wen 模型参数是决定结构滞回性能力学特征的关键。由于该模型参数众多且选择范围不明确, 为适应该类模型参数高效识别的需求, 通过在 MATLAB / Simulink 环境中搭建程序框图, 实现了对该理论模型控制参数的定性及定量分析, 并运用遗传算法对 10 个 SCRW 试验结果进行参数识别, 对识别结果进行统计分析, 建立各参数与滞回曲线关键点的关系式, 基于统计结果给出了各参数的建议取值范围; 最后, 通过 SCRW 拟静力试验对改进的滞回模型和参数取值范围进行了验证。结果表明: 这种单自由度改进的 Bouc-Wen 滞回模型能较好地反映 SCRW 在往复荷载作用下无残余变形和强度、刚度退化特点的“旗帜型”滞回特性。所提出的参数取值范围显著提升了改进 Bouc-Wen 模型的识别精度与效率, 识别过程对类似模型的参数识别具有参考价值。

关键词: 自复位摇摆墙; “旗帜形”滞回特性; 改进 Bouc-Wen 模型; 模型参数识别; 拟静力试验

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)01-0039-11

An Improved Bouc-Wen Hysteresis Model for Self-Centering Rocking Walls

SU Xing¹, YAN Shi¹, FU Jiangjian¹, SUN Xianglei²

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110068, China;

2. Petro China East China Design Co., Ltd., Qingdao 266000, China)

Abstract: The Bouc-Wen model is a multifunctional nonlinear smooth hysteresis model that can characterize the stiffness and strength degradation of structures and is widely used to describe the hysteresis behavior of various types of structures. Self-centering rocking wall (SCRW) structures have a “flag-shaped” hysteresis curve due to their superior seismic and self-centering performance. Aiming at characterizing the “flag-shaped” hysteresis characteristics, an improved Bouc-Wen hysteresis model with higher accuracy and better practicality is developed based on the Bouc-Wen model. The parameters of the improved Bouc-Wen model are the key to determining the mechanical characteristics of the structural hysteresis performance. Due to the large number of parameters with undefined selection ranges of this model, the qualitative and quantitative analyses are realized to meet the demand of efficient identification of the parameters of the theoretical model, by constructing a flow chart in the envi-

* 收稿日期: 2023-07-10; 修回日期: 2023-08-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0705602)资助

作者简介: 苏醒(1993—), 女, 博士研究生。主要从事可恢复功能结构方面的研究。E-mail: suxingxing@stu.sjzu.edu.cn

ronment of MATLAB / Simulink. Moreover, the genetic algorithm is applied to identify the parameters of 10 SCRW tests, and the identification results are statistically analyzed to establish the relationship between each parameter and the key point of the hysteresis curves. The suggested value ranges of each parameter are given based on the statistical results. Finally, the validation results of SCRW pseudo-static tests show that this single-degree-of-freedom improved Bouc-Wen hysteresis model can better reflect the “flag-shaped” hysteresis characteristics under repeated loading without residual deformation and strength-stiffness degradation. The proposed range of parameter values significantly improves the identification accuracy and efficiency of the improved Bouc-Wen model, and the identification process has a reference value for the identification of similar models.

Keywords: self-centering rocking wall (SCRW); “flag-shaped” hysteresis characteristics; improved Bouc-Wen hysteresis model; parameter recognition; pseudo-static test

0 引 言

摇摆结构是一种典型的韧性结构,如摇摆框架^[1]和框架-摇摆墙^[2]结构等。通过设置后张预应力筋^[3-4](图 1(a))和在摇摆界面处设置耗能装置^[5-6],形成“旗帜形”的滞回曲线(图 1(b)),其特点是在震后能够实现极小的残余变形,具有良好的自复位和耗能性能,符合近年来所提出的韧性结构的理念^[7-8]。准确地反映该“旗帜型”结构的力学行为需要考虑多种因素,包括结构(或构件)消压时“起摇点”的力学描述、摇摆界面“开合效应(呼吸效应)”带来的接触非线性、摇摆体自身弹塑性变形的影响以及体现自复位能力的残余变形等。建立能够反映该“旗帜型”滞回特性的非线性滞回模型,是准确且有效地预测其在强震作用下地震响应的基础。

目前,已经具有多种可用来模拟非线性滞回性能的滞回模型,根据光滑程度可以分为折线型滞回模型和曲线型滞回模型。折线型滞回模型主要采用线段直观描述滞回曲线的加卸载规律,如 Takeda 三折线模型^[9]、Clough 模型^[10]等。折线型滞回模型存在刚度变化不连续、程序实现不方便等缺点。相比之下,曲线型滞回模型的刚度变化连续且易于程序化。1967年,R.Bouc^[11]首先提出了用微分形式的数学模型来模拟滞回非线性系统,即 Bouc 模型。1976年,Y.K.Wen^[12]改进了 Bouc 模型,建立了用于结构随机振动分析的曲线型滞回模型,称为 Bouc-Wen 模型,其在表征和模拟结构复杂滞回行为上具有强大的适应性,为各种消能减震结构及构件滞回模型研究提供了有价值的参考,但模型存在以下两点不足:(1)无法准确反映结构及构件的刚

度、强度退化过程;(2)不能反映构件的捏拢特性。为建立更为准确的连续型滞回模型,许多学者致力于对 Bouc-Wen 模型进行改进,以实现构件滞回特性的准确表征。吕大刚等^[13]在传统的 Bouc-Wen 模型中引入捏缩函数,提出了一种可以考虑材料捏缩行为的改进 Bouc-Wen 模型,并将该模型引入到 OpenSees 软件平台中,对抗震性能进行了研究。郭玉荣等^[14]利用 Park-Ang 损伤模型对 BWBN 模型进行修正,提出变轴力足尺柱的恢复力模型。而上述模型的目的是为了改进 Bouc-Wen 材料在 OpenSees 平台中的二次开发,并应用该材料定义完成结构的数值建模。徐亚洲等^[15]基于近似狄拉克 δ 函数提出了一种新的改进 Bouc-Wen (MBW) 模型对预制 RC 桥墩的滞回性能进行描述,但该模型存在函数复杂、参数太多的问题,导致其计算效率较低。吴克川等^[16]根据防屈曲支撑的恢复力特性及滞回曲线的特点,提出了一种能更好地模拟防屈曲支撑材料塑性硬化及力学参数非对称性特点的改进 Bouc-Wen 模型,但上述模型并不能体现出无残余变形且“双旗形”的 SCRW 特有的滞回特征。牛健^[17]为了描述 SMA 材料的双旗形滞回特性,在充分考虑 SMA 独特的超弹性特性和自恢复特点情况下,将 Bouc-Wen 模型表达式中加入阶跃函数对其进行修正,得到阶跃 Bouc-Wen 模型。但该文献强调滞回特性的描述,并未对模型参数进行量化讨论,也没有给出具体的模型参数取值建议。

本文提出一种可以描述自复位摇摆墙(Self-centering rocking wall, SCRW)的“旗帜型”滞回特性的改进 Bouc-Wen 模型,对模型中的参数进行量化讨论,采用遗传算法对 10 个 SCRW 试件进

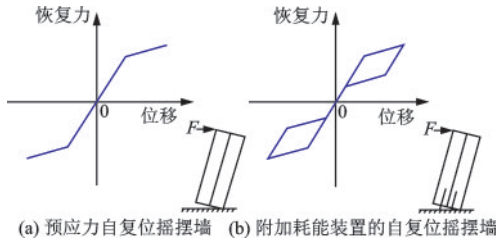


图1 自复位摇摆墙的典型滞回曲线

Fig.1 Two typical kinds of hysteretic curves of SCRW

行参数识别,并对识别结果进行统计分析,建立各参数与滞回曲线关键点的关系式,得出相应参数的统计分布特征,基于统计结果给出了各参数的建议取值范围。最后采用拟静力试验验证该参数识别方法和建议取值范围的有效性和准确性。

1 改进的 Bouc-Wen 滞回模型

1.1 Bouc-Wen 滞回模型

Bouc-Wen 滞回模型可以模拟多种不同类型的滞回特性,是一种典型的数学模型,其单自由度结构示意图如图 2 所示。其数学模型描述为:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + F(t) = f(t) \quad (1)$$

$$F(t) = akx(t) + (1-\alpha)kz(t) \quad (2)$$

$$\dot{z}(t) = A\dot{x}(t) - \beta|\dot{x}(t)||z(t)|^{n-1}z(t) - \gamma\dot{x}(t)|z(t)|^n \quad (3)$$

式中, m 和 c 分别为结构的质量和阻尼系数; $x(t)$ 、 $\dot{x}(t)$ 和 $\ddot{x}(t)$ 分别为结构相对地面的位移、速度和加速度; $F(t)$ 为结构恢复力,由线性恢复力 $akx(t)$ 和滞回恢复力 $(1-\alpha)kz(t)$ 组成; k 为线性刚度, $z(t)$ 和 $\dot{z}(t)$ 分别为非线性滞回位移和速度; α 为结构非线性刚度与线性刚度的比值; A 、 β 和 γ 为影响滞回环形状和大小的模型参数, n 为影响滞回曲线拐点尖锐程度的模型阶数; $f(t)$ 为激励荷载。

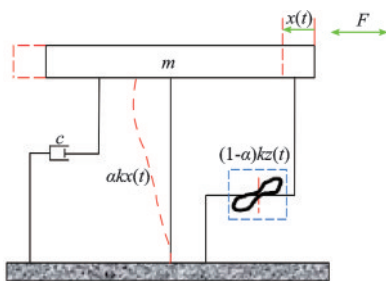


图2 单自由度结构 Bouc-Wen 滞回模型原理

Fig.2 The schematic of Bouc-Wen hysteretic model for single degree of freedom structure

Bouc-Wen 滞回模型由线性弹簧和滞回弹簧叠加来描述,如图 3 所示。加载初期,由于结构(构件)处于弹性阶段,力与位移呈线性关系,两个弹簧的位移均为 x ,线性弹簧表述弹性阶段构件或结构的特性;当结构(构件)进入弹塑性阶段后,出现刚度退化现象,滞回弹簧出现滑移,位移为 x_1 ,且保持不变,但线性弹簧位移仍为 x ,由两种弹簧的组合形式来表述屈服后的退化特性。Bouc-Wen 模型表达式中含有线性恢复力 $akx(t)$ 和滞回恢复力 $(1-\alpha)kz(t)$ 。但模型的残余变形较大,不能反映出“旗帜形”的可恢复功能结构滞回特点。

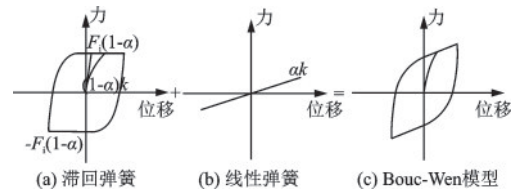


图3 Bouc-Wen 模型的滞回曲线^[17]

Fig.3 Hysteretic curve of Bouc-Wen model^[17]

1.2 改进的 Bouc-Wen 模型

Bouc-Wen 模型滞回曲线以原点为中心并跨越 4 个象限,这与 SCRW“旗帜形”滞回曲线仅在第一、三象限对称布置有所不同,且无法描述无残余变形的滞回特性。因此,为了准确利用 Bouc-Wen 模型描述 SCRW 的“双旗帜形”滞回特性,在充分考虑 SCRW 滞回特性和自复位特点情况下,将 Bouc-Wen 模型表达式中加入双曲正切函数 $\tanh(x)$ 对其进行修正,以得到理想的 SCRW 恢复力滞回理论模型。改进后的 Bouc-Wen 模型由 Bouc-Wen 模型的线性恢复力、滞回恢复力以及虚拟弹簧的恢复力三部分组成。本文称其为改进的 Bouc-Wen 模型,其原理如图 4 所示。

改进的 Bouc-Wen 滞回模型表达式为:

$$F_b(t) = akx(t) + (1-\alpha)kz(t) \quad (4)$$

$$F_1 = k_i(x(t) \pm x_0) = k_i x(t) + k_i x_0 \cdot \tanh[x(t)] = k_i x(t) + f_i \cdot \tanh[x(t)] \quad (5)$$

$$F_{RW} = F_b + F_1 = akx(t) + (1-\alpha)kz(t) + k_i x(t) + f_i \cdot \tanh[x(t)] \quad (6)$$

$$\dot{z}(t) = A\dot{x}(t) - \beta|\dot{x}(t)||z(t)|^{n-1}z(t) - \gamma\dot{x}(t)|z(t)|^n \quad (7)$$

式中, $F_b(t)$ 为 Bouc-Wen 模型中的恢复力; F_1

为双曲正切函数表征的虚拟恢复力,阶跃函数表达式如式(5),令 $f_i=k_i x_0$,代表虚拟预应力钢筋预拉力,是与自复位性能即弹性段刚度有关的系数, k_i 为虚拟预应力刚度, x_0 为预应力钢筋的预拉位移; F_{RW} 为SCRW的恢复力;其他符号物理意义同前。

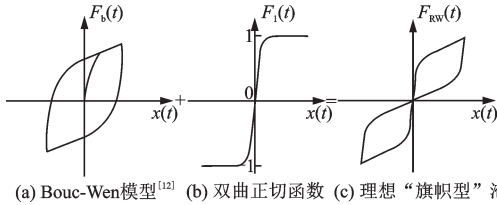


图4 改进的Bouc-Wen滞回模型示意图

Fig.4 The schematics of improved Bouc-Wen hysteretic model

在改进的Bouc-Wen滞回模型中包含 $n, A, k, \alpha, k_i, f_i, \beta$ 和 γ 共8个参数,其中, n 是弹塑性过渡段参数,可取任意正数,而Wen假设 n 的取值为整数。在 n 为正且取值较小的情况下,模型从弹性段到非弹性段的过度比较平滑,当 n 的取值较大时,过渡比较尖锐; A 是与结构(或构件)最大输出力相关的比例系数,控制滞回曲线面积; k 是模型的刚度,控制滞回环整体对水平坐标的斜率; α 是屈服后刚度比,取值范围 $[0, 1]$,当 $\alpha = 1$ 时模型为完全线性,滞回环相当于一个斜率,当 $\alpha = 0$ 时模型为完全非线性。且 α 越大,滞回环越细长; β 和 γ 控制滞回环的大小和形状的参数, β 取值为正,而参数 γ 的取值范围为 $[-\beta, \beta]$ ^[18]; f_i 和 k_i 则为控制自复位性能即弹性段刚度的参数。表1所示是所有参数的总结归纳。

表1 改进Bouc-Wen模型各参数

Table 1 Parameters of the improved Bouc-Wen model

参数	物理意义
形状控制	1 A 结构最大输出的比例系数
	2 k 模型刚度
形状控制+弹性段控制	3 n 屈服尖锐程度参数
	4 β 滞回环形状控制参数
	5 γ 滞回环形状控制参数
弹性段控制	6 f_i 预应力筋预拉力
	7 k_i 预应力刚度
屈服段控制	8 α 屈服后刚度比

2 摇摆墙的改进Bouc-Wen滞回模型参数分析

2.1 初步参数识别

对于摇摆墙改进的Bouc-Wen滞回模型,可以通过试验结果与参数识别相结合的方法初步确定相应参数的取值范围,以避免参数取值的盲目性。试验数据来自J.I.Restrepo等^[3]在2007年进行的SCRW拟静力试验。为避免单一试件带来的不确定性和不准确性,选取其中的Unit1(不附加耗能钢筋)和Unit2(附加耗能钢筋)试件在相同试验位移激励下进行初始参数识别。试验滞回曲线如图5所示,其中,实线与点线分别表示Unit1与Unit2的试验结果。

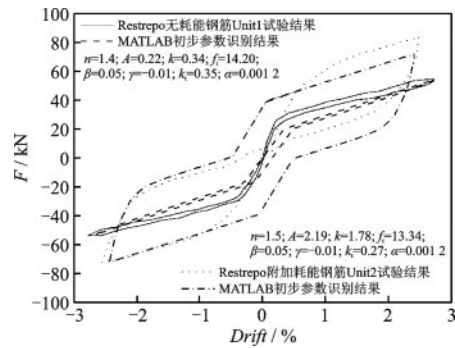


图5 初步参数识别结果

Fig.5 Preliminary parameter identification results

目前,从已知试验数据中识别Bouc-Wen模型参数的算法研究大致可以分为两类:一类为基于数值求解技术的参数拟合方法,如最小二乘法^[19]、梯度下降法^[16]等,但在参数取任意初值时难以保证全局收敛且对于模型的参数识别效果不算优异;另一类是基于优化技术的参数拟合方法,如粒子群算法^[20]、微分进化算法^[14]等,该类算法虽然可以达到较好的效果,但是实现过程较复杂,时间成本较高。本文使用MATLAB遗传算法工具箱中的遗传算法(Genetic algorithm, GA)进行参数识别。与其他算法相比,GA的可行解表达广泛,具有自适应性,不易陷入局部最优,而且算法本身特点使得程序易于实现并行化计算。在计算过程中不需要其他辅助信息,识别过程开始也不需要给出的参数的初始估

计,只需要给定合理的参数取值范围。识别过程中适应度函数由公式(8)定义:

$$\text{fitness} = \sum_{i=1}^n \frac{|F_{\text{exp},i} - F_{\text{sim},i}|}{|F_{\text{exp},\max} - F_{\text{exp},\min}|} \quad (8)$$

式中, n 为总的数据点数量; $F_{\text{exp},i}$ 和 $F_{\text{exp},\min}$ 分别为试验获得的摇摆墙第 i 点和最小恢复力; $F_{\text{sim},i}$ 和 $F_{\text{sim},\min}$ 分别为由数值模型获得的第 i 点和最小恢复力恢复力;该适应度函数基于最小二乘法,当适应度函数值接近 1×10^{-3} 时达到最优。识别过程的终止条件由种群代数和适应度函数变化共同控制,当种群代数超过设定的最大值100代或适应度函数变化小于限值时,停止优化,如图6所示。

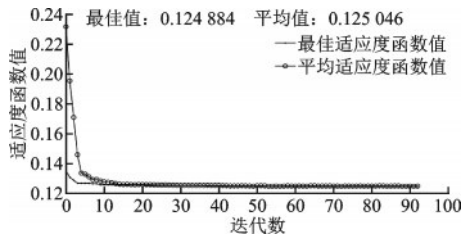


图6 GA迭代过程中适应度函数变化

Fig.6 Variation of fitness function in iteration process of genetic algorithm

首先,根据经验和前人经验给出一个初始且较大的参数取值范围,进行一个大致参数识别,将初始的参数识别取值范围定为:

下限: $LB = [1 \ 0.1 \ 1 \ 0.01 \ -0.09 \ 5 \ 0.1 \ 0.001]$
(参数排列顺序见表1); 上限: $UB = [10 \ 5 \ 5 \ 0.1 \ -0.01 \ 200 \ 50 \ 0.1]$, 约束 $\beta \geq |\gamma|$, 并将参数 n 依据 WEN 的建议限制为整数。由于在参数取值范围较宽的条件得到的参数适应度函数值较大,因此需要缩小参数取值范围来提高识别精度。结合2.2节参数分析得到的规律对第二次参数识别范围进行调整,需要减小的参数值取初步识别结果为上限值,下限值仍取初始下限,而需要增大的参数值取识别结果为下限值,上限值仍取初始上限。以此类推,逐渐缩小参数的取值范围,参数识别的精度也逐渐提高。直至适应度函数值接近 1×10^{-3} 时达到最优。

2.2 识别结果参数分析

通过初步识别获得如下参数集; Unit1: $n =$

$1.4; A = 0.22; k = 0.34; f_i = 14.2; \beta = 0.05; \gamma = -0.01; k_t = 0.35; \alpha = 0.001 \ 2$ 和 Unit2: $n = 1.5; A = 2.19; k = 1.78; f_i = 13.34; \beta = 0.05; \gamma = -0.01; k_t = 0.27; \alpha = 0.001 \ 2$ 。参数取值在给定的取值范围内,并没有出现取值集中在上下界的情况,说明给出的参数上下界限合理。但由图5对比可知,试验和识别的结果除了恢复力最大和最小值吻合较好外,其他点的结果差别很大,故此,需要在 MATLAB Simulink 中搭建模型框架图进行详尽的参数分析,取 Unit2 试件初步参数识别结果作为对照组,研究具体参数的影响规律,从而不断缩小参数识别范围,使识别结果更好地与试验曲线吻合。

参数 A 和 k 是形状控制参数,主要控制滞回环的面积。由图7可知,随着 A 和 k 的增大,滞回环变得更饱满,其面积也逐渐增大,整体耗能能力越强;反之,随着 A 和 k 的减小,滞回环变得细长。不同之处在于,随着 k 的减少,弹性段加载与卸载包围的面积(简称弹性段面积)会显著缩小,直至为0,即加载与卸载弹性段重合成一条直线;而不论 A 取值多少,弹性段面积始终存在,故在模拟自复位能力较好的摇摆墙时(如图5中的 Unit1),往往没有残余变形,表现在滞回曲线上加载与卸载弹性段几乎重合,可以设定 k 值范围较小。但 A 和 k 并不影响滞回曲线的弹性段和塑性段的刚度。

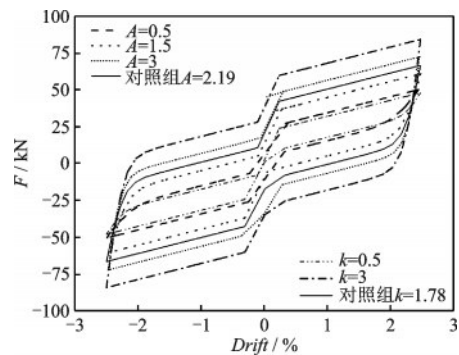


图7 参数 A 、 k 对滞回特性影响规律

Fig.7 The influence of A and k on hysteresis characteristics

参数 f_i 和 k_t 是控制弹性段参数,主要控制弹性段刚度和长度以及弹性段和屈服段过渡拐点位置,不影响曲线形状。如图8所示, f_i 越大,弹性段刚度和长度越大,从而导致其拐点位置越高,即屈服段恢复力越大,但屈服后刚度不变。随着 k_t 的增大,曲线弹性段刚度越来越大,随之屈服后刚度也显著增

大,斜率越来越陡,恢复力也显著增大,故可以通过调整 k_1 大小来达到调整恢复力峰值大小的目的。它们的区别在于 f_i 仅改变弹性段刚度和长度以及拐点位置,而 k_1 改变弹性段刚度同时,拐点后刚度也随之变化。

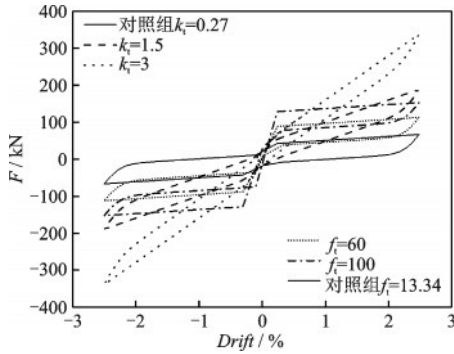


图8 参数 k_1 、 f_i 对滞回特性影响规律

Fig.8 The influence of k_1 and f_i on hysteresis characteristics

参数 n 、 β 和 γ 是形状和弹性段控制参数。由图 9 和 10 可知,弹性段刚度随着 n 的增大不断增大,弹性段越来越陡,但屈服后刚度几乎不变,恢复力减小。对于 β 和 γ ,两者存在关联性,可以通过两者之和的变化来说明其对滞回特性的影响。经过前人结论可知, β 的取值为正,而 γ 取值为负能够更好地描述自复位摇摆结构。经过本文论证, γ 取值在 $(-\beta, -0.01]$,且 $|\gamma| < \beta$,在这个范围内的取值可以更好地表征 SCRW 的滞回特点。在此区间内,由图 9 可知,当 n 大于 1 时,只要 $\beta + \gamma$ 不变,各自取值不论在范围内怎样变化,其滞回曲线形状几乎没有变化。由图 10 可知,当 $\beta + \gamma$ 变化时,其值越小,滞回环面积越大,耗能越强,恢复力峰值越大,弹性段刚度越小,曲线越缓,但屈服后刚度几乎不变。相反, $\beta + \gamma$ 越大,则曲线越细长,面积越小,耗能越弱,峰值恢复力越小,但弹性段刚度越陡。

α 是屈服后与前的刚度比,控制曲线屈服后的刚度。随着 α 的减小,弹性段刚度不变,屈服后刚度越来越小。其取值范围 $[0, 1]$,当 $\alpha = 1$ 时模型为完全线性,滞回环相当于一个斜率;当 $\alpha = 0$ 时,屈服后为完全非线性。 α 越大,滞回环越细长。为了更好地描述“旗帜型”滞回特性, α 取值趋近于 0,即模型完全非线性,且当 α 在 0 附近变化时, α 的变化对滞回曲线的影响几乎可以忽略,故本文 α 取初步参数识别结果 0.001 2。

根据以上规律,对 Restrepo 试验中 Unit1 和

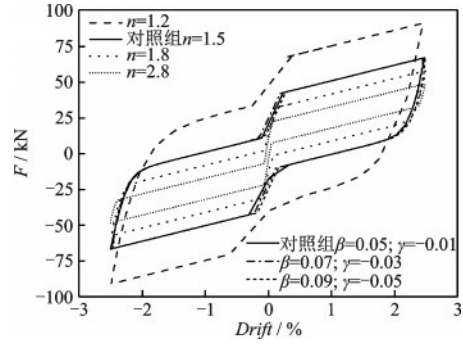


图9 n 和 $\beta + \gamma$ (不变)对滞回特性影响

Fig.9 The influences of n and $\beta + \gamma$ on hysteresis characteristics

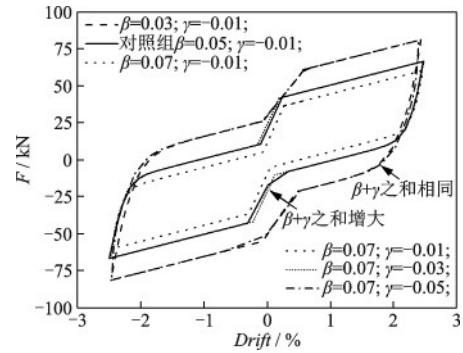


图10 $\beta + \gamma$ (变化)对滞回特性影响

Fig.10 The influences of $\beta + \gamma$ on hysteresis characteristics

Unit2 滞回曲线初始参数识别范围进行如下调整。由图 5 实线可知,对于无耗能钢筋试件 Unit1,模拟结果弹性刚度太小、弹性段长度不够,且面积过小,故主要增大参数 A 、 k 、 n 、 f_i 的取值,则取这些参数识别结果作为下限值,上限值仍取初始上限进行二次识别,参数识别范围为:下限 $LB = [0.22 \ 0.34 \ 1.4 \ 0.01 \ -0.09 \ 14.2 \ 0.1 \ 0.001]$;上限 $UB = [10 \ 5 \ 5 \ 0.1 \ -0.01 \ 200 \ 50 \ 0.001 \ 21]$ 。由图 5 点线可知,对于附加耗能钢筋的 Unit2 试件,模拟结果弹性段面积太大且弹性段太短导致拐点位置太低,导致屈服后恢复力和峰值恢复力相比试验力不够大,故主要减小 A 、 k ,增大 f_i 和 k_1 。第二次的参数识别范围为:下限 $LB = [1 \ 0.1 \ 1.5 \ 0.01 \ -0.09 \ 13.34 \ 0.27 \ 0.001]$;上限 $UB = [2.19 \ 1.78 \ 5 \ 0.1 \ -0.01 \ 200 \ 50 \ 0.001 \ 2]$ 。经过调整后,识别结果如图 11 所示,在相同试验位移激励下,对比改进 Bouc-Wen 模型和实际试验的恢复力一位移关系可知,模型很好地反应出了附加耗能钢筋的 SCRW 试件在加载过程中出现的“旗帜型”滞回特性。另一方面,说明改进的 Bouc-Wen 模型和所应用的基于 GA 的识别参数方法能够较好地模拟出 SCRW 结构的滞回特性。

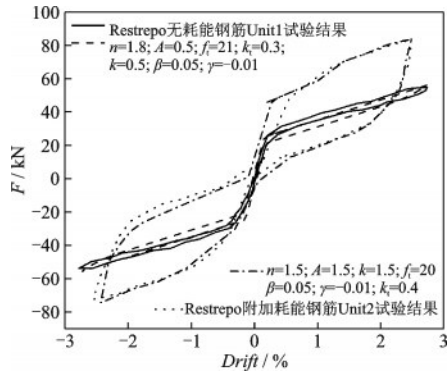


图 11 参数识别最终结果

Fig.11 Final results of parameter identification

3 摇摆墙的改进 Bouc-Wen 滞回模型 关键参数取值范围

对于给定一个滞回曲线,如何能够利用改进的 Bouc-Wen 模型在更精准的参数范围内快速定参,以达到描述 SCRW 滞回特性的目的是非常重要的。故本文对多组试验滞回曲线(或选取不同试件的恢复力峰值对应的目标位移)进行参数识别,将定参后的 SCRW 采用归一化方式处理,横坐标采用位移角(位移除以墙体高度),纵坐标采用恢复力除以屈服力(屈服点的定义取自 Park^[21])。目的是得到关键参数的取值范围,并对关键参数与影响滞回曲线的关键指标进行拟合,得到指标与参数之间的关系表达式。表 2 为定参的 10 个 SCRW 试件的基本信息。

3.1 摇摆墙滞回曲线分类

通过表 2 中 10 个试件滞回曲线的分析,发现摇摆墙的滞回曲线可以大致分为两大类:(1)不附加耗能装置的 SCRW,即纯自复位摇摆墙。该类滞回曲线特点为:曲线细长,面积小,屈服后刚度平缓。对于这类摇摆墙,往往参数 A 和 k 不会太大,如图 12 所示。(2)附加耗能装置的 SCRW,即混合型摇摆墙。这类结构的滞回曲线特点:曲线饱满,面积大,屈服后刚度大,恢复力显著提高。对于这类摇摆墙,参数 A 和 k 取值较大,如图 13 所示。

3.2 影响 SCRW 滞回特性参数取值范围

经过对 10 个试验滞回环分析,改进 Bouc-Wen 滞回模型各参数取值见表 3,得到如下关键参数取值范围。对于控制曲线形状的参数: $A \geq 0.5$;建议

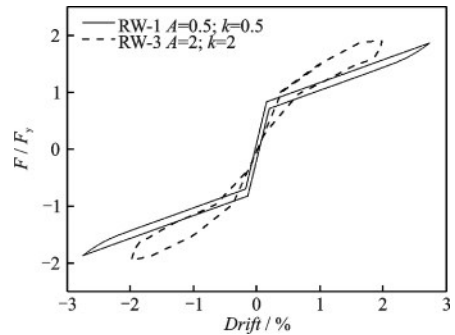


图 12 归一化后无耗能装置 SCRW 滞回曲线

Fig.12 Prestressed rocking wall hysteretic curves after normalization

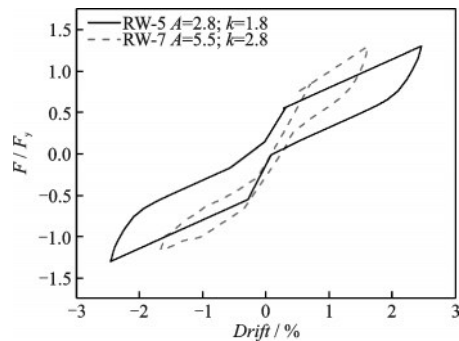


图 13 归一化后附加耗能装置 SCRW 滞回曲线

Fig.13 Hybrid rocking wall hysteretic curves after normalization

k 值的范围 $[0.5, 3]$;对于控制曲线形状和弹性段的参数:建议 n 值的范围为 $[1.3, 2.0]$ 且为正整数;对于 $\beta + \gamma$,建议 β 的取值为正,而 γ 取值为负且 γ 取值在 $(-\beta, -0.01]$,且 $|\gamma| < \beta$,两参数之和在 $[0.01, 0.05]$ 。

对于控制弹性段的参数: k 与恢复力峰值之间的关系较为复杂,可以建立拟合关系式,拟合曲线如图 14 所示,拟合关系式为:

$$y = -1.29 \times 10^{-5} x^2 + 0.0189x - 0.966 \quad (9)$$

式中, x 代表目标位移下的恢复力峰值; y 代表 k 取值。可以将拟合得到的参数值作为参数识别中的初始值,以提高模型的精度。

另外, $f_i \geq 15$;屈服段控制参数:建议 α 取值在 $[0.001, 0.1]$ 。

4 具有弧形界面摇摆墙试验验证

为了进一步验证所提出的改进 Bouc-Wen 滞回模型和参数取值范围的有效性,进行了一组 SCRW 拟静力试验,其中,采用 SCRW-2 数据进行有效性

表2 试件编号和基本信息

Table 2 Specimen number and basic information

试件编号	来源	试件尺寸/(mm×mm×mm)	软化点/(%,/)	屈服点/(%,kN)	恢复力峰值/kN	滞回环面积
RW-1 (无耗能)	Restrepo ^[3]	1 350 × 125 × 4 485	(0.15, 0.83)	(0.80, 35.5)	55.8	1.1
RW-2	Restrepo ^[3]	1 350 × 125 × 4 485	(0.50, 0.81)	(0.99, 58.2)	83.5	3.5
RW-3 (无耗能)	Perez ^[4]	2 540 × 200 × 7 140	(0.19, 0.54)	(0.99, 540.4)	688.7	1.9
RW-4	Twigden ^[5]	800 × 125 × 2 860	(0.20, 0.65)	(1.11, 88.9)	113.8	5.8
RW-5	Zhang ^[22]	1 000 × 125 × 2 000	(0.13, 0.29)	(1.57, 93.6)	115.4	2.2
RW-6	Gu ^[23]	1 500 × 200 × 3 340	(0.15, 0.36)	(2.40, 455.2)	522.7	1.1
RW-7	Dang ^[6]	1 000 × 200 × 3 120	(0.41, 0.68)	(0.92, 354.5)	472.4	1.2
RW-8	Mohammad ^[24]	1 350 × 125 × 4 000	(0.12, 0.51)	(0.88, 96.7)	126.6	2.1
RW-9	Yooprasertchai ^[25]	900 × 150 × 2 700	(0.25, 0.70)	(0.95, 108.8)	131.7	2.6
RW-10	Su	1 400 × 160 × 2 800	(0.05, 0.31)	(1.50, 111.6)	123.4	2.5

表3 不同摇摆墙试件各参数取值

Table 3 The values of each parameter for SCRW specimens

编号	A	n	β	γ	$\beta+\gamma$	k	k_t	f_t
RW-1	0.5	1.8	0.05	-0.01	0.04	0.5	0.3	21
RW-2	1.5	1.5	0.05	-0.01	0.04	2	0.4	20
RW-3	2	1.4	0.07	-0.05	0.02	2	6	100
RW-4	1.6	1.5	0.07	-0.05	0.02	2	0.7	25
RW-5	2.8	1.8	0.06	-0.03	0.03	1.8	1.6	20
RW-6	1.8	1.6	0.05	-0.03	0.02	3	4.6	30
RW-7	5.5	1.5	0.07	-0.03	0.04	2.8	5.9	100
RW-8	9	1.8	0.07	-0.03	0.04	0.9	0.7	38
RW-9	3	1.4	0.07	-0.04	0.03	1.5	1.2	38
RW-10	4	2.0	0.07	-0.06	0.01	2	1.3	30

表4 试件主要设计参数

Table 4 Main design parameters of specimens

试件 编号	预应力钢筋			耗能钢筋			轴压力 N / kN	弯矩贡献比 λ
	配置	e_p / mm	f_{pi} / f_{pk}	配置	e_c / mm	f_y / MPa		
SCRW-2	2Φ ^s 12.7	±268	0.45	2Φ16	±152	400	200	1.85

注： e_p 和 e_c 分别为摇摆墙试件预应力钢筋和耗能钢筋的偏心距； f_{pi} 为摇摆墙试件初始预应力； f_{pk} 为钢绞线极限强度标准值，1 860 MPa

验证。SCRW-2的几何尺寸及配筋如图15所示，墙体尺寸为2 800 mm(墙高)×1 400 mm(墙宽)×160 mm(墙厚)，高宽比为2，弧形界面半径为137 mm。试件主要设计参数见表4。

试验参照《建筑抗震试验规程》^[26]制定加载方案进行。竖向加载轴力由液压千斤顶完成，控制千斤顶竖向力为200 kN，由MTS电液伺服作动器进行水平方向拟静力反复加载，加载装置如图16所

示。为了防止预应力筋在加载过程中发生屈服或断裂，美国混凝土标准ACI ITG-5.1-07^[27]建议了SCRW在加载过程中的位移角不宜超过位移角限值 θ_{lim} ，其表达式为：

$$\theta_{lim} = 0.8 \frac{h_w}{l_w} + 0.5 \quad (10)$$

式中， h_w 为SCRW的墙高； l_w 为墙宽。

试验采用力和位移加载方案，在SCRW试件

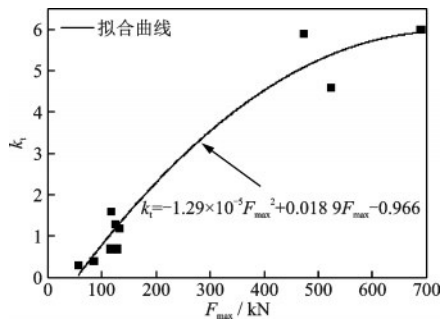


图 14 k_t 拟合曲线

Fig.14 Fitting curve of k_t

试验开始之前预加载 16 kN, 以消除试件内部不均匀性, 同时, 检查试验设备及各测量仪器是否正常。正式加载时, 以 10 kN 为一级, 每级循环 2 次后加一级继续循环 2 次, 直至达到屈服荷载, 之后采用位移加载, 以 8 mm 为一级, 每级循环 2 次后

加一级继续循环 2 次, 直至预应力筋达到屈服荷载终止加载。其中, 屈服位移的确定采用“3/4 法则”^[28]。

试验结果滞回曲线如图 17 所示。在预应力筋和耗能钢筋的共同作用下, SCRW 呈现出“旗帜型”滞回曲线。其特点为, 加载初期, 试件近似处于弹性状态; 随着顶点位移的增大, 墙角开始抬升, 随着墙-基础摇摆界面水平缝的逐渐张开直至到起摇点后, SCRW 的刚度发生了明显的减小, 此时滞回曲线仍很狭窄, 主要的耗能来源于墙体摇摆、变形; 耗能钢筋屈服之后, 滞回环面积开始增大, 曲线逐渐饱满同时刚度开始退化。基于预应力钢绞线的自身材料特性, 可以始终提供弹性恢复力。因此, 试件几乎无残余变形, 验证了 SCRW 结构具有良好的抗震韧性性能。

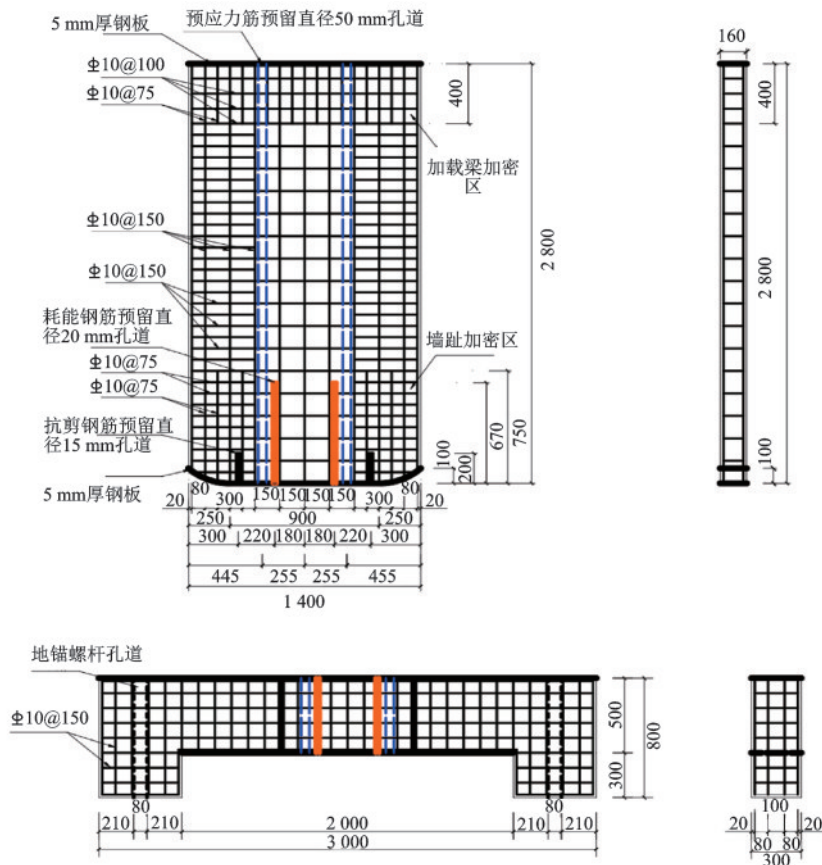


图 15 具有弧形界面 SCRW 配筋

Fig.15 Reinforcement details of SCRW with curved interface

根据本文建议的各参数取值范围对试件 SCRW-2 进行参数识别和定参。先选取目标位移 72 mm (2.5%) 对应的滞回环进行识别。首先, 根据 k_t 的拟合关系式 (8), 得到 k_t 的初步建议值为 1.2 左

右; 之后, 再对其他参数根据取值范围给出参数识别的上下限: 下限 $LB = [1 \ 0.5 \ 1.5 \ 0.01 \ -0.07 \ 15 \ 1.2 \ 0.001]$; 上限 $UB = [5 \ 3 \ 2 \ 0.07 \ -0.01 \ 100 \ 1.5 \ 0.1]$; 约束 $\beta \geq |\gamma|$, 并将参数 n 限制为整数。

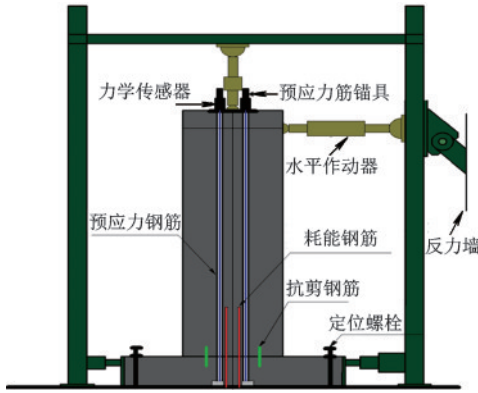


图 16 试验加载装置

Fig.16 The schematic of experimental setup

通过识别获得如下参数集： $A = 3$ ； $k = 2.08$ ； $n = 2.0$ ； $\beta = 0.07$ ； $\gamma = -0.06$ ； $f_t = 30$ ； $k_t = 1.3$ ； $\alpha = 0.0012$ 。其他目标位移曲线定参过程与上述一致，此处不再赘述。参数识别的结果如图 18 所示，从试验和识别的结果来看，模拟结果和试验结果吻合良好，验证了提出的改进 Bouc-Wen 模型能够较好地描述 SCRW 结构的滞回特性，同时也证明了上文建议的参数取值范围的合理和准确性。

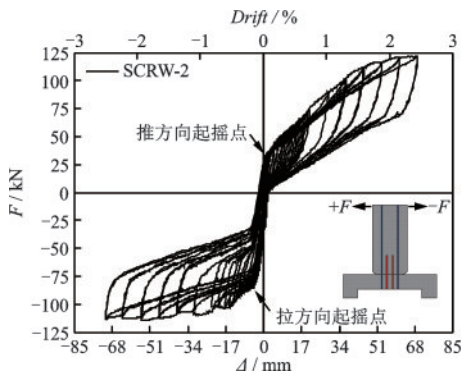


图 17 试验滞回曲线

Fig.17 Experimental hysteretic curves

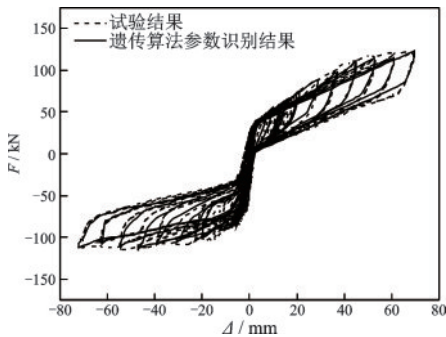


图 18 试验和模拟滞回曲线对比

Fig.18 Comparison of tested and simulated hysteretic curves

5 总结与讨论

基于 Bouc-Wen 模型提出改进的 Bouc-Wen 模型，模拟了 SCRW“旗帜型”滞回特性，并分析了模型中各参数对滞回曲线的影响规律，基于参数分析结果用 GA 对 10 个摇摆墙试件进行参数识别和定参，得到参数取值范围和拟合关系式，通过试验进行了验证，得到以下结论：

(1) 相较于经典 Bouc-Wen 模型，改进的 Bouc-Wen 模型能更好地模拟 SCRW 的滞回特性，尤其能更好地反映“旗帜型”曲线、无残余变形、起撬后刚度下降和强度刚度退化的滞回特性。

(2) 随着 A 和 k 的增大，结构整体的滞回曲线变得更饱满，滞回环面积也逐渐增大，结构（构件）整体耗能能力越强；另外，随着 n 的增大，滞回环的面积越来越小，曲线变得细长，但弹性段刚度不断增大，弹性段越来越陡，但屈服后刚度几乎不变。建议 $A \geq 0.5$ ， $k \in [0.5, 3]$ ， $n \in [1.3, 2.0]$ 且为正整数。

(3) 当 $n > 1$ 时，只要 $\beta + \gamma$ 之和不变，各自取值不论在范围内怎样变化，其滞回曲线形状几乎没有变化。当 $\beta + \gamma$ 之和变化时，和值越小且越趋近于 0，则滞回环表现为面积越大，耗能越强，弹性段刚度越缓，但屈服后刚度几乎不变。建议 β 的取值为正，而 γ 取值为负且 γ 取值在 $(-\beta, -0.01]$ ，且 $|\gamma| < \beta$ ，和值在 $[0.01, 0.05]$ 。

(4) f_t 越大，弹性段刚度和长度越大，从而导致其拐点位置越高，即屈服段恢复力越大，但屈服后刚度不变。随着 k_t 的增大，曲线弹性段刚度越来越大，随之屈服后刚度也显著增大，斜率越来越陡，恢复力也显著增大。 k_t 的拟合关系如式(9)。

(5) 使用 GA 能够得到比较好的参数识别结果。参数识别过程可供其他类似识别参考。

参考文献：

- [1] Roh M, Reinhorn A M. Modeling and seismic response of structures with concrete rocking columns and viscous dampers [J]. Engineering Structures, 2010, 32 (8) : 2096-2107.
- [2] 赵江, 李文武, 周攀. 预应力 RC 框架-摇摆墙结构抗震减振性能研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42 (6): 1213-1221.

- Zhao J, Li W W, Zhou P. Research on the seismic performance and vibration reduction of prestressed rocking wall-frame system [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(6): 1213-1221. (in Chinese)
- [3] Restrepo J I, Rahman A. Seismic performance of self-centering structural walls incorporating energy dissipators [J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(11): 1560-1570.
- [4] Perez F J, Pessiki S, Sause R. Lateral load behavior of unbonded post-tensioned precast concrete walls with vertical joint connectors [J]. PCI Journal, 2004, 49(2): 48-65.
- [5] Twigden K M, Sritharan S B, Henry R S. Cyclic testing of unbonded post-tensioned concrete wall systems with and without supplemental damping [J]. Engineering Structures, 2017, 140: 406 - 420.
- [6] Dang L J, Liang S T, Zhu X J, et al. Research on seismic behavior of unbonded post-tensioned concrete wall with vertical energy-dissipating connections [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 45: 103-123.
- [7] 吕西林, 武大洋, 周颖. 可恢复功能防震结构研究进展 [J]. 建筑结构学报, 2019, 40(2): 1-15.
Lyu X L, Wu D Y, Zhou Y. Progress of research on seismic resistant structures [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(2): 1-15. (in Chinese)
- [8] 欧进萍, 武沛松, 关新春. 大位移摩擦摆底层和多层隔震韧性结构 [J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(4): 657-676.
Ou J P, Wu P S, Guan X C. Seismic resilient base isolated structure equipped with super-large displacement friction pendulum bearing and isolated structure equipped with multi-super-large displacement friction pendulum bearing [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(4): 657-676. (in Chinese)
- [9] Takeda T, Sozen M A, Nielsen N N. Reinforced concrete response to simulated earthquakes [J]. Journal of the Structural Division, 1970, 96(12): 2557-2573.
- [10] Clough R W. Inelastic earthquake response of tall buildings [C] // Proceedings of the 3rd World Conference on Earthquake Engineering. New Zealand: [s.n.], 1965: 68-89.
- [11] Bouc R. Forced vibration of mechanical systems with hysteresis [C] // Proc Con/Nonlinear Oscillation, Prague, Czechoslovakia: [s.n.], 1967.
- [12] Wen Y K. Method for random vibration of hysteretic systems [J]. Journal of Engineering Mechanics Division, 1976, 102(2): 249-263.
- [13] 吕大刚, 于晓辉, 杜文晨. 基于改进 Bouc-Wen 模型的 RC 梁-柱节点抗震性能研究 [J]. 工程力学, 2015, 32(增): 45-54.
Lyu D G, Yu X H, Du W C. Study on seismic performance of RC beam-column joints with a modified Bouc-Wen model [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(Sup): 45-54. (in Chinese)
- [14] 郭玉荣, 潘建中. 基于改进 Bouc-Wen 模型的 RC 柱数值模拟方法 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 31(8): 10-19.
Guo Y R, Pan J Z. Numerical simulation method for reinforced concrete columns based on modified Bouc-Wen model [J]. Journal of Jilin University, 2022, 31(8): 10-19. (in Chinese)
- [15] 徐亚洲, 魏克伦, 丁艳琼. 基于新的改进 Bouc-Wen 模型的预制 RC 桥墩滞回模型研究 [J]. 工程力学, 2024, 41(2): 180-193.
Xu Y Z, Wei K L, Ding Y Q. Study on hysteretic model of precast RC bridge piers based on new modified Bouc-Wen model [J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(2): 180-193. (in Chinese)
- [16] 吴克川, 陶忠, 潘文, 等. 基于改进 Bouc-Wen 模型的防屈曲支撑参数拟合方法 [J]. 建筑科学, 2020, 36(11): 21-28.
Wu K C, Tao Z, Pan W, et al. Fitting method of buckling restrained brace parameters based on modified Bouc-Wen model [J]. Building Science, 2020, 36(11): 21-28. (in Chinese)
- [17] 牛健. 新型 SMA-SMP 阻尼装置对风电塔结构的减震研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
Niu J. Study of new SMA-SMP damping device for vibration damping of wind tower structure [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [18] 朱奕, 章红梅. 基于遗传算法的钢筋混凝土剪力墙 Bouc-Wen 模型参数识别 [J]. 结构工程师, 2016, 32(4): 58-65.
Zhu Y, Zhang H M. Identification of parameters of Bouc-Wen model for reinforced concrete shear walls based on genetic algorithm [J]. Structural Engineer, 2016, 32(4): 58-65. (in Chinese)

(本文编辑: 周小潭)

(下转第 201 页)