

文章编号:1673-2049(2015)04-0031-08

基于 IDARC 的 RC 剪力墙 Park 恢复力模型参数修正

刘成清¹,倪向勇¹,施卫星²

(1. 西南交通大学 土木工程学院,四川 成都 610031; 2. 同济大学 土木工程学院,上海 200092)

摘要:使用 IDARC 非线性分析程序对 RC 剪力墙构件进行拟静力反复加载非线性分析,研究 Park 恢复力模型 4 个参数对剪力墙构件强度、刚度、卸载刚度、耗能和等效粘滞阻尼的影响规律及影响程度。将修正后的参数运用于剪力墙低周往复荷载试验的数值模拟,得到的结果与试验结果较为吻合,并根据得到的数据提出了针对 RC 剪力墙构件的 Park 恢复力模型参数建议取值范围。研究表明:刚度退化参数 α 对剪力墙构件的卸载刚度、耗能及等效粘滞阻尼有较大影响;基于延性的强度退化参数 β_1 对构件的强度影响较大,对耗能及等效粘滞阻尼有中度影响;基于能量的强度退化参数 β_2 对构件的各项抗震指标均有轻微影响;滑移退化参数 γ 对构件的耗能及等效粘滞阻尼有较大影响。

关键词:IDARC;参数修正;非线性分析;Park 恢复力模型;RC 剪力墙;低周往复荷载

中图分类号:TU398.2

文献标志码:A

Parameter Modification of Park Hysteretic Model for RC Shear Walls Based on IDARC

LIU Cheng-qing¹, NI Xiang-yong¹, SHI Wei-xing²

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;

2. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Nonlinear analysis program IDARC was used to analyze nonlinear response of reinforced concrete (RC) shear walls under quasi-static cyclic loading, and the influences of four parameters of Park hysteretic model on strength, stiffness, unloading stiffness, energy dissipation and equivalent viscous damping were researched. Based on the results of parameter modification, numerical calculation for low cyclic loading tests of shear walls was carried out, and the simulation results were in good agreement with those of tests. Then the suggested range of every parameter value was put forward for RC shear walls. The research results show that stiffness degradation parameter α has severe influence on unloading stiffness, energy dissipation and equivalent viscous damping. Ductility-based strength degrading parameter β_1 has severe influence on strength, moderate influence on energy dissipation and equivalent viscous damping. Energy-based strength degrading parameter β_2 has little influence on all. Slip degradation parameter γ has severe influence on energy dissipation and equivalent viscous damping.

Key words: IDARC; parameter modification; nonlinear analysis; Park hysteretic model; RC shear wall; low cyclic loading

收稿日期:2015-01-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51278428);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2682014CX066)

作者简介:刘成清(1976-),男,江西赣州人,副教授,工学博士,E-mail:lcqj@163.com。

0 引言

剪力墙是高层结构中的重要抗侧力构件,其刚度大,可承担竖向荷载及地震、风等引起的横向荷载。基于性能的抗震设计方法要求计算结构在地震作用下的非线性响应,这对结构弹塑性分析方法提出了更高的要求。进行整体结构弹塑性分析的前提是解决构件层次的恢复力模型^[1]。恢复力模型是结构进行弹塑性分析的基础,是根据大量恢复力与变形的关系曲线,经合理地抽象和简化而得到的实用数学模型。对于 RC 剪力墙,各国进行了很多研究,提出了若干恢复力模型,其中 Park 等^[2]提出的三线性恢复力模型较好地考虑了捏缩效应以及刚度和强度退化的影响,是目前公认的考虑因素较为全面的模型。Park 恢复力模型可自定义刚度退化参数 α 、强度退化参数 β_1, β_2 、滑移或捏缩效应退化参数 γ 来较为真实地模拟不同构件的滞回规则。关于 Park 恢复力模型的 4 个参数,文献^[3]仅量化了各参数对构件滞回性能的影响程度。尽管 Park 恢复力模型已应用于各国较多的非线性分析程序,但基本都是简单直接应用,几乎没有深入研究 Park 恢复力模型 4 个参数对 RC 剪力墙构件的强度、刚度、卸载刚度、耗能和等效粘滞阻尼的影响规律及影响程度。为此,开展这方面的研究,对于 RC 剪力墙在低周往复荷载作用下的非线性分析与结构抗震分析具有一定的理论参考价值和现实意义。

剪力墙构件的力学分析模型主要有微观模型和宏观模型。微观模型考虑了剪力墙钢筋分布特点,将钢筋分散于整个有限元单元中,将单元作为连续均匀的材料^[4]。由于钢筋混凝土在复杂应力状态下的本构关系复杂,且微观模型往往具有庞大的自由度^[5-6],分析时需繁重的数值计算,且计算难以收敛^[7-8],导致微观模型在实际结构的非线性分析中难以大规模使用。宏观模型建立在试验研究和理论简化基础上,其模型简单,力学概念直观,在宏观上反映剪力墙构件的非线性特性,便于常规设计,在工程实践中得到广泛应用^[9]。IDARC 是基于宏观模型对钢筋混凝土构件进行非线性分析。本文鉴于 IDARC 良好的非线性分析能力,对 Park 恢复力模型的 4 个参数进行修正。

1 IDARC 中 Park 恢复力模型

IDARC 是由美国纽约州立大学 Buffalo 分校开发的较为成熟的二维平面杆系非线性分析程序。

Park 三折线恢复力模型最早由 Park 等提出并用于 IDARC 程序中。Park 模型考虑了结构刚度退化、强度退化、非对称响应、滑移退化和捏缩效应,能较好地模拟钢筋混凝土结构的滞回性能,可用于剪力墙构件的剪切破坏和弯曲破坏分析。各个参数对结构滞回曲线的影响如图 1 所示,其中, M 为弯矩, Φ 为曲率, M_y 为屈服弯矩, Φ_y 为屈服曲率, Φ_{\max} 为最大曲率, M_{\max} 为一个循环中最大的弯矩, M_{new} 为随后一个循环内的最大弯矩, M_{CR} 为开裂弯矩。

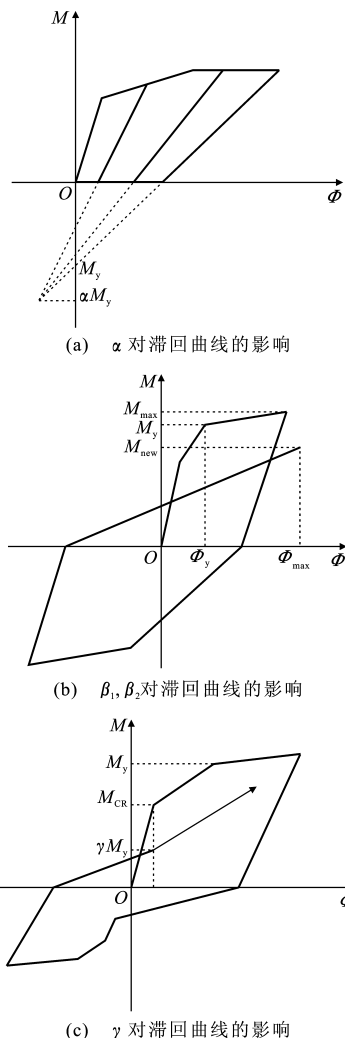


图 1 参数 $\alpha, \beta_1, \beta_2, \gamma$ 对滞回曲线的影响

Fig. 1 Influences of Parameters $\alpha, \beta_1, \beta_2, \gamma$ on Hysteretic Curves

刚度退化参数 α 控制着构件恢复力模型卸载段的刚度退化[图 1(a)],所有的卸载线均反向交于一点,该点的纵坐标为 αM_y 。强度退化参数 β_1, β_2 用于描述构件在往复荷载作用下强度不断下降的现象[图 1(b)],其中 M_{new} 由下式计算得到

$$M_{\text{new}} = M_{\max} (1 - \beta_1 \bar{E} - \beta_2 u_c) \quad (1)$$

$$\bar{E}=\frac{A_T}{M_y\Phi_y}\tag{2}$$

$$u_c=\frac{\Phi_{max}}{\Phi_y}\tag{3}$$

式中: A_T 为 $M\text{-}\Phi$ 滞回曲线的面积。

由于考虑了滑移和捏缩效应[图 1(c)],加载线由零荷载处指向 γM_y ,并在此阶段保持着较小的刚度直到弯曲曲率达到开裂曲率。当加载线通过开裂曲率点时,在没有强度退化的情况下会直达先前的最大弯矩处。

2 恢复力模型参数修正

2.1 参数修正方法

为阐明恢复力模型各参数的修正方法,本文拟以试验的剪力墙构件为模型,利用 IDARC 程序对其进行拟静力低周往复加载非线性分析,通过改变参数,得到剪力墙构件在不同参数值下的骨架曲线、刚度曲线、卸载刚度曲线、耗能曲线与等效粘滞阻尼曲线,观察各参数对其影响。以刚度退化参数 α 为例,其退化程度可分为 4 个等级,即无退化、轻微退化、中等退化、严重退化,分别对应 200,15,10,4 四个值。在进行参数修正时,保持其他参数不变且对构件无退化影响,得到参数 α 分别为上述 4 个值时对剪力墙构件的强度、刚度、耗能和等效粘滞阻尼的影响,然后再以上述步骤分别分析其他参数对构件滞回性能的影响。表 1 为参数修正过程中各个模型参数的设定值。

2.2 IDARC 模型建立

2.2.1 模型参数

根据文献[10]的试验,选择其中编号为 SPW2 的试件,使用 IDARC 软件对其进行拟静力往复加载非线性分析。试件截面长度为 500 mm,厚度为 100 mm,高度为 1 000 mm,轴压比为 0.2。采用 C30 等级混凝土,所用钢筋均为 HPB235 级钢筋,竖向分布筋及边缘锚固筋均采用 $\phi 8$ 钢筋,横向分布筋采用 $\phi 6$ 钢筋,截面的竖向分布筋配筋率为 1.24%,横向配筋率均为 0.57%。试件的截面尺寸及配筋如图 2 所示。

在 IDARC 中通过输入剪力墙构件的截面尺寸、高度、横向分布筋配筋率与竖向分布筋配筋率及轴压比,定义边缘约束构件的尺寸、配筋等信息,程序会自动生成构件的模型。由于此程序没有前处理器和后处理器,输入模型和提取分析结果需使用程序自带的编程语言。

表 1 参数修正过程中各参数设定值

Tab.1 Set Values of Parameters During Parameters Modification Process

类型编号	模型编号	α	β_1	β_2	γ
1	1	200	0.01	0.01	1.00
	2	15	0.01	0.01	1.00
	3	10	0.01	0.01	1.00
	4	4	0.01	0.01	1.00
2	5	200	0.15	0.01	1.00
	6	200	0.30	0.01	1.00
	7	200	0.60	0.01	1.00
3	8	200	0.01	0.08	1.00
	9	200	0.01	0.15	1.00
	10	200	0.01	0.60	1.00
4	11	200	0.01	0.01	0.40
	12	200	0.01	0.01	0.25
	13	200	0.01	0.01	0.05

注: α 为200,15,10,4分别对应无退化、轻微退化、中等退化、严重退化; β_1 为0.01,0.15,0.30,0.60分别对应无退化、轻微退化、中等退化、严重退化; β_2 为0.01,0.08,0.15,0.60分别对应无退化、轻微退化、中等退化、严重退化; γ 为1.00,0.40,0.25,0.05分别对应无退化、轻微退化、中等退化、严重退化。

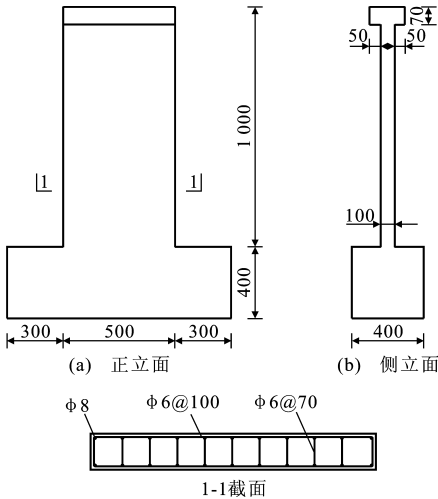


图 2 试件截面尺寸及配筋(单位:mm)

Fig.2 Section Size and Reinforcement of Specimen (Unit:mm)

2.2.2 材料本构关系输入

(1)混凝土本构关系

关于混凝土的本构关系,IDARC 采用 Kent-Scott-Park 约束本构模型^[11],Kent-Scott-Park 本构模型由上升段和下降段组成,图 3 为无约束混凝土本构模型,其中, σ 为应力, ϵ 为应变, ϵ_0 为混凝土受压峰值应变, Z_m 为应变软化段斜率, E_c 为混凝土弹性模量, ϵ_u 为钢筋极限应变, f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度。

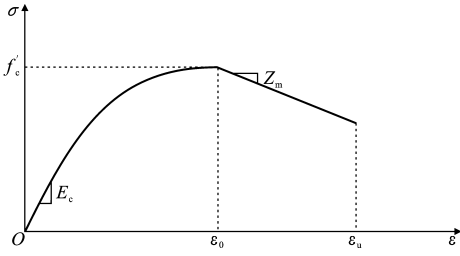


图3 无约束混凝土本构模型

Fig. 3 Constitutive Model of Unconfined Concrete

本构模型上升段与下降段的方程式为

$$\sigma_c = \begin{cases} K f'_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{0.002K} - \left(\frac{\varepsilon_c}{0.002K} \right)^2 \right] & \varepsilon_c \leq 0.002K \\ K f'_c [1 - Z_m(\varepsilon_c - 0.002K)] & \varepsilon_c > 0.002K \end{cases} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} K &= 1 + \frac{\rho_s f_{yh}}{f'_c} \\ Z_m &= 0.5 \left[(3 + 0.29 f'_c) / (145 f'_c - 1000) + \right. \\ &\quad \left. 0.75 \rho_s \sqrt{h/s_h} - 0.002K \right]^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: σ_c 为混凝土应变 ε_c 时的应力; f_{yh} 为钢筋屈服强度; K 为考虑箍筋约束而引起的混凝土强度增加系数; ρ_s 为体积配箍率; h 为从箍筋外边缘算起的核心混凝土宽度; s_h 为箍筋间距。

在进行 IDARC 仿真时,需要输入混凝土圆柱体抗压强度 f'_c , $f'_c = 0.79 f_{cu,k}$ ($f_{cu,k}$ 为混凝土的抗压强度标准值),根据文献[10]实测值,换算取 $f'_c = 25.60$ MPa,混凝土弹性模量 $E_c = 300$ GPa,混凝土受压峰值应变 $\varepsilon_0 = 0.2\%$,受拉开裂强度 f_t 取 2.56 MPa, Z_m 等值缺省设置,由程序自动计算得出。

(2) 钢筋本构关系输入

墙体试件所用钢筋的本构模型采用文献[12]中所介绍的,其分段方程如下

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= E_s \varepsilon_s & \varepsilon_s &\leq \varepsilon_y \\ \sigma &= f_y & \varepsilon_y &< \varepsilon_s \leq \varepsilon_{uy} \\ \sigma &= f_y + k(\varepsilon_s - \varepsilon_{uy}) & \varepsilon_{uy} &< \varepsilon_s \leq \varepsilon_u \\ \sigma &= 0 & \varepsilon_s &> \varepsilon_u \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: E_s 为钢筋弹性模量; ε_s 为钢筋受拉应变; ε_y 为钢筋屈服应变; ε_{uy} 为钢筋硬化起点对应的应变; f_y 为钢筋屈服强度代表值; k 为钢筋硬化段斜率。

根据文献[10]中对钢筋进行的拉伸试验,钢筋的屈服强度代表值 f_y 取为 362 MPa,极限强度代表值 f_u 取为 500 MPa,弹性模量 E_s 取为 210 GPa,钢筋硬化段斜率按公式 $k = \frac{E_s}{60}$ 计算取值,钢筋硬化起点对应的应变取为 $0.03^{[3]}$ 。钢筋本构关系如图 4 所示。

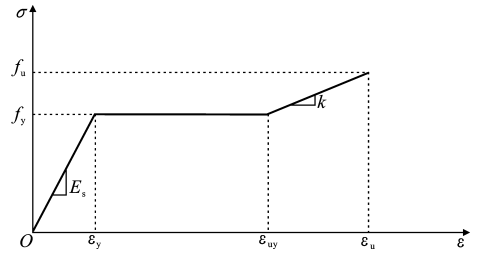


图4 钢筋本构关系

Fig. 4 Constitutive Relation of Steel Bar

2.2.3 荷载工况

墙体的轴压比为 0.2,经计算输入的静载为 199.03 kN,在 IDARC 中,该静载均匀施加在墙顶部截面。关于构件水平方向的荷载,采用全位移加载模式,低周往复水平荷载加载制度如图 5 所示。

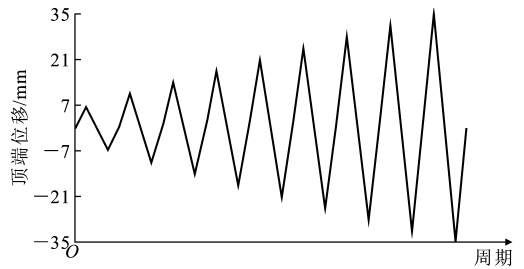


图5 低周往复水平荷载试验加载制度

Fig. 5 Loading System of Low Cyclic Horizontal Loading Test

3 计算结果分析

3.1 数值模拟结果及分析

将本文第 2 节的模型数据输入 IDARC 中,得到如图 6(a)所示的滞回曲线,经过对数据进行整理得到如图 6(b)所示的骨架曲线。

与原试验的滞回曲线对比可知,仿真的滞回曲线轮廓与原试验相吻合,刚度、卸载刚度趋势、延性与试验结果接近,且较好模拟了剪力墙构件的捏缩效应。模拟结果与原试验的骨架曲线相比,初始斜率、屈服荷载、极限荷载等均相当。综上所述, IDARC 可较好地模拟剪力墙在低周往复荷载作用下的非线性行为。

3.2 参数变化对试件抗震性能的影响

反映构件抗震性能的参数有强度、刚度、卸载刚度、耗能及等效粘滞阻尼。构件的骨架曲线反映其强度的大小。刚度反映构件的变形能力,在反复加载过程中,随着混凝土开裂以及钢筋屈服,构件刚度会逐渐下降,利用由式(7)计算得到的割线刚度来反映构件刚度的退化,即

$$K_i = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|+X_i| + |-X_i|} \quad (7)$$

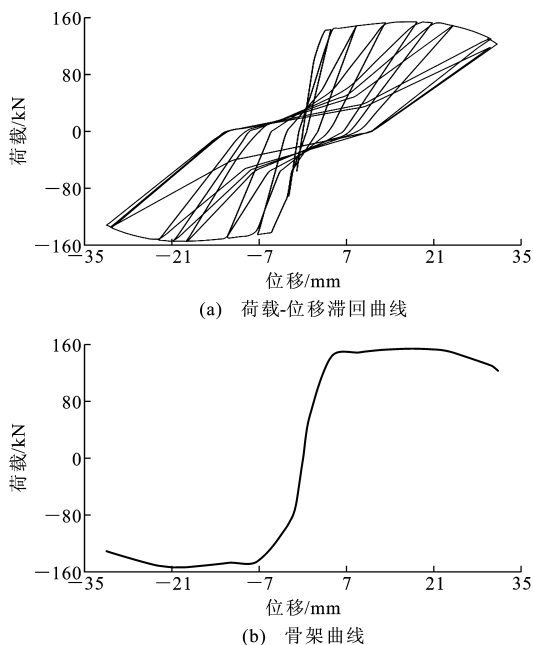


图6 仿真结果

Fig. 6 Simulation Results

式中: K_i 为第 i 个循环墙体模型横向割线刚度; F_i 为第 i 次峰点荷载值; X_i 为第 i 次峰点位移值。

图7为等效粘滞阻尼系数 ξ 计算示意。卸载刚度即为滞回曲线卸载段构件的刚度。在每个循环中,加载时构件吸收能量,在卸载时构件释放能量,吸收的能量与释放的能量之差即为1个循环中构件的耗能^[13-15],等于滞回曲线在1次循环中所围面积大小,利用 MATLAB 软件精确计算出其面积,累积耗能为各个滞回曲线面积的累加。依据《建筑抗震试验方法规程》相关规定,可用等效粘滞阻尼系数 ξ 来评价构件抗震性能,等效阻尼反映构件的耗能能力,其越大说明构件的耗能能力越强, ξ 可由式(8)计算得到,即

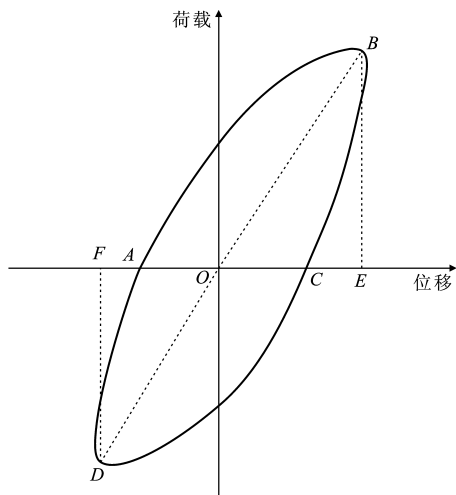
$$\xi = \frac{S_{ABCD}}{2\pi(S_{\triangle ODF} + S_{\triangle OBE})} \quad (8)$$

式中: S_{ABCD} 为曲线滞回环 ABCDA 面积; $S_{\triangle ODF}$ 为 $\triangle ODF$ 面积; $S_{\triangle OBE}$ 为 $\triangle OBE$ 面积。

3.2.1 刚度退化参数 α 对试件抗震性能的影响

由表1可知,分别对参数 $\alpha, \beta_1, \beta_2, \gamma$ 进行修正,共有13个仿真模型,仅改变参数 α 的数值,共有4个模型。根据 IDARC 计算得到的力-位移数据,分别绘出4个仿真模型的刚度退化曲线、卸载刚度退化曲线、耗能变化曲线、等效粘滞阻尼变化曲线,如图8所示。

由图8(a)可以看出,参数 α 对构件的强度无影响。由图8(b)可以看出,随着刚度退化参数 α 的减

图7 等效粘滞阻尼系数 ξ 计算示意Fig. 7 Calculation Diagram of Equivalent Viscous Damping Coefficient ξ

小,即退化越严重,构件所吸收的能量越小,说明参数 α 对构件的耗能影响较大。由图8(c)可以看出: ξ 在弹性阶段较小,在塑性阶段较大,这反映出构件在塑性阶段消耗能量较强,随着刚度退化参数 α 的减小,构件的耗能能力降低。由图8(d)可以看出,参数 α 对构件的刚度无影响。由图8(e)可以看出,参数 α 对构件卸载刚度的退化影响较为严重,随着刚度退化参数 α 的减小,构件的卸载刚度退化速度较快,退化程度较高。综上所述,刚度退化参数 α 对剪力墙构件的累积耗能、等效粘滞阻尼、卸载刚度有较大影响,对构件的强度、刚度无影响。

3.2.2 基于延性的强度退化参数 β_1 对试件抗震性能的影响

对参数 β_1 的修正按照上述对参数 α 修正的步骤进行,参数 β_1 对构件的刚度退化、卸载刚度退化均无影响,对构件的累积耗能有轻微影响。图9(a)为参数 β_1 对剪力墙构件骨架曲线的影响,随着参数 β_1 的增大,构件的强度降低,且影响较为明显。图9(b)为参数 β_1 对剪力墙构件等效粘滞阻尼的影响,随着参数 β_1 的增大,构件的等效粘滞阻尼降低,即构件的耗能能力降低。综上所述,参数 β_1 对剪力墙构件的强度、等效粘滞阻尼影响较大。

3.2.3 基于能量的强度退化参数 β_2 与滑移退化参数 γ 对试件抗震性能的影响

经过观察,基于能量的强度退化参数 β_2 对剪力墙构件的各项抗震性能均有轻微影响,在此不再赘述。滑移退化参数 γ 能较好地反映构件捏缩效应,图10为滑移退化参数 γ 对构件抗震性能影响。由图10(a)可以看出,滑移退化参数 γ 对构件的累积

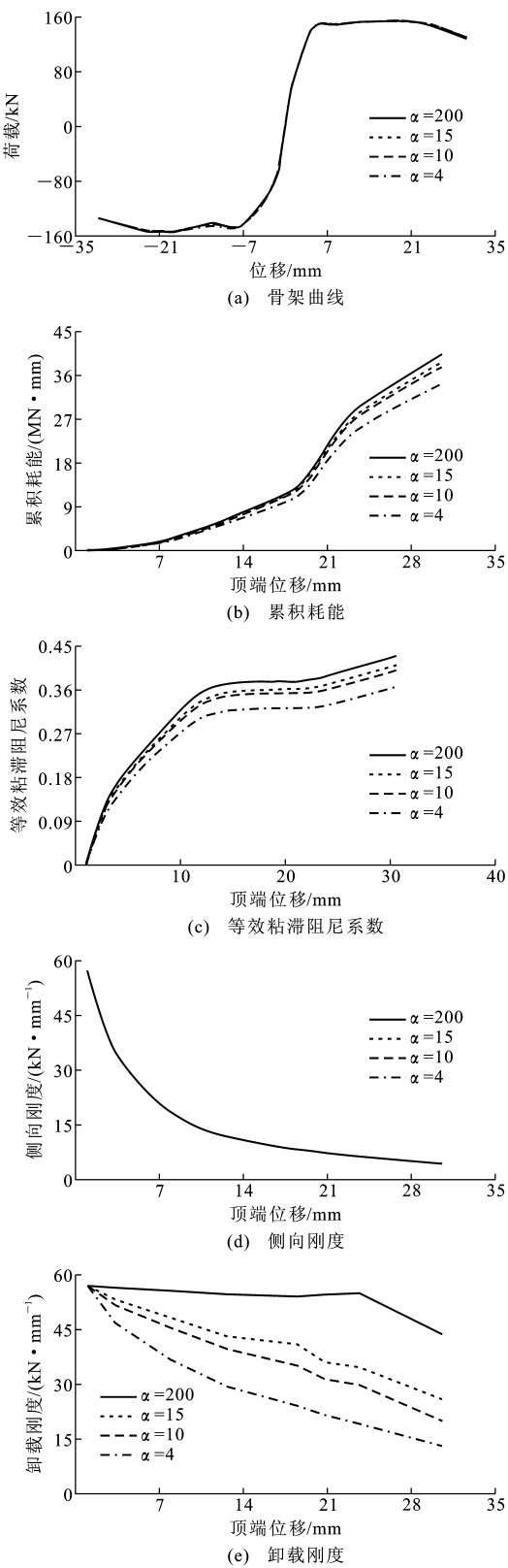


图 8 刚度退化参数 α 对构件抗震性能的影响

Fig. 8 Influences of Stiffness Degradation Parameter α on Seismic Performance of Structure

耗能影响较为明显, γ 越小, 构件的累积耗能越小。由图 10(b)可以看出, γ 越小, 构件的等效粘滞阻尼

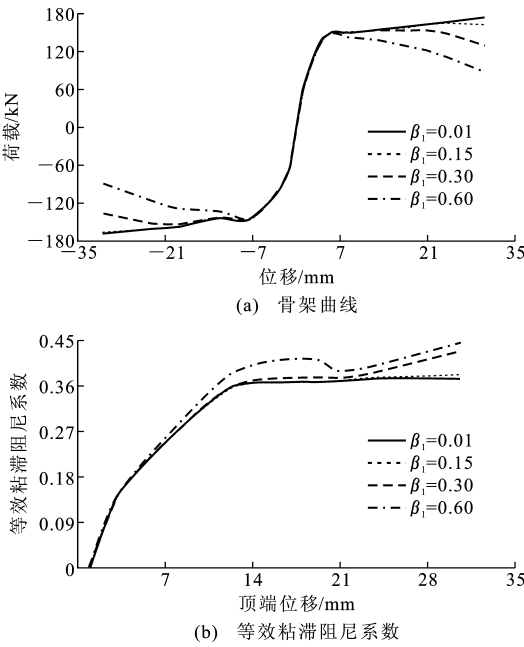


图 9 基于延性的强度退化参数 β_1 对构件抗震性能的影响

Fig. 9 Influences of Ductility-based Strength Degrading Parameter β_1 on Seismic Performance of Structure

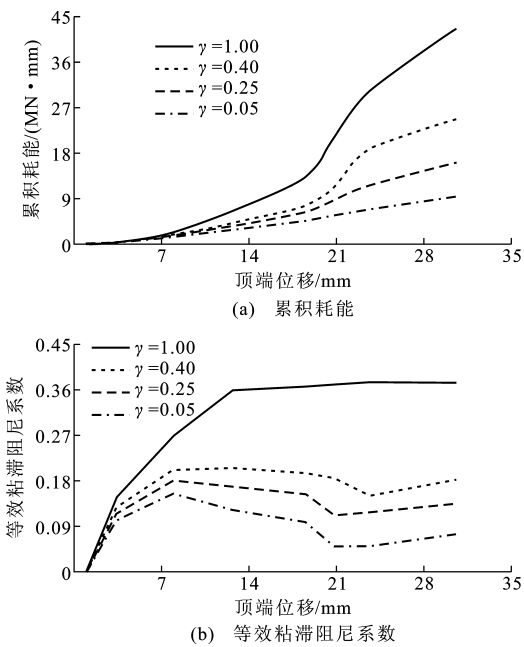


图 10 滑移退化参数 γ 对构件抗震性能的影响

Fig. 10 Influences of Slip Degradation Parameter γ on Seismic Performance of Structure

就越小, 构件的耗能能力越小, 当 γ 减小到一定程度时, 等效粘滞阻尼系数 ξ 在塑性阶段降低严重, 表明构件在塑性阶段耗能能力降低。

3.3 其他算例验证

改变剪力墙模型的尺寸、配筋率、轴压比等条件, 通过 IDARC 进行非线性分析, 分别对 $\alpha, \beta_1, \beta_2, \gamma$

四个参数进行修正,得到的结果与第 3.2 节中的结果均一致,即刚度退化参数 α 对构件的卸载刚度、耗能、等效粘滞阻尼有较大影响,基于延性的强度退化参数 β_1 对构件的强度、耗能及等效粘滞阻尼有中度影响,基于能量的强度退化参数 β_2 对构件的各项抗震指标影响较小,滑移退化参数 γ 对构件的耗能及等效粘滞阻尼有较大影响。其他算例结果说明参数修正的结果具有普遍适用性。根据上述分析,本文总结了各个参数对墙体抗震性能的影响及影响程度,如表 2 所示。

表 2 参数修正结果

Tab. 2 Results of Parameters Modification

参数	强度	刚度	卸载刚度	累积耗能	等效粘滞阻尼
α	×	×	√√	√√	√√
β_1	√√	×	×	√	√
β_2	—	—	×	—	—
γ	×	×	×	√√	√√

注:“√√”表示有较大影响;“√”表示有中度影响;“—”表示有轻微影响;“×”表示无影响。

4 参数修正结果的验证及各参数取值建议

根据前文参数修正结果,利用 IDARC 程序对文献[12]中 Z 形截面短肢剪力墙进行拟静力反复加载非线性分析。依据文献中墙体试件的开裂荷载、开裂位移、屈服荷载、屈服位移、极限荷载、极限位移等数据,计算得到墙体试件的开裂弯矩、开裂曲率、屈服弯矩、屈服曲率、极限曲率等数据,然后通过输入试件特性的方法进行分析,按表 1 所示参数值进行逐步仿真,各参数均具有表 2 所示的性质。同时按相同的步骤对文献[4]和文献[12]中剪力墙模型进行分析,各参数均具有相同的特征,这说明本文参数修正的可靠性。

通过观察文献中钢筋混凝土剪力墙的滞回曲线,发现其卸载刚度下降,捏缩效应和滑移现象较为明显。当文献[16]中 Z 形短肢剪力墙试件 SWZ-2 参数设定为 $\alpha=0.90, \beta_1=0.60, \beta_2=0.01, \gamma=0.4$, 使用 IDARC 分析得到的滞回曲线如图 11 所示,与原试验的滞回曲线相比,仿真模拟滞回曲线轮廓与原试验吻合度较高,强度、卸载刚度趋势、延性与试验结果接近,且较好模拟了剪力墙构件的捏缩效应。文献[10]中一字形短肢剪力墙试件 SPW1 参数设定为 $\alpha=1, \beta_1=0.50, \beta_2=0.15, \gamma=0.35$, 其滞回曲线如图 12 所示,其与原试验得到的滞回曲线吻合度较高。根据以上数据,RC 剪力墙 Park 恢复力模型

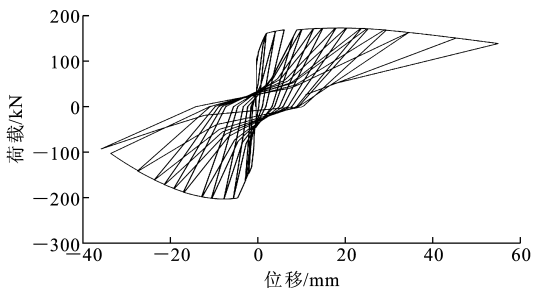


图 11 试件 SWZ-2 滞回曲线

Fig. 11 Hysteresis Curves of Specimen SWZ-2

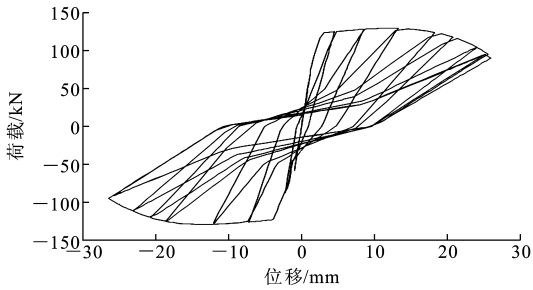


图 12 试件 SPW1 的滞回曲线

Fig. 12 Hysteresis Curves of Specimen SPW1

各参数建议取值为: $\alpha<4, 0.3\leq\beta_1\leq0.55, 0.01\leq\beta_2\leq0.30, 0.25\leq\gamma\leq0.50$ 。

5 结 语

(1)本文深入研究了 Park 恢复力模型 4 个参数对 RC 剪力墙构件的强度、刚度、卸载刚度、耗能和等效粘滞阻尼的影响规律及影响程度,其中刚度退化参数 α 对剪力墙构件的卸载刚度、耗能及等效粘滞阻尼有较大影响;基于延性的强度退化参数 β_1 对构件的强度有较大影响,对耗能及等效粘滞阻尼有中度影响;基于能量的强度退化参数 β_2 对构件的各项抗震指标均有轻微影响;滑移退化参数 γ 对构件的耗能及等效粘滞阻尼有较大影响。

(2)本文结合具体实例对参数修正的结果进行了验证,并给出针对 RC 剪力墙 4 个退化参数的取值范围,得到 RC 剪力墙 Park 恢复力模型各参数建议取值为: $\alpha<4, 0.3\leq\beta_1\leq0.55, 0.01\leq\beta_2\leq0.30, 0.25\leq\gamma\leq0.50$ 。

参考文献:

References:

[1] 张松,吕西林,章红梅. 钢筋混凝土剪力墙构件恢复力模型[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2009,25(4):644-649.
ZHANG Song, LU Xi-lin, ZHANG Hong-mei. Experimental and Analytical Studies on Resilience Models

- of RC Shear Walls[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University; Natural Science, 2009, 25(4): 644-649.
- [2] PARK Y J, REINHORN A M, KUNNATH S K. IDARC: Inelastic Damage Analysis of Reinforced Concrete Frame-shear-wall Structures [R]. Buffalo: State University of New York at Buffalo, 1987.
- [3] REINHORN A M, ROH H, SIVASELVAN M, et al. IDARC 2D Version 7. 0: A Program for the Inelastic Damage Analysis of Structures [R]. Buffalo: State University of New York at Buffalo, 2009.
- [4] 雷拓, 钱江, 刘成清. 基于精细有限元分析的既有 RC 框架结构破坏机理[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45(1): 214-222.
- LEI Tuo, QIAN Jiang, LIU Cheng-qing. Failure Mechanism of an Existing RC Frame Structure Based on Detailed Finite Element Analysis[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014, 45(1): 214-222.
- [5] 雷拓, 钱江, 刘成清. 混凝土损伤塑性模型应用研究[J]. 结构工程师, 2008, 24(2): 22-27.
- LEI Tuo, QIAN Jiang, LIU Cheng-qing. Application of Damaged Plasticity Model for Concrete[J]. Structural Engineers, 2008, 24(2): 22-27.
- [6] 刘成清, 施卫星, 赵世春. 基于试验测量的高层结构整体抗震损伤评估[J]. 建筑科学, 2012, 27(8): 8-11.
- LIU Cheng-qing, SHI Wei-xing, ZHAO Shi-chun. Seismic Damage Assessment of High-rise Structures Based on Experimental Measurements [J]. Building Science, 2012, 27(8): 8-11.
- [7] 党像梁, 吕西林, 周颖. 底部开水平缝摇摆剪力墙抗震性能分析[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(5): 182-189.
- DANG Xiang-liang, LU Xi-lin, ZHOU Ying. Study on Seismic Performance of a Rocking Wall with Bottom Horizontal Slits[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(5): 182-189.
- [8] 黄志华, 吕西林, 周颖. 钢筋混凝土剪力墙的变形能力及基于性能的抗震设计[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(5): 86-93.
- HUANG Zhi-hua, LU Xi-lin, ZHOU Ying. Deformation Capacity and Performance-based Seismic Design for Reinforced Concrete Shear Walls [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(5): 86-93.
- [9] 李晓蕾. 高层建筑短肢剪力墙结构的力学模型与试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
- LI Xiao-lei. Mechanical Model and Test Study of High-rise Building on Short-leg Shear Wall Structure [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011.
- [10] 韦宏, 龚正为, 方小丹, 等. 一字形短肢剪力墙结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(3): 71-74.
- WEI Hong, GONG Zheng-wei, FANG Xiao-dan, et al. Experimental Research on Seismic Performance of Short-pier Shear Wall Structure with Rectangular Section[J]. Building Structure, 2010, 40(3): 71-74.
- [11] SCOTT B D, PARK R, PRIESTLEY M J N. Stress-strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates[J]. ACI Journal Proceedings, 1982, 79(1): 13-27.
- [12] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- GUO Zhen-hai, SHI Xu-dong. Reinforced Concrete Theory and Analyse [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [13] LU X L, YU Y, TANAKA K, et al. Experimental Study on the Seismic Behavior in the Connection Between CFRT Column and Steel Beam[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2000, 9(4): 365-374.
- [14] VARMA A H, RICLES J M, SAUSE R, et al. Seismic Behavior and Modeling of High-strength Composite Concrete Filled Steel Tube (CFT)[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2002, 58(5): 725-758.
- [15] NAKANISHI K, KITADA T, NAKAI H. Experimental Study on Deterioration of Ultimate Strength and Ductility of Damage Concrete Filled Steel Box Columns[C]// Association for International Cooperation and Research in Steel-concrete Composite Structures. Proceedings of the 4th ASCCS International Conference on Steel-concrete Composite Structures. Kosice: Association for International Cooperation and Research in Steel-concrete Composite Structures, 1994: 127-130.
- [16] 张彬彬, 曹万林, 张建伟, 等. 双向单排配筋 Z 形剪力墙抗震性能试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2011, 33(5): 45-52.
- ZHANG Bin-bin, CAO Wan-lin, ZHANG Jian-wei, et al. Experimental Study on Seismic Performance of Z-shear Wall Structure with Bidirectional Single Row of Steel Bars [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2011, 33(5): 45-52.