

密肋复合墙体双参数地震损伤模型研究

姚谦峰¹, 马静¹, 黄炜^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 710055, 西安; 2. 西安交通大学土木工系, 710049, 西安)

摘要: 结合损伤力学的基本原理和密肋壁板结构的自身特点, 采用刚度退化与规格化滞回耗能的非线性组合, 提出了适用于密肋复合墙体的双参数地震损伤模型; 通过对密肋复合墙体进行拟动力试验研究, 分析了墙体的动力反应、滞回曲线和骨架曲线, 确定了地震损伤模型参数; 最后给出了密肋复合墙体在不同震害等级时的损伤指数范围和墙体三水准抗震设计的地震损伤目标建议. 理论分析和试验结果表明: 密肋复合墙体在遭受小震或中震后, 具有稳定的水平承载能力及良好的耗能性能, 在遭受大震后仍具有良好的抗倒塌能力.

关键词: 密肋复合墙体; 拟动力; 地震损伤模型; 损伤指数

中图分类号: TU352.1; O346.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)07-0852-05

Two-Parameter Earthquake Damage Model of Multi-Ribbed Composite Wall

Yao Qianfeng¹, Ma Jing¹, Huang Wei^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;

2. Department of Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A two-parameter earthquake damage model of multi-ribbed composite wall is presented based on the damage mechanics and the characteristics of multi-ribbed slab structure. Two modeling parameters are obtained by analyzing the dynamic response and hysteretic curves from the pseudo-dynamic experiment of multi-ribbed composite wall. The performance objective of three-level seismic design for multi-ribbed composite wall is classified in the light of the calculation of damage indices range to different damage levels. It is shown that the multi-ribbed composite wall has steady lateral capacity and good energy dissipation character when subjected to minor or medium earthquake and expected anti-collapse performance when exposed in great earthquake.

Keywords: multi-ribbed composite wall; pseudo-dynamic; earthquake damage model; damage index

密肋壁板结构是一种轻质、高强、节能、抗震的建筑物新体系, 主要由预制密肋复合墙板与隐型外框及楼盖现浇而成. 边框柱(连接柱)和暗梁形成的隐型框架连接, 约束着密肋复合墙板, 从而形成密肋复合墙体, 成为密肋壁板结构的主要受力构件. 密肋复合墙体是以截面及配筋较小的混凝土框格为骨架, 内嵌以炉渣、粉煤灰等工业废料为主要原料的加气硅酸盐砌块预制而成的^[1-2].

如何评价在地震作用下结构的损伤程度, 一直

是地震工程研究领域的一个关键问题^[3-4]. 近年来, 国内外的研究者通过试验及理论分析, 提出了一些关于砌体结构、混凝土结构以及钢结构的地震损伤模型, 而密肋壁板结构作为一种新型的结构体系, 在地震损伤模型方面的研究仍是空白. 本文在分析现有的破坏准则以及几种双参数地震破坏准则的基础上, 结合损伤力学的基本原理和密肋壁板结构的自身特点, 采用刚度退化与规格化滞回耗能的非线性组合, 提出了适用于密肋壁板结构的密肋复合墙体

双参数地震损伤模型,并通过对5榀墙板的拟动力荷载试验分析确定了模型参数,最后给出了密肋复合墙体在不同震害等级时的损伤指数和墙体三水准抗震设计的地震损伤目标建议。

1 现有的几种双参数地震损伤模型

目前,被地震工程界普遍接受的是 Park 等人^[5-6]基于大量钢筋混凝土梁柱破坏试验建立起来的规格化最大位移和规格化滞回耗能线性组合的双参数地震破坏模型,其表达式为

$$D = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \beta \frac{\int dE}{F_y \delta_u} \quad (1)$$

式中: D 为结构的损伤指数; δ_m 为地震作用下构件或结构的最大变形; δ_u 为单调荷载作用下构件或结构的极限变形; F_y 为屈服强度计算值; $\int dE$ 为累积滞回耗能; β 为循环荷载影响系数。

江近仁等^[7]通过对砖墙破坏试验结果的分析,提出了一种适用于砖结构的双参数破坏准则

$$D = \left[\left(\frac{X_m}{X_Y} \right)^2 + 3.67 \left(\frac{\epsilon}{Q X_Y} \right) \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中: X_m 为房屋的最大位移均值; X_Y 为结构的极限变形; ϵ 为累积滞回耗能; Q 为屈服强度计算值。

欧进萍等^[8]同样采用最大变形与累积耗能的组合,提出了一种用于钢结构的双参数破坏模型

$$D = \left(\frac{X_{mj}}{X_{uj}} \right)^\beta + \left(\frac{\epsilon_j}{\epsilon_{uj}} \right)^\beta \quad (3)$$

式中: X_{mj} 为结构层的最大变形; X_{uj} 为第 j 层的极限变形; ϵ_j 为第 j 层的极限滞回耗能; β 为一正整数。

袁泉等^[9]提出了一种用于密肋复合墙板的双参数破坏模型

$$D = (1-\beta) \frac{\delta_m}{\delta_u} + \beta \frac{E_i}{F_y \delta_u} \quad (4)$$

式中符号的意义与式(1)中的相同, E_i 与式(1)中的 $\int dE$ 意义相同。

2 密肋复合墙体双参数地震损伤模型

在上述所有双参数破坏准则中,绝大多数模型都是由 Park 的最大变形-累积耗能模型演化而来,只是在组合形式上各不相同。本文在此提出针对密肋复合墙体3阶段受力特点、同时反映首次超越破坏与累积损伤破坏的密肋复合墙体双参数地震损伤

模型,该模型不同于 Park 模型,是用最大变位处卸载刚度的退化与规格化滞回耗能这2个指标来联合表征损伤指数的。

2.1 模型的推导

墙体在循环受力过程中,应变 ϵ 可分解为可逆应变 ϵ_e 和不可逆应变 ϵ_i ,即

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_i \quad (5)$$

ϵ_i 由塑性应变 ϵ_p 和由于微裂缝不可闭合而形成的损伤残余应变 ϵ_d 组成,故总应变可以写成

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p + \epsilon_d \quad (6)$$

根据损伤前后的应变等效并引入虎克定律,式(5)可写为

$$\sigma = E(1-D)\epsilon_e = E(1-D)(1-\epsilon_p - \epsilon_d) \quad (7)$$

将含唯象损伤演化构件的力-位移关系比拟式(7)所表达的基于不可逆热力学内变量理论得出的含损伤材料的本构方程,有如下关系(同样可由热力学内变量理论推得)

$$F = K_0(1-D)\Delta_e = K_0(1-D)(\Delta - \Delta_p - \Delta_d) \quad (8)$$

式中: F 为构件衰减后的抗力; K_0 为构件初始弹性刚度; Δ 、 Δ_e 、 Δ_p 、 Δ_d 分别为构件在某一反应时刻的总位移、弹性可恢复位移、材料塑性引起的不可逆位移和微裂缝开展引起的不可逆位移。对于钢筋混凝土构件而言, ϵ_d 与 Δ_d 是引起构件各项指标劣化的主要因素,可以认为是损伤源,用这2个指标描述结构损伤是最合适的。然而,这2个变量很难从总变形分量中定量地分离出来,因此难以直接利用。由于 ϵ_d 与 Δ_d 在总的不可逆变形分量中占绝对主导地位,因此在应用中可将总的不可逆应变 ϵ_i 与总的宏观不可逆变形 Δ_i 作为参数,用来描述材料、构件的损伤。将式(8)变形可得

$$D = 1 - \frac{F}{K_0(\Delta - \Delta_p - \Delta_d)} = 1 - \frac{F/\Delta_e}{K_0} = 1 - \frac{K_r}{K_0} \quad (9)$$

式中: K_r 为构件的卸载刚度。

式(7)、式(8)反映了损伤演化引起的材料应力降低及构件抗力衰减,对单调加载而言,可认为式(9)将损伤归结为卸载刚度的退化。由此可见,基于损伤力学原理,刚度退化这一宏观可测指标可以作为损伤参数。

2.2 模型的确定

为充分考虑结构由卸载刚度退化引起的破坏和低周疲劳累积损伤引起的破坏对构件整体破坏程度的贡献,本文参照文献[10]提出的组合方式,同时考

考虑这2种破坏的相关性,得出 D 的表达式为

$$D = D_1 + f(D_1)D_2 \quad (10)$$

式中

$$D_1 = (1 - K_r/K_0)^\alpha \quad (11)$$

$$D_2 = \left(\int dE/Q_y \delta_u \right)^\beta \quad (12)$$

式(10)体现了首次超越破坏与累积损伤破坏界限的相互影响,较为合理。

$f(D_1)$ 反映了当 D_1 较小时破坏主要由耗能控制、 D_1 较大时破坏主要由最大变位处的卸载刚度控制这一破坏机理,当 $D_1 \geq 1$ 时,结构已完全破坏。 $f(D_1) < 0$ 无意义,故规定当 $D_1 > 1$ 时, $f(D_1) = 0$ 。因此, $D \geq 1$ 表示结构(构件)发生倒塌破坏, $D = 0$ 对应于结构(构件)完好。

本文由式(10)的表达方式,将损伤模型表示为

$$D = \left(1 - \frac{K_r}{K_0} \right)^\alpha + \left(\frac{K_r}{K_0} \right)^\alpha \left(\frac{\int dE}{Q_y \delta_u} \right)^\beta \quad (13)$$

式中: K_0 为构件的初始弹性刚度; K_r 为构件的卸载刚度,可按式(14)~(16)计算^[11]

$$K_r = \left(\frac{\Delta_K}{\Delta_r} \right)^{0.6} K_0 \quad \Delta_K < |\Delta_r| \leq \Delta_Y \quad (14)$$

$$K_r = \left(\frac{\Delta_Y}{\Delta_r} \right)^{0.62} K_0 \quad \Delta_Y < |\Delta_r| \leq \Delta_W \quad (15)$$

$$K_r = \left(\frac{\Delta_W}{\Delta_r} \right)^{0.66} K_0 \quad \Delta_W < |\Delta_r| \leq \Delta_U \quad (16)$$

其中 Δ_r 为卸载时墙体的侧移, Δ_K 为开裂荷载 V_K 对应的开裂位移, Δ_Y 为屈服荷载 V_Y 对应的屈服位移, Δ_W 为最大荷载 V_W 对应的最大位移, Δ_U 为破坏荷载 V_U 对应的极限位移; δ_u 为单调荷载作用下构件或结构的极限变形; Q_y 为屈服强度计算值; $\int dE$ 为累积滞回耗能。在该模型中,刚度退化与累积耗能利用系数 α, β 进行非线性组合,使模型更具有一般意义。

2.3 模型参数的确定

本文根据5榀密肋复合墙体拟动力试验的破坏现象及试验数据来确定累积耗能利用系数 α, β 。试验加载图如图1所示。竖向荷载模拟墙体在结构中的实际受力情况,通过出力为500 kN的千斤顶加在分配梁上,经二次分配后加在肋柱上,待竖向荷载稳定后加水平荷载,水平荷载通过反力墙并借助电液伺服作动器施加到墙体顶部。墙板ML5选用EL-centro地震波,持续时间为10 s,数值积分步长为0.02 s,试验按单自由度体系的位移进行控制,输入的地震波峰值加速度分别为0.1g、0.2g、0.4g和

0.8g。不同地面加速度峰值地震波作用下的墙体裂缝图、滞回曲线、骨架曲线分别见图2~图4。

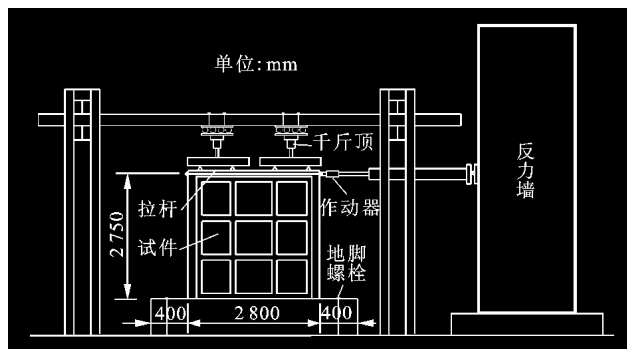


图1 试验加载装置图

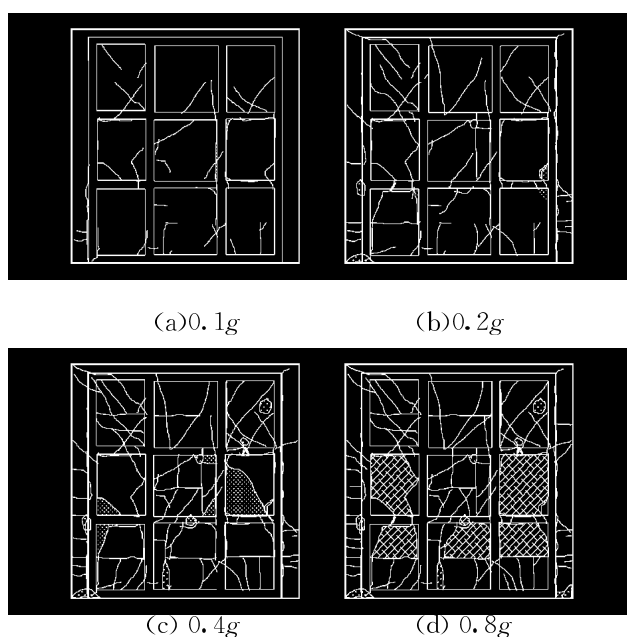


图2 不同地面加速度峰值地震波作用下的墙体裂缝图

从图3可以看出:当输入加速度峰值为0.1g的地震波时,在位移较小的情况下试件基本处于弹性阶段,整体性较好,滞回曲线基本为直线,刚度值几乎不变;当输入加速度峰值为0.2g的地震波时,滞回环的面积增大,出现了残余变形,刚度明显退化;当输入加速度峰值为0.4g的地震波时,裂缝增多,滞回曲线呈反S形,滞回环的面积变得更大,由于墙体中斜裂缝的张翥以及试件剪切变形的影响(包括墙体与底梁间的滑移),荷载-位移曲线出现“捏拢”现象;当输入加速度峰值为0.8g的地震波时,位移成倍增长,滞回环面积更大,并向Z形转变,捏拢趋势更加明显。

墙体在不同加速度峰值地震波作用下的骨架曲线对比见图4,可以看出:墙体在遭受小震和中震后,表现出稳定的水平承载能力及良好的耗能性能;

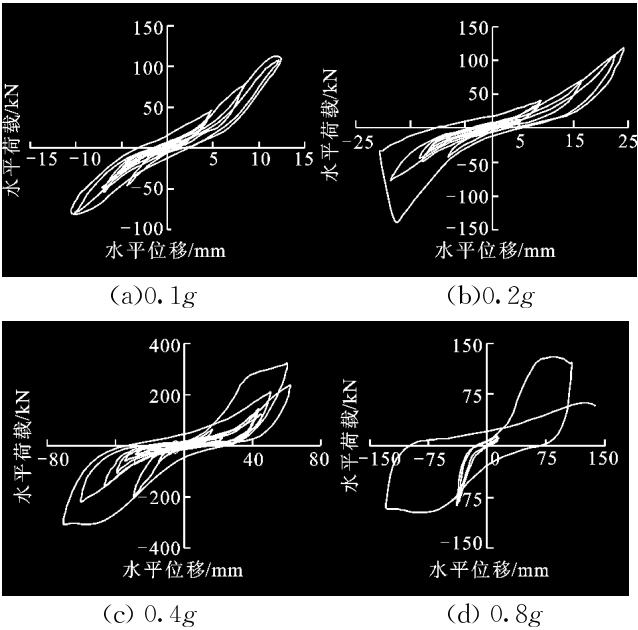


图 3 不同加速度峰值地震波作用下的墙体滞回曲线

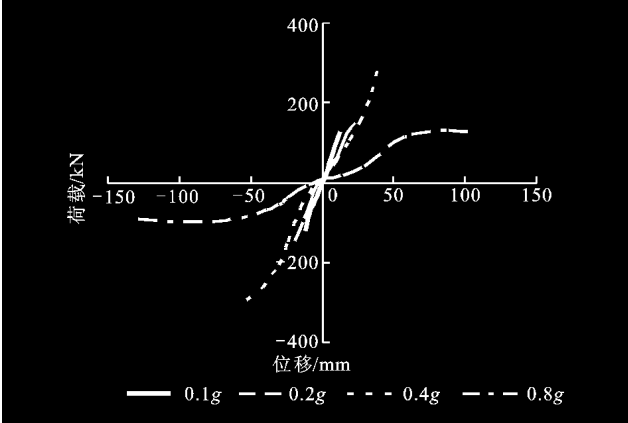


图 4 不同加速度峰值地震波作用下的墙体骨架曲线

墙体在遭受大震后,表现出良好的抗倒塌能力.由于累积损伤的原因,在不同地面加速度峰值地震波的作用下,墙体在相同水平位移下的水平荷载有明显下降.

根据试验结果(见表 1),对上述损伤模型表达式(13)进行回归分析,得到: $\alpha=1.975,\beta=1.932$.考

虑到 α 和 β 与 2 接近,经计算分析发现取为 2 后结果差别不大,因此为便于记忆,可将 α 和 β 均取为 2.

密肋复合墙体双参数地震损伤模型的定量表达式为

$$D = \left(1 - \frac{K_r}{K_0}\right)^2 + \left(\frac{K_r}{K_0}\right)^2 \left(\int dE/Q_y \delta_u\right)^2 \quad (17)$$

3 墙体的损伤评价

3.1 墙体的损伤指数

根据试验结果,本文给出了密肋复合墙体的损伤指数,见表 1.

3.2 不同震害等级时墙体的损伤指数

根据对试验破坏全过程的考察以及对不同状态下损伤指数的研究,本文给出了密肋复合墙体在不同震害等级时的损伤指数和墙体三水准抗震设计的地震损伤目标建议,分别如表 2、表 3 所示.

4 结 论

(1)在分析现有的损伤参数以及几种双参数地震破坏准则的基础上,结合损伤力学的基本原理和密肋壁板结构的自身特点,采用刚度退化与规格化滞回耗能的非线性组合,提出了适用于密肋复合墙体的双参数地震损伤模型.

(2)通过对 5 榀墙板的拟动力试验研究,分析了墙体的动力反应、滞回曲线和骨架曲线.

(3)根据密肋复合墙体的双参数地震损伤模型,并结合试验结果分析,最终确定模型参数为 $\alpha=1.975,\beta=1.932$.

(4)根据对试验破坏全过程的考察以及不同状态下损伤指数的研究,给出了密肋复合墙体在不同震害等级时的损伤指数和墙体三水准抗震设计的地震损伤目标建议,为今后密肋壁板结构的设计、研究提供了理论依据.

表 1 密肋复合墙体的试验结果及损伤指数

编号	公共指数		砌块开裂时				墙体屈服时			墙体极限状态		
	δ_u/mm	Q_y/kN	$K_0/\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$	$K_r/\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$	$\int dE/\text{kN}\cdot\text{mm}$	D	$K_r/\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$	$\int dE/\text{kN}\cdot\text{mm}$	D	$K_r/\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$	$\int dE/\text{kN}\cdot\text{mm}$	D
SW1	80.0	265	107.5	107.5	0	0	57.0	15 358	0.378 1	37.1	39 358	0.837 8
SW2	37.2	220	148.4	148.4	0	0	97.9	5 456	0.319 9	53.8	15 456	0.871 5
SW3	53.2	78	38.9	38.9	0	0	28.8	1 656	0.158 2	9.9	10 651	0.987 8
SW4	48.0	82	27.2	27.2	0	0	14.4	2 776	0.370 2	4.5	12 775	0.981 4
SW5	120.0	260	47.2	47.2	0	0	26.2	17 642	0.305 8	9.1	18 554	0.867 6

注:为使损伤指数 D 的值精确,按 $\alpha=1.975,\beta=1.932$ 计算 D 值.

表 2 墙体不同震害等级时的损伤指数范围

地震加速度	震害等级	震 害 描 述	损伤指数范围
0.1g	基本完好	肋梁、肋柱中没有出现裂缝,砌块中也没有明显的裂缝.	0.00~0.10
	轻微破坏	墙体中层中砌块内沿砌块对角线出现比较明显的斜裂缝,并开始向肋梁内逐步延伸,其他砌块中也出现较均匀的细裂缝.	0.10~0.25
0.2g	中等破坏	砌块内的裂缝增多且延伸至肋梁、肋柱,墙体中的裂缝分布比较均匀,发展比较缓慢、充分.	0.25~0.55
0.4g		墙体中的斜裂缝已在肋梁、肋柱中贯通,并延伸至框柱,砌块破碎、剥落现象比较明显,开始逐步退出工作.	0.55~0.95
0.8g	倒塌	边框柱及肋梁、肋柱钢筋屈服,混凝土压酥,墙体结构局部丧失功能.	>0.95

表 3 密肋壁板结构三水准抗震设计的地震损伤目标

地震设防水准	小震不坏	中震可修	大震不倒
相应的地震破坏等级	基本完好	轻微破坏和中等破坏	严重破坏、倒塌或近似倒塌
一般结构损伤指数允许值	0.00~0.10	0.10~0.55	0.55~0.90

参考文献:

- [1] 马静,黄伟,姚谦峰.密肋壁板结构中复合墙体的竖向承载力及稳定性研究[J].西安建筑科技大学学报,2007,39(2):187-192.
Ma Jing, Huang Wei, Yao Qianfeng. Research on vertical bearing capacity and stability of a composite wall in multi-ribbed slab structure [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology, 2007, 39 (2): 187-192.
- [2] 黄伟,姚谦峰,章宇明,等.内填砌体的密肋复合墙体极限承载力计算[J].土木工程学报,2006,39(3):68-75.
Huang Wei, Yao Qianfeng, Zhang Yuming, et al. Calculation on ultimate bearing capacity of multi-ribbed composite walls infilled with blocks [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 68-75.
- [3] 何政.钢筋混凝土结构非线性分析及地震损伤性能设计与控制[D].上海:同济大学土木工程学院,2001.
- [4] Williams M S, Sexsmith R G. Seismic assessment of concrete bridge using inelastic damage analysis [J]. Engineering Structure, 1997, 19 (3): 208-216.
- [5] Park Y J, Ang H S. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete [J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 1985, 111 (4): 722-739.
- [6] Park Y J, Ang H S. Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings [J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 1985, 111(4): 740-757.
- [7] 江近仁,孙景江.砖结构的地震破坏模型[J].地震工程与工程振动,1987,7(1):20-26.
Jiang Jinren, Sun Jingjiang. Earthquake damage model of brick structure [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1987, 7(1): 20-26.
- [8] 欧进萍,牛荻涛,王光远.多层非线性抗震钢结构的模糊动力可靠性分析与设计[J].地震工程与工程震动,1990,10(4):27-37.
Ou Jinping, Niu Ditao, Wang Guangyuan. Fuzzy dynamical reliability analysis and design of multi-storey nonlinear seismic steel structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1990, 10(4): 27-37.
- [9] 袁泉,姚谦峰,贾英杰.密肋复合墙板的恢复力模型与损伤模型研究[J].四川建筑科学研究,2004,30(4):5-7.
Yuan Quan, Yao Qianfeng, Jia Yingjie. Study on hysteretic model and damage of multi-rib wall [J]. Sichuan Building Science, 2004, 30(4): 5-7.
- [10] 杜修力,欧进萍.建筑结构地震破坏评估模型[J].世界地震工程,1991,7(3):52-58.
Du Xiuli, Ou Jinping. Seismic damage model of structure [J]. World Earthquake Engineering, 1991, 7(3): 52-58.
- [11] 黄伟.密肋复合墙体抗震性能及设计理论研究[D].西安:西安建筑科技大学土木工程学院,2004.

(编辑 葛赵青)