

文章编号: 1000-5013(2010)01-0088-07

# 叠合板式剪力墙恢复力模型特征参数计算方法

连 星, 叶献国, 蒋 庆

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 在低周反复荷载下,对 4 个叠合板式剪力墙和 2 个普通剪力墙进行对比试验,系统分析试件的刚度退化趋势.基于理论公式及试验数据,建立往复荷载作用下构件的三折线型恢复力模型,与试验结果较为吻合.基于小波变换原理,提出一种新的基于小波变换的恢复力模型特征参数的计算方法.该方法简便,可较好地反映试件在各阶段刚度的变化,更符合刚度退化的实际情况.

**关键词:** 叠合板式剪力墙;刚度;恢复力模型;特征参数

**中图分类号:** TU 398<sup>+</sup>.201

**文献标识码:** A

叠合板式住宅在欧洲和其他工业发达国家得到广泛使用.该结构体系的优点是设计简单,施工方便、快捷,而且对环境的影响小,可极大地提高住宅建设的工业化、产业化程度,是一种极具市场前景的绿色住宅体系.叠合板式剪力墙结构体系是融合预制叠合构件(叠合墙板、叠合楼板)、全现浇构件(墙体约束边缘构件、暗柱、连梁、异形柱、楼梯、阳台、雨棚、挑檐等)于一体的结构体系.恢复力是指结构或构件在去掉外力以后恢复变形的能力.恢复力模型的主要特征反应了结构的受力特性,概括了结构或构件的刚度、强度、延性、耗能等力学特性<sup>[1]</sup>.这些都是衡量结构抗震性能的重要指标,是进行结构弹塑性动力分析的重要依据.本文介绍一种新型叠合板式剪力墙住宅体系,对叠合混凝土墙板进行系统分析,并基于小波变换原理,提出一种新的基于小波变换的恢复力模型特征参数的计算方法.

## 1 试验材料与方法

设计制作 6 片剪力墙试件,墙截面尺寸相同,宽为 1.8 m,厚为 0.2 m,高为 3.2 m.试件 W-1, W-4 为普通全现浇混凝土剪力墙,试件 W-2, W-5, W-3, W-6 为叠合混凝土剪力墙.其中:试件 W-2, W-5 包含现浇端柱,试件 W-3, W-6 边缘约束措施由暗柱组成.各试件的配筋形式如图 1 所示.

现浇剪力墙试件采用国产 C30 混凝土,受力钢筋为国产 HRB400 钢筋.叠合板式剪力墙试件的预制部分在德国生产,其混凝土德国标号为 C35/45,灌芯部分现浇国产 C30 混凝土.预制墙板内受力钢筋及

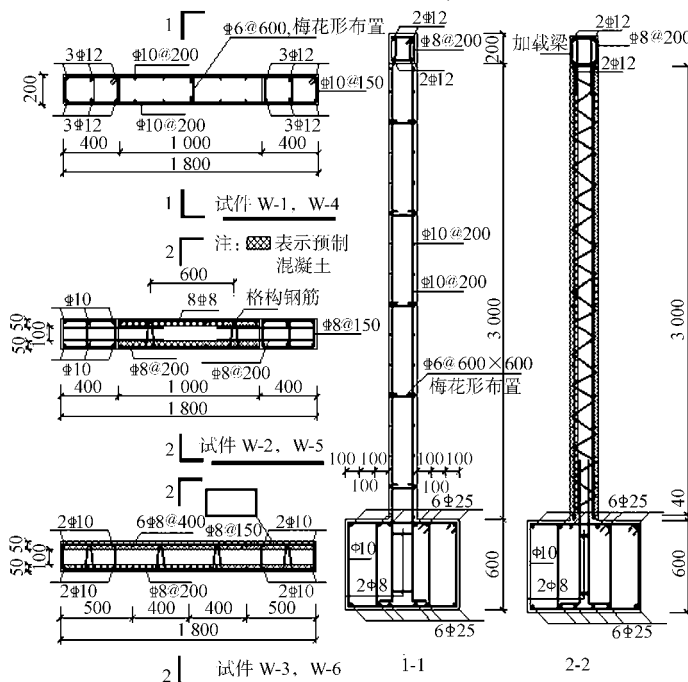


图 1 试件配筋示意图(单位:mm)

Fig. 1 Reinforcement details of the specimens(unit:mm)

收稿日期: 2009-05-04

通信作者: 叶献国(1954-),男,教授,主要从事建筑结构设计和防震减灾的研究. E-mail: yexg428@yahoo.com.cn.

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划项目(90715016);建设部科学技术计划项目(2008-K3-2)

基础插筋采用德国生产的 BST500 钢筋。

试验为在恒定竖向荷载下施加水平低周反复荷载的拟静力试验。竖向加载装置由反力梁、千斤顶和锚杆构成,千斤顶施加的轴力作用于墙体顶部加载梁上表面的中心,由承压钢板向下传递扩散到墙体全截面上。水平加载为墙顶单点加载,采用 1 000 kN 电液伺服加载系统(美国 MTS 公司)施加水平荷载。水平加载装置由反力墙、电液伺服作动器、匀载钢板和拉杆构成。电液伺服作动器水平安装在反力墙上,作用于墙体顶部加载梁端部的中心位置,如图 2 所示。

加载制度按照 JGJ 101 - 1996《建筑抗震试验方法规程》的相关规定实行。试件 W-1, W-2, W-3 试验时,首先在墙体顶部施加 730 kN 的竖向荷载(轴压比为 0.1),试件 W-4, W-5, W-6 实验时未施加竖向荷载。水平加载方式为双向反复加载,加载分两个阶段<sup>[2]</sup>。第一、二阶段分别采用力和位移控制,按屈服时顶点位移的倍数逐级加载,每级循环 3 次,直至试件承载力下降到最大水平承载力的 85 % 为止。

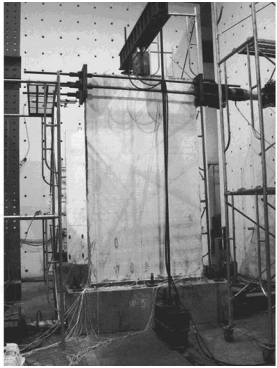


图 2 加载装置  
Fig. 2 Loading setup

2 试验结果

(1) 在屈服荷载之前,6 片剪力墙均先在墙体边缘出现水平裂缝。随着荷载的加大,墙体边缘水平裂缝数目逐渐增加,一些水平裂缝逐渐延伸发展成弯剪斜裂缝;斜裂缝基本上是 45° 走向,墙体混凝土无脱落现象发生,裂缝宽度很小,试件基本完好。

(2) 屈服荷载之后,随着荷载的继续增加,墙体出现一定数量的裂缝,已有裂缝延伸并逐渐加宽,在试件中部出现 X 形交叉斜裂缝。剪力墙在墙体与基础底座连接处均出现一条较为明显的水平裂缝,并随着荷载的增大,裂缝不断开展直至贯通。

(3) 试件达到最大水平荷载时,墙体中几条主要裂缝延伸开展至贯通,裂缝加宽速度迅速变快。在加载后期,墙体与基础底座连接处裂缝宽度迅速增大,受拉侧墙体出现被拉起的现象,底部截面受压区混凝土开始被压碎,钢筋露出,试件破坏严重。

(4) 试验结束时,墙中受力钢筋屈服,底部截面受压区混凝土压碎,受压区边缘处的受力主筋出现压屈外鼓现象,部分箍筋发生颈缩。由于基础顶面采取了提高连接强度的构造措施,在整个试验过程中,没有发现剪力墙和基础顶面出现明显的相对剪切滑移。

试件 W-4, W-5, W-6 墙体破坏过程,分别与试件 W-1, W-2, W-3 相类似。但由于未施加竖向荷载,试件 W-4, W-5, W-6 比试件 W-1, W-2, W-3 出现的裂缝要多,墙体的屈服荷载与极限荷载分别比试件 W-1, W-2, W-3 显著降低。试件的最终破坏形态,如图 3 所示。

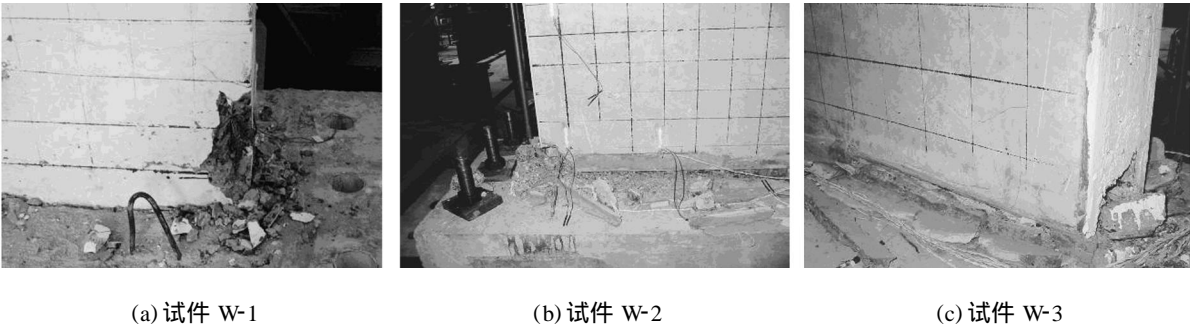


图 3 试件最终破坏形态

Fig. 3 Ultimate failure of the specimens

各剪力墙试件水平荷载-顶点位移关系滞回曲线,如图 4 所示。6 个试件的滞回环开始均为梭形,然后逐渐发展到弓形及反 S 形。滞回曲线均未见反 Z 形,表明试件到破坏都未出现大量剪切变形及滑移。滞回曲线的捏缩现象越严重,构件的延性也随之降低。叠合板式剪力墙试件的滞回环比普通剪力墙的“捏缩”现象更为严重,表明试件从加载到破坏塑性开展不如普通剪力墙试件全面。

在反向加载初期,可以观察到各试件刚度有所下降,估计是有些裂缝尚未闭合,仅由钢筋与未开裂

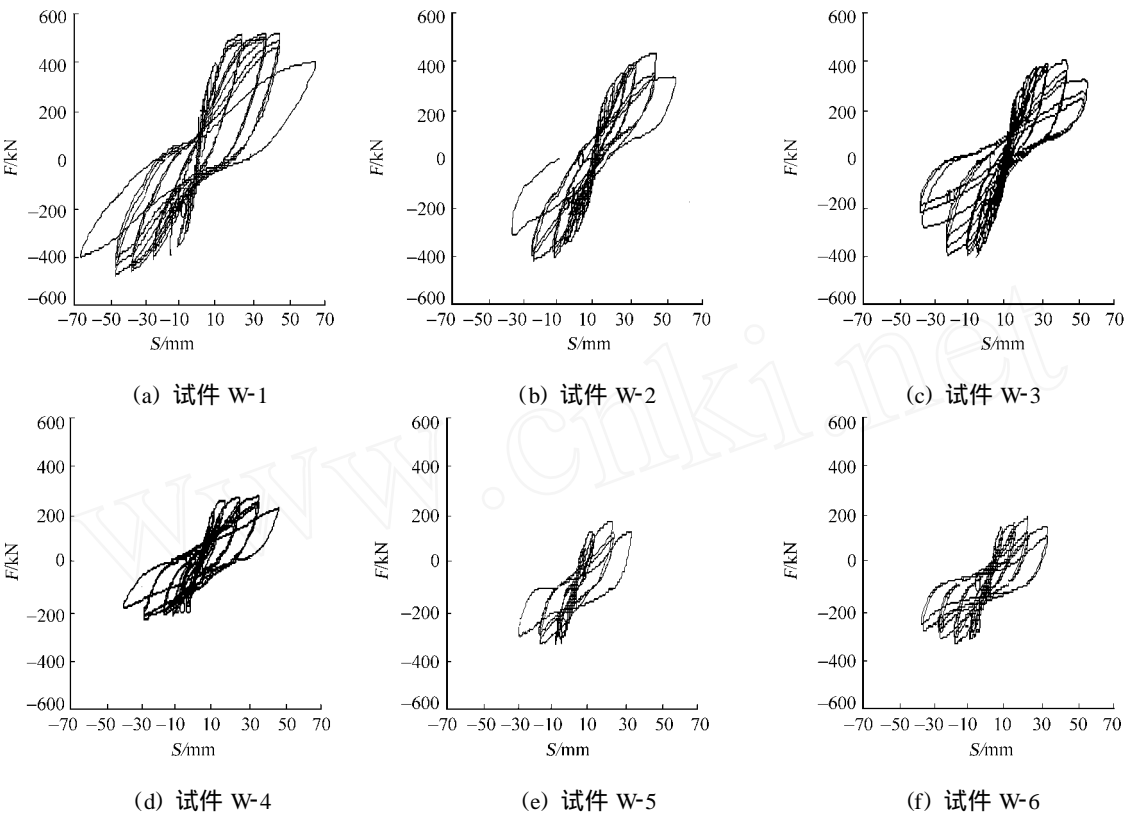


图 4 各试件力-位移关系滞回曲线

Fig. 4 Load-displacement hysteretic curves for the specimens

的混凝土承担外力作用,试件刚度很小,一旦裂缝完全闭合,则已开裂混凝土又参加工作,试件刚度增大.在达到开裂荷载以后,各试件都表现出显著的刚度退化,残留位移越来越大,到极限荷载时,墙体刚度急剧下降,残留位移很大,墙体丧失承载能力.无轴力的剪力墙试件刚度退化更快.这是由于缺少竖向压力的有效约束,骨料咬合力较小,在裂缝出现后,钢筋的滑移量将进一步增大.

3 墙体抗侧刚度的理论计算

要建立剪力墙构件的恢复力模型,首先必须确定墙体的弹性刚度.剪力墙在水平荷载作用下,截面上各部分的应变近似服从平截面假定,其侧移可按整体悬臂墙的计算方法计算.试验模拟剪力墙边界条件可认为一端固定,另一端自由.墙顶位移( )可看成由剪切变形(  $j$  )和弯曲变形(  $w$  )组成<sup>[3]</sup>. 即有

$$\begin{aligned} &= w + j = \frac{PH^3}{3EI} + \frac{PH}{GA}, \\ K = \frac{P}{\Delta} &= \left[ \frac{PH^3}{3EI} + \frac{PH}{GA} \right]^{-1}. \end{aligned}$$

实际情况中,剪力墙是在一定轴压力状态下工作.考虑到轴压比对弹性刚度的影响,可得到剪力墙弹性刚度计算公式为

$$K = \left[ \frac{PH^3}{3EI} + \frac{PH}{GA} \right]^{-1} \cdot \left( 1 + \frac{N}{f_c bh} \right). \tag{1}$$

式(1)中: $h, b$ 为剪力墙截面高度、宽度,  $H$ 为剪力墙高度,  $A$ 为剪力墙截面面积,  $P$ 为墙体所受的水平荷载,  $f_c$ 为混凝土轴心抗压强度设计值,混凝土强度等级不同时,取较小值,  $E, G, I$ 为剪力墙的弹性模量、剪切模量、惯性矩.弹性刚度计算值(  $K_c$  )与试验实测值(  $K_m$  )对比,如表 1 所示.

表 1 弹性刚度计算值与实测值对比

Tab. 1 Comparison of elastic stiffness between calculation values and test results

试件	$K_c / \text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	$K_m / \text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	$\frac{K_c}{K_m}$
W-1	237.34	243.90	0.97
W-2	223.48	214.27	1.04
W-3	223.48	222.22	1.01
W-4	215.77	214.29	1.01
W-5	208.86	200.00	1.04
W-6	208.86	206.90	1.01

4 墙体刚度实测值和衰减过程分析

随着加载位移不断增加,试件的损伤累积会造成刚度随循环周次的增加而逐渐降低. 为了定量反映各次循环时试件的刚度退化程度,定义每级加载下的割线刚度<sup>[4]</sup>为

$$K_i = \frac{P_i / + / - P_i /}{\Delta_i / + / - \Delta_i /}$$

上式中:  $K_i$  为第  $i$  级循环荷载下的割线刚度;  $P_i$ ,  $-P_i$  分别为第  $i$  级循环荷载时正向、负向水平荷载;  $\Delta_i$ ,  $-\Delta_i$  为第  $i$  级循环荷载时正向、负向水平荷载作用下的水平位移.

各试件割线刚度的退化曲线,如图 5 所示. 从图 5 可知,剪力墙的刚度衰减过程可分为如下 3 个阶段: (1) 从加载初期到开裂为刚度速降阶段; (2) 从开裂到明显屈服为刚度次速降阶段; (3) 从明显屈服到最大弹塑性变形为刚度缓降阶段.

剪力墙在相同轴压比下初始弹性刚度非常接近,且开裂刚度相差不大,说明初始弹性刚度主要由混凝土强度、试件尺寸及轴压比决定. 各墙体刚度退化趋势大致相同,初始加载时墙体的刚度均较大,墙体开裂后,刚度迅速退化,这主要是新裂缝不断出现和已有裂缝展开的结果. 极限荷载以后,试件的主要裂缝已经形成,刚度退化相对稳定,此时刚度的退化主要是次裂缝作用的结果. 与现浇混凝土剪力墙试件相比,叠合板式剪力墙试件后期的刚度退化较快. 此外,有轴压力的墙体刚度退化相对迟缓,原因在于轴压力的存在提高了骨料咬合力,裂缝发展较慢.

根据剪力墙刚度衰减的 3 个阶段,为了保证计算的简便和精度,选取建立考虑刚度退化的三线型恢复力模型,如图 6 所示.

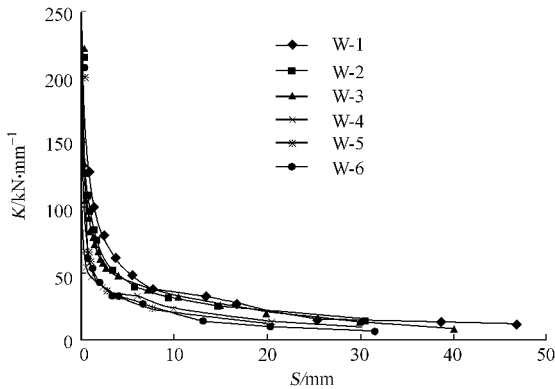


图 5 各试件割线刚度退化曲线

Fig. 5 Curves of secant stiffness degeneration of the specimens

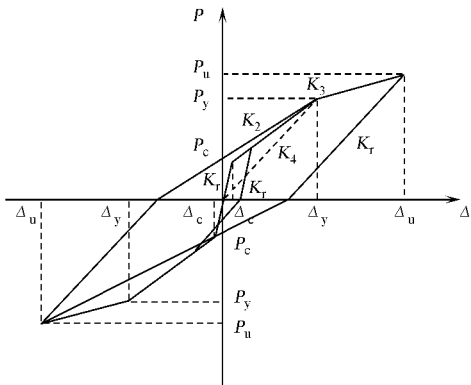


图 6 恢复力模型

Fig. 6 Restoring force model

试验过程中,剪力墙的刚度在水平荷载很小时就开始迅速衰减,到墙体裂缝明显时刚度已退化很多,整个加载过程几乎未观测到弹性阶段. 恢复力模型的第一直线段从加载点开始到开裂点,刚度为  $K_1$ ,  $K_1 = \alpha_1 K_0$ ; 墙体开裂后到屈服点为恢复力模型的第二直线段,刚度为  $K_2$ ,  $K_2 = \alpha_2 K_1$ ; 屈服荷载至极限承载力为恢复力模型的第三直线段,刚度为  $K_3$ ,  $K_3 = \alpha_3 K_1$ . 初始弹性刚度  $K_0$  可按式(1)计算.

$K_4$  为屈服时的割线刚度. 卸载线取为斜直线,即

$$K_r = K_1, \quad P > P_y.$$
$$K_r = K_4, \quad P_y < P < P_u.$$

再加载线由一个方向卸荷至  $P=0$ ,以此时的残余变形为起点往另一方加载,与上一循环曾达到的最高点直线相连. 如果该最高点未超过开裂点或钢筋屈服点,则与此特征点相连,然后再沿骨架线前进.

5 基于小波变换的试件刚度分析

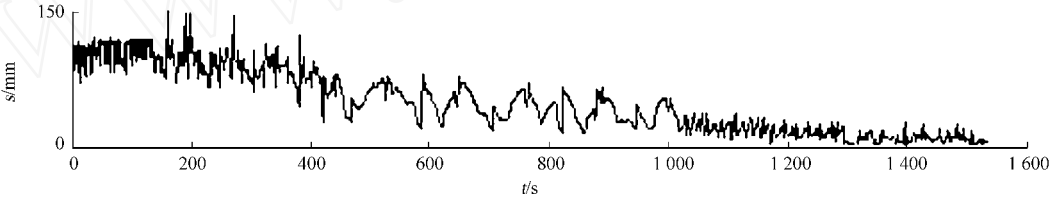
确定恢复力模型需要 3 个关键参数: (1)  $\alpha_1$ , 即从初始弹性到开裂过程中的刚度衰减系数; (2)  $\alpha_2$ , 即从开裂到明显屈服过程中的刚度衰减系数; (3)  $\alpha_3$ , 即从明显屈服到极限荷载过程中的刚度衰减系数. 国内外在建立恢复力模型时,刚度衰减系数通常由试验数据统计分析得到,有

$$_1 = K_c / K_0, \quad _2 = K_f / K_c, \quad _3 = K_u / K_c.$$

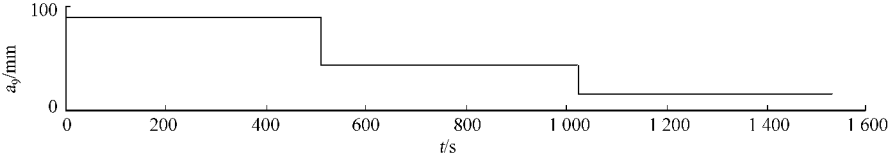
一般情况下,  $K_0$  取试件的初始弹性刚度,  $K_c$  取试件的开裂割线刚度,  $K_f$  取试件的屈服割线刚度,  $K_u$  取试件的极限荷载割线刚度. 即以试件开裂割线刚度代表从初始弹性到开裂整个过程中的刚度, 屈服割线刚度代表从开裂到明显屈服整个过程中的刚度, 极限荷载割线刚度代表从明显屈服到极限荷载整个过程中的刚度.

这与实际情况是不可能相符的, 如试件从初始弹性到开裂整个过程中的刚度衰减达 50 % 以上, 整个阶段的刚度取开裂割线刚度是明显偏于保守的. 针对恢复力模型特征参数计算这一不足之处, 提出了一种基于小波变换的特征参数确定方法.

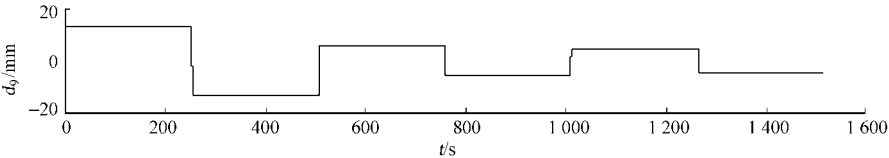
在结构分析时, 结构的刚度模型采用三折线模式, Harr 小波的小波函数为矩形方波<sup>[5-6]</sup>. 经过 Harr 小波分解重构后, 低频信号的概貌形式与三折线一样. 所以, 选择用 Harr 小波, 对试件 W-1 ~ W-6 在整个试验过程的刚度  $K(t)$  进行 9 层小波分解变换, 得到 6 个试件的概貌信号  $a_9$ , 以及细节信号 (即高频信号, 分别为  $d_9 \sim d_1$ ). 试件 W-1 的刚度  $K(t)$  分解, 如图 7 所示.



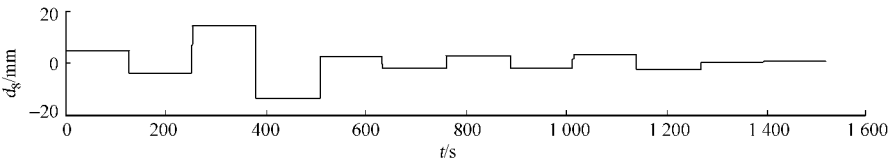
(a) 原始信号



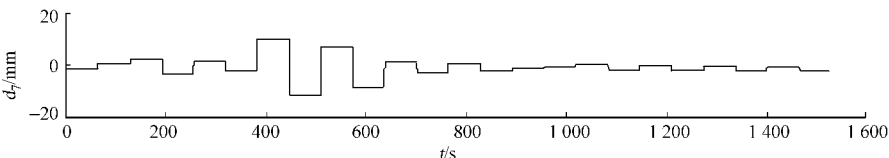
(b) 概貌信号  $a_9$



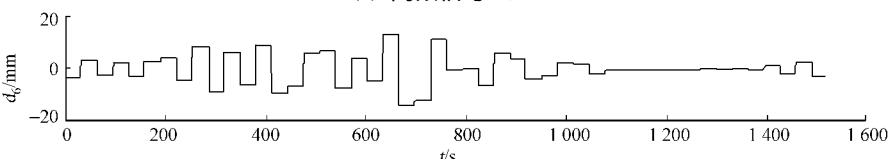
(c) 高频信号  $d_9$



(d) 高频信号  $d_8$



(e) 高频信号  $d_7$



(f) 高频信号  $d_6$

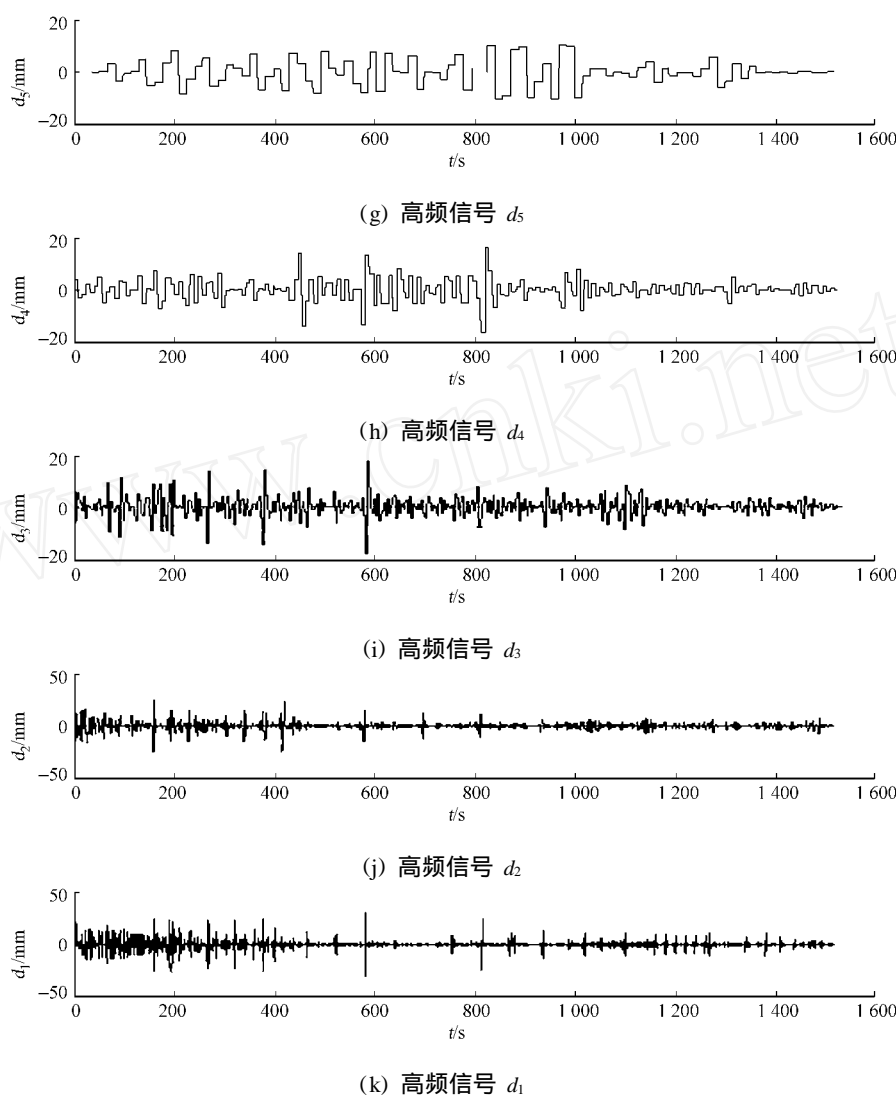


图 7 试件 W-1 的刚度小波分解示意图

Fig. 7 The wavelet transform of specimen W-1 stiffness

概貌信号  $a_0$  中三折线的每一段,依次为试件在初始弹性到开裂过程中,从开裂到明显屈服过程中,从明显屈服到极限荷载过程中原信号(即刚度)的概貌,选其值做为每一阶段刚度的代表值。

试件 W-1 ~ W-6 的各阶段刚度代表值及刚度衰减系数,如表 2 所示。表 2 中:  $K_c$  为试件开裂刚度代表值,  $K_f$  为试件屈服刚度代表值,  $K_u$  为试件极限荷载刚度代表值。

表 2 试件各阶段刚度代表值和刚度衰减系数

Tab.2 Calculation results of stiffness and stiffness degeneration coefficient

墙体编号	$K_0/\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	$K_c/\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	$K_f/\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	$K_u/\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$	1	2	3
W-1	243.90	96.96	47.75	11.95	0.40	0.49	0.12
W-2	214.27	88.58	44.23	15.41	0.41	0.50	0.17
W-3	222.22	90.18	45.46	15.62	0.41	0.50	0.17
W-4	214.29	52.77	35.97	11.79	0.25	0.68	0.22
W-5	200.00	51.09	35.71	11.62	0.26	0.70	0.23
W-6	206.90	52.87	37.00	12.06	0.26	0.70	0.23

当剪力墙轴压比为 0.1 时,初始弹性刚度  $K_0$  可按式(1)计算。开裂前,  $K_1 = {}_1 K_0$ ,在此阶段,普通剪力墙的刚度衰减系数为 0.40,建议取  $K_1 = 0.40 K_0$ ;而叠合板式剪力墙的刚度衰减系数为 0.41,建议取  $K_1 = 0.41 K_0$ 。进入开裂阶段后,  $K_2 = {}_2 K_1$ ,在此阶段,普通剪力墙的刚度衰减系数为 0.49,建议取  $K_2 = 0.49 K_1$ ;而叠合板式剪力墙的刚度衰减系数约为 0.50,建议取  $K_2 = 0.50 K_1$ 。当进入屈服阶段后,  $K_3 = {}_3 K_1$ ,在此阶段,普通剪力墙的刚度衰减系数为 0.12,建议取  $K_3 = 0.12 K_1$ ;而叠合板式剪力墙的

刚度衰减系数为 0.17, 建议取  $K_3 = 0.17 K_1$ .

当剪力墙轴压比为 0 时, 初始弹性刚度  $K_0$  可按式(1)计算. 开裂前,  $K_1 = 1 K_0$ , 在此阶段, 普通剪力墙的刚度衰减系数为 0.25, 建议取  $K_1 = 0.25 K_0$ ; 而叠合板式剪力墙的刚度衰减系数为 0.26, 建议取  $K_1 = 0.26 K_0$ . 当进入开裂阶段后,  $K_2 = 2 K_1$ , 在此阶段, 普通剪力墙的刚度衰减系数为 0.68, 建议取  $K_2 = 0.68 K_1$ ; 而叠合板式剪力墙的刚度衰减系数为 0.70, 建议取  $K_2 = 0.70 K_1$ . 进入屈服阶段后,  $K_3 = 3 K_1$ , 在此阶段, 普通剪力墙的刚度衰减系数约为 0.22, 建议取  $K_3 = 0.22 K_1$ ; 而叠合板式剪力墙的刚度衰减系数为 0.23, 建议取  $K_3 = 0.23 K_1$ .

## 6 结论

通过试验, 得到如下几个主要结论.

(1) 两种采用不同边缘约束措施的叠合板式剪力墙试件, 其刚度退化趋势未表现出明显的差别, 恢复力模型刚度衰减系数取值相同.

(2) 基于理论公式及试验结果建立的往复荷载作用下的构件恢复力模型与试验结果吻合较好, 为对叠合板式剪力墙整体结构进行进一步的弹塑性地震反应分析提供了依据.

(3) 基于小波变换原理, 提出了一种基于小波变换的恢复力模型特征参数的计算方法. 该计算方法简便, 并可较好地反映试件在各阶段刚度的变化.

### 参考文献:

- [1] 陈云涛. 钢筋混凝土结构恢复力特性的分析研究和数字化[D]. 上海: 同济大学, 2002.
- [2] 郭子雄, 刘阳, 杨勇. 框架柱试验结果的震害指数计算模型比较[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2005, 26(2): 145-148.
- [3] 何远宏. Dipy 模网混凝土剪力墙力学性能试验分析与设计研究[D]. 上海: 同济大学, 2004.
- [4] DINEHART D W, SHENTON H W. Model for dynamic analysis of wood frame shear wall[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2000, 126(9): 899-908.
- [5] 侯健. 基于小波变换的结构损伤检测理论与应用方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2005.
- [6] DAUBECHIES I. Ten lectures on wavelet[M]. Philadelphia: Capital City Press, 1992.

## The Calculating Method about Character Parameter of the Superimposed Slab Shear Walls Restoring Force Model

LIAN Xing, YE Xian-guo, JIANG Qing

(School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 23009, China)

**Abstract:** Under low cyclic loading, comparative experimental study on four superimposed slab shear walls and two general shear walls is conducted. The stiffness degeneration of the specimens is analyzed systematically. Based on the theoretic formulas and testing data, the trilinear restoring model under low cyclic load is established, which agrees well with the test results. Based on wavelet transform, a new calculation method about character parameter of the restoring force model is also presented. This concise method could reflect the stiffness change of the specimens at different stages, and also agrees well with the experimental phenomenon of stiffness degeneration.

**Keywords:** superimposed slab shear walls; stiffness; restoring force model; character parameter

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)