密肋复合墙体刚度退化全过程分析

郭 猛，姚谦峰
（北京交通大学土木建筑工程学院，北京 100044）

摘 要：密肋复合墙是密肋壁板结构体系的主要抗侧力构件,复合墙在荷载作用下的刚度退化规律是研究密肋结构体系抗震性能的基础性问题之一. 由 1/2 比例密肋复合墙体低周反复荷载试验,得出了复合墙各个特征点刚度和从加荷到破坏全过程的三阶段刚度退化规律,分析了轴压比等因素对复合墙刚度退化的影响,即轴压比越大,剪跨比、外框架截面及配筋、肋柱(梁)数量及配筋越小,刚度退化速度越快,反之则越慢;同时给出了复合墙刚度退化曲线指数表达式和各变形阶段的退化系数表. 讨论了改善施工工艺、采用纤维填充材料等延缓复合墙刚度退化速度的方法,为密肋壁板结构体系的工程应用提供了参考.

关键词：密肋复合墙体；低周反复荷载试验；特征点刚度；刚度退化；影响因素
中图分类号：TU315　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0493-2137(2010)09-0792-06

Stiffness Degradation Process Analysis of Multi-Ribbed Composite Wall

GUO Meng，YAO Qian-feng
（School of Civil Engineering，Beijing Jiaotong University，Beijing 100044，China）

Abstract：Multi-ribbed composite wall is the main anti-lateral force component in multi-ribbed slab structure system and the law of its stiffness degradation under load is one of the fundamental problems about seismic performance of multi-ribbed slab structures. Low-cyclic reversed loading tests were conducted on composite wall samples with the ratio of 1∶2，in which the characteristic point stiffness and the law of their stiffness degradation process from loading to failure were studied，and the effect of main influencing factors such as axial compression ratio on the wall stiffness degeneration was analyzed. The results show that with the increase of axial compression ratio, the decrease of the shear span ratio，outside frame section and its reinforcement ratio，rib column (beam) quantity，the speed of stiffness degradation increased. Otherwise it decreased. The stiffness degradation formula and degradation coefficients in different deformation stages were presented and methods to delay stiffness degradation with construction technique improvement and fibers as stuffing materials were also discussed. The study has provided reference for the application of multi-ribbed slab structure.

Keywords：multi-ribbed composite wall；low-cyclic reversed loading test；characteristic point stiffness；stiffness degradation；influencing factor

结构地震反应大小与其自身刚度大小密不可分,研究构件及结构在不同受力阶段的刚度与刚度退化规律是进行结构抗震性能研究的重要内容之一. 对于钢筋混凝土框架、剪力墙、混凝土空心剪力墙、配筋砌体墙等构件的刚度及其退化问题,很多学者进行了试验研究和理论分析,取得了诸多有益成果,为相关规范的完善和实际工程设计提供了指导作用[1-5].

密肋壁板轻框结构(密肋复合墙结构)是 20 世纪 90 年代提出并应用于住宅领域的一种新型结构体系,由密肋复合墙、隐型外框架及楼板现浇形成,其中密肋复合墙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

收稿日期：2009-04-28；**修回日期**：2010-01-19.
基金项目："十一五"国家科技支撑计划资助项目(2006BAJ04A02-05)；国家自然科学基金资助项目(50578021)；北京交通大学优秀博士生科技创新基金资助项目(141071522).
作者简介：郭 猛(1982—)，男，博士研究生，工程师.
通讯作者：郭 猛，guomeng673@163.com.

气硅酸盐砌块预制或现浇而成[6-7]. 由于密肋复合墙是将力学性能相差悬殊的 2 种材料(轻质砌块、混凝土)通过特殊构造形式转换成一种强度较高、抗震性能优良的结构受力构件,独特的构造形式决定墙体在抗震与耗能减震方面的优势,但也决定了墙体破坏过程的复杂性,其刚度大小以及反复荷载作用下的刚度退化问题比一般材质均匀的砌体墙、混凝土墙复杂,所受影响因素也较多,目前为止鲜见学者对此进行过深入研究.

笔者根据近几年所做的密肋复合墙体低周反复荷载试验,参考型钢混凝土外框架柱复合墙及框架-复合剪力墙的试验结果,对密肋复合墙的刚度退化规律及其影响因素进行详细的分析和研究.

1　密肋复合墙体试验

对密肋复合墙体抗震性能方面的研究,北京交通大学姚谦峰教授、西安建筑科技大学黄炜副教授等[8]人先后进行了 4 批 39 榀 1/1、1/2、1/3 比例的复合墙体模型试验,以影响墙体抗震性能的主要因素为依据,突出经济、实用的优化设计思想,在墙体尺寸相同,耗材基本相同的前提下,依次改变控制因素,研究各项设计指标对墙体抗震性能的影响. 本文共选取 9 榀反映剪跨比、轴压比、配筋率等主要因素的试件,研究其刚度退化情况和各主要因素对刚度退化的影响程度,试件设计见表 1.

密肋复合墙体试件及试验装置如图 1 所示,主要试验结果如下:在水平荷载达到极限荷载的 40%前,密肋复合墙体的受力性能表现为弹性,砌块中出现少数微裂缝;随着水平荷载的增加,砌块内的裂缝增多且延伸至框格,当荷载值达到极限荷载的 60%~70%时,肋梁中出现了斜裂缝,受拉区外框柱脚部出现水平裂缝且逐步延伸、扩大,受压区外框柱脚部混凝土出现轻微的压碎现象;当水平荷载达到极限荷载的85%左右时,墙体中的肋梁、肋柱出现明显斜裂缝,中层砌块开始出现轻微剥落,这一阶段最明显的现象是肋梁中的钢筋应变迅速增大并开始屈服,墙体承载力虽然仍在上升,但其刚度下降很快,塑性变形显著;荷载继续增加,墙体中的斜裂缝已在部分肋梁、肋柱中贯通,延伸至框柱,形成沿对角线方向贯通整个墙体的弥散裂缝,各层砌块出现破碎、剥落现象,并开始逐步退出工作,外框柱拉区钢筋屈服,压区混凝土有压碎现象;此后进入位移控制的循环阶段,当达到极限位移时,墙体出现大量的剪切和滑移变形,肋梁上出现多处塑性铰区,最终退化成仅由肋格和外框组成的纯框架.

表 1　密肋复合墙体试件设计

Tab.1　Design of multi-ribbed composite wall members

比例	编号	长×高×厚/m×m×m	试件的主要特征和设计目的
1/2	SW6	1.4×1.375×0.1	标准墙体试件,以实际工程中的典型墙板为原型缩尺制作
1/2	SW5	1.4×1.375×0.1	3 根肋柱,分析肋柱数量对刚度及其退化规律的影响
1/2	SW12	1.4×1.375×0.1	5 根肋柱,与 SW6、SW5 比较,分析肋柱数量对刚度及其退化规律的影响
1/2	SW7	1.4×1.375×0.1	变轴压比, $\mu=0.46$,与 SW6 比较,分析轴压比对刚度及其退化规律的影响
1/2	SW3	2.7×1.375×0.1	变剪跨比,双榀墙,与 SW6 比较,分析剪跨比对刚度及其退化规律的影响
1/2	SW13	1.4×1.375×0.1	肋柱纵筋由 4Φ4 变为 4 Φ6,与 SW6 比较,分析肋柱纵筋对刚度及其退化规律的影响
1/2	DW4	1.4×1.440×0.1	采用现砌施工工艺,分析不同施工工艺对刚度及其退化规律的影响
1/2	DW5	1.4×1.440×0.1	轻钢龙骨框格复合墙体,分析框格构件配筋率对刚度及其退化规律的影响
1/2	GML1	1.4×1.440×0.1	型钢砼边框柱,与 SW6 比较,分析外框架对刚度及其退化规律的影响

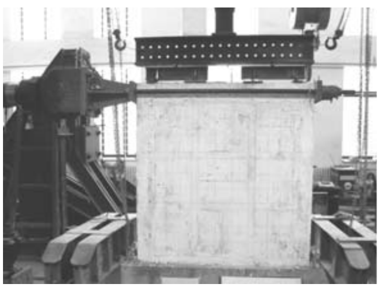


图 1　密肋复合墙低周反复荷载试验示意

Fig.1　Low-cyclic reversed loading test of multi-ribbed composite wall

的纯框架.

试件 DW4、DW5、GML1[9]是标准密肋复合墙的拓展形式,其结果主要用于比较施工工艺、框格配筋率、外框柱配筋率大小对墙体刚度退化的影响.

2　密肋复合墙体刚度退化全过程分析

2.1　密肋复合墙体特征点等效刚度

特征点是指墙体开裂、屈服、极限和破坏时所对应荷载-位移曲线上的点,根据试验数据统计,得到复合墙各特征点的荷载与位移值如表 2 所示. 等效刚度取往复荷载作用下正、反向荷载的绝对值之和除以

相应正、反向位移绝对值之和，见式(1)，计算结果见表 3，括号内数据为等效刚度退化系数，即各特征点的等效刚度除以开裂点等效刚度得到的比值.

$$\overline{K_i} = \frac{|V_i| + |-V_i|}{|\varDelta_i| + |-\varDelta_i|} \tag{1}$$

式中 V_i、$\varDelta_i$ 分别为各阶段的荷载和相对应的位移

表 2 密肋复合墙体特征点的荷载-位移值

Tab.2 Load-displacement of characteristic points multi-ribbed composite walls

试件编号	轴压应力/MPa	开裂		屈服		极限		破坏	
		V_k/kN	$\varDelta_k$/mm	V_y/kN	$\varDelta_y$/mm	V_w/kN	$\varDelta_w$/mm	V_u/kN	$\varDelta_u$/mm
SW6	0.78	41.0	1.10	90.0	5.8	109.7	13.3	92.6	31.3
SW5	0.78	40.0	1.20	81.0	5.4	106.6	12.5	95.7	32.1
SW12	0.78	48.8	1.50	80.0	6.9	101.3	14.8	90.4	26.2
SW7	0.46	38.1	1.24	83.5	5.6	106.5	12.4	90.5	33.1
SW3	0.78	100.0	1.20	220.0	3.8	261.0	6.8	221.9	23.0
SW13	0.78	40.6	0.90	94.0	5.7	129.8	15.1	110.3	32.0
DW4	0.78	37.5	1.60	80.7	5.9	96.2	13.0	83.5	35.0
DW5	0.78	38.7	1.80	99.7	7.3	124.8	19.0	102.5	37.0
GML1	0.78	46.3	1.10	112.7	5.2	137.1	12.0	116.5	24.6

表 3 荷载特征点的等效刚度及刚度退化系数

Tab.3 Equivalent stiffness and stiffness degeneration coefficients of characteristic points

kN/mm

试件编号	开裂刚度 K_k	屈服刚度 K_y	极限刚度 K_w	破坏刚度 K_u
SW6	37.3(1.00)	15.5(0.42)	8.2(0.22)	3.0(0.08)
SW5	33.3(1.00)	15.0(0.45)	8.5(0.26)	3.0(0.09)
SW12	32.5(1.00)	11.6(0.36)	6.8(0.21)	3.5(0.11)
SW7	30.7(1.00)	14.9(0.49)	8.6(0.28)	2.7(0.09)
SW3	83.3(1.00)	57.9(0.69)	38.4(0.46)	9.6(0.12)
SW13	45.1(1.00)	16.5(0.37)	8.6(0.19)	3.4(0.08)
DW4	23.4(1.00)	13.7(0.59)	7.4(0.32)	2.4(0.10)
DW5	20.9(1.00)	13.7(0.66)	6.6(0.32)	2.8(0.13)
GML1	42.1(1.00)	21.7(0.51)	11.4(0.27)	4.7(0.11)

注：表中括号内数值为无量纲.

分析表 3 可知，试件 SW5、SW6(标准墙体)和 SW12 的尺寸及荷载条件一致，仅肋柱数量由 3 根递增至 5 根，开裂刚度以框格单元为正方形的 SW6 为最大. 由于填充砌块在抵抗水平荷载方面的作用，砌块在约束状态下的受力机制决定了自身承载能力的发挥程度，SW5、SW6 和 SW12 中的砌块高宽比分别为小于 1、等于 1 和大于 1，砌块的抗压承载力远大于其抗剪承载力，高宽比 $\varphi < 1$ 时，外荷载作用下以受剪为主；$\varphi = 1$ 时，砌块作用类似对角斜撑杆件，以单轴受压为主；而 $\varphi > 1$ 时，呈大偏压和局部受压的受力状态，抗剪承载力随着高宽比降低很快. 通过分析 3 种砌块的力学模型，密肋复合墙中填充砌块高宽比 $\varphi = 1$ 时受力机制最合理，对墙板刚度的贡献最大，是理想的砌块尺寸比例，这也从侧面验证了实际工程中应用正方形框格划分形式的合理性.

与 SW6 相比，SW7(变轴压比)、SW3(变剪跨比)、SW13(变肋柱纵筋)的初始刚度分别为 SW6 初始刚度的 0.93、0.92、2.11 和 1.11 倍，可见除了与肋柱构造形式有关外，墙体的初始刚度与轴向荷载、剪跨比、梁柱配筋率等几种因素也都有关. 其中，轴向荷载对开裂刚度影响较大，较大的轴向荷载能提高墙体的开裂刚度，对屈服刚度、极限刚度和破坏刚度影响不大；试件 SW3 为剪跨比 0.5 的单层双跨墙体，其开裂刚度、屈服刚度等大大提高，为 SW6 的 2～4 倍；SW13 肋柱纵筋配置为 4 $\varPhi$6，配筋率由标准墙体(4 $\varPhi$4)的 1.0%提高到 2.2%，增大了墙体各阶段的刚度，尤其是开裂刚度.

2.2 刚度退化规律及指数式退化曲线

密肋复合墙体试件的滞回曲线在开裂之前基本保持直线，可以认为刚度退化是从开裂点开始的. 将表 2 所列试件各个荷载峰值点的位移除以试件的高度，得到相应的层间位移角，以层间位移角为横坐标，以等效刚度退化系数为纵坐标，做出 SW 系列试件的刚度退化系数随层间位移角的变化规律曲线，如图 2 所示. 图 3 为标准复合墙试件 SW6 与采用现砌工艺制作的 DW4、轻钢龙骨框格墙板 DW5 刚度退化曲线

的比较情况.

由图 2 可见,尺寸及荷载条件相近的密肋复合墙体刚度退化规律基本相同,退化速度基本一致,总体趋势是退化初期刚度衰减很快,随着位移的增大而减缓,最后趋于平缓. 结合墙体试验现象及荷载-位移骨架曲线模型[8],刚度退化全过程可分为以下 3 个典型阶段.

(1)第 1 阶段　加载初期至开裂荷载阶段,由于材料非线性性质和填充砌块微裂缝的产生,刚度略有下降,荷载-位移曲线在砌块出现少量裂缝后呈现一定的转折,加卸载曲线基本重合,刚度较为稳定.

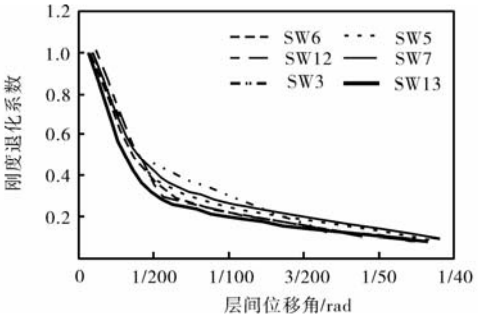


图 2　密肋复合墙体等效刚度退化曲线

Fig.2　Equivalent stiffness degradation curves of multi-ribbed composite walls

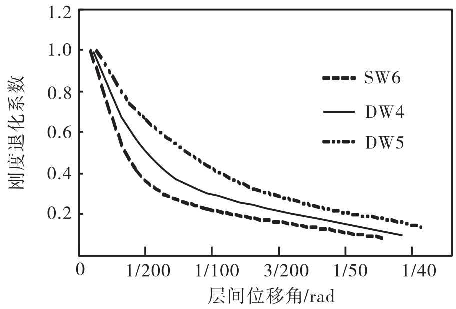


图 3　SW6、DW4、DW5 刚度退化曲线比较

Fig.3　Comparison of stiffness degradation curves between SW6,DW4 and DW5

(2)第 2 阶段　墙体开裂至屈服阶段,填充砌块、肋梁、肋柱上新的裂缝不断产生,旧有裂缝持续扩展,刚度退化速度明显加快,是刚度退化全过程中最快的阶段.

(3)第 3 阶段　屈服后至承载力极限阶段再至破坏阶段,主裂缝已经产生并得到充分开展,刚度降低的主要原因是裂缝两侧砌体剪摩力随着裂缝的变宽而降低,以及少量次生裂缝的影响,刚度缓慢且均匀下降,没有明显的刚度突变,剩余刚度为初始刚度的 10%～15%.

以 SW6、SW5、SW12、SW7、SW13 五块试件的详细试验数据为依据,以其余试件数据为参考,利用指数表达式对复合墙刚度退化曲线进行拟合,对于一般典型密肋复合墙体刚度退化曲线,表达式为

$$\frac{K}{K_\mathrm{k}}=1.0 \qquad \varDelta<\varDelta_\mathrm{k} \tag{2}$$

$$\frac{K}{K_\mathrm{k}}=0.007\,5\left(\frac{\varDelta}{h}\right)^{-0.7} \qquad \varDelta\geqslant\varDelta_\mathrm{k} \tag{3}$$

式中复合墙体的开裂位移角$\varDelta_\mathrm{k}/h$ 平均约为 1/1 200,认为层间位移角达到 1/1 200 前,墙体保持弹性,之后按指数规律退化. 对应于具体位移角的刚度退化系数见表 4,为便于比较,将框架、剪力墙的刚度退化系数一同附上. 密肋复合墙的刚度退化值介于框架与剪力墙之间,退化早于框架而晚于剪力墙.

表 4　框架、密肋复合墙、剪力墙刚度退化系数

Tab.4　Stiffness degeneration coefficients of frame,composite wall and shear wall

层间位移角 θ/rad	框架刚度退化系数	密肋复合墙刚度退化系数	剪力墙刚度退化系数
<1/3 000	1.00	1.00	1.00
1/2 000	1.00	1.00	0.80
1/1 000	1.00	0.94	0.57
1/500	1.00	0.58	0.39
1/250	0.69	0.36	0.25
1/120	0.46	0.21	0.17

2.3　影响刚度退化的主要因素

1)剪跨比

影响密肋复合墙刚度退化的诸多因素中,剪跨比的影响尤为明显. 表 3 中,与标准试件 SW6 相比,试件 SW3(双片墙)的剪跨比减小 1/2,其刚度退化速度很快,开裂刚度相差 46 kN/mm,而破坏刚度仅相差 6.6 kN/mm,表明在剪切破坏状态下,随着剪跨比的增加,墙体的塑性变形发展越慢,刚度退化越平缓.

2)轴压比

与 SW6 相比,SW7 的轴压比较小,刚度退化较缓,说明轴压比虽然可以提高墙体的开裂刚度,但也导致墙体刚度退化速度较快,其原因主要是较大的轴压比在墙体发生一定程度侧移后转化为重力二阶效应,由此形成的附加弯矩也将引起一定的水平位移.

3)肋柱(梁)数量及配筋率

试件 SW5、SW6 和 SW12 的尺寸及荷载条件一致,仅肋柱数量由 3 根递增至 5 根,随着肋梁、肋柱数量的增加,后期刚度降低程度变缓,表明一定数量的肋梁、肋柱,有助于保证墙体的后期刚度. 分析原因,随着肋梁、肋柱数量的增多,一方面有效地限制了砌块裂缝的发展,另一方面其可提供塑性铰的部位增加,观察墙体破坏过程,内部肋梁柱节点区进入屈服

阶段存在先后顺序，位于主对角线上的节点及附近肋梁端部首先屈服，随后远离对角线的肋梁和节点区才进入屈服，这就能保证在一些节点承载力达到极限，甚至丧失承载力时，还有另一部分节点区发挥承载力及耗能作用.

比较图 2 中 SW13、SW6 的曲线及表 3 给出的等效刚度可见，肋柱配筋比例的变化对明显开裂前的刚度影响较小，对开裂后刚度的影响较大. 肋柱钢筋增加后，相应构件的屈服刚度比一般墙体明显提高，可以相对稳定结构后期的刚度和性能，对抗震有利.

4）外框架截面及配筋率

GML1 和 SW6 的截面尺寸及荷载条件基本一致，仅外框架柱配置了型钢，刚度退化速度较 SW6 明显缓慢很多；傅秀岱等[10]进行的 2 批 8 榀 1/4 比例框架-复合剪力墙模型试验表明，随着外框架与内墙体强弱对比的加大，复合墙的刚度退化规律将向带填充墙框架的刚度退化规律转变；配筋砌体剪力墙的试验结果表明，端柱或连接柱的配置延缓了剪力墙刚度的退化速度[11]，因此，外框架截面及其配筋率是影响复合墙刚度退化的另一个重要因素.

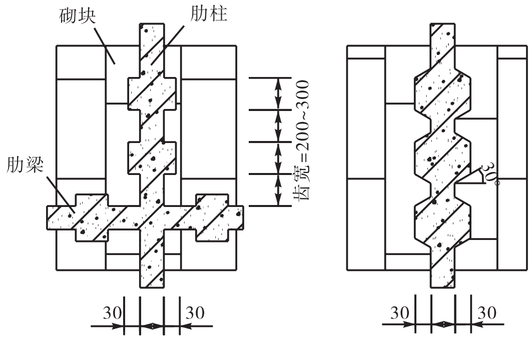
试件 DW4 采用的是现砌整浇的施工工艺，两侧外肋柱与外框柱、上肋梁与外框梁均合二为一，复合墙的整体性能更好，同时砌块之间按砌体规范要求设置灰缝，使得 DW4 与 SW6 相比刚度衰减速度降低，如图 3 所示；其他因素如砌块与混凝土强度等也会对复合墙刚度退化产生一定影响. 上述重点分析的 4 个因素中，以剪跨比、外框架截面及配筋率对墙体刚度退化影响最大. 总之，轴压比越大，剪跨比、外框架截面及配筋、肋柱（梁）数量及配筋越小，刚度退化速度越快，反之则刚度退化速度越慢.

3 讨 论

根据密肋复合墙体模型试验及其刚度退化规律，对以下几个问题进行探讨.

（1）如何提高复合墙的开裂刚度. 首先保证填充砌块尽量是正方形，砌块之间采用水泥砂浆粘结，使砌块处于单轴受压的对角支撑状态；其次通过构造措施改善砌块与混凝土框格之间的粘结性能，例如采用锯齿交错形式，扩大砌块与肋梁、肋柱混凝土的接触面积，增强两者之间的摩阻力和机械咬合力，如图 4 所示；三是适当提高肋柱（梁）的配筋率，不但可以提高墙体开裂刚度，也可以提高屈服刚度及后期刚度，改善墙体刚度退化情况.

（2）如何延缓复合墙的刚度退化速度. 严格控制轴压比，不仅关系到墙体刚度退化速度，还与其变形、耗能等其他抗震性能有直接关系；提高外框架截面及配筋率、肋柱（梁）数量及配筋率；增加填充砌块的韧性和抗裂能力，本课题组近期进行的纤维加气混凝土砌块和植物纤维生土基砌块密肋复合墙抗震性能试验表明，填充砌块的韧性和抗裂能力对于墙体后期刚度及刚度退化具有非常重要的改善作用.



（a）直角齿形接触 （b）钝角齿形接触

图 4 砌块与框格接触方式

Fig.4 Contact forms between brick and frame

（3）密肋复合墙的刚度退化规律不同于普通混凝土剪力墙，由于弹性阶段中后期填充砌块开裂、砌块与框架之间产生界面裂缝，均会对墙体刚度产生不利影响. 当其用于框架-密肋复合墙结构[12]时，墙体刚度退化对框架内力影响的程度、地震反应的变化情况以及相应设计方法必然与框架-密肋剪力墙结构有所不同，框架所受总地震剪力能否按现行抗震规范的规定直接进行调整，这些问题都需要做进一步的研究.

4 结 论

（1）根据 9 榀 1/2 比例密肋复合墙体的低周反复荷载试验，系统地研究了密肋复合墙体在不同受力阶段特征点等效刚度和刚度退化全过程规律，拟合得出了指数式退化曲线和退化系数表. 研究表明，密肋复合墙刚度衰减的总体趋势是填充砌块初裂时刚度略有下降，墙体开裂后刚度衰减很快，随着位移的逐渐增大而减缓，最后趋于平缓，剩余刚度为开裂刚度的 10%～15%.

（2）密肋复合墙体刚度退化与轴压比、剪跨比、配筋率、肋梁肋柱数量、外框架等因素有关. 总的规律为：轴压比越大，剪跨比、外框架截面及配筋、肋柱（梁）数量及配筋越小，刚度退化速度越快，反之则刚度退化速度越慢. 其中剪跨比、外框架是影响墙体刚

度退化的主要因素.

(3)讨论了提高复合墙开裂刚度和延缓刚度退化的方法. 在保证墙板施工可行性的前提上,尽量将框格单元划分为正方形,肋梁、肋柱宜密集不宜稀疏;当密肋复合墙结构应用于较高地震烈度区时,应在抗震计算基础上适当增大边框柱、肋柱的纵筋配筋率,以保证大震下结构具有相对稳定的后期刚度和抗震性能.

参考文献:

[1] 杨翠如,钟锡根,刘大海. 抗震墙的刚度退化对高层框-剪结构地震内力的影响[J]. 土木工程学报,1988(6):25-29.
Yang Cuiru,Zhong Xigen,Liu Dahai. Influence on seismic internal forces of high-rise frame-wall structures due to stiffness degradation of walls [J]. *China Civil Engineering Journal*,1988(6):25-29(in Chinese).

[2] Thomson E,Bendito A,Flórez-López J. Simplified model of low cycle fatigue for RC frame [J]. *Journal of Structure Engineering*,1998,124(9):1082-1085.

[3] Holden T,Restrepo J,Mander J B. Seismic performance of precast reinforced and prestressed concrete walls [J]. *Journal of Structure Engineering*,2003,129(3):286-296.

[4] 王铁成,陈恒超,郭永亮,等. 反复荷载作用下双向受剪框架柱的刚度退化[J]. 天津大学学报,2005,38(12):1058-1062.
Wang Tiecheng,Chen Hengchao,Guo Yongliang,et al. Rigidity degeneration of RC column under two-way horizontal cyclic loads [J]. *Journal of Tianjin University*,2005,38(12):1058-1062(in Chinese).

[5] 许淑芳,张　弢,索跃宁,等. 钢筋混凝土空心剪力墙刚度退化研究[J]. 西安建筑科技大学学报,2007,39(5):605-609.
Xu Shufang,Zhang Tao,Suo Yuening,et al. Study of stiffness degeneration on R.C. hollow shear wall [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture and Technology*,2007,39(5):605-609(in Chinese).

[6] Jia Yingjie,Yuan Quan,Yao Qianfeng. Research on shear resistant capacity and reliability of multi-ribbed composite wall in high-rise building [J]. *Key Engineering Materials*,2005,302/303:669-675.

[7] Xia Lei,Yao Qianfeng,Chang Peng,et al. Seismic safety evaluation analysis of a new building structure with multi-ribbed composite wall structure [C]//*International Conference on Earthquake Engineering*:*The 1st Anniversary of Wenchuan Earthquake*. Chengdu,China,2009:325-328.

[8] 黄　炜. 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.
Huang Wei. Research of Seismic Performance and Design Theory of Multi-Ribbed Slab Wall [D]. Xi'an:School of Civil Engineering,Xi'an University of Architecture and Technology,2004(in Chinese).

[9] 田　鹏,姚谦峰,何明胜,等. 钢骨外框密肋复合墙体抗剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2008(增):78-82.
Tian Peng,Yao Qianfeng,He Mingsheng,et al. Experimental research on shear bearing behavior of the steel reinforced multi-ribbed composite wall [J]. *Journal of Building Structures*,2008(Suppl):78-82(in Chinese).

[10] 傅秀岱,马　峰,杨永哲. 新型钢筋混凝土复合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 天津大学学报,2000,33(3):336-340.
Fu Xiudai,Ma Feng,Yang Yongzhe. Experimental study of lattice composing shear walls on seismic performance [J]. *Journal of Tianjin University*,2000,33(3):336-340(in Chinese).

[11] 胡志远. 采用端部约束的配筋砌块砌体剪力墙抗震性能试验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学土木工程学院,2006.
Hu Zhiyuan. Experimental Study on the Seismic Behavior of Reinforced Concrete Masonry Shear Walls with End Restraint [D]. Harbin:School of Civil Engineering,Harbin Institute of Technology,2006(in Chinese).

[12] 郭　猛,姚谦峰. 框架-密肋复合墙结构新体系研究[J]. 地震工程与工程振动,2009,29(5):73-78.
Guo Meng,Yao Qianfeng. Research on frame-multi-ribbed composite wall structure new system [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*,2009,29(5):73-78(in Chinese).