

# 提高钢筋混凝土剪力墙抗震性能的思想与方法

蒋欢军<sup>1,2</sup>, 王 斌<sup>1</sup>, 吕西林<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 钢筋混凝土剪力墙是高层结构的主要抗侧力构件之一, 位于结构底部的剪力墙承受较大的轴力、剪力和弯矩。高轴压下的剪力墙在强震作用下易发生剪切或压溃破坏, 震后难以修复。如何提高底部剪力墙的抗震性能, 是高层结构抗震设计的关键问题之一。从 2010 年智利地震和 2011 年新西兰地震中剪力墙震害现象出发, 分析了可能引起剪力墙破坏的主要原因, 详细介绍了改善剪力墙抗震性能的思想与常用设计方法。同时, 针对目前超高层结构中采用的内置钢板组合剪力墙, 利用数值模拟进行了参数化分析。研究表明, 内置的钢板可以有效地改善剪力墙构件的受压行为, 可以明显提高构件的承载力、延性和耗能能力, 能有效地改善钢筋混凝土剪力墙的抗震性能。

**关键词:** 智利地震; 新西兰地震; 内置钢板组合剪力墙; 数值模拟; 抗震性能

**中图分类号:** TU973.14; TU398.2

**文献标志码:** A

## Concepts and Measures for Improving Seismic Performance of Reinforced Concrete Shear Wall

JIANG Huanjun<sup>1,2</sup>, WANG Bin<sup>1</sup>, LÜ Xilin<sup>1,2</sup>

(1. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In tall buildings the reinforced concrete (RC) shear wall is one of the predominant structural components used to resist earthquakes. Because shear walls located on the bottom zone of high-rise buildings are subjected to large axial load, shear force and moment during severe earthquakes, the shear failure or crushing of concrete usually occurs in the bottom zone of walls, and such failure mode is irreparable. Therefore, the improvement of seismic performance of RC walls at the bottom is one of the key issues of seismic design of high-rise building structures. The observed damage of RC walls in Chile earthquake (2010) and New Zealand (2011) are

firstly introduced in the paper, and correlated factors which likely result in the failure of walls are analyzed. Based on the detailed assessment of seismic behavior of RC walls, concepts and measures for improving the seismic performance of RC walls are then suggested. Meanwhile, due to the increasing use of the steel plate-reinforced concrete composite shear wall (SPRCW) in super tall buildings currently, the parametric analyses of this novel structural member are carried out by numerical analysis. The numerical results indicate that, compared with the conventional RC shear walls, the embedded steel plate can efficiently improve the behavior bearing the compressive force, the load carrying capacity, ductility and energy dissipation capacity, resulting in the significant improvement of the seismic performance of RC walls.

**Key words:** Chile earthquake; New Zealand earthquake; steel plate-reinforced concrete composite shear walls; numerical simulation; seismic performance

早期的抗震设计理念认为钢筋混凝土框架结构的变形性能好于剪力墙结构, 而剪力墙由于刚度大, 变形能力较差, 在强震作用下容易引起脆性破坏, 因此较大程度上限制了剪力墙的使用。虽然就延性系数而言, 剪力墙确实不如框架, 但是在历次大地震中, 剪力墙结构却很少受到破坏, 表现出良好的抗震性能<sup>[1]</sup>。随着对剪力墙抗震性能的进一步认识, 人们意识到剪力墙结构合理的屈服机制应该是大震作用下, 结构的主要耗能通过连梁大量弯曲屈服承担, 墙肢的屈服应尽量推迟, 并且大部分控制在结构的底部。当前实际工程中, 钢筋混凝土剪力墙已是高层结构的主要抗侧力构件之一。由于高层结构底部的剪力墙承受较大的轴力、弯矩和剪力, 在强震作用下, 高轴压下的剪力墙容易发生受压剪切或者压溃破坏, 使其构件强度和耗能明显下降, 震后难以修复。如何提高底部剪力墙的抗震性能, 是高层结构抗震

收稿日期: 2013-03-10

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2012BAJ13B02)

第一作者: 蒋欢军(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为高层及超高层结构抗震。E-mail: jh73@tongji.edu.cn

通讯作者: 王 斌(1985—), 男, 博士生, 主要研究方向为高层结构抗震。E-mail: 2008wangbin@tongji.edu.cn

设计的关键问题之一。

2010 年 2 月智利地震(M8.8)和 2011 年 2 月新西兰 Christchurch 地震(M6.3)中,剪力墙结构出现了不同程度和不同类型的破坏,部分墙体的破坏远超出可修复的程度,这也是近年来现代钢筋混凝土高层建筑遭受明显破坏的地震。因此,对这两次地震中剪力墙的震害调查及对钢筋混凝土结构抗震设计方法的改进受到全世界地震工程和结构工程专业人士的极大关注<sup>[2-7]</sup>。

本文首先从智利地震和新西兰地震中剪力墙的震害现象出发,分析可能造成剪力墙破坏的主要原因,提出改善剪力墙抗震性能的思想与设计方法。同时,针对目前超高层结构中采用的内置钢板组合剪力墙,利用数值模拟开展参数化分析,为当前钢筋混凝土高层建筑结构的抗震设计提供依据。

## 1 智利和新西兰地震中剪力墙震害现象分析

剪力墙的破坏模式与墙体的高宽比、轴压比、截面形式、边缘约束构件以及钢筋配置形式等因素密切相关。通常情况下墙体都是在轴压、弯曲和剪切多种作用状态下工作,其破坏模式最终取决于这 3 种承载力的相对强弱关系,弯曲破坏的墙体具有较好的延性,而剪切破坏的墙体在超过峰值荷载后承载力迅速退化,延性较差。

### 1.1 钢筋混凝土受压破坏

2010 年智利地震中,较多的中高层剪力墙底部出现严重的混凝土压碎破坏,其最直接的原因是底部剪力墙较薄,墙体轴压过大。用  $A_w$  表示底层剪力墙的面积, $W$  表示结构总重力, $d_{np}=A_w/W$  表示单位重力所占的剪力墙体面积。经统计,1939—1985 年间的建筑, $d_{np}$  的均值是  $3 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$ ,而 1985—2006 年间的建筑, $d_{np}$  降低为  $2 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$ (图 1)。1985 年,墙体轴压比均值小于 0.1,而 1985 年后尤其是 2000 年后的建筑,轴压比均值为 0.2~0.3<sup>[7]</sup>。建筑高度的增加使得其底部剪力墙承受竖向荷载增大,在地震作用下容易发生压溃破坏,如图 2a 所示。这种破坏使得整体结构的强度迅速下降,甚至引起建筑物的倒塌。

1980 年前,新西兰主要采用的抗震设计规范为 NZS4203:1976,剪力墙中典型的配筋方式是在厚度为 150~200 mm 的墙中,配置单层或者双层间距为 305 mm(12 in)、直径为 9.5 mm(3/8 in)的水平 and 竖

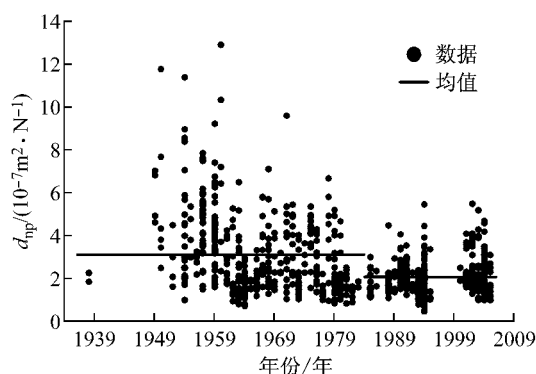


图 1 不同年份剪力墙承担竖向荷载分布<sup>[7]</sup>

Fig.1 Axial load distribution of shear walls variation over the years<sup>[7]</sup>

向钢筋,较低的配筋率使得剪力墙在 2011 年的地震中易发生受剪破坏<sup>[5]</sup>。相比之下,一些老结构由于墙体较厚,表现出较好的抗震性能。20 世纪 80 年代后,新建的剪力墙结构具有高宽比较大和轴压比过大等特点,虽然此类剪力墙设计为弯曲破坏模式,但当承受较大竖向荷载时,地震过程中容易出现底部墙体剪压破坏或者混凝土压溃破坏。

在智利和新西兰地震中都出现了整体墙片发生平面外失稳破坏的现象,如图 2b 所示,相对其他破坏形式而言,此类震害以前研究相对较少,墙体较薄、轴压比过大和边缘约束区混凝土较早压碎破坏可能是导致这一现象的主要原因。

### 1.2 边缘构件纵筋屈曲和断裂

在 1985 年的智利地震中,剪力墙表现出了良好的抗震性能,虽然大部分墙体没有采用延性构造措施,但是仍可有效控制层间变形,所以 1996 年发布的抗震设计规范 NCh433. Of96 中,虽然绝大多数条款与美国规范 ACI318—95 的规定类似,但是取消了边缘约束构件这条规定,这也是本次地震中剪力墙边缘部位出现如此严重破坏的主要原因(图 2c)。地震中破坏的剪力墙的配筋间距普遍为 200 mm×200 mm,并且箍筋为 90°弯钩,混凝土保护层(通常两边各 20 mm)的剥落直接导致了墙体有效承压面积减少近 20%左右,在这种情况下,90°弯钩的箍筋在地震作用下容易张开,导致墙体纵筋出现严重的压屈破坏,甚至出现钢筋断裂的现象。

新西兰在采用规范 NZS3101:1982 前,剪力墙大多未采用延性设计的措施,尤其在边缘约束区域。近年来剪力墙设计时,一般采用规范 NZS3101:2006 的延性设计方法,但是在配置箍筋较少的边缘约束位置,也易发生纵筋压屈或断裂破坏。



图2 钢筋混凝土剪力墙的典型破坏模式

Fig.2 Typical damage modes of RC shear wall

## 2 改善普通剪力墙抗震性能的研究

震害调查和试验研究表明,普通钢筋混凝土剪力墙在强震作用下,主要存在以下两个突出的问题:

(1)底部剪力墙承受较大的轴向压力,其破坏模式较难控制,容易发生剪压破坏,构件的强度和耗能能力呈明显下降趋势。

(2)虽然按照“强剪弱弯”的原则设计墙体的抗弯和抗剪钢筋,并且试图使塑性铰出现在底部加强区部位,但是由于损伤位置过分集中,使墙体震后难以修复,所以对底部墙体的变形和耗能提出了更高的要求。

因此,对于高层和超高层建筑结构来说,如何避免剪力墙底部发生剪压破坏和提高墙体的变形能力,是结构抗震设计中突出的问题。就试验研究和实际工程应用而言,主要有4类改进的方法:①在墙体内部配置型钢或钢板,端部配置型钢以延缓墙脚的破坏,提高墙体的延性,而配置钢板可以改善墙体的轴压行为,对承载力、延性和耗能能力都有明显的改善。②改变普通剪力墙的配筋形式,如采用斜向分布配筋和内藏钢桁架等,可以提高剪力墙的抗剪能力和耗能能力。③改变剪力墙的剪跨比,使剪力墙破坏模式发生变化,如中间开缝剪力墙等。④开发新型剪力墙体系,如在剪力墙中增加耗能装置,采用摇摆剪力墙结构体系等。当前实际工程中常用的是第①和第②类方法。

### 2.1 改善轴向压力的分析

为了提高剪力墙在地震作用下的延性,通常要控制其承担轴向压力的大小。我国建筑抗震设计规范<sup>[8]</sup>第6.4.2条对不同抗震等级和不同设防烈度下的剪力墙在重力荷载代表值下的轴压比限值进行了

规定,但是在美国规范 ACI318—08 和智利规范 NCh433. Of96 中,均没有限制轴压比的规定。从前面的震害分析可以看出,轴压比的增大使得墙体易发生压溃破坏,从而在一定程度上导致了整体墙片的失稳破坏。

评估钢筋混凝土剪力墙和内置钢板组合剪力墙的轴压比随竖向荷载变化的基本参数如下:剪力墙抗震等级取一级,7度抗震设防,混凝土强度等级为C60,初步设计墙厚为1000 mm。改善轴压比的方法采用增加墙厚至1500 mm和采用内置钢板组合剪力墙两种方式,其中内置钢板采用Q345钢,配钢率取3.5%,其轴压比 $n$ 随楼层变化如图3所示。

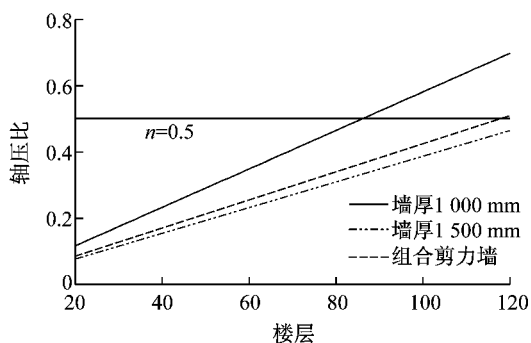


图3 不同墙体轴压比变化

Fig.3 Variation of axial load ratio with different types of shear walls

从图3可以看出,当采用1000 mm的普通剪力墙,楼层数量超过85层时,其轴压比已超过规范限值0.5。为满足墙体延性的需求,将墙厚增加到1500 mm和采用内置钢板组合剪力墙都可以满足轴压比的限值,但相比而言,组合剪力墙不论从提高墙体的抗剪能力,增加结构的延性和耗能能力,还是增加建筑面积来说,都优于增加墙厚这一措施。采用3.5%配钢率的钢板组合剪力墙,可以使轴压比降低27%。

2.2 改善墙体抗剪机制的分析

对于剪力墙的抗剪承载力来说,增加竖向钢筋或水平配筋对其效果不是很明显,但是通过改变墙体的配筋形式,如采用斜向配筋形式、增加内藏钢桁架或内藏钢板,都能明显提高墙体的抗剪能力.

钢筋混凝土剪力墙构件的受剪承载力  $V_a$  可以

表达为

$$V_a = V_s + V_c + V_p \tag{1}$$

式中:  $V_s$  为抗剪承载力中钢筋的贡献;  $V_c$  为抗剪承载力中混凝土的贡献;  $V_p$  为轴力对剪力的影响. 本文主要探讨不同配筋形式对剪力墙抗剪承载力的影响,其配筋形式和分析模型简图如图 4 所示.

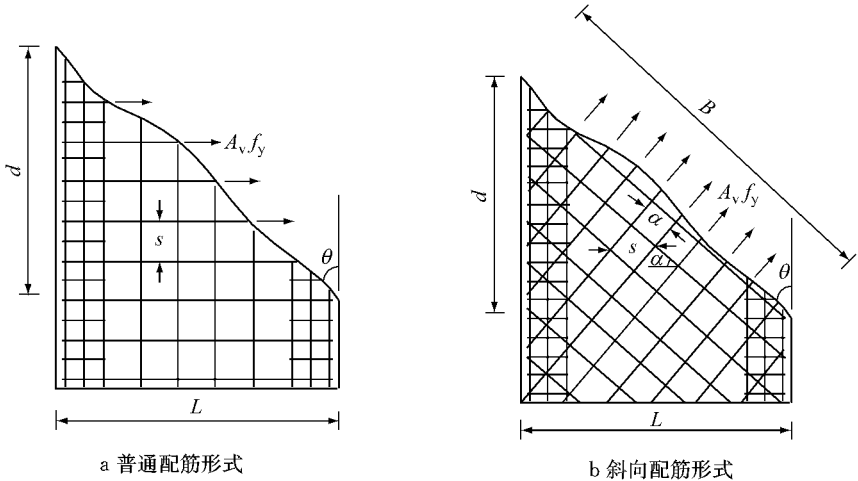


图 4 剪力墙抗剪承载力分析  
Fig.4 Shear strength analysis of shear walls

对于普通配筋形式的剪力墙(图 4a)来说,其水平钢筋提供的抗剪承载力为

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \tag{2}$$

式中:  $A_v$  为水平钢筋的面积;  $f_y$  为屈服强度;  $d$  为墙体开裂高度;  $s$  为分布筋间距.

当采用斜向配筋时,斜向钢筋的水平分布间距仍然为  $s$ ,钢筋的倾角为  $\alpha$ ,由图 4b 可得,斜向裂缝长度  $B = d / \cos \theta$ ,钢筋的间距  $a = s / [\sin \theta (\cot \theta + \cot \alpha)]$ ,通常可以假定裂缝倾角为  $\theta = 45^\circ$ ,那么所有穿过裂缝的全部钢筋的水平分量为

$$V_s = \frac{A_v f_y d (\sin \alpha + \cos \alpha)}{s} \tag{3}$$

从公式(3)可以得出,当钢筋倾角为  $45^\circ$  时,其抗剪承载力  $V_s = 1.41 A_v f_y d / s$ ,和普通配筋的剪力墙的抗剪承载力相比,提高了 41%.

在低周反复加载过程中,由于斜向配筋的方向和斜裂缝开展方向较一致,使得钢筋能更有效地发挥其轴向拉压的贡献,减少了构件滞回曲线的捏拢效应,能有效地提高构件的滞回耗能能力,这一点已在试验中得以验证<sup>[9-11]</sup>,这种特性能显著改善底部剪力墙在强震作用下的抗震性能.

2.3 实际超高层工程应用分析

为了有效地改善超高层结构底部剪力墙的抗震性能,实际工程中采用多种组合剪力墙体系.表 1 中列举了国内典型超高层结构的结构体系.可以看出,内置钢板组合墙是一种具有良好发展前景的超高层抗侧力构件,尤其适用于高烈度地震区的建筑.此类组合剪力墙构件的设计方法虽然已写入《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3—2010),但是对于其抗震性能还需进一步研究.

表 1 典型超高层建筑的结构体系

Tab.1 Structural systems of typical super high-rise buildings

工程名称	高度/m	框架体系	核心筒体系
深圳平安金融中心	660	巨型型钢混凝土柱+钢斜撑+环带桁架	
上海中心	632	巨型型钢混凝土柱+环带桁架	
天津 117 大厦	597	巨型型钢混凝土柱+环带桁架	内置钢板组合剪力墙+型钢组合剪力墙
广州东塔	530	巨型钢管混凝土柱+环带桁架	
武汉中心	438	巨型钢管混凝土柱+环带桁架	

### 3 内置钢板组合剪力墙抗震性能分析

2009年吕西林等<sup>[12]</sup>进行了多参数内置钢板混凝土组合剪力墙(SPRCW)的试验研究. 2011和2012年陈涛、蒋冬启等<sup>[13-14]</sup>针对高轴压比和高强混凝土钢板组合剪力墙进行了系列试验研究. 本文基于OpenSees程序,针对组合剪力墙中轴压比和配钢率2个常用参数,对比分析了不同参数下组合剪力墙的抗震性能,对其破坏形式和受力特性进行了研究,为该类组合剪力墙构件的实际工程应用提供参考.

#### 3.1 组合剪力墙计算分析模型

混凝土和钢筋本构采用美国休斯敦大学Mansour和Hsu<sup>[15-16]</sup>提出的循环软化膜模型(cyclic softening membrane model, CSMM).

选取文献[14]中试件作为研究对象,墙厚150 mm,截面宽度800 mm,墙高2160 mm,其截面尺寸与配筋信息见图5(两边对称),分析的单元与材料见表2. 钢筋混凝土墙与钢板之间采用共节点刚接,即不考虑二者之间的黏结滑移关系. 边缘约束构件与剪力墙板之间采用共节点命令组合,协调二者之间的变形,分析模型如图6所示.

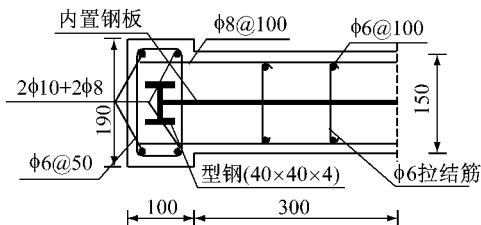


图5 构件截面尺寸与配筋信息(单位:mm)

Fig.5 Cross-sectional dimensions and reinforcement details (unit:mm)

表2 组合剪力墙构件分析参数

Tab.2 Analytical parameters of SPRCW

组成部分	单元	材料
边缘构件	Fiber Element	混凝土:Concrete02 钢筋和型钢:Steel02
剪力墙板	Quad Element	Plane Stress Concrete Materials
内置钢板	Quad Element	J2 Plasticity Material

数值模拟结果与试验结果对比见图7.可以看出,所采用的分析模型能够较好地模拟构件极限承载力前后强度和刚度变化.但在后期加载阶段,分析模型有过高估计构件滞回耗能的趋势,这可能是由于分析模型中没有考虑实际试验过程中钢板与混凝土墙体之间的黏结滑移而导致.

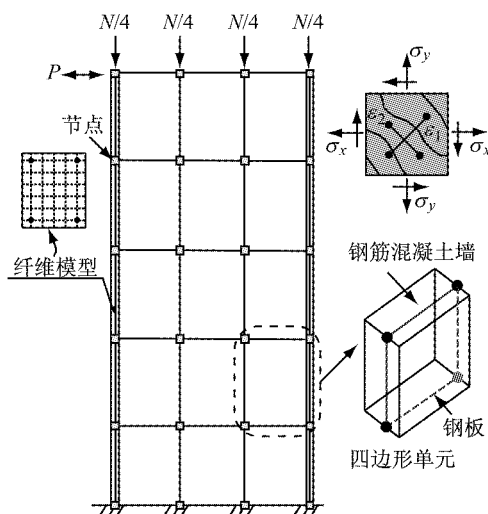


图6 有限元分析模型

Fig.6 Finite element model

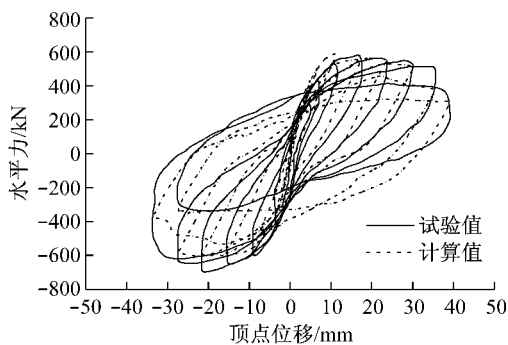


图7 计算与试验滞回曲线对比

Fig.7 Analytical and test load-displacement curves

基于实际结构设计中的问题,本文主要探讨轴压比和配钢率对组合剪力墙抗震性能的影响.实际上钢板与混凝土之间的构造措施对于构件的抗震性能也有很大的影响,但是在一定数量的抗剪栓钉或拉结筋的作用下,钢板与混凝土墙体协调变形,所以文中没有讨论这个参数.分析模型的加载制度如图8所示.

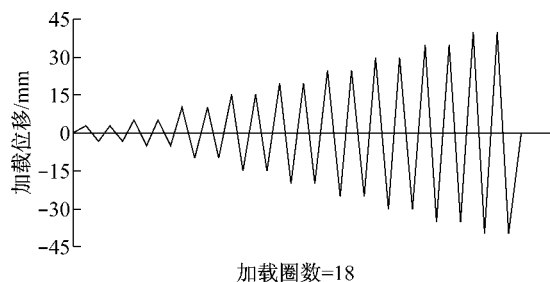


图8 分析模型的加载制度

Fig.8 Loading protocol of analytical models

#### 3.2 轴压比的影响

分析模型中组合剪力墙构件的钢板厚度取5

mm, 竖向和水平向配筋率分别为 0.67% 和 0.37%。轴压比分别取 0.1, 0.2, 0.3 和 0.4, 对应模型分别为 Model-0.1, Model-0.2, Model-0.3, Model-0.4。

不同模型在低周反复加载下水平力-顶点位移的滞回曲线如图 9 所示。从图中可知, 轴压比越大, 构件承载力越高。轴压比较小的构件, 在整个加载过程中, 混凝土与钢板共同工作, 构件承载力尚未出现退化现象, 如 Model-0.1 和 Model-0.2 (为了统一评估构件的抗震性能, 对所有分析模型采用相同的加载制度, 所以对 Model-0.1 和 Model-0.2 并未加载到最终破坏阶段); 而轴压比较大的构件 (如 Model-0.4) 在加载后期由于混凝土逐渐压碎破坏, 导致构件承载力明显下降, 此后构件的滞回曲线较为稳定, 承载力主要由钢板提供。

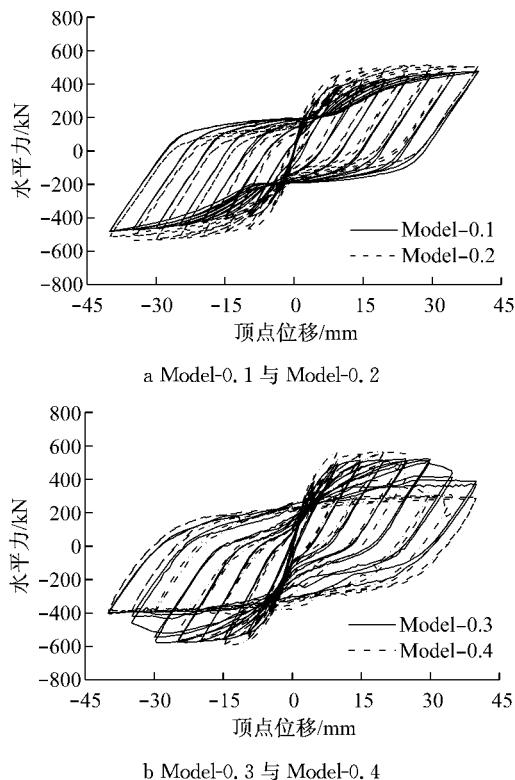


图 9 不同轴压比下构件的荷载-位移滞回曲线  
Fig.9 Load-displacement hysteretic curves for members with different vertical loads

图 10 对比了不同轴压比时组合剪力墙中钢筋混凝土部分和钢板部分分别承担的侧向水平力。当轴压比较小如 0.2 时, 侧向水平力主要由混凝土部分承担, 而钢板的贡献相对较少。当轴压比较大如 0.4 时, 随着混凝土的损伤发展和部分退出工作, 钢板分配的剪力逐渐增大。整个构件的后期承载力, 主要由钢板承担。由此可见, 和普通钢筋混凝土剪力墙类似, 轴压比也是影响组合剪力墙抗震性能的一个

重要参数。从图 10b 可以看出, 在加载后期, 由于组合剪力墙中钢板的贡献, 使构件保持较高的承载力, 能改善超高层结构底部剪力墙的抗震性能, 这一点与试验中结论一致<sup>[12,17]</sup>。

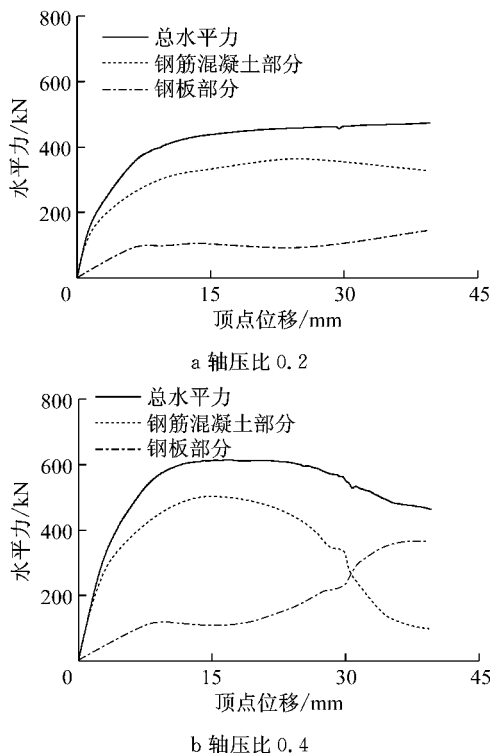


图 10 不同轴压比时钢筋混凝土剪力墙与钢板承担侧向力对比

Fig.10 Comparison of lateral force for RC walls and steel plates

### 3.3 配钢率的影响

分析模型中内置钢板厚度分别取 0, 3, 7 和 10 mm。当厚度为 10 mm 时, 其配钢率 (6.6%) 和目前实际工程相比稍微偏大一些。轴压比取 0.3, 竖向和水平向配筋率分别为 0.67% 和 0.37%。其中内置钢板厚度为 0 mm 表示为普通钢筋混凝土剪力墙。

不同构件在低周反复加载下水平力-顶点位移的滞回曲线如图 11 所示。由图 11 可知, 和普通钢筋混凝土剪力墙相比, 内置钢板组合剪力墙可以非常明显地改善构件的承载力、延性和滞回耗能。钢板厚度越大, 构件承载力和滞回耗能则越大。

图 12 对比了内置不同厚度钢板时组合剪力墙中钢筋混凝土部分和钢板部分分别承担的侧向水平力。当含钢率较低时, 整个加载过程中, 混凝土承担主要的水平力。随着钢板厚度的增加, 其承担的水平力增大。尤其在后期加载阶段, 随着外围混凝土的压碎破坏, 钢板承担了更多的水平力。

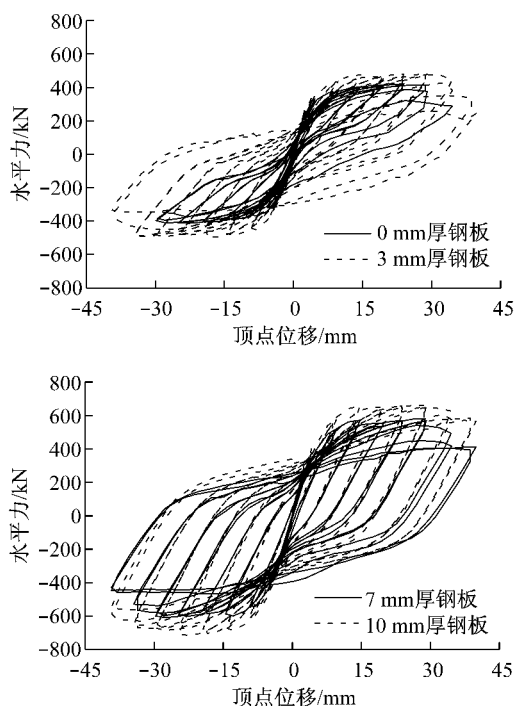


图11 不同配钢率下构件的荷载-位移滞回曲线

Fig.11 Load-displacement hysteretic curves for members with different thicknesses of steel plates

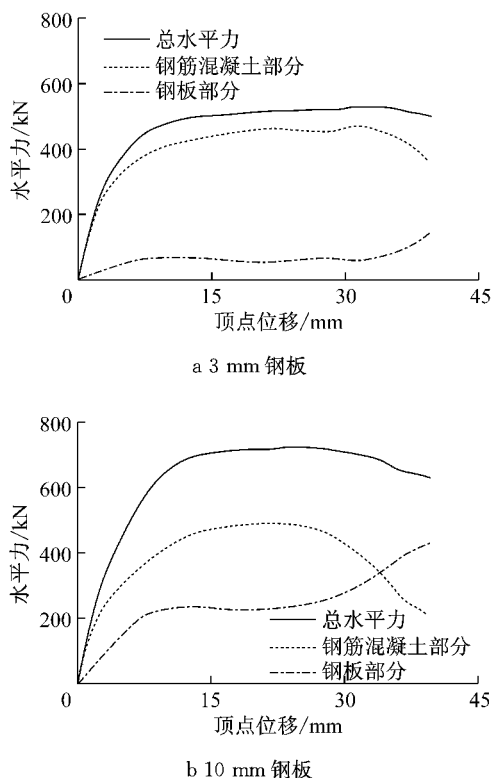


图12 内置不同厚度钢板时钢筋混凝土剪力墙与钢板承担侧向力对比

Fig.12 Comparison of lateral force for RC walls and steel plates

## 4 结论

从智利地震和新西兰地震中剪力墙的震害现象出发,阐述了提高钢筋混凝土剪力墙抗震性能的思想与方法.针对目前在实际超高层工程中应用的内置钢板组合剪力墙进行了数值模拟分析.主要结论如下:

(1)轴压比过大和缺少边缘构造措施,导致构件易发生混凝土压溃和钢筋屈曲破坏,是智利地震和新西兰地震中剪力墙破坏的主要原因.底部剪力墙的严重破坏,使震后修复工作比较困难.

(2)提高墙体的受压能力和抗剪承载力,都可以有效地改善钢筋混凝土剪力墙的抗震性能.就当前实际工程而言,在墙体内部配置型钢和钢板是最为常用的方式.对于钢板组合剪力墙而言,内置的钢板可以有效地改善墙体的轴压能力,提高墙体的承载力、延性和耗能能力.

(3)轴压比是影响组合剪力墙抗震性能的一个重要参数.轴压力较大的构件,在加载后期随着混凝土的损伤发展和部分退出工作,钢板分配的剪力逐渐增大,整个构件的后期承载力主要由钢板承担.由于组合剪力墙中钢板的贡献,使构件保持较高的承载力,能明显改善超高层结构底部剪力墙的抗震性能.

(4)和普通钢筋混凝土剪力墙相比,内置钢板组合剪力墙可以非常有效地提高构件的承载力、延性和滞回耗能.配钢率越大,构件承载力和滞回耗能则越大.随着钢板厚度的增加,其承担的水平剪力也越大.尤其在后期加载阶段,随着外围混凝土的破坏,钢板承担了更多的水平剪力.

## 参考文献:

- [1] Fintel M. Performance of buildings with shear walls in earthquakes in the last thirty years [J]. PCI Journal, 1995, 40 (3): 62.
- [2] Wallace J W, Massone L M, Bonelli P, et al. Damage and implications for seismic design of RC structural wall buildings [J]. Earthquake Spectra, 2012, 28(S1): 281.
- [3] Wallace J W. Behavior, design and modeling of structural walls and coupling beams—lessons from recent laboratory tests and earthquakes [J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2012, 6(1): 3.
- [4] Telleen K, Maffei J, Heintz J, et al. Practical lessons for concrete wall design, based on studies of the 2010 Chile earthquake [C/CD]// Proceedings of 15 World Conference on

- Earthquake Engineering. Lisboa:[s.n.],2012.
- [5] Kam W Y, Pampanin S, Elwood K. Seismic performance of reinforced concrete buildings in the 22 February Christchurch (Lyttelton) earthquake [J]. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2011, 44(4): 239.
- [6] 周颖,吕西林. 智利地震钢筋混凝土高层建筑震害对我国高层结构设计的启示[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(5): 17.  
ZHOU Ying, LÜ Xilin. Lessons learnt from damages of reinforced concrete tall buildings in Chile earthquake and revelations to structural design in China [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(5): 17.
- [7] Massone L M, Wallace J W, Bonelli P, et al. Seismic design and construction practices for RC structural wall buildings [J]. Earthquake Spectra, 2012, 28(S1): 245.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50011-2010 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [9] Sittipunt C, Wood S L, Lukkunaprasit P, et al. Cyclic behavior of reinforced concrete structural walls with diagonal web reinforcement [J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(4): 554.
- [10] Mansour M, Hsu T. Behavior of reinforced concrete elements under cyclic shear. I: experiments [J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(1): 44.
- [11] Shaingchin S, Lukkunaprasit P, Wood S L. Influence of diagonal web reinforcement on cyclic behavior of structural walls [J]. Engineering Structures, 2007, 29(4): 498.
- [12] 吕西林,干淳洁,王威. 内置钢板钢筋混凝土剪力墙抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(5): 89.  
LÜ Xilin, GAN Chunjie, WANG Wei. Study on seismic behavior of steel plate reinforced concrete shearwalls [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(5): 89.
- [13] 陈涛,肖从真,田春雨,等. 高轴压比钢-混凝土组合剪力墙压弯性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(6): 1.  
CHEN Tao, XIAO Congzhen, TIAN Chunyu, et al. Experimental study of the compression-bending behavior of composite shear walls of high axial compression ratios [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(6): 1.
- [14] 蒋冬启,肖从真,陈涛,等. 高强混凝土钢板组合剪力墙压弯性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(3): 17.  
JIANG Dongqi, XIAO Congzhen, CHEN Tao, et al. Experimental study of the compression-bending behavior of high-strength concrete steel composite shear walls [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 45(3): 17.
- [15] Mansour M, Hsu T. Behavior of reinforced concrete elements under cyclic shear. I: experiments [J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(1): 44.
- [16] Mansour M, Hsu T. Behavior of reinforced concrete elements under cyclic shear. II: theoretical model [J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(1): 54.
- [17] 孙建超,徐培福,肖从真,等. 钢板-混凝土组合剪力墙受剪性能试验研究[J]. 建筑结构, 2008, 38(6): 1.  
SUN Jianchao, XU Peifu, XIAO Congzhen, et al. Experimental study on shear behavior of steel plate-concrete composite wall [J]. Building Structure, 2008, 38(6): 1.

#### • 下期文章摘要预报 •

### 主动来流闭口箱梁气动力时频相关性

许 坤,赵 林,葛耀君,曹曙阳

基于主动控制的多风扇和振动格栅装置模拟了14种同步二维湍流场,同步测量了参考点处流场特性及相应断面气动力,从时域和频域2个角度分析了荷载展向相关性与来流特性之间的关系,研究发现,来流相关性与气动力相关性并不相同;气动力相关性之间也互不相同。气动力相关性受来流特性影响显著,在大积分尺度来流下,脉动风及荷载空间相干函数并不满足传统 $e$ 指数形式。为了考虑来流特性对气动力相干函数的影响,提出了一种相干函数模型,较之传统模型,该模型可以反映来流特性对空间相干函数的影响以及气动力与脉动风相干函数间的差异。