

# 抗剪连接件对内配钢板混凝土剪力墙 抗震性能影响的研究

王 威, 王伟涛, 苏三庆

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:**为研究抗剪连接件对内配钢板R.C.剪力墙抗震性能的影响,以9个试件在低周反复水平荷载作用下的试验结果为基础,3个有限元模型为补充,分别对试验和数值模拟结果进行对比分析,研究抗剪连接件栓钉和拉结筋对内配钢板R.C.剪力墙抗震性能的影响.研究表明:栓钉或拉结筋的存在可以明显提高内配钢板R.C.剪力墙的抗剪承载力和延性;同等条件下,栓钉对内配钢板R.C.剪力墙的抗剪承载力和延性的提高略优于拉结筋;随着拉结筋间距的减小,内配钢板R.C.剪力墙的承载力逐渐提高,间距达到一定程度时,提高作用趋于稳定.

**关键词:**内配钢板R.C.剪力墙;抗震性能;数值分析;栓钉;拉结筋

**中图分类号:** TU398

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2014)06-0810-06

内配钢板R.C.剪力墙作为一种新型的抗侧力构件,能够有效提高剪力墙的强度和刚度,其结构形式是将钢板内配于钢筋混凝土剪力墙中,依靠钢板与混凝土间的抗剪连接件,充分发挥钢板与混凝土两种材料的力学性能,共同承受竖向荷载和水平荷载. Zhao和Astaneh-Asl等人<sup>[1-2]</sup>为了改善普通钢板-混凝土组合剪力墙中混凝土开裂严重的缺陷,提出了一种预制混凝土板与周边框架之间设有缝隙的新型钢板-混凝土组合剪力墙. 这种剪力墙可以有效减轻混凝土板的破坏,能使钢板充分发挥其材料性能,避免屈服前发生局部屈曲,但不能有效利用混凝土材料的抗压性能,作者也未对抗剪连接件的贡献进行研究. 2013年Kai Zhang等人<sup>[3]</sup>做了外包钢板钢筋混凝土组合剪力墙在轴向压力作用下,栓钉连接件对组合作用影响的研究,提出栓钉间距与钢板厚度之比的设计参数,以提高组合剪力墙的组合作用,但没有对承受横向水平荷载的组合剪力墙中抗剪连接件的作用进行研究.

以上研究中,关于抗剪连接件对钢板-钢筋混凝土组合剪力墙整体工作性能影响的研究涉及很少,但从国内外关于钢板混凝土剪力墙方面的文献可知,钢构件与混凝土之间的抗剪连接件很重要<sup>[4-6]</sup>,实际工程中又亟待解决这一问题. 因此,本文通过试验和数值模拟,分析抗剪连接件对内配钢板R.C.剪力墙抗震性能的影响.

## 1 内配钢板 R. C. 剪力墙低周反复荷载试验

### 1.1 试件设计

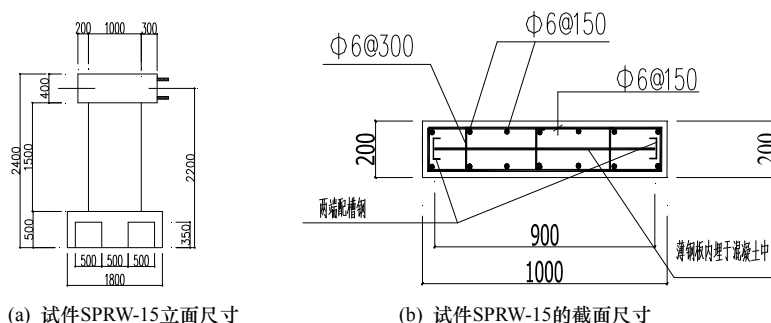


图 1 试件尺寸及配钢图

Fig.1 Section dimensions and reinforcement details

按JGJ101-96《建筑抗震试验方法规程》<sup>[7]</sup>的规定,试件采用1:2的缩尺比例,以试件SPRW-15为例,截面形式和尺寸如图1所示,钢板与端部槽钢焊接成整体配置于钢筋混凝土剪力墙中,钢板上梅花型焊栓钉或开洞穿拉结筋,混凝土中垂直和水平分布钢筋按《混凝土结构设计规范》<sup>[8]</sup>的构造要求配置. 内配钢板R.C.剪力墙上端为与墙体整体现浇的加载梁,其右端施加水平反复集中荷载,顶面施加由轴压比控制的竖

收稿日期: 2014-06-25

修改稿日期: 2014-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51478383); 陕西省教育厅自然科学研究项目 (12JK0913)

作者简介: 王威 (1972-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方为钢与混凝土组合结构及结构安全诊断. E-mail: wangwgh@xauat.edu.cn

向均布荷载,剪力墙下端为现浇钢筋混凝土底座梁,与试验台座的地槽固定,试件的详细尺寸如表1所示.采用Scheneck机对试件施加水平荷载,试件屈服前用力控制,每级加载一次,屈服后采用位移控制,每级循环3次,直至试件抗剪承载力下降到极限承载力的85%.

表1 试件主要参数  
Tab.1 Parameters of specimens

试件编号	墙高/mm	墙宽/mm	墙厚/mm	轴压比	混凝土等级	钢板厚度/mm	钢板栓钉	拉结筋
SPRW-3	2 000	1 000	125	0.3	C50	4	-	Ø6@300
SPRW-4							Ø6@300	-
SPRW-6							-	-
SPRW-7							-	Ø6@300
SPRW-9	1 500	1 000	125	0.4	C40	4	-	-
SPRW-11							-	Ø6@300
SPRW-12							Ø6@300	-
SPRW-14							-	-
SPRW-15	1 500	1 000	200	0.4	C40	6	-	-
						4	-	Ø6@300

注:“-”表示不存在.

1.2 试验的破坏过程

试件SPRW-3、SPRW-4属于“高窄墙”,因拉结筋和栓钉的存在,试件SPRW-3、SPRW-4的混凝土与钢板之间的整体性能较强.由图2(a)、(b)可以看出,两个试件的破坏过程类似,裂缝以水平方向为主,破坏时墙体底部混凝土破坏严重,但钢板的变形却很小.试件SPRW-6、SPRW-7属于“高宽墙”,从图2(c)、(d)可以看出,初始裂缝以水平裂缝为主,出现在墙体的中下部区域.试件SPRW-6中钢板与混凝土之间未设栓钉和拉结筋,水平荷载达到290KN时初始裂缝出现.试件SPRW-7中因有拉结筋,初始裂缝出现相对较晚,当水平荷载达到400KN时才出现.随着水平荷载的增大,裂缝向墙体中上部区域发展,并逐渐形成贯通的斜裂缝,随后,墙体脚部的钢筋鼓出,混凝土被压碎,甚至脱落,钢板整体平面外失稳,试件破坏.试件SPRW-9、SPRW-11、SPRW-12属于“中高窄墙”,高宽比为1.5,墙厚为125mm,其中试件SPRW-9的破坏形式属于弯曲屈服后的剪切滑移破坏,SPRW-11、SPRW-12为弯剪型破坏.由图2(e)、(f)、(g)可以看出,加载初期3个试件的裂缝发展形式基本一致,初始裂缝出现在墙体中下部区域,以水平裂缝为主,随着荷载的增大,裂缝向墙体中上部区域发展,逐渐形成贯通的斜裂缝.当水平力达到最大时,试件SPRW-9的边缘钢筋鼓出,混凝土保护层脱离,钢板局部失稳,试件因发生整体平面外错动而破坏;试件SPRW-11、SPRW-12的混凝土破坏发展较为缓慢,后期裂缝愈加明显,脚部混凝土脱离,但因抗剪连接件的存在,钢板变形不明显,属于延性破坏.试件SPRW-14、SPRW-15属于“中高宽墙”,高宽比为1.5,墙厚为200mm,其破坏主要由于底部发生剪切变形破坏.从图2(h)、(j)可以看出,初始裂缝出现在墙体中下部区域,以水平短小裂缝为主,随着荷载的增大,裂缝向墙体中上部区域发展,并形成交叉斜裂缝.当达到峰值荷载后,水平剪切裂缝更加明显,脚部混凝土剥落,部分钢筋断裂,呈现延性破坏,但延性不足.

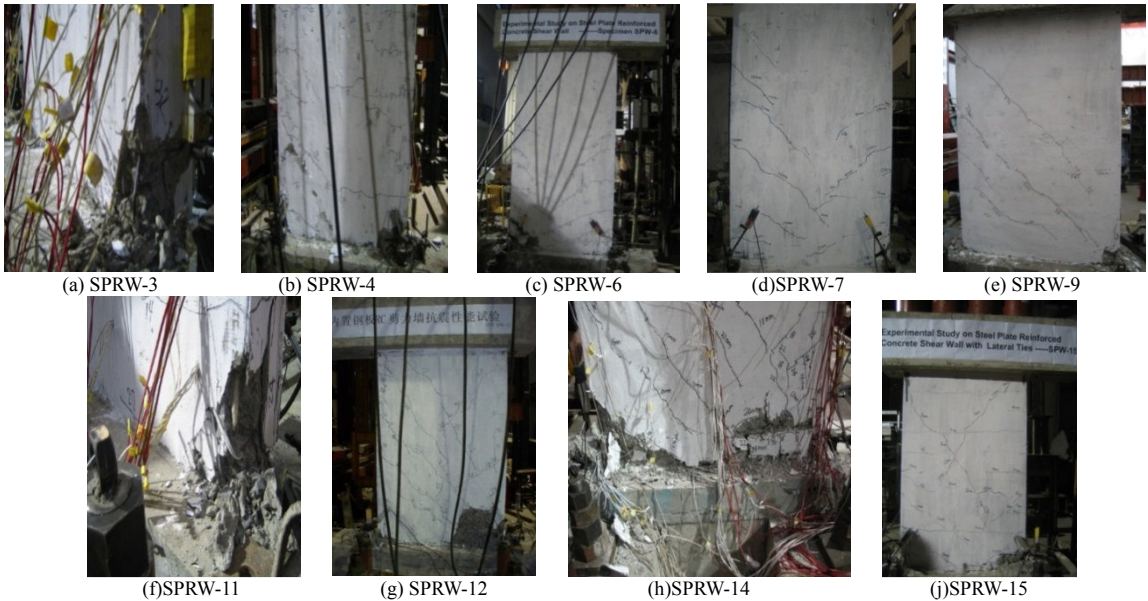


图2 试件裂缝发展及破坏形态  
Fig.2 The cracking development and failure mode of SPRW

### 1.3 抗剪连接件对钢板与混凝土组合作用的影响

#### 1.3.1 骨架曲线

为了分析栓钉和拉结筋对内配钢板 R.C. 剪力墙抗剪承载力和延性的影响, 分别将试件的骨架线对比如图 3.

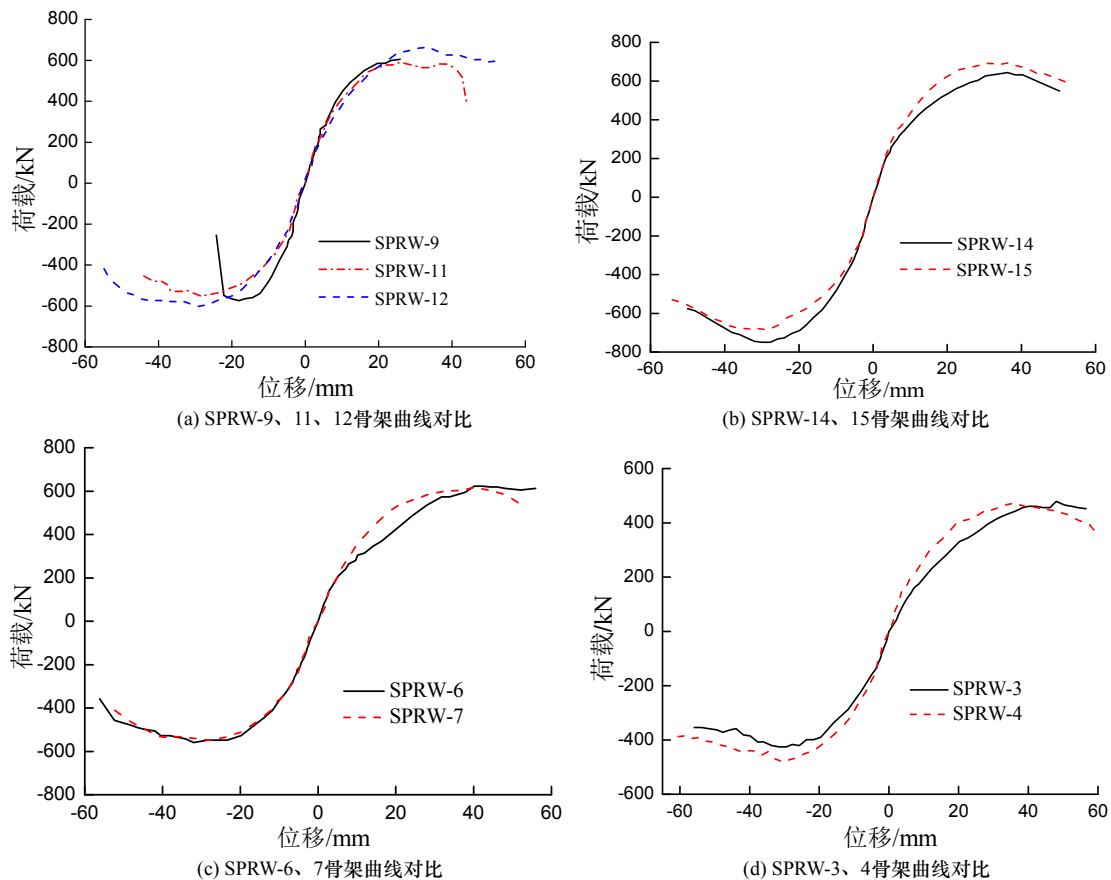


图3 试件骨架曲线对比图

Fig.3 Comparison of the skeleton curves of specimens

SPRW-9为无抗剪连接件的试件, SPRW-11为带有拉结筋的试件, SPRW-12为带有栓钉的试件, 从图3(a)骨架线可以看出, 带有抗剪连接件的试件SPRW-11、SPRW-12与无抗剪连接件的试件SPRW-9相比, 抗剪承载力略有提高, 延性明显提高, 其中栓钉作为抗剪连接件的试件SPRW-12的承载力和延性又优于拉结筋作为抗剪连接件的试件SPRW-11, 表明拉结筋可以提高混凝土对钢板的约束, 栓钉可以有效提高混凝土与钢板的组合效果.

从图3(d)可以看出, 带拉结筋的试件SPRW-3的抗侧刚度比带栓钉的试件SPRW-4的小, 延性却好于试件SPRW-4, 但带拉结筋的试件发生剪切滑移导致骨架线不对称. 相对来说, 栓钉作为抗剪连接件比拉结筋更有效. 从图3(c)可以看出, 无抗剪连接件的试件SPRW-6与带拉结筋的试件SPRW-7的骨架曲线接近, 但试件SPRW-6的钢板厚度比试件SPRW-7的钢板厚度大2mm, 表明拉结筋的存在可以明显提高内配钢板 R.C. 剪力墙的抗剪承载力, 同等抗剪承载力要求下, 可以减小钢板厚度, 节约钢材. 同样从图3(b)也能看出, 带拉结筋的试件SPRW-15的抗剪承载力比钢板厚度增大2mm的无拉结筋的试件SPRW-14的抗剪承载力还要大. 由此可以看出拉结筋对内配钢板 R.C. 剪力墙的抗剪承载力的提高效果明显.

#### 1.3.2 刚度退化

在位移幅值不变的情况下, 结构或构件的刚度随反复加载次数的增加而降低的特性称为刚度退化, 可采用同级位移下环线刚度  $K_1$  的变化规律反应试件的刚度退化规律. 试件的刚度退化情况如图 4 所示.

由图4可知, 各试件随水平位移的增大刚度呈退化趋势, 其主要是由试件屈服后塑性发展导致的累积损伤引起的. 从图4(b)可以看出, 带有拉结筋的试件SPRW-7和SPRW-15明显比对应的不带拉结筋的试件SPRW-6和SPRW-14的初始刚度大, 但是刚度退化率略大, 这是由于加载初期拉结筋对试件组合作用的提高约束了混凝土裂缝的发展, 使其保持较大刚度, 随着塑性的发现, 拉结筋逐渐屈服破坏, 混凝土失去钢筋



网的约束,在较大水平荷载下迅速破坏,导致刚度下降率提高.从图4(a)可以看出,带有抗剪连接件分别为拉结筋和栓钉的试件SPRW-3和SPRW-4,及SPRW-11和SPRW-12,其对应的刚度退化曲线基本保持一致,带栓钉的试件比带拉结筋的试件的刚度略大,其退化率也略大,表明带栓钉的内配钢板R.C.组合剪力墙的组合效果略优于带拉结筋的内配钢板R.C.组合剪力墙的组合效果.

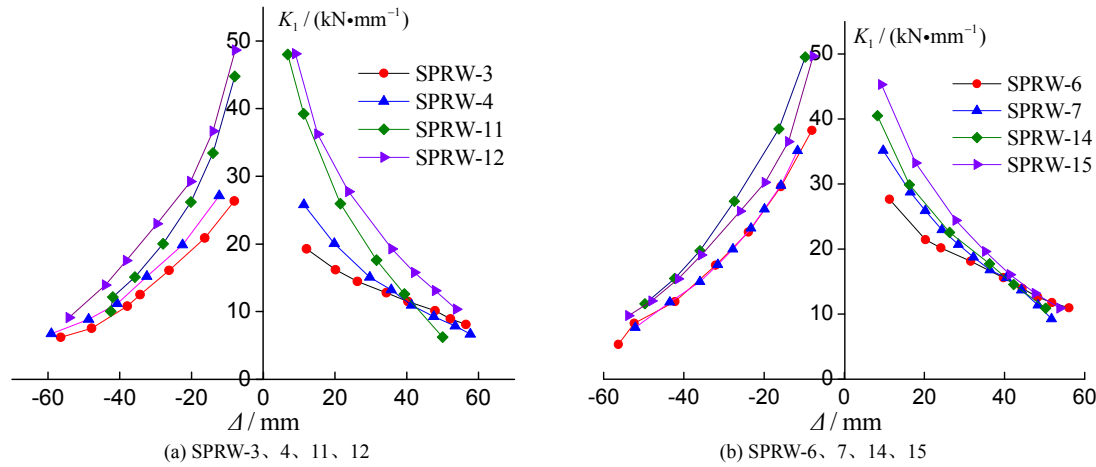


图 4 试件刚度退化情况  
Fig.4 Stiffness degradation of specimens

1.3.3 延性系数

延性是反应试件塑性变形能力的指标,也是用来反应其抗震性能的指标之一,可以用位移延性系数来衡量延性的大小.位移延性系数可以用式(1)表达.

$$\mu=\Delta_u/\Delta_y \tag{1}$$

将各试件的位移延性系数计算结果列入表 2,对比分析发现,试件 SPRW-11 和 SPRW-12 带有抗剪连接件,其位移延性系数明显大于不带抗剪连接件的试件 SPRW-9;不带抗剪连接件的试件 SPRW-6 和带抗剪连接件的试件 SPRW-7 的位移延性系数基本相当,但是试件 SPRW-6 比 SPRW-7 的配钢率大 32%,同样,带抗剪连接件的试件 SPRW-15 的配钢率比试件 SPRW-14 小 32%,但位移线性系数却提高 27%;试件 SPRW-3 和 SPRW-4,SPRW-11 和 SPRW-12 分别带有不同类型的抗剪连接件,它们的位移延性系数基本相等,高宽比为 2 时,带栓钉的试件 SPRW-4 的延性系数略大于带拉结筋的试件 SPRW-3,高宽比为 1.5 时,带拉结筋的试件 SPRW-11 的位移延性系数略大于带栓钉的试件 SPRW-12.

为了进一步说明拉结筋间距对内配钢板 R.C.剪力墙抗剪承载力的影响,本文用 ABAQUS 有限元软件,对内配钢板 R.C.剪力墙进行数值模拟分析.

表2 试件的位移延性系数  
Tab.2 Displacement ductility coefficient of specimens

试件编号	高宽比	屈服荷载 $P_y$ / kN	屈服位移 $\Delta_y$ / mm	最大荷载 $P_u$ / kN	极限荷载 $0.85P_u$ / kN	极限位移 $\Delta_u$ / mm	延性系 数 $\mu$	配钢率 $A_{sp} / A_g$
SPRW-3	2	357.178	24.219	480.225	451.904	56.372	2.33	4.23%
SPRW-4	2	350.464	16.016	469.482	389.893	58.06	3.63	4.23%
SPRW-6	2	467.651	15.747	623.535	611.816	56.2	3.57	3.72%
SPRW-7	2	469.36	16.382	614.502	528.931	52.539	3.21	2.82%
SPRW-9	1.5	449.829	10.986	578.247	207.935	25.244	2.30	4.23%
SPRW-11	1.5	439.697	11.792	578.979	339.884	44.254	3.75	4.23%
SPRW-12	1.5	496.216	15.747	658.979	591.553	53.882	3.42	4.23%
SPRW-14	1.5	486.084	16.187	641.235	548.462	50.22	3.10	3.72%
SPRW-15	1.5	523.315	13.696	691.772	584.351	53.955	3.94	2.82%

2 数值模拟分析

2.1 模型的建立

以试件SPRW-7为例,用ABAQUS有限元软件建立有限元模型进行分析.模型中混凝土墙板、钢板、上下钢梁都采用8节点实体单元(C3D8R);钢筋采用ABAQUS中的钢筋层单元(Rebar Layer)嵌入混凝土中来模拟;拉结筋采用墙平面内的非线性弹簧和墙法向的弹性弹簧来模拟,穿拉结筋处钢板按孔洞实际尺寸开孔,为了网格划分方便,以方孔代替圆孔;钢梁与混凝土墙的嵌固采用绑定(tie)约束模拟;钢板与混凝土切向接触采用罚函数摩擦模型,法向接触采用硬接触.钢梁与钢板采用耦合(coupling)约束.

## 2.2 材料的本构

混凝土本构关系采用ABAQUS提供的混凝土塑性损伤模型(Concrete damage plasticity)<sup>[9]</sup>,该模型使用各向同性损伤弹性结合各向同性拉伸和压缩塑性的模式来表示混凝土的非线性行为,是一种基于连续介质的损伤模型,能够较好的模拟混凝土的弹塑性性能.混凝土单轴抗压强度值根据材料性能试验所得到的结果取值<sup>[10]</sup>,泊松比取0.2,密度取为 $2.5 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ .钢筋采用二折线硬化模型,弹性模量 $E_s$ ,屈服强度 $f_y$ 和极限拉应变 $\varepsilon_u$ 根据材性试验得到<sup>[5]</sup>,屈服后的强化刚度取 $E'_s = 0.001 E_s$ ,泊松比取0.3,密度取为 $7.85 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ .钢筋采用同样的材料本构模型.

## 2.3 模型的验证

将上述方法所建立的模型,在位移控制的水平荷载作用下所得到的荷载-位移关系曲线与试件SPRW-7的试验结果进行对比,如图5所示.

从图5可以看出,屈服前计算刚度稍大于试验刚度.这是由于试验为反复加载,而有限元计算为单调加载,且忽略了混凝土与钢筋之间的粘结滑移,有限元程序设定的混凝土是理想均质材料,而实际试件的材料是非均质,试件内部也存在一些缺陷,所以试件的刚度要比数值分析得到的刚度偏大.屈服后,计算值与试验值吻合相对较好,试验值稍大于计算值,这是因为有限元计算按生死单元法则,单元达到极限强度即退出工作,而试验中材料破坏后尚可以承受一定的荷载.

从图6钢板的应力云图可以看出,试件破坏时钢板底部屈服,上部开孔穿拉结筋处应力集中,与试验和理论符合.

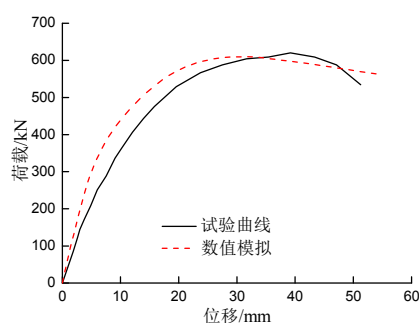


图5有限元分析曲线与试验曲线比较

Fig.5 Comparison load-displacement curves between test and simulations

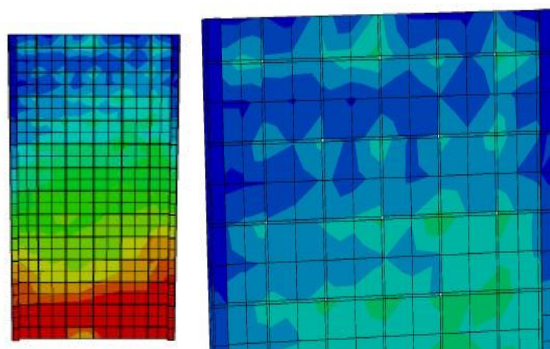


图6 钢板应力分布图

Fig.6 The stress distributing graph of steel plate

综上所述,模型的计算数据与试验数据基本一致,说明本文利用ABAQUS建立的有限元模型可以用于对带拉结筋的内配钢板R.C.剪力墙进行参数分析.

## 2.4 参数分析

在试验构件数量不足的情况下,为了研究拉结筋间距对内配钢板R.C.剪力墙的影响,本文在以上验证了的有限元模型的基础上,改变拉结筋间距,分别为150 mm、300 mm、450 mm,得出如图7所示构件随拉结筋间距改变的荷载-位移曲线.从图7可以看出,在拉结筋间距较大的情况下,随着拉结筋间距的减小,数量增多,内配钢板R.C.剪力墙的抗剪承载力和延性提高明显.当拉结筋间距减小到一定程度后,继续减小间距,对构件抗剪承载力和延性的提高逐渐减小,趋于稳定.这是由于在拉结筋间距较大的情况下,拉结筋的抗剪承载力不足,钢板与混凝土的协同工作能力较差,墙体脚部钢板发生局部屈曲,不能充分利用两种材料的力学性能.而当拉结筋的数量达到一定程度后,有效避免了钢板的局部屈曲,可以充分发挥两种材料的力学性能,承载能力达到极限.因材料的力学性能已经充分发挥,继续减小拉结筋的间距,抗剪承载力提高不大,拉结筋也不能充分利用,相反,由于穿拉结筋,钢板开孔数量增加,一定程度上消减了钢板的刚度,对抗震不利.

通过以上分析,在内配钢板R.C.剪力墙中,为了充分发挥两种材料的力学性能,避免钢板在屈服前发生局部屈曲,本文建议拉结筋的间距在300 mm以下,但也不宜过小.

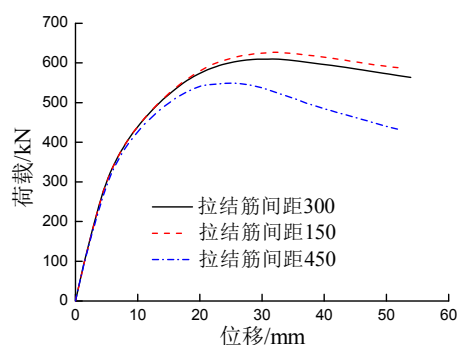


图7 荷载-位移曲线

Fig.7 Load-Displacement Curves

### 3 结论

本文主要分析了拉结筋对内配钢板R.C.剪力墙抗震性能的影响,并与栓钉的贡献作了比较,得出以下结论:

(1)栓钉或拉结筋的存在可以明显提高内配钢板R.C.剪力墙的抗剪承载力和延性;

(2)同等条件下,栓钉对内配钢板R.C.剪力墙的抗剪承载力和延性的提高略优于拉结筋;

(3)随着拉结筋间距的减小,内配钢板R.C.剪力墙的承载力逐渐提高,间距减小到一定程度时,提高作用趋于稳定。

### 参考文献 References

- [1] ASTANEH-AAL A. Seismic behavior and design of composite steel plate shear walls[R]. Steel Tips Report, Structural Steel Educational Council, Moraga, California, 2002.
- [2] ZHAO Q, ASTANEH-AAL A. Cyclic behavior of traditional and innovative composite shear walls[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2): 271-283.
- [3] ZHANG Kai, VARMAA Amit H, MALUSHTA Sanjeev R, et al. Effect of shear connectors on local buckling and composite action in steel concrete composite walls[J]. Nucl. Eng. Des. (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.08.035>
- [4] SAARI W K, HAJJAR J F, SCHULTZ A E, et al. Behavior of shear studs in steel frames with reinforced concrete infill walls[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(10):1453-1480
- [5] 李国强, 张晓光, 沈祖炎. 钢板外包混凝土剪力墙抗剪滞回性能试验研究[J]. 工业建筑, 1995, 25(6): 32-35.  
LI Guoqiang, ZHANG Xiaoguang, SHEN Zuyan. Experimental study on hysteretic behavior of concrete-incased steel plate shear walls[J]. Journal of Industrial Construction, 1995, 25(6): 32-35.
- [6] 王威, 杨腾, 苏三庆, 等. 带栓钉的内置钢板混凝土组合剪力墙抗剪性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2014, 46(1): 27-33.  
WANG Wei, YANG Teng, SU Sanqing, et al. Research of shear capacity performances of embedded steel plate concrete shear walls with studs[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2014, 46(1): 27-33.
- [7] 建筑抗震试验方法规程(JGJ 101-96) [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 1996.  
Specification of test methods for earthquake resistant building(JGJ 101-96) [S]. Beijing: The Press of building industry, 1996.
- [8] 混凝土结构设计规范(GB 50010-2002) [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002.  
Code for design of concrete structures (GB50010-2002) [S]. Beijing: The Press of building industry, 2002.
- [9] SIMULIA.ABAQUS Analysis User's Manual: Dassault Systems [M]. Simulia, 2011.
- [10] 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):89-96.  
LÜ Xilin, GAN Chunjie, WANG Wei. Study on seismic behavior of steel plate reinforced concrete shear walls[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(5):89-96.

## Effect of shear connectors on seismic behavior of R.C. composite shear wall in-filled with steel plate

WANG Wei, WANG Weitao, SU Sanqing

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** In order to research the effect of shear connectors on seismic behavior of R.C. composite shear wall in-filled with steel plate, nine specimens are tested under low frequency cyclic and reversed lateral loads, and numerical analysis with 3 finite element models are conducted to supplement the tests. By the comparison of the results of tests and FEM analytical results with different parameters, It is concluded that studs and tie rods can improve the shear strength and ductility of the composition wall; with the same span of shear connector, effect of the studs on seismic behavior of R.C. composite shear wall is better than tie rods. When concrete wall and steel plate thickness meet the basic demand of details required, shear strength and ductility of shear walls are increased by decreasing the span of studs.

**Key words:** steel plate in-filled reinforced concrete composite shear wall; seismic behavior; numerical analysis; studs; tie rods

(本文编辑 吴海西)