

带栓钉的内置钢板混凝土 组合剪力墙抗剪性能研究

王 威, 杨 腾, 苏三庆, 高俊杰

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 为研究带栓钉的内置钢板混凝土剪力墙的受力状态及承载力的变化规律, 以 4 个带栓钉的内置钢板混凝土剪力墙试验研究为基础, 采用有限元软件 ABAQUS 建立了 22 组带栓钉的内置钢板混凝土剪力墙的有限元模型, 模拟了加载的过程和剪力墙的受力性能, 考虑了材料的非线性, 栓钉的滑移模型等, 并将模拟结果与试验结果进行对比. 分析不同参数如墙体厚度, 钢板厚度, 栓钉的直径、间距, 轴压比及高宽比对组合墙的水平承载力和变形的影响, 主要得到了栓钉对内置钢板混凝土剪力墙的影响规律. 分析结果表明: 当墙体、钢板厚度满足一定要求时, 采用较大直径栓钉可以明显提高墙体的抗剪承载力, 但随着栓钉直径的增大, 承载力增加减慢; 加密布置细直径栓钉后剪力墙承载力提高明显, 而且延性较好. 通过栓钉的模拟计算, 拟合了带栓钉的内置钢板钢筋混凝土剪力墙的受剪承载力公式, 可为设计应用提供理论依据.

关键词: 内置钢板混凝土剪力墙; 栓钉; 有限元; 滑移模型

中图分类号: TU398 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7930(2014)01-0027-07

在高层结构设计特别是底部加强层中, 组合钢板剪力墙应用优势明显. 它具有较高承载能力和延性, 截面尺寸小, 可以增加建筑面积. 但是承载过程中, 当达到一定荷载后, 钢板与混凝土间将产生较明显的滑移, 变形不能协调一致. 而栓钉作为钢与混凝土组合构件中常用的一种受剪连接件, 可以提高两者之间的变形协调能力, 充分发挥二者的作用. 研究栓钉的布置形式、间距、直径变化等对钢板混凝土剪力墙的影响规律, 具有明显的理论及实际应用价值.

目前, 国外 Astaneh-Asl 等^[1-3]对内藏钢板混凝土剪力墙进行了一系列的试验研究, 分别对单侧钢板混凝土剪力墙、内藏单层钢板剪力墙、双层钢板剪力墙等与外部构件无缝的墙板进行低周往复荷载试验, 试验结果表明, 内藏钢板的混凝土剪力墙耗能能力很强, 是一种有前景的抗侧力构件, 为了解决混凝土剪力墙墙板与外部构件连接处开裂的问题, Astaneh-Asl 提出在混凝土墙板与旁边构件之间设置缝隙, 试验表明: 由于缝隙的存在可以很好地抑制开裂现象的产生. 国内吕西林^[4]等人设计 16 个内置钢板钢筋混凝土剪力墙试件, 进行低周反复加载试验研究比较不同参数如高宽比、墙体厚度、钢板厚度等条件下试件的工作性能, 研究细部构造措施如拉结筋和钢板上焊接栓钉等对于剪力墙受力破坏特征以及抗震性能方面的影响; 张文江^[5]等人通过对 18 个带列阵栓钉内藏钢板混凝土组合构件在单调荷载下的推出试验, 对栓钉抗剪键钢板与外包混凝土剪力墙的共同工作性能进行研究. 然而, 对带栓钉的组合钢板剪力墙整体的工作性能以及栓钉对其如何具体影响研究甚少, 因此, 考虑栓钉对组合剪力墙的影响研究十分必要, 本文在内置钢板混凝土剪力墙研究的基础上, 采用 ABAQUS 6.12 软件, 结合试验, 通过对带栓钉的内置钢板混凝土剪力墙的抗剪性能进行参数分析, 研究栓钉影响规律, 为带栓钉的内置钢板混凝土剪力墙的设计提出建议.

1 试验概况

本文选取文献[4]中四片布置栓钉的内置钢板混凝土剪力墙试件试验结果进行数值模拟, 并将计算结果与试验结果对比. 栓钉为 $\phi 6@300$ 、长 25 mm, 呈梅花状焊接在钢板上, 墙体纵向分布筋为 $\phi 6@150$, 水平向箍筋为 $\phi 6@150$. 试件设计参数见表 1、2, 试件截面尺寸及配筋、立面如图 1 所示.

收稿日期: 2013-09-09

修改稿日期: 2014-02-20

基金项目: 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, 主要从事钢与混凝土组合结构及建筑结构安全诊断方向的研究. E-mail: wangwgh@xauat.edu.cn

表 1 试件主要参数
Tab.1 Detail of test specimens

试件编号	墙宽 L/mm	墙厚 B/mm	高宽比	混凝土强度等级	钢板厚度/ mm	轴压比	构造措施	边缘配置槽钢
SPRCW-4	1 000	125	2	C50	4	0.3	栓钉	[6.3
SPRCW-8	1 000	200	2	C50	4	0.3	栓钉	[8.0
SPRCW-12	1 000	125	1.5	C50	4	0.3	栓钉	[8.0
SPRCW-16	1 000	200	1.5	C50	4	0.3	栓钉	[8.0

表 2 钢板及钢筋材料性能
Tab.2 Properties of steel plates and rebars

钢材料	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	弹性模量/ MPa
6 mm 钢板	307.29	419.54	1.86×10^5
4 mm 钢板	302.1	413.93	1.9×10^5
$\phi 6$ 钢筋	307.11	441.53	2.19×10^5

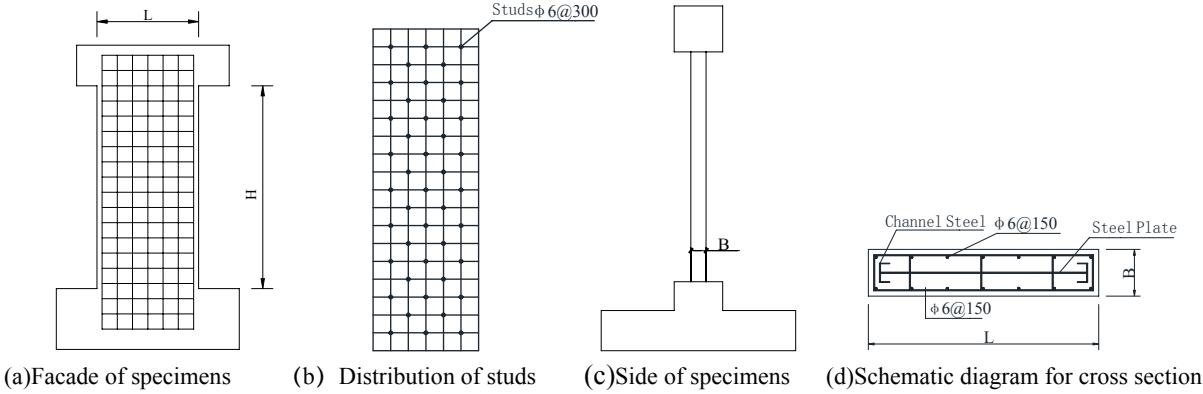


图 1 试件几何尺寸及配筋图
Fig.1 Arrangement of reinforcement and dimensions of specimens

2 有限元模型的建立

2.1 单元的选取

本文采用 ABAQUS6.12 对带栓钉的内置钢板混凝土剪力墙进行有限元模拟。混凝土墙板、钢板采用实体单元 C3D8R, 通过弹簧单元将墙板和钢板连接。钢筋采用杆单元 T3D2, 利用 embed 功能将钢筋嵌入混凝土内, 钢筋和混凝土单元共用节点。栓钉的纵向 X、Y 抗剪作用由非线性弹簧模拟, 通过定义弹簧的荷载-相对位移曲线来模拟栓钉的剪切变形; 竖向 Z 抗拔作用由线性弹簧模拟, 弹簧刚度取作栓钉的抗拉刚度。

2.2 材料参数

2.2.1 混凝土的本构关系

混凝土采用ABAQUS中的混凝土塑性损伤(Concrete damage plasticity)模型。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。这是一种基于连续介质的损伤模型。塑性流动法则为非关联流动法则, 塑性势面采用 Drucker-Prager双曲线函数。

本模型中墙板钢筋混凝土和槽钢周围混凝土采用文献^[6]提出的单轴受压和单轴受拉混凝土应力-应变关系模型。混凝土的单轴抗压强度值根据材性试验所得到的结果取值; 单轴抗拉强度值根据立方

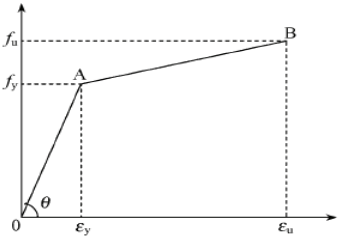


图 2 钢材的应力-应变曲线模型
Fig.2 Steel stress-strain curve

体抗压强度值查表得到;泊松比取 0.2, 密度取为 $2.5 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$.

2.2.2 钢材的本构关系

钢材采用 von Mises 屈服准则, 本构关系采用二折线形式的弹性-强化模型, 屈服后的应力-应变关系简化为平缓的斜直线, 即 $E'_s = 0.001 E_s$, 如图2. 钢材屈服强度根据材性试验结果取值, 泊松比取 0.3, 密度取为 $7.85 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$.

2.2.3 栓钉的剪力和滑移关系

栓钉的剪力和滑移关系影响到钢板和混凝土组合剪力墙的滑移, 从而影响组合剪力墙共同作用. 目前, 对于栓钉的纵向剪力-滑移曲线有着许多的模型, 其中 Ollgaard 于 1971 年提出的模型[7]应用最为广泛, 如图 3(a), 公式如下式:

$$V = V_u (1 - e^{-ns})^m \quad (1)$$

式中: V_u 为栓钉的极限承载力; s 为栓钉的滑移; m 、 n 为不同学者提出的参数.

根据我国《钢结构设计规范》(GB50017-2003), 单个栓钉连接件的极限承载力 V_u 可按下式计算:

$$V_u = 0.43 A_{st} \sqrt{E_c f_c} \leq 0.7 A_{st} \gamma f_y \quad (2)$$

式中: A_{st} 为栓钉的截面面积, E_c 为混凝土的弹性模量; f_c 为混凝土的轴心抗压强度, f_y 为栓钉的屈服强度, γ 为系数.

根据本试验结果, 建议取文献[8]提出的 $m=0.989$, $n=1.535 \text{ mm}^{-1}$.

考虑到实际结构中栓钉的滑移量不可能无限的增大, 需要对其极限滑移量进行定义, 本文采用文献[9]的栓钉荷载-滑移曲线, 如图 3(b), 其中 S_f 为栓钉的极限滑移值; S_u 为栓钉达到极限抗剪强度时对应的滑移值.

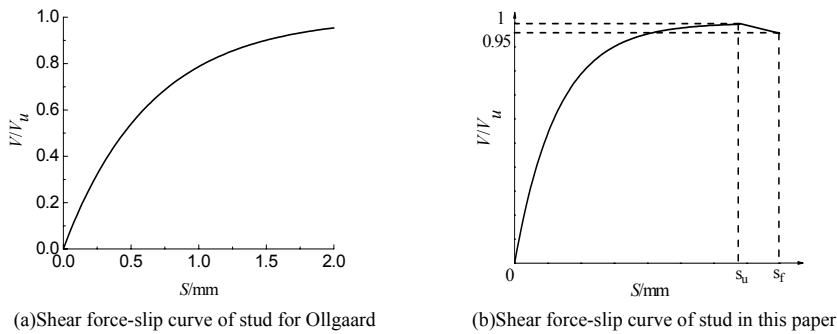


图3 栓钉的刚度曲线
Fig.3 Shear force-slip curve of stud

2.3 有限元模型

带栓钉的内置钢板混凝土剪力墙有限元模型采用实际尺寸建模. 为避免应力集中及简化计算, 剪力墙构件底梁假定为刚体并与地固接, 加载梁的材料属性设为钢材的, 但弹性模量增大 1000 倍, 墙顶加载位置处增加弹性垫块. 墙体中按试验挖出钢板的大小尺寸, 上下两端与梁邦定, 钢板与墙板通过弹簧连接, 并建立面与面接触, 切向接触属性定义为罚函数摩擦模型, 法向接触属性定义为硬接触. 对试验的加载方式及过程进行模拟时, 竖向荷载根据各试件的轴压比值折算为均布荷载的形式施加至模型顶面, 水平荷载通过参考点与加载面耦合的方法进行单向位移加载, 以得到荷载-位移全过程曲线. 有限元模型如图 4 所示.

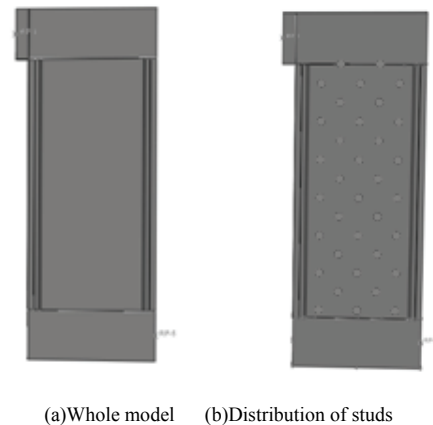


图4 有限元分析模型
Fig.4 Geometry model for FEM analysis

2.4 计算与试验结果对比

剪力墙水平荷载作用下墙体的水平荷载 P -顶点位移 Δ 曲线试验结果与有限元结果对比如图 5, 剪力墙破坏时的裂缝开展情况如图 6.

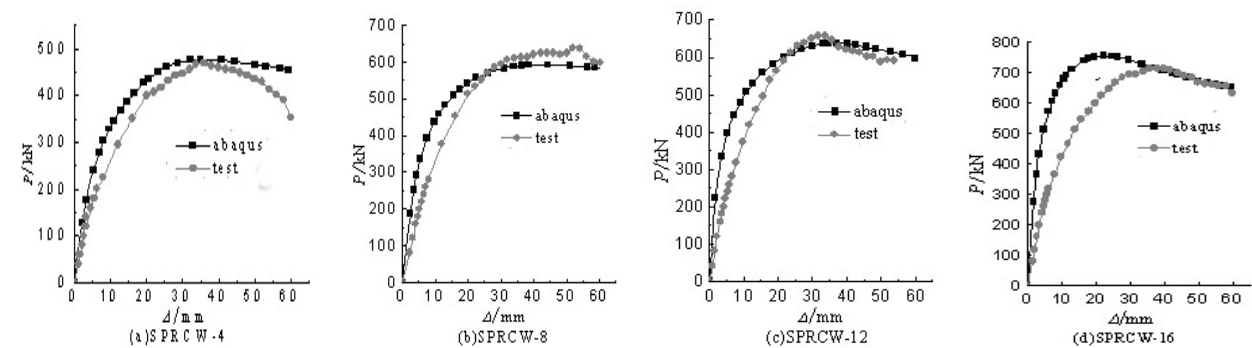
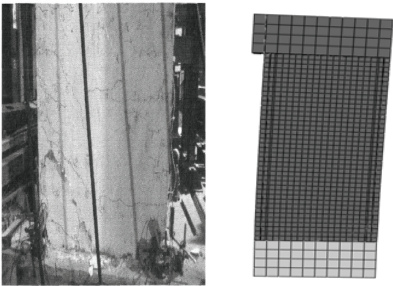


图 5 有限元分析曲线与试验曲线比较
Fig.5 Comparison of load-displacement curves between test and FEM analysis results

从图中可以看出, 计算曲线和试验结果吻合良好, 其承载力和变形基本一致. 但是计算曲线的弹性刚度要大于试验曲线的弹性刚度, 曲线峰值稍大于试验峰值点, 且之后的形状有所偏差, 这是因为: 试验为往复加载, 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, 而实际模型试验的材料是非均质, 试件内部也存在一些缺陷. 总体来说, 本文建立的有限元模型、选用的材料参数及栓钉模型可以较好地模拟带栓钉的内置钢板混凝土剪力墙的承载力和变形.



(a) Test result (b) FEM analysis result

图 6 混凝土裂缝分布对比

Fig.6 Concrete crack distribution comparison

3 参数分析

在以上验证了有限元模型的正确性之后, 采用有限元分析方法对影响带栓钉的内置钢板混凝土剪力墙性能的主要参数进行分析. 主要考虑了墙体厚度、钢板板厚、栓钉的直径、间距、轴压比、高宽比因素的影响, 试件设计参数如表 3; 所得的各试件的顶点荷载和位移曲线如图 7. 分析试件的混凝土等级为 C50, 栓钉和钢筋按试验布置, 当力-位移曲线顶点位移达到 60 mm 时, 所对应的荷载值定义为模型的极限点.

表 3 有限元模型试件设计参数
Tab.3 Properties of FEM specimens

试件编号	墙厚/mm	板厚/mm	直径/mm	间距/mm	轴压比	高宽比
SC1	125	4	6	300	0.3	2.0
SC2	125	4	8	300	0.3	2.0
SC3	125	4	10	300	0.3	2.0
SC4	125	4	6	200	0.3	2.0
SC5	125	4	6	400	0.3	2.0
SC6	125	6	6	300	0.3	2.0
SC7	125	6	8	300	0.3	2.0
SC8	125	6	10	300	0.3	2.0
SC9	125	4	6	300	0.4	2.0
SC10	125	4	6	300	0.5	2.0
SC11	200	4	6	300	0.3	2.0
SC12	125	4	6	300	0.3	1.5
SC13	200	4	6	300	0.3	1.5
SC14	200	4	8	300	0.3	1.5
SC15	200	4	10	300	0.3	1.5
SC16	200	4	6	200	0.3	1.5
SC17	200	4	6	400	0.3	1.5
SC18	200	6	6	300	0.3	1.5
SC19	200	6	8	300	0.3	1.5
SC20	200	6	10	300	0.3	1.5
SC21	200	4	6	300	0.4	1.5
SC22	200	4	6	300	0.5	1.5

(1)墙体厚度、钢板厚度. 图 7(a)表明, 随着墙体和钢板厚度增大, 试件抗侧承载能力增强. 比较试件 SC1 和 SC6, SC13 和 SC18

可知:当墙厚一定时,增加钢板厚度,通过栓钉的作用,可以有效发挥钢板的作用,提高整体的承载力;随着板厚的增大,由于栓钉的抗剪能力或混凝土的强度有限,在达到极限承载力后,承载力下降较快,变形较差.比较 SC1 和 SC11, SC12 和 SC13 表明:当板厚一定时,增加墙厚,可以防止钢板局部屈曲.

(2)栓钉的直径、间距.图 7(b)、(c)、(d)、(e)表明,随着栓钉的直径的增大,极限承载力提高,当直径增大到一定程度,极限承载力增速减慢,承载力和变形取决于钢板和混凝土墙板的厚度和强度.比较图 (b)和 (c)可知:当钢板厚达到一定程度后,栓钉的直径从 6 mm 增大到 8 mm,组合墙承载力明显提高,延性较好,但随着栓钉直径继续增大,组合墙承载力提高不大.墙体破坏是由于墙底钢板发生屈曲变形,导致外包混凝土破裂掉落.比较图 (d)和 (e)可知:随着墙体厚度的增大,采用较大栓钉直径可以提高组合墙抗剪承载力,当栓钉直径从 8 mm 增大到 10 mm,承载力增加较慢,这时增大钢板厚度和栓钉直径,可以明显提高墙体的承载能力和变形能力.图 7(f)表明,随着栓钉的间距增大,相应的栓钉数量减少,当减少到一定程度后,由于未能充分发挥钢板或混凝土的强度,组合墙承载力降低,延性变差.可见,减小栓钉的间距,能明显提高整体的承载力和变形能力.

(3)轴压比.图 7(g)为在不同墙厚时,变化不同轴压比时的力和位移曲线.随着轴压比的增大,施加在剪力墙顶部的轴向压力会在剪力墙截面上产生压应力,可以抵消截面受拉一侧的一部分拉应力,从而可以提高剪力墙极限承载力,提高的幅度随轴压比的增大而逐渐减小.但是,当在相同的混凝土极限压应变条件下增大轴压比,截面的受压区高度就会增大,截面曲率延性系数就变小,延性有所降低.所以,为保证剪力墙的延性,应该限制轴压比.

(4)高宽比.比较图 7(h)中 SC1 和 SC12, SC11 和 SC13,可以看出,在其他参数相同、通过栓钉确保二者共同作用良好情况下,随着高宽比的增大,弹性阶段的刚度和承载力降低,但延性较好.这是因为高宽比较小的墙体破坏由剪切裂缝控制,要达到峰值需要更大的水平荷载;而高宽比较大的墙体,一般情况下是弯曲屈服后破坏,耗能较多,所以延性较好.

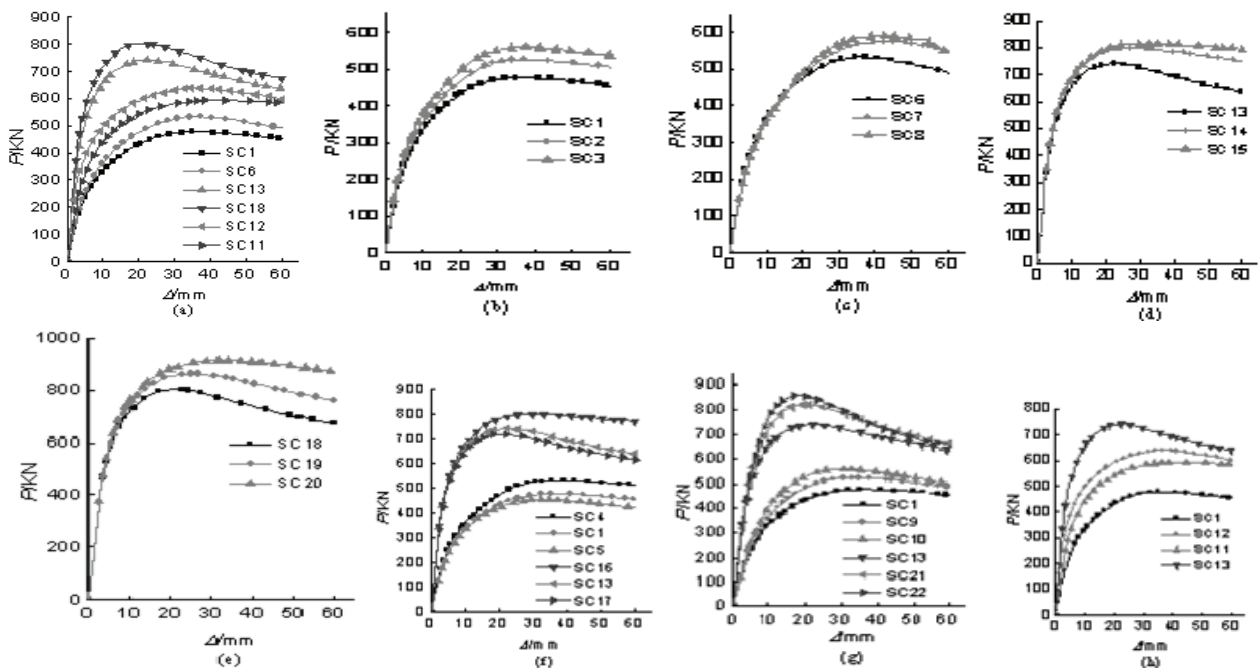


图7 荷载-位移曲线

Fig.7 Load-Displacement Curves

4 受剪承载力计算公式的建立

对于带栓钉的内置钢板混凝土剪力墙的受剪承载力,本文采用叠加法^[10]进行计算,即用钢筋混凝土板、钢骨(槽钢)和钢板的受剪承载力相加.第一、第二项用 JGJ138-2001《型钢混凝土组合结构技术规程》中的公式计算,即 V_c 和 V_s , 计算公式如下:

$$V_c = (1/(\lambda - 0.5))(0.05f_c b h_0 + 0.13N(A_w/A)) + f_{yv}(A_{sh}/S)h_0 \quad (3)$$

$$V_s = (0.4/\lambda)f_a A_a \quad (4)$$

钢板的受剪承载力 V_p 通过考虑栓钉等因素的影响对其进行拟合, 得到的公式如下:

$$V_p = (1/\lambda)(0.05 + 7.5d/s')f_p A_p \quad (5)$$

因此, 带栓钉的内置钢板混凝土剪力墙的受剪承载力计算公式为:

$$V = \frac{1}{\lambda - 0.5}(0.05f_c b h_0 + 0.13N \frac{A_w}{A}) + f_{yv} \frac{A_{sh}}{S} h_0 + \frac{0.4}{\lambda} f_a A_a + \frac{1}{\lambda}(0.05 + 7.5 \frac{d}{s'}) f_p A_p \quad (6)$$

式中: λ 为墙体的高宽比, 即计算截面处的剪跨比; f_c 为混凝土抗压强度值; b 为剪力墙厚度, h_0 为型钢(槽钢)受拉翼缘和剪力墙端部纵向受拉钢筋的合力点至混凝土受压边缘的距离; N 为剪力墙的轴向压力; A_w 为 T 形、工形截面剪力墙腹板的截面面积, 对于矩形截面剪力墙, 取 $A = A_w$, 即与剪力墙的截面面积相等; f_{yv} 为剪力墙水平分布钢筋的屈服强度值; A_{sh} 为配置在同一水平截面内的水平分布钢筋的全部截面面积; S 为水平分布钢筋的竖向间距; f_a 为钢骨(即槽钢)的屈服强度值; A_a 为剪力墙一端处型钢的截面面积; f_p 为钢板的屈服强度值; A_p 为钢板截面面积; d 为栓钉的直径; s' 为栓钉的间距(梅花型布置)。

表4为有限元模拟值和公式计算值的比较, 可以看出有限元模拟值和公式(6)的计算值相差在10%以内, 说明了拟合的带栓钉的内置钢板混凝土剪力墙的受剪承载力能较好的体现栓钉对组合墙的贡献。

表4 有限元模拟值与计算值对比
Tab.4 Comparison of maximum shear capacity between FEM and calculation

试件编号	有限元模拟值/kN	计算值/kN	相对误差%
SC1	476	484	1.83
SC2	524	511	-2.30
SC3	557	539	-3.21
SC4	559	525	-5.98
SC5	504	464	-7.86
SC6	507	541	6.87
SC7	573	541	-5.43
SC8	589	541	-8.01
SC9	497	530	6.79
SC10	558	565	1.38
SC11	593	615	3.83
SC12	639	664	3.91
SC13	756	757	0.13
SC14	797	793	-0.46
SC15	815	829	1.78
SC16	815	811	-0.44
SC17	733	729	-0.43
SC18	763	833	9.18
SC19	845	833	-1.41
SC20	896	833	-7.01
SC21	819	841	2.68
SC22	858	924	7.69

5 结论

(1)在试验的基础上, 选取的本构关系、单元模型及栓钉的荷载-滑移曲线可以较好模拟带栓钉的内置钢板混凝土剪力墙的静力加载破坏情况, 计算曲线与试验曲线总体上吻合较好。

(2)墙体的厚度越大、钢板厚度越大, 剪力墙的强度和刚度越好, 通过在钢板表面焊接栓钉, 可以提高组合墙的变形能力; 在其他参数相同情况下, 加密布置栓钉可以提高组合墙的承载力和延性, 因此建议采用较小直径加密布置。当钢板具有足够的强度和刚度条件下, 采用较大直径的栓钉对内置钢板混凝土剪力墙的承载力提高显著。

(3)随着轴压比的增大, 水平承载力有所提高, 但变形能力明显下降; 随着高宽比的增加, 水平承载力减小, 而变形能力增加; 二者对剪力墙承载力和变形能力的影响较大。

(4)栓钉通过自身的剪切弯曲来保证钢板和混凝土的协调变形, 修正的带栓钉内置钢板混凝土组合墙的抗剪承载力公式, 考虑了栓钉的直径和间距的影响, 其计算结果与模拟值符合较好。

参考文献 References

- [1] ASTANEH-ASL A. Seismic behavior and Design of Steel Shear Walls[R]. Steel Tips Report. Structural Steel Educational Council, 2001.

- [2] ASTANEH-ASL A. Seismic behavior and design of composite steel plate shear walls[R]. Steel Tips Report. Structural Steel Educational Council, 2002.
- [3] ZHAO Q H, ASTANEH-ASL A. Cyclic behavior of Traditional and Innovative Composite shear Walls[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2): 271 -285.
- [4] 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.
- [5] 张文江, 曹万林, 董宏英. 带栓钉钢板与外包混凝土剪力墙共同工作性能研究[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(6): 828-835.
ZHANG Wenjiang, CAO Wanlin, DONG Hongying. Performance of co-work between steel plate with studs and outer reinforced concrete in shear wall[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(6): 828-835.
- [6] GB50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB50010-2010 Code for design of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010.
- [7] OLLGAARD J G, SLUTTER R G, FISHER J W. Shear strength of stud connectors in lightweight and normal weight concrete [J]. Journal of AISC Engineering, 1971, 8(4): 55-64.
- [8] JOHNSON R P, MOLENSTRA N. Partial shear connection in composite beams in building [J]. Proceeding of Institution of Civil Engineers, Part 2, 1991, 91: 679-704.
- [9] 赵洁, 聂建国. 钢板-混凝土组合梁的非线性有限元分析[J]. 工程力学, 2009, 26(4): 105-112.
ZHAO Jie, NIE Jian-guo. Nonlinear finite element analysis of steel plate-concrete composite beams [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(4): 105-112.
- [10] 乔彦明, 钱稼茹, 方鄂华. 钢骨混凝土剪力墙抗剪性能的试验研究[J]. 建筑结构, 1995, 25(8): 3-7.
QIAO Yanming, QIAN Jiaru, FANG Ehua. Experimental study on shear capacity of steel reinforced concrete shear walls[J]. Building Structure, 1995, 25(8): 3-7.

Research of shear capacity performances of embedded steel plate concrete shear walls with studs

WANG Wei, YANG Teng, SU Sanqing, GAO Junjie

(School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

Abstract: To research stress state and the variation of shear capacity, based on the experiment of 4 embedded steel plate concrete shear walls with arrayed studs, a total of 22 finite element models were designed to simulate the process of the loading and concrete walls mechanics behavior by ABAQUS. The nonlinear behavior of materials, load-slip behavior and fracture model of studs are taken into account in the analysis. The reliability of the finite element model was verified through the comparison of analysis results with experimental results. Based on the proposed model, the combination of the following parameters were varied so as to compare their influence on structural response of the walls: the thickness of the concrete wall, the thickness of steel plate, stud diameter, spacing, axial load ratio and the aspect ratio. The results of the analysis about different parameters mainly show the variation of the bearing capacity of the shear wall with studs. When concrete wall and steel plate thickness meet the basic demand of details, shear bearing capacity is obviously improved by using bigger diameter studs. However, shear bearing capacity increases slowly with the increase of the diameter stud. Shear bearing capacity and ductility of shear wall become stronger by decreasing the span of studs. Considering the studs, the formula for calculating maximum shear capacity of embedded steel plate concrete shear wall with arrayed studs is also suggested. According to the simulation results, this formula provide a reference for engineering design.

Key words: embedded steel plate concrete shear wall; stud; nonlinear finite element analysis; slip model

(本文编辑: 吴海西)