

方钢管混凝土框架内置侧边开洞薄钢板剪力墙的 抗侧承载力研究

王先铁¹, 周绪红², 储召文¹, 刘立达¹, 贺 博¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 对 1 榀 1/3 比例的单跨 2 层方钢管混凝土框架内置侧边开洞薄钢板剪力墙进行了拟静力试验. 利用有限元软件 ABAQUS 对其进行了非线性数值分析, 结合试验结果, 分析了方钢管混凝土框架内置侧边开洞薄钢板剪力墙的受力机理和破坏机制. 研究了洞口边缘构件与边框架不同连接方式对结构抗侧承载力的影响. 基于侧边开洞薄钢板剪力墙的受力机理, 提出了方钢管混凝土框架内置侧边开洞薄钢板剪力墙的抗侧承载力计算模型及计算公式, 并与试验及足尺有限元模型结果对比. 结果表明: 方钢管混凝土框架内置侧边开洞薄钢板剪力墙具有较高的承载力、初始刚度和延性, 抗侧承载力公式计算结果与试验及有限元结果吻合较好.

关键词: 方钢管混凝土框架; 薄钢板剪力墙; 侧边开洞; 破坏机制; 抗侧承载力

中图分类号: TU398.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)03-0350-10

Study on lateral resistance capacity of concrete-filled square steel tubular frame-thin steel plate shear wall with side opening

WANG Xiantie¹, ZHOU Xuhong², CHU Zhaowen¹, LIU Lida¹, HE Bo¹

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

2. Chongqing University, Chongqing 400045, China)

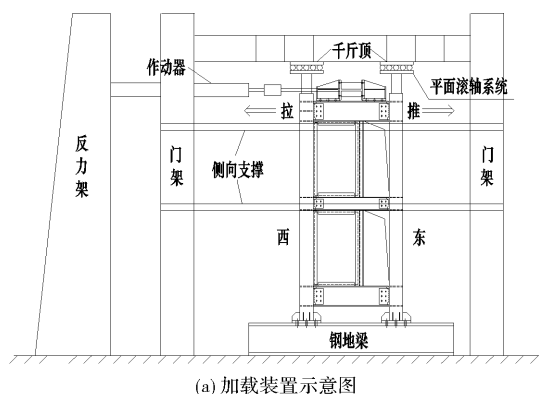
Abstract: The quasi-static test was conducted on one 1/3 scale one-bay two-story concrete-filled square steel tubular frame-thin steel plate shear wall with side opening (SPSW-SO). The nonlinear analytical analysis was conducted using the finite element package ABAQUS. Based on the experimental and analytical results, the mechanical behavior and failure mechanism of the concrete-filled square steel tubular frame-thin SPSW-SO were studied. The effect of different connection types between the boundary members and frame beams on the structure was studied. Based on the failure mechanism of the SPSW-SO, the analytical model and simplified calculating formula of the lateral force resistant capacity of the SPSW-SO were proposed. The formula results were compared with those of the experimental and full size finite element model. The results show that the concrete-filled square steel tubular frame-thin SPSW-SO has considerable lateral-resisting capacity, initial stiffness and favorable energy dissipation capacity. The formula results agree well with the experimental and numerical results.

Key words: concrete-filled square steel tubular frame; thin steel plate shear wall; side opening; failure mechanism; lateral resistance capacity

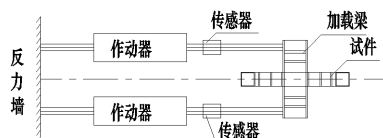
钢板剪力墙结构是一种新型抗侧力结构体系, 主要由内填钢板、竖向边缘构件(柱)及水平边缘构件(梁)构成. 其中, 充分利用屈曲后强度的薄钢板剪力墙以其良好的力学性能和经济性成为钢板剪力墙研究的热点. 近年来, 以薄钢板剪力墙为主要抗侧力构件的结构体系在高层建筑中得到了越来越多的应用^[1]. 但薄钢板剪力墙的边框必须具有足够的强度和刚度, 以承担钢板剪力墙屈曲后拉力场产生的拉力, 为钢板剪力墙屈曲后性能的充

分发挥提供有效的边界约束^[2-3]. 以方钢管混凝土柱作为竖向边缘构件的薄钢板剪力墙结构将方钢管混凝土柱承载力高、刚度大及延性好等优点与薄钢板剪力墙抗侧刚度大、延性好的优点相结合, 具有良好的承载能力和抗震性能^[4].

为了设置门、窗洞口及满足其他使用功能的要求, 需在钢板剪力墙上开洞. 开洞会对钢板剪力墙的刚度、承载力、抗震性能及破坏机制产生的影响^[5]. In-Rak Choi^[6]等对 5 榀单跨 3 层薄钢板剪



(a) 加载装置示意图



(b) 水平加载装置示意图

图2 试验装置

Fig. 2 Test setup

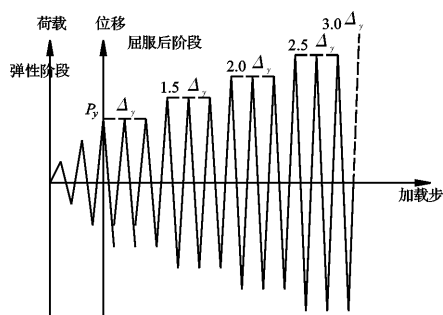


图3 加载制度

Fig. 3 Loading system

1.4 测试内容和测点布置

利用应变片、位移计和百分表监测试件在低周往复加载过程中的受力与变形情况,位移计和应变片布置如图4所示.每层梁的两端各布置1个位移计测量试件的水平位移.梁柱节点处设置斜向位移计测量梁柱节点相对转角.梁柱节点区中心和钢梁两端腹板布置应变花,钢梁两端上下翼缘布置应变片,监测边缘构件的应力发展情况.钢板剪力墙中部、角部及其它应力较大的位置布置应变花和应变片,监测钢板剪力墙的应力发展过程^[14].

2 试验现象及破坏形态

试件一、二层钢板剪力墙的最大初始面外变形分别为5 mm、3 mm.

推向加载至300 kN时,两层钢板剪力墙均产生了面外屈曲变形.反向加载时,钢板剪力墙出现“呼吸效应”^[14].随着荷载增大,钢板剪力墙进入屈服,拉向至400 kN时,一、二层钢板剪力墙沿

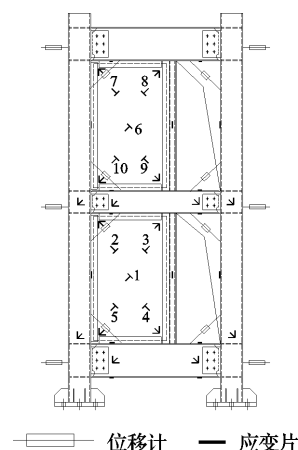


图4 测点布置

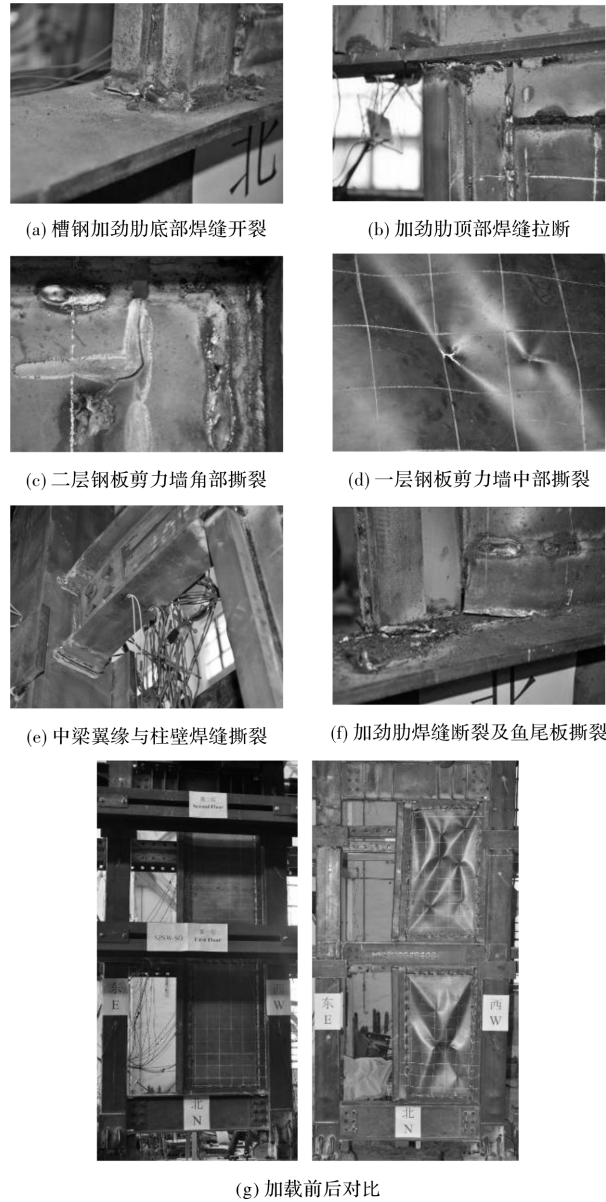
Fig. 4 Layout of measuring points

对角线处均屈服(最大应变 1.644×10^{-6}).

推向加载至450 kN时,两层钢板剪力墙均沿对角线方向形成多道明显的屈曲半波,钢板剪力墙内力形成拉力带,荷载-位移曲线明显向位移轴倾斜,取屈服位移 Δ_y 为24 mm.此时,一、二层钢板剪力墙最大面外变形分别为20 mm、16 mm^[14].1.5 Δ_y 时,一层槽钢加劲肋底部焊缝开裂(图5a).由于钢板剪力墙角部应力集中,在拉力场和框架侧移内力共同作用下,一层下部鱼尾板东侧与底梁上翼缘焊缝被拉开.2.0 Δ_y 第2循环推向加载完成时,二层槽钢加劲肋顶部焊缝被拉断(图5b),西柱柱脚处轻微鼓曲.第3循环推向加载完成时,二层钢板剪力墙西北角沿对角线方向撕裂(图5c),中梁东侧腹板和东柱柱脚处鼓曲.第3循环拉向加载完成时,由于钢板剪力墙屈曲后在反复荷载作用下被多次弯折,二层钢板剪力墙中心开裂.2.5 Δ_y 时试件达到峰值荷载,推拉方向荷载分别为516.48 kN、-479.08 kN.此时,一、二层钢板剪力墙最大面外变形分别为40 mm、28 mm.

随着循环位移增大,鱼尾板与框架间的裂缝、钢板剪力墙角部及中部裂缝继续发展.由于一层槽钢加劲肋端部焊缝断裂,对钢板剪力墙拉力场锚固作用减弱,可发挥抗侧作用的钢板剪力墙面积减少,试件承载力逐渐下降.反复荷载作用下钢板剪力墙中心撕裂(图5d),中梁东侧下翼缘与柱壁连接焊缝被撕裂(图5e).3.0 Δ_y 第1循环拉向加载完成时,二层鱼尾板与顶梁下翼缘焊缝撕裂,顶梁东侧下翼缘与柱壁连接焊缝被拉断.第2循环拉向加载完成时,一层槽钢加劲肋底部与底梁上翼缘焊缝被拉断(图5f).3.5 Δ_y 第1循环推向加载完

成时, 水平荷载降至峰值荷载的 85% 以下, 试验结束^[14]. 最终破坏形态与加载前对比见图 5g.



(g) 加载前后对比

图 5 试验现象

Fig. 5 Experiment phenomena

3 试验结果及分析

3.1 滞回曲线与骨架曲线

试件的水平荷载-顶点位移滞回曲线如图 6 所示. 滞回曲线在零位移附近存在“捏缩”现象. 其原因是正向加载使钢板剪力墙屈曲形成拉力场, 卸载并反向加载过程中, 拉力带松弛而退出工作, 钢板剪力墙出现“呼吸效应”, 之后形成反向拉力场, 期间水平荷载主要由框架承担, 侧向刚度在此阶段大幅下降^[15]. 峰值荷载之前, 滞回环呈较为饱满的梭形; 峰值荷载之后, 钢板剪力墙已大部分屈服, 刚度逐渐降低, 钢板剪力墙分担水平

荷载的比例减少, 框架分担水平荷载的比例增加. 随着循环位移增大, 钢板剪力墙角部和中部裂缝持续发展, 加劲肋端部焊缝断裂, 对钢板剪力墙拉力场锚固作用减弱, 滞回曲线出现下降段, 荷载与刚度逐渐下降. 滞回环由梭形转化为反 S 形.

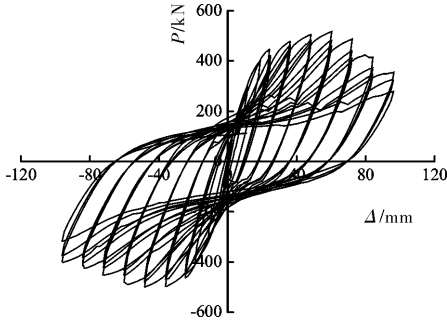


图 6 荷载-位移滞回曲线

Fig. 6 Load-displacement hysteretic curve

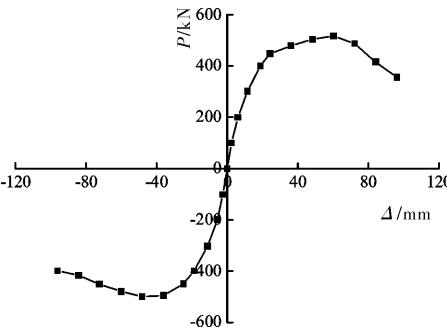


图 7 骨架曲线

Fig. 7 Skeleton curve

试件的骨架曲线如图 7 所示. 由骨架曲线可知试件的特征荷载和位移, 如表 2 所示. 采用“通用屈服弯矩法”确定屈服位移 Δ_y ^[16]. 试验中洞口边缘加劲肋焊缝断裂, 对钢板剪力墙锚固作用减弱, 导致后期钢板剪力墙拉力场未能充分开展, 影响了其抗震性能的充分发挥. 试件一层层间位移为 35.38 mm(对应层间位移角 1/40), 二层层间位移为 46.99 mm(对应层间位移角 1/30), 均大于《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)^[17]中多、高层钢结构弹塑性层间位移角 1/50 的限值, 表明试件具有良好的延性.

表 2 试验结果

Tab. 2 Test results

加载方向	P_y /kN	Δ_y /mm	P_m /kN	Δ_m /mm	Δ_u /mm	μ
推	427.98	20.51	516.55	61.02	79.88	3.89
拉	401.06	19.04	479.08	42.10	80.34	4.22

注: P_y 为屈服荷载, Δ_y 为屈服荷载对应的位移; P_m 为峰值荷载, Δ_m 为峰值荷载对应的位移; Δ_u 为极限荷载对应的位移, μ 为延性系数 ($\mu = \Delta_u / \Delta_y$).

3.2 钢板剪力墙应力分析

钢板剪力墙的应力发展情况如图8所示(测点编号见图4),其中, σ 为单轴应力, σ_y 为材料的屈服应力.由图8可知,正向加载时,测点4、9的应力值基本小于其它测点应力值;反向加载时,测点3、8的应力值基本小于其它测点应力值.其原因为洞口边缘构件强度、刚度不足及往复荷载作用下其端部焊缝过早撕裂.正向加载时,测点4、9所在区域未能得到充分锚固,反向加载时,测点3、8所在区域未能得到充分锚固,钢板剪力墙形成“不充分拉力场”.加载初期,钢板剪力墙沿对角线区域受力较大,随着加载位移增大,拉力场逐渐向两侧扩展,钢板剪力墙内力分布逐渐均匀.

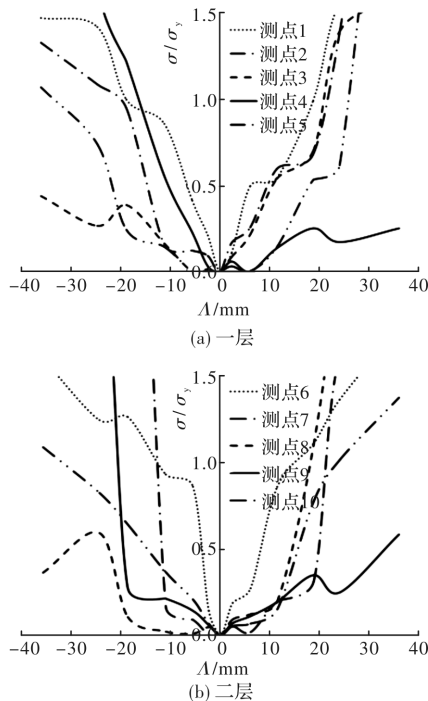


图8 钢板剪力墙应力发展

Fig. 8 Stress development of SPSW

3.3 破坏机理分析

较小的水平荷载作用下,钢板剪力墙处于平面受力状态,在水平剪力作用下出现主拉应力和主压应力,当剪应力达到临界剪应力时,主压应力方向的钢板剪力墙即发生屈曲,沿对角线方向形成拉力带,继续增加的荷载由钢板剪力墙拉力场承担.随着位移增加,拉力带沿对角线逐渐向外扩展,钢板剪力墙屈服面积逐渐增大,钢板剪力墙角部和中部在水平往复荷载作用下形成褶皱,逐渐开裂,且由于加劲肋与框架连接焊缝过早断裂,加剧了钢板剪力墙角部撕裂,之后荷载主要由钢管混凝土框架承担.梁端与柱壁连接焊缝逐渐开裂,最终由于柱脚形成塑性铰,试件破坏.试件

破坏过程为钢板剪力墙先屈曲、后屈服,随后钢管混凝土柱脚形成塑性铰而破坏.符合“钢板剪力墙先于框架破坏”的抗震设防理念,基本达到双重抗震设防目标^[14].

方钢管混凝土框架可为钢板剪力墙屈曲后性能的发提供足够的锚固.由于钢板剪力墙侧边开洞,开洞侧的槽钢加劲肋相当于局部边缘构件,为钢板剪力墙屈曲后拉力场提供锚固作用.试验中当槽钢加劲肋与周边框架的连接焊缝破坏后,局部边缘构件对钢板剪力墙拉力场的锚固作用减弱,导致后期钢板剪力墙拉力场未能充分开展,影响了试件承载能力和延性的充分发挥.因此,为了充分发挥内置侧边开洞薄钢板剪力墙的性能,必须确保洞口边缘加劲肋具有足够的强度和刚度,以及加劲肋两端与周边框架的可靠连接^[14].

4 有限元分析结果与试验结果对比

4.1 有限元模型

为深入了解结构的应力发展过程,明确其受力机理和破坏机制,采用有限元软件 ABAQUS 对试件进行非线性数值分析.钢材材性参数取材性试验结果,选用弹性-线性强化模型,强化模量 $E_t = 2\%E$ (E 为钢材弹性模量),泊松比取 0.30. 钢构件选用线性减缩薄壳单元 S4R,混凝土选用 8 节点缩减积分格式的实体单元 C3D8R. 考虑几何、材料及接触非线性.混凝土采用塑性损伤模型,其塑性参数^[18]见表 3. 钢管壁与混凝土之间的接触关系,切线方向采用库伦摩擦模型,摩擦系数取 0.6,以考虑二者间的粘结滑移,法线方向采用“硬”接触.约束柱脚平面各个方向的位移和转角,模拟嵌固边界条件;约束钢梁的平面外水平位移,防止钢梁平面外失稳.选取钢板剪力墙屈曲分析中不利的缺陷分布当作初始几何缺陷计入模型,几何缺陷取试件实际缺陷幅值.有限元模型如图 9 所示.

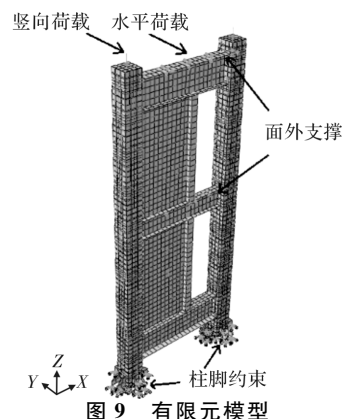


图9 有限元模型

Fig. 9 Finite element model

表 3 混凝土塑性参数

Tab. 3 Plastic coefficients of concrete

膨胀角/°	偏心率 ϵ	σ_{b0}/σ_{c0}	形状系数 K_c	粘性系数
30	0.1	1.16	0.667	0.0005

注: σ_{b0} 为初始等效双轴抗压强度; σ_{c0} 为初始单轴抗压强度.

4.2 结果对比

有限元结果与试验结果对比如图 10 所示. 由图 10(a)、(b)可知, 钢板剪力墙在往复荷载作用下整体呈现出“X”变形, 柱根部鼓曲较为严重, 有限元与试验变形形态吻合较好. 由图 10(c)、(d)可知, 屈服荷载前, 有限元与试验滞回曲线几乎一致. 有限元模拟了试件的理想情况, 而材料强度的离散性、试件加工质量、试验装置间的缝隙、支撑系统对试件的摩擦力等因素都将对结构性能产生影响

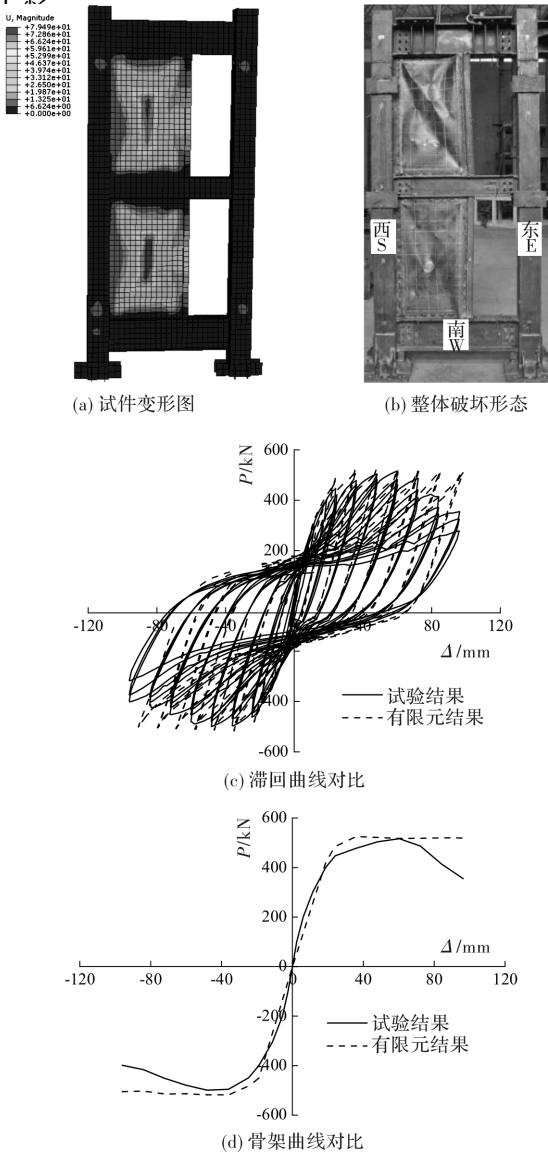


图 10 有限元与试验结果对比
Fig. 10 Comparison between the finite element analysis and test results

响, 同时, ABAQUS 中的金属本构模型未能考虑材料在循环荷载下的损伤与断裂, 因此, 有限元计算滞回曲线较为饱满, “捏缩”相对较轻, 有限元滞回曲线在达到峰值荷载后, 未出现明显下降段. 总体来看, 有限元分析能够较好地模拟方钢管混凝土框架内置侧边开洞薄钢板剪力墙在低周反复荷载作用下的受力全过程^[14].

5 抗侧承载力

5.1 洞口边缘构件研究

为更好地发挥钢板剪力墙的性能, 洞口一侧边缘需设置边缘加劲构件. 边缘构件截面形式可为 H 型钢、T 型钢、角钢、槽钢、矩形管等, 其中, 矩形管具有较高的抗弯、抗扭刚度, 可提供有效的面外约束和轴向支撑作用, 因此, 采用矩形钢管作为洞口边缘构件.

洞口边缘构件与边框梁的连接方式有刚接、铰接及不连接三种形式. 为了解不同连接方式对结构抗侧承载力的影响, 设计了单跨 3 层足尺模型, 采用有限元软件 ABAQUS 对其进行非线性数值分析. 为了更好地实现理想的破坏机制, 即钢板剪力墙先于框架破坏, 钢板剪力墙采用 Q235 钢材 ($f_y = 235 \text{ MPa}$), 方钢管柱和钢梁等采用 Q345 钢材 ($f_y = 345 \text{ MPa}$). 弹性模量为 $E = 2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, 泊松比为 0.3, 钢材本构模型为理想弹塑性. 混凝土采用 C40, 考虑钢管与混凝土之间的接触及混凝土材料的塑性损伤. 模型几何尺寸和有限元模型如图 11 所示. 方钢管柱截面为 $\square 700 \times 30$, 钢板剪力墙厚度为 8 mm, 框架梁截面尺寸如表 4 所示. 主要分析因素为: (1) 洞口边缘构件截面尺寸, 取为 $\square 100 \times 10 \sim \square 350 \times 10$; (2) 洞口边缘构件与边框梁的连接形式(刚接、铰接、不连接).

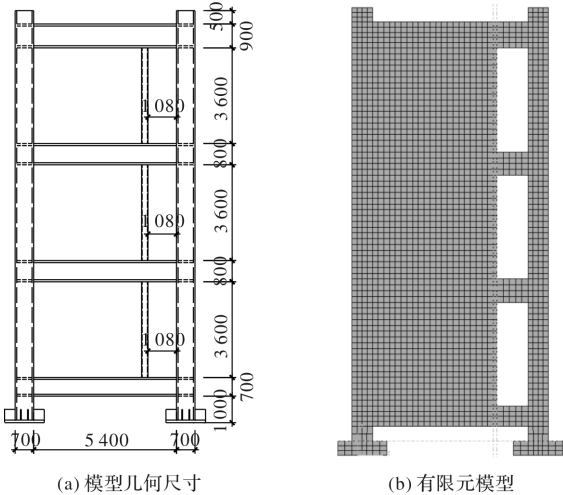


图 11 分析模型
Fig. 11 Analysis model

表 4 梁截面尺寸

Tab. 4 Dimensions of beams /mm

顶梁	中梁	底梁
H900×500×30×40	H800×500×30×40	H700×400×25×35

图 12 为洞口边缘构件尺寸-结构极限承载力曲线。由图可知,随着洞口边缘构件尺寸增大,结构极限承载力呈增大趋势;洞口边缘构件截面边长小于 300 mm 时,两端与边框梁铰接时结构极限承载力最大,刚接次之,不连接最小;洞口边缘构件截面边长大于 300 mm 后,两端与边框梁刚接时结构极限承载力最大,铰接次之,不连接最小,这是因为洞口边缘构件尺寸较大时,相当于中柱,其参与了结构抗侧。试验过程中发现,当洞口边缘构件两端与边框梁刚接时,往复荷载作用下,边缘构件端部焊缝易撕裂;而当洞口边缘构件端部与框架不连接时,钢板剪力墙角部应力集中,钢板撕裂使钢板剪力墙有效受力面积减小。研究表明,洞口边缘构件两端刚接时,会对框架梁和其自身应力分布产生不利影响,导致提前失效;洞口边缘构件两端铰接时,其端部无弯矩,对框架梁的影响较小^[19]。因此,建议洞口边缘构件端部与框架梁采用铰接连接。

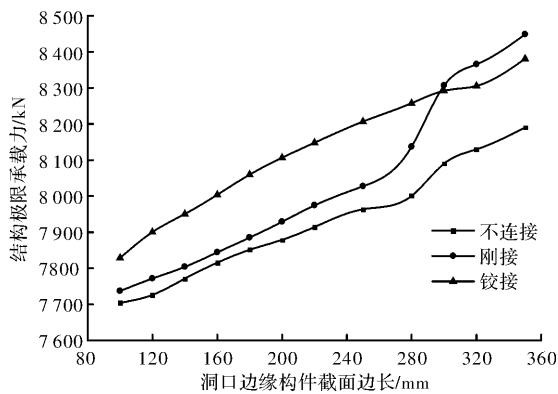


图 12 洞口边缘构件尺寸-极限承载力曲线

Fig. 12 Dimensions of boundary members-ultimate carrying capacity

5.2 极限抗侧承载力

试验与有限元分析表明,由于钢板剪力墙侧边开洞,洞口边缘构件对钢板剪力墙的锚固刚度不足,使钢板剪力墙拉力带发展不充分,形成“不充分拉力场”。正、反向极限状态下,结构与钢板剪力墙的 von Mises 应力如图 13 所示。

由图 13 可知,正、反向极限状态下,侧边开洞薄钢板剪力墙右下、右上部形成“不充分拉力场”。因此,方钢管混凝土框架内置侧边开洞薄钢板剪力墙的简化计算模型如图 14 所示,其中,“高效区”表示极限状态下拉力带充分发展部分,“低

效区”表示极限状态下拉力带未能充分发展部分。

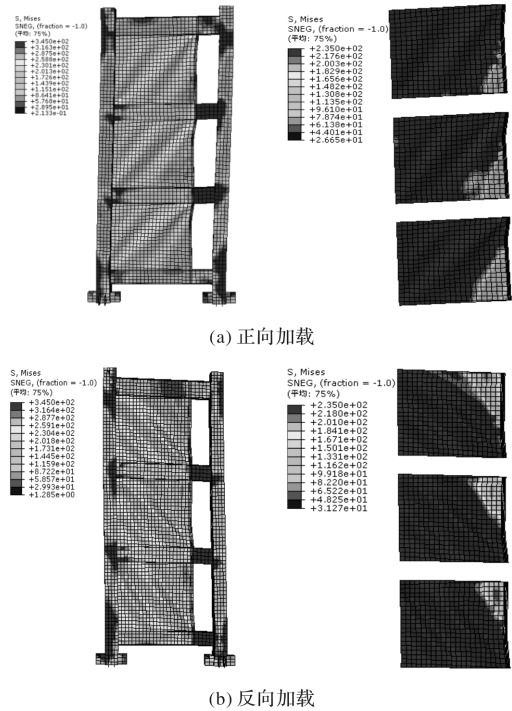


图 13 von Mises 应力

Fig. 13 von Mises stress

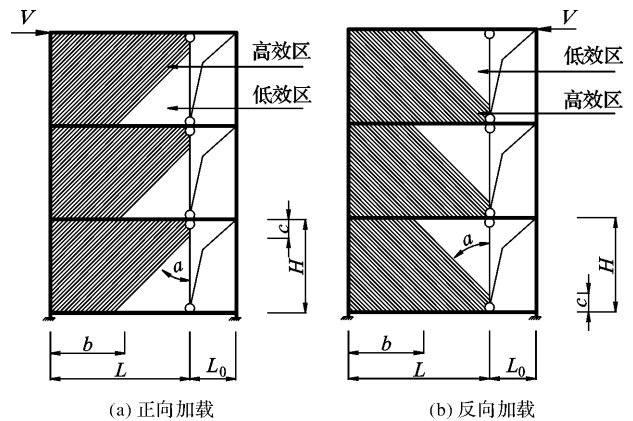


图 14 简化计算模型

Fig. 14 Simplified calculating models

方钢管混凝土框架内置侧边开洞薄钢板剪力墙的抗侧承载力 V 取剪切破坏受剪承载力 V_s 和弯曲破坏受剪承载力 V_f 的较小值,即 $V = \min\{V_s, V_f\}$ 。

5.2.1 剪切型破坏承载力 V_s

剪切型破坏承载力 V_s 为框架抗侧承载力 V_{sf} 和内填钢板剪力墙受剪承载力 V_{sp} 的叠加。与未开洞钢板剪力墙结构相比,侧边开洞钢板剪力墙由于洞口的设置,框架不仅在柱根部、柱顶及梁端出现塑性铰,还在洞口对应连梁段位置出现耗能梁段。极限状态下结构的塑性破坏机构如图 15 所示。

剪力墙形成“不充分拉力场”，框架柱根部、柱顶形成塑性铰，以及洞口处连梁段形成耗能梁段。

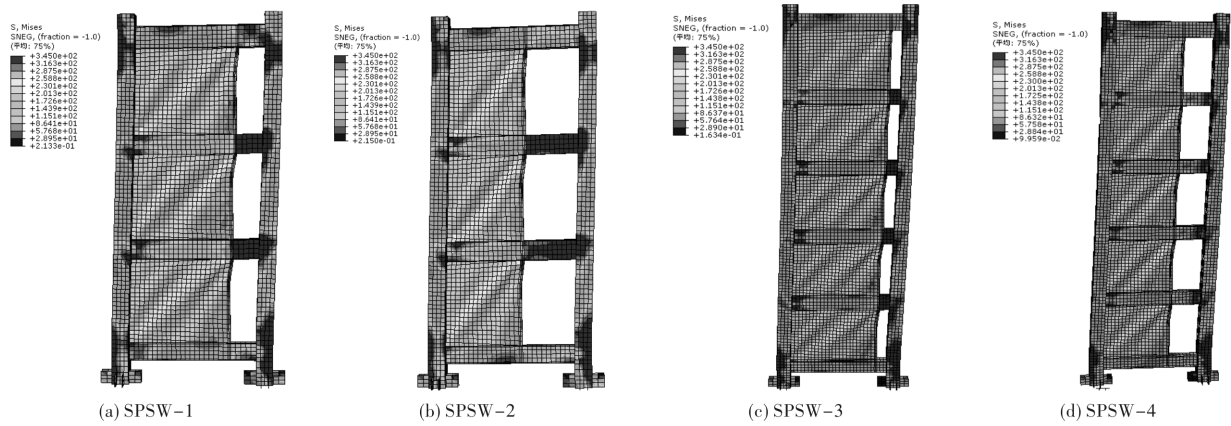


图 17 极限状态下的 von Mises 应力

Fig. 17 von Mises stress under limited states

极限抗侧承载力公式计算结果与试验及有限元结果对比见表 5。由表可知，4 个模型的极限抗侧承载力理论计算结果均略小于有限元结果，差值在 10% 以内。试验试件由于钢管柱内混凝土未

浇筑密实，且洞口边缘构件焊缝断裂造成钢板剪力墙角部过早撕裂，影响了试件的抗侧承载力，试验结果略小于理论计算结果。总体而言，公式计算结果与有限元及试验结果吻合较好。

表 5 公式与试验及有限元结果对比

Tab. 5 Comparison between formula, experimental and FEA results

编号	ω	V_s/kN	V_f/kN	V/kN	$V_{\text{FEA}}(V_{\text{test}})/\text{kN}$	$V/V_{\text{FEA}}(V_{\text{test}})$
SPSW-1	0.792	7 325	17 800	7 325	7 867	0.931
SPSW-2	0.788	6 683	17 800	6 683	6 975	0.958
SPSW-3	0.815	8 012	13 040	8 012	8 422	0.951
SPSW-4	0.809	7 019	13 040	7 019	7 532	0.932
试验	0.714	551	820	551	526	1.047

注： V_{FEA} 为有限元结果， V_{test} 为本文试验结果。

6 结论

(1) 方钢管混凝土框架内置侧边开洞薄钢板剪力墙承载力高、初始刚度大、延性较好，是一种优良的抗侧力结构体系。

(2) 方钢管混凝土柱为钢板剪力墙发挥屈曲后强度提供了有效锚固。在框架柱破坏之前，钢板剪力墙充分屈服并耗散能量，符合“钢板剪力墙先于框架破坏”的抗震设防理念，基本达到双重抗震设防目标。

(3) 方钢管混凝土框架内置侧边开洞钢板剪力墙由于洞口的存在，不仅在柱根部、柱顶及梁端形成塑性铰，而且在洞口对应连梁段出现耗能梁段。洞口边缘构件端部与框架梁建议采用铰接连接方式。

(4) 方钢管混凝土框架内置侧边开洞薄钢板剪力墙的计算模型和抗侧承载力计算公式，具有较

好的适用性。

参考文献 References

- [1] 郭彦林,董全利. 钢板剪力墙的发展与研究现状[J]. 钢结构,2005,20(1):1-6.
GUO Yanlin, DONG Quanli. Research and application of steel plate shear wall in high-rise buildings[J]. Steel Structure,2005,20(1):1-6.
- [2] THORBURN L J, KULAK G L, MONTGOMERY C J. Analysis of steel plate shear walls[R]. Structural Engineering Report No. 107, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, 1983.
- [3] 郭彦林,周明. 非加劲与屈后曲钢板剪力墙性能及设计理论的研究现状[J]. 建筑结构学报,2011,32(1):1-16.
GUO Yanlin, ZHOU Ming. An overview of current state of the art in behavior and design theory for unstiffened or buckling-restrained steel plate shear walls[J].

- Journal of Building Structures, 2011, 32(1): 1-16.
- [4] 张建伟,曹万林,董宏英,等. 不同构造措施的钢管混凝土边框钢板剪力墙抗震性能试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2011, 31(4): 450-456.
- ZHANG Jianwei, CAO Wanlin, DONG Hongying, et al. Experimental study on seismic performance of steel-plate shear walls with concrete filled steel tube columns and different constructional measures [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31(4): 450-456.
- [5] SABOURI-GHOMI S, AHOURI E, SAJADI R, et al. Stiffness and strength degradation of steel shear walls having an arbitrarily-located opening [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 79(5): 91-100.
- [6] CHOI In-Rak, PARK Honggun. Steel plate shear walls with various infill plate designs[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(7): 785-796.
- [7] LAN Huiguo, QIN Rong, MA Xinbo, et al. Behavior of steel plate shear wall connected to frame beams only [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 11(4): 467-479.
- [8] 聂建国,朱力,樊健生,等. 钢板剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(1): 61-69.
- NIE Jianguo, ZHU Li, FAN Jiansheng, et al. Experimental research on seismic behavior of steel plate shear walls[J]. Journal of Building Structure, 2013, 34(1): 61-69.
- [9] 郭震,袁迎曙. 三边约束受剪钢板剪力墙力学特征研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2011, 38(11): 7-12.
- GUO Zhen, YUAN Yingshu. Mechanical characteristics of steel shear plate walls with trilateral constraint [J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences). 2011, 38(11): 7-12.
- [10] 王先铁,周超,贾贵强,等. 方钢管混凝土柱框架内置中间开洞薄钢板剪力墙结构抗震性能试验研究, 建筑结构学报, 2015, 36(8): 16-23.
- WANG Xiantie, ZHOU Chao, JIA Guiqiang, et al. Experimental research on seismic behavior of concrete-filled square steel tubular column frame-thin steel plate shear walls with middle opening[J]. Journal of Building Structures. 2015, 36(8): 16-23.
- [11] JEFFREY Berman, MICHEL Bruneau. Plastic analysis and design of steel plate shear walls[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(11): 1448-1456.
- [12] 王先铁,马尤苏夫,郝际平,等. 钢板剪力墙边缘构件的计算方法研究[J]. 工程力学, 2014, 31(8): 175-182.
- WANG Xiantie, MA Yousufu, HAO Jiping, et al. Calculation methods for boundary elements in steel plate shear walls[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(8): 175-182.
- [13] 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, 1997.
- Specifying of testing methods for earthquake resistant building: JGJ 101-96[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997.
- [14] 王先铁,王东石,李海广,等. 方钢管混凝土框架-单侧开洞薄钢板剪力墙滞回性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(3): 333-340.
- WANG Xiantie, WANG Dongshi, LI Haiguang, et al. Re-search on the hysteretic behavior of concrete-filled square steel tubular frame-thin steel plate shear walls with side opening[J]. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2015, 47(3): 333-340.
- [15] 王先铁,王东石,马尤苏夫,等. 方钢管混凝土框架内置十字加劲薄钢板剪力墙低周反复荷载试验研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(22): 84-91.
- WANG Xiantie, WANG Dongshi, MA Yousufu, et al. Experimental study on concrete-filled square steel tubular frame-thin steel plate shear walls with cross stiffeners under low cyclic loading[J]. Building structure, 2016, 46(22): 84-91.
- [16] 唐九如. 钢筋混凝土框架节点抗震[M]. 南京: 东南大学出版社, 1999.
- TANG Jiuru. Seismic on reinforced concrete frame joint [M]. Nanjing: Southeast University Press, 1999.
- [17] 建筑抗震设计规范: GB50011-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Code for seismic design of buildings: GB50011-2010. [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [18] Dassault Systèmes Simulia Corp. ABAQUS Analysis User's Manual Version 6.10 [M]. Providence, RI: Dassault Systèmes Simulia Corp., 2010.
- [19] 王先铁,李海广,白连平,等. 方钢管混凝土框架-侧边开洞薄钢板剪力墙受力性能研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(1): 156-160.
- WANG Xiantie, LI Haiguang, BAI Lianping, et al. Study of mechanical behavior of the concrete filled square steel tube frames-thin steel plate shear walls with side openings[J]. Industrial Construction, 2015, 45(1): 156-160.
- [20] 陈绍蕃. 钢结构设计原理(第三版)[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- CHEN Shaofan, Principles of Steel Structure Design 3rd ed. [M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [21] PARK H G, KWACK J H, JEON S W, et al. Framed steel plate wall behavior under cyclic lateral loading [J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(3): 378-388.