

两边连接钢板剪力墙与组合剪力墙抗剪性能

徐 嫚, 王玉银, 张素梅

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090, xuman306@126.com)

摘 要: 采用 ANSYS 有限元程序对两边连接钢板剪力墙与钢板组合剪力墙进行数值模拟分析. 研究了不同高厚比下两边连接钢板剪力墙与钢板组合剪力墙抗剪静力性能的区别, 分析了两种剪力墙的受力机理和破坏模式. 结果表明: 高厚比 λ 是影响两边连接钢板剪力墙抗剪静力性能的主要因素; 高厚比较大的剪力墙所需要的能够完全限制钢板出平面方向位移的混凝土板厚度较小; 预制混凝土板的存在改变了剪力墙钢板的受力模式, 对薄钢板剪力墙尤为明显, 钢板由拉力带承担水平荷载改变为截面受剪承担水平荷载.

关键词: 钢板剪力墙; 钢板组合剪力墙; 初始刚度; 承载力; 抗剪静力性能

中图分类号: TK529 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2010)08-1216-05

Shear resistance behaviour of steel plate shear wall and steel-concrete composite shear wall with two-side connection

XU Man, WANG Yu-yin, ZHANG Su-mei

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, xuman306@126.com)

Abstract: In this paper the numerical simulation on steel plate shear wall (SPSW) and steel-concrete composite shear wall (SCSW) with two-side connection was carried out by the finite element software ANSYS. Performances of the two shear walls were investigated. Different mechanical behaviors between SPSW and SCSW with two-side connection were discussed in details. It is found that the depth-thickness ratio λ is a key parameter that influences the shear resistance behavior of SPSW with two-side connection. The concrete plate which completely restricts the out-of-plate displacement may be thin if the depth-thickness ratio of a wall is large enough. Due to the concrete plate supporting, stress distributions in the SCSW are changed obviously: the horizontal load transferring manners are changed from tension strip to cross-sectional shear in the steel plates.

Key words: steel-plate shear wall; steel-concrete composite shear wall; initial stiffness; bearing capacity; shear resistance behavior

目前实际工程中的钢板剪力墙常采用钢墙与周边框架梁、柱都连接的形式^[1-3], 这种连接方式使得墙板对框架柱产生较大的附加弯矩和轴力, 使柱受力复杂, 甚至先于剪力墙板发生破坏, 不符合强柱弱梁和多道抗震体系的抗震理念, 同时不利于门窗洞口的设置^[4-6]. 为此, 采用两边连接钢板剪力墙和钢板组合剪力墙, 剪力墙钢板只与梁连接, 对柱不产生附加弯矩, 更符合强柱弱梁

的抗震理念, 塑性和滞回性能较好^[7-8]. 本文主要利用 ANSYS 有限元方法研究两边连接钢板剪力墙与钢板组合剪力墙在单向荷载作用下的抗剪静力性能.

1 模型的建立

为得到简单合理的剪力墙计算模型, 在 5 层模型图 1(a) 中取出隔离体, 隔离体受力如图 1(b) 所示. 计算中发现在剪力墙板不与框架柱连接的情况下, 柱的反弯点几乎在各层框架柱的中部, 选取如图 2 所示模型可以较好模拟框架柱在实际结构中的受力情况. 简化计算模型是在单层

收稿日期: 2008-11-19.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50478029).

作者简介: 徐 嫚(1982—)女, 博士研究生;

张素梅(1963—)女, 教授, 博士生导师.

单跨模型的基础上,上下各自延伸 1/2 层,这样在模型割取上截面柱端的弯矩可近似为零.侧边的边界条件是限制其出平面的位移,框架柱端部节点铰接,底板底边两角点铰接.模型较为合理的边界条件为 EF 边界钢板限制了 x 方向位移和绕 x 轴的转角, GH 边界钢板限制绕 x 轴的转角并耦合 x 轴方向位移^[9].

在钢板剪力墙简化计算模型的基础上建立了

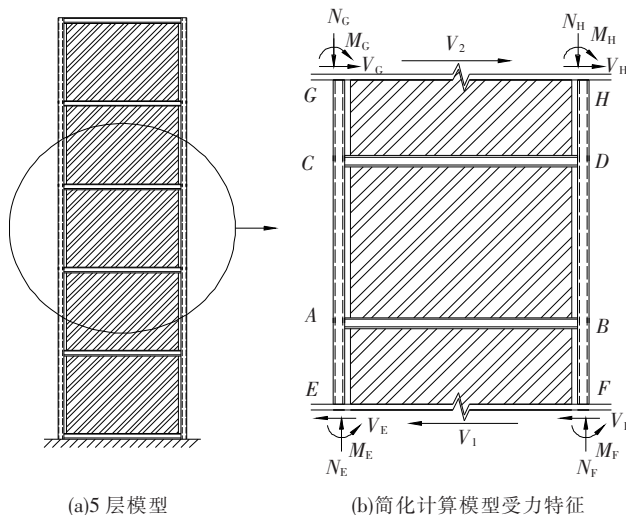


图 1 简化计算模型选取及受力特征

钢板组合剪力墙的简化计算模型,详见文献[10].预制混凝土墙板并不直接承担水平荷载,而仅作为钢板的侧向约束,防止钢板发生面外屈曲.钢板组合剪力墙模型中的连接件沿 x 轴和 y 轴方向均匀布置,间距为 300 mm,计算时在连接件位置利用耦合命令使钢板与预制混凝土板相应位置出平面方向的位移一致.钢板初始缺陷幅值取 $L/1\ 000$,分析中不考虑应力集中对剪力墙的影响.

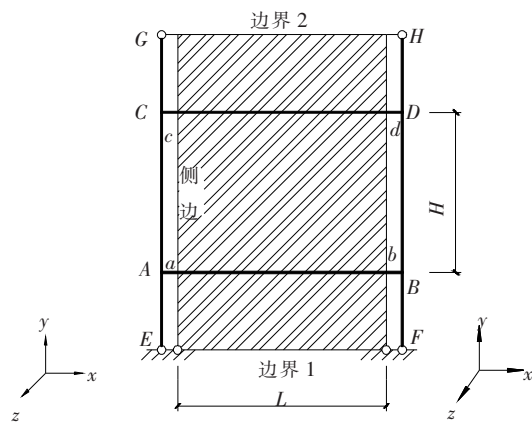


图 2 钢板剪力墙简化计算模型

2 钢板剪力墙抗剪静力性能研究

定义剪力墙板高厚比 λ 为钢墙板高度与厚度的比值 ($\lambda = H/t$).本文计算中模型钢板的高度 $H = 3\ 000\ \text{mm}$,长度 $L = 4\ 500\ \text{mm}$,通过改变钢板厚度 t 改变高厚比 λ .

图 3 为平均剪应力 τ 随层间侧移角 θ 变化的关系曲线(简称 $\tau - \theta$ 曲线).图 4 所示为钢板剪力墙的初始剪切刚度 K_c 随高厚比 λ 变化的关系曲线.图 5 所示为平均剪应力 $\tau_{1/300}$ 和 $\tau_{1/70}$ 随 λ 变化的关系曲线.由图 4~5 可以看出:当 $\lambda \geq 200$ 时,随 λ 的减小,钢板剪力墙的平均剪应力 τ 和初始剪切刚度 K_c 降低;当 $\lambda < 200$ 时, $\tau - \theta$ 曲线规律发生变化,这是由于不同高厚比下钢板剪力墙的受力机理存在着差异.

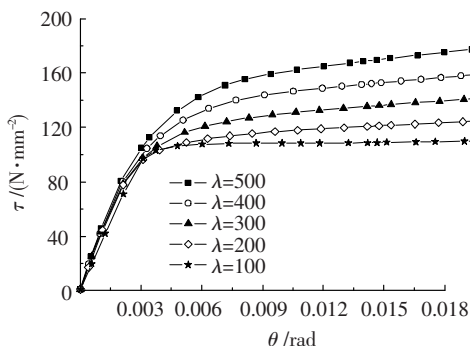


图 3 不同 λ 下钢板剪力墙的 $\tau - \theta$ 曲线

图 6 为 $\lambda = 500$ 时,不同层间侧移角 θ 下钢板剪力墙沿 z 轴方向变形图.可以看出,随着 θ 的增大,钢板上形成的屈曲波数目不断增加,增加的方式是由中间屈曲波向两侧扩展,屈曲波的宽度逐渐减小;屈曲波的方向约为钢板对角线方向;屈曲波形状在剪力墙钢板左上方区域和右下方区域发生变化,呈类似于三角形形状,这是因为钢板 ac 边和 bd 边不与框架柱相连而仅限制其出平面方向的位移,其边界条件发生了改变.

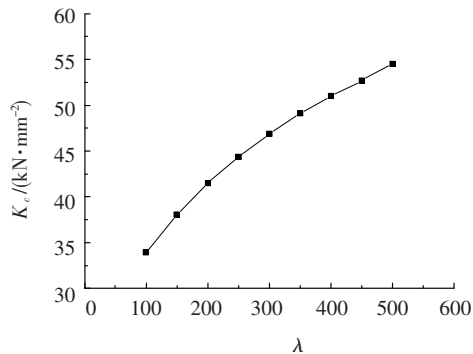


图 4 K_c 随 λ 变化的曲线

图 7 为 $\lambda = 150$ 时,不同 θ 下钢板剪力墙沿 z 轴方向变形图.可以看出,随 θ 的增大,剪力墙钢板上形成屈曲波的数目没有明显的增加,但屈曲波的宽度不断减小;屈曲波的方向约为钢板对角线方向;屈曲波形状在钢板左上方和右下方区域发生变化,呈类似于三角形形状,原因和 $\lambda = 500$

的钢板剪力墙是一样的。

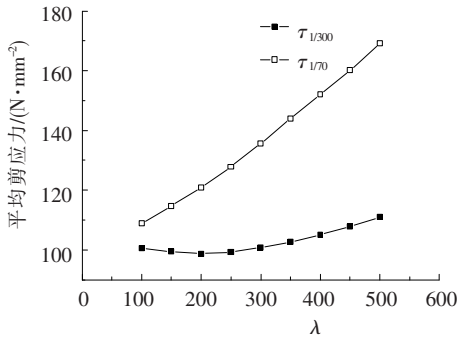
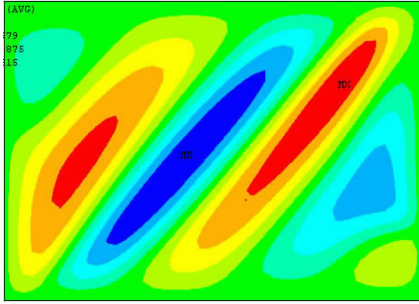
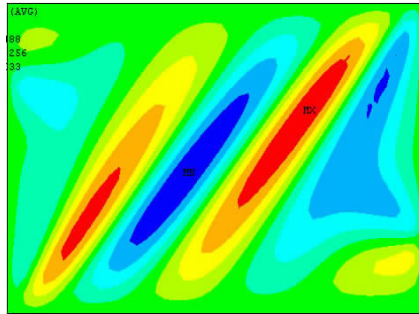


图5 λ对平均剪力 $\tau_{1/300}$ 和 $\tau_{1/70}$ 的影响

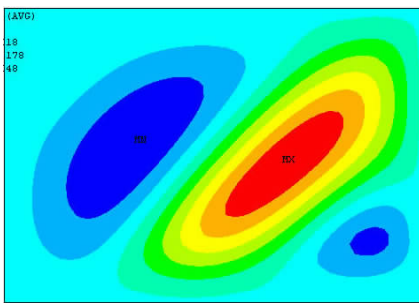


(a) $\theta = 1/300$ rad

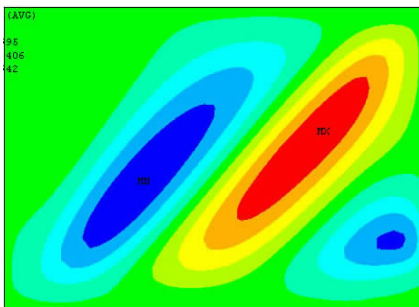


(b) $\theta = 1/70$ rad

图6 钢板剪力墙沿z轴方向变形图($\lambda = 500$)



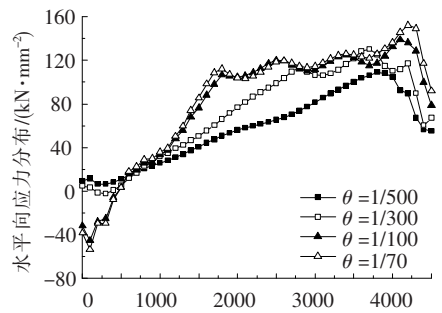
(a) $\theta = 1/300$ rad



(b) $\theta = 1/70$ rad

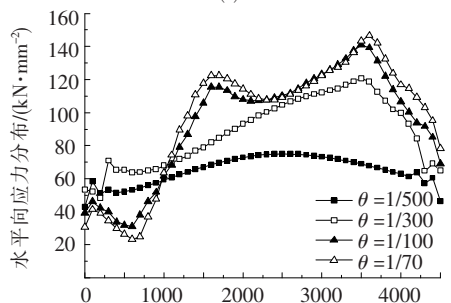
图7 钢板剪力墙沿z轴方向变形图($\lambda = 150$)

图8为高厚比 $\lambda = 500$ 和 $\lambda = 150$ 时,不同 θ 下框架梁 CD 对钢板 cd 边所产生的水平应力分布(以 f_{hor}/t 表示, f_{hor} 表示框架梁 CD 对钢板 cd 边沿 x 轴方向的分布力, t 为剪力墙钢板厚度),横轴表示钢板 cd 边任意一点距 c 点的距离.由图8(a)可以看出,分布应力 f_{hor}/t 沿梁长度方向分布不均匀,其最大值位于钢板 cd 边 d 点附近.当层间侧移角为 $1/500$ 时, $x = 0$ mm处的数值约为 0 kN/m, $x = 4000$ mm时数值最大, $x = 0 \sim 4000$ mm分布应力 f_{hor}/t 近似呈直线分布,随着 θ 的增大, $x = 1500 \sim 4000$ mm分布应力 f_{hor}/t 逐渐增大并且分布逐渐趋于均匀.以上现象说明,受力初期钢板在沿 ad 对角线方向形成拉力带;随着 θ 的增大,拉力带不断变宽,拉力带内应力不断增加.当 θ 为 $1/500$ 时,分布应力 f_{hor}/t 在 c 点为正值,随着 θ 的增大,分布应力 f_{hor}/t 不断减小,当 θ 达到一定值, f_{hor}/t 变为负值.这是由于钢板在沿钢板 ad 方向形成拉力带的同时会在 b 点和 c 点形成压力区,压力区应力随着 θ 的增大而增大.由图8(b)可以看出,当 θ 为 $1/500$ 时,分布应力 f_{hor}/t 曲线分布相对薄钢板剪力墙均匀, cd 边某点的数值没有明显高于其他位置.随着 θ 的增加,曲线形成波状.以上现象说明,在受力初期钢板上没有形成拉力带.随着 θ 的增大,首先在沿钢板对角线 ad 附近形成拉力带,随后拉力带不断变宽,拉力带内应力不断增加.钢板 cd 边 c 点附近水平向分布力 f_{hor}/t 的变化趋势为先增大然后减小,这是



梁上某点位置/mm

(a) $\lambda = 500$



梁上某点位置/mm

(b) $\lambda = 150$

图8 框架梁 CD 对钢板 cd 边水平方向分布应力

由于在受力初期钢板以截面受剪承担水平荷载,随着 θ 的增加,截面剪力不断增加并在钢板 ad 方向形成拉力带,随着拉力带的扩展,钢板 $b、c$ 区域形成压力区, c 点附近的 f_{hor}/t 分布由于钢板受力机理发生了变化而发生先增大后减小的变化趋势。

以上分析说明在受力初期,薄钢板剪力墙以拉力带形式承担水平荷载,随着 θ 的增大,两边连接钢板剪力墙以截面受剪承担水平荷载;厚钢板剪力墙受力初期以截面受剪承担水平荷载。

3 钢板组合剪力墙抗剪静力性能研究

图9为不同 λ 下钢板组合剪力墙的 $\tau - \theta$ 曲线.随着 λ 的减小,钢板组合剪力墙的平均剪应力 $\tau_{1/300}、\tau_{1/70}$ 和初始剪切刚度 K_c 降低。

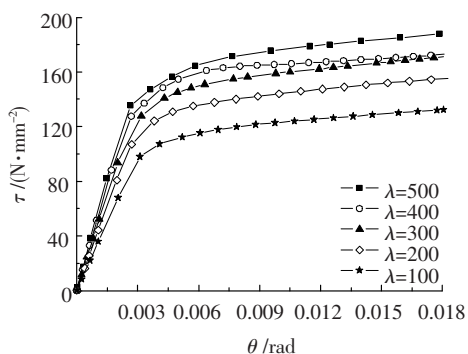


图9 不同 λ 下钢板组合剪力墙的 $\tau - \theta$ 曲线

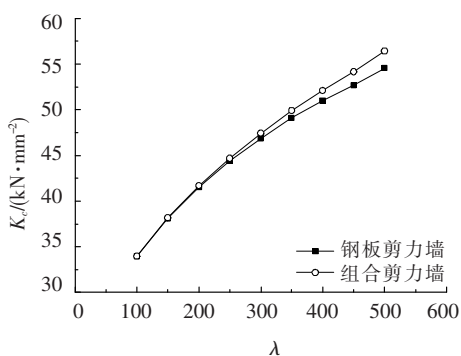


图10 λ 对初始剪切刚度 K_c 的影响

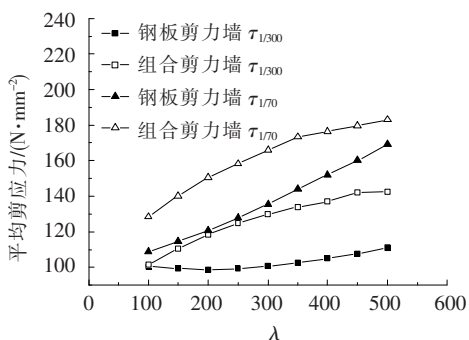
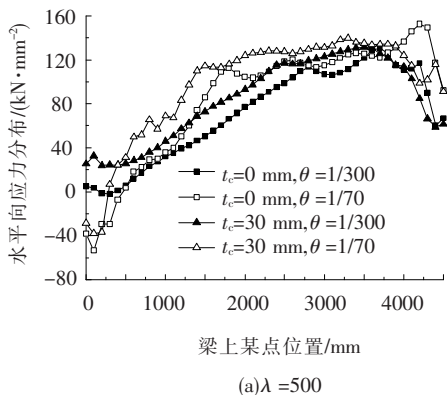


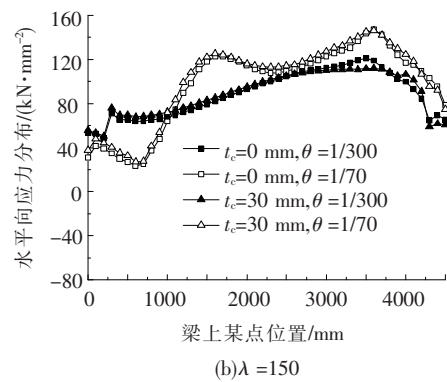
图11 λ 对平均剪应力 $\tau_{1/300}$ 和 $\tau_{1/70}$ 的影响

图10和图11分别为钢板剪力墙的初始剪切刚度 K_c 、平均剪应力 $\tau_{1/300}$ 和 $\tau_{1/70}$ 随 λ 变化的曲线.随 λ 的增大, K_c 近似呈线性增长;随 λ 的增大, $\tau_{1/300}$ 和 $\tau_{1/70}$ 逐渐增大,但增大幅度逐渐减小.随 λ 的减小,钢板组合剪力墙与钢板剪力墙的初始剪切刚度 K_c 和平均剪应力 $\tau_{1/300}$ 逐渐接近,这是由于当钢板厚度较厚时,钢板组合剪力墙和钢板剪力墙的受力机理趋于一致,主要以截面受剪承担水平荷载。

图12为 $\lambda = 500$ 和 $\lambda = 150$ 时,不同预制混凝土板厚度 t_c 下钢板组合剪力墙框架梁 CD 对钢板 cd 边所产生的水平应力分布.由图12(a)可以看出,对应 $\lambda = 500$ 的情况,钢板组合剪力墙钢板应力的分布规律与钢板剪力墙钢板应力的分布规律相同:在受力初期,钢板在沿 ab 对角线方向形成拉力带,随着 θ 的增大,拉力带宽度不断增加,拉力带内部应力增加,主要以拉力带形式承担水平荷载;在达到相同层间侧移角时,钢板组合剪力墙钢板 cd 边分布应力 f_{hor}/t 的数值大于钢板剪力墙,并且分布力分布比钢板剪力墙分布均匀.这说明预制混凝土板的存在提高了钢板强度的利用率.由图12(b)可以看出,对应 $\lambda = 150$ 的情况,预制混凝土板的存在并没有明显改变分布力的数值和分布.这说明对应高厚比较小情况,须采用较厚的预制混凝土板才可以使钢板受力形式发生变化。



(a) $\lambda = 500$



(b) $\lambda = 150$

图12 框架梁 CD 对钢板 cd 边水平方向分布应力

图13为不同 θ 下钢板组合剪力墙沿 z 轴方向变形图(预制混凝土板厚度能够完全限制钢板连接件位置出平面方向的位移).当钢板外侧覆盖混凝土板足够厚,使其能够完全限制住钢板与螺栓连接位置出平面方向的位移时,钢板的变形形式由原来的整体屈曲改变为局部屈曲.钢板在沿对角线 ad 方向形成屈曲波,屈曲波在两排螺栓之间发展,且随着层间侧移角的增大,屈曲波由中间向两侧扩展;但在钢板不与框架柱连接区域,由于边界条件发生了变化使得屈曲波形状发生变化,由沿对角线方向变为水平方向.在工程实际中,当混凝土板厚度达到一定数值时,剪力墙钢板不再发生出平面屈曲,两边连接钢板组合剪力墙以截面受剪承担水平荷载.

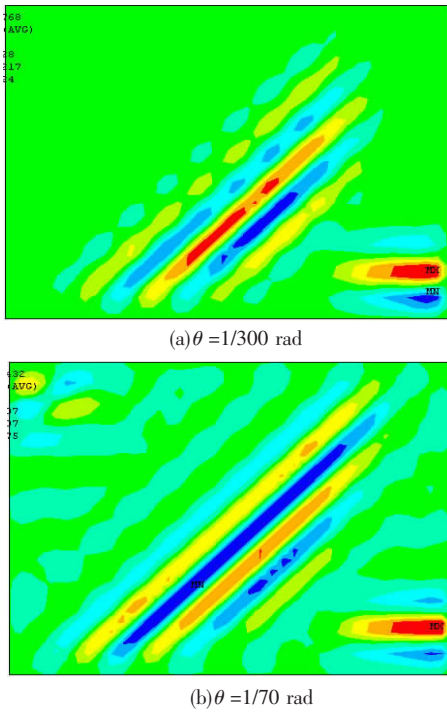


图13 钢板组合剪力墙沿 z 轴方向变形图($\lambda = 500$)

4 结 论

1)高厚比 λ 是影响两边连接钢板剪力墙抗剪静力性能的主要因素.薄钢板剪力墙以拉力带形式承担水平荷载,厚钢板剪力墙在受力初期以截面受剪承担水平荷载.钢板剪力墙的初始剪切刚度 K_c 、平均剪应力 $\tau_{1/300}$ 和 $\tau_{1/70}$ 随 λ 的增大而增大.

2)对不同高厚比的剪力墙完全限制钢板出平面方向位移所需的混凝土板厚度是不同的,高厚比较大的所需要的厚度较小.

3)预制混凝土板的存在改变了剪力墙钢板的受力模式,对薄钢板剪力墙尤为明显.钢板由拉力带承担水平荷载改变为截面受剪承担水平荷载,屈曲由整体屈曲改变为两排螺栓之间的局部屈曲.

参考文献:

- [1] 吴志坚. 钢板剪力墙和组合剪力墙的抗剪静力性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [2] 陈国栋. 钢板剪力墙结构性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2002.
- [3] BERMAN J W, CELIK O C, BRUNEAU M. Comparing hysteretic behavior of light-gauge steel plate shear walls and braced frames[J]. *Engineering Structures*, 2005, 27(3): 475 - 485.
- [4] ALINIA M M, DASTFAN M. Behaviour of thin steel plate shear walls regarding frame members[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2006, 62(7): 730 - 738.
- [5] BERMAN J, BRUNEAU M. Plastic analysis and design of steel plate shear walls[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(11): 1448 - 1456.
- [6] SABOURI-GHOMI S, GHOLHAKI M. Ductility of thin steel plate shear walls[J]. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, 2008, 9(2): 153 - 166.
- [7] MEFTAH S A, TOUNSI A, MEGUENI A, *et al.* Lateral stiffness and vibration characteristics of RC shear walls bonded with thin composite plates[J]. *Composite Structures*, 2006, 73(1): 110 - 119.
- [8] CHEN S J, JHANG C. Cyclic behavior of low yield point steel shear walls[J]. *Thin-Walled Structures*, 2006, 44(7): 730 - 738.
- [9] 徐嫚, 王玉银, 张素梅. 两边连接钢板剪力墙抗剪静力性能研究[J]. *工业建筑*, 2009, 39(3): 107 - 111.
- [10] 徐嫚, 王玉银, 马欣伯. 两边连接钢板组合剪力墙抗剪静力性能研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2007, 39(2): 352 - 356.

(编辑 赵丽莹)