

轻型木结构剪力墙抗侧力性能试验与有限元分析

祝恩淳, 陈志勇, 陈永康, 阎新宇

(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090, e. c. zhu@hit.edu.cn)

摘要: 为研究国产钉连接轻型木结构剪力墙的抗侧力性能, 对7组14片不同尺寸规格和构造的剪力墙进行了标准推力试验, 并利用 ABAQUS 建立了剪力墙的有限元模型, 对其工作性能进行分析. 结果表明: 钉连接失效是导致剪力墙破坏的主要原因; 剪力墙的承载力和刚度与墙体宽度成正比; 开洞剪力墙的承载性能均比宽度与洞口两侧墙肢总宽度相等的剪力墙高; 石膏板对剪力墙的承载性能有显著提高作用. 由试验和有限元分析结果拟合得到了预测剪力墙的荷载-位移曲线、极限承载力和刚度的经验公式.

关键词: 轻型木结构; 剪力墙; 抗侧力试验; 有限元

中图分类号: TU 759.4

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)10-1548-07

Testing and FE modeling of lateral resistance of shearwalls in light wood frame structures

ZHU En-chun, CHEN Zhi-yong, CHEN Yong-kang, YAN Xin-yu

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China, e. c. zhu@hit.edu.cn)

Abstract: In order to investigate the performance of shearwalls connected with domestic nails in light wood frame structures, lateral resistance tests were conducted on 14 shearwalls in 7 groups with different dimensions and structural arrangements. Using ABAQUS, FE models of shearwalls were developed to simulate the structural behaviour. Both the experimental and numerical results show that failure of nail connections is the primary cause leading to the failure of shearwalls. The load-carrying capacity and the stiffness of shearwalls are proportional to the width. The performance of shearwalls with an opening, in terms of load-carrying capacity and stiffness, is higher than that of shearwalls without an opening but with the width equaling to the sum of the wall segments from the two sides of the opening. Gypsum panels improve the performance of shearwalls significantly. The empirical equations to predict the lateral resistance and stiffness of shearwalls were derived based on the test and FE modelling.

Key words: light wood frame structure; shearwall; lateral resistance testing; finite element

剪力墙是轻型木结构的主要抗侧力构件, 是决定轻型木结构抗侧力性能的关键因素. 自上世纪40年代始, 标准推力试验^[1]成为研究剪力墙力学性能的重要手段. Atherton^[2]通过10组以刨花板为覆面板的剪力墙试验, 研究了覆面板厚度、钉子规格和间距、横隔以及覆面板布置方式对剪力墙承载力的影响. Cheung等^[3]对剪力墙进行足尺静载试验和自由震动试验来验证剪力墙的非线性

有限元模型, 结果显示墙骨和覆面板之间的钉连接对剪力墙承载性能起控制作用. Patton^[4]、Karacabeyli^[5]和 Jang^[6]等对剪力墙进行了相关试验, 结果表明剪力墙承载力随墙骨间距减小、墙体宽度增加或洞口面积减小而增大, 且洞口位置的影响甚小; 石膏板增强了剪力墙的承载性能但降低了剪力墙的延性和耗能能力. Lam^[7]对大尺寸覆面板剪力墙进行了试验研究, 在单调静载作用下大尺寸覆面板剪力墙的刚度和承载力均大于普通剪力墙, 但在往复荷载作用下大尺寸覆面板剪力墙的耗能性能不如普通剪力墙. Dean 和 Shent-

收稿日期: 2009-03-19.

基金项目: 哈工大海外留学人员回国工作科研启动项目.

作者简介: 祝恩淳(1963—), 男, 教授, 博士生导师.

on^[8]研究了竖向荷载对剪力墙水平侧向承载能力的影响,发现竖向荷载对于剪力墙的侧向承载力和刚度均有显著提高,并且当竖向荷载可以抵抗倾覆时, Hold-down 对剪力墙的影响不再显著。

近 20 年来,学者们对剪力墙承载性能进行了大量的有限元分析. 其中 Judd 和 Fonseca^[9] 基于 ABAQUS 建立的剪力墙模型,用梁单元模拟骨架材料,平面应力单元模拟覆面板,用户自定义非线性单元模拟墙骨和覆面板之间的钉连接,其剪力墙有限元模型能合理预测剪力墙的承载力,但预测的刚度偏大。

以上研究主要集中在剪力墙的承载力上,而对其刚度的研究不多,且用来预测剪力墙承载性能的计算公式偏于复杂. 为了能够通过各个墙肢的特性得到组合剪力墙的承载性能以便于工程应用,并检验采用国产圆钉连接的剪力墙的承载性能,本文通过对不同尺寸规格和构造的剪力墙进行标准推力试验,得到了剪力墙的荷载-位移曲线,并得出墙体长度、洞口和石膏板对其承载力和刚度的影响. 同时采用与剪力墙中钉连接构造一致的钉连接试验数据^[10-11],利用 ABAQUS 建立了剪力墙有限元模型并进行了剪力墙长度和非标准尺寸覆面板对剪力墙承载性能影响的数值模拟分析,得到了剪力墙承载力和刚度的计算公式,为剪力墙研究和工程设计提供了重要依据。

1 剪力墙抗侧力性能试验

剪力墙所用墙骨是截面尺寸为 38 mm × 89 mm 的云杉-松-冷杉(S-P-F)规格材,材质等级为 Vc;覆面板是 9.5mm 厚的标准尺寸

(2.44 m × 1.22 m) OSB;装饰板为 12 mm 厚的石膏板(2.44 m × 1.22 m). OSB 和墙骨通过 2 寸国产圆钉(长度为 50 mm、直径为 2.8 mm)连接;石膏板和墙骨通过 1.25 寸国产螺丝钉(长度为 30 mm、钉杆直径为 2.6 mm、螺纹直径和间距分别为 3.6 mm 和 1.5 mm)连接;墙骨和底(顶)梁板用 3 寸国产圆钉(长度为 80 mm、直径为 3.4 mm)连接。

按《木结构设计规范》GB50005-2003^[12]对剪力墙构造的要求,设计了 7 组(共 14 片)典型的剪力墙片进行抗侧力试验,如表 1 所示. 参照 ASTM E564^[13],用于试验的剪力墙应与实际工程尽量一致,本试验所用剪力墙皆由专门建造轻型木结构房屋的木工按照国内工程做法制作. 为使墙体模型与工程实际相近并避免钉连接引起面板与墙骨间摩擦力对剪力墙抗侧性能的影响^[14],将所有加工完成的剪力墙存放在常温室内一个月后再行试验. 根据试验目的并参考 ASTM E564^[13]的规定和国外相关试验资料^[1-7]制定了相应的加载程序. 对每一片剪力墙,首先进行预载,即对剪力墙匀速加载至估计承载力 P_u 的 10% 并保持 5 min,检查剪力墙和试验仪器设备是否正常工作,卸载至零并保持 5 min,将所有仪表清零;第一次加载,匀速加载至估计承载力 P_u 的 1/3 并保持 5 min,卸载至零再保持 5 min;第二次加载,匀速加载至估计承载力 P_u 的 2/3 并保持 5 min,卸载至零再保持 5 min;第三次加载,匀速加载直至剪力墙破坏或达千斤顶最大行程后卸载. 加载及位移传感器 LVDT 的布置如图 1 所示。

表 1 试验用剪力墙

编号	剪力墙尺寸 (宽×高)/m	覆面板 材料	覆面板 厚度/mm	墙骨 间距/mm	钉种类	钉间距/mm	承载力/kN	
							估计值 P_u	试验结果
SW-A1	0.6×2.4	OSB	9.5	300	2寸圆钉	150/300	3.56	3.32
SW-A2								
SW-B1	1.2×2.4	OSB	9.5	400	2寸圆钉	150/300	7.13	8.85
SW-B2								
SW-C1	1.8×2.4	OSB	9.5	400	2寸圆钉	150/300	10.69	11.99
SW-C2								
SW-D1	2.4×2.4	OSB	9.5	300	2寸圆钉	150/300	14.26	17.95
SW-D2								
SW-E1	2.4×2.4	OSB	9.5	400	2寸圆钉	150/300	7.13	14.37
SW-E2 (开 1.2×1.2 洞口)								
SW-F1	2.4×2.4	石膏板	12	400	1.25寸螺丝钉	150/300	7.39	8.33
SW-F2								
SW-G1	2.4×2.4	OSB/ 石膏板	9.5/12	400	2寸圆钉/1.25寸 螺丝钉	150/300	21.65	23.48
SW-G2								

注:钉间距“150/300”表示剪力墙覆面板周边处钉间距为 150 mm,其他位置为 300 mm。

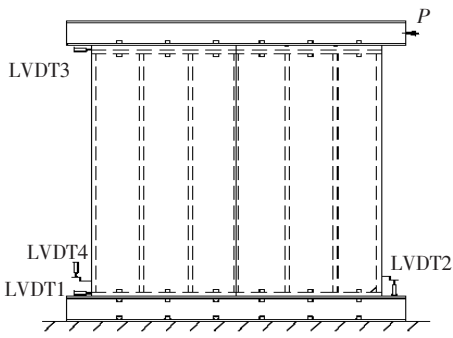


图1 剪力墙试验

按文献[14]介绍的方法,估算 P_u 为

$$P_u = 2.2V,$$

$$V = \sum f_d l.$$

式中: V 为剪力墙的承载力设计值(kN); f_d 为剪力墙抗剪强度设计值(kN/m); l 为剪力墙墙肢的宽度(m).对于OSB覆面板剪力墙,其抗剪强度设计值按GB50005-2003^[12]的方法计算,取 $f_d = 2.7$ kN/m;对于覆面板为石膏板的剪力墙,其抗剪强度设计值参考加拿大木结构设计规范CAS O86-01^[15],取 $f_d = 1.4$ kN/m;对于双面覆面板剪力墙,其承载力设计值取其相应单面覆面板剪力墙承载力设计值之和^[12].各剪力墙承载力的估计值和试验结果均列于表1.可见,采用国产圆钉制作的剪力墙承载力能满足我国规范^[12]剪力墙抗侧力承载力的要求.

2 试验结果分析

2.1 试验现象

剪力墙在预载和第一、二次加载时都处于弹性阶段,在荷载作用下墙体仅发生轻微侧移,覆面板发生轻微的平面内转动.在第三次加载至某一荷载水平时,墙骨发生明显的弯曲变形,钉连接发出嘎吱声响,覆面板发生较大的平面内转动,继而加载一侧剪力墙的下角处或发生钉帽陷入覆面板、或钉杆剪坏覆面板,随后其他位置钉连接相继屈服和破坏;最终加载点下方墙骨从底梁板拔出,剪力墙逐渐失去承载能力.

试验中剪力墙呈4种破坏形式:钉连接破坏、墙骨与底梁板脱离、覆面板破坏和剪力墙整体变形过大,其中钉连接的破坏往往伴随着周围覆面板受损和墙骨局部破坏.钉连接的受力变形和破坏是导致剪力墙丧失承载能力的主要原因.在文献[10-11、17]专门的钉连接试验中,不涉及剪力墙的整体协调作用,其破坏形式有覆面板剪坏、钉子穿透、钉子拔出、墙骨撕裂、覆面板断裂和墙骨压坏等6种.而本试验中钉连接只发生了前4种

破坏形式,无覆面板断裂和墙骨压坏.

带洞口剪力墙在试验过程中,其洞口的两个上角点处分别受拉、压应力作用而发生覆面板撕裂和压屈两种破坏形式.洞口过梁和附近墙骨之间的钉连接很弱,可以近似看作铰接.当墙片受侧向力作用产生较大侧移时,过梁和附近墙骨之间的夹角由直角变为钝角或锐角,但OSB覆面板的平面内刚度较大约束了这种转动而导致应力集中,从而造成覆面板受拉撕裂和受压鼓出的破坏现象.

2.2 荷载-位移曲线

钉连接是影响剪力墙承载力和刚度的主要因素,且两者的荷载-位移曲线形态相近,故采用文献[16]介绍的钉连接荷载-位移曲线公式对剪力墙荷载-位移曲线的外包线进行拟合,拟合公式为

$$P = (P_o + K_1 \times \Delta_{int}) \times (1 - e^{-\frac{K_o \times \Delta_{int}}{P_o}}) \times e^{-\frac{\Delta_{int}}{b}},$$

$$\Delta_{int} = \Delta_3 - \Delta_1 - (\Delta_2 - \Delta_4) \frac{H}{L}.$$

式中: P 为侧向荷载(N); P_o (N)、 K_o (N/mm)和 K_1 (N/mm)为物理拟合参数,其含义如图2所示; a 和 b (mm^a)为数值拟合参数; Δ_{int} 为剪力墙内部剪切位移(mm); Δ_1 为基础的水平滑移; Δ_2 为受力边墙骨底部竖向位移; Δ_3 为剪力墙顶点水平位移; Δ_4 为非受力边墙骨底部竖向位移; H 和 L 分别为剪力墙的高度和宽度(m).图3为2.4 m宽剪力墙试验曲线与拟合曲线的比较关系,可以看出两者非常吻合.各组剪力墙的拟合参数列于表2,其拟合曲线如图4所示.

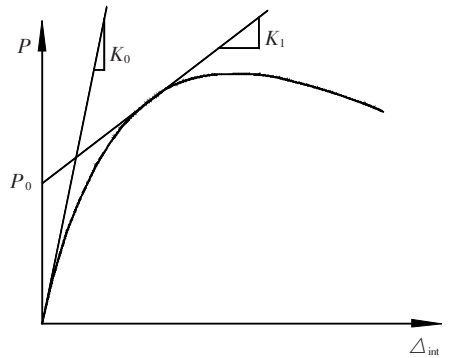


图2 剪力墙荷载-位移曲线

2.3 各种因素对剪力墙抗侧力性能的影响

2.3.1 墙体宽度及窄板的影响

宽度分别为0.6、1.2、1.8和2.4 m剪力墙承载力列于表3中以便对比.可以看出,剪力墙的承载力与其宽度基本成正比.由标准覆面板制成的剪力墙(宽度为1.2 m和2.4 m)的单位宽度承载

能力几乎相同,而带有窄板的剪力墙(宽度为 0.6 m 和 1.8 m)其单位宽度承载力比标准覆面板的剪力墙平均低 24.7%。可见,现行木结构设计规范^[12]不考虑覆面板组合形式而将不同宽度剪力墙的单位宽度承载力(抗剪强度设计值)取同一值,将导致设计值偏高。考虑覆面板的组合形式,计算剪力墙单位宽度的承载力公式为

$$R_{com} = \left(\sum_{i=1}^n l_i \times R_i \right) / L$$

式中: R_{com} 为组合墙片单位宽度的承载力(kN/m); l_i 为第 i 片覆面板宽度(m); R_i 为第 i 片覆面板剪力墙单位宽度的承载力(kN/m); n 为组合墙片剪力覆面板数量; L 为墙体宽度(m)。将 0.6 m 和 1.2 m 宽剪力墙单位宽度的承载力代入上式得到 1.8 m 宽剪力墙单位宽度的计算承载力为 6.76 kN/m,与试验值 6.66 kN/m 极为接近。由

两块 1.2 m 宽覆面板组成的剪力墙单位宽度计算承载力为 7.38 kN/m,与试验值 7.48 kN/m 亦极为接近。由此可以根据 0.6 m 和 1.2 m 宽剪力墙单位抗剪强度,得到由 0.6 m 和 1.2 m 墙体组成的任一宽度剪力墙承载力。

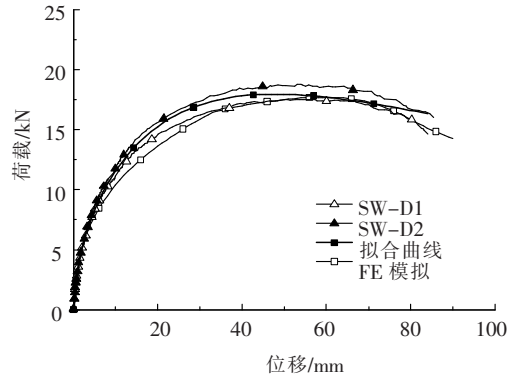


图 3 剪力墙(2.4 m 宽)的荷载-位移曲线

表 2 各组剪力墙荷载-位移曲线拟合参数

编号	P_o/N	$K_o/$ ($N \cdot mm^{-1}$)	$K_l/$ ($N \cdot mm^{-1}$)	a	$b/(mm^a)$	编号	P_o/N	$K_o/$ ($N \cdot mm^{-1}$)	$K_l/$ ($N \cdot mm^{-1}$)	a	$b/(mm^a)$
SW-A	1 300	614	285	0.497	4.445	SW-E	834	1 237	966	0.807	19.457
SW-B	1 708	1 071	532	0.641	10.219	SW-F	3 980	7 504	4 591	0.466	1.620
SW-C	1 471	3 163	2 404	0.380	1.894	SW-G*	5 180	43 995	26 075	0.280	0.738
SW-D	3 414	4 813	1 947	0.574	5.474						

注: SW-G2 试验中部分仪表失灵,故此仅为 SW-G1 试验数据的拟合曲线参数。

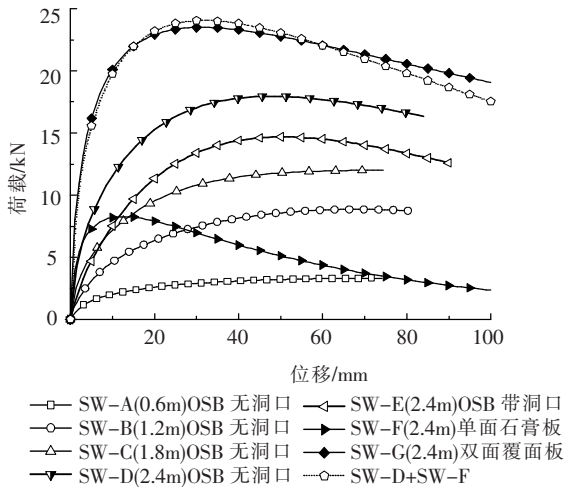


图 4 拟合曲线对比

参考 ASTM E564^[13]和文献^[17],定义 10% P_{max} 和 40% P_{max} 两点间的割线斜率为剪力墙的刚度, N/mm ,按下式计算并列于表 3。

$$K = \frac{(40\% P_{max} - 10\% P_{max})}{(\Delta_{40\%} - \Delta_{10\%})}$$

式中: P_{max} 为剪力墙的承载力(kN); $\Delta_{40\%}$ 、 $\Delta_{10\%}$ 分别为 40% P_{max} 和 10% P_{max} 对应的位移(mm)。因剪力墙主要通过覆面板抗剪来抵抗水平侧向力,多块覆面板并不能作为一整块覆面板工作,而是按刚度分配荷载来共同工作,因而剪力墙模型试验刚度与剪力墙宽度成正比。这有异于将剪力墙看作矗立于地面的悬臂梁其刚度与截面高度的(相当于剪力墙宽度)三次方成正比的关系。

表 3 剪力墙承载力和刚度对比

剪力墙尺寸规格/m	0.6	1.2	1.8	2.4	2.4(带洞口)	2.4(石膏板)	2.4(OSB+石膏板)
承载力 P_{max}/kN	3.32	8.85	11.99	17.95	14.37	8.33	23.48
单位宽度承载力/($kN \cdot m^{-1}$)	5.53	7.38	6.66	7.48	5.99	3.47	9.78
刚度 $K/(N \cdot mm^{-1})$	283	481	986	1 673	776	4 000	7 885

2.3.2 墙体洞口的影响

各国现行木结构规范大都不考虑洞口上、下

墙肢对开洞剪力墙承载力和刚度的贡献,但从表 3 可以看出,虽然一块标准板剪力墙在开了一个

1.2 m × 1.2 m 的洞口后,其承载力下降 20%,刚度下降 53.6%,但 2.4 m 宽带 1.2 m × 1.2 m 洞口剪力墙的承载力和刚度分别比 1.2 m 宽剪力墙大 62.3% 和 61.4%。开洞剪力墙的承载力和刚度比与其剩余墙肢宽度相等的剪力墙要高。因此,不考虑洞口上、下墙肢的作用是过于保守的。

2.3.3 石膏板的影响

关于石膏板对剪力墙承载性能的影响,各国规范规定不一,有些予以考虑,如加拿大规范^[15],有些则不予考虑,如我国规范^[12]。比较图 4 中 SW-G(2.4 m 宽双面覆面板)和 SW-D(2.4 m 宽单面 OSB)的两条曲线可见,石膏板对剪力墙的工作性能影响很大,承载力和刚度分别提高了 30.8% 和 371.3%。由表 3 看出,石膏板单覆面板剪力墙的刚度远大于 OSB 单覆面板剪力墙,所以这种双覆面板剪力墙的刚度比 OSB 单覆面板剪力墙高很多。图 4 中将 SW-D 与 SW-F(2.4 m 宽单面石膏板)试验拟合曲线相加,所得结果与 SW-G 曲线基本重合,说明双面覆面板剪力墙的承载性能为 OSB 板和石膏板共同作用的结果。因此,剪力墙的设计宜考虑石膏板的贡献。

3 有限元分析

3.1 剪力墙有限元分析模型

本文使用有限元软件 ABAQUS 对剪力墙在侧向荷载作用下的工作性能进行了数值模拟。剪力墙为平面受力构件,故将剪力墙模型定义为二维模型。考虑到墙体骨架同时承受轴向力和弯矩作用而覆面板主要承受平面内剪力作用,分别采用 B21^[18]梁单元和平面应力单元 CPS4R^[18]模拟

骨架和覆面板。国外研究表明^[19],墙骨和覆面板在整个受力过程中均处于弹性阶段而剪力墙的破坏主要由钉连接失效所致,故假设墙体骨架和覆面板均为线弹性,钉连接为弹塑性。根据 GB50005-2003^[12]和文献[14]查得:墙骨的弹性模量 $E = 8\,300\text{ N/mm}^2$;覆面板平行(垂直)于长度方向的弹性模量为 $3\,208\text{ N/mm}^2$ ($2\,222\text{ N/mm}^2$);泊松比为 0.28(0.12);平面内的剪切模量取为 $1\,500\text{ N/mm}^2$ 。将底梁板与墙骨的连接设为铰接。采用 Spring A^[18]单元模拟钉连接的非线性性能,且根据钉连接在剪力墙不同的部位选用对应的剪力墙钉连接试验拟合曲线模型。剪力墙有限元模型的单元划分及在侧向力作用下的变形如图 5 所示。

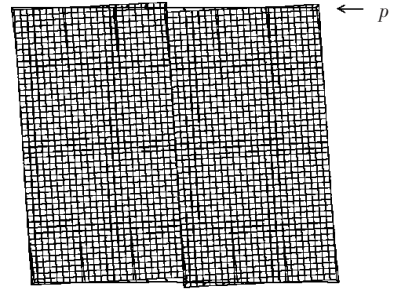


图 5 剪力墙有限元网格划分及在侧向荷载作用下的变形图

将有限元分析所得 2.4 m 宽 OSB 覆面板无洞口剪力墙的荷载-位移曲线亦示于图 3 中。可见有限元分析结果与试验结果吻合良好,所建立的剪力墙有限元模型能准确有效地模拟剪力墙的工作性能。结合 GB50005-2003^[12]对剪力墙构造的要求,制定了分析剪力墙宽度和非标准尺寸覆面板对剪力墙承载性能影响的数值模拟方案,如表 4 所示。

表 4 剪力墙尺寸、覆面板布置和计算结果

剪力墙编号*	剪力墙宽度及覆面板布置形式/m	承载力/kN	单位宽度承载力/(kN · m ⁻¹)	刚度/(N · mm ⁻¹)
SW-0.6A	0.6	4.88	8.13**	250
SW-1.2S	1.2	10.83	9.03**	697
SW-1.8A	1.8 (1.2+0.6)	12.70	7.06	936
SW-2.4S	2.4 (1.2×2)	17.68	7.37	1 472
SW-3.0A	3.0 (1.2×2+0.6)	20.71	6.90	1 795
SW-3.6S	3.6 (1.2×3)	25.40	7.05	2 462
SW-3.6B	3.6 (0.6+1.2×2+0.6)	23.14	6.43	1 949
SW-4.2A	4.2 (1.2×3+0.6)	28.98	6.90	2 464
SW-4.8S	4.8 (1.2×4)	34.21	7.13	2 792
SW-4.8B	4.8 (0.6+1.2×3+0.6)	31.41	6.54	2 657
SW-5.4A	5.4 (1.2×4+0.6)	36.57	6.77	2 913
SW-6.0S	6.0 (5×1.2)	41.37	6.90	3 173
SW-6.0B	6.0 (0.6+1.2×4+0.6)	38.85	6.48	3 026
SW-6.6A	6.6 (5×1.2+0.6)	44.02	6.67	3 213
SW-7.2S	7.2 (6×1.2)	48.97	6.80	3 440

注:剪力墙编号中 S-剪力墙由标准尺寸覆面板组成;A-剪力墙由标准尺寸覆面板另加一片 0.6 m 宽的窄板组成;B-剪力墙由标准尺寸覆面板另加两片 0.6 m 宽的窄板组成;当剪力墙宽度较小时,倾覆效果明显,而所建立的有限元模型其墙骨与底梁板间假设为铰接,无形中增加了抗倾覆能力,使得 0.6 m 和 1.2 m 宽剪力墙的计算结果高于试验值。

3.2 剪力墙宽度和非标准尺寸覆面板对剪力墙承载性能影响的分析

图 6 所示为由标准尺寸覆面板制作的剪力墙其承载力和刚度与剪力墙宽度的关系,可见两者

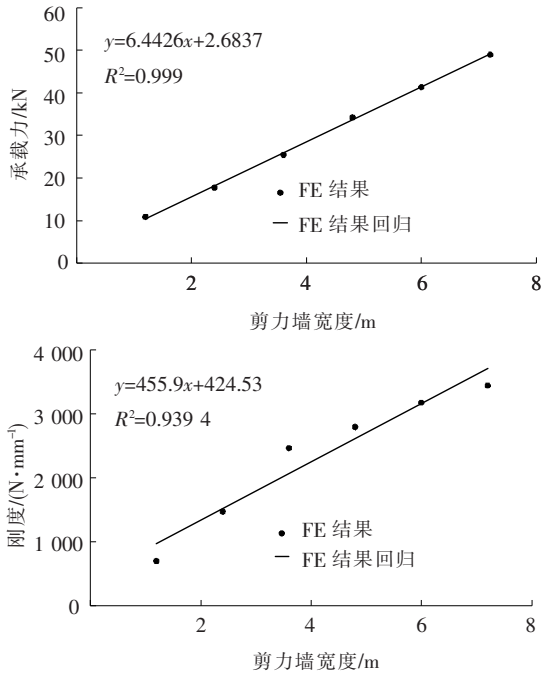


图 6 标准尺寸覆面板剪力墙承载性能与宽度的关系与剪力墙宽度皆呈线性关系,从而验证了 GB5005-2003^[12]中剪力墙承载力的计算方法,同时也为剪力墙的试验和设计提供了承载力和刚度的计算公式,分别为

$$P_{\max} = 6.44l + 2.68,$$

$$K = 456l + 425.$$

式中: l 为剪力墙宽度 (m), 适用于 1.2 ~ 7.2 m; P_{\max} 为剪力墙承载力 (kN); K 为剪力墙刚度 (N/mm).

含一块非标准尺寸覆面板 (0.6 m) 剪力墙与标准尺寸覆面板剪力墙承载性能关系比较如图 7 所示. 可以看出, 含非标准尺寸覆面板剪力墙 (宽度为 l) 的承载力 ($P_{\max,l}$) 与刚度 ($K_{\max,l}$), 皆在两块相邻宽度标准尺寸覆面板剪力墙 (宽度分别为 $(l-0.6)$ m 和 $(l+0.6)$ m 的承载力 (分别为 $P_{\max,l-0.6}$ 和 $P_{\max,l+0.6}$) 和刚度 (分别为 $K_{\max,l-0.6}$ 和 $K_{\max,l+0.6}$) 之间, 经统计有如下关系:

$$(P_{\max,l} - P_{\max,l-0.6}) = 0.35(P_{\max,l+0.6} - P_{\max,l-0.6}),$$

$$(K_{\max,l} - K_{\max,l-0.6}) = 0.22(K_{\max,l+0.6} - K_{\max,l-0.6}).$$

含一块非标准尺寸覆面板剪力墙的承载力和刚度, 可按以上两式, 由相邻宽度标准尺寸覆面板剪力墙推算出来.

对于宽度为 3.6, 4.8 和 6.0 m 的剪力墙, 各有两种构造方式: 全部由标准尺寸覆面板组成; 标

准尺寸覆面板另加两片 0.6 m 宽的窄板. 两种情况的承载力对比和刚度对比如图 8 所示. 可以看出, 对于相同宽度的剪力墙, 含有窄板的剪力墙的承载力和刚度比标准尺寸覆面板剪力墙平均分别低 7.7% 和 10.1%.

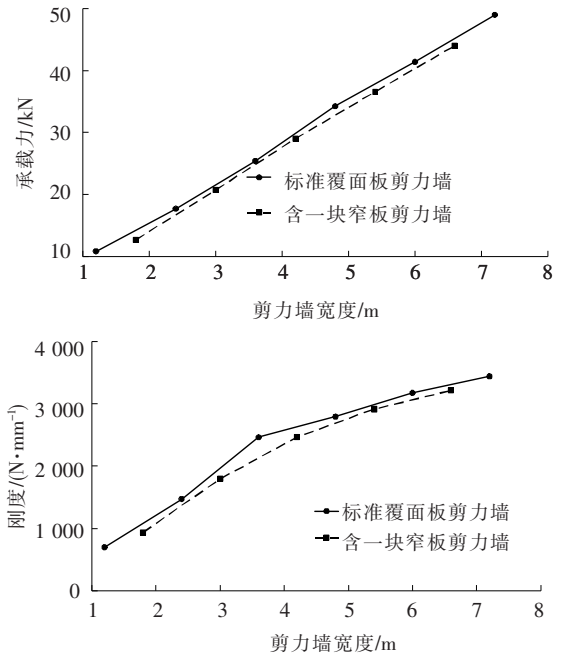


图 7 单块非标准尺寸覆面板对剪力墙承载性能的影响

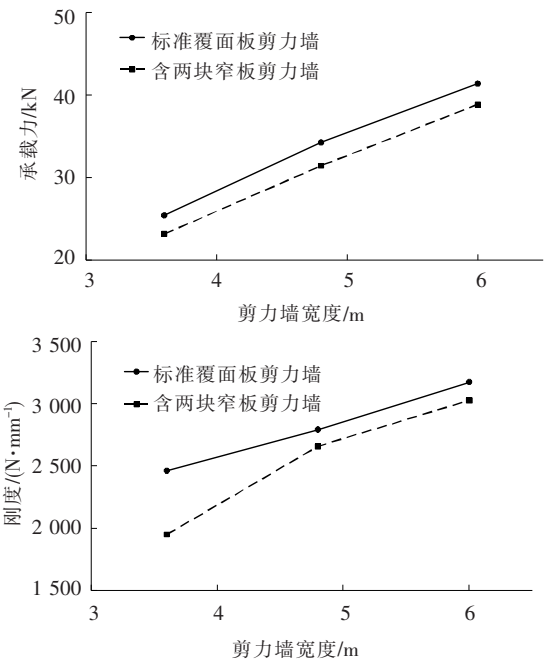


图 8 两块非标准尺寸覆面板对剪力墙承载性的影响

4 结 论

经对 7 组 14 片不同尺寸规格和构造的剪力墙进行了标准抗侧力试验, 表明钉连接是决定剪力墙承载性能的关键因素, 钉连接失效是导致剪力墙破坏的主要原因. 剪力墙中钉连接破坏主要

出现在墙体角部,破坏形式有墙板剪坏、钉子穿透、钉子拔出和墙骨撕裂四种.对于开洞口剪力墙,由于洞口角部产生应力集中,覆面板也会出现撕裂或压屈破坏.

采用国产钉子的剪力墙能够满足抗侧力性能要求;由多块覆面板组成的剪力墙其承载力等于各覆面板对应的单个墙片的承载力之和,刚度与剪力墙宽度成正比;开洞剪力墙的承载力和刚度均比与洞口两侧墙肢总宽度相等的剪力墙高,而石膏板对于剪力墙的承载力有显著提高,我国《木结构设计规范》GB50005-2003^[12]不考虑洞口上、下墙肢对剪力墙承载力性能贡献,以及石膏板的这种有利作用是偏于保守的.

对不同宽度剪力墙抗侧力试验结果拟合所得的经验公式,可用于预测剪力墙的极限承载力、刚度以及荷载-位移曲线.本文建立的剪力墙有限元模型能够准确有效地预测 OSB 覆面板剪力墙的抗侧力性能.通过有限元分析回归,得到了剪力墙承载力和刚度的估算公式和非标准尺寸覆面板对剪力墙承载性能的影响程度.

参考文献:

- [1] JOHN W, VAN D L. Evolution of wood shear wall testing, modeling, and reliability analysis: Bibliography [J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2004, 9(1): 44-53.
- [2] ATHERTON G H. Ultimate strength of structural particleboard diaphragms [J]. Forest Products Journal, 1983, 33(5): 22-26.
- [3] CHEUNG C K. Characteristics of wood diaphragms: experimental and parametric studies [J]. Wood Fiber Science, 1988, 20(4): 438-456.
- [4] PATTON M. Light-frame shear wall length and opening effects [J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 1985, 111(10): 2227-2239.
- [5] KARACABEYLI E. Test result on the lateral resistance of nailed shear walls [C]//Proceedings of 4th World Conference on Timber Engineering. New Orleans, Louisiana, USA: WCTE, 1996: 179-186.
- [6] JANG S K. Racking resistance of shear walls with various sheathing materials and openings [C]//Proceedings of 6th World conference on Timber. Whistler, British Columbia, Canada: WCTE, 2000: 5.4.2.
- [7] LAM F, PRION H G L, HEM . Lateral resistance of wood shear walls with large sheathing panels [J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 1997, 123(12): 1666-1673.
- [8] DEAN P K, SHENTON III H W. Experimental investigation of the effect of vertical load on the capacity of wood shear walls [J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 2005, 131(7): 1104-1113.
- [9] JUDD J P, FONSECA F S. Finite element analysis of wood shear walls and diaphragms using ABAQUS [C]//Proceedings of the 2002 ABAQUS Users' Conference. Taipei, China: ABAQUS, 2002: 27.
- [10] 陈志勇. 轻型木结构中剪力墙钉连接承载性能试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [11] 陈松来, 陈志勇, 樊承谋, 等. 木结构剪力墙中钉连接的实验研究[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2008, 47(4): 133-138.
- [12] 中华人民共和国建设部. GB 5005-2003 木结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [13] American Society for Testing and Materials (ASTM). E564-00^{el} Standard Practice for Static Load Test for Shear Resistance of Framed Walls for Buildings [S]. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2006.
- [14] James Cook Cyclone Structural Testing Station. Recommendations for the Testing of Roofs and Walls to Resist High Wind Forces [R]. Townsville, Queensland, Australia: James Cook University of North Queensland, 1980.
- [15] Canadian Standards Association (CSA). O86-01 Engineering Design in Wood [S]. Toronto, Canada: Canadian Standards Association, 2005.
- [16] GIRHAMMAR U, BOVIM N, KALLSNER B. Characteristics of sheathing-to-timber joints in wood shear walls [C]//Proceedings of 8th World Conference on Timber Engineering. Lahti, Finland: WCTE, 2004: 165-170.
- [17] NI C. Effect of overturning restraint on performance of shear walls [C]//Proceedings of 6th World conference on Timber Engineering. British Columbia: WCTE, 2000: 2.3.1.
- [18] HIBBITT, KARLSSON & SORENSEN, Inc. ABAQUS/Standard User's Manual Version 6.4 [M]. Pawtucket, 2003.
- [19] American Society for Testing and Materials (ASTM). E72-05 Standard Test Methods of Conducting Strength Tests of Panels for Building Construction [S]. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2006.
- [20] 阎新宇. 轻型木结构剪力墙抗侧力性能试验研究与有限元分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.