

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.03.006



不同加载方式 SIP 墙体的抗剪性能

王雪花¹, 方露¹, 吴智慧¹, 倪骏², 费本华³

(1. 南京林业大学 家具与工业设计学院, 南京 210037; 2. 苏州昆仑绿建木结构科技股份有限公司, 江苏 苏州 215105; 3. 国际竹藤中心, 北京 100102)

摘要:以 3 种不同的单向加载方式对以木质 OSB 覆面的 SIP 墙体进行侧向加载实验, 对比分析 3 种加载方式下 SIP 墙体的破坏形式及这 3 种加载方式对墙体抗剪性能参数的影响, 结果表明: 3 种加载方式得到的墙体的抗剪性能指标有所差异, 其中, 采用 ISO22452 加载协议, 即对墙体施加持续增加载荷的加载方式所得到的极限承载力最大、极限位移和延性系数居中, 分别为 46.06 kN、71.83 mm、3.31; 采用 ASTM E72-05 加载时极限承载力居中、极限位移及延性系数最大, 分别为: 40.66 kN、76.97 mm、4.07。采用 ASTM E564-06 加载, 即对墙体施加阶段载荷并使阶段目标载荷持续作用一段时间的方式, 所得到的极限承载力、极限位移及延性系数最小, 分别为 37.73 kN、54.92 mm、2.91; 3 种加载方式对墙体破坏形式的影响不大。

关键词:SIP 墙体; 静力单向加载协议; 破坏形式; 抗剪性能

中图分类号:TU531.11 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)03-0041-07

Shear performance of SIP wall under different monotonic loading protocols

Wang Xuehua¹, Fang Lu¹, Wu Zhihui¹, Ni Jun², Fei Benhua³

(1. College of Future and Industrial Design, Nanjing Forestry University, Nanjing 100102, P. R. China;

3. Suzhou Crownhomes Company Limited by Shares, Suzhou 215105, Jiangsu, P. R. China;

3. International Center of Bamboo and Rattan, Beijing 100102, P. R. China)

Abstract: Three different static loading protocols were used in the lateral loading experiment on SIP wall covering with oriented strand board (OSB), and failure forms and shear performance of the SIP wall were recorded and analysed treated by three loading protocols: ISO 22452, ASTM E72-05 and ASTM E564-06. The results showed that shear performances of the SIP walls under the three loading protocols were

收稿日期:2016-01-08

基金项目:南京林业大学高层次人才科研启动基金(GXL1023);江苏省自然科学基金(BK20150881);国家林业行业公益性专项(201204701)。

作者简介:王雪花(1982-),女,博士后,主要从事木竹质工程材料及应用研究,(E-mail) xuehua3099@sina.com。

费本华(通信作者),研究员,博士生导师,(E-mail)feibenhua@icbr.ac.cn。

Received:2016-01-08

Foundation item: Initial Funding of Nanjing Forestry University for High Level Talents(No. GXL1023); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (CN) (No. BK20150881); Public Welfare Special Fund of National Forestry Industry(No. 201204701).

Author brief: Wang Xuehua(1982-), main interests: wooden products and modification, (E-mail)xuehua3099@sina.com. Fei Benhua(corresponding author), professor, doctoral supervisor, (E-mail) feibenhua@icbr.ac.cn.

different, ultimate bearing capacity and ultimate displacement were the largest one, and the ductility factor was the middle one which loaded by ISO 22452, the value were 46.06kN, 71.83mm, 3.31 respectively; while ultimate bearing capacity was the middle one, ultimate displacement and ductility factor were the largest one which loaded by ASTM E72-05, the datas were 40.66kN, 76.97 mm, 4.07 respectively; ultimate bearing capacity 37.73 kN, ultimate displacement 54.92 mm and ductility factor 2.91 were the smallest treated by ASTM E564-06 among the three loading protocols. Failure forms of the walls under the three loading protocols were similar, there were little influence on failure forms caused by the three loading protocols used in this research.

Keywords: SIP wall; static loading protocol; failure forms; shear performance

结构保温板,也称结构隔热板(SIP, structural insulated panels),是以硬质发泡材料或其他保温材料为夹心层,外贴压型钢板、木板、水泥加压板等薄板的三明治型的复合板材,常见的芯材种类有:EPS、XPS、PU以及无机类保温材料等,贴面板有:压型钢板、欧松板、桔梗板等木质板材、水泥加压板、石膏板等无机板材。该结构类型的复合板材具有良好的保温隔热性能、抗震性能及轻质高强的特点^[1-2],提高了木材利用率,创造出比传统木结构形式更加先进的SIP住宅系统(structural insulated panel system, SIPs)^[3-4],在北美和欧洲等地,以SIP为基本单元的SIP住宅系统广泛用于民用和商用住宅,SIPs建造就像搭积木一样简单快捷,可大大节省建造时间和建造费用。

作为建筑物的重要组成部分,墙体在建筑中除实现围护、防火、隔音、保温等需求外,同时需要承受风载及地震等的作用,墙体需具有足够的承载能力,以便保证墙体的安全^[5]。目前,关于SIP的试验数据和研究主要集中在近20年。在力学性能方面,Taylor等^[6]1997年进行SIP构件的试验研究,建立了定向刨花板面板、聚氨酯泡沫板和聚苯乙烯泡沫板芯的SIP的受弯蠕变模型,推导出SIP受弯构件挠度随时间变化的公式;Keith等^[7]于2006年制备了4种厚度的SIP试件,并做了抗弯、轴压、剪切和测压试验,在APA发表了关于SIP标准化测试的报告,规定了对于SIP面板、芯材和胶粘剂的要求指标;Kermani^[8-9]2006年对采用定向刨花板作为面板的SIP的抗弯、轴压、压弯和抗侧性能进行了测试,并总结了高度对轴向承载力的影响和开洞率对结构保温板抗侧力的影响。中国关于SIP墙体的研究较

少,严帅^[10]对SIP墙体的保温特性进行了专门研究,并推导了基于节能保温要求的最佳芯层厚度;对SIP抗弯试件进行4点弯曲试验,揭示了这类构件的破坏形态,并对其受力性能、破坏机理进行了探讨;对SIP抗侧试验进行研究,发现当采用杨木胶合板作为SIP面板时的侧向承载力大于定向刨花板。目前关于SIP板式结构抗震性能的研究极少。Jamison^[11]于1997年对足尺SIP剪力墙进行低周反复荷载试验,并与轻型木结构墙体做了对比,发现SIP剪力墙在承受较大的载荷下变形比轻木结构胶合板剪力墙小50%。

从总体上看,尽管SIP板式结构体系作为建筑结构板材具有显著的优势,但国际上关于SIP作为墙体的研究是很少甚至是严重缺乏的,中国则更少关于SIP墙体的测试标准更是无从谈起。本研究选取了国外比较常见的关于木结构墙体的3种单向加载测试标准,以SIP墙体为测试对象,研究其破坏形式及抗剪性能,以期能为SIP墙体的抗剪性能研究提供一些数据。

1 材料和方法

1.1 材料

实验所用墙体,墙体由两片SIP墙板构成,每片SIP板的尺寸为1220mm×2440mm,与加载设备的连接如图1。其中,顶梁板由两根长度相同但截面尺寸不同的SPF规格材构成,位于上部的称为上顶梁板,位于下部的称为下顶梁板;底梁板由两根长度相同但截面尺寸不同的SPF规格材构成,位于上部的称为上底梁板、位于下部的称为下底梁板(如图2)。墙体主要部件的基本参数见表1。

表 1 试件组成及尺寸
 Tabel 1 Composition and size of test pieces

部位	材料	尺寸	性能指标	
框架	SPF 规格材	上顶梁板	2 440 mm×113 mm×38 mm	
		下顶梁板	2 440 mm×89 mm×38 mm	
		侧墙骨	2 364 mm×89 mm×38 mm	弹性模量 9 650 MPa
		上底梁板	3 000 mm×89 mm×38 mm	
		下底梁板	3 000 mm×113 mm×38 mm	
芯层	聚苯乙烯泡沫板	2 364 mm×1 144 mm×89 mm	密度 20 kg/m ³ ,抗拉强度 140 kPa	
覆面板	木质 OSB	2 440 mm×1 220 mm×11.1 mm	顺/横纹方向弹性模量为 4 545/1 965 MPa	

注:SPF 是产自加拿大的主要商用软木材树种组合,文中 SPF 为 NLGA 2 级。

墙体连接及固定,覆面板与聚苯乙烯泡沫板之间通过聚氨酯胶合,覆面板与 SPF 之间、中间两根作为侧墙骨的 SPF 之间采用钉连接,墙体底部左右侧墙骨与底梁板之间各锚固一个 L 形抗倾覆连接件,底梁板与地梁之间、顶梁板与加载梁之间采用螺栓连接,各连接件规格尺寸见表 2。

表 2 连接件参数
 Tabel 2 Parameter of fasteners

连接件名称	参数
聚氨酯胶	施胶量 180 g/m ²
麻花钉	长 60 mm,直径 4 mm;钉间距 150 mm,
抗倾覆连接件	尺寸:450 mm×41 mm(长/宽);侧面开 10 个直径 6.5 mm 的孔,用直径 6 mm 的自攻螺钉与侧墙骨连接;底部开直径 21 mm 的孔,用直径 20 mm 的螺栓与底梁板及地梁连接
	顶梁板连接螺栓 直径 14 mm,间距 400 mm
低梁板锚固螺栓	直径 20 mm,间距 400 mm

1.2 加载程序

采用 3 种加载方式 (ISO 22452^[12]、ASTM E564^[13]、ASTM E72^[14])对墙体进行加载。

ISO 22452 加载方案:采用力控制加载程序,载荷持续增加的加载方式。以 6 kN/min 的速度加载直至试件破坏。

ASTM E72 加载方案:采用力控制加载程序分段加载,加载速度:1.5 kN/min。对试件施加 3 个阶段(3.5、7.0、10.5 kN)载荷并分别立即卸载后,再重新加载直至试件破坏。

ASTM E564 加载方案中单向加载部分:采用力控制加载程序,分段加载,目标载荷保持一定作用时间,加载速度恒定为 6 kN/min。首先对试件施加预估最大载荷 10%左右的载荷,保持 5 min,卸载,保持 1 min,再重新加载。当加载到预估最大

载荷的 1/3 和 2/3 时保持 1 min 后卸载,保持 5 min,再继续加载,直至达到最大载荷。此方案中的预估最大载荷,参照 ISO 22452 加载方案中的破坏载荷。

1.3 数据记录及处理

实验过程中实时记录墙体的载荷和位移数据,包括:墙体底梁板中间部位的水平位移(图 1 测点 2)、左右侧墙骨距底部 150 mm 处的垂直位移(图 1 测点 1、测点 3)、作动器作动筒的位移以及作动器载荷。以作动器载荷为墙体载荷,以测点 2 处的水平位移对作动器位移进行修正,作为墙体位移。

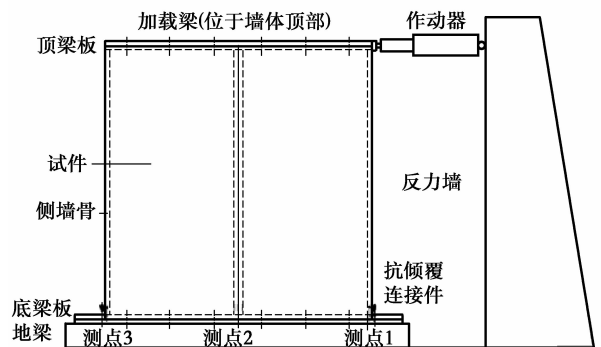


图 1 墙体安装及加载位置示意
 Fig.1 scheme of wall installation and position of loading on wall

1.4 主要实验参数

SIP 墙体的抗侧性能,按照等效能量弹塑性曲线的观点定义以下指标考察^[15-17]:

初始抗侧刚度:载荷-位移曲线上上升段中的最大载荷的 10%处和 40%处之间的割线刚度定义为初始抗侧刚度 K ;

极限承载力:实验数据中的载荷-位移曲线中的最大载荷定义为极限承载力 F_{max} ,极大载荷处相应的位移值定义为 D_{Fmax} ;

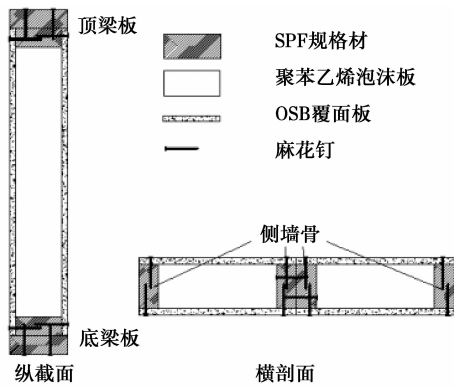


图 2 墙体截面

Fig. 2 section of SIP wall

极限位移: 载荷-位移曲线下降段中最大载荷的 80% 处位移定义为极限位移 D_u ;

极限抗侧刚度: 墙体长度记为 L_w , 墙体单位长度承受的最大载荷即为极限抗侧刚度, 即: $S_u = F_{\max} / L_w$;

延性系数: 载荷-位移上升段中最大载荷与 50% 载荷处的位移之比, 即: $D = D_{F_{\max}} / D_y$ 。

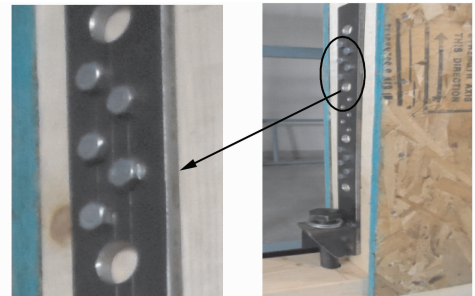
2 结果与分析

2.1 实验破坏现象

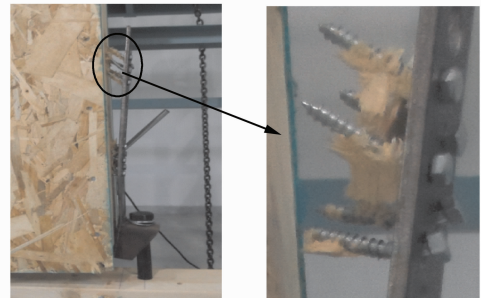
加载过程中, 作动器施加给 SIP 墙体的侧向载荷, 通过加载横梁传递给顶梁板, 之后通过连接钉传到覆面板, 然后通过胶层、连接钉传到侧墙骨、聚苯板芯层, 再通过连接钉传到抗倾覆连接件以及底梁板, 最后通过底梁板上的锚固螺栓传递给地梁。将墙体作为一个整体, 作动器向墙体施加的侧向载荷, 使墙体产生一个绕轴转动, 转动轴即为作动器对角线处的墙角部位(图 6)。在试验中所采用的 3 种加载协议下, 墙体的破坏均是在作动器下方的墙角部位, 也是墙体相对位移较大的部位开始, 沿底梁板与覆面板之间的连接部位展开。位于作动器下方的抗倾覆连接件与墙体侧墙骨间的自攻螺钉在侧向载荷的作用下从侧墙骨中拔出(图 3(a)), 抗倾覆连接件变形其连接失效, 墙体覆面板与底梁板之间只剩下钉连接, 在作动器施加的侧向力作用下, 作动器侧的墙骨逐渐抬升, 底梁板与覆面板之间的钉连接失效, 墙体承载力下降。

3 种加载方式墙体的破坏情况相似, 破坏部位集中在作动器侧抗倾覆连接件(图 3(b))以及覆面板与底梁板之间的钉连接部位(图 4(a)), 而远离作动器侧的抗倾覆连接件(图 3(a))、顶梁板和覆面板

之间(图 4(b))、侧墙骨和覆面板之间则基本保持未加载前的完好状态, 两片 SIP 墙板之间表现出一定的整体性(图 4a), 但也出现较小幅度的相对错位(图 5a)。墙体受力时发生破坏的部位, 满足两点: 1) 在墙体转动时产生相对位移; 2) 连接薄弱, 容易破坏。针对墙体受力集中的部位进行局部加固, 比如, 在墙体受力时容易发生位移的部位采用强度更高的规格材、减小连接钉间距等, 将可有效提高墙体抵抗侧向载荷的能力。



(a) 远离作动器侧连接件基本完好, 自攻螺钉未破坏



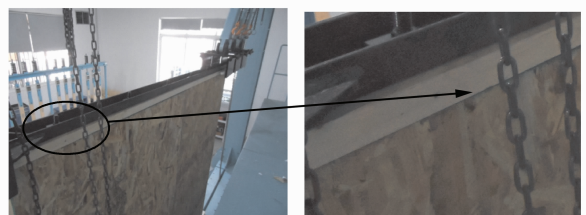
(b) 作动器侧连接件与墙体侧墙骨脱离, 自攻螺钉被拔出

图 3 抗倾覆连接件的破坏

Fig. 3 failure of overturning connections



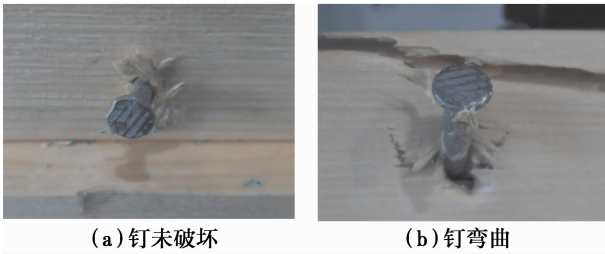
(a) 底梁板部位覆面板边缘被连接钉撕裂



(b) 覆面板与顶梁板之间未出现破坏

图 4 覆面板与顶/底梁板之间的破坏

Fig. 4 failure between covering and top/bottom beam



(a) 钉未破坏 (b) 钉弯曲

图 5 底梁板上钉接点的破坏形式

Fig. 5 failure forms of nail joint at bottom beam

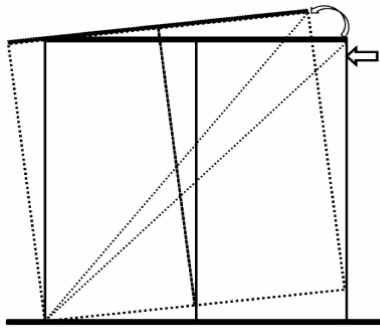


图 6 加载过程中的墙体转动

Fig. 6 rotary motion wall during loading on wall

2.2 不同加载协议下的抗侧性能

图 7 为 3 种加载协议下墙体的载-位移曲线。可以看到,不同加载方式下墙体的极限承载力及相应位移存在明显的差别。其中,采用 ISO22452 加载协议时墙体的极限承载力最大,载-位移曲线的斜率也较其他两种加载方式稍大,说明其刚度较大,在达到极限承载力后随荷载增加墙体荷载也减小最快;采用 E564 加载协议时墙体的极限承载力及相应位移最小,在达到极限承载力之后随位移增加墙体荷载下降较慢。

对曲线进行分析得到不同加载协议条件下墙体各抗侧性能指标,列于表 3 中。

表 3 不同加载协议墙体的抗剪性能参数
 Tabel 3 lateral load resistance performances of SIP wall under different loading methods

加载协议	初始刚度 $K/(kN \cdot mm)$	极限承载力 F_{max}/kN	极限荷载位移 D_{Fmax}/mm	极限抗侧刚度 $S_0/(N \cdot mm)$	延性系数 D
ISO22452	1.20	46.06	71.83	18.88	3.31
ASTM E72	1.23	40.66	76.97	16.66	4.07
ASTM E564	1.00	37.73	54.92	15.46	2.91

3 种测试协议中,一种荷载单调增加直至试件破坏 (ISO22452),一种分段对墙体进行加/卸载

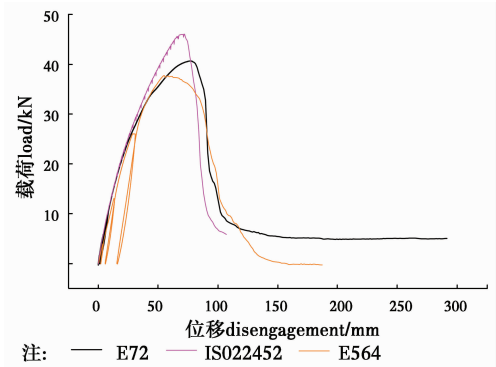


图 7 不同加载程序下墙体的载-位移曲线

Fig. 7 the loading displacement curve under different loading methods

(E72),一种分段加/卸载,同时使各阶段目标荷载持续一定时间(E564),从表 3 可以看出,这 3 种加载方式对墙体的抗剪性能指标有较大的影响。与 ISO22452 加载协议下墙体的抗剪性能相比,E72 协议加载墙体的初始刚度稍提高 2.5%,E564 协议加载墙体的初始刚度降低 16.7%,这说明阶段荷载不持续作用的加卸载对墙体初始刚度的影响不大,但阶段荷载持续作用时则会造成墙体蠕变而使初始刚度下降;E72 及 E564 加载时的极限承载力分别降低 11.7%、18.8%,说明随加卸载次数增多,由于内部能耗,墙体极限承载力下降;E72 加载时墙体的延性系数提高 22.9%,但 E564 加载墙体的延性系数则降低 12.1%,这说明当加卸载次数较少时可使延性系数增大,但当加卸载次数较多时,已造成墙体内部损伤而使其位移较小时就破坏。

承载能力和延性系数是结构抗震性能和安全性能的两个重要指标。极限承载力是结构或构件所能承受的最大荷载,与结构所承受的荷载形式有关。采用反复加卸载的方式对墙体施加载荷,在墙体达到极限荷载前造成了较大的内部耗能,随加卸载次数增多以及阶段荷载作用时间的延长,墙体的极限承载能力下降,故试验中采用 E564 协议加载墙体的极限承载力及延性系数均较采用 ISO22452 及 E72 协议加载时小。

在抗震设计中,延性系数是一个重要的指标,结构在遭受地震作用时,延性系数大的材料可以依靠自身的弹塑性变形来消耗地震能,避免结构倒塌。与单调增加的荷载作用 (ISO22452) 相比,多次加卸载且目标荷载不持续的加载方式 (E72) 所得到的延性系数较大,这是由于采用 E72 协议加载时,在

50% 载荷以上加卸载时,由于载荷较大且又反复作用,使墙体的刚度遭到破坏,从而使墙体产生较单调增加载荷作用时更大的位移,即墙体进行加卸载会使其抵抗侧向位移的能力减小,位移增大,而造成其延性系数增大;而采用多次加卸载同时目标载荷持续的加载方式(E564)的延性系数减小,这是由于在这种加载方式下,即便受到较小的载荷作用,由于阶段性目标载荷持续作用,墙体在载荷作用下已反生了部分不可恢复的位移,位移变形恢复能力变差,从而造成载荷达到 50% 时的位移已经较大,当载荷在 50% 以上继续增大,由于加载过程中墙体内部损伤累积,随位移增大及反复加卸载作用,使墙体容易出现疲劳破坏,从而造成延性系数减小。

3 结 论

采用 3 种不同的静力加载协议对木质 OSB 覆盖面的 SIP 墙体进行抗剪性能测试,墙体在不同测试协议下的破坏形式相似,但抗剪性能参数因加载协议的不同而有所区别。采用持续加载方式较反复加卸载方式得到的墙体的极限承载力大,屈服位移也大,延性系数居中。墙体测试过程中随阶段目标载荷所保持的时间越长,墙体所产生的蠕变效应增大,其极限承载力变小,极限位移也小,延性系数最小。

参考文献:

- [1] 吴刚,王曙光. 新型 SIP 填充墙板的制备及性能模拟研究[J]. 新型建筑材料, 2012,39(6): 8-11.
WU G, WANG S G. Preparation and simulation test of new SIP panel [J]. New Building Material, 2012, 39 (6):8-11. (in Chinese)
- [2] 曹海,刘鹏飞,严帅. SIP 墙板的综合性能分析[J]. 铜陵学院学报,2012, 11(1):110-111.
CAO H, LIU P F, YAN S. Study of the comprehensive of SIP[J]. Journal of Tongling College, 2012, 11(1): 110-111. (in Chinese)
- [3] 严帅,刘伟庆,陆伟东,等. SIP 板式结构住宅体系[J]. 新型建筑材料, 2010,37(8):35-39.
YAN S, LIU W Q, LU W D, et al. Study on SIP slab structure residential system [J]. New Building Material, 2010, 37(8): 35-39. (in Chinese)
- [4] MICHAEL M. Building with structural insulated panels[M]. American, 2000.
- [5] 席佳,赵荣军,费本华,等. 木结构建筑的墙体组成简介[J]. 林产工业, 2010, 37(2): 45-47.
XI J, ZHAO R J, FEI B H, et al. Wall composition of

- timber structure building [J]. China Forest Products Industry. 2010, 37(2): 45-47. (in Chinese)
- [6] TAYLOR S B, MANBECK H B, JANOWIAK J J, et al. Modeling structural insulated panel (SIP) flexural creep deflection[J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(12): 1658-1665.
- [7] KEITH E L. Standardization testing of structural insulated panels (SIPs) for the structural insulated panel association [J]. APA The Engineered Wood Association; Tacoma, WA, USA, 2006.
- [8] KERMANI A. Performance of structural insulated panels [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, 2006, 159(1): 13-19.
- [9] KERMANI A, HAIRSTANS R. Racking performance of structural insulated panels[J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(11): 1806-1812.
- [10] 严帅. SIP 板式木结构体系抗震性能研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2010.
YAN S. Research about seismic performance of SIP wood frame construction [D]. Nanjing: Nanjing Tech University, 2010. (in Chinese)
- [11] JAMISON J B. Monotonic and cyclic performance of structurally insulated panel shear walls [D]. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997.
- [12] Timber structural insulated panel walls-test methods ISO 22452:[S]. ISO, 2011.
- [13] Standard Practice for Static Load Test for Shear resistance of Framed Walls for Buildings: ASTM E564-06:[S]. ASTM, 2012.
- [14] Standard Test Methods of Conducting Strength Tests of Panels for Building Construction: ASTM E72-05:[S]. ASTM, 2005.
- [15] 胡国玺. 不规则木结构剪力墙抗侧性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
HU G X. Study about lateral force resisting performance of irregular wooden shear wall [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [16] LAM F, PRION H G, HE M. Lateral resistance of wood shear walls with large sheathing panels [J]. Journal of structural engineering, 1997, 123 (12): 1666-1673.
- [17] HONGYONG M I. Behavior of unblocked wood shear walls [D]. New Brunswick: University of New Brunswick. 2004.