

科技与工程

日本预制装配式框板胶合木结构的技术特点及研究现状

高颖¹, 杨越¹, 伊松林¹, 祝磊², 平田俊次³

(1. 北京林业大学, 北京 100083; 2. 北京建筑大学, 北京 100044; 3. 日本三泽房屋株式会社, 日本东京 1680071)

摘要: 木结构是日本住宅建筑的最主要结构形式, 其中预制装配式框板胶合木结构经历了约 50 年的研究和发展, 以结构的坚固耐久性以及生产施工的预制化、标准化著称。本文对其结构特点、生产施工等方面进行总结, 并对其近年开发的抗震性能测试方法进行介绍, 期望为中国木结构的开发及生产提供参考。

关键词: 日本; 预制装配式框板胶合木结构; 预制化; 结构性能

中图分类号: TU366.2

文献标识码: B

文章编号: 1001-8654(2013)04-0020-05

Technology Features and Research Status of Prefabricated Wood Panel Structure in Japan

GAO Ying¹, YANG Yue¹, YI Song-lin¹, ZHU Lei², HIRATA Toshi-tsugu³

(1. Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. Misawa Homes Co, Ltd, Tokyo 1680071, Japan)

Abstract: Wood structure is one of the primary Japanese residential building constructions. In recent decades, the Japanese wood structures have been constantly standardized and industrialized. The performance and durability of Japanese wood panel structures have been evaluated for more than 50 years. The main characteristics of Japanese wood structural design and manufacturing are discussed in this paper. The successful history and experience will provide valuable information for future development of China's wood structure industry.

Key words: Japan; wood panel structure; prefabrication; structural properties

据日本国土交通省资料显示, 从 1999—2008 年的十年间, 日本所有新建住宅中, 木结构的建筑比例平均为 47%, 而独栋住宅中, 木结构约占 86%。截止 2013 年 1 月, 日本全国建筑总使用面积为 785 828 万 m², 其中住宅为 543 180 万 m² (约占 74.8%), 木结构

建筑的使用面积约占住宅总面积的 68%; 非住宅类建筑中, 木结构建筑所占比例约为 7%^[1]。另据日本总务省调查, 日本现有住宅中, 59% 为木结构, 独栋住宅的 93% 为木结构^[2-3]。

日本木结构住宅形式通常分为: 传统梁柱木结构、现代梁柱木结构、轻型木结构和预制装配式框板胶合木结构等 4 种^[4]。其中, 传统及现代梁柱木结构约占 82%, 轻型木结构约占 12%, 预制装配式框板木结构约占 6%。

日本传统木结构可以追溯到中国唐宋时期, 伴随文化交流, 中国的建筑形式传到日本并得以延续和发

收稿日期: 2013-03-11; 修改日期: 2013-05-24

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助“北京林业大学新进教师科研启动基金(科技创新计划)”(200-1242591); “北京林业大学本科生科技创新专项计划项目”(200-201313)。

作者简介: 高颖(1974—), 女, 北京林业大学材料科学与技术学院副教授。

通讯作者: 伊松林, 男, 北京林业大学材料科学与技术学院教授。

展,如神社、寺院、日式民宅等。19 世纪末,日本开始学习西方木结构技术,逐步使用斜撑和金属加强件进行结构加固,加工精度亦大幅提高,形成现代梁柱木结构体系。

轻型木结构是欧美最普遍的木结构建造方式,于 1974 年前后传入日本。其特点是使用断面较小的规格材,均匀紧密分布连接,由主要和次要结构构件共同构成框架组结构传导载荷^[5]。

预制装配式框板胶合木结构是 20 世纪 60 年代,日本为解决战后住房紧缺而发展起来的一种预制构件装配式工业化木结构住宅。预制住宅的主要构造部分,如墙壁、地面、屋顶和台阶等构件,通过机械加工的方法在工厂生产,再运输至施工现场进行组装。预制住宅具有工厂生产精度高、预制化程度及现场标准化施工程度高,对建筑技术工人需求量低等特点,是日本大型住宅建设企业的主要施工方法。

我国木结构住宅产业正处于技术发展的关键阶段,预制工业化住宅符合我国住宅产业化发展及低碳节能的发展战略,是未来房地产发展的重要方向。本文对日本预制装配式框板胶合木结构的开发及研究现状进行总结,旨在为发展适合中国国情的工业化预制木结构住宅产业提供借鉴。

1 预制装配式框板胶合木结构的结构与施工

1.1 预制装配式框板胶合木结构的结构特点

1) 钉、胶连接相结合。

工厂生产的框板部件均采用胶合的连接方式,施工现场框板部件拼装时,采用胶与钉相结合的连接方式。与钉连接相比,胶连接更具均一性。研究人员以欧洲云杉为芯材(30 mm×80 mm×1 820 mm),针叶树胶合板为覆面板(5 mm×455 mm×1 820 mm)制作试样,进行两种连接方式的载荷剪切强度的对比试验。结果显示,在挠度变形为 12.13 mm 时,胶连接强度约为钉连接刚度的两倍^[6]。

2) 预制体系一体化。

单件框板完全实现工厂化生产,精度可控制在 0.2 mm 以内。加工过程:先将芯材拼装成对称龙骨架,龙骨架一侧面施胶覆 12 mm 厚胶合板,在空格处填充玻璃棉等保温隔热材料,随后在 0.7 MPa 压力下,在另一侧面施胶加压约 90 s 使双面覆板。由于

框板胶合木结构的单件框板均为框与板共同形成的作用体系,其蒙皮效应使框板自身具有极大的承载能力及刚度^[6]。其结构如图 1 所示。

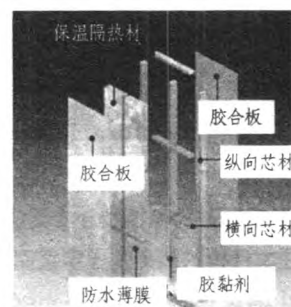


图 1 框板胶合木结构墙体单元结构示意图

Fig. 1 Construction of a wood panel wall unit

3) 硬壳式构造(Monocoque Structure)。

在施工现场,预制装配式框板胶合木结构式房屋通过钉和胶相结合的连接方式,将各个单件框板组合成墙体单体进行拼装,从而使各个单件框板构成整体连续的硬壳式结构,其载荷传递情况如图 2 所示。建筑物自重、家具载荷、积雪载荷等垂直荷载,通过连续整体的屋面结构均匀分散到建筑整体;同样,风载荷以及由地震引起的水平震动等水平荷载,亦可通过水平平面整体连续传递。



图 2 框板胶合木结构房屋整体受力示意图

Fig. 2 Vertical and horizontal loads on a wood structure

预制装配式框板胶合木结构与梁柱木结构的力传递方式,如图 3 所示。预制装配式框板胶合木结构通过框板单体自身以及结合部位的高强度连接,实现了硬壳结构在房屋建筑技术上的完美应用(图 3a)。与梁柱木结构的连接结构相比(图 3b),预制装配式框板胶合木结构大大减少了应力集中,增加了建筑结构的强度及刚度。

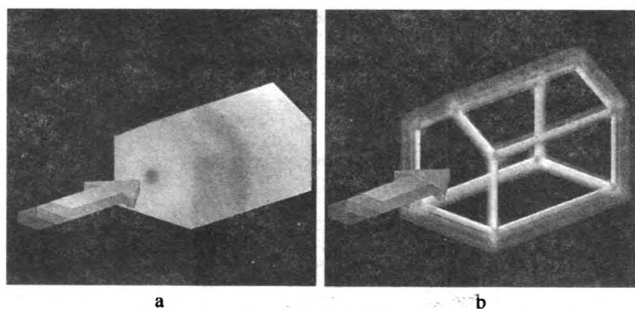


图3 预制装配式框板胶合木结构与
梁柱木结构的荷载传递示意图

Fig. 3. Lateral force transmission in wood structures

框板胶合木结构在日本历次大地震中均有良好表现,图4为1995年日本兵库县南部地震灾害后,在周围房屋均出现不同程度破坏或倒塌的情况下,预制装配式框板胶合木结构房屋依然屹立。据统计^[7],1995年兵库县南部地震中,有27万户的房屋损毁或半损毁,而预制装配式框板胶合木结构房屋无倒塌、无大规模损坏。即使是处于震中心的房屋,也仅出现壁纸等内部装饰材料的轻微破坏,完全不影响居住。



图4 日本兵库地震灾后调查照片

Fig. 4 Intact wood house after Hyogo-Ken earthquake

框板胶合木结构因其综合性能优越,从1968年开始至今,已在南极昭和基地建设完成35栋,面积约5 500 m²的框板胶合木结构建筑(图5)。最早建成的建筑至今已有40多年的历史,经受住了南极-50℃、风速60 m/s的极地气候考验。

1.2 预制装配式框板胶合木结构的生产与施工

现阶段,木结构住宅建设的各种构配件、成品、半成品基本实现了在工厂预制生产和专业加工,在施工现场机械化、半机械化或人力装配,从而达到缩短工期,提高精度,节约能源、材料,减少建筑垃圾和环境污染的目的。

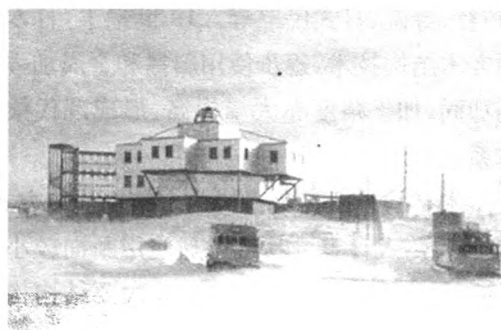


图5 日本南极昭和基地建设的框板胶合木结构建筑

Fig. 5 Wood panel structure at Japanese
Showa Antarctica Base

1.2.1 工厂预制化生产

预制装配式框板单体的生产从选材、锯切、组框,到涂胶、拼装,全部实现自动化加工。呼吸纸、门窗、防盗卷帘窗、甚至外墙材,亦均在工厂预制加工(图6),加工完毕后直接运往工地拼装,其自动化程度可以与汽车工厂生产线相媲美。高度的工厂化生产,不仅确保了加工精度、施工质量及稳定性,而且避免了施工过程受天气等因素的影响,缩短工期。

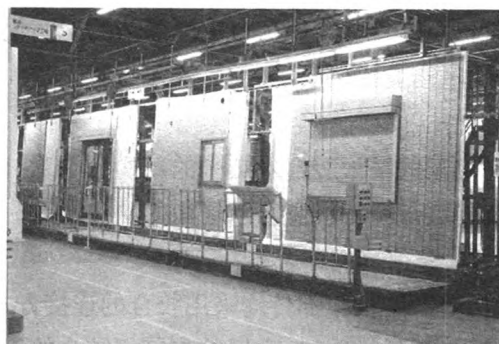


图6 工厂预制化生产线

Fig. 6 Manufacturing line of a prefabricated
wood panel system

1.2.2 标准化施工

房屋的部品及构件到达工地现场后进行施工(图7),标准工期为55天。由于墙体、地面、屋顶等结构部件完全工厂化生产,质量和精度均有保障;现场施工亦有严格的操作规定,保障房屋建设的高效率。一栋2~3层约150 m²房屋,主体框架建设一般只需2天,标准工期内即可完成电气线路、给排水、空调、中央换气系统、内装、电器卫浴设备,以及固定家具和电器等的施工安装,交付消费者使用。



图 7 标准化施工现场

Fig. 7 Assembly of prefabricated wood panels

现场施工主要采用钉、胶并用的连接方式。钉子通常采用麻花钉,并用斜钉结合方式产生钩扣效果,以增加连接牢固程度。图 8 为相邻墙体之间的连接方式示意图。楼板及屋面除采用地脚螺栓等金属件进行连接外,亦使用胶连接进行加固。

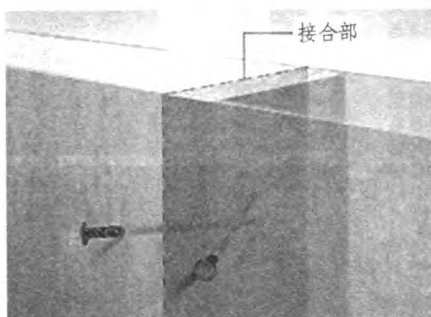


图 8 相邻墙体之间连接示意图

Fig. 8 Connection of two wood panel wall units

为保证预制框板胶合木结构的施工效率及质量,通常采用“3 次运送”、“6 次管理及检查”制度。紧密配合现场施工进度,部品及构件分 3 次运送至施工现场,实现标准化施工;在施工阶段,进行“地面加固工程管理及检查”、“开工管理及基础配筋、模板检查”、“基础工程管理及完工检查”、“结构主体工程管理及检查”、“防水工程管理及检查”、“完工管理及检查”。

2 预制装配式框板胶合木结构的研究与开发

足尺试验是指试验对象的尺寸与实际对象尺寸一致的试验,因其能真实、直观地反映试验对象的现实数据,在结构抗震研究中被普遍采用。预制装配式框板胶合木结构的足尺试验研究始于 1963 年,其后对于地面、墙体、屋面等部件的足尺构件的静力、动力试验从未间断,整栋房屋的足尺试验也进行了约 10 余次。具有代表性的试验如下。

2.1 剪力墙水平抗震对比试验

预制装配式框板胶合木结构体系中,连续剪力墙既是承担竖向荷载的主要构件,又是承担风荷载或地震产生的水平剪力的主要构件,因此,研究其强度及抗震性能具有重要意义。

研究人员设计了 4 种结构进行单向水平振动加载对比试验,包括:①预制装配式框板胶合木结构(30 mm×80 mm 骨架材、5 mm 厚覆面胶合板、CN 50 钉、异氰酸酯胶黏剂);②斜撑加强钢结构(3.2 mm 厚 C 型钢骨柱、 $\phi 16$ mm 斜撑);③北美轻型木结构(38 mm×89 mm 骨架材、9 mm 厚胶合板、CN 50 钉);④日本现代梁柱木结构(105 mm×105 mm 日本柳杉柱、45 mm×105 mm 加固斜撑截面)。

试验墙体尺寸为 3 640 mm×2 578 mm(其中轻型木结构剪力墙试件的宽度为 2 464 mm),分 10 次对墙体进行 2.5 Hz 振动加载,试验结果表明:预制装配式框板胶合木结构的极限载荷,分别为斜撑加强钢结构的 1.4 倍、轻型木结构的 4 倍、现代梁柱木结构的 5 倍;相同载荷量时,预制装配式框板胶合木结构的水平位移量,仅为斜撑加强钢结构的 1/4,显示极高的强度、抗震性和刚度。

2.2 三层房屋结构拟静力试验

结构拟静力试验,是目前结构或结构构件受力及变形性能研究广泛应用的方法之一,可建立结构构件在地震作用下的恢复力特性,建立确定结构构件恢复力的计算模型;通过试验所得的滞回曲线和曲线所包围的面积,求得结构的等效阻尼比,衡量结构的耗能能力;同时还得到骨架曲线、结构的初始刚度及刚度退化等参数,由此可以进一步从强度、变形和能量等三个方面,判断和鉴定结构的抗震性能。通过结构拟静力试验,研究结构构件的破坏机制,是改进现行结构抗震设计方法及结构设计构造的有效依据。

日本《住宅品质确保促进法》(简称《品确法》)中的《性能表示制度》规定,住宅的最高抗风等级为 2 级,要求房屋在遭受 50 年一遇的台风时不得有损坏,遭受 500 年一遇台风时不得出现倒塌等破坏。考虑风压为可变载荷,换算成该建筑物所承受载荷时,其承载力需扩大 1.2 倍,即分别为 136 kN 和 162 kN。1987 年,日本相关企业对一栋高 9.6 m、各层面积 6.4 m×6.4 m 的三层足尺预制装配式框板胶合木结

构房屋进行拟静力加载试验(图 9),结果显示其承受的极限载荷为 281 kN,验证了预制装配式框板胶合木结构房屋优越的抗风性能。

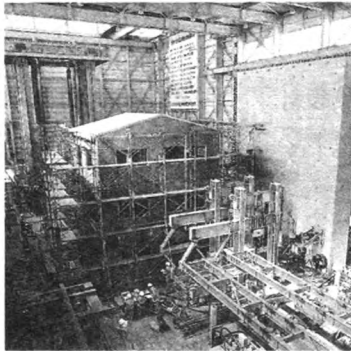


图 9 三层足尺拟静力试验
Fig. 9 Pseudo-static test of full-size three story wood structure

2.3 足尺三层房屋振动台试验

日本是一个多地震的国家,研究房屋的抗震性能具有极其重要的意义。1997 年日本对一栋预制装配式框板胶合木结构房屋,进行了世界首次 3 层房屋模拟振动台试验(图 10)。

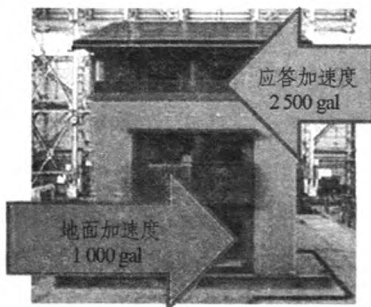


图 10 三层足尺房屋振动台试验
Fig. 10 Shaking table test of full size house

建筑面积约 150 m²,总重量 27.8 t,地上三层构造,地震波加速度采用 1995 年日本兵库县南部地震时神户海洋气象台观测到的地震波信息:水平加速度 818 gal,水平速度 94.4 cm/s,垂直加速度 336.5 gal,垂直速度 40.3 cm/s;还进行了水平加速度 1 000 gal,速度 94.4 cm/s 的振动试验。试验测算出当地面加速度为 818 gal 时,2 层楼板的应答加速度为 1 002 gal,3 层楼板的应答加速度为 1 150 gal,屋顶的应答加速度达到了 2 500 gal。试验后对房屋破坏性状检测发现,除屋内壁纸出现部分裂痕外,房屋结构部分保持完好,并没有出现肉眼可见的结构破坏。

• 24 •

2.4 抗震减震装置搭载足尺房屋振动台试验

高阻尼橡胶具有将动能转化为热能的效果,目前在日本建筑的减震装置中得到了广泛开发和应用。使用高阻尼橡胶开发出的墙体式抗震装置,通过杠杆原理将中心钢板运动行程扩大,对于预制装配式框板胶合木结构起到了进一步加固的效果。

图 11 所示为专业抗震加固装置 MGEO (Misawa governance system for earthquake oscillation control),针对预制装配式框板胶合木结构而开发,一般作为墙体的替代部分,在房屋建筑一层设置两枚,且两枚减震墙体需在水平面上相互垂直。

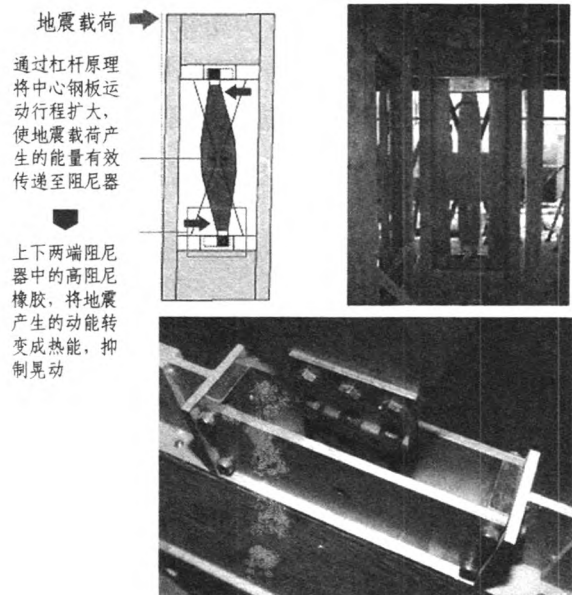


图 11 MGEO 抗震装置
Fig. 11 Misawa governance system for earthquake oscillation (MGEO)

2004 年 7 月,为研究 MGEO 的抗震减震性能,进行了搭载 MGEO 的足尺预制装配式框板胶合木结构房屋振动台试验(图 12)。试验采用超过 1 200 gal 的地震波,4 天时间里累计进行了 39 次振动加载试验。试验结果显示,搭载 MGEO 的房屋变形量为 5.7 mm,为未搭载时的 1/2;与轻钢结构相比,其变形量仅为 1/8(轻钢结构变形量为 43 mm),MGEO 可以吸收 1/2 以上的地震能量,振动时间也缩短了一半。MGEO 对于减小房屋震动、控制房屋水平位移、减轻房屋破坏,起到重要的作用,进一步增强了预制装配式框板胶合木结构房屋的抗震性能^[7]。

(下转第 49 页)

别对应酰胺键中的 C=O 和 C—O 的伸缩振动^[10]。表明 MBC 及 MMBC 的酯键与试材中的羟基发生酯交换反应;而 MMBC 对位的具有供电性的甲基能够活化酰胺键,使其更有效地与木材中的羟基发生酯交换反应。

3 结论

1) 在本试验条件下,3 种防霉剂对霉菌的抑制效果,均随着处理剂质量分数的增加而增强;在同一质量分数下,MMBC 的防霉效果优于五氯酚钠,但略差于 MBC。

2) 防霉剂质量分数愈高,其抗流失性愈强;MMBC 抗流失性优于 MBC,五氯酚钠的流失率最高。

3) MMBC 的防霉机理有待进一步研究,其成本高于五氯酚钠和 MBC,今后将进行 MMBC 与其他木材防霉剂复配的研究,从而达到防霉效果优、成本低的目的。

参考文献:

- [1] Evans P. Emerging technologies in wood protection [J]. For Prod, 2003, 53(1): 14-22.
- [2] 孙芳利, 鲍滨福, 陈安良, 等. 有机杀菌剂在竹材保护中的应用及发展展望[J]. 浙江农林大学学报, 2012, 29(2): 272-278.
- [3] 金菊婉, 丁鑫, 董诗文. 多菌灵和咪鲜胺用于杨木定向刨花板的防霉研究[J]. 林产工业, 2010(2): 19-24.
- [4] 庄海燕. 多菌灵的合成研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [5] 李焱, 马会强, 王玉炉. 苯并咪唑及其衍生物合成与应用研究进展[J]. 有机化学, 2008, 28(2): 210-217.
- [6] Siya R, Dean S W, Linda L W, et al. Synthesis and biological activity of certain alkyl 5-(alkoxycarbonyl)-1H-benzimidazole-2-carbamates and related derivatives[J]. J Med Chem, 1992, 35(3): 539-547.
- [7] 王彦, 胡志声, 杨玉森, 等. 五氯酚及五氯酚钠的测定: 藏红 T 比色法[J]. 铁道劳动卫生通讯, 1986, 49(3): 51-53.
- [8] 淑英. 多菌灵残留测定方法的研究及葡萄与葡萄酒中多菌灵残留的分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
- [9] 刘晓松, 童张法, 郑玲, 等. 固相萃取-高效液相色谱法同时测定噻菌灵和多菌灵在浓缩菠萝汁中的残留量[J]. 分析科学学报, 2007, 23(3): 311-313.
- [10] 李坚. 木材波普学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

(责任编辑 张一萍、姜征)

(上接第 24 页)

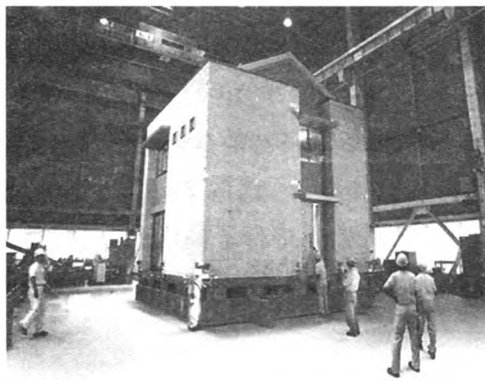


图 12 搭载 MGEO 的足尺振动台试验

Fig. 12 Shaking table test of full size house with MGEO

3 结语

本文以装配式框板胶合木结构为例,从结构特点、生产施工、抗震性能、研究开发等方面,简要介绍了日本预制木结构的发展历程和技术现状,并着重对木结构抗震性能设计和相关试验进行了深入讨论。经过半个多世纪的发展,日本的新型木结构在坚固、耐久、节能、舒适和生态环保等方面,积累了许多成功的经验,创建了一套包括木结构研发、设计和建设施

工在内,产学研紧密结合的高效创新体系,形成并发展了具有鲜明日本特色的木结构文化。

我国正处在一个重大的转型时期,在木材工业和房屋建设的交叉领域,借鉴和吸收日本现代木结构发展中的有益经验和教训,走出一条具有中国特色的木结构发展道路,对促进生态文明建设、发展低碳经济,将起到积极的推动作用。

参考文献:

- [1] 日本国土交通省. 建筑物存量统计(2013 年 1 月 1 日)[J]. 日本: 国土交通省, 2013.
- [2] 日本国土交通省. 住宅开工统计[J]. 日本: 国土交通省, 2008.
- [3] 日本总务省. H20 年住宅土地统计调查[R]. 日本: 总务省, 2008.
- [4] 木构造设计. 日本建筑学会关东支部讲习会资料[Z]. 日本: 横滨, 2008.
- [5] 何敏娟, Frank Lam. 北美“轻型木结构”住宅建筑的特点[J]. 结构工程师, 2004(1): 1-6.
- [6] 日本三泽房屋株式会社. 三泽房屋株式会社技术资料集[Z]. 日本: 三泽房屋株式会社, 2009.
- [7] Hisamitsu Kajikawa. Research on anti-seismic structure of wooden panel structure[J]. Journal of JAEE, 2005(2): 26-29.

(责任编辑 向琴、孟凡丹)