

胶合板-薄壁型钢组合楼板的振动及受弯性能研究

夏永惠, 郑晓燕, 魏建

(南京林业大学土木工程学院, 江苏南京 210037)

摘要: 提出一种由冷弯薄壁型钢与意杨胶合板通过结构胶和螺钉连接而成的钢木组合板。研究钢板厚度、胶合板厚度、组合板高度、板跨等因素对组合板自振特性与受弯特性的影响, 并提出一种更简便有效的舒适度判别标准。结果表明, 意杨胶合板与薄壁型钢能很好地协同工作, 提高型钢板厚与胶合板板厚, 可显著提高组合板的承载能力与振动舒适度, 且振动性能和抗弯承载能力满足建筑楼板的要求。推荐用于跨度 <3.6 m的住宅或办公室建筑楼板。

关键字: 冷弯薄壁型钢; 胶合板; 钢木组合楼板; 建筑; 舒适度; 承载力

中图分类号: S792.11; TU398.6; TU352.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654 (2020) 03-0018-05

Vibration and Bending Performance of a Composite Panel Built-up with Plywood and Thin-walled Section Steel

XIA Yong-hui, ZHENG Xiao-yan, WEI Jian

(College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: A steel-wood composite panel composed of cold-formed thin-walled steel plate and plywood connected with structural glue and screws was developed. The influences of the steel plate thickness, plywood thickness, composite panel height and span on the natural vibration and bending performance of the composite panel were analyzed. And a more effective and simpler comfort criterion was proposed. The results showed that the plywood and the thin-walled steel plate could be well combined together. Increasing the thickness of the steel plate and the thickness of the plywood could significantly improve the bearing capacity and vibration comfort of the composite panel. The panel was recommended to for residential or office buildings with floor spans no greater than 3.6 m.

Key words: thin-walled steel; plywood; steel-wood composite panel; vibration comfort; loading capacity

在建筑结构设计, 常采用轻型钢木组合结构的楼板。笔者借鉴了北美的钢托梁与木面板的组合形式, 设计了一种以意杨胶合板为面板、以冷弯薄壁型钢为骨架的组合板形式, 旨在开发一种经济环保的新型钢木组合楼板。冷弯薄壁型钢材具有重量轻、强度高, 但容易发生屈曲的特点, 与胶合板组

合后, 既可降低楼盖自重, 改善抗震性能, 同时为人工林木材的利用增加了新途径。

在人行荷载下, 楼板通常容易产生很大的振动, 进而引起人的不适感。因此, 对于组合板楼板的振动舒适度评价不可或缺。

不同国家对楼板振动舒适度的评价标准差异较大, 但均与频率、幅值与振动时间有关。我国主要通过加速度限值及频率限值的方式评价舒适度。有学者研究了冷弯薄壁型钢组合楼盖的自振频率、振动性能以及抗弯承载力^[1-2], 但未评价振动舒适度,

收稿日期: 2019-04-10; 修改日期: 2020-04-19

作者简介: 夏永惠 (1994—), 女, 硕士研究生。Email: xiayonghuihui@163.com

责任作者: 郑晓燕, 女, 教授。Email: xyzh@njfu.com.cn

且测试的组合板所用材料,均来自不可再生资源,虽然强度高但环保性能欠佳;亦有研究将竹胶合板用于建筑楼板,并证明了钢竹组合板间有较好的组合效应,力学性能可以满足建筑楼板的要求,但也未考虑钢竹组合板的振动性能^[3-4]。鉴于此,笔者以不同截面形式的冷弯薄壁型钢与不同厚度的意杨胶合板组合,进行振动及受弯试验,旨在探究其作为建筑楼板的可行性,并提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1) 意杨 (*Populus euramevicana*) 胶合板:取自江苏金湖县某胶合板厂,幅面为 1 220 mm×2 440 mm,厚度分别为 11、14、18 mm。

根据 GB/T 22349—2008《木结构覆板用胶合板》、GB/T 17657—2013《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》,三种厚度胶合板的弹性模量(MOE)分别为 6 163、8 008、6 966 MPa,静曲强度(MOR)分别为 51.0、58.3、49.4 MPa。

2) 冷轧薄壁型钢:经过强度预计算,选择了壁厚 1.0、1.5、2.0 mm 的三种钢材。

参考美国《钢木组合结构细节—建筑指南》,选用了抗弯刚度更大的 U 型钢。按照 GB/T 228—2002《金属材料室温拉伸试验方法》,测得三种厚度钢板的屈服强度和抗拉强度相差均<5%,弹性模量相差均<5%,故取其平均值进行计算。即:屈服强度 220.55 MPa,抗拉强度 317.45 MPa,弹性模量 1.96×10^5 MPa^[5-7]。

3) 结构胶:高强环氧 AB 胶。外购。

4) 自攻螺钉:规格 M5.5*45。外购。

1.2 试验设备

INV9818 加速度传感器, DH5922 动态信号测试分析系统, AG-IC 万能力学试验机, TDS 530 数据采集仪,激光位移计,静动态电阻应变仪等。

1.3 试验设计

1) 组合板制备

试验制备试板 12 块,长度 2.3 m,宽度 0.6 m。根据骨架型钢截面形式的不同,试件分为 A(芯部为 U 型钢)、B(芯部为双 U 型钢)两种结构。组合结构及尺寸见图 1。

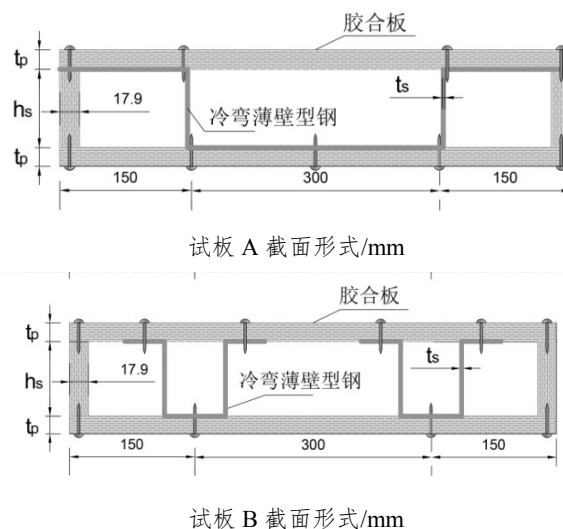


图 1 组合板截面形式及实物图

Fig.1 Structure and appearance of steel-wood composite panels

胶合板与钢板之间先用高强度结构胶粘结,加压固化后,再在胶结面处打入自攻螺钉,并用 18 mm 厚的胶合板条进行组合板封边,用自攻螺钉固定封边板与覆面胶合板。

2) 试验设计

除胶合板厚度、型钢板厚度和截面形式外,还选用型钢板高度(h_s)为影响因子,见表 1。考虑到 A 组型钢抗弯刚度要小于 B 组,因而 A 组的高度水

表 1 试验因素与水平

Tab.1 Experimental factors and levels

试验因素	水平
型钢截面形式	U 型(A 组); 双 U 型(B 组)
胶合板厚度/mm	11; 14; 18
型钢板厚度/mm	1.0; 1.5; 2.0
型钢板高度/mm	A 组: 65; 75; 85 B 组: 90; 100

平选用 65、75、85 mm, B 组水平则选用 80、90、100 mm。具体参数见表 2。

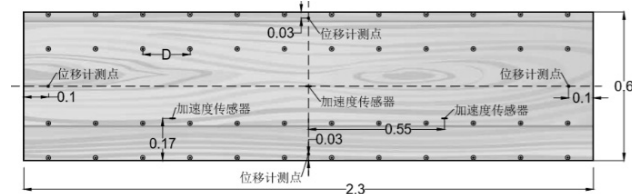
表 2 组合板制备参数

Tab.2 Manufacturing parameters of steel-wood composite panel samples

编号	胶合板厚度 t_p / mm	型钢厚度 t_s / mm	型钢高度 h_s / mm	螺钉间距 D / mm
A1	11.1	1.5	85	150
A2	13.9	1.5	85	150
A3	17.9	1.5	85	150
A4	17.9	1.5	65	150
A5	17.9	1.5	75	150
A6	17.9	1.0	65	150
A7	17.9	2.0	65	150
B1	11.1	1.0	80	150
B2	13.9	1.0	80	150
B3	17.9	1.0	80	150
B4	17.9	1.5	90	150
B5	17.9	2.0	100	150

1.4 试验方法

建立 ANSYS 有限元模型对组合板进行模态分析, 预判前三阶阵型振幅最大位置。综合考虑试验操作的便利性后, 组合板测点布置见图 2。



注: 长度单位为 m。

图 2 加速度传感器和位移测点布置

Fig.2 Acceleration sensor and displacement measuring point arrangement

通过千斤顶与反力架, 对组合板进行逐级加载, 以测定组合板的抗弯承载力; 通过环境激励和人行荷载, 测量板的动态响应。试验装置见图 3。

1.5 性能检测

1) 振动性能: 通过两块垫块, 将试件简支, 净跨 2.1 m, 放置重物模拟 0.8 kN/m² 的荷载工况。先测量环境激励下组合板的动力特性, 再由一名体重 70 kg 的人以 2.0 Hz 的步频, 沿板中跨度方向行走, 测量所有板的动力响应。通过 ANSYS 仿真模拟对试验进行扩展, 分析不同跨度下的振动性能。

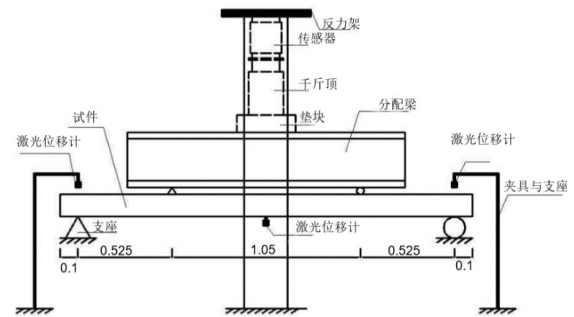


图 3 弯曲试验加载装置

Fig.3 Loading device for bending test

2) 抗弯承载力: 试件两端简支, 通过分配梁加载两集中力。采用逐级加载的方法, 每级荷载 5 kN, 持续加载 2~3 min, 待荷载和应变读数稳定后, 记录位移计和应变仪的读数。

取荷载标准值及板的密度, 通过公式 1, 计算不同使用环境下组合板在挠度限值下的最大跨度^[8-10]。

$$l^2 \leq B \omega_c / SM \quad (1)$$

式中: l —计算板跨; S —与荷载形式和支承条件有关的系数。A 组截面 S 取 0.1065; B 组截面 S 取 0.1146; ω_c —板的挠度限值; M —由荷载产生的跨中弯矩; B —等效刚度, $B = \alpha_1 \alpha_2 EI$ 。其中 α_1 —螺钉强化系数, 取值为 1.15; α_2 —组合板刚度折减系数。A 截面 $\alpha_2 = 1.0$; B 截面 $\alpha_2 = 0.76$ 。

2 结果与讨论

2.1 振动性能

钢-木组合板的振动性能试验结果, 列于表 3。

表 3 钢-木组合板的振动试验结果

Tab.3 Vibration test results of steel-wood composite panels

编号	自振频率/ Hz	峰值加速度/ (m·s ⁻²)	编号	自振频率/ Hz	峰值加速度/ (m·s ⁻²)
A1	21.01	1.54	B1	20.03	0.83
A2	20.91	1.5	B2	21.98	0.68
A3	19.79	1.46	B3	21.49	0.43
A4	21.28	1.01	B4	26.4	0.19
A5	21.25	1.09	B5	29.31	0.2
A6	17.35	1.17			
A7	23.7	0.95			

试件在环境激励下的自振频率均在 15 Hz 以上, 满足 JGJ 99—2015《高层民用建筑钢结构技术规程》的要求。但由于试件两端简支, 无法体现试板在结构中的整体性能, 因而响应加速度较 JGJ 3—2010《高

层建筑混凝土结构设计规程》中的峰值加速度限值 0.15 m/s^2 偏大。分析原因:

1) 钢板厚度越大, 组合板整体刚度越大, 试件自振频率越高, 峰值加速度越小; 胶合板厚度对于自振频率的影响较小, 增加胶合板厚度同样可以减小峰值加速度, 对增加板的整体舒适度仍有帮助。

以试板 A4、A6、B1、B2 为例。胶合板厚度增加 61.3%时, 自振频率仅增加 7.2%, 峰值加速度降低 18%; 型钢板厚度增加 50%时, 自振频率可以增加 22.6%, 加速度降低 13.6%。这可能是由于胶合板增加刚度的同时, 增大了组合板自重, 两者效应相互抵消, 使得自振频率的增加不明显。

2) 在板厚不变的情况下, 型钢板的高度增加使得组合板的厚度增加, 自振频率降低, 加速度增加, 舒适度降低, 对 A 组影响尤甚。

以试板 A3、A4、A5 以及 B4、B5 为例, 型钢板高度增加 10 mm, A 组振动加速度分别增加了 8%、33%, B 组峰值加速度增加仅 5%。说明 A 组的截面形式对于型钢板高度的变化更敏感。

3) A 组板的峰值加速度, 普遍 10 倍大于标准限值, 说明 A 组截面形式过于简单, 较难满足楼板舒适度要求。

对振动性能更好的 B 组进行峰值加速度加权, 得到振动强度 a_w , 列于表 4。

表 4 B 组试板的振动强度
Tab.4 Vibration intensity of group B composite panel samples

编号	B1	B2	B3	B4	B5
$a_w / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	0.0159	0.0080	0.0085	0.0069	0.0065

根据 ISO 2631-2: 2003 《机械振动和冲击-人体全身振动的评价》第二分项对建筑中振动的规定, 办公室区域的振动强度限值为 0.020, 住宅区域的限值为: 白天 0.015、夜晚 0.007。表 4 中 B 组试件的振动强度可以满足该规范对办公区域的要求。

表 3 中列出的峰值加速度, 虽然大于国内标准的限值 (0.15 m/s^2), 但并未超出十倍限值, 且测试人员在试验过程中没有不舒适感, 由此反映出我国标准以峰值加速度作为舒适度限值的做法过于保守。建议先通过自振频率及十倍的峰值加速度进行舒适度预判, 再通过振动强度判断舒适度是否满足^[11]。

采用 ANSYS 程序, 对振动响应较好的 B4、B5 号试板, 进行不同跨度时其动力响应的模拟, 结果列于表 5。

表 5 不同跨度组合板动力响应的有限元模拟
Tab.5 Finite element simulation of dynamic response of composite panels with different spans

编号	特性	组合板跨距/m				
		2.1	3.0	3.3	3.6	3.9
B4	频率/Hz	31.8	24.44	20.26	17.05	14.55
	加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	0.011	0.023	0.031	0.038	0.045
B5	频率/Hz	30.6	26.57	22.03	18.55	15.83
	加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	0.009	0.018	0.023	0.028	0.035

在人行荷载作用下, 除跨度 3.9 m 的组合板外, 其余均满足自振频率和振动强度的要求。当楼板跨度大于 3.6 m 时, 无法同时保证频率与振动强度符合舒适度要求, 因为板跨的增加会降低板的舒适度。对于大跨度的建筑, 或对楼板振动有更高要求的建筑, 需增加材料厚度或降低组合板的总厚度, 以满足舒适度要求。

2.2 抗弯承载能力

在加载初期, 型钢板与胶合板之间胶层薄弱处出现局部脱胶现象, 但由于螺钉的作用, 两种板材仍能很好的共同工作, 荷载与变形仍然呈线性关系。

随着继续加载, 脱胶程度逐渐增大, 螺钉变形; 胶合板发生断裂; 型钢上下板屈服, 型钢肋板屈曲, 最终导致组合板破坏。

表 6 列出了各试板跨中达到挠度限值 $L/200$ 时的特征弯矩和破坏弯矩。

表 6 组合板的特征弯矩与破坏弯矩
Tab.6 Characteristics moment and failure moment of steel-wood composite panels

/($\text{kN} \cdot \text{m}$)					
编号	特征弯矩	破坏弯矩	编号	特征弯矩	破坏弯矩
A1	14.14	19.2	B1	3.699	5.19
A2	17.76	19.96	B2	5.329	7.355
A3	18.76	20.73	B3	3.643	7.476
A4	12	14.98	B4	10.83	16.9
A5	14.9	15.9	B5	11.59	18.75
A6	9.95	10.98			
A7	13.73	21.46			

试验中, 由于构造复杂, B1、B2、B3 板加工时, 未在结构胶固化过程中及时用重物加压, 导致材料

之间粘结不彻底,在加载前就发生板材之间开胶,失去组合效应;试板 A6 破坏时,胶合板断裂,型钢强度未完全发挥。除以上试件外,其余各试件体现了较好的组合效应和承载能力,荷载与挠度基本呈线性关系。

分析易知,分别增大钢板与胶合板的厚度,组合板的承载能力都会有显著提高,但钢板对提高能力的贡献更强。以试板 A2、A3、A4、A7 为例,胶合板厚增加 28%时,破坏弯矩增加 3.9%;而型钢厚度增加 33%时,破坏弯矩增加了 43.2%;表明型钢板的厚度越大,组合板承载能力越大。

按照 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》以及测得的组合板自重,取办公、住宅环境下的荷载标准值 3.1 kN/m^2 ,商场荷载标准值 5.1 kN/m^2 ,由公式 1 计算出挠度限值时的最大板跨,见表 7。

表 7 组合板最大跨度

Tab.7 Maximum span of steel-wood composite panels

			/m		
编号	商场	办公与住宅	编号	商场	办公与住宅
A1	3.5	3.9	B1	2.8	3.2
A2	3.7	4.2	B2	3.1	3.5
A3	3.8	4.3	B3	3.2	3.6
A4	3.3	3.8	B4	3.5	3.9
A5	3.5	4	B5	3.8	4.3
A6	3.2	3.6			
A12	3.4	3.9			

表 7 显示,对于办公、住宅环境,组合板楼板的板跨不宜超过 3.6 m;商场环境的板跨不宜超过 3.0 m。

3 结论

1) 该类钢木组合板的组合效应良好,舒适度及受力性能均能满足设计规范要求;建议跨度 $< 3.6 \text{ m}$ 。

2) 增加冷弯薄壁型钢板壁厚或胶合板厚度,都可以有效提高板的承载力与振动舒适度,而增加型钢板的壁厚作用更为明显。

3) 型钢的高度增加,可以增加组合板的承载能力,但同时会降低振动舒适度。对振动敏感的环境及跨度较大的组合板,应该谨慎选用组合板的厚度。

4) U 型截面型钢难以满足舒适度要求,容易过早脱胶;同等参数条件下,双 U 型截面型钢的刚度大于 U 型,具有更好的承载力、组合效应与舒适度。

此外,在钢-木组装胶合过程中,应及时施压,以保证型钢与胶合板之间有足够的胶合强度。

参考文献:

- [1] R Parnell, B W Davis, L Xu. Vibration performance of lightweight cold-formed steel floors[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 136(6): 645-653.
- [2] 贾子文,周绪红. 冷弯薄壁型钢-混凝土组合楼盖振动性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(4): 42-51.
JIA Z W, ZHOU X H. Experimental study on vibration performance of cold-formed thin-walled steel-concrete composite floor[J]. Journal of Civil Engineering, 2011, 44 (4): 42-51.
- [3] 李玉顺,单炜,黄祖波,等. 压型钢板-竹胶板组合楼板的力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008(1): 96-102, 111.
LI Y S, SHAN W, HUANG Z B, et al. Experimental study on mechanical properties of profiled steel plate-bamboo plywood composite floor[J]. Journal of Building Structures, 2008(1): 96-102, 111.
- [4] 单炜,李玉顺,张秀华,等. 冷弯薄壁 C 型钢-竹胶板组合楼板受弯性能研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(1): 30-35.
SHAN W, LI Y S, ZHANG X H, et al. Bending performance of cold-formed thin-wall C-steel-bamboo plywood composite floor[J]. Industrial Construction, 2016, 46 (1): 30-35.
- [5] 于彩霞. 型钢-意杨胶合板组合板受弯性能试验研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2015.
YU C X. Experimental study on bending performance of section steel-yiyang plywood composite panel[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2015.
- [6] 魏健. 冷弯薄壁型钢-意杨胶合板组合楼盖振动性能研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2014.
WEI J. Study on vibration properties of cold-formed thin-walled steel-Yiyang plywood composite floor[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2014.
- [7] 赵建华. 钢-木组合楼板舒适度研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2014.
ZHAO J H. Study on the comfort of steel-wood composite floor[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2014.
- [8] 史占崇,苏庆田,戴昌源. 钢-碳纤维混凝土组合桥面板轴拉性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019(40): 54-60.
SHI Z C, SU Q T, DAI C Y. Experimental research on the axial tensile performance of steel-steel fiber reinforced concrete composite deck[J]. Journal of Building Structures, 2019(40): 54-60.
- [9] 黄海林,刘光伟,朱慧,等. 带剪力键的 GFRP-混凝土空心箱型组合板受力性能试验研究[J]. 公路交通科技, 2019, 36(7): 67-76.
HUANG H L, LIU G W, ZHU H, et al. Experimental study on the mechanical performance of GFRP-concrete hollow box composite slab with shear key[J]. Highway Transportation Science and Technology, 2019, 36(7): 67-76.
- [10] 肖波,陈强,刘圣贤,等. 竹筋实木组合板小变形阶段受弯性能试验研究[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2018, 27(6): 13-16.
XIAO B, CHEN Q, LIU S X, et al. Experimental study on the flexural properties of bamboo-reinforced solid wood composite panels at small deformation stages[J]. Journal of Hunan City University (Natural Science Edition), 2018, 27(6): 13-16.
- [11] 折雄雄,陈隽. 大跨度楼盖振动舒适度研究综述[J]. 结构工程师, 2009, 25(6): 148-153.
SHE X X, CHEN J. A review of research on vibration comfort of long-span floors[J]. Structural Engineer, 2009, 25(6): 148-153.

(本文编校 张 鹏、姜 征)