

木塑增强组合梁抗弯性能研究

席飞^{*1}, 赵龙龙², 孙友富³

(1.南京财经大学艺术设计学院, 南京 210023; 2.南京林业大学土木工程学院, 南京 210000; 3.南京林业大学材料科学与工程学院, 南京 210037)

摘 要: 木塑增强组合梁(A-WPC)是在热轧铝板表面与木塑复合材料共同挤出所形成的新型建筑构件, 为研究其抗弯性能, 设计了3种不同跨度的组合梁, 对其进行四点受弯性能试验, 获得并分析了各组试件的破坏模式、屈服荷载、抗弯承载力、强度利用率, 变形能力及应变分布。结果表明: 当跨高比较小时, A-WPC在受压侧率先发生褶皱破坏, 当跨高比较大时, A-WPC在受拉侧率先发生变形, 并产生裂痕; 跨高比为12的试件相较于跨高比为18的试件, 平均极限荷载高66.75%, 破坏时的平均挠度低38.03%; 跨高比为6的试件相较于跨高比为12的试件, 平均极限荷载高65.97%, 破坏时的平均挠度低43.86%。在强度利用率方面, A-WPC增强组合梁比各类工程木梁的强度利用率增长了8.71%-9.26%, 比各类胶合木梁的强度利用率增长了3.46%-8.61%。在此基础上, 本文提出了A-WPC抗弯承载力计算方法。通过计算和试验结果的分析表明, A-WPC增强组合梁具有良好的抗弯性能, 是较优的组合设计方案。

关键词: 木塑复合材料; 组合梁; 抗弯性能; 增强设计; 承载力计算

引言

木塑复合材料(WPC)在美国ASTM标准中的定义为: “一种主要由木材或纤维素为基础材料与塑料(也可以是多种塑料)制成的复合材料^[1]。由于WPC既具有木材的质感和环保性, 又具备塑料的耐久性和可重复加工性, 因此, WPC的制造与使用既可以提升木质废弃物利用率、缓解日益紧张的森林资源, 又可以提高废旧塑料回收率、减轻环境污染, 是一种新兴的绿色装饰材料。

目前, 市场上常见的木塑复合材料, 其力学性能无法满足建筑结构材料的要求, 需进行增强处理。现有的增强方式, 主要从木塑复合材料自身的物理和化学性能改性入手, 如Jyoti Sankar Borah等人总结了诸如PE、PP、PVC等热塑性塑料与改性木纤维结合所形成的复合材料在力学性能优化上的最新进展^[2-3], M. Khalid等人利用油棕空果束纤维与油棕纤维素对聚丙烯木塑复合材料机械性能进行了优化^[4], Amir Nourbakhsh等人探索了玉米秸秆、芦苇秸秆和油籽秸秆与塑料复合而成的材料在拉伸性能、弯曲性能和冲击性能上的异同^[5-6], 程万里教授团队探索了不同木纤维直径和长径比对WPC密度、拉伸强度、弯曲强度和模量等物理性能的影响^[7], 曹金珍教授团队针对木粉组分中的纤维素、半纤维素、木质素以及抽提物对WPC材料力学性能的影响进行了总结^[8], 胡圣飞教授团队综述了树脂纤维和植物纤维界面相容的物理方法, 以优化WPC的力学性能^[9], 宋湛谦和李大纲教授团队探索了纳米纤维素不同预处理方法对改性后的WPC微观形态和力学特性的影响^[10]。

现有研究均局限于提升材料自身的力学强度, 但其综合性能暂时无法达到商业生产级别。因此, 本研究力图将新研发的木塑-铝(A-WPC)复合增强材料应用于建筑梁架结构设计之中, 该材料通过牵引机将铝材与木塑复合材料共同挤出, 木塑复合材料附着在铝材表面, 不仅可以增加轻质铝材的力学性能, 也对其表面进行了保护和美化, 并根据使用要求, 形成不同截面尺寸和形状。从而通过木塑-铝(A-WPC)增强复合材料设计, 将木塑-铝(A-WPC)增强复合材料应用于A-WPC增强组合梁之中, 摆脱现有研究体系中只针对WPC自身力学性能进行优化的桎梏, 促进WPC在建筑结构领域中的应用。

基金项目: 江苏省自然科学基金青年项目(BK20190796), 江苏省科技计划-产学研合作项目(BY20221178), 安徽森泰木塑集团横向课题

*通讯作者: 席飞, 男, 副教授, 博士, 木结构建筑, 13914757415, 476726084@qq.com

1 试验概况

1.1 试验材料

WPC 是由安徽**公司生产，材料含量是 30%的聚烯烃、50%的木粉（木粉为 60 目）、15%的碳酸钙等组成，铝材为热轧铝板，两种材料力学性能由前期试验得到，试验结果如表 1 所示^{[11] [12]}，表中 σ_{tu} 为极限强度（Ultimate stress）， ϵ_{tu} 为极限应变（Ultimate strain）， E_t 为弹性模量（Elasticity Modulus），A 为断裂伸长率（Elongation at fracture）， ν 为泊松比（Poisson's Ratio）。

表 1. 基础材料力学性能 Tab1. Mechanical properties of materials						
		σ_{tu}/MPa	A/%	ν	E_t/GPa	$\epsilon_{tu}/\%$
木塑复合 材料	平均值	21. 29	0. 61	0. 35	6. 09	0. 0045
	方差	1. 02	0. 074	0. 016	0. 20	0. 00045
	协方差	4. 81	12. 12	4. 47	3. 30	10. 13
铝材	平均值	201. 48	12. 74	0. 35	63. 62	0. 027
	方差	5. 41	1. 49	0. 016	2. 34	0. 0023
	协方差	2. 69	11. 68	4. 52	3. 67	8. 51

1.2 试件设计

本次试验的主要目的是研究不同跨高比的 A-WPC 增强组合梁抗弯性能，其由木塑复合材料和热轧铝板共同组成：通过牵引机将铝材牵引进入模具，模具侧面放置一台木塑复合材料共挤机，在温度 160–200℃，压力 20Mpa 的情况下，实现不同截面尺寸的铝材与木塑复合材料的共同挤出，A-WPC 增强复合材料力学性能由前期试验得到，如表 2 所示^[11]。本次试验共设计了 3 组共 9 个试件，铝材截面尺寸均为 50mm×150mm，壁厚为 1.5mm，木塑复合材料的附着厚度为 2.5mm，试件长度分别为 1200mm、2100mm 和 3000mm。试件基本参数见表 3，截面形式见图 1。

表 2. A-WPC 力学性能 Tab2. Mechanical properties of A-WPC					
	σ_{tu}/MPa	A/%	ν	E_t/GPa	$\epsilon_{tu}/\%$
平均力学性能	84. 070	6. 17	0. 35	24. 51	0. 017
方差	1. 80	0. 73	0. 019	0. 83	0. 0015
协方差	2. 14	11. 82	5. 33	3. 40	8. 8

表 3. 试件设计 Tab.3 Design of specimens								
组号	编号	数量	跨度 (mm)	截面高度 (mm)	跨高比	截面宽度 (mm)	壁厚 (mm)	木塑复合材料 厚度 (mm)
1	1-1, 1- 2, 1-3	3	900	150	6	50	1. 5	2. 5
2	2-1, 2- 2, 2-3	3	1800	150	12	50	1. 5	2. 5
3	3-1, 3- 2, 3-3	3	2700	150	18	50	1. 5	2. 5

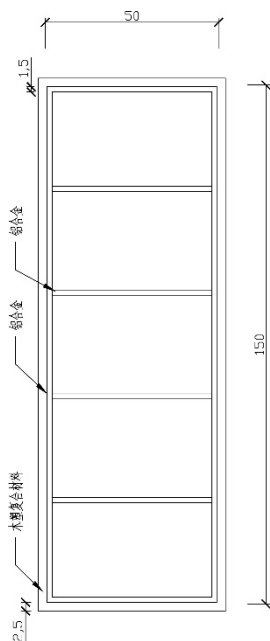


图 1 试件截面形式 (mm)

Fig.1 Cross-section configuration of the specimens(mm)

1.3 加载与测量方案

本试验在南京林业大学土木工程试验中心进行，用多功能加载系统通过分配梁在试件的三分点处对称加载试件，并在试件两端设置铰支座。全程由多功能试验机进行位移控制，加载速率为 3mm/min，达到极限荷载后，继续由位移控制加载，直到荷载下降至极限荷载的 85%以下，停止试验。

为了记录加载全过程试件的变形和应力应变情况，分别在跨中位置布置位移计 1 个，在底面、顶面各粘贴应变片 1 片，跨中侧面粘贴应变片 5 片，重点关注跨中界面的应力应变分布规律，具体加载及布置情况见图 2。荷载、位移以及应变数据均通过动态数据采集仪同步记录。

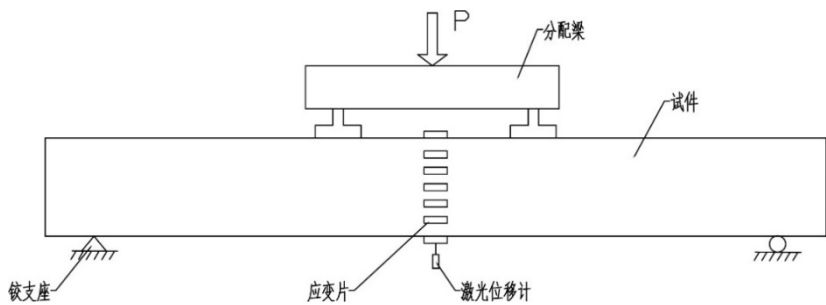


图 2 试验加载与测量装置

Fig.2 Test set-up and instrumentation set-up

2 试验结果及分析

2.1 试验现象及破坏形态

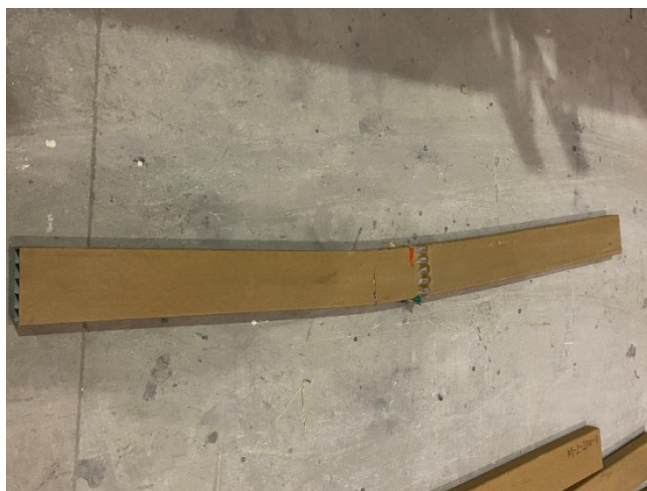
在加载的初始阶段，A-WPC 增强组合梁基本处于弹性状态，此阶段试验梁受压和受拉区域均未出现裂痕，各试件跨中位移较小；随着荷载逐步接近极限荷载时，试验梁跨中受压区达到屈服荷载，出现褶皱变形，跨中位移增大，各试件进入弹塑性变形阶段；当试验梁受压区变形加快，跨中位移进一步加大，超过各试件极限强度时，试件顶部或底部受压或受拉破坏，并出现明显裂缝。

当跨高比较小时，A-WPC 增强组合梁受拉侧还未达到极限拉应变，而受压侧已超过了极限压应变并发

生褶皱破坏,但未出现明显裂痕。当跨高比较大时,A-WPC 增强组合梁受压侧先达到屈服强度,出现褶皱变形,直到受拉侧超过极限应变而发生破坏,出现明显裂缝。各跨度木塑增强组合梁破坏形态见图 3。



(a) 跨高比 6 组



(b) 跨高比 12 组



(c) 跨高比 18 组

图 3 试件破坏形态

Fig.3 Failure modes of specimens

2.2 荷载挠度曲线分析

从图 4 的荷载-挠度曲线可以看出，不同跨高比的 A-WPC 增强组合梁，其荷载-挠度曲线体现出梯度关系。跨高比在 10 以上时，加载的初始阶段试件处于弹性阶段，荷载-挠度曲线呈线性变化；随后当达到屈服荷载时，试件受压区出现褶皱变形，试件进入塑形变形阶段，荷载-挠度曲线呈非线性变化；最终当加载到极限荷载时，受拉区超过极限应变，而受压区仍处于塑形变形阶段，试件底部的拉断破坏要早于顶部的压屈破坏，组合梁弯曲塑性破坏。但跨高比越小，极限荷载越大，破坏时的变形越小，如跨高比为 12 的试件相较于跨高比为 18 的试件，平均极限荷载高 66.75%，破坏时的平均挠度低 38.03%。

跨高比在 10 以下时，自加载开始至极限荷载 90%左右，试件受拉侧和受压侧均处于弹性阶段，荷载-挠度曲线呈线性变化，且斜率较大；其后至极限荷载阶段，由于受拉区尚未达到受拉极限，而受压区达到受压极限，试件顶部的压屈破坏早于底部的拉断破坏，受压区屈服的过程，使试件进入弹塑性阶段，刚度明显减小，挠度增加较大，荷载-挠度曲线呈非线性变化；跨高比为 6 的试件相较于跨高比为 12 的试件，平均极限荷载高 66.05%，破坏时的平均挠度低 49.05%。

根据 GB 50005—2017《木结构设计标准》^[13]的规定，梁跨中挠度设计限值应小于 1/250，因此，本次试验的三种高跨比 A-WPC 增强组合梁的挠度设计值分别为 3.6mm、7.2mm 和 10.8mm。而通过图 4 的荷载-挠度曲线可以看出，此挠度设计值所对应的曲线均为线性增长阶段，即处于试件的弹性变形阶段，根据结构承载极限状态下的破坏不应早于正常使用极限状态下破坏的设计原则，三种高跨比的 A-WPC 增强组合梁均符合强度设计要求。并且，跨高比为 6 时，挠度设计值所对应荷载与极限荷载的比值，即该构件的强度利用率为 37.58%，跨高比为 12 时，强度利用率为 28.23%；跨高比为 18 时，强度利用率为 24.74%，而其与同样跨度的其他种类工程木梁的强度利用率对比见表 4，通过对于表 4 的分析发现，A-WPC 增强组合梁的强度利用率高于大多数工程木梁的强度利用率，是一种性能良好的组合结构构件。

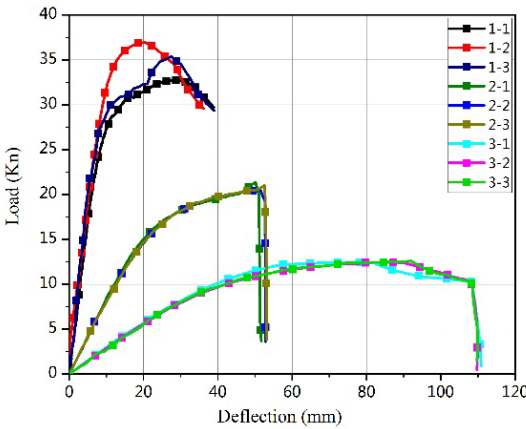


图 4 试件荷载-挠度曲线

Fig.4 Load-deflection curves of specimens

表 4. 强度利用率对比	
Tab4. Strength utilization comparison	
工程木梁种类	强度利用率
A-WPC	24.74%
云杉木梁	15.48% ^[14] (9.26) 跨高比 19.2
樟子松木梁	16.03% ^[15] (8.71) 跨高比 19.2
杨木胶合梁	16.13% ^[15] (8.61) 跨高比 19.2
杨木 LVL	18.9% ^[15] 跨高比 19.2
重组竹胶合梁	20.67% ^[16] 跨高比 21
云杉重组竹胶合梁	21.28% ^[16] (3.46) 跨高比 21
云杉胶合梁	32% ^[16] 跨高比 21

落叶松木梁	26.79% ^[17] 跨高比 15
水杉木梁	29.65% ^[18] 跨高比 15

2.2 荷载-应变分析

各组 A-WPC 增强组合梁的跨中荷载-应变, 由按梁的高度平均分布的应变片测得, 负应变区域为组合梁受压区, 正应变区域为组合梁受拉区。从图 5 选择的各跨度典型梁跨中荷载-应变图中可以看出, 各跨度梁在加载初始阶段的受压应变和受拉应变, 均随荷载的增加呈线性上升; 而后随着试件受压侧达到屈服应变, 发生变形, 试件进入塑形变形阶段, 曲线出现向外偏移的趋势, 在荷载增加较慢的情况下, 应变增加较快, 曲线呈非线性变化, 并且此变化延续至试件受拉侧或受压侧达到极限应变, 试件发生破坏。而各组梁的拉应变和压应变基本呈对称分布, 在达到极限荷载时, 跨高比为 6 的梁, 其顶层极限压应变为 8.937×10^3 , 底层极限拉应变为 10.912×10^3 ; 跨高比为 12 的梁, 其顶层极限压应变为 8.842×10^3 , 底层极限拉应变为 8.975×10^3 ; 跨高比为 18 的梁, 其顶层极限压应变为 5.457×10^3 , 底层极限拉应变为 5.736×10^3 。即跨高比越小, 极限荷载越大, 破坏时所对应的应变越大。

并且, 经分析发现, 不同跨高比的组合梁, 在承受相同荷载时, 其跨高比越小, 所对应的拉应变和压应变值越小, 即跨高比与梁的刚度呈反向相关关系。

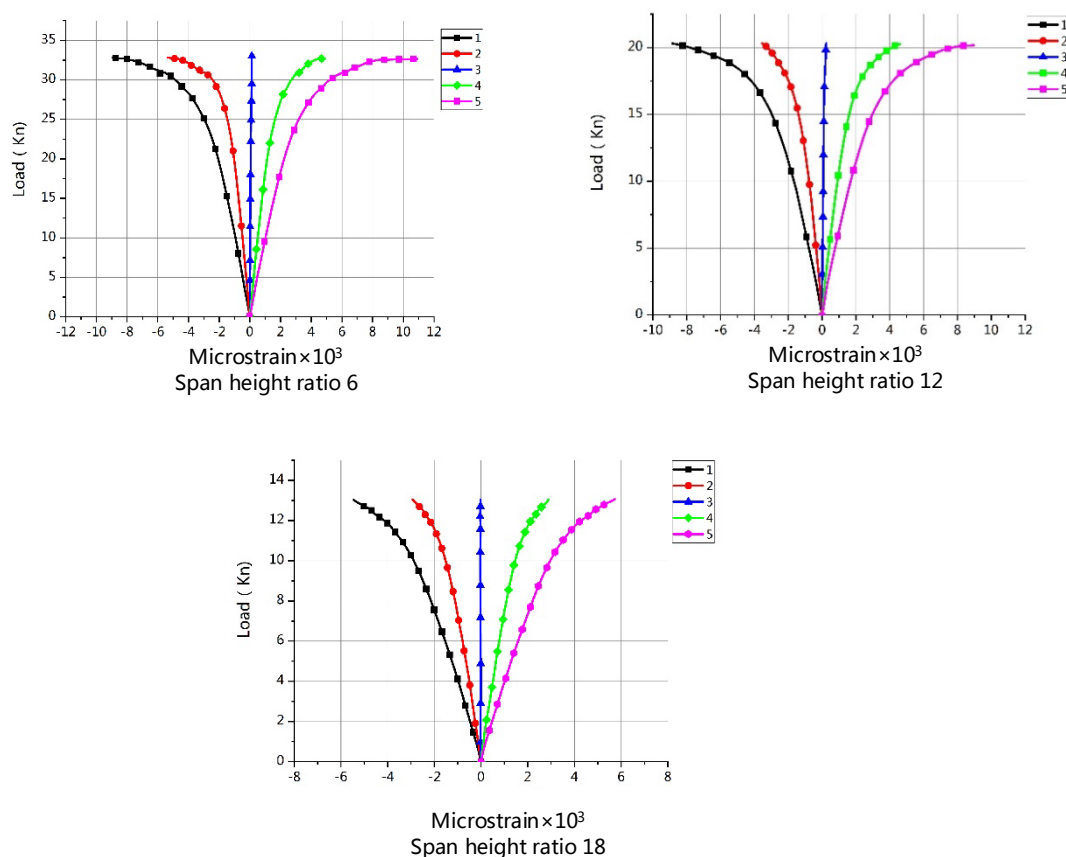


图 5 典型荷载-应变曲线

Fig.5 Typical load-strain curve for different beam of span height ratio

2.3 平截面假定分析

通过沿梁高度截面平均分布的应变片, 分别测得各跨度 A-WPC 增强组合梁典型试件在各级荷载下的应变分布, 得到跨中截面高度-应变关系曲线, 见图 6。从图中可以看出, 在各级荷载作用下的各跨度梁跨中截面高度-应变曲线近似保持线性, 测点应变沿截面高度的变化规律基本符合平截面假定。在加载的初始阶段, 组合梁跨中截面高度方向的应变较小, 变化规律符合平截面假定; 而当荷载逐步增大, 组合梁的拉应变和压应变呈三角形对称分布, 跨中截面高度-应变曲线呈线性状态, 其变化规律仍符合平截面假定; 随

着荷载的进一步增加直至试件破坏,跨度较大的试件受压区增大,受拉区减小,中性轴向受拉侧轻微移动,但整体上跨中截面高度-应变曲线仍呈线性状态,变化规律符合平截面假定。综上所述,各跨度木塑增强组合梁在计算时,可采用平截面假定进行计算。

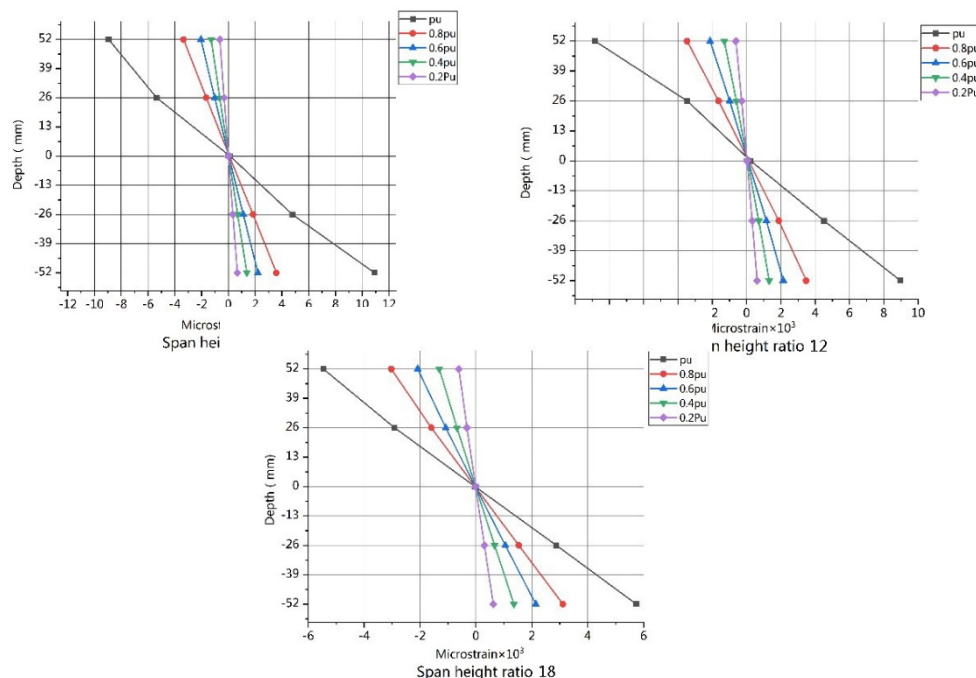


图6 典型跨中截面高度-应变曲线

Fig.6 Typical strain profile for different beam of span height ratio

3 受弯承载力计算

3.1A-WPC 受弯构件的弹性模量应按式计算:

A-WPC 拉伸过程中, WPC 与铝材两种材料满足变性协调条件, 试验全过程两种材料没有发生滑移, 具有良好的整体性能, 因此可以运用等效刚度法来计算 A-WPC 的弹性模量^[11], 如式(1.1)所示。前期试验也已证明利用等效刚度法计算与试验结果相比, 处于误差允许范围之内, 其等效过程如图7, 先将 A-WPC 空心组合梁(7a)等效成两种材料的工字梁(7b), 再通过式1.1进行刚度等效, 得到(7c)的均一材料的工字梁, 最后简化成(7d)的简图进行计算^[20-22]:

$$E = \frac{E_W A_W + E_A A_A}{A_W + A_A} \quad (1.1)$$

E_W ——WPC 的弹性模量;

E_A ——热轧铝板的弹性模量;

A_W ——WPC 的截面面积;

A_A ——热轧铝板的截面面积;

E ——等效弹性模量, 计算结果为 34.39GPa;

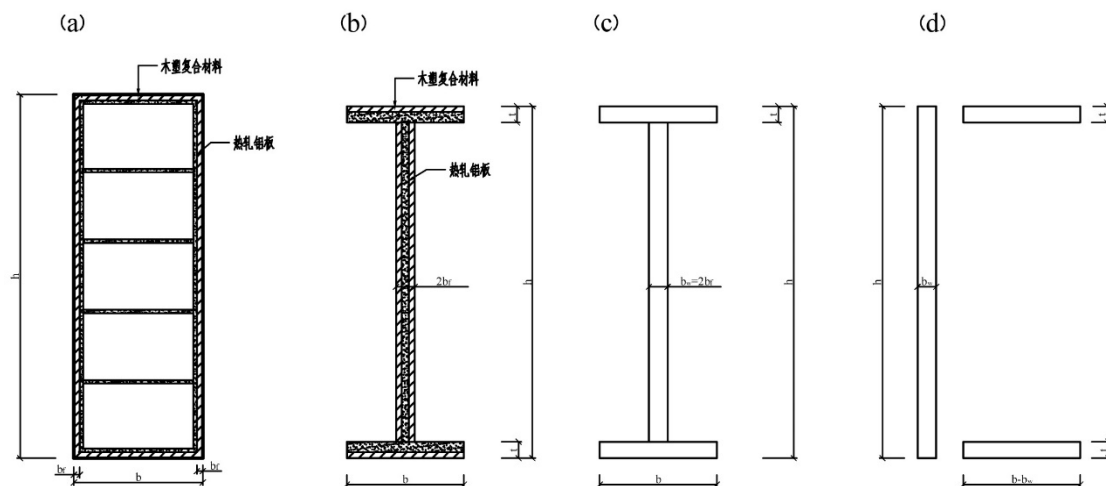


图7 等效刚度过程

Fig.7 Equivalent stiffness process

3.2 首先进行强度验算，计算构件的极限，计算公式如下：

$$\frac{M}{\gamma W} \leq f \quad (1.2)$$

M ——构件所受的弯矩；

W ——构件截面的弹性抗弯模量；

f ——材料强度设计值；

γ ——截面塑形发展系数，这里取 0.95；

3.3 然后对构件整体稳定性验算，A-WPC 受弯构件的弯扭整体稳定性应按式计算：

$$\frac{M}{\varphi_b Z} \leq f \quad (1.3)$$

M ——构件所受的弯矩；

f ——材料强度设计值；

φ_b ——铝合金受弯构件整体稳定系数，按第 3.4 条计算；

Z ——构件截面的塑性截面模量，按下式计算：

$$Z = 2bt \left(\frac{h}{2} - \frac{t}{2} \right) + b_w \left(\frac{h}{2} \right)^2 \quad (1.4)$$

3.4 A-WPC 受弯构件的整体稳定系数应按式计算：

$$\varphi_b = \frac{1}{2\bar{\lambda}} \left[\left(\frac{1}{\bar{\lambda}^2} + 1 + \varepsilon_0 \right) - \sqrt{\left(\frac{1}{\bar{\lambda}^2} + 1 + \varepsilon_0 \right)^2 - 4\bar{\lambda}} \right] \quad (1.5)$$

$\bar{\lambda}$ ——受弯构件的正规化长细比，按第 3.5 条计算；

ε_0 ——受弯构件的等效缺陷,按下式计算: $\varepsilon_0 = a \bar{\lambda}^2 + b \bar{\lambda} + c, a=-0.22, b=0.42, c=-0.2$

3.5 A-WPC 受弯构件的正则化长细比 $\bar{\lambda}$ 应按下式计算:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{M_p/M_{cr}} \quad (1.6)$$

M_p ——构件截面的塑性铰弯矩, $M_p = Z f_{0.2}$;

M_{cr} ——受弯构件的弹性 m 临界弯矩,应按第 3.6 条计算;

3.6 设截面的弯曲轴为 x-x 轴,则 A-WPC 受弯构件弹性临界弯矩应按下式计算:

$$M_{cr} = \beta_1 \frac{\pi^2 E I_y}{l_y^2} [\beta_2 a + \beta_3 \beta_y + \sqrt{(\beta_2 a + \beta_3 \beta_y)^2 + \frac{I_w}{I_y}}] (1 + \frac{G I_k}{\pi^2 E}) \quad (1.7)$$

I_y ——截面弯曲平面外的惯性矩,按下式计算:

$$I_y = \frac{b_w h^3}{12} + \frac{2(b - b_w)t^3}{12} + \frac{(h - t)^2}{2}(b - b_w)t \quad (1.8)$$

I_w ——截面的翘曲常数,按下式计算:

$$I_w = \frac{I_1 I_2}{I_y} h^2 \quad (1.9)$$

$$I_1 = I_2 = \frac{2(b - b_w)t^3}{12} + \frac{(h - t)^2}{2}(b - b_w)t \quad (1.10)$$

I_k ——截面的扭转常数,按下式计算:

$$I_k = \frac{1.2}{3} [2(b - b_w)t^2 + b_w h^2] \quad (1.11)$$

l_y ——构件平面外计算长度,可取侧向支撑点之间的距离;

l_w ——构件的扭转屈曲计算长度,可根据构件两端的边界条件确定;

β_y ——截面绕 x 轴的不对称截面常数,按下式计算;当截面对称时, $\beta_y = 0$;

$$\beta_y = \frac{\int A y (x^2 + y^2) dA}{2 I_x} - y_0 \quad (1.12)$$

a ——荷载作用点到剪心的距离,位于剪心之上取正值,位于剪心以下取负值;

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ ——和荷载和边界条件有关的系数,分别为 1.046, 0.43, 0.57;

G ——剪切模量,按下式计算 (μ 为泊松比,为 0.35):

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (1.13)$$

通过对于上述计算公式计算结果的分析,当以强度设计为标准, A-WPC 的极限弯矩计算值为 10.32kN.m, 当以整体稳定性为标准, A-WPC 的极限弯矩计算值为 6.47kN.m, 并且, 由于试验均为整体失稳破坏, 强度并未完全利用, 因此进行计算结果分析时, 使用稳定性计算更加准确。而试验结果中, 跨高比为 6 的 A-WPC 受弯构件, 极限弯矩平均值为 6.14 kN.m, 与计算结果相比误差率为 5.1%; 跨高比为 12 的 A-WPC 受弯构件, 极限弯矩平均值为 6.87 kN.m, 与计算结果相比误差率为 6.18%; 跨高比为 18 的 A-WPC 受弯构件, 极限弯矩平均值为 5.98kN.m, 与计算结果相比误差率为 6.96%。综上所述, A-WPC 的受弯承载力计算结果与试验结果处于误差允许范围之内, 计算公式可以很好的预测 A-WPC 的受弯承载力。

4 结论

(1) A-WPC 增强组合梁在跨高比较小时,总是在受压侧率先发生褶皱破坏,当跨高比较大时,A-WPC 总是在受拉侧率先发生变形,并产生裂痕。

(2)跨高比为 12 的试件相较于跨高比为 18 的试件,平均极限荷载高 66.75%,破坏时的平均挠度低 38.03%;跨高比为 6 的试件相较于跨高比为 12 的试件,平均极限荷载高 66.05%,破坏时的平均挠度低 49.05%。

(3)在强度利用率方面,A-WPC 增强组合梁比各类工程木梁的强度利用率增长了 8.71%~9.26%,比各类胶合木梁的强度利用率增长了 3.46%~8.61%,是力学性能较优的构件。

(4)不同跨高比的组合梁,其跨高比越小,极限荷载越大,破坏时所对应的应变越大;在承受相同荷载时,其跨高比越小,所对应的拉应变和压应变值越小,即跨高比与梁的刚度呈反向相关关系。

(5)A-WPC 木塑增强组合梁在破坏前,其跨中截面高度-应变曲线呈线性状态,变化规律符合平截面假定。

(6)运用等效刚度原理建立了 A-WPC 抗弯承载力计算公式模型,与试验结果相比误差率在允许范围之内,准确的预测了试验结果。

参考文献

- [1]ASTM D7031-2011-Evaluating Mechanical and Physical Properties of Wood-Plastic Composite Products[S].
- [2]Jyoti Sankar Borah, Dae Su Kim. Recent development in thermoplastic/wood composites and nanocomposites: A review[J]. Korean Journal of Chemical Engineering,2016,33(11): 3035-3049.
- [3]Taneli Väisänen, Antti Haapala, Reijo Lappalainen, et al. Utilization of agricultural and forest industry waste and residues in natural fiber-polymer composites: A review[J]. Waste Management,2016,54(08): 62-73.
- [4]M. Khalid, C.T. Ratnam, T.G. Chuah, et al. Comparative study of polypropylene composites reinforced with oil palm empty fruit bunch fiber and oil palm derived cellulose [J]. Materials and Design,2008,29(01): 173-178.
- [5]Amir Nourbakhsh, Alireza Ashori. Wood plastic composites from agro-waste materials: Analysis of mechanical properties[J].Construction and Building Materials,2010,101(07): 2525-2528.
- [6]H.Mohit, V.Arul Mozhi Selvan. A comprehensive review on surface modification, structure interface and bonding mechanism of plant cellulose fiber reinforced polymer based composites[J]. Composite Interfaces,2018,25(05-07): 629-667.
- [7]高珣,程万里,王海刚,等. 杨木纤维几何形态对木塑复合材料性能的影响[J]. 东北林业大学学报,2014 (02): 100-103.
- [8]刘如,曹金珍,彭尧,等. 木粉组分对木塑复合材料性能的影响研究进展[J]. 化工进展,2014 (08): 2072-2082.
- [9]赵敏,胡圣飞,张冲,等. 木塑复合材料界面改性研究进展[J]. 化工时刊,2009 (08): 47-51.
- [10]李晶晶,宋湛谦,李大纲,等. 纳米纤维素增强木塑复合材料的性能研究[J]. 林产化学与工业,2015 (10): 15-21.
- [11]Longlong Zhao, Fei Xi, Xiaorui Wang. Mechanical performance of aluminum reinforced wood plastic composites under axial tension: An experimental and numerical investigation[J]. Journal of Wood Science,2021,67(09): 1-8.
- [12]Longlong Zhao, Fei Xi, Xiaorui Wang. Calculation model for uniaxial stress-strain relationship of wood plastic composites[J]. Polymer Composites,2021,42(09): 1-8.
- [13]GB50005—2017 木结构设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [14]马建勋,蒋湘闽,胡平,等. 碳纤维布加固木梁抗弯性能的试验研究[J]. 工业建筑,2005 (08): 35-39.
- [15]刘伟庆,杨会峰. 工程木梁的受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2008 (02): 90-95.
- [16]冷予冰,许清风,王明谦. 胶合竹木梁抗弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2019 (07): 89-99.
- [17]尚 澎,孙友富. 小跨高比空心胶合木梁抗弯性能研究[J]. 林产工业,2020 (12): 8-15+25.
- [18]王全凤,李飞,陈浩军,等. GFRP 加固木梁抗弯性能的试验研究与理论分析[J]. 建筑结构,2010 (05): 50-52+107.