

硅酸钙-聚氨酯夹芯板的抗弯性能

查晓雄, 唐智荣, 冯琳

(哈尔滨工业大学 深圳研究生院, 518055 广东 深圳)

摘要: 为研究非金属面夹芯板受弯破坏时的力学性能,考虑芯材剪切变形的影响,利用力与变形的平衡微分关系,推导并简化在均布荷载和集中荷载作用下单跨简支夹芯板的弯曲变形与承载力计算公式.通过真空加载和沙袋堆载分别对硅酸钙-聚氨酯夹芯板进行了两组弯曲试验,并用软件 ABAQUS 进行了有限元模拟,分别得到其正常使用极限状态和承载能力极限状态时的变形和破坏荷载,以及相应的荷载-位移曲线.结果表明,理论计算简化公式、试验结果和有限元结果三者吻合较好,因而该理论简化公式可用于计算这种非金属面夹芯板的弯曲变形和承载力.

关键词: 硅酸钙面板;聚氨酯芯材;夹芯板;抗弯性能;弯曲变形

中图分类号: TU502+.6

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2014)06-0001-07

Bending properties of sandwich panels with calcium-silicate faces and polyurethane cores

ZHA Xiaoxiong, TANG Zhirong, FENG Lin

(Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, 518055 Shenzhen, Guangdong, China)

Abstract: To study on mechanical properties of non-metal faced sandwich panels under bending load, the force-deformation relationships of differential equations were used to derive and simplify deformation calculate formulas and bearing capacity calculate formulas of the single-span simply supported sandwich panels under uniformly distributed load and concentrated load, considering the influence of the shear deformation of core. Bending properties of two groups of sandwich panels with calcium-silicate (CS) faces and polyurethane (PU) cores were tested through vacuum chamber loading and sandbag loading and they were analyzed through the finite element methods (FEM) with software ABAQUS. Bending deflection and bending bearing capacity of sandwich panels in serviceability limit states and bearing capacity limit states are got separately and the corresponding load-displacement curves are drew. The results show that the theoretical calculation results are identical to the experimental results and FEM results. It is concluded that the simplified formulas can be used to calculate accurately bending deflection and bending bearing capacity of non-metal faced sandwich panels.

Keywords: calcium-silicate (CS) faces; polyurethane (PU) cores; sandwich panels; bending properties; bending deflection

夹芯板由于具有保温节能、轻质高强和安装快捷等优点,已广泛应用于临时房屋、工业厂房和组合房屋等建筑围护结构^[1].近年来,一些夹芯板在受到强风、暴雪等荷载时容易发生破坏,造成人员伤亡和财产损失,需要进一步研究其力学性能和破坏机理.美国材料与试验协会(ASTM)提出了

夹芯板的弯曲测试标准^[2],我国在此标准基础上也提出了夹层结构弯曲性能试验方法^[3].前人对金属面夹芯板的抗弯性能做了较多研究^[4-8],但对非金属面夹芯板的抗弯性能研究较少,我国也缺少相应的非金属面夹芯板设计标准.目前非金属面夹芯板抗弯性能的研究对象主要是以木制面板为主的结构绝缘板(SIPs)^[9-12].美国工程木材协会(APA)提供的胶木复合夹芯板设计和制造标准^[13]可用于非金属面夹芯板的设计参考,但此

收稿日期: 2013-11-26.

作者简介: 查晓雄(1968—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 查晓雄, zhaxx@hit.edu.cn.

标准没有考虑面板材料较厚时面板自身抗弯刚度的影响,也不能用于两层面板材料不同时的夹芯板设计。

硅酸钙-聚氨酯夹芯板是近年来出现的一种新型非金属面夹芯板,其面板材料采用防火、防潮、耐久性好的硅酸钙板,而芯材采用隔热保温性能优异的聚氨酯泡沫材料。本文针对这种非金属面夹芯板的抗弯性能,分别提出了单跨简支夹芯板在均布荷载与集中荷载作用下的变形和承载力简化计算方法,并用两组试验以及有限元模拟进行验证,研究结果可以为这种非金属面夹芯板的设计提供参考依据。

1 理论分析

假定面板与芯材粘结牢固,且变形协调,其弯曲应力沿每层截面高度的分布为一条连续的直线。如图1和图2所示,将弯曲应力和弯曲刚度分为三部分。由于芯材的弹性模量一般远小于面板的弹性模量,所以第③部分的弯曲刚度在计算中不予考虑。第①、②部分对应的弯曲刚度分别为:

$$B_1 = E_1 I_{11} + E_2 I_{22}, \quad (1)$$

$$B_2 = E_1 I_1 + E_2 I_2.$$

式中: B_1 、 B_2 分别为第①、②部分的弯曲刚度; E_1 、 E_2 分别为上、下层面板的弹性模量; I_{11} 、 I_{22} 分别为第①部分上、下层面板对自身中性轴的惯性矩; I_1 、 I_2 分别为第②部分上、下层面板对整体夹芯板截面中性轴的惯性矩。

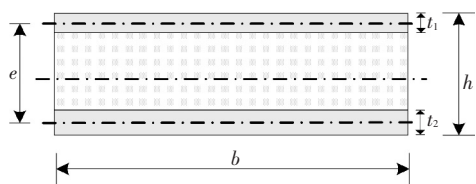


图1 夹芯板的横截面

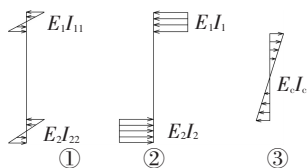


图2 横截面弯曲应力与弯曲刚度分布

1.1 弯曲变形理论分析

1.1.1 均布荷载作用下的变形计算公式

简支夹芯板受到均布荷载作用时的情况见图3,令变形位置参数 $\xi = x/L = 0.5$,结合边界条件及力的作用方式,得到跨中变形计算公式^[4]:

$$f = \frac{qL^4 b}{B} \left(\frac{5}{384} + \frac{1}{8ik^2} - \frac{\cosh(k/2) - 1}{ik^4 \cosh(k/2)} \right), \quad (2)$$

$$i = \frac{B_1}{B_2}, j = \frac{B_2}{AGL^2}, k^2 = \frac{1+i}{ij}. \quad (3)$$

式中: f 为跨中变形, b 为截面宽度, L 为夹芯板计算长度, q 为均布荷载, B 为夹芯板总刚度, i 、 j 、 k 为计算参数, G 为等效芯材剪切模量, A 为芯材截面积。

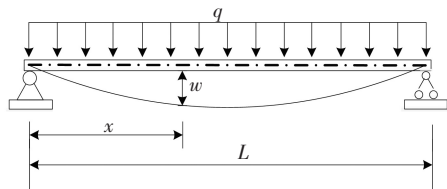


图3 均布荷载作用下的简支夹芯板

1.1.2 集中荷载作用下的变形计算公式

集中荷载作用下两端简支夹芯板情况见图4,令荷载位置参数 $\varepsilon = \xi = x/L = 0.5$,可求得当集中荷载 F 作用于跨中时此处的变形^[4]:

$$f = \frac{FL^3 b}{B} \left(\frac{1}{48} + \frac{1}{4ik^2} - \frac{1}{ik^3} \frac{\sinh(k/2) \sinh(k/2)}{\sinh k} \right). \quad (4)$$

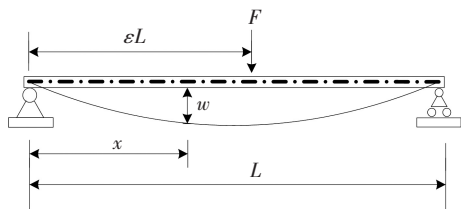


图4 集中荷载作用下的简支夹芯板

1.2 抗弯承载力理论分析

1.2.1 均布荷载作用下的抗弯承载力

当受到均布面荷载作用时,令 $\xi = 0.5$,第①部分、第②部分对应的跨中弯矩分别为^[4]

$$\begin{cases} M_1 = \frac{qL^2 ib}{1+i} \left[\frac{1}{8} + \frac{\cosh(k/2) - 1}{ik^2 \cosh(k/2)} \right], \\ M_2 = \frac{qL^2 b}{1+i} \left[\frac{1}{8} - \frac{\cosh(k/2) - 1}{k^2 \cosh(k/2)} \right]. \end{cases} \quad (5)$$

夹芯板的抗弯承载力主要取决于下层面板的极限抗拉强度,下层面板的最大拉应力满足:

$$\sigma_{F_2} = \frac{M_2}{eA_{F_2}} + \frac{B_{F_2}}{B_1} \frac{M_1}{W_{F_2}} \leq [\sigma]. \quad (6)$$

式中: σ_{F_2} 为下层面板最大拉应力; $[\sigma]$ 为下层面板抗拉强度; A_{F_2} 为层面板横截面积; W_{F_2} 为下层面板惯性系数, $W_{F_2} = \frac{2I_{F_2}}{t_2}$, t_2 为下面层厚度; B_{F_2} 为下层面板刚度。

将式(5)代入式(6)得均布荷载作用下的承

载力为

$$q_{cr} = \frac{[\sigma]}{\frac{bL^2}{eA_{F2}}[\alpha - \beta] + \frac{bL^2}{W_{F2}}[\alpha i + \beta] \frac{B_{F2}}{B_1}}, \quad (7)$$
$$\alpha = \frac{1}{8(1+i)}, \beta = \frac{(e^{\frac{k}{2}} + e^{-\frac{k}{2}})/2 - 1}{(1+i)k^2(e^{\frac{k}{2}} + e^{-\frac{k}{2}})/2}. \quad (8)$$

1.2.2 集中荷载作用下的抗弯承载力

同理,跨中集中荷载作用下的承载力为

$$F_{cr} = \frac{[\sigma]}{\frac{bL}{eA_{F2}}[\alpha' - \beta'] + \frac{bL}{W_{F2}}[\alpha' i + \beta'] \frac{B_{F2}}{B_1}}, \quad (9)$$
$$\alpha' = \frac{1}{4(1+i)}, \beta' = \frac{(e^{\frac{k}{2}} - e^{-\frac{k}{2}})/2}{(1+i)k(e^{\frac{k}{2}} + e^{-\frac{k}{2}})}. \quad (10)$$

1.3 抗弯承载力简化计算公式

1.3.1 双层面板材料与厚度均相同时抗弯承载力简化计算公式

在实际工程中,夹芯板的两侧通常采用同种材料和相同厚度的面板,因而考虑简化计算,以便于实际应用.由于式(2)、(4)、(7)和式(9)计算较复杂,本文首先简化分析相同厚度面板的计算参数值.

若面板采用相同材料,且厚度都为 t , 面板中性轴间的距离为 e , 则式(3)和式(8)中的参数可

简化:

$$\alpha = \frac{1}{8(1+i)}, i = \frac{t^2}{3e^2}, k^2 = (1+i) \frac{6GeL^2}{E_1 t^3}. \quad (11)$$

芯材厚度分别取 90 mm 和 100 mm,夹芯板长度 L 分别取 1 200 mm 和 2 400 mm,芯材剪切模量 G 取 2.4 MPa,改变面板厚度 t ,得到参数 α 和 k 的值如图 5 所示,可得

$$\alpha \approx \frac{1}{8}, \beta \approx \frac{1}{k^2}, \alpha' \approx \frac{1}{4}, \beta' \approx \frac{1}{2k}. \quad (12)$$

取面板的厚度都为 t ,则

$$A_{F2} = bt, \frac{B_{F2}}{B_1} = \frac{1}{2}. \quad (13)$$

将式(12)和式(13)代入式(7)得均布荷载作用下的抗弯承载力简化计算公式为

$$q_{cr} = \frac{[\sigma]}{\frac{L^2}{8et} + \frac{L^2}{8e^2} + \frac{E_1 t}{2eG}}. \quad (14)$$

其中 α 和 β 的简化值偏大,使得式(14)右侧计算值偏小,则 q_{cr} 的计算值偏小,简化计算公式偏于安全.

同理,跨中集中荷载作用下的抗弯承载力简化计算公式为

$$F_{cr} = \frac{[\sigma]}{\frac{L}{4et} + \frac{L}{4e^2} + \sqrt{\frac{3E_1 t}{8eG}}}. \quad (15)$$

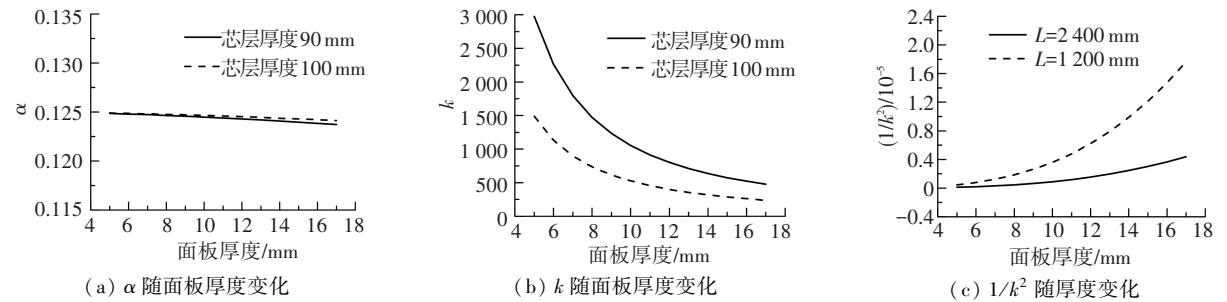


图 5 参数随面板厚度变化

1.3.2 双层面板材料与厚度均不相同抗弯承载力简化计算公式

当双层面板材料和厚度均不相同时,根据上述简化方法可得:

均布荷载作用下抗弯承载力简化计算公式为

$$q_{cr} = \frac{[\sigma]}{\frac{L^2(\alpha - \beta)}{et_2} + \frac{6L^2E_2t_2(\alpha i + \beta)}{E_1t_1^3 + E_2t_2^3}}, \quad (16)$$

集中荷载作用下的抗弯承载力简化计算公式为

$$i = \frac{(E_1bt_1^3 + E_2bt_2^3)/12}{E_1t_1E_2t_2e^2/(E_1t_1 + E_2t_2)},$$
$$k^2 = \frac{(1+i)eGL^2}{(E_1t_1^3 + E_2t_2^3)/12}, \quad (17)$$
$$\alpha = \frac{1}{8}, \beta = \frac{1}{k^2}.$$

$$F_{cr} = \frac{[\sigma]}{\frac{L(\alpha' - \beta')}{et_2} + \frac{6LE_2t_2(\alpha'i + \beta')}{E_1t_1^3 + E_2t_2^3}}, \quad (18)$$

$$\alpha' = \frac{1}{4}, \beta' = \frac{1}{2k}. \quad (19)$$

1.4 弯曲变形简化计算公式

1.4.1 双层面板材料和厚度均相同时的弯曲变形简化计算公式

为进行简化计算,将式(2)和式(4)中的参数进行简化:

$$\frac{\cosh(k/2) - 1}{\cosh(k/2)} \approx 1, \quad (20)$$

$$\frac{\sinh(k/2) \sinh(k/2)}{\sinh k} \approx \frac{1}{2}. \quad (21)$$

将式(20)代入式(2),得均布荷载作用下的跨中变形简化计算公式为

$$f = \frac{qL^4b}{B} \left(\frac{5}{384} + \frac{eE_1t}{16GL^2} \right), \quad (22)$$

将式(21)代入式(4),集中荷载作用下的跨中变形简化计算公式为

$$f = \frac{FL^3b}{B} \left(\frac{1}{48} + \frac{eE_1t}{8GL^2} \right). \quad (23)$$

式中总刚度 $B = \frac{E_1bt^3}{6} + \frac{E_1bte^2}{2}.$

式(17)、(20)和式(21)简化值偏大,使得式(22)和式(23)变形计算值偏小,简化计算公式偏于不安全.

1.4.2 双层面板材料和厚度不相同时的弯曲变形简化计算公式

同样利用上面的简化方法得到:

均布荷载作用下的跨中变形简化计算公式为

$$f = \frac{qL^4b}{B} \left(\frac{5}{384} + \frac{1}{8ik^2} - \frac{1}{ik^4} \right), \quad (24)$$

集中荷载作用下的跨中变形简化计算公式为

$$f = \frac{FL^3b}{B} \left(\frac{1}{48} + \frac{1}{4ik^2} - \frac{1}{2ik^3} \right). \quad (25)$$

式中: t_1 、 t_2 分别为上、下面板的厚度;总刚度 $B = (E_1bt_1^3 + E_2bt_2^3)/12 + E_1t_1E_2t_2e^2/(E_1t_1 + E_2t_2).$

2 试验研究

2.1 硅酸钙面板材料力学试验

如图 6 所示,为了测得硅酸钙面板的弹性模量及抗拉强度,用沙袋在跨中加载,测量跨中变形及破坏荷载,反算出硅酸钙板的弹性模量及板底边缘的抗拉强度.3 个面板试件的试验结果见表 1,相应的荷载-位移曲线见图 7.取表 1 中的破坏荷载计算出硅酸钙板抗拉强度 $\sigma_{cs} = 6.90 \text{ MPa}.$

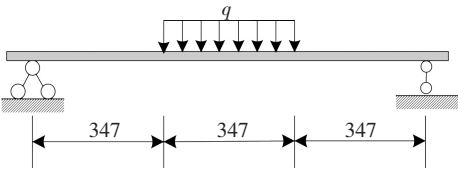


图 6 硅酸钙面板的加载

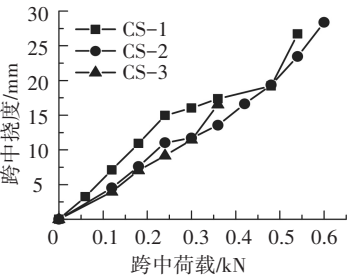


图 7 硅酸钙面板荷载-跨中变形曲线

表 1 硅酸钙面板的材料力学试验结果

试件编号	长度/mm	宽度/mm	厚度/mm	沙袋总重/kN		跨中变形/mm	
				单个	均值	单个	均值
CS-1				0.48		26.70	
CS-2	1 220	1 220	8	0.54	0.46	23.45	22.22
CS-3				0.36		16.51	

由图 7 可知,试件 CS-1 在荷载为 0.25 kN 左右时存在折线段,其原因是由于沙袋加载的过程中,存在一定的冲击力,因此计算弹性模量应取加载时跨中变形比较稳定时的弹性阶段的试验数据.试件 CS-3 的跨中最大变形与平均值相差大于 30%,在计算弹性模量时,去掉这组试验数据,取前两个试件的数据,最终计算得到弹性模量 $E_{cs} = 7\,875.30 \text{ MPa}.$

经试验测得聚氨酯芯材的密度 $\rho_{pu} = 42.50 \text{ kg/m}^3$,由文献[7]的公式 $E_{pu} = 4.24 \times (\rho/38)^2$ 和 $G_{pu} = 1.92 \times (\rho/38)^2$,可计算得到聚氨酯的弹性模量 E_{pu} 为 5.30 MPa,剪切模量 G_{pu} 为 2.40 MPa.

2.2 硅酸钙夹芯板弯曲试验

本次弯曲试验采用总厚度为 100 mm 的夹芯板,其面板均为 8 mm 厚硅酸钙板,中间填充 84 mm

厚聚氨酯泡沫. 为模拟风荷载、雪荷载等均布荷载以及集中荷载, 分别对 A 组试件采用了真空均布加载(图 8)和对 B 组试件采用了沙袋堆载(图 9)两种加载方式. 如图 8 所示, 将 A 组夹芯板放置于真空槽中, 在其上覆盖并密封塑料薄膜. 将抽气泵与真空槽用管道连接, 通过控制管道阀门来控制气压大小, 并通过真空压力表读出相应的压强数值. 对 B 组夹芯板的跨中进行沙袋集中加载, 荷载采用分级施加, 当读数稳定后进行下一级加载. 当接近极限荷载时, 减小加载幅值, 加载至试件破坏.

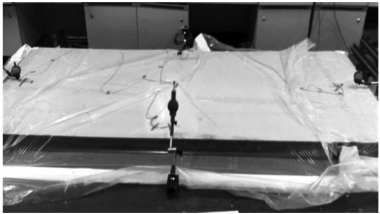


图 8 真空均布加载装置



图 9 沙袋跨中加载装置

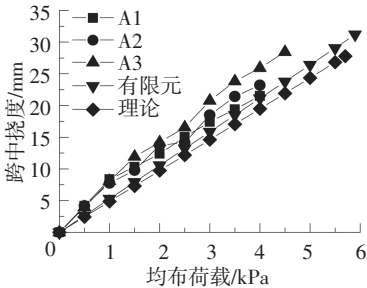
为观察夹芯板跨中部位的变形发展情况和获得各级荷载作用下试件的变形数值, 在夹芯板跨中位置的两侧各布置一个百分表, 并在两端支座处各放置一个千分表, 同时采用 DH3816 静态应变采集箱进行应变数据采集.

2.3 试验现象及破坏形态分析

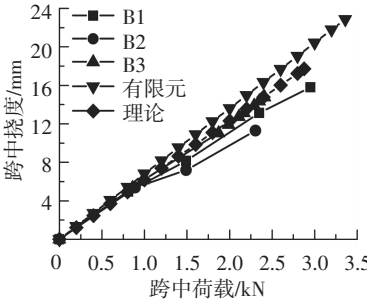
A 组和 B 组试件的变形起初都随着荷载的增大而增大, 当荷载增加到一定程度时, 跨中处的下

面板因达到抗拉强度而突然断裂, 且裂纹在芯材层迅速向上扩展, 导致上面板不能单独承受荷载而发生断裂, 最终整块夹芯板被完全破坏.

如图 10 所示, 在未破坏以前, 试件的荷载-跨中变形曲线近似为一条直线, 说明板在破坏前处于弹性状态. 参照夹芯板欧洲标准^[14]和中国标准^[15], 试件的跨中最大变形不应超过板跨长度的 1/200, 即跨中最大变形 $f \leq L/200$, 此时即为硅酸钙夹芯板的正常使用状态. 随着荷载的增加, 底部硅酸钙板被拉断, 此状态为承载能力极限状态. 各试件在变形达到 $L/200$ 时的荷载和最终破坏荷载见表 2、3.



(a) A 组试件



(b) B 组试件

图 10 理论、试验与有限元的结果对比

表 2 硅酸钙-聚氨酯夹芯板真空均布加载试验结果

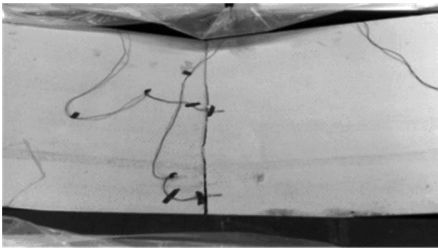
试验组	试件编号	总长/mm	总宽/mm	$f = L/200$ 时的荷载/kPa		破坏荷载/kPa	
				试验值	试验平均值	试验值	试验平均值
A	A1	2 400	1 000	2.50		4.00	
	A2			2.75	2.33	4.00	4.10
	A3			1.75		4.30	

表 3 硅酸钙-聚氨酯夹芯板跨中集中加载试验结果

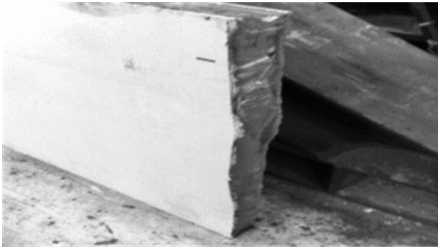
试验组	试件编号	总长/mm	总宽/mm	$f = L/200$ 时的荷载/kN		破坏荷载/kN	
				试验值	试验平均值	试验值	试验平均值
B	B1	1 400	600	1.10		2.95	
	B2			1.24	1.11	2.35	2.57
	B3			0.98		2.41	

对于 A 组试件,变形起初随荷载的增加而增大,面板没有任何破坏迹象,当变形达到 $L/200$ 时,荷载约为 2.5 kPa.继续加压,当荷载达到 4 kPa 左右时,试件破坏,如图 11 所示,断裂面位于跨度中部,即弯矩最大处.表 2 中试件 A3 在跨中变形为 $L/200$ 的荷载与同组试件 A1 和 A2 相差 30% 左右,其误差原因可能是由于硅酸钙板是以水泥为基体材料,配以增强纤维组合而成,而水泥固化和增强纤维分布都有一定离散随机性,导致 A3 夹芯板存在初始内部缺陷,因而其力学性能受到影响.

对于表 3 中 B 组试件,试件底部硅酸钙板最终同样因受拉应力而破坏,如图 12 所示,断裂面也位于跨度中部.



(a) 跨中断裂



(b) 断裂横截面

图 11 A 组试件跨中破坏

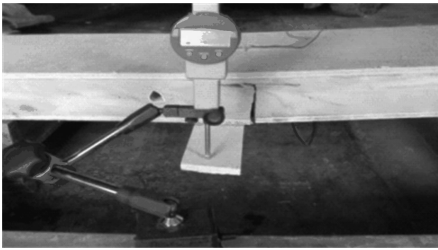
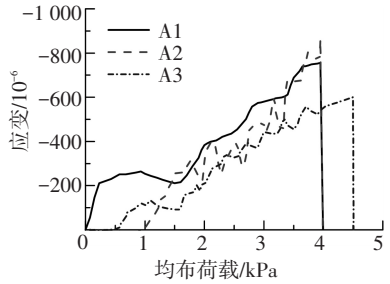
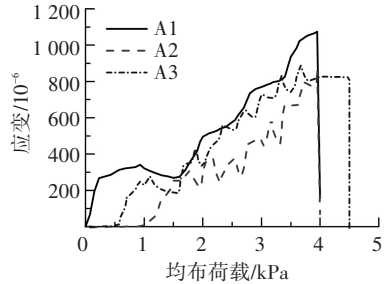


图 12 B 组试件跨中破坏

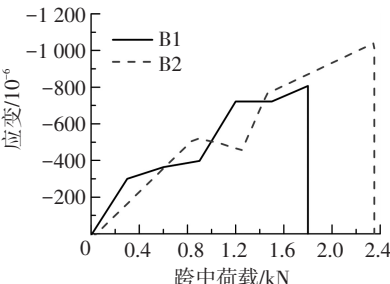
在跨中的面板上、下部均布置应变片,测量结果见图 13,从应变的变化曲线来看,A 组试件下面板最大应变为 900×10^{-6} 左右.B 组试件下面板的最大应变为 $1\,200 \times 10^{-6}$ 左右.A 组硅酸钙夹芯板的荷载-应变曲线起初有凹凸段是因为真空加载刚开始的时候,压力较小,难以控制,等到压力增大稳定后,应变随荷载变化逐渐趋于平稳.



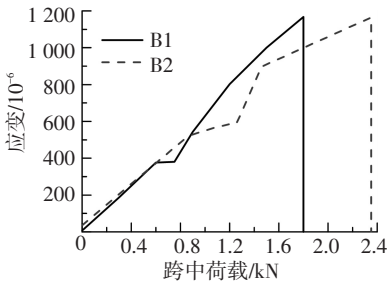
(a) A 组试件上表面



(b) A 组试件下表面



(c) B 组试件上表面



(d) B 组试件下表面

图 13 夹芯板试验的荷载-应变曲线

3 有限元分析

使用 ABAQUS 软件建模时,面板和芯材都采用八节点线性减缩积分三维实体单元(C3D8R).根据 2.1 节的试验结果,取硅酸钙面板的拉伸强度为 6.90 MPa,弹性模量为 7 875.3 MPa,聚氨酯芯材的弹性模量为 5.30 MPa,剪切模量为 2.40 MPa.硅酸钙面板与聚氨酯芯材之间采用 Tie 约束,并在夹芯板模型的两侧施加简支约束.在分析步中,根据试验加载方式对夹芯板分别施加均布荷载和跨中集中荷载,相应的荷载-位移曲线见图 10.

为验证夹芯板理论计算简化公式的准确性,运用前文推导的理论简化公式分别计算硅酸钙夹芯板在均布荷载和集中荷载作用下的变形和承载力,并将理论计算结果与试验结果及有限元结果进行对比.如表 2 和图 10(a) 所示,当跨中变形为 $L/200$ 时, A 组夹芯板有限元模拟值为 2.18 kPa,理论计算值为 2.37 kPa,二者比值为 0.92,而试验平均值与理论值之比为 0.98,误差均较小.如表 3 和图 10(b) 所示,此时的 B 组夹芯板有限元模拟值为 0.96 kN,理论计算值为 1.06 kN,二者比值为 0.91,而试验平均值与理论值之比为 1.05,误差也都较小.综上所述,理论值、试验值和有限元值三者吻合良好.

4 结 论

- 1) 推导了单跨简支硅酸钙-聚氨酯夹芯板分别在均布荷载和集中荷载作用下的弯曲变形和承载力理论计算公式,并对理论公式进行简化处理.
- 2) 进行了两组硅酸钙-聚氨酯夹芯板弯曲试验,发现夹芯板首先达到跨中变形限值 $L/200$,最后因跨中的下部面板达到抗拉强度而突然断裂,导致夹芯板整体失效,属于脆性破坏.
- 3) 将理论简化计算公式与弯曲试验及有限元模拟进行对比验证,三者结果吻合良好,说明该理论简化计算公式合理,可以用来计算这种非金属面夹芯板的弯曲变形及承载力.

参考文献

[1] 查晓雄. 建筑用绝热夹芯板结构——金属面和非金属面[M]. 北京: 科学出版社, 2011.

[2] ASTM C393—00 Standard test method for flexural properties of sandwich constructions[S]. United States: ASTM International, 2000.

[3] GB/T 1456—2005 夹层结构弯曲性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.

[4] DAVIES J M. Lightweight sandwich construction[M]. London: Blackwell Science Ltd., 2001.

[5] 王海忠, 何保康. 建筑夹芯板结构性能分析[J]. 钢结构, 1999, 14(4): 41-45.

[6] 宋新武, 查晓雄. 建筑用绝热金属面夹芯板抗弯承载力的试验研究[J]. 工业建筑, 2011, 41(3): 9-15.

[7] 秦培成. 金属面夹芯板抗弯性能的理论及试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

[8] ALLEN H G. Analysis and design of structural sandwich panels[M]. London: Pergamon Press, 1969.

[9] PLANTEMA F J. Sandwich construction: the bending and buckling of sandwich beams, plates and shells[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1966.

[10] MORLEY M. Building with structural insulated panels (SIPs): strength and energy efficiency through structural panel construction[M]. Newtown: The Taunton Press, 2000.

[11] ALWIN H Z. Development of method to analyze structural insulated panels under transverse loading[D]. Washington: Washington State University, 2002.

[12] KAWASAKI T, ZHANG M, WANG Q, et al. Elastic module and stiffness optimization in four-point bending of wood-based sandwich panel for use as structural insulated walls and floors[J]. Journal of Wood Science, 2006, 52(4): 302-310.

[13] Plywood Design Specification Supplement 4: Design and fabrication of plywood sandwich panels[S]. Tacoma: APA-The Engineered Wood Association, 1990.

[14] European Recommendations for Sandwich Panels Part 1: Design[S]. EUR.: ECCS&CIB, 2001.

[15] GB/T 23932—2009 建筑用金属面绝热夹芯板[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

(编辑 赵丽莹)