



## 工程水泥基复合材料与发泡式聚苯乙烯保温板的界面粘结性能

李雨珊 尹世平 徐世娘 侯向明 王宇清 李传秀

### **Bonding properties of the interface between engineering cementitious composite and expanded polystyrene insulation board**

LI Yushan, YIN Shiping, XU Shilang, HOU Xiangming, WANG Yuqing, LI Chuanxiu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220215.002>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### CFRP-钢界面粘结性能试验与数值模拟

Experimental study and numerical simulation for bond behavior of interface between CFRP and steel

复合材料学报. 2018, 35(12): 3534–3546 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180316.001>

#### 负泊松比三明治结构填充泡沫混凝土的面内压缩性能

In-plane compression properties of negative Poisson's ratio sandwich structure filled with foam concrete

复合材料学报. 2020, 37(8): 2005–2014 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191207.001>

#### 缝线对缝合增强三明治结构(陶瓷-气凝胶-陶瓷)热防护结构静力特性的影响

Effect of stitches on static characteristics of stitched reinforced sandwich structure (ceramic–aerogel–ceramic) thermal protection structure

复合材料学报. 2020, 37(2): 432–441 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190516.001>

#### 全GFRP筋混凝土电缆排管的抗剪承载力

Shear bearing capacity of concrete cable duct reinforced with GFRP bars

复合材料学报. 2018, 35(12): 3331–3341 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180206.001>

#### 不同纤维掺量下聚乙烯醇纤维增强工程水泥复合材料梁剪切韧性试验

Experimental study on shear toughness of polyvinyl alcohol fiber reinforced engineered cementitious composite beams with different fiber contents

复合材料学报. 2019, 36(8): 1968–1976 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20181108.006>

#### CFRP增强工程水泥基复合材料桥面连接板的结构和性能

Structural performance of CFRP reinforced ECC link slabs in jointless bridge decks

复合材料学报. 2019, 36(4): 848–859 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180522.001>

# 工程水泥基复合材料与发泡式聚苯乙烯 保温板的界面粘结性能



分享本文

李雨珊<sup>1</sup>, 尹世平<sup>\*1,2</sup>, 徐世烺<sup>3</sup>, 侯向明<sup>4</sup>, 王宇清<sup>3</sup>, 李传秀<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 江苏省土木工程环境灾变与结构可靠性重点实验室, 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 徐州 221116; 3. 浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310058; 4. 山西五建集团有限公司, 太原 030013)

**摘要:** 随着国家对节能减排的倡导, 因建筑围护结构隔热性能不足导致的建筑高能耗问题日益突出。对此, 采用一种以工程水泥基复合材料 (Engineered cementitious composites, ECC) 为面层、发泡式聚苯乙烯 (EPS) 板为保温层的夹芯 (Sandwich) 结构墙体来改善围护结构的隔热性能。这种结构不仅能够有效降低能量的耗散, 还具有良好的变形和控制裂缝的能力。然而, 界面粘结性能是决定其能否充分发挥各自材料优势并满足使用要求的重要前提。于是, 对夹芯结构进行了双面剪切试验, 研究了制作方式、保温层厚度、有无连接件及插入连接件的角度对 ECC 面层与 EPS 保温层界面粘结性能的影响。试验结果表明, EPS 预制试件的粘结性能最差, 并且其极限荷载的平均值仅为现浇试件的 1/4。保温层厚度越大, 试件的粘结性能则越差。连接件的加入有助于提高试件的承载能力和界面粘结性能, 其中嵌入 45°连接件的试件的增强效果最明显。同时, 通过对各试件韧性指数的分析发现, 有连接件的试件的韧性均较好, 无连接件且保温层厚度为 50 mm 的试件在试验后期也具有较好的界面间粘结性能。此外, 还基于 Teixeira 的分析理论推导了试件的抗剪承载力公式, 并与试验结果进行对比, 结果表明该计算公式可以用于预测试件的抗剪承载力。

**关键词:** 夹芯结构; ECC; EPS; 界面粘结性能; 韧性指数; 抗剪承载力

中图分类号: TU528.58 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2022)11-5251-13

## Bonding properties of the interface between engineering cementitious composite and expanded polystyrene insulation board

LI Yushan<sup>1</sup>, YIN Shiping<sup>\*1,2</sup>, XU Shilang<sup>3</sup>, HOU Xiangming<sup>4</sup>, WANG Yuqing<sup>3</sup>, LI Chuanxiu<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Impact and Structural Safety in Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 4. Shanxi Wujian Group CO. LTD., Taiyuan 030013, China)

**Abstract:** Nowadays, with the national advocacy of energy conservation and emission reduction, the problem of high energy consumption of buildings caused by insufficient thermal insulation performance of building envelopes has become increasingly prominent. In this regard, a sandwich structure wall with engineered cementitious composites (ECC) as the surface layer and expanded polystyrene (EPS) board as the insulation layer was adopted to improve the thermal insulation performance of the enclosure structure. It can not only effectively reduce energy dissipation, but also have excellent deformation and crack control ability. However, the bonding performance is an important prerequisite to determine whether it can give full play to the advantages of its own materials and meet the use requirements. Therefore, a double-sided shear test was carried out on the sandwich structure. The effects of the

收稿日期: 2021-11-23; 修回日期: 2022-01-15; 录用日期: 2022-01-30; 网络首发时间: 2022-02-15 16:29:30

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220215.002>

基金项目: 徐州市重点研发计划(产业前瞻与共性关键技术领域)(KC18106)

通信作者: 尹世平, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为新型土木工程材料 E-mail: [yinshiping2821@163.com](mailto:yinshiping2821@163.com)

引用格式: 李雨珊, 尹世平, 徐世烺, 等. 工程水泥基复合材料与发泡式聚苯乙烯保温板的界面粘结性能 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(11): 5251-5263.

LI Yushan, YIN Shiping, XU Shilang, et al. Bonding properties of the interface between engineering cementitious composite and expanded polystyrene insulation board[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(11): 5251-5263(in Chinese).

production method, the thickness of insulation layer, the presence or absence of connectors and the insertion angle of connectors on the bonding properties of interface between ECC surface layer and EPS insulation layer were studied. The test results show that the bonding performance of EPS precast specimens is the worst, and the average value of its ultimate load is only 1/4 of that of in-situ casting specimens. The greater thickness of the insulation layer, the worse bonding performance of the specimens. The addition of connectors helps to improve the bearing capacity and bonding performance of specimens, among which the strengthening effect of specimens with 45° connectors is the most obvious. At the same time, through the analysis of the toughness index, it is found that the toughness of the specimens with connectors is better, and the specimen with the insulation layer thickness of 50 mm in the specimen without connector also has good interfacial bonding performance at the later stage of the test. In addition, based on the analysis theory of Teixeira, the shear bearing capacity formula of the specimens was deduced. Comparing the calculation results with the test results, the results show that the calculation formula can be used to predict the shear bearing capacity of the specimens.

**Keywords:** sandwich structure; ECC; EPS; interface bonding performance; toughness index; shear capacity

随着经济和生活水平的提高,能源的消耗问题日益严重,尤其是建筑能耗。而在建筑能耗中,由于围护结构隔热性能的不足带来的能量消耗所占比例最大。因此,欧美国家提出了采用夹芯(Sandwich)结构墙体作为外围护结构来改善其隔热性能。该结构是将保温材料置于难燃材料中间,并使用连接件连接内外叶面层,从而形成一个集保温、装饰、隔声于一体的复合墙体结构<sup>[1-2]</sup>。

传统的夹芯结构多采用普通混凝土材料作为面层,在实际使用中易出现面层较厚、整体质量较大、开裂、脱落等现象<sup>[3]</sup>。同时,在建筑外墙保温所采用的做法中,外墙外保温是目前国内外应用最广泛、最成熟的保温形式<sup>[4]</sup>。在使用这种做法时,外面层的开裂和脱落往往会加剧保温层与建筑主体结构或饰面层之间因光照、内外温差等原因产生的不同的收缩变形,从而降低了保温材料的保温效果。然而,作为一种有着显著的多缝开裂和应变硬化特征的材料,工程水泥基复合材料(Engineered cementitious composites, ECC)不仅具有卓越的抗拉性能,其裂缝宽度还可以控制在100以下<sup>[5-6]</sup>,同时还具有良好的韧性和耐久性<sup>[7]</sup>。因此,将ECC作为夹芯结构的面层不仅可以解决传统夹芯结构面层厚度较厚、易开裂等问题,还可以解决因普通混凝土脆性带来的一系列问题。

夹芯结构的面层与保温层之间的粘结性能是决定二者能否协同工作,并充分发挥各自优势的重要因素。对此,学者们主要从保温材料种类、保温层厚度、表面处理形式及连接件的采用等方面对夹芯结构面层间的粘结性能进行了研究。Choi等<sup>[8]</sup>、Tae等<sup>[9]</sup>、Sopal<sup>[10]</sup>通过试验研究发现保温材料为挤塑式聚苯乙烯(XPS)板试件的承载

力比发泡式聚苯乙烯保温(EPS)板试件高,但EPS保温板与面层粘结性能和延性更好。宋小软等<sup>[11]</sup>对由玻璃纤维增强水泥板和不同保温材料组成的试件进行了抗剪试验研究,结果表明,聚氨酯(PUR)材料与水泥板间的界面粘结性能较好,能够满足使用要求,而XPS与水泥板间的界面粘结性能相对较差,并且不建议在试件中只将XPS与混凝土表面进行单纯的自然粘结。Hodicky等<sup>[12]</sup>通过试验研究发现,保温层厚度对界面粘结性能有很大影响,降低保温层厚度可以提高试件的界面粘结性能。高睿<sup>[13]</sup>、Kazem等<sup>[14]</sup>、Naito等<sup>[15]</sup>通过试验研究发现,在界面处设置锚钉、在保温板表面预留沟槽及提高混凝土强度都能提高试件界面间的粘结强度,其中对保温板进行表面处理的效果最佳。Jang等<sup>[16]</sup>和尹红宇等<sup>[17]</sup>对混凝土与保温层之间的界面粘结性能进行了研究发现,在混凝土表面预留沟槽可以有效提高界面间的粘结性能。Teixeira等<sup>[18]</sup>通过双面剪切试验研究了玄武岩纤维增强树脂复合材料(BFRP)筋直径和嵌入角度对试件的极限承载力和剪切刚度的影响,结果表明,增大连接件的嵌入角度和直径都能提高试件的极限荷载和刚度。

综上所述, EPS 保温板与面层的粘结性能更好,因此本文仅对 EPS 保温板进行了研究。此外,由于BFRP筋具有耐腐蚀性、轻质高强、导热性低且低碳环保等特点<sup>[19]</sup>,可用于替代普通钢筋作为夹芯结构墙板的连接件。但是,国内外只有少部分学者对采用BFRP筋作为连接件的夹芯结构的粘结性能进行了研究。同时,关于ECC作为面层、EPS作为保温层、BFRP筋作为连接件的夹芯结构的界面粘结性能研究较少,数据信息不够丰富。

因此, 本文在前人研究的基础上, 提出了将 ECC 与 EPS 相结合, 并以 BFRP 筋作为夹芯墙板连接件, 形成轻质、导热系数小、表层不易开裂的新型薄壁夹芯结构。同时, 对夹芯结构进行了双面剪切试验, 研究了制作方式、保温材料的厚度、有无连接件及其角度对 ECC 面层与保温材料间的界面粘结性能的影响, 并推导了试件的抗剪承载力计算公式。

## 1 试件设计与制备

### 1.1 原材料

试验采用 EPS 保温板的参数如表 1 所示。ECC 的配合比如表 2 所示, 该配合比下 ECC 材料

在养护 28 天后的力学性能如表 3 所示, 其中抗压试验采用  $70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm}$  的立方体试块, 拉伸试验试件的总尺寸为  $32 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$ 、中间段长为  $8 \text{ mm}$ 、宽为  $30 \text{ mm}$ , 四点弯曲试验试件的尺寸为  $400 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 。聚乙烯醇 (PVA) 短切纤维的性能参数如表 4 所示。BFRP 筋的直径及其力学性能如表 5 所示。

### 1.2 试件设计

研究了不同制作方式、不同连接件角度及不同保温材料厚度对 ECC 面层与 EPS 保温层之间界面粘结性能的影响。试验共设置 7 组, 每组试件各 3 个, 共 21 个试件, 试件的具体尺寸、配筋情况及制作方法如图 1 和表 6 所示。

表 1 发泡式聚苯乙烯 (EPS) 性能参数

Table 1 Performance parameters of the expanded polystyrene (EPS)

Heat insulator	Thermal conductivity/(W·(m·K) <sup>-1</sup> )	Density/(kg·m <sup>-3</sup> )	Tensile strength/MPa	Compressive strength/MPa
EPS	0.039	20	0.13	0.12

表 2 工程水泥基复合材料 (ECC) 配合比

Table 2 Mix proportion of engineered cementitious composites (ECC)

Material	Cement	Fly ash	Quartz sand	Water	Water reducing agent	PVA fiber
Mix proportion	379	885	455	379	17.4	26

Note: PVA—Polyvinyl alcohol.

表 3 ECC 力学性能

Table 3 Mechanical properties of ECC

Specimen number	Compressive strength/MPa	Ultimate tensile strength/MPa	Ultimate tensile strain/%	Ultimate bending load/kN	Ultimate mid-span deflection/mm
ECC-1	57.5	8.76	3.47	0.81	21.90
ECC-2	52.2	7.12	2.63	0.83	24.62
ECC-3	49.3	6.34	3.25	0.79	21.83
Average value	53.0	7.41	3.12	0.81	22.78
Standard deviation	3.40	1.01	0.36	0.02	1.30
Coefficient of variation	0.06	0.14	0.12	0.02	0.06

表 4 聚乙烯醇 (PVA) 纤维性能参数

Table 4 Performance parameters of polyvinyl alcohol (PVA) fiber

Type	Length/mm	Diameter/mm	Tensile strength/MPa	Elastic modulus/GPa	Density/(g·cm <sup>-3</sup> )
PVA fiber	12	0.04	1 600	42	1.3

表 5 玄武岩纤维增强树脂复合材料 (BFRP) 筋的力学性能

Table 5 Mechanical properties of basalt fiber reinforced polymer (BFRP) bars

BFRP diameter/mm	Ultimate tensile strength/MPa	Elastic modulus/GPa	Percentage elongation/%
6	1 279	60.12	2.13
8	1 194	60.75	1.97
10	1 066	55.84	1.91
12	1 350	59.40	2.27

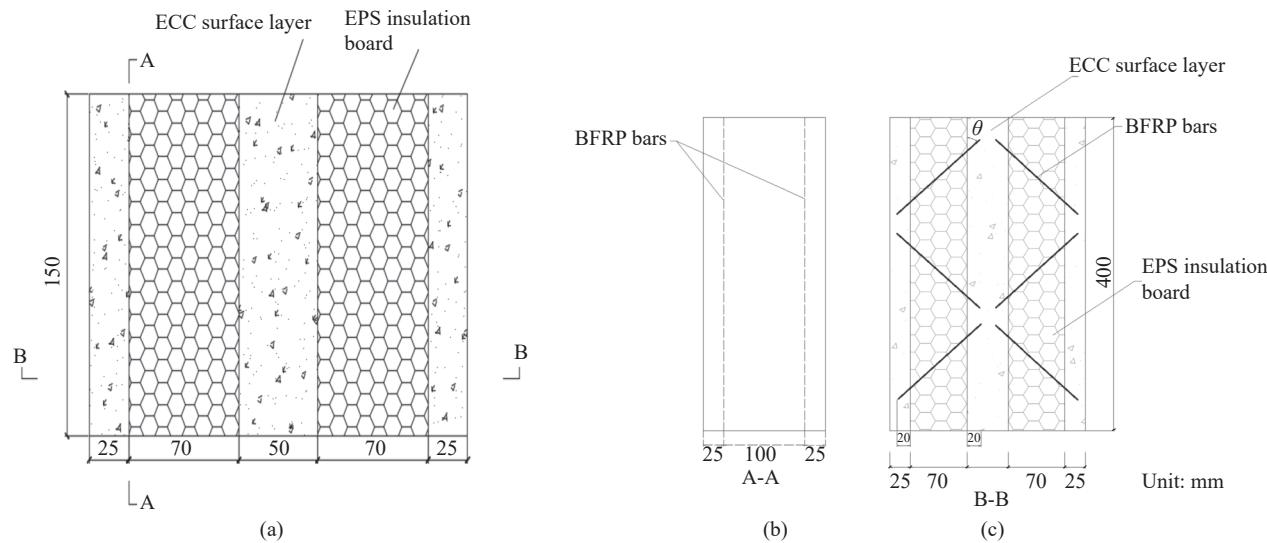


图 1 ECC-EPS 保温板双面剪切试验尺寸图

Fig. 1 Size of ECC-EPS insulation board for double-sided shear test

表 6 ECC-EPS 保温板试验分组

Table 6 Test group of ECC-EPS insulation board

Specimen number	Type of insulation material	Production method	Insulating layer thickness/mm	BFRP connector or not	Connector insertion angle/(°)
ECC(X)-EPS(70)	EPS	Cast-in-site	70	Without	-
ECC(Y)-EPS(70)	EPS	Prefabrication	70	Without	-
ECC(X)-EPS(50)	EPS	Cast-in-site	50	Without	-
ECC(X)-EPS(100)	EPS	Cast-in-site	100	Without	-
ECC(X)-EPS(70)-BFRP(90)	EPS	Cast-in-site	70	Having	90
ECC(X)-EPS(70)-BFRP(60)	EPS	Cast-in-site	70	Having	60
ECC(X)-EPS(70)-BFRP(45)	EPS	Cast-in-site	70	Having	45

Notes: In specimen number, X—Cast-in-site; Y—Prefabrication; BFRP bar insertion angle refers to the angle between the bar and the specimen in the vertical direction; Insertion depth is 20 mm<sup>[18]</sup>.

试件由三层 ECC 面板和两层 EPS 保温板交错分布而成, 分布的顺序从左往右依次为 ECC 面层(厚度为 25 mm)、EPS 保温层(厚度分别为 50 mm、70 mm、100 mm)、ECC 面层(厚度为 50 mm)、EPS 保温层(厚度与前者保温层相同)、ECC 面层(厚度为 25 mm)。在本次试验中, 由于保温层厚度的不同, 试件的总体尺寸有三种, 分别为 400 mm×200 mm×150 mm(保温层厚度为 50 mm)、400 mm×240 mm×150 mm(保温层厚度为 70 mm)、400 mm×300 mm×150 mm(保温层厚度为 100 mm)。同时, 试件中共设置有两排连接件, 其相对位置如图 1 的 A-A 剖面图所示, 每一排连接件的布置情况如图 1 的 B-B 剖面图所示。最后, 本试验中的连接件采用 BFRP 筋, 其插入 ECC 面层中的深度为 20 mm, 插入角度分别 45°、60°、90°。

试件按照 ECC 面层及制作方式、保温材料种

类及厚度、连接件类型及角度的顺序进行命名。其中, 第一项中的 ECC(X) 表示采用现浇 ECC 作为面层、ECC(Y) 表示采用预制 ECC 作为面层, 第二项中的 EPS(50)、EPS(70)、EPS(100) 分别表示采用 50 mm、70 mm、100 mm 厚的 EPS 保温层, 第三项中的 BFRP(45)、BFRP(60)、BFRP(90) 分别表示插入 BFRP 连接件的角度为 45°、60°、90°。对于无连接件的试件, 不再写出第三项的组分信息。例如, 表 6 中的 ECC(X)-EPS(70)-BFRP(45) 表示该试件的保温材料为 EPS, 制作方式为现浇, 保温层厚度为 70 mm, 含有 BFRP 连接件并且连接件角度为 45°。

### 1.3 试件制备

现浇试件的具体制作过程如下: 首先, 按照试件设计的尺寸制作木模板, 同时用切割机将 EPS 保温板切割成指定尺寸; 其次, 在保温板表

面标出连接件插入点的位置, 然后根据定位点和指定的角度将 BFRP 筋插入保温板中(无连接件的试件省去此步骤); 在连接件插入后, 将 EPS 保温板上不与 ECC 材料粘结的四个表面用透明胶带裹住; 处理完 EPS 保温板后, 在木模板内部涂抹脱模剂, 并将 EPS 保温板放入木模板中, 用小木块将 EPS 保温板按试件设计时的位置进行固定, 如图 2(a) 所示; 最后, 按照表 2 所示的配合比制备 ECC 材料, 并将其浇筑到木模板内剩余的空隙中, 浇筑完成后振捣并抹平形成完整的试件。此外, 在试件制作完成 7 天后拆除木模板, 并持续养护 28 天以保证试件达到设计强度。最终的试件成型图如图 2(b) 所示。

预制试件的具体制作过程如下: 首先, 按照 ECC 面层的设计尺寸制作木模板; 其次, 在木模板内部涂抹脱模剂, 同时按照表 2 所示的配合比制备 ECC 材料; 制备好 ECC 后将其浇筑到木模板中, 振捣并抹平; 待 ECC 面层浇筑成型 7 天后拆除模板, 并用粘结砂浆将脱模的 ECC 面层与保温材料粘结成整体, 形成预制试件; 最后需将试件养护 28 天以确保其达到设计强度。此外, 需要注意的是, EPS 保温板与 ECC 面板是直接粘结, 未使用界面粘结剂。



(a) Template diagram of specimens



(b) Specimen forming diagram

图 2 ECC-EPS 保温板制备过程

Fig. 2 Preparation process of ECC-EPS insulation board

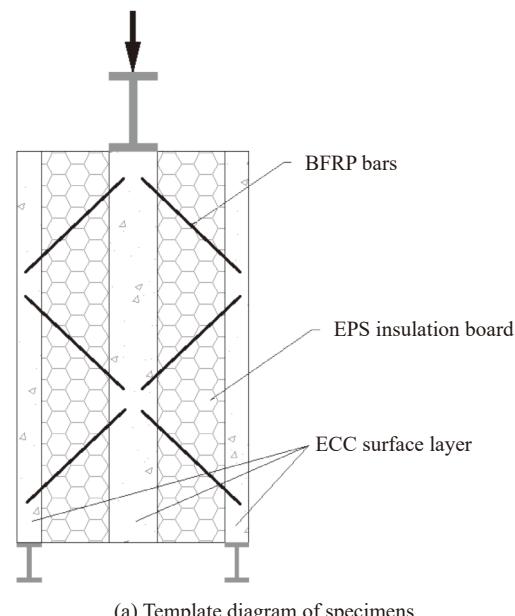
#### 1.4 试件加载设计

本试验采用双面剪切试验方法, 试验中的试件均为对称试件。这种设计与传统的剪切试验相结合, 试件推出量近似等于界面滑移量。

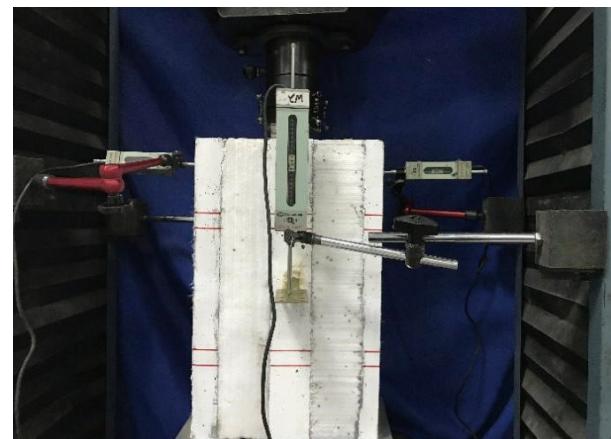
在试验过程中, 为使试件所受荷载为均匀荷载, 在中间层 ECC 的正上方放置一个尺寸为  $150\text{mm} \times 50\text{mm} \times 20\text{mm}$  的钢垫块。通过 DDL-300 电子万能试验机和钢垫块将垂直荷载施加到中间层 ECC 的顶面, 以产生穿过界面的直接剪切力。同时, 在试验机底座上面和试件底部外侧的两个 ECC 板下方分别放置钢板和高度为 8 mm 的钢垫块, 以便

双面剪切试验的正常进行, 如图 3(a) 所示。

此外, 双面剪切试验所用仪器为中国矿业大学力学教学实验室 30 吨压力机, 位移速率为 0.2 mm/min。试件中间 ECC 层前后中点及试件两侧分别放置两个量程为 100 mm 和两个量程为 30 mm 的位移计, 分别测量滑移量及偏移量。双面剪切试验示意图, 如图 3(b) 所示。



(a) Template diagram of specimens



(b) Specimen forming diagram

图 3 ECC-EPS 保温板双面剪切试验

Fig. 3 Double-sided shear test of ECC-EPS insulation board

### 2 ECC-EPS 保温板试验结果与分析

#### 2.1 ECC-EPS 保温板双面剪切试验结果

试件的界面粘结性能可通过试件的破坏模式和抗剪强度进行评价。当界面结合面积相同时, 抗剪强度由试件在加载过程中所受的荷载决定。

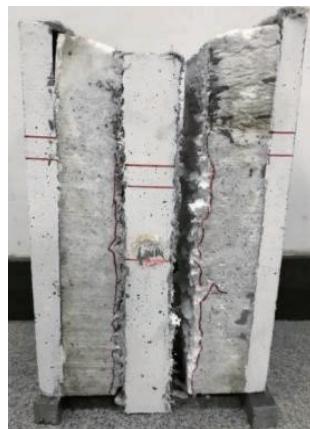
由于界面剪切应力的分布是不均匀的，并且距离加载端较近的界面的剪切应力往往会大于距离加载端较远的界面，因此在加载过程中距离加载端较近的两个界面会率先达到极限强度。于是，本试验选用中间两个界面的抗剪强度作为本次双面剪切试验的抗剪强度，其计算公式如下：

$$\tau_{\max} = P_m / 2A \quad (1)$$

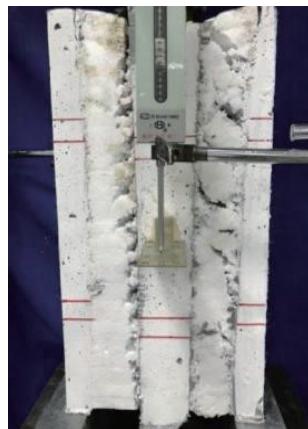
式中： $\tau_{\max}$  为试件抗剪强度 (MPa)； $P_m$  为抗剪极限荷载值 (N)； $A$  为 EPS 保温板与 ECC 面层单个结合面的面积 ( $\text{mm}^2$ )。

限荷载值 (N)； $A$  为 EPS 保温板与 ECC 面层单个结合面的面积 ( $\text{mm}^2$ )。

图 4 为 ECC-EPS 保温板破坏形态。可以看出，出现界面破坏的试件都是中间两个界面脱粘引起的，因此根据中间层 ECC 面板与保温材料粘结的两个界面会率先达到极限强度并发生破坏这一特征提出的抗剪强度计算公式，能够准确地得到试件的抗剪强度。



(a) Interfacial failure



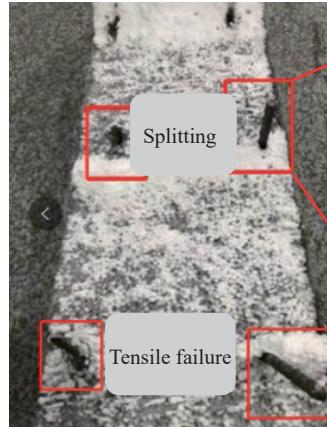
(b) Shear failure of EPS



(c) Shear failure of EPS



(d) Bending failure of ECC board



(e) Splitting, breaking and pulling out of BFRP bars

图 4 ECC-EPS 保温板破坏形态

Fig. 4 Failure mode of ECC-EPS insulation board

双面剪切试验试件的极限荷载、抗剪强度、界面滑移量及破坏模式如表 7 所示。试件的破坏模式主要分为三种：ECC 面层与 EPS 保温层界面脱粘，发生界面破坏；EPS 保温层发生剪切破坏；两侧 ECC 面层发生受弯破坏。

由表 7 可知，大部分试件的破坏模式均为界面破坏，如图 4(a) 所示，并且即使试件未发生界面破坏，其界面处仍出现部分脱粘现象。这是由

于在加载过程中，外荷载最先由 ECC 面层与 EPS 保温层之间的界面粘结作用来承担。随着荷载的增大，试件底部的中间 ECC 面层与两侧 EPS 保温层界面处开始出现裂缝，并向上延伸。对于无连接件的试件，荷载完全由界面粘结作用承担，随着荷载继续增大，裂缝迅速开展直至贯穿整个试件并发生破坏。对于采用 BFRP 筋作为连接件的试件，试件在出现裂缝后会进行内力重分布，从

表 7 ECC-EPS 保温板双面剪切试验结果  
Table 7 Results of double-sided shear test of ECC-EPS insulation board

Specimen number	Order number	Limit load/kN	Absolute deviation	Displacement/mm				Shear strength/MPa	Mode of failure
				Front displacement	Rear displacement	Average value	Absolute deviation		
ECC(X)-EPS(70)	1	7.25	0.08	15.90	15.68	15.79	0.49	0.060	Interfacial failure
	2	7.43	0.10	17.60	17.86	17.73	1.45	0.062	
	3	7.30	0.03	15.40	15.23	15.32	0.96	0.060	
	Average value	7.33	-	-	-	16.28	-	0.060	
ECC(Y)-EPS(70)	1	1.92	0.40	3.73	3.87	3.80	0.51	0.016	Interfacial failure
	2	2.87	0.55	5.73	4.20	4.97	0.66	0.024	
	3	2.18	0.14	4.35	3.95	4.15	0.16	0.018	
	Average value	2.32	-	-	-	4.31	-	0.020	
ECC(X)-EPS(50)	1	8.50	0.16	16.41	16.55	16.48	1.49	0.070	Shear failure of EPS and interfacial failure
	2	8.46	0.20	18.23	18.56	18.40	0.43	0.070	
	3	9.02	0.36	18.93	19.15	19.04	1.07	0.076	
	Average value	8.66	-	-	-	17.97	-	0.072	
ECC(X)-EPS(100)	1	6.07	0.00	13.12	15.27	14.20	1.36	0.050	Interfacial failure
	2	5.74	0.33	11.00	12.31	11.66	1.18	0.048	
	3	6.39	0.32	11.24	14.10	12.67	0.17	0.054	
	Average value	6.07	-	-	-	12.84	-	0.050	
ECC(X)-EPS(70)-BFRP(90)	1	11.13	0.45	27.75	29.33	28.54	4.52	0.092	Shear failure of EPS and BFRP bars splitting
	2	11.89	0.31	19.49	20.38	19.94	4.08	0.100	
	3	11.72	0.14	23.22	23.95	23.59	0.43	0.098	
	Average value	11.58	-	-	-	24.02	-	0.096	
ECC(X)-EPS(70)-BFRP(60)	1	20.53	1.07	12.81	13.64	13.23	0.01	0.172	Bending failure of two ECC boards on the outside
	2	20.60	1.00	11.16	10.40	10.78	2.46	0.172	
	3	23.67	2.07	15.73	15.69	15.71	2.47	0.198	
	Average value	21.60	-	-	-	13.24	-	0.181	
ECC(X)-EPS(70)-BFRP(45)	1	47.74	5.33	18.90	20.80	19.85	2.35	0.398	Interfacial failure
	2	40.60	1.81	19.26	21.30	20.28	2.78	0.338	
	3	38.90	3.51	12.67	12.05	12.36	5.14	0.324	
	Average value	42.41	-	-	-	17.50	-	0.354	

主要由界面粘结作用来承担外荷载转变为由连接件与界面粘结作用共同承担。因此破坏模式为界面破坏的情况主要发生在无连接件的试件中。

EPS 保温层剪切破坏如图 4(b)、图 4(c) 所示。这种破坏模式主要发生在无连接件且保温层厚度为 50 mm 的试件和有 90°连接件的试件中, 但是这两种试件发生破坏的原因和形态各不相同。对于无连接件且保温层厚度为 50 mm 的试件, 由于保温层厚度和刚度较小, 使 EPS 保温层随着荷载的增大产生较大的压缩变形。当试件的界面粘结

作用和荷载大于 EPS 的剪切强度时, EPS 保温层便会发生剪切破坏, 如图 4(b) 所示。而有 90°连接件的试件发生破坏的主要原因是剪切过程中中间层 ECC 面板中的 BFRP 连接件会受拉变形, 使连接件位置处的保温层出现剪切裂缝, 并且裂缝宽度随着变形的增大而增大, 直至保温层发生剪切破坏, 如图 4(c) 所示。同时, 有 90°连接件的试件在加载过程中还伴有 BFRP 连接件被拔出、拉断和劈裂现象, 这是由于连接件在承担荷载时主要依靠其自身的拉拔强度及与 ECC 之间的粘结

力,当两者不能抵抗所承受的荷载时,便会出现连接件破坏的现象,如图4(e)所示。

ECC面层受弯破坏如图4(d)所示。这种破坏模式主要发生在保温层厚度为70 mm且连接角度为60°的试件中。这是由于ECC中60°的连接件不仅能够承担竖向剪力,还能加强中间层ECC与两侧ECC面层的连接。在加载过程中,BFRP连接件的角度会随着中间层ECC位移的增大而增大。由于嵌入角度为60°的连接件与ECC面层的粘结性能较好,不会发生BFRP连接件拔出现象,因此随着连接件角度的增大,BFRP筋在水平方向的长度也增大。由于连接件与ECC面层的粘结强度大于ECC面层与EPS保温板的粘结强度,因此连接件附近的外侧ECC面层与EPS保温板会首先发生脱粘,进而该处ECC面板会随着BFRP筋水平距离的增大而向外偏移,当ECC面板的横向位移达到其极限弯曲应变时,ECC面板发生破坏。此外,由于外侧ECC面层与EPS保温层的粘结界面仍有部分未发生脱粘,因此这一部分的粘结力会约束ECC面板的弯曲变形,从而导致外侧ECC面板直接断裂。

## 2.2 ECC-EPS保温板双面剪切试验结果与分析

### 2.2.1 制作方式的影响

比较图5(a)中的荷载-滑移曲线和表7可知,制作方式的不同不仅会严重影响界面粘结强度,还会改变其破坏模式。如表7所示,现浇试件的极限承载力和抗剪强度是预制试件的2.5倍,这表明采用预制ECC面层制作夹芯结构墙体会严重降低材料的界面粘结性能。由现浇试件和预制试件的荷载-滑移曲线可以看出,二者的荷载-滑移曲线均可大致分为两部分,即上升段和下降段。在上升段,两种试件在加载初期所承受的荷载与界面滑移均呈线性关系,而后随着界面粘结作用的损失,滑移量的增量增大。在下降段,现浇试件在达到峰值荷载后荷载缓慢下降,滑移量显著增大,并且出现多条剪切裂缝,最终发生界面剪切破坏并呈现出延性破坏特征。而预制试件在达到峰值荷载后迅速发生破坏,破坏时中间层ECC面板与EPS保温板完全剥离,呈脆性破坏特征。

### 2.2.2 保温层厚度的影响

由图5(b)可以看出,EPS保温层厚度为50 mm、70 mm、100 mm试件的荷载-滑移曲线均呈现两个阶段,即线性上升阶段和缓慢下降阶段。在线性上升阶段,保温层厚度为50 mm和70 mm试件的荷载-滑移曲线基本重合,但保温层厚度为70 mm

的试件的承载能力要低于50 mm的试件,而保温层厚度为100 mm的试件的承载力更低,曲线斜率也更大。这是由于当ECC面层厚度一定时,减小保温层厚度有助于提高试件的界面剪切刚度(如表7所示,保温层厚度为50 mm的试件相较于厚度为70 mm和100 mm的试件,平均抗剪强度分别提高了20%和44%,并且厚度为70 mm的试件平均抗剪强度比厚度为100 mm的试件提高了20%),同时较大的保温层厚度还会导致试件的变形能力变差。

### 2.2.3 有无连接件的影响

由图5(c)可以看出,在荷载-滑移曲线的上升阶段,无连接件试件与连接件角度为90°的试件的斜率相近,但二者的极限承载力和抗剪强度相差很大。这是由于在加载初期,两种试件受到的荷载主要由ECC面层与EPS保温层之间的界面粘结作用承担。随着荷载的增加,无连接件试件承担荷载的方式不变,而嵌入连接件的试件承担荷载的方式从主要由界面粘结作用承担转变为由连接件和界面粘结作用共同承担。因此嵌入连接件的试件具有更高的极限承载力和抗剪强度,如表7所示,ECC(X)-EPS(70)-BFRP(90)试件的平均极限荷载值是ECC(X)-EPS(70)试件的1.6倍,平均抗剪强度提高了60.0%。在荷载滑移曲线的下降段,两种试件的承载力均逐渐降低,但是有连接件的试件承载力的下降较缓慢,并且在较长一段时间内仍保持有一定的承载力。而无连接件的试件在相对较短的时间内承载力会降至最小值。因此,连接件对与夹芯结构墙体的受力、变形等方面有着极其重要作用。

### 2.2.4 连接件角度的影响

由图5(d)可以看出,对于连接件角度为90°和60°的试件,荷载-滑移曲线可大致分为上升阶段和缓慢下降阶段,而对于连接件角度为45°的试件,荷载-滑移曲线较前者多了增强阶段。对于连接件角度为45°的试件,荷载在达到峰值后承载力仅有少量降低,并且后续还会出现承载力增强的现象。这是由于试件在承受荷载时,界面粘结作用对承载力的贡献逐渐降低,在加载后期主要由连接件来承担,因此45°的连接件在提高试件承载力方面发挥了重大作用。而由于连接件角度为60°的试件提前发生了ECC受弯破坏,其荷载-滑移曲线只有上升阶段和缓慢下降阶段两部分。对于连接件角度为90°的试件,由于连接件与ECC面

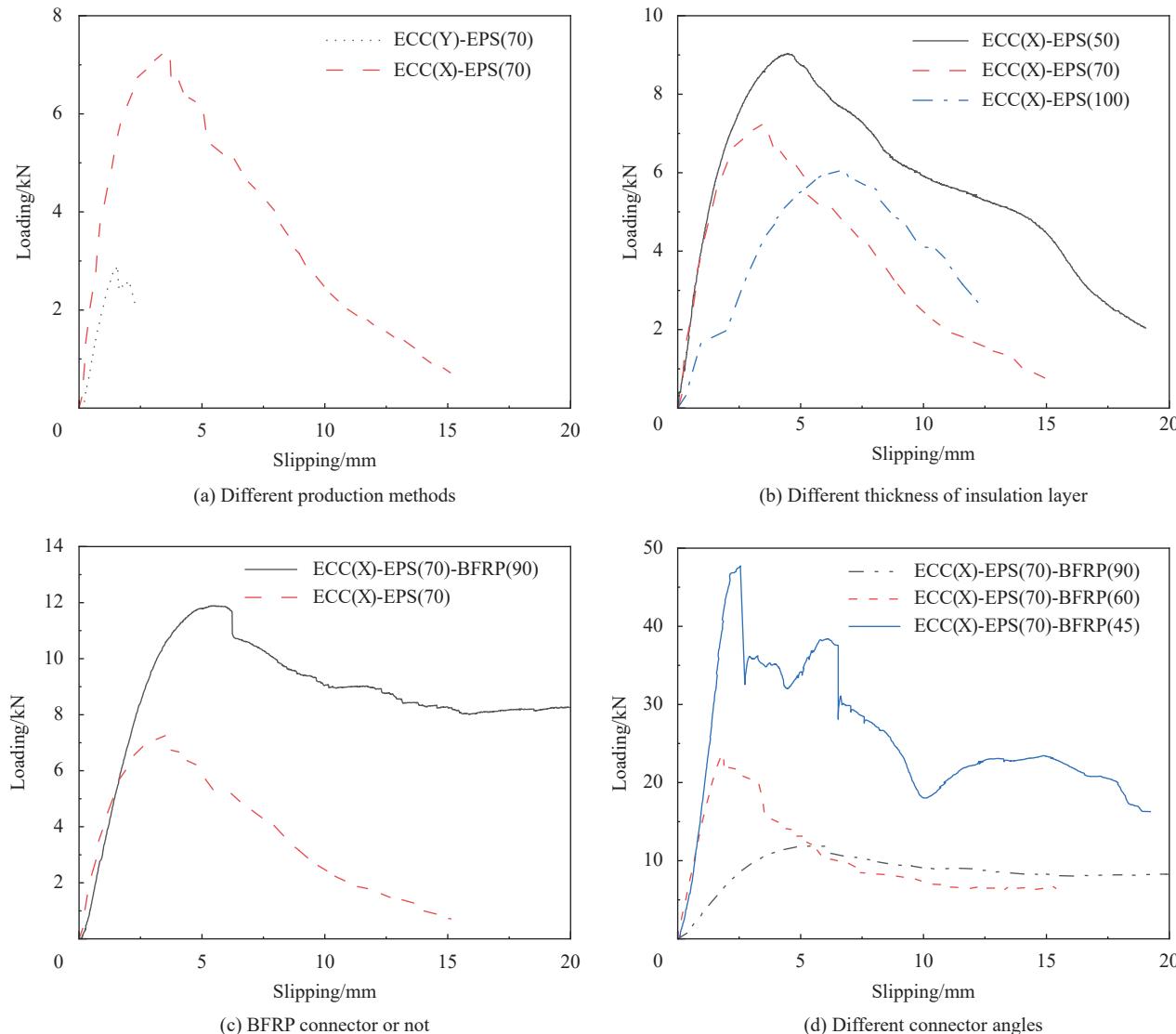


图 5 ECC-EPS 保温板的荷载-滑移曲线

Fig. 5 Load-slip curves of ECC-EPS insulation board

层的粘结性能相对较弱, 在发生破坏时, 界面未出现较大的剥离, 粘结力仍在发挥作用, 并且出现 BFRP 筋被拔出等现象, 这也导致了这种类型的试件未出现增强阶段。此外, 连接件角度为 45° 的试件的承载能力和抗剪强度都要远高于连接件角度为 60° 和 90° 的试件, 其试件的平均抗剪强度是 60° 和 90° 试件的 2 倍和 3.7 倍, 极限承载力也分别提高了 96.3%、266.2%。

## 2.3 ECC-EPS 保温板韧性

为了进一步评价试件的界面粘结性能, 采用 Kim 等<sup>[20]</sup>提出的耗能理论, 并引入韧性指数 (Toughness index,  $\alpha_s$ ) 来评价试件达到峰值后的耗能能力。韧性指数反映了试件加载后期界面粘

结性能与试件破坏所需能量之间的转换关系, 其数值越大, 则试件在承载后期的抗剪性能越好:

$$\alpha_s = \frac{E_{\text{post}}}{(P_{\text{peak}}\delta_{\text{peak}})/2} \quad (2)$$

式中:  $\alpha_s$  为韧性指数;  $E_{\text{post}}$  为峰值荷载后的能量值 (kN·mm);  $P_{\text{peak}}$  为极限荷载值 (kN);  $\delta_{\text{peak}}$  为极限荷载值时的界面滑移量 (mm)。具有如下关系:

$$E_{\text{post}} = \int_{\delta_{\text{post-peak}}}^{\delta_{\text{peak}}} P d\delta \quad (3)$$

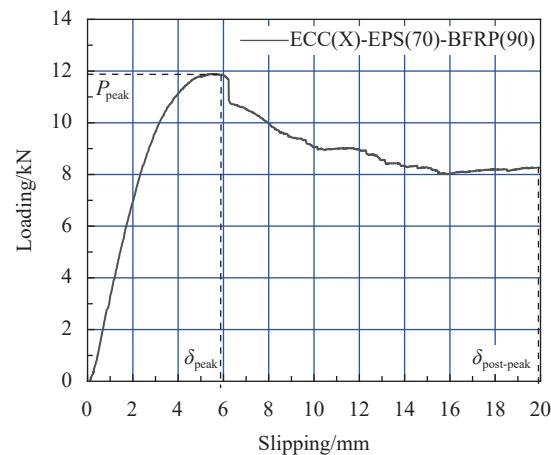
式中:  $E_{\text{post}}$  取峰值荷载处到滑移量为 20 mm 时的荷载-滑移曲线下的面积。对于滑移量不够 20 mm 的试件曲线, 终点为曲线终止处, 峰值荷载后的能量值对应的界面滑移量  $\delta_{\text{post-peak}}$  为 20 mm。本

文利用图6中网格分割法来估算 $E_{\text{post}}$ 值。试件的 $E_{\text{post}}$ 、 $P_{\text{peak}}$ 、 $\delta_{\text{peak}}$ 及韧性指数值如表8所示。

由表8可知,有连接件的试件的韧性指数普遍较高,其中连接件角度为45°的试件的韧性指数最高,这表明了连接件的存在有助于提高试件的延性,避免发生脆性破坏。在无连接件试件中保温层厚度为50 mm的韧性指数最大,说明此类试件在加载后期界面间的粘结性能仍较好,延性较高,这与试验现象相吻合。

### 3 夹芯结构墙体抗剪承载力计算

为了能够更加深入地了解夹芯结构墙体的破坏机制,基于Tomlinson等<sup>[18]</sup>的分析理论提出了双面剪切试验抗剪承载力公式,预测了有连接件试件的抗剪承载力和结构中各因素对荷载值的贡献比例,并采用试验结果对计算公式进行了验证。



$P_{\text{peak}}$ —Limit load value (kN);  $\delta_{\text{peak}}$ —Interface slip value at the limit load (mm);  $\delta_{\text{post-peak}}$ —Interface slip corresponding to the energy value after the peak load

图6 峰值荷载后的能量 $E_{\text{post}}$ 计算

Fig. 6 Calculation of energy value after peak load  $E_{\text{post}}$

表8 ECC-EPS 保温板韧性指数

Table 8 Toughness index of ECC-EPS insulation board

Specimen number	$E_{\text{post}}/(kN \cdot \text{mm})$	$P_{\text{peak}}/kN$	$\delta_{\text{peak}}/\text{mm}$	$\alpha_s$
ECC(X)-EPS(70)	36.7	7.25	3.49	2.90
ECC(Y)-EPS(70)	2.4	2.87	1.51	1.09
ECC(X)-EPS(50)	78.8	9.02	4.46	3.92
ECC(X)-EPS(100)	25.8	6.07	6.68	1.27
ECC(X)-EPS(70)-BFRP(90)	124.2	11.89	5.90	3.54
ECC(X)-EPS(70)-BFRP(60)	142.0	23.67	1.88	6.38
ECC(X)-EPS(70)-BFRP(45)	425.0	47.74	2.55	6.98

Notes:  $E_{\text{post}}$ —Energy value after the peak load (kN·mm);  $\alpha_s$ —Toughness index.

由图4(d)可以看出,嵌入角度为60°BFRP连接件的试件均发生ECC面板受弯破坏,因此试件的抗剪强度应为ECC面板的弯曲破坏强度。然而,在加载过程中,ECC面板的受力较复杂,其不仅受到BFRP筋的横向推力,还受到界面粘结力的作用,这便导致了试验中ECC面板的弯曲破坏,但这种破坏与四点弯曲破坏并不完全相同。因此,在计算此类型试件的承载力时不能直接采用ECC材料的弯曲破坏强度作为试件的抗剪强度。于是,ECC面板对于抗剪承载力的贡献近似采用连接件和界面粘结作用对抗剪承载力的贡献之和来表示。因此在计算试件的抗剪承载力时,嵌入角度为45°和60°BFRP连接件的试件的抗剪承载力计算公式相同。

抗剪承载力主要有两个方面组成,分别为绝缘保温层与ECC面层间的界面粘结力 $F_{\text{in}}(N)$ 和连接件的抗剪作用。其中,90°连接件的抗剪作用采用 $F_{\text{dw}}(N)$ 来表示;45°、60°连接件的抗剪作用采

用 $F_{\text{tr}}(N)$ 来表示。因此,试件的抗剪承载力 $F$ 值可用下式来表示,并作出四个假设,即梁理论适用于试件中连内外叶ECC面层的连接件;BFRP连接件为线弹性;保温板的破坏是由于对角拉伸分裂而失效的;在双面剪切试验过程中ECC面层不会发生挤压破碎:

$$F = F_{\text{in}} + F_{\text{dw}} \text{ 或 } F_{\text{tr}} \quad (4)$$

### 3.1 夹芯结构中各因素对承载力的贡献

#### 3.1.1 绝缘保温层对抗剪承载力的贡献

假设剪切变形很小,则剪切应变可用 $\delta_1/L$ 来表示。进而可得到绝缘保温层对抗剪承载力的贡献,其计算公式如下:

$$F_{\text{in}} = \frac{G_{\text{in}} A_{\text{in}} \delta_1}{L} \quad (5)$$

其中, $F_{\text{in}}$ 的最大值 $F_{\text{in},\text{max}}$ 为

$$F_{\text{in},\text{max}} = f_{u,\text{in}} A_{\text{in}} \quad (6)$$

式中:  $G_{in}$  为保温材料的剪切模量 (EPS 材料为 2.27 MPa);  $A_{in}$  为保温受剪切面面积 (等于  $bh$ ,  $b$  为剪切面宽度,  $h$  为剪切面高度)(mm<sup>2</sup>);  $L$  为保温层厚度 (mm);  $\delta_1$  为相对滑移量 (mm), 选荷载-滑移曲线中荷载首次突降时的滑移值;  $f_{u,in}$  为保温材料的抗拉强度 (MPa)。

根据双面剪切试验结果, 对保温层厚度为 50 mm、70 mm、100 mm 的试件的极限抗剪承载力进行拟合, 将  $\lambda$  作为保温层厚度影响系数, 则式(5)可调整为

$$F_{in} = \lambda \frac{G_{in} A_{in} \delta}{L} \quad (7)$$

其中,  $\lambda = -5.411 \times 10^{-4} L^2 + 0.080L - 1.922$ 。

### 3.1.2 嵌入 90°的连接件对抗剪的贡献

由于嵌入 90°连接件的销钉作用相当于结构中的固定梁, 因此其对抗剪承载力的贡献可用下式表示:

$$F_{dw} = \frac{12 E_{sc} I_{sc} \delta_2}{L^3} \quad (8)$$

其中,  $F_{dw}$  的最大值  $F_{dw,max}$  为

$$F_{dw,max} = \frac{4 f_{u,sc} I_{sc}}{L \phi} \quad (9)$$

式中:  $E_{sc}$  为连接件的弹性模量 (MPa);  $I_{sc}$  为连接件的转动惯量 (mm<sup>4</sup>);  $\delta_2$  为相对滑移量 (mm), 选取荷载-滑移曲线中荷载第二次突降时的滑移值;  $f_{u,sc}$  为连接件的抗压强度 (MPa), 取其抗拉强度的 30%<sup>[21]</sup>;  $\phi$  为连接件直径 (mm)。

### 3.1.3 嵌入角度为 45°、60°的连接件对抗剪承载力的贡献

由于连接件的轴向分量决定了连接系统的性能, 于是采用连接件的轴向应变  $\varepsilon_{sc,a}$  进行计算, 其计算公式如下:

$$\varepsilon_{sc,a} = \frac{\Delta d_{ac}}{d_{ac}} = \frac{\sqrt{(L \tan \theta + \delta_2)^2 + L^2} - d_{ac}}{d_{ac}} \quad (10)$$

则连接件对抗剪性能的贡献  $F_{tr}$  可用下式表示:

$$F_{tr} = F_{ac} \sin \theta' = E_{sc} \varepsilon_{sc,a} A_{sc} \tan^{-1} \left( \frac{L \tan \theta + \delta_2}{L} \right) \quad (11)$$

式中:  $d_{ac}$  为连接件原始长度;  $F_{ac}$  为轴向力;  $A_{sc}$  为连接件的横截面面积 (mm<sup>2</sup>);  $\theta'$  为连接件在受力变形后与试件水平方向夹角 (°);  $\theta$  为连接件与试件水平方向夹角 (°);  $E_{sc}$  为连接件弹性模量 (MPa)。

当 45°、60°连接件受到拉力而处于拉伸状态, 并且杆所受的应力  $f_{tr,strength}$  超过 BFRP 的抗拉强度  $f_{u,b}$  时, 连接件会发生断裂。此时, 连接件发生拉伸破坏时的荷载值  $F_{tr,strength}$  应采用下式进行计算:

$$F_{tr,strength} = f_{tr,strength} A_{sc} \sin \theta' \quad (12)$$

其中:

$$f_{tr,strength} = \frac{\sqrt{(L \tan \theta + \delta)^2 + L^2} - d_{ac}}{d_{ac}} E_{sc} + \frac{3 E_{sc} \phi}{L^2} \delta_2 \quad (13)$$

当 45°、60°连接件与 ECC 发生脱粘被拔出时,  $F_{tr,strength}$  应采用下式进行计算:

$$F_{tr,bond} = f_{tr,bond} A_{sc} \sin \theta \quad (14)$$

其中:

$$f_{tr,bond} = \frac{0.083 \sqrt{f_{u,e}}}{\alpha} \left( 13.6 \frac{d_e}{\phi} + \frac{C}{\phi} \frac{d_e}{\phi} + 340 \right) \quad (15)$$

式中:  $f_{u,e}$  为 ECC 抗压强度 (MPa);  $d_e$  为连接件的嵌入长度 (mm);  $C$  为 BFRP 筋中心位置到 ECC 面层边缘的最小保护层厚度 (mm);  $\alpha$  为连接件位置系数 (当  $C/\phi$  超过 3.5 时, 取 3.5, 当嵌入深度小于  $20\phi$  时,  $\alpha$  取值为  $d_e/(20\phi)$ );  $F_{tr,bond}$  为连接件发生脱粘破坏时的荷载值 (N)。

最后, 嵌入角度为 45°和 60°BFRP 连接件的承受能力取式(12)和式(14)中的最小值。

## 3.2 理论值验证

对带有连接件且已画出荷载-滑移曲线图的 EPS 试件的极限承载力理论值和试验值进行对比分析, 结果如表 9 所示。可以看出, 采用上述计算公式计算得到的理论值与试验值的吻合度较高,

表 9 ECC-EPS 保温板计算荷载与实际荷载值对比

Table 9 Comparison of calculated load and actual load of ECC-EPS insulation board

Specimen number	Failure load/kN				Theoretical contribution value/%	
	Experimental value	Theoretical value	Experimental value/Theoretical value	Thermal insulating material	Connectors	
ECC(X)-EPS(70)-BFRP(90)	11.89	11.11	1.07	70.21	29.79	
ECC(X)-EPS(70)-BFRP(60)	23.67	22.77	1.04	16.51	83.49	
ECC(X)-EPS(70)-BFRP(45)	47.74	32.56	1.47	15.66	84.34	

因此采用上述公式来预测试件的抗剪承载力具有一定的可靠性。同时由计算结果还可以看出, 对于连接件角度为90°的试件, 保温材料对抗剪承载力的理论贡献值要大于连接件的理论贡献值。而对于连接件角度为45°和60°的试件, 连接件对抗剪承载力的理论贡献值更大, 并且对于发生ECC面板弯曲破坏的试件采用连接件与界面粘结作用对抗剪承载力的贡献来计算抗剪承载力能够满足实际需要。

## 4 结论

(1) 由于预制夹芯结构墙板的粘结性能比现浇墙板差很多, 因此在制备夹芯结构墙体时应尽可能采用现浇方式。

(2) 由于保温层厚度过小会导致保温层发生剪切破坏, 而厚度过大导致界面剪切刚度下降, 因此在设计夹芯墙体时应合理选择保温层厚度。

(3) 为了提高试件的韧性和降低脆性破坏的可能性, 夹芯结构墙体应该设置有连接件, 同时为了保证连接件能够有效发挥作用, 连接件应尽可能选择自身抗拉性能好、抗剪强度高且与工程水泥基复合材料(ECC)面层有良好粘结的材料。

(4) 不同处理方式下的夹芯墙体结构粘结性能优劣顺序为: 嵌入连接件角度45°>嵌入连接件角度60°>嵌入连接件角度90°>保温层厚50 mm>保温层厚70 mm>保温层厚100 mm>预制。

(5) 综合比较各处理方式对夹芯结构粘结性能的影响, 在设计夹芯墙体时应优先选用现浇方式, 连接件的嵌入角度选为45°, 保温层厚度选为70 mm。

(6) 基于Teixeira的分析理论推导的夹芯结构抗剪承载力与试验结果的吻合度较高, 可以用于预测试件的抗剪承载力。

## 参考文献:

- [1] EINEA A, SALMON D C, TADROS M K, et al. A new structurally and thermally efficient precast sandwich panel system[J]. *PCI Journal*, 1994, 39(4): 90-101.
- [2] O'HEGARTY R, KINNANE O. Review of precast concrete sandwich panels and their innovations[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 233: 117145.
- [3] LI V C. On engineered cementitious composites (ECC)-A review of the material and its applications[J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2003, 1(3): 215-230.
- [4] 董恒瑞, 刘军, 秦砚瑶, 等. 建筑外围护系统节能保温形式及发展趋势浅析[J]. *建设科技*, 2020(8): 37-40.
- [5] DONG Hengrui, LIU Jun, QIN Yanyao, et al. Analysis on energy saving and thermal insulation forms and development trend of building external envelope system[J]. *Construction Technology*, 2020(8): 37-40(in Chinese).
- [6] MA H, QIAN S, ZHANG Z, et al. Tailoring engineered cementitious composites with local ingredients[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 101: 584-595.
- [7] ZHANG Z, QIAN S, LIU H, et al. Ductile concrete material with self-healing capacity for jointless concrete pavement use[J]. *Transportation Research Record*, 2017, 2640(1): 78-83.
- [8] 徐世烺, 李庆华, 李贺东. 碳纤维编织网增强超高韧性水泥基复合材料弯曲性能的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2007(12): 69-76.
- [9] XU Shilang, LI Qinghua, LI Hedong. An experimental study on the flexural properties of carbon textile reinforced ECC[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007(12): 69-76(in Chinese).
- [10] CHOI K B, CHOI W C, FEO L, et al. In-plane shear behavior of insulated precast concrete sandwich panels reinforced with corrugated GFRP shear connectors[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 79: 419-429.
- [11] TAE S O, JANG S J, LEE K, et al. Insulation type effect on the direct shear behavior of concrete sandwich panel (CSP) with non-shear connectors[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 663: 154-158.
- [12] SOPAL G J. Use of CFRP grid as shear transfer mechanism for precast concrete sandwich wall panels[M]. America Raleigh: North Carolina State University, 2013.
- [13] 宋小软, 牛伟, 姜余丰, 等. 复合保温模板夹芯混凝土的界面粘结性能试验研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2013(8): 62-67.
- [14] SONG Xiaoruan, NIU Wei, JIANG Yufeng, et al. Experimental study on interfacial bonding performance of composite insulation formwork sandwich concrete[J]. *Concrete and Cement Products*, 2013(8): 62-67(in Chinese).
- [15] HODICKY K, SOPAL G, RIZKALLA S, et al. Experimental and numerical investigation of the FRP shear mechanism for concrete sandwich panels[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2015, 19(5): 04014083.
- [16] 高睿. 保温复合剪力墙各叠合层的界面粘结性能研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2019.
- [17] GAO Rui. Study on interfacial bonding performance of laminated layers of thermal insulation composite shear wall[D]. Beijing: Northern University of Technology, 2019(in Chinese).
- [18] KAZEM H, BUNN W G, SELIEM H M, et al. Durability and long term behavior of FRP/foam shear transfer mechanism for concrete sandwich panels[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 98(15): 722-734.

- [15] NAITO C, HOEMANN J, BEACRAFT M, et al. Performance and characterization of shear ties for use in insulated precast concrete sandwich wall panels[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2012, 138(1): 52-61.
- [16] JANG S J, YOU Y C, YUN H D. Effect of GFRP shear ties on shear behavior of interfaces between precast concrete panel and extruded polystyrene special insulation[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 658: 46-49.
- [17] 尹红宇, 孙帅, 胡夏闽. 织物增强混凝土与再生保温混凝土界面黏结性能试验研究[J]. *工业建筑*, 2017, 47(2): 128-132, 179. YIN Hongyu, SUN Shuai, HU Xiamin. Experimental study on interfacial bonding performance between fabric reinforced concrete and recycled aggregate thermal insulation concrete[J]. *Industrial Building*, 2017, 47(2): 128-132, 179(in Chinese).
- [18] TOMLINSON D G, TEIXEIRA N, FAM A, et al. New shear connector design for insulated concrete sandwich panels using basalt fiber-reinforced polymer bars[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2016, 20(4): 04016003.
- [19] 皇民, 赵玉如, 蔺世豪, 等. 冻融循环下BFRP筋与混凝土黏结滑移本构模型[J]. *混凝土*, 2021(8): 1-5, 10. HUANG Min, ZHAO Yuru, LIN Shihao, et al. Bond slip constitutive model between BFRP reinforcement and concrete under freeze-thaw cycle[J]. *Concrete*, 2021(8): 1-5, 10(in Chinese).
- [20] KIM H R, KANG D H, YUN H D. Influence of insulation type on in-plane shear behavior of insulated concrete sandwich panels (ICSP) with GFRP grid shear connectors[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 3014(525): 416-419.
- [21] MIRMIRAN A, YUAN W, CHEN X. Design for slenderness in concrete columns internally reinforced with fiber-reinforced polymer bars[J]. *ACI Structural Journal*, 2001, 98(1): 116-125.