引用格式：薛伟辰，李泽垚，杨佳林，等．考虑混凝土龄期影响的纤维增强复合材料(FRP)棒状连接件抗拔性能试验研究[J]．工业建筑，2026，56(2)：16-20．XUE Weichen，LI Zeyao，YANG Jialin，et al. Experimental Research on the Pull-Out Performance of FRP Bar Connectors Considering Concrete Age[J]. Industrial Construction，2026，56(2)：16-20 (in Chinese)．DOI：10.3724/j.gyjzG26012810

考虑混凝土龄期影响的纤维增强复合材料(FRP)棒状连接件抗拔性能试验研究*

薛伟辰[1]　李泽垚[1]　杨佳林[1]　李　亚[2]

(1. 同济大学土木工程学院，上海　200092；2. 上海师范大学建筑工程学院，上海　201418)

摘　要　为研究施工阶段中纤维增强复合材料(FRP)棒状连接件的抗拔性能，以混凝土强度等级(C25、C15)和保温层厚度(50，70 mm)为研究参数，设计并开展了4组共12个FRP棒状连接件拔出试验，主要研究了连接件的破坏形态、抗拔承载力、荷载-滑移曲线和荷载连接件应变曲线。试验结果表明：所有棒状FRP连接件拔出试件均发生连接件端部混凝土锚固破坏；混凝土强度等级对连接件的抗拔承载力影响较大，混凝土强度等级从C15提升至C25时，保护层厚度为50，70 mm的试件抗拔承载力分别提升了18.1%和21.0%；保温层厚度对连接件的抗拔承载力影响较小，保温层厚度从50 mm升至70 mm时，混凝土强度等级为C15和C25的试件抗拔承载力分别提升了3.3%和7.4%；试件破坏时，连接件沿拔出方向的应变均远小于FRP的极限拉伸应变，连接件均未发生损伤。

关键词　混凝土龄期；FRP连接件；抗拔性能；承载能力；荷载-滑移曲线

Experimental Research on the Pull-Out Performance of FRP Bar Connectors Considering Concrete Age

XUE Weichen[1]　LI Zeyao[1]　YANG Jialin[1]　LI Ya[2]

(1. *College of Civil Engineering*, *Tongji University*, *Shanghai* 200092, *China*; 2. *School of Civil Engineering*, *Shanghai Normal University*, *Shanghai* 201418, *China*)

Abstract: To investigate the pull-out performance of FRP bar connectors during the construction stage, this study designed and conducted pull-out tests on four groups with a total of twelve FRP bar connectors, with concrete strength (C25, C15) and insulation layer thickness (50 mm, 70 mm) as the research parameters. The failure modes, pull-out bearing capacity, load-slip curves, and load-connector strain curves were systematically analyzed. The experimental results indicated that all specimens failed due to concrete anchorage failure at the connector end. Concrete strength grade had a significant influence on the pull-out bearing capacity of the connectors. When the concrete strength increased from C15 to C25, the pull-out bearing capacity of specimens with insulation layer thicknesses of 50 mm and 70 mm improved by 18.1% and 21.0%, respectively. In contrast, insulation layer thickness had a relatively minor effect on the pull-out bearing capacity. When the insulation layer thickness increased from 50 mm to 70 mm, the pull-out bearing capacity of specimens with concrete strength grades of C15 and C25 increased by 3.3% and 7.4%, respectively. At failure, the strain of the connectors along the pull-out direction remained well below the ultimate tensile strain of the FRP material, and no damage was

*“十四五”国家重点研发计划(2022YFC3801400)。

第一作者：薛伟辰，博士，教授，博士生导师，主要从事预制混凝土结构、预应力混凝土结构及FRP筋混凝土结构等方面的研究。

电子信箱：xuewc@tongji.edu.cn

收稿日期：2026-01-28

observed in any of the connectors.

Keywords: concrete age; FRP connectors; pull-out performance; bearing capacity; load-slip curve

0　引　言

近年来，我国国家制定了“双碳”目标，大力推动装配式建筑结构和建筑节能。据统计，在当前建筑能耗中，围护结构能耗所占比重最大，高达 70%~80%。而围护结构中热损失比例最大的为外墙，约占 60%~70%。因此，采用保温墙体来实现墙体节能是降低建筑能耗的一个重要途径[1-3]。

实际工程中采用的保温墙体主要分为外保温墙体、内保温墙体和预制夹心保温墙体[4]。内保温墙体施工方便、造价低，但易受到室内装修的破坏，使用寿命较短，一般仅为 5~10 年；外保温墙体的防火性和耐久性则是突出问题，安全隐患较大；预制夹心保温墙体由内外叶混凝土墙板、保温层和连接件构成[5]，其节能效果显著，防火性和耐久性较好，使用寿命长，可实现与建筑结构同寿命[6]。

连接件是连接预制夹心保温墙体内、外叶混凝土板的关键部件，其主要作用是抵抗在风荷载和地震作用下混凝土板之间的分离作用以及在竖向荷载作用下混凝土板之间的纵向剪力，连接件的受力性能直接影响到墙体结构的安全与否[7-8]。预制混凝土夹心保温墙体中的连接件主要包括金属连接件和 FRP 连接件[9-10]。相比于金属连接件，采用 FRP 连接件可有效减少冷（热）桥作用，显著提高墙体的保温隔热性能，符合超低能耗建筑的需求。近年来，国内学者对 FRP 连接件的力学性能进行了研究，杨佳林等[11]研究了片状 FRP 连接件的抗拔、抗剪承载力，发现片状 FRP 连接件的抗拔承载力为 23.5 kN，平面内和平面外的抗剪承载力分别为 19.6，12.6 kN，均具有较大的安全储备；李智斌等[12]研发了一种螺纹式玻璃纤维增强复合材料（GFRP）连接件并研究了其抗拔承载力和抗剪承载力，在锚固长度 40 mm 情况下，连接件的抗拔承载力为 11.72 kN，抗剪承载力为 6.43 kN；刘若南[13]开展了棒状 FRP 连接件的拔出试验，发现锚固长度对连接件的抗拔承载力影响较大，随着锚固长度的增大（30~70 mm），连接件的拔出承载力从 7.63 kN 提高到 15.41 kN；何之舟等[14]提出了一种 GFRP 工字型连接件并对其轴向性能开展了研究，连接件的拔出试验均发生了混凝土冲切破坏，抗拔承载力为 25.6 kN。

在实际施工中，由于工期等多种因素，预制夹心保温墙体可能无法达到龄期就需要运送至施工现场完成拼装，此时混凝土的强度一般只能达到设计值的 50%~70%。系统查阅国内文献[11-14]后，发现已有的研究主要以连接件的样式和连接件在混凝土中的锚固长度为主，对于不同混凝土强度下 FRP 连接件的受力性能研究较少。在此基础上，本文设计并开展了 4 组共 12 个棒状 FRP 连接件拔出试验，分别研究了混凝土强度和不同保温层厚度对连接件抗拔承载力的影响，为该连接件的应用提供理论依据。

1　抗拔试验设计

1.1　试件设计

为研究不同混凝土强度和不同保温层厚度下 FRP 棒状连接件在预制夹心保温墙体中的抗拔性能，设计了 4 组共 12 个连接件抗拔试件，试件参数如表 1 所示。

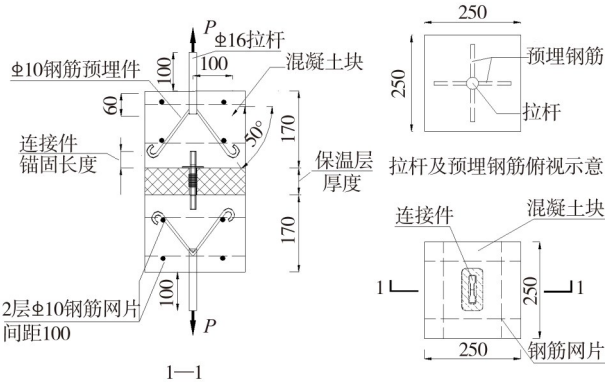
表 1　FRP 连接件抗拔试件参数

Table 1　Parameters of FRP connector pull-out specimens

连接件类型	试件编号	混凝土强度等级	连接件锚固长度/mm	保温层厚度/mm
棒状	PO1~3	C25	30	50
	PO4~6	C25	30	70
	PO7~9	C15	30	50
	PO10~12	C15	30	70

FRP 连接件拔出试件的中部保温层厚度分别为 50，70 mm，FRP 连接件拔出试件两端混凝土块尺寸为 250 mm × 250 mm × 170 mm，混凝土块中预埋钢拉杆和锚固筋。为防止混凝土过早劈裂，在混凝土块内配置双层钢筋网片。每个试件使用一枚连接件。

制作试件时，首先将保温板切割成 250 mm×250 mm 的块体，在其中心部位开设狭槽，狭槽尺寸与连接件截面尺寸相同，将连接件插入狭槽中。再组装模板、安装预埋件（钢筋网片、钢拉杆、焊接锚固筋），后将保温板放置于模板中心位置，浇筑混凝土。拔出试件施工图如图 1 所示。



注:φ16拉杆埋入混凝土深度60 mm,在端部与φ10钢筋焊接。

图1 连接件拔出试件施工示意 mm

Fig. 1 Construction drawing of connector pull-out specimens

1.2 加载与测量

FRP棒状连接件拔出试验在万能试验机上进行。为模拟连接件最不利受力状态,试验时除去试件保温层和连接件外部套环。试验采用单调加载的方式,先预加载,再匀速缓慢加载至试件破坏,加载速度控制在1 kN/mm。试验加载装置如图2所示。



图2 试验加载

Fig. 2 Test loading diagram

连接件拔出试验主要测试内容包括:

1)FRP连接件应变。

棒状连接件轴心处贴水平及竖向应变片,连接件两侧各布置1个测点(图3)。

2)FRP连接件与混凝土滑移。

在FRP连接件上下端部与混凝土块表面各预埋1个位移计导杆,分别测试连接件上、下两端与混凝土的滑移,每个试件共测4个滑移(图4)。

1.3 材料力学性能

FRP连接件拔出试件的钢筋及混凝土材料的力学性能由材性试验得到,见表2、表3。

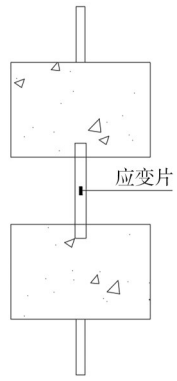


图3 拔出试件应变片布置

Fig. 3 Strain gauge arrangement on the pull-out specimen

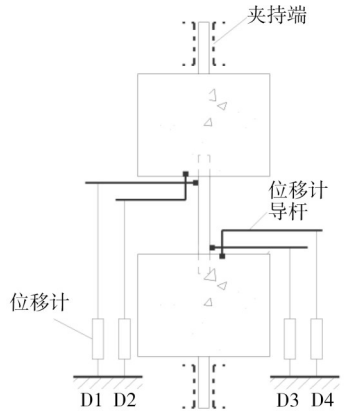


图4 拔出试件位移计布置

Fig. 4 Arrangement of displacement transducers on the pull-out specimen

表2 钢筋实测力学性能

Table 2 Tested mechanical properties of rebars

钢筋种类	屈服强度 f_y / MPa	极限强度 f_u / MPa	弹性模量 E_s / 10^5 MPa	伸长率/ %
φ10	276	415	1.93	32
φ16	369	513	1.88	28

表3 混凝土实测力学性能

Table 3 Tested mechanical properties of conrete

试件编号	混凝土强度等级	立方体抗压强度 f_{cu}/ MPa	棱柱体抗压强度 f_c/ MPa	抗拉强度 f_t / MPa	弹性模量 E_c / 10^4 MPa
PO1~3	C25	26.7	21.1	2.4	2.65
PO4~6	C25	28.1	22.3	2.5	2.68
PO7~9	C15	17.8	15.3	1.9	2.25
PO10~12	C15	18.3	15.8	2.1	2.17

2 试验结果分析

2.1 破坏形态

拔出试件的破坏形态如图5所示。可知:12个试件均发生FRP连接件端部锚固破坏。拔出试件加载至约0.95P_u(P_u为破坏荷载)时,连接件上端附

近混凝土表面开始出现裂缝，随着荷载的增大，裂缝不断延伸，并新增多条环绕连接件的裂缝，之后裂缝迅速扩展成闭合裂缝，随后连接件从混凝土中拔出。试件破坏后，连接件表面出现划痕，连接件槽口处有被压碎的混凝土粉末，连接件表面无纤维断裂或树脂开裂损伤。



（a）试件 PO1~3　（b）试件 PO4~6　（c）试件 PO7~9　（d）试件 PO10~12

图 5　拔出试件破坏形态

Fig. 5　Failure modes of pull-out specimens

棒状连接件的锚固力主要来自于连接件槽口与混凝土之间的咬合作用，咬合力是由槽口内嵌入混凝土而产生的，连接件槽口对混凝土的挤压如同一个楔。在拔出力作用下，棒状连接件槽口向外侧挤压混凝土，连接件根部混凝土沿斜向劈裂，连接件沿楔角呈约 45°方向形成近似圆锥劈裂破坏。

2.2　荷载-滑移曲线

试验得到的棒状 FRP 连接件拔出试验的荷载及特征值如表 4 所示，荷载-滑移曲线如图 6 所示。可知：在保温层厚度相同的情况下，混凝土强度等级从 C15 升至 C25 时，拔出承载力分别提升了 18.1% 和 21.0%，，而保温层厚度的变化对拔出承载力的影响不大，保温层厚度从 50 mm 变为 70 mm 时，混凝土强度等级为 C15 和 C25 的试件抗拔承载力仅提升了 3.3% 和 7.4%。主要原因是由于不同保温层厚度试件的破坏模式相同，均发生连接件端部的混凝土锚固破坏，因此其影响因素主要为连接件的锚固长度和混凝土的强度等级。

由荷载-滑移曲线可以看出，在加载初期，连接件与混凝土间的滑移值大都小于 0.3 mm，连接件荷载-滑移曲线基本呈线性，此时连接件与混凝土间的黏结力主要以化学胶着力和机械咬合力为主，此时滑移增长速度较慢；加载至（0.4~0.6）P_u 时，连接件与混凝土之间的化学胶着力丧失，抗拔力主要由机械咬合力承担，连接件与混凝土之间滑移变化加快。当荷载加至约 0.9P_u 时，连接件根部混凝土开裂，荷载达到峰值时，相应 FRP 连接件与混凝土的滑移量 S_m 约为 1.5~3.0 mm。

2.3　荷载-连接件应变曲线

试验得到的荷载-连接件应变曲线如图 7 所示。可知：连接件沿拔出方向正应变随荷载基本呈线性关系，个别试件沿长度方向的正应变在加载前期增长较慢，加载至（0.4~0.6）P_u 时增长速度加快；当所有拔出试件发生破坏时，连接件沿拔出方向的正应变均小于 1500×10^{-6}，小于连接件纵向拉伸极限应变（约 20000×10^{-6}），FRP 连接件并未发生损伤。这是因为抗拔承载力是由混凝土的锚固力决定的。

表 4　FRP 棒状连接件拔出试验荷载-滑移特征值

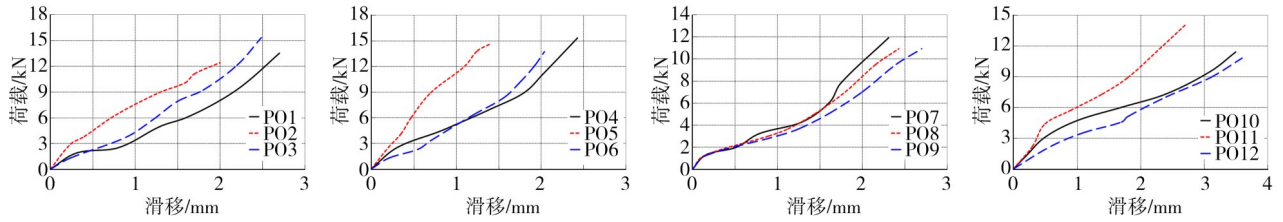
Table 4　Characteristic values of load-slip curves from FRP bar connector pull-out tests

编号	P_u/kN	均值/kN	S_m/mm
PO1	13.5		2.7
PO2	12.4	13.7	2.0
PO3	15.3		2.5
PO4	15.0		2.4
PO5	14.5	14.8	1.4
PO6	14.8		2.0
PO7	11.9		2.3
PO8	11.4	11.6	2.8
PO9	11.5		2.4
PO10	11.1		3.5
PO11	14.0	12.0	2.7
PO12	10.8		3.6

3　结　论

1）不同混凝土强度和不同保温层厚度下，棒状 FRP 连接件的拔出试验均发生连接件端部锚固破坏，且连接件表面无纤维断裂或树脂开裂损伤。

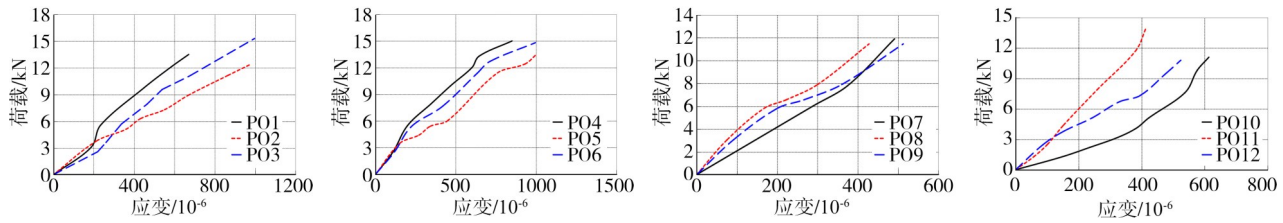
2）混凝土强度等级对连接件的抗拔承载力影响较大，混凝土强度等级从 C15 提高至 C25 时，连接件的抗拔承载力分别提高了 18.1% 和 21.0%；不同保温层厚度（50，70 mm）的抗拔试件对连接件的抗拔承载力影响较小，保温层厚度从 50 mm 变为



(a) PO1~3　(b) PO4~6　(c) PO7~9　(d) PO10~12

图 6　荷载-滑移曲线

Fig. 6　Load-slip curves



(a) PO1~3　(b) PO4~6　(c) PO7~9　(d) PO10~12

图 7　荷载-连接件应变曲线

Fig. 7　Load-connector strain curves

70 mm时，混凝土强度等级为C15和C25的试件抗拔承载力仅提升了3.3%和7.4%；在加载初期，连接件与混凝土之间的滑移增速较慢，加载至(0.4~0.6)P_u时，由于连接件与混凝土之间化学胶着力的丧失，滑移增速加快。

3)试件破坏时，连接件沿拔出方向的应变均远小于FRP的极限拉伸应变，连接件均未发生损伤。

参　考　文　献

[1] 李亚，胡翔，顾盛，等. 预制混凝土夹芯保温墙体FRP连接件试验方法综述[J]. 施工技术. 2018, 47(12): 87-91.

[2] 顾天舒，谢连玉，陈革. 建筑节能与墙体保温[J]. 工程力学，2006, 23(2): 167-184.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 装配式混凝土建筑技术标准：GB 51231—2016[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2017.

[4] 吴学淑，李进军，王平山，等. 预制混凝土夹芯保温墙应用研究进展[J]. 建筑结构，2021，51(增刊2)：1197-1202.

[5] LOSCH E D, HYNES P W, ANDREWS J R, et al. State of the art of precast/prestressed concrete sandwich wall panels [J]. PCI journal, 2011, 56(2): 131-176.

[6] 熊峰，边钰，刘烨，等. 预制混凝土夹芯保温墙板结构性能研究综述[J]. 建筑结构，2022，52(23)：26-34.

[7] 蒋勤俭，吴焕娟，祁成财，等. 非组合夹芯保温外墙板用非金属连接件的力学性能试验研究 [J]. 建筑技术，2018，49(1)：72-76.

[8] LIU Z, ZHU J, ZHU J W, et al. The mechanical properties of ultra-low energy consumption precast concrete sandwich wall panels with novel GFRP connectors [J]. Structures, 2025, 74: 108488.

[9] 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.

[10] ZHI Q, GUO Z. Experimental evaluation of precast concrete sandwich wall panels with steel-glass fiber-reinforced polymer shear connectors [J]. Advances in Structural Engineering, 2017, 20(10): 1476-1492.

[11] 杨佳林，薛伟辰，栗新. 预制夹芯保温墙体FRP连接件的力学性能试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版)，2013，34(6)：723-729.

[12] 李智斌，丛茂林，孙彬彬，等. 预制夹芯保温墙体中螺纹式GFRP连接件的试验研究[J]. 施工技术，2019，48(21)：82-84.

[13] 刘若南. 基于强度的预制混凝土夹芯保温墙板连接件设计研究 [D]. 武汉：武汉理工大学，2015.

[14] 何之舟，潘鹏，王海深. 夹芯保温墙体GFRP连接件轴向性能研究[J]. 工程力学，2021，38(3)：112-121.