

新型陶粒发泡混凝土锚固剪切性能试验研究

王超维¹, 杨毅超¹, 顾征宇¹, 任鑫森¹, 陆正卿¹, 杨晓伟²

¹上海烟草集团有限责任公司, 上海

²同济大学土木工程学院, 上海

收稿日期: 2024年1月8日; 录用日期: 2024年3月26日; 发布日期: 2024年4月3日

摘要

本文对一种新型轻质混凝土的材料性能及锚固剪切性能进行了研究, 针对该种材料提出并设计了相应配套的连接措施。研究以套筒数量、套筒位置、锚固试件厚度为变量, 通过试制的8个锚固剪切试件开展试验, 分析以上连接因素对混凝土剪切性能的影响, 并进行了锚固剪切承载力分析, 为后续该种轻质混凝土及连接方法的设计及推广应用提供了理论依据。

关键词

新型陶粒发泡混凝土, 锚固剪切性能, 剪切承载力

Experimental Study on Anchorage Shearing Performance of New Ceramsite Foam Concrete

Chaowei Wang¹, Yichao Yang¹, Zhengyu Gu¹, Xinsen Ren¹, Zhengqing Lu¹, Xiaowei Yang²

¹Shanghai Tobacco Group Co., Ltd., Shanghai

²College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

Received: Jan. 8th, 2024; accepted: Mar. 26th, 2024; published: Apr. 3rd, 2024

Abstract

This paper investigates the material properties and anchorage shearing performance of a novel lightweight concrete, proposing corresponding design measures for its application. The study explores variables such as the number and position of sleeves and the thickness of anchor specimens. Eight anchorage shearing specimens were fabricated for experimental testing, and the in-

fluence of the aforementioned connection factors on the shearing performance of concrete was analyzed. Additionally, a thorough analysis of the anchorage shearing bearing capacity was conducted. The findings serve as a theoretical foundation for the subsequent design and widespread application of this type of lightweight concrete and its connection methods.

Keywords

New Ceramsite Foam Concrete, Anchorage Shearing Performance, Shearing Capacity

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

装配式建筑的连接方法,从施工方法角度,大致可分为干式连接和湿式连接两类[1]。螺栓连接属于干式连接,是一种通过螺栓杆件及螺母将上下层预制构件连接为整体的连接技术[2],具有施工便捷、安装效率高等优势,在装配式墙板的连接安装中经常被使用。作为整个墙板的薄弱处,连接处的锚固破坏是外墙板破坏的主要形式之一,因此连接的可靠锚固是其安全使用的前提[3] [4] [5]。陆春阳等[6]对陶粒混凝土与钢筋粘结锚固性能进行了抗拉试验研究,张玉[7]等建立了轻质混凝土与钢筋粘结强度概率模型。轻质混凝土中预埋螺栓套筒采用螺栓连接的锚固剪切性能,还未见相关文献资料研究。

本文对一种新型陶粒发泡混凝土材料的力学性能进行了研究,并设计了8个锚固剪切试件,对该混凝土材料的锚固剪切性能进行了综合评估分析,为之后该类型混凝土及锚固方法应用于装配式外墙提供了相关的锚固理论依据。

2. 材料性能试验

本试验研究采用新型陶粒发泡混凝土(下文简称混凝土),该材料是一种使用闭孔发泡技术,将水泥胶凝材料、陶粒骨料、外加剂和水按一定比例均匀混合并搅拌发泡,经浇筑成型、振动密实、养护制成的轻质混凝土。

材性试验采用与锚固试件制作同批次的混凝土,共制作3组9块边长为150 mm的标准立方体试件和5组15块尺寸为150 mm × 150 mm × 300 mm的标准棱柱体试件。试验采用20吨多功能试验机,在同济大学土木工程防灾国家重点试验室进行。

2.1. 立方体材性试验

立方体试件分为A、B、C三组,分别编号为A1~A3、B1~B3、C1~C3。在试验前使用电子称对立方体试件进行称重,以获取混凝土的容重。试验过程中,随着压力的逐渐增加,试件表面在高度中央出现了竖向、并沿斜向往上、下端发展的裂缝,裂缝逐渐发展到承压面,转向试件角部,继续施加荷载,裂缝由表层逐渐向内部发展,表层混凝土开始向外鼓凸、剥落,试件破坏。经试验研究,该种类混凝土的平均立方体抗压强度为7.13 MPa,容重为907.26 kg/m³,主要试验结果详见表1。

2.2. 棱柱体材性试验

棱柱体试件分为A、B、C、D、E共5组,每组各三块,D、E组试块测试弹性模量。对A、B组三

块试件进行棱柱体抗压强度试验后，以该组棱柱体强度试验结果的平均值的 1/3 作为弹性模量试验的试验加荷标准。弹性模量试验采用混凝土弹模测定仪进行，棱柱体的弹模平均值为 4.57×10^3 MPa，平均棱柱体抗压强度为 5.36 MPa，主要试验结果详见表 2。

Table 1. Test result of cube specimens

表 1. 立方体试块试验结果

分组	试块编号	荷载(kN)	重量(kg)	密度(kg/m ³)	抗压强度(MPa)	立方体平均抗压强度(MPa)
A 组	A1	117	2.99	886.81	5.20	7.13
	A2	161	3.03	898.37	7.16	
	A3	144	3.06	906.37	6.40	
B 组	B1	149	3.11	920.00	6.62	
	B2	231	3.20	949.33	10.27	
	B3	175	3.05	904.59	7.78	
C 组	C1	158	3.05	904.89	7.02	
	C2	153	3.09	914.67	6.80	
	C3	144	2.97	880.30	6.40	

Table 2. Test result of prism specimens

表 2. 棱柱体试块试验结果

分组	试块编号	荷载(kN)	抗压强度(MPa)	弹性模量(MPa)	立方体平均抗压强度(MPa)
A 组	A1	116	5.16	4.57×10^3	5.36
	A2	133	5.91		
	A3	99.5	4.42		
B 组	B1	115.3	5.12		
	B2	157.9	7.02		
	B3	108.6	4.83		
C 组	C1	94.1	4.18		
	C2	117.7	5.23		
	C3	144	6.40		

3. 锚固剪切试验

3.1. 试件制作

试验共制作了 8 块新型陶粒发泡混凝土锚固试件，JD1~JD8。锚固试件连接组成主要包括四部分：

- ① 双层双向钢筋网：采用 HRB400 钢筋，钢筋直径为 8 mm；
- ② 龙骨钢架：龙骨钢架的钢材选用厚度为 1.5 mm 的 Q235B 钢板制成，龙骨钢架之间进行焊接连接；
- ③ 挂点套筒：连接螺栓采用高强螺栓 8.8 级，

套筒采用 M20 的配套产品；④ 套筒固定钢板：钢板采用与龙骨钢架同级别钢材，厚度为 4 mm，钢板通过焊接方式与龙骨钢架和挂点套筒连接。厚度为 120 mm 和 150 mm 的锚固试件对应的双层双向钢筋网的间距分别为 84 mm 和 114 mm，对应的龙骨钢架宽度分别为 60 mm 和 90 mm。锚固试件的参数设计表详见表 3，试件构造详图如图 1 所示。

Table 3. Parameter design table of specimens
表 3. 试件参数设计表

试件编号	布置形式	厚度(mm)	龙骨宽度(mm)	构造详图
JD1	单个螺栓 + 居中	120	60	详图 1
JD2	单个螺栓 + 居中	150	90	详图 1
JD3	单个螺栓 + 靠边	120	60	详图 2
JD4	单个螺栓 + 靠边	150	90	详图 2
JD5	两个螺栓 + 居中	120	60	详图 3
JD6	两个螺栓 + 居中	150	90	详图 3
JD7	两个螺栓 + 靠边	120	60	详图 4
JD8	两个螺栓 + 靠边	150	90	详图 4

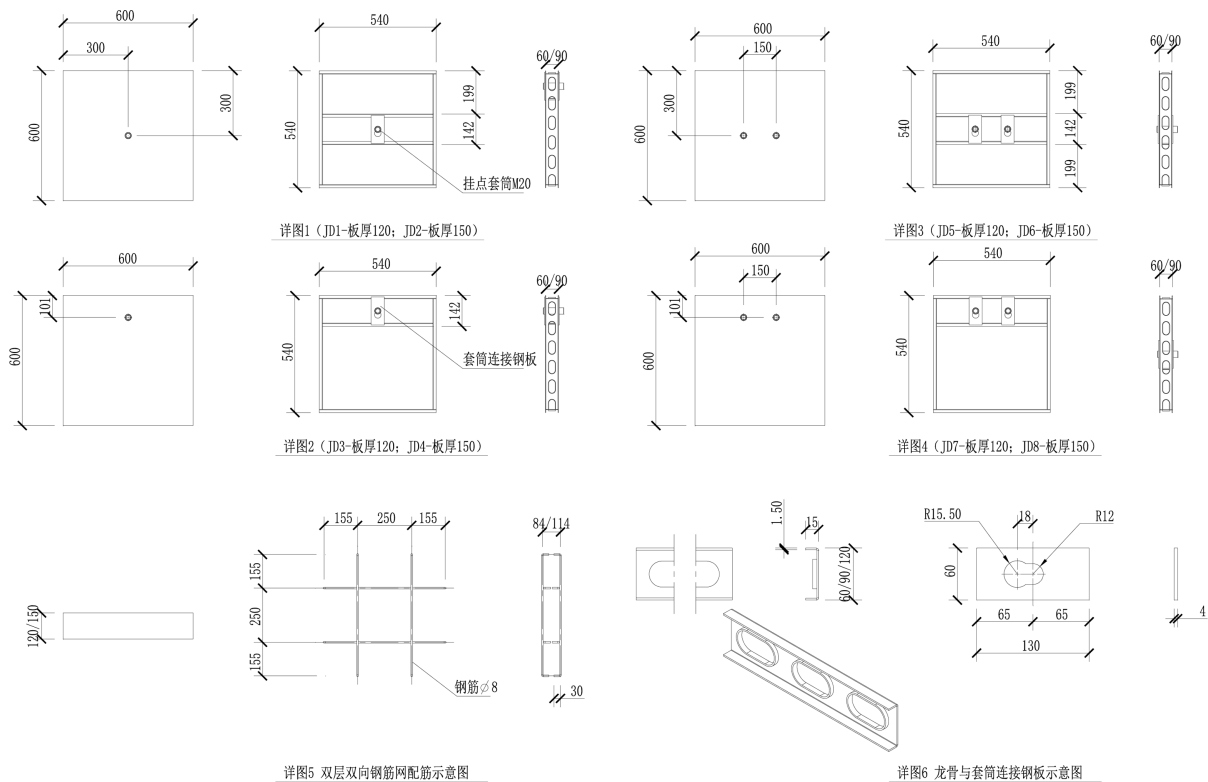


Figure 1. Detailed drawing of anchored shear specimens
图 1. 锚固剪切试件详图

3.2. 试验方案

为得到试件的剪切荷载位移曲线,采用 20t 作动器对试件进行加载(见图 2),加载过程中为保证加载装置剪力竖直,在试件侧面采用千斤顶抵住试件,防止发生侧倾。为准确获得连接件及锚固剪切顶面的变形,在定制连接装置和试件上顶面放置了位移计,以位移计相关位移对试件荷载-位移曲线进行修正。

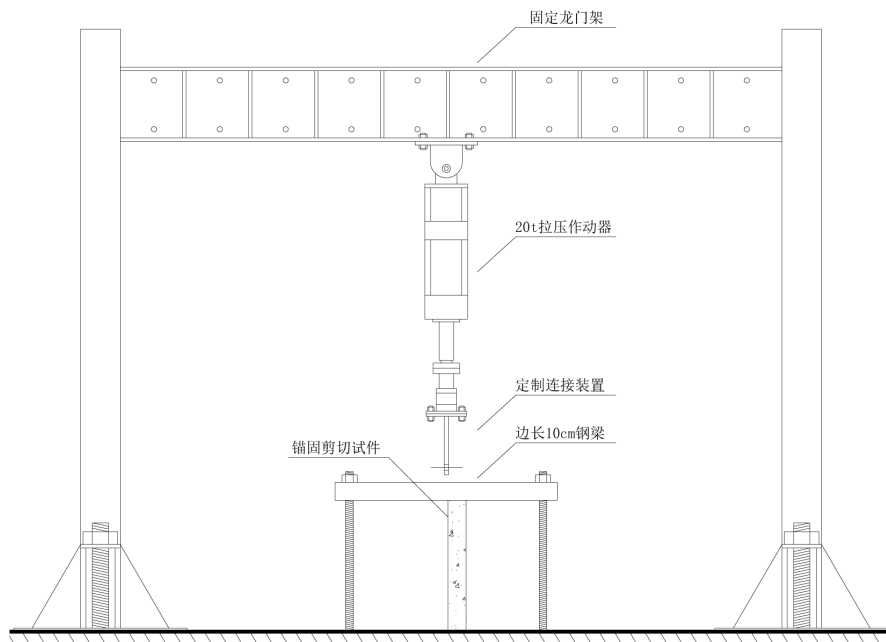


Figure 2. Installation diagram of testing device

图 2. 试验装置安装示意图

4. 试验结果及分析

4.1. 试验现象

锚固剪切试件的试验现象基本相似,在加载前期试件处于弹性阶段,荷载与位移基本呈现线性关系,荷载达到线性阶段的峰值后,试件开始发生塑性变形,试件承载力逐渐增加。随着荷载的不断增加,试件出现受剪锥形裂缝,两侧混凝土出现明显劈裂裂缝,试件变形增大,受剪破坏,试验结束,各试件的最终破坏形态见图 3。JD5、JD6 的受剪锚固性能明显优于所选用的混凝土基材,混凝土破坏先于连接锚固受剪破坏。

在受剪极限承载力方面,JD8 的受剪极限承载力最大为 79.8 kN,JD3 试件的受剪极限承载力最小为 33.34 kN。锚固剪切试件的极限变形在 10~15 mm 之间,试件的受剪极限承载力和变形能力均较好。试件的破坏形态分为两种,对于 JD3、JD4 连接出现了典型的锥形破坏,其他锚固试件由于锚固抗剪性能优于混凝土基材,两侧出现劈裂裂缝,连接周围受剪锥形裂缝沿 45°方向发展,裂缝形态明显。

以 JD3 试件为例定量描述锚固受剪试件的试验现象,预加载 0.5 kN,当位移为 1.53 mm 时,板面出现第一条从连接位置沿 45°方向发展的裂缝,宽度 0.05 mm。荷载达到 26.82 kN 时出现板顶裂缝,3 mm 位移时裂缝宽度明显增加,沿着 45°方向裂缝数量略微增加,板顶混凝土有剥落趋势。持续加载,试件塑性变形不断增大,最后连接上方混凝土脱落破坏,破坏形式为锥形破坏,受剪极限承载力为 33.34 kN。



Figure 3. Failure mode of the specimens JD1~JD8
图 3. JD1~JD8 试件破坏形态

4.2. 荷载 - 位移曲线

以锚固试件连接套筒的位置作为变量，控制其他构造措施相同，将试件的荷载 - 位移曲线进行比对 (见图 4)。在锚固试件的初始受剪阶段，构造相同试件的曲线斜率较接近，8 个锚固剪切试件内的连接构

造能够稳定承受相关剪力，锚固性能可靠。通过曲线比对，基本上连接套筒居中布置，锚固剪切试件的极限承载力提高，试件厚度 150 mm，连接套筒位置的改变对极限承载力的影响不显著；连接套筒位置的改变对试件的变形能力的影响无明显规律。

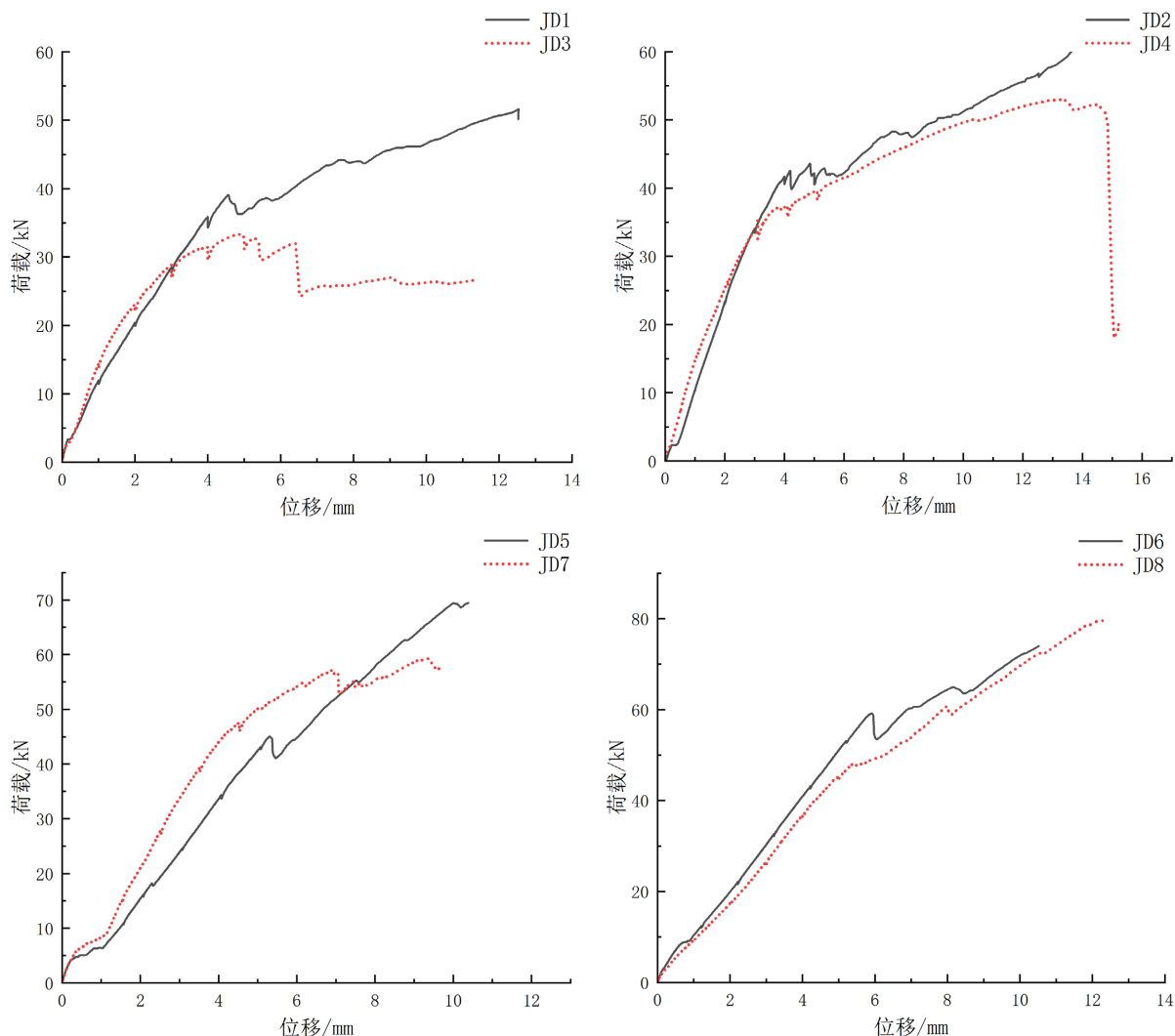


Figure 4. Comparison of load displacement curve with different hanging point sleeve position

图 4. 挂点套筒位置荷载 - 位移曲线比对

以锚固试件连接套筒的数量作为变量，控制其他构造措施相同，将试件的荷载 - 位移曲线进行比对 (见图 5)。在线性阶段，连接套筒数量的增加对试件的初始加载刚度影响不明显。挂点套筒数量的增加改变了试件的受力模式，提高了锚固试件的极限剪切承载力，JD5~JD8 试件的极限承载力提升了 30~40 kN 不等，随着荷载增大 JD5~JD8 试件加载刚度降低不明显。在变形方面，挂点套筒数量增加锚固试件变形能力有所降低。

以锚固试件厚度作为变量，保证其他构造措施相同，将试件的荷载 - 位移曲线进行对比 (见图 6)。对于含有单个挂点连接套筒的锚固试件，试件厚度的增加将线性阶段最大荷载提升了 5~10 kN。锚固试件厚度和连接龙骨钢架宽度增加可以提高试件的剪切承载力和变形能力，且对于螺栓靠边布置时影响更明显。

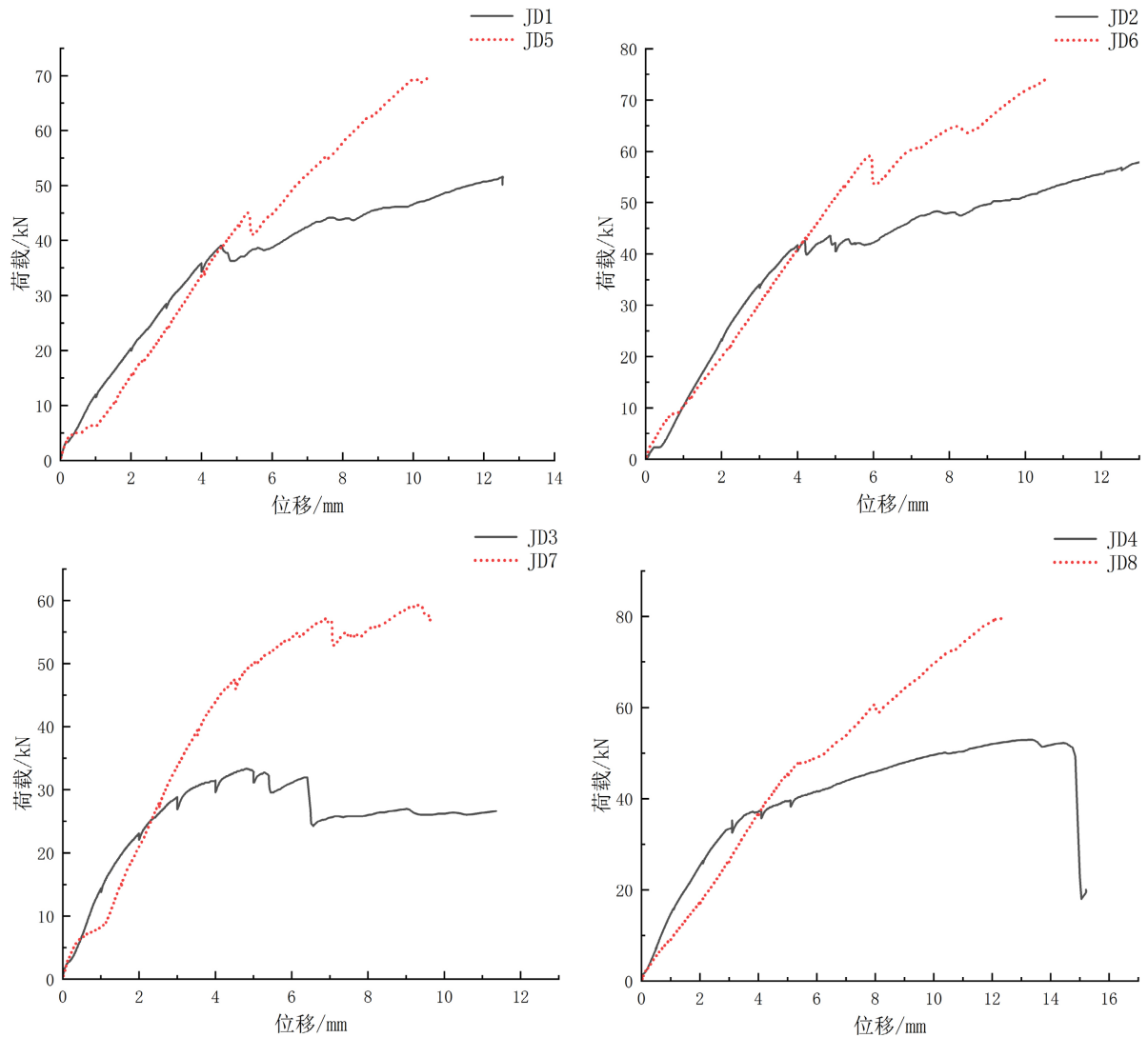
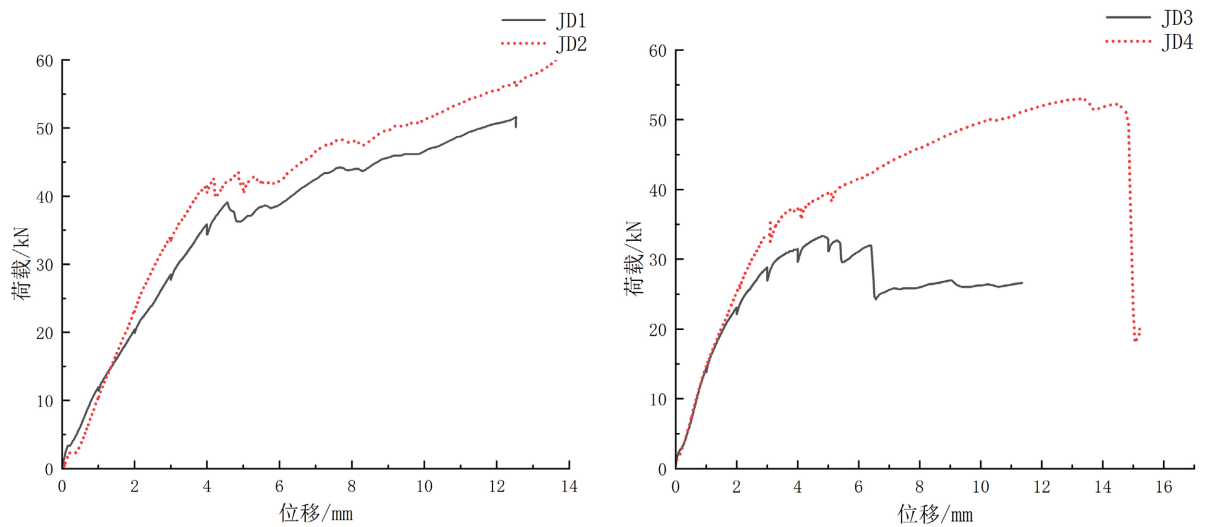


Figure 5. Comparison of load displacement curve with different hanging point sleeve number

图 5. 挂点套筒数量荷载 - 位移曲线比对



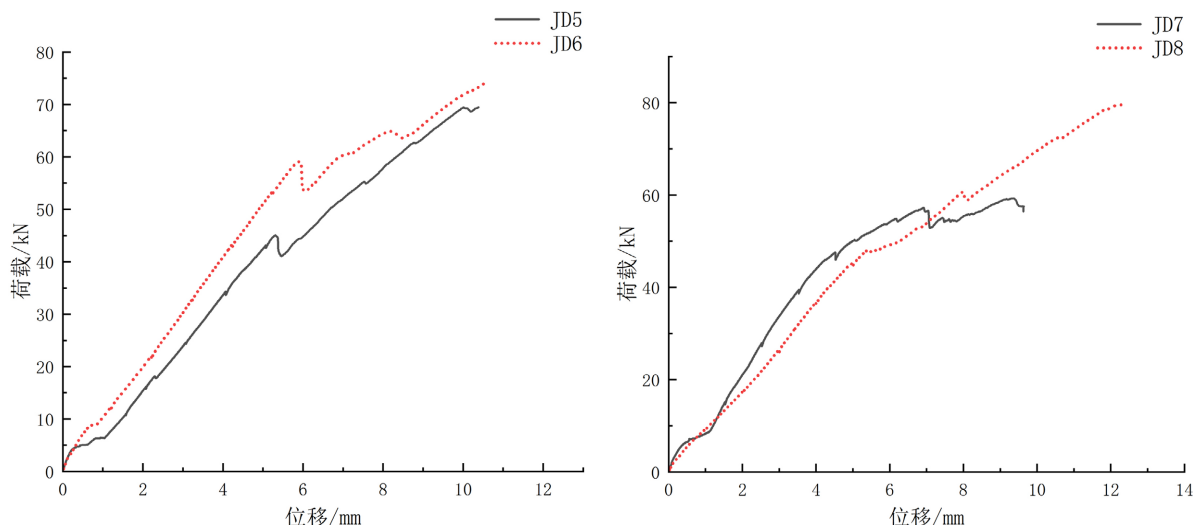


Figure 6. Comparison of load displacement curve with different specimen thickness

图 6. 试件厚度荷载 - 位移曲线比对

5. 锚固剪切承载力分析

采用《装配式混凝土结构技术规程》(JGJ 1-2014) [8]中给出的荷载组合效应公式对持久设计状况和地震设计状况两种工况进行剪切承载力分析。选取处于较不利应用环境下的预制外墙板进行计算, 尺寸 $4.2 \text{ m} \times 3.3 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ 。假定墙板处于 8 度区, 基本风压 0.7 kN/m^2 , 地面粗糙度 A 类, 每块墙板由两个支承预埋件和四个调节标高预埋件组成, 构件自重及竖向地震作用主要由支承预埋件承担, 风荷载和水平地震荷载作用下产生的水平力主要由调节标高预埋件承担。

竖向地震作用标准值时, 可采用等效侧力法, 根据文献[8]规定, 按下式进行计算:

$$F_{Evk} = 0.65\beta_E\alpha_{\max}G_k \quad (1)$$

基材容重按照试验结果取 9.0 kN/m^3 , 单块墙板受到的竖向地震力为 $F_{Evk} = 13.0 \text{ kN}$ 。

按照每块墙板所受的竖向力仅由支承预埋螺栓承担计算。持久设计状况和竖向地震设计状况下, 根据文献[8]规定, 单个预埋螺栓所受的剪力设计值分别按照下式计算:

$$S_d = \gamma_G S_{Gk} \quad (2)$$

$$S_{Eh} = \gamma_G S_{Gk} + \gamma_{Ev} S_{Evk} \quad (3)$$

持久设计状况剪力设计值 $S_d = 16.8 \text{ kN}$ 、竖向地震设计状况剪力设计值 $S_{Eh} = 25.3 \text{ kN}$ 。

综上, 预制外墙板位于 8 度区、基本风压 0.7 kN/m^2 、地面粗糙度 A 类时, 新型陶粒发泡混凝土基材中预埋的螺栓剪切承载力大于 25.3 kN 时, 可以满足抗剪承载的需求。根据试验结果, 试验所有连接节点的弹性变形阶段最大荷载均大于该水平力, 可满足实际工程使用要求。

6. 结论

本文通过开展新型陶粒发泡混凝土材料性能试验和锚固剪切试验研究, 得出以下主要结论:

(1) 采用试验提出的锚固连接构造做法, 试件剪切承载力和变形能力表现较好, 发生锥形破坏或两侧混凝土劈裂破坏。

(2) 连接套筒居中布置, 锚固剪切试件的极限承载力提高, 连接套筒位置的改变对变形能力的影响无明显规律。连接套筒数量的增加对试件的初始加载刚度影响不明显, 提高了锚固试件的极限剪切承载力,

变形能力有所降低。锚固试件厚度增加可以提高试件的剪切承载力和变形能力。

(3) 根据试验研究与锚固剪切承载力分析结果,证实了该种连接装置的新型陶粒发泡混凝土的锚固剪切性能能够满足实际的装配式墙板工程应用。

参考文献

- [1] 刘正勇, 应惠清. 装配式混凝土框架结构节点构造方法简介[J]. 施工技术, 2008, 37(S2): 26-29.
- [2] 程龙, 张宇, 李文倩, 等. 装配式混凝土结构干连接方式研究[J]. 北方建筑, 2019, 4(1): 13-16.
- [3] 黄宇星, 祝磊, 叶桢翔, 等. 预制混凝土结构连接方式研究综述[J]. 混凝土, 2013(1): 120-126.
- [4] 杨叶. 装配式建筑结构深化设计及关键技术研究[J]. 工程机械与维修, 2020(2): 102-103.
- [5] 纵斌, 方林, 李承铭. 一体化集成外围护墙板连接节点锚固抗拉性能试验研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(S1): 1191-1195.
- [6] 陆春阳, 王卫玉, 李丕宁. 陶粒混凝土与变形钢筋粘结锚固性能的试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2007(1): 6-9.
- [7] 张玉, 刘伯权. 轻质混凝土与钢筋粘结强度概率模型分析[J]. 桂林理工大学学报, 2021, 41(3): 554-559.
- [8] 李晓明, 黄小坤, 将勤俭, 等. JGJ 1-2014. 装配式混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2014.