

基于非接触测量的陶粒混凝土预制底板平截面假定验证

郭常达, 王娟*, 夏煜星, 蒙福茂, 郭俊铭, 梁俊杰

湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2026年3月16日; 录用日期: 2026年4月6日; 发布日期: 2026年4月20日

摘要

为验证陶粒混凝土预制底板在受弯过程中是否满足平截面假定, 本研究设计并制作了1块尺寸为3600 mm × 1100 mm × 80 mm的足尺试件, 采用普通混凝土与陶粒混凝土组合结构, 内部嵌入空心保温模具以提升保温隔热性能。通过堆载试验获取试件在各级荷载下的位移、混凝土应变、钢筋应变及裂缝发展数据, 系统分析其受力全过程。试验结果表明: 试件破坏时跨中挠度达112.2 mm, 呈现典型延性破坏特征; 荷载-位移曲线可分为弹性、裂缝发展和破坏三个阶段, 反映了截面刚度退化与内力重分布过程; 混凝土应变在开裂后非线性增长, 中性轴显著上移; 钢筋应变在开裂后快速增长, 极限状态前接近屈服阈值。跨中截面应变分布和DIC应变演化图像显示, 开裂前($P \leq 0.2 F_u$)截面应变呈线性分布, 符合平截面假定; 开裂后受拉区应变偏离线性, 但受压区仍保持线性; 极限阶段($P \geq 0.9 F_u$)受压区非线性加剧。综上, 陶粒混凝土预制底板在整体受力过程中基本满足平截面假定, 为同类复合结构的设计与分析提供了试验依据和理论支撑。

关键词

预制底板, 陶粒混凝土, DIC监测, 平截面假定

Verification of Plane Section Hypothesis for Precast Ceramsite Concrete Base Plate Using Non-Contact Measurement

Changda Guo, Juan Wang*, Yuxing Xia, Fumao Meng, Junming Guo, Junjie Liang

School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: March 16, 2026; accepted: April 6, 2026; published: April 20, 2026

*通讯作者。

文章引用: 郭常达, 王娟, 夏煜星, 蒙福茂, 郭俊铭, 梁俊杰. 基于非接触测量的陶粒混凝土预制底板平截面假定验证[J]. 土木工程, 2026, 15(4): 202-214. DOI: 10.12677/hjce.2026.154094

Abstract

To verify the validity of the plane section assumption for precast ceramsite concrete base plates under bending, a full-scale specimen with dimensions of 3600 mm × 1100 mm × 80 mm was designed and fabricated, featuring a composite structure of ordinary concrete and ceramsite concrete with embedded hollow thermal insulation molds. Pile loading tests were conducted to obtain displacement, concrete strain, reinforcement strain, and crack development data at various load levels, enabling systematic analysis of the entire mechanical response. The results indicate that the specimen exhibits typical ductile failure characteristics with a mid-span deflection of 112.2 mm at ultimate state. The load-deflection curve demonstrates three distinct stages: elastic, crack development, and failure, reflecting section stiffness degradation and internal force redistribution. Concrete strain increases nonlinearly after cracking with significant upward shifting of the neutral axis, while reinforcement strain increases rapidly and approaches the yield threshold prior to ultimate state. Strain distribution at the mid-span section and DIC strain evolution images reveal that strain follows a linear distribution before cracking ($P \leq 0.2 F_u$), consistent with the plane section assumption. After cracking, tensile zone strain deviates from linearity whereas compressive zone strain remains linear; nonlinearity in the compression zone intensifies at the ultimate stage ($P \geq 0.9 F_u$). In conclusion, the precast ceramsite concrete base plate essentially satisfies the plane section assumption throughout the loading process, providing experimental basis and theoretical support for the design and analysis of similar composite structures.

Keywords

Precast Base Plate, Ceramsite Concrete, DIC Monitoring, Plane Section Assumption

Copyright © 2026 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

随着建筑工业化与绿色化发展战略的深入推进,装配式建筑结构体系对预制构件的性能提出了更高要求。普通混凝土叠合板虽能满足承载力需求,但存在自重大、保温隔热性能不足等固有局限,难以适应当前建筑结构“轻量化、绿色化、节能化”的发展趋势。陶粒混凝土作为一种以陶粒为轻骨料制备的新型复合材料,凭借其质轻、保温、吸声、环保及力学性能优良等突出优势,在建筑保温及非承重结构领域展现出广阔的应用前景[1][2]。

目前,学术界围绕陶粒混凝土的基础性能开展了较为系统的研究,研究内容涵盖陶粒制备工艺优化[3]、力学性能演化规律[4]、高温及声学性能改良[5][6]以及叠合界面粘结机理[7]等方面,为陶粒混凝土的工程应用奠定了理论与技术基础。在此基础上,针对陶粒混凝土叠合板这一典型结构形式,国内外学者已开展了实心型、空心型、夹芯保温复合结构以及桁架钢筋增强型等多种构造形式的受力性能研究[8]-[11]。已有研究表明,合理的构造设计可显著提升叠合板的抗火、承载及减重性能,部分成果已应用于实际工程[12]-[17]。上述研究为陶粒混凝土叠合板的体系发展提供了重要支撑。

然而,现有研究多聚焦于陶粒混凝土叠合板的整体承载性能与构造优化,对其基本力学假定—尤其是平截面假定在受力全过程中的适用性问题,尚缺乏直接的试验验证。平截面假定是混凝土结构弯曲理论的核心前提,直接关系到截面承载力计算、刚度分析及设计方法的可靠性。对于普通混凝土构件,该

假定已被大量试验证实；但对于材料性能与普通混凝土存在差异的陶粒混凝土，在含有空心保温模具的预制底板这一复杂构造形式下，截面应变分布是否仍符合平截面假定。

本文设计制作了 1 块足尺陶粒混凝土预制底板试件，采用非接触式数字图像相关技术(Digital Image Correlation, DIC)与应变片相结合的方法，开展堆载试验，研究试件在受弯全过程中的截面应变分布特征及演化规律，验证平截面假定的适用性，为陶粒混凝土复合结构的理论分析与工程应用提供试验依据。

2. 试验概况

2.1. 材料准备

(1) 普通混凝土

为获取准确的材料性能参数，按《普通混凝土力学性能试验方法标准》[18] GB/T 50081-2003 制作边长 150 mm 的标准立方体试件 6 组，标准养护条件(温度 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 95% 以上)下养护至 28 天龄期后进行抗压强度测试，如图 1 所示。试验测得普通混凝土立方体抗压强度平均值 $f_{nc} = 35.4 \text{ MPa}$ ，表明普通混凝土均质性良好。按规范推荐公式推算得弹性模量 $E_{nc} = 2.57 \times 10^4 \text{ MPa}$ ，泊松比 $\lambda_{nc} = 0.18$ 。上述普通混凝土材料性能试验数据见表 1。



Figure 1. Material property testing of normal concrete
图 1. 普通混凝土材性测试

Table 1. Measured mechanical properties of normal and ceramsite concrete

表 1. 普通混凝土和陶粒混凝土实测力学性能

材料性能/平均值	普通混凝土	陶粒混凝土
抗压强度 f_c (MPa)	35.4	26.7
弹性模量 E_c	2.57×10^4	1.36×10^4
泊松比 λ	0.18	0.17

(2) 陶粒混凝土

为获得性能稳定的轻骨料混凝土，陶粒混凝土的配合比设计及性能测试严格遵循《轻骨料混凝土结构技术规程》[19] JGJ 12-2006。如图 2 所示，根据规范要求对标准试块进行材料性能试验，试验测得陶粒混凝土立方体抗压强度平均值 $f_{cc} = 26.7 \text{ MPa}$ ，表明陶粒混凝土均质性良好。按规范推荐公式推算得弹性模量 $E_{cc} = 1.36 \times 10^4 \text{ MPa}$ ，泊松比 $\lambda_{cc} = 0.18$ 。陶粒混凝土的各项材料性能详见表 1。



Figure 2. Material property testing of ceramsite concrete
图 2. 陶粒混凝土材性测试

(3) 分布钢筋

如图 3 所示, 钢筋力学性能测试根据《金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》[20] GB/T 228.1-2021 进行材性试验。选用直径 6 mm 和 8 mm 两种规格的钢筋, 每种规格制作 3 根标准拉伸试件。在万能试验机上进行拉伸试验, 测得的两组钢筋关键性能参数代表值见表 2。

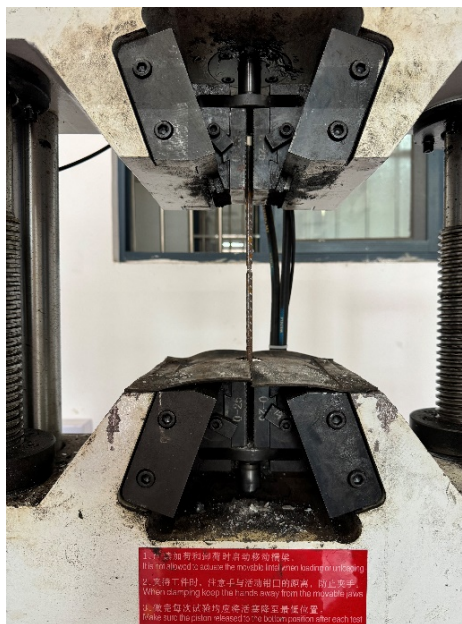


Figure 3. Tensile tests of steel reinforcement
图 3. 钢筋拉伸测试

Table 2. Electrochemical test design
表 2. 电化学试验设计

钢筋型号	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/MPa	备注
φ6	420	550	2.32×10^5	用于横向分布钢筋和肋梁箍筋
φ8	510	600	2.26×10^5	用于纵向分布钢筋和肋梁纵筋

2.2. 陶粒混凝土预制底板设计

本研究设计制作了 1 块几何尺寸为 $3600\text{ mm} \times 1100\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ 足尺试件。根据陶粒混凝土预制底板的构造形式，采用普通混凝土和陶粒混凝土相结合的结构形式，在预制底板内埋置了规则排列空心保温模具，以获得轻质、保温隔声隔热等性能。试件详细构造细节如图 4 所示。

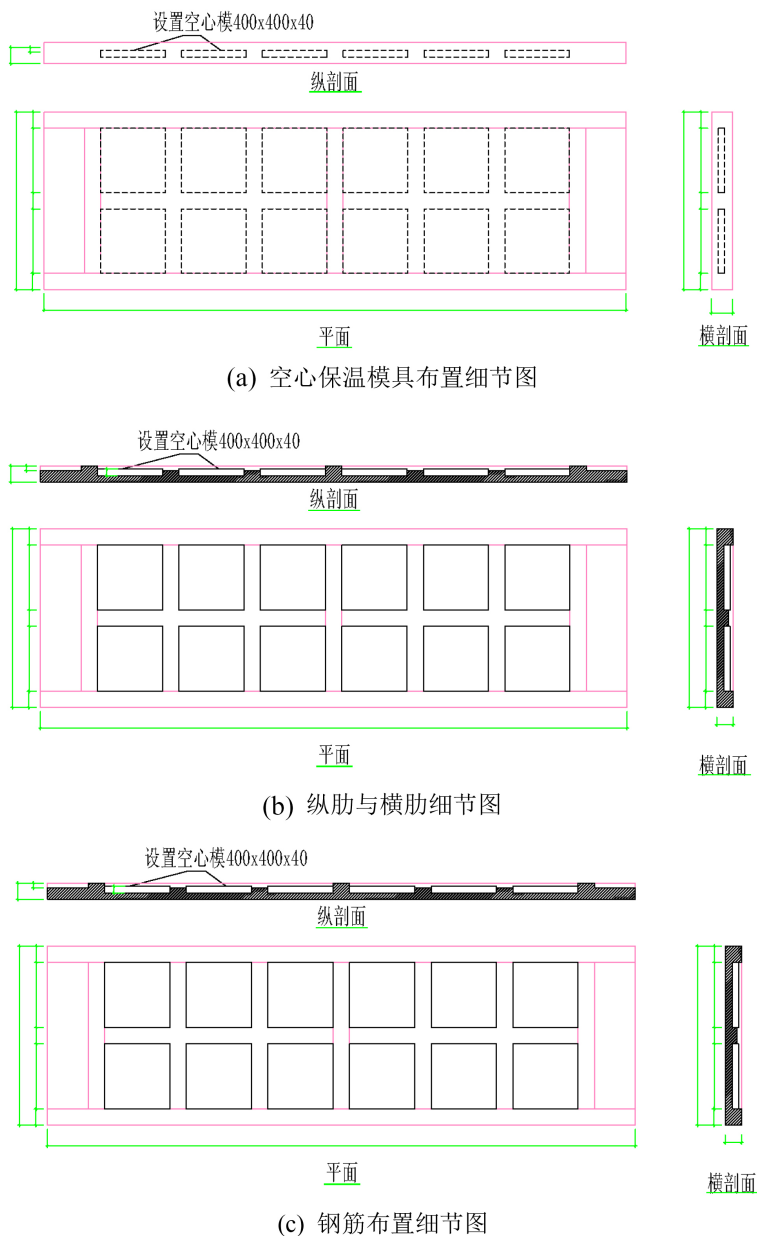


Figure 4. Structural details of specimen

图 4. 试件结构设计细节图

如图 4(a)所示，试件内部布置的空心保温模具呈矩形阵列均匀布置。在预制底板结构设计内，相邻空心保温模具中心距纵向与横向均为 500 mm ；空心保温模具外侧至叠合板边缘的最小距离为 100 mm ，以确保边缘混凝土的完整性。该布置设计有效形成了规则的纵向与横向混凝土肋梁。

如图 4(b)所示, 在空心保温模具的间隙处, 混凝土形成纵横交错的肋梁网格。纵向肋梁与横向肋梁的中心线分别于空心保温模具的行列轴线重合。肋梁截面为矩形, 宽度均为 100 mm, 肋梁高度存在一定的差异, 内部有钢筋笼的肋梁高度为 100 mm, 无钢筋笼的肋梁高度为 80 mm。该肋梁结构设计有效形成了稳定的空间网格骨架, 显著减轻了结构自重, 同时确保了预制叠合板与后浇混凝土层的整体协同工作。

如图 4(c)所示, 陶粒混凝土预制底板其中肋梁内设置钢筋笼, 钢筋笼由肋梁纵筋 4 ϕ 8 和箍筋 5 ϕ 6 构成的, 底板钢筋网由纵向分布钢筋 ϕ 8@150 和横向分布钢筋 ϕ 6@250 构成的, 以约束混凝土并承担开裂后的拉力。所有钢筋的保护层厚度均满足规范要求, 以确保试件的耐久性。

2.3. 堆载试验

2.3.1. 试验准备

如图 5 所示, 在试验装置内的试件上均匀布置堆积重物进行加载。试件的净跨度 L_0 取 3400 mm, 支承条件为一端采用固定铰支座, 一端采用滚动铰支座, 以确保试件在弯曲过程中可自由转动而无附加轴力。堆积荷载采用沙袋与砖块均布堆载的方式, 为保证均布堆载的准确性与可重复性, 所有加载单元均经预先筛选与质量标定。每袋砂袋质量统一为 20.0 kg, 允许偏差 \pm 0.2 kg。砖块按规格分为大、小两类: 大砖单块质量控制在 30.0 kg, 允许偏差 \pm 0.2 kg; 小砖单块质量为 2.5 kg, 允许误差 \pm 0.5 kg。通过大、小砖块的组合使用, 实现荷载的灵活分级与精确配平。在试验加载最终阶段, 接近试件极限承载力时, 试件跨中及支座附近绑扎防护缓冲带, 以约束混凝土爆裂碎片的飞散, 防止试件突发脆性破坏导致的冲击危害, 确保试验人员及设备安全。



Figure 5. Site installation diagram

图 5. 场地装置图

2.3.2. 测量内容

位移测量。为准确得到陶粒混凝土预制底板在弯曲荷载作用下的变形特征, 沿板长方向布置 5 个竖向位移测点, 具体位置为: 两端支座中心、三分点截面、跨中截面及三分之二跨截面, 其中跨中截面布置了三个沿板宽均匀分布的测点, 以测得横向变形差异并防止局部数据缺失, 测点布置如图 6 所示。该布置方案可得到完整的挠度曲线, 并通过支座位移实现挠度数据的支点修正, 确保跨中挠度的计算精度。位移传感器数据通过 DHDAS 静态应变测试系统同步采集。

钢筋应变片布置位置如图 7 所示, 为全面监测钢筋在加载过程中的受力状态, 试验在预制底板的纵

向分布钢筋以及肋梁纵筋关键位置布置了应变片。共设置 5 个对称测区，布置 35 个应变测点，测区分别位于跨中、加载点及支座附近等控制截面，以捕捉钢筋应变随荷载变化的规律。由于采用堆积荷载加载方式，试件底部受拉区全部钢筋在加载过程中均处于受拉工作状态，测点布置充分考虑对称性，确保数据冗余与可靠性，为分析钢筋屈服顺序、应力分布及叠合面的协同工作性能提供依据。

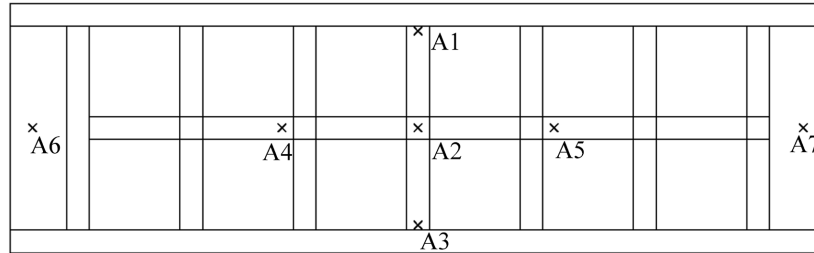


Figure 6. Displacement measurement point layout
图 6. 位移测点布置

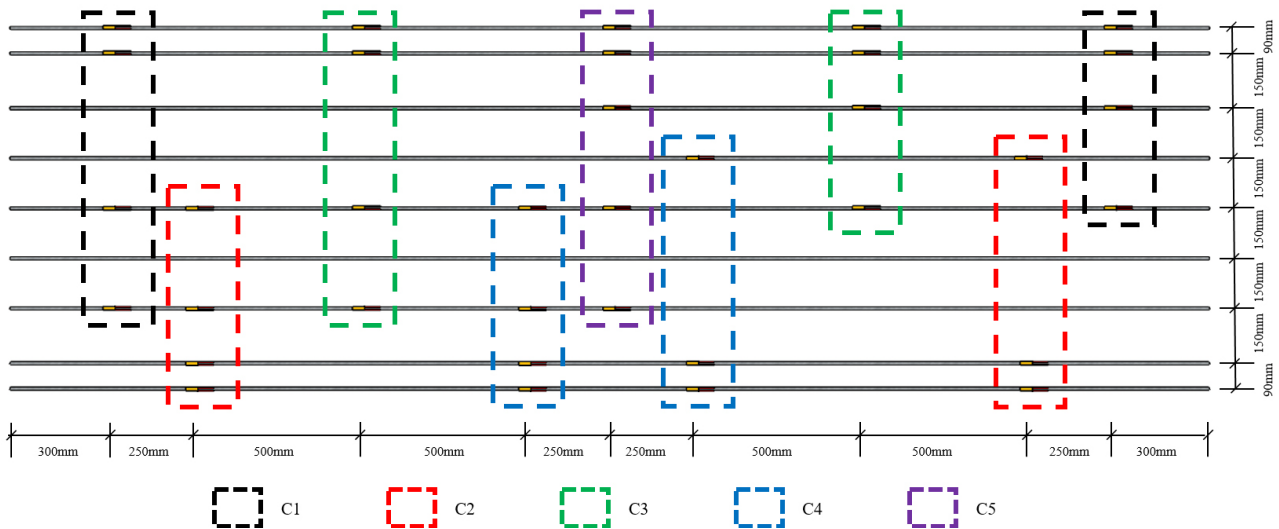


Figure 7. Strain gauge arrangement on reinforcement
图 7. 钢筋应变片测点布置

裂缝观测。数字图像技术(Digital Image Correlation, DIC)是一种先进的高精度光学测量技术，便于在试样表面进行非接触、全场变形测量。DIC 对试件板侧的跨中区域裂缝发展全过程进行监测，之后进行数据处理可以得到精确的裂缝发展云图以及裂缝开口宽度，DIC 的观测区域如图 8 所示。

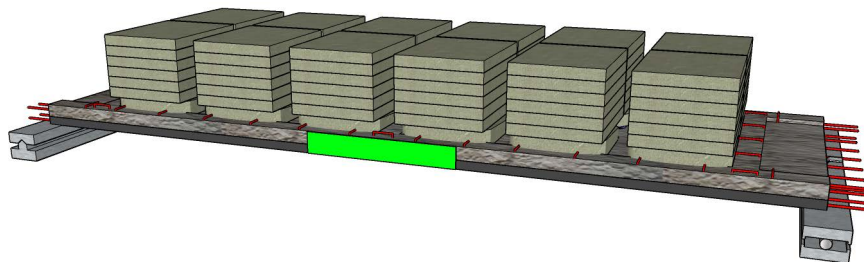


Figure 8. DIC measurement area
图 8. DIC 测量区域

加载方案。陶粒混凝土预制底板抗弯性能试验严格根据《混凝土结构试验方法标准》[21] GB/T 50152-2012, 采用分级加载制度, 分为预加载与正式加载两个阶段。预加载阶段: 预加载分三级, 每一级取估算开裂荷载值的 20%, 每级加载后应静置 10 min。预加载完成后, 卸荷至 0 kN/m², 检查并校正数据采集系统各通道的工作状态正常后, 进入正式加载。正式加载阶段: 正式加载时, 参照预估的试件开裂荷载和极限荷载来进行分级加载, 通过公式计算得到开裂荷载估算值为 2.61 kN/m², 极限荷载估算值为 10.69~12.81 kN/m²。在加载达到开裂荷载值的 90%之前, 每级加载值取开裂荷载预估值的 20%; 加载达到开裂荷载预估值的 90%之后, 每级加载值取开裂荷载预估值的 5%。超过开裂荷载估算值后, 加载达到极限荷载估算值的 90%之前, 每级加载值取极限荷载估算值的 10%; 加载到达极限荷载估算值的 90%以后, 每级加载值取极限荷载估算值的 5%。每级加载后应静置 15 min, 待试件变形基本稳定以后, 观察板底及板侧的裂缝发展并测量板底最大裂缝宽度, 读取挠度值和应变值。试件破坏后停止加载, 记录极限荷载与破坏形态。

2.4. 试验现象及破坏

如图 9 所示, 试件 N4C4R20 底面裂缝的发展过程及局部破坏细节。该试件主裂缝出现于网格线 36 至 40 区段(对应跨中偏左约 1/4 跨位置), 裂缝扩展路径受跨中横肋约束, 始终局限于肋宽范围内未向两侧板面穿越, 表明横肋对裂缝扩展具有明显的导向与限制作用。随着荷载接近极限荷载, 受压区 CC 层出现显著的压溃与层间剥离现象, 混凝土被压溃和剥落的现象。值得注意的是, 裂缝在厚度方向的扩展并非直线穿透, 而是沿空心保温模具的侧壁边缘绕行延伸, 形成“空心保温模具边缘诱导型”贯通路径。这一特征表明, 空心保温模具 - 混凝土界面为裂缝扩展的薄弱通道, 空心保温模具的存在改变了裂缝的局部扩展轨迹。

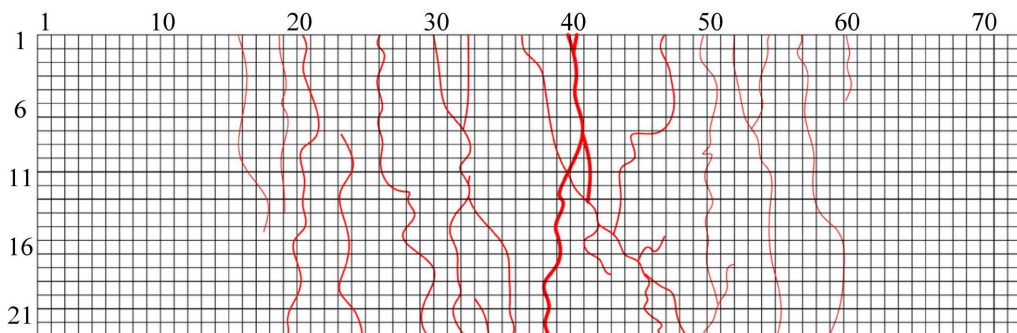


Figure 9. Typical failure modes and crack distributions
图 9. 典型破坏模式及裂缝分布

3. 试验结果及其分析

3.1. 荷载 - 位移曲线

所有测点的荷载 - 位移曲线如图 10 所示。曲线呈三阶段特征, 完整的反映了试件从弹性到破坏的受力全过程: 试件在弹性阶段位移时, 随荷载线性增长, 截面刚度保持恒定, 试件处于全截面工作状态。此时受拉区混凝土尚未开裂, 陶粒混凝土与普通混凝土协同变形良好。试件处于裂缝发展阶段时, 曲线斜率明显降低, 标志着受拉区混凝土开裂导致截面刚度退化。位移增速加快, 中性轴逐渐上移, 随着荷载的增加, 裂缝逐渐发展成贯穿裂缝。试件处于破坏阶段时, 曲线趋于平缓, 位移增速显著快于荷载增长。受拉钢筋屈服, 裂缝宽度迅速扩展, 受压区陶粒混凝土达到抗压极限并被压碎。极限荷载对应的跨中挠度达 112.2 mm, 位移延性系数满足受弯构件要求, 呈现典型的延性破坏特征。

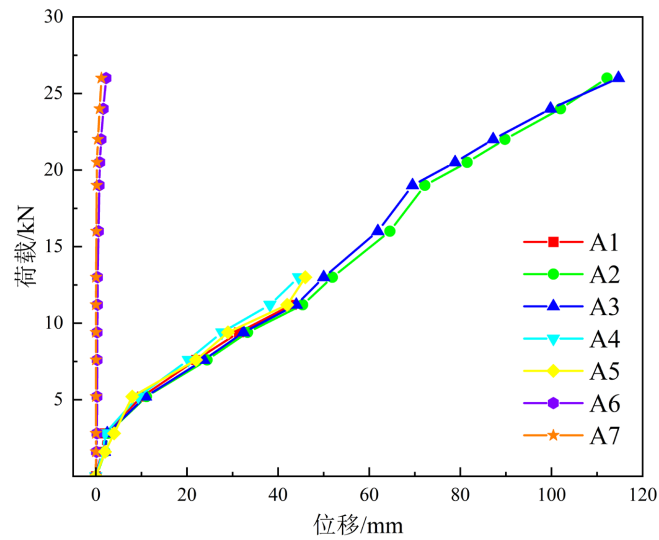


Figure 10. Load-displacement curve

图 10. 荷载 - 位移曲线

3.2. 荷载 - 应变曲线

(1) 混凝土荷载 - 应变曲线

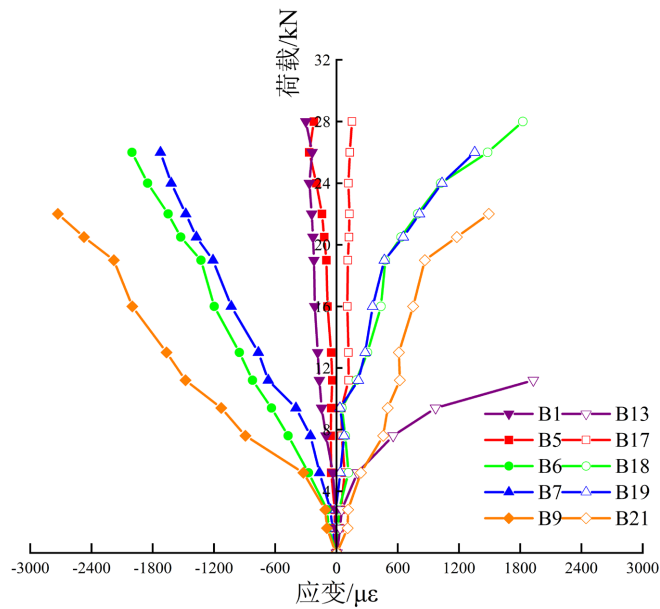


Figure 11. Concrete load-strain curve

图 11. 混凝土荷载 - 应变曲线

试件混凝土表面关键测点的荷载 - 应变关系如图 11 所示。试件初始加载阶段，混凝土应变与荷载保持严格的线性关系，表明该阶段截面处于整体弯曲状态，应变沿跨度方向分布均匀，未出现明显的刚度突变或应力集中现象。初始裂缝萌生后，跨中、三分点及四分点位置的应变呈线性行为且量值一致。开裂后，所有试件均出现非线性应变增长。试件最大压应变均出现在三分点位置，最大拉应变位于四分点。试件屈服后，底面受拉区边缘附近出现拉应变的快速非线性增长，应变值远超混凝土极限拉应变，导致

保护层混凝土与核心混凝土剥离，形成沿钢筋的纵向劈裂裂缝。该局部剥离削弱了截面有效高度，加速了刚度退化。最终，顶部非线性压应变的快速增长引起受压区压溃及试件破坏。

(2) 钢筋荷载 - 应变曲线

分布钢筋的荷载 - 应变曲线如图 12 所示，分布钢筋的计算屈服应变为 $2495 \mu\epsilon$ 。初始加载阶段，分布钢筋测点应变随荷载线性增长，证实试件在初裂前保持弹性。初始贯穿裂缝形成后，分布钢筋应变快速增长，在荷载 - 应变曲线上表现为拐点，标志着非线性行为开始。该响应归因于试件内部力的重分布。试件屈服时，分布钢筋应变接近屈服阈值。随着荷载的增加，分布钢筋应变近似线性增长。极限状态时，受压区混凝土压溃与分布钢筋极限应变发展同时发生。

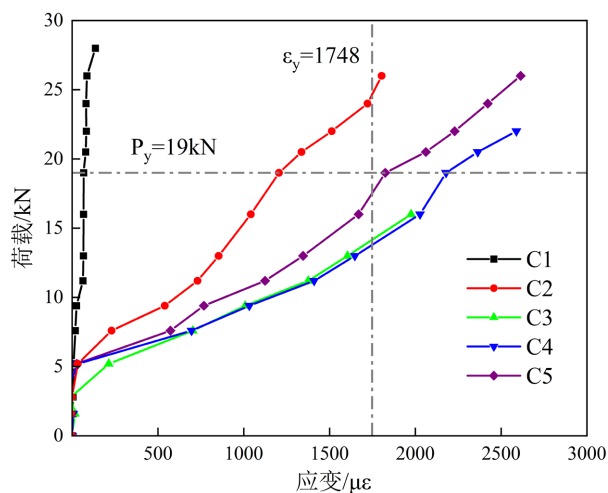


Figure 12. Steel load-strain curve

图 12. 钢筋荷载 - 应变曲线

3.3. 平截面假定验证

(1) 跨中截面高度应变分布

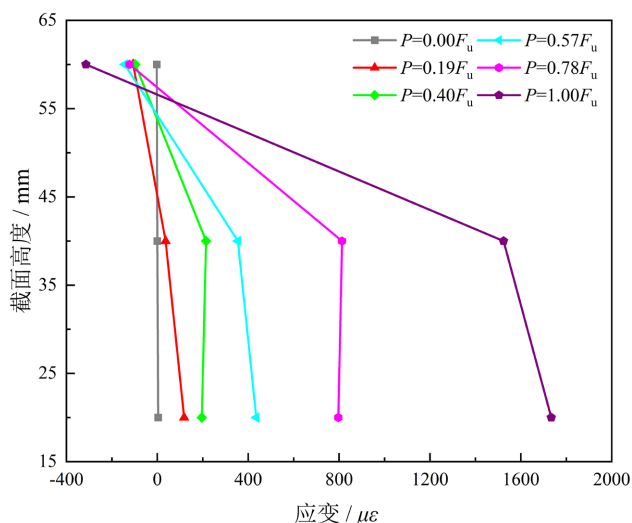


Figure 13. Strain distribution along mid-span section height

图 13. 跨中截面高度应变分布

图 13 展示了试件跨中截面在不同荷载水平下的混凝土应变分布曲线,为验证平截面假定的适用性及揭示截面受力机制提供了试验依据。结果表明,在开裂前阶段($P \leq 0.2 F_u$),该阶段混凝土处于弹性工作状态,截面应变分布基本呈线性,符合平截面假定。中性轴位置稳定,位于截面高度中部偏上,受压区与受拉区应变绝对值大致对称,表明截面处于线弹性弯曲状态。混凝土开裂后至屈服阶段($P = 0.3 \sim 0.7 F_u$),随着受拉区混凝土开裂退出工作,拉应力向钢筋转移,受拉区应变快速增长,中性轴显著上移。应变分布在受拉区出现明显的非线性偏离,但受压区仍保持较好的线性特征。该阶段平截面假定在受压区依然适用,全截面采用时需引入受拉区刚度折减系数。当 $P \geq 0.9 F_u$ 时,荷载接近极限时,受压区混凝土进入非线性强化段,受拉区钢筋屈服后塑性变形发展,截面应变分布的非线性程度加剧,整体刚度退化。

(2) 板侧应变演化特征

基于 DIC 处理结果对试件侧面在特征荷载下的应变演化特征进行分析。图 14 直观展示了预制底板从初始加载到破坏全过程其侧面应变云图的变化情况。初始加载阶段($P = 0.2 F_u$),板中面出现微裂缝;裂缝发展阶段($P = 0.2 \sim 0.8 F_u$),裂缝走向大致垂直于主拉应力方向,并向上部发展。试件屈服至破坏阶段阶段($P = 0.8 \sim 1.0 F_u$),主导损伤裂缝演化显著,竖向裂缝区主要集中于肋梁-板界面。该图像直观反映了叠合板在受弯作用下的裂缝演化规律及其与平截面假定的符合性。

空心保温模具通过改变截面刚度分布与应力传递路径,对试件力学行为产生显著改变,其影响可由 DIC 技术精准量化与可视化。应力重分布上,弹性阶段模具周边混凝土应变较肋梁区域高 10%~15%,呈现轻微应力集中;开裂后肋梁与模具交接处应变峰值较相邻区域高 20%~30%,成为应力集中核心区;极限阶段应力重分布趋于稳定,拉应力由肋梁钢筋完全承担,压应力集中于顶面受压区,模具周边因长期应力集中成为初始损伤萌生点。破坏模式上, DIC 监测的裂缝演化特征表明,裂缝未沿直线穿透截面,而是沿模具侧壁绕行形成“诱导型”贯通路径,扩展速率较混凝土高 30%,而纵横向肋梁网格约束裂缝全域扩展,最终试件呈现延性破坏, DIC 全程未监测到模具与混凝土界面脱粘的应变突变,证实了二者协同工作性能良好。

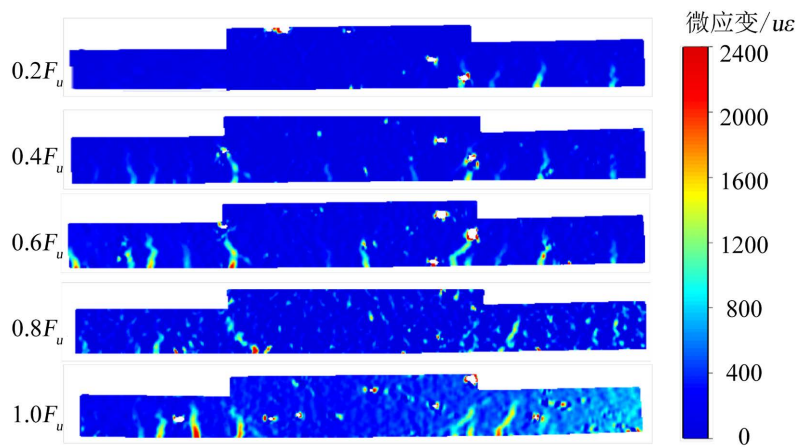


Figure 14. Strain distribution at cross-sectional height under DIC monitoring
图 14. DIC 监测下截面高度应变分布

4. 研究的局限性

本研究通过足尺堆载试验,结合 DIC 非接触测量技术,验证了陶粒混凝土预制底板在受弯过程中平截面假定的适用性。DIC 方法能够实现全场、非接触的应变监测,克服了传统点式测量在空间分辨率与数据连续性方面的局限,为复杂结构截面应变分布的精细化识别提供了新的技术手段。试验结果表明,

该方法可有效捕捉开裂前后及极限阶段的应变演化特征，直观呈现截面应变分布规律，从而为平截面假定的验证提供可靠的数据支撑。

基于上述方法可行性的初步验证，未来可围绕 DIC 技术在复合结构力学行为研究中的应用开展系统拓展。首先，可结合多种图像处理与应变场重构算法，建立适用于陶粒混凝土预制底板的 DIC 高精度应变分析方法，明确其在裂缝识别、应变局部化捕捉及界面协同工作机制中的适用条件与可靠性。其次，可进行偏载、疲劳、长期加载等复杂工况，评估 DIC 技术非稳态受力过程中的测量稳定性，并探讨不同加载方式下平截面假定的适用边界。此外，可开展 DIC 与应变片、光纤传感等多技术融合的协同监测研究，通过多源数据的互补与校核，提升应变场反演的综合精度。最后，可结合有限元数值模拟，建立基于全场应变观测的平截面假定适用性判别方法，为同类复合结构的设计理论发展与性能评估提供更为坚实的方法支撑。

5. 结论

本文通过对比试验现象和数据处理分析，得到以下结论：

(1) 试件破坏时跨中挠度达 112.2 mm，呈现典型延性破坏特征；主裂缝受横肋有效约束未向板面穿越，受压区陶粒混凝土压溃与钢筋屈服同步发生，整体结构协同工作良好，满足受弯构件设计要求。

(2) 荷载 - 位移曲线呈现弹性、裂缝发展、破坏三阶段特征；混凝土应变在开裂后非线性增长，中性轴上移；钢筋应变在开裂后快速增长并于极限状态前接近屈服阈值，反映了试件刚度退化与内力重分布全加载过程。

(3) 开裂前($P \leq 0.2 F_u$)跨中截面应变呈线性分布，平截面假定成立；开裂后受拉区应变非线性偏离，但受压区仍保持线性；极限阶段($P \geq 0.9 F_u$)受压区非线性加剧。DIC 云图直观验证了裂缝演化与应变分布规律，截面高度应变分布和应变演化特征两者共同证实预制底板满足平截面假定。

基金项目

湖南科技大学博士启动基金“基于压电陶瓷的装配式剪力墙叠合面地震损伤机理分析”(项目编号：E52292)。

参考文献

- [1] Pei, J., Pan, X., Lv, Z., Yu, H., Tu, G. and Jiang, F. (2024) Synergistic Mechanism to Prepare Ultra-Lightweight Ceramsite Using Multiple Industrial Solid Wastes. *Construction and Building Materials*, **425**, Article 136139. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136139>
- [2] Huang, W., Gong, M., Huang, Q., Liu, Z., Wang, J., Xue, F., et al. (2025) Research Progress on the Industrial Solid Waste-Based Ceramsite: Composition, Curing and Application. *Materials Today Communications*, **49**, Article 113769. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.113769>
- [3] 赵增丰, 蒲紫盈, 林璨, 等. 免烧陶粒及陶粒混凝土性能研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(20): 84-96.
- [4] 陈宇良, 李浩, 吴辉琴, 等. 三向受压状态下轻骨料混凝土的变形性能及损伤分析[J]. 实验力学, 2021, 36(5): 668-676.
- [5] 刘雨珊, 庞建勇, 姚韦靖. 页岩陶粒轻骨料混凝土高温后蠕变特性[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(5): 1096-1104.
- [6] 李玉平, 虞秀勇, 胡胜. 轻骨料混凝土吸声性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(12): 112-119.
- [7] 王建民, 肖自强, 范奕涛, 等. 组合混凝土界面粘结性能多因素正交试验分析[J]. 材料导报, 2022, 36(2): 87-92.
- [8] Wang, X., Sun, H., Hou, Y. and Li, Y. (2024) Study on Seismic Performance of Steel Frame Installed New-Type Lightweight Concrete Composite Exterior Wallboard. *Buildings*, **14**, Article 2224. <https://doi.org/10.3390/buildings14072224>
- [9] Ma, S., Li, L. and Bao, P. (2021) Seismic Performance Test of Double-Row Reinforced Ceramsite Concrete Composite Wall Panels with Cores. *Applied Sciences*, **11**, Article 2688. <https://doi.org/10.3390/app11062688>

-
- [10] Bu, C.M., Yang, H.Y., Sun, Y., *et al.* (2020) Experimental Study on Flexural Performance of Fabricated Ceramsite Concrete Lightweight Wall Panel. *E3S Web of Conferences*, **204**, Article 1007.
- [11] Gao, C., Li, Z., Ma, H., Li, M., Shi, N. and Tian, S. (2025) Study on the Flexural Performance of Composite Wall Panels with Ceramsite Foam Concrete and Normal Concrete. *Buildings*, **16**, Article 128. <https://doi.org/10.3390/buildings16010128>
- [12] 王新堂, 窦华坤, 梧松. 冷弯薄壁钢-陶粒混凝土组合楼板静载性能研究[J]. 建筑结构学报, 2019(S1): 54-60.
- [13] 孟邳恒, 王新堂, 刘链波. 冷弯薄壁钢-陶粒混凝土组合楼板火灾响应试验研究[J]. 空间结构, 2021, 27(1): 52-59+36.
- [14] Li, L., Ma, S., Bao, P. and Wang, H. (2022) Effect of Hidden Column Type on Seismic Performance of the Insulated Sandwich Wall Panel Joints with Ceramsite Concrete Layer. *Buildings*, **12**, Article 2214. <https://doi.org/10.3390/buildings12122214>
- [15] Sun, J., Li, R.Y.M., Jiao, T., Wang, S., Deng, C. and Zeng, L. (2022) Research on the Development and Joint Improvement of Ceramsite Lightweight High-Titanium Heavy Slag Concrete Precast Composite Slab. *Buildings*, **13**, Article 3. <https://doi.org/10.3390/buildings13010003>
- [16] Chen, D., Ding, Q., Zhang, G., Zhou, P., Deng, Y., Wan, C., *et al.* (2025) Development and Characteristics of Sustainable Ultra-High Performance Concrete Utilizing Coal Gangue Ceramsite. *Construction and Building Materials*, **459**, Article 139676. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139676>
- [17] 张延宾, 谷倩, 雷晓天, 等. 大尺寸大开间页岩陶粒混凝土双向叠合板足尺试验研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(2): 27-33+112.
- [18] 普通混凝土力学性能试验方法标准, GB/T 50081-2002 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [19] 轻骨料混凝土结构技术规程, JGJ 12-2006 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [20] 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法 GB/T 228.1-2021 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- [21] 混凝土结构试验方法标准, GB/T 50152-2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.