

特约论文



于峰 博士,二级教授,博士生导师,安徽省皖江学者特聘教授、安徽省杰出青年科学基金获得者、安徽省技术领军人才、安徽省住建系统优秀中青年专家、安徽省教学名师、安徽省优秀科研创新团队负责人、安徽省优秀研究生指导团队负责人、安徽省结构工程教学团队负责人。安徽工业大学建筑工程学院院长、安徽省冶金固废绿色建造工程技术研究中心主任、安徽省乡村建设协同技术服务中心常务副主任,同时担任7个学会或协会理事和专家委员。主要研究方向为新型组合结构、纤维增强复合材料应用,主持国家自然科学基金4项、省部级课题10余项。发表论文168篇,其中SCI论文101篇、EI论文120余篇;出版学术专著3部;主编省级和行业标准4部,参编行业标准5部;授权发明专利37件。以第一完成人获省部级科技进步一、二等奖各2项,省教学成果一、二等奖等,另以参与人获省部级以上奖励4项。

波形钢板-特细铁尾矿砂混凝土叠合板变形分析

罗宏¹, 乔利杰², 高擎¹, 王辉², 于峰²

(1. 马钢集团设计研究院有限责任公司, 安徽 马鞍山 243000; 2. 安徽工业大学建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243032)

摘要:以特细铁尾矿砂混凝土替代普通混凝土,设计制作波形钢板-特细铁尾矿砂混凝土叠合楼板试件,并开展抗弯性能试验,研究抗剪键类型、叠合层厚度、波形钢板含钢率、铁尾矿砂掺量和混凝土类型等关键参数对试件破坏形态与应变行为的影响。结果表明:抗剪键类型及其布置列数的差异导致波形叠合板主要呈现滑移破坏和受弯破坏2种典型破坏模式,所有试件在受力过程中均依次经历了弹性、裂缝发展、屈服与破坏4个特征阶段;跨中截面混凝土应变沿板高方向分布基本符合平截面假定。在弹性阶段,各参数变化对受拉钢筋纵向应变、波形钢板剪切应变及受压区混凝土应变的影响均较为有限;进入裂缝发展、屈服及破坏阶段后,随着叠合层厚度、波形钢板含钢率和铁尾矿砂掺量的增加,荷载-应变曲线斜率增大,应变发展速度相应减缓,其中铁尾矿砂掺量为50%时试件的应变发展最慢,而抗剪键类型对应变发展的影响相对不显著。与普通混凝土相比,采用特细铁尾矿砂混凝土的叠合板表现出更慢的应变发展速度。本研究为特细铁尾矿砂在叠合楼板中的实际应用提供了可行方法,同时也为缓解我国砂石资源短缺问题、推动铁尾矿砂的大规模资源化利用提供了科学依据。

关键词:装配式结构;叠合板;波形钢板;铁尾矿砂;混凝土板;抗弯性能;应变分析;资源化利用

中图分类号: TU 528.01 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.25065



收稿日期: 2025-06-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078001);安徽省优秀科研创新团队(RZ2300002950);安徽省协同创新项目(GXXT-2022-074);马鞍山市科学技术计划项目(2022KN-18);安徽省住建厅科学技术项目(2022-YF114);马鞍山市科技创新攻坚计划项目(2024RGZN002)

作者简介: 罗宏(1979—),男,安徽宿松人,工程师,主要研究方向为建筑设计。

通信作者: 于峰(1980—),男,安徽砀山人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为新型组合结构、纤维增强复合材料应用。

引文格式: 罗宏,乔利杰,高擎,等.波形钢板-特细铁尾矿砂混凝土叠合板变形分析[J].安徽工业大学学报(自然科学版),2025,42(6):586-598.

Deformation Analysis of Corrugated Steel Sheet-Ultra Fine Iron Tailings Sand Concrete Composite Slabs

LUO Hong¹, QIAO Lijie², GAO Qing¹, WANG Hui², YU Feng²

(1. Magang Group Design & Research Institute Co., Ltd., Maanshan 243000, China; 2. School of Architectural Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

Abstract: Specimens of composite floor slabs with corrugated steel plates and ultra-fine iron tailings sand concrete were designed and fabricated by replacing ordinary concrete with ultra-fine iron tailings sand concrete. Flexural performance tests were conducted to investigate the influences of key parameters, including the type of shear connectors, overlay thickness, corrugated steel plate ratio, iron tailings sand content, and concrete type, on the failure modes and strain behaviors of the specimens. The results indicate that the differences in shear connector types and arrangement configurations cause the corrugated composite slabs to be primarily categorized into two failure modes: slip failure and flexural failure. All specimens sequentially undergo four typical stages during loading: elastic phase, crack development phase, yielding phase, and failure phase. The concrete strain at the mid-span section basically conforms to the plane section assumption along the slab height direction, exhibiting a linear distribution. During the elastic stage, the influence of various factors on the longitudinal strain of the tensile reinforcement, shear strain of the corrugated steel plate, and compressive strain of the concrete is relatively weak. Upon entering the crack development, yielding, and failure stages, as the overlay thickness, corrugated steel ratio, and iron tailings content increase, the slope of the load-strain curve is enhanced, and the strain development rate is correspondingly slowed. The slowest strain development is observed when the iron tailings content is 50%, whereas the type of shear connector shows no significant influence. Compared with ordinary concrete, composite slabs utilizing ultra-fine iron tailings concrete demonstrate a slower strain development rate. This study provides a feasible method for the application of ultra-fine iron tailings in composite slabs and also offers a scientific basis for alleviating the shortage of sand and gravel resources in China and promoting the large-scale resource utilization of iron tailings.

Keywords: prefabricated structure; composite slab; corrugated steel sheet; iron tailings sand; concrete slab; bending resistance; strain analysis; resource utilization

铁尾矿作为矿山开采产生的主要固体废弃物,在我国年产量高达8.4亿t^[1],但综合利用率较低,大量堆存的铁尾矿不仅占用土地资源,还伴随着环境与安全风险^[2-3]。因此,推动铁尾矿的资源化利用已成为实现矿业可持续发展的重要课题。与此同时,随着我国建筑行业向工业化与绿色化转型,装配式建筑凭借其施工效率高、现场污染少、构件质量易控制等优势,已成为建筑行业发展的主流趋势^[4]。其中叠合板作为装配式混凝土结构中的核心受力构件,其性能与经济性直接影响装配式建筑的整体质量与推广应用效果。目前,工程中常用的叠合楼板形式主要包括压型钢板混凝土组合楼板、预制带肋底板混凝土叠合楼板和钢筋桁架混凝土叠合楼板,然而这3种形式均存在明显技术瓶颈,其中:压型钢板-混凝土组合楼板虽具备施工便捷、承载力较高

等优点,但其底部钢板长期暴露在空气中易发生锈蚀,且钢材的耐火性能较差,在潮湿、腐蚀性环境或对防火有较高要求的工程中应用受限;预制带肋底板混凝土叠合板虽整体工作性能较强,具有较高的抗弯承载力和抗弯刚度,但预制底板上的混凝土肋需在施工现场进行二次浇筑,不仅增加现场作业量,还显著降低生产效率;钢筋桁架混凝土叠合板通过钢筋桁架实现叠合层与预制层的可靠连接,虽能有效提高楼板的整体抗弯刚度和抗弯承载力,但现行规范对其楼板厚度要求较高,且钢筋桁架的加工、安装流程繁杂,导致构件生产与现场施工效率低下。在此背景下,开展波形钢板-特细铁尾矿砂混凝土叠合板变形性能研究,既契合建筑工业化与资源循环利用的战略需求,又能有效突破传统叠合板技术瓶颈,为铁尾矿资源化利用提供新路径,对推动建筑业

绿色转型与矿业可持续发展具有重要意义。

在铁尾矿资源化利用的研究进程中,国内外学者通过以铁尾矿砂替代传统建筑用砂制备混凝土,并将其应用于工程结构,已在配合比优化^[5-6]、基本力学性能测试^[7-8]及耐久性评估^[9-11]等方面积累了较多成果,初步验证了铁尾矿用于混凝土结构的技术可行性。然而现有研究仍存在局限:一方面,相关试验^[12-13]、理论分析与数值模拟^[14-15]多聚焦于粗粒径铁尾矿砂;另一方面,针对特细铁尾矿砂的研究相对匮乏。而特细铁尾矿砂在总排放量中占比较高,若无法有效利用,将持续造成资源浪费与环境压力。尽管特细铁尾矿砂存在黏聚性差、保水性较弱及单独配制时混凝土强度偏低等问题^[16];但其颗粒密实度高,与机制砂合理复合后能够有效填充骨料间隙,改善拌合物和易性并具备良好的力学性能^[17]。目前,关于特细铁尾矿砂在叠合板等重要受力构件中的应用研究尚未开展,其与新型叠合板结构的匹配性、受力性能及破坏机理尚不明确,不仅制约了该材料的规模化资源化利用,也限制了装配式叠合板性能优化与创新的可能路径。基于此,本文提出一种以波形钢板作为抗剪键的新型叠合楼板结构,采用特细铁尾矿砂混凝土替代普通混凝土设计制作试件,并开展抗弯性能试验,研究混凝土类型、叠合层厚度、波形钢板含钢率和铁尾矿砂掺量等关键参数对试件破坏形态与应变特征的影响,揭示其受弯破坏机制,以拓展特细铁尾矿砂资源化利用的技术路径,并为该类波形钢板-特细铁尾矿砂混凝土叠合板的工程应用提供理论依据。

1 试验概况

波形钢板-特细铁尾矿砂混凝土叠合楼板的抗弯性能试验主要包括试件设计、材料基本性能测试、测量方案设计与加载方案制定。

1.1 试件设计

设计 12 块叠合楼板试件,其整体结构与配筋情

况如图 1。其中:10 块为波形钢板-特细铁尾矿砂混凝土叠合楼板,标记为 TCB-1~TCB-10;2 块为钢筋桁架-特细铁尾矿砂混凝土与波形钢板-普通混凝土叠合楼板,相应编号为 TCB-11, NCB-1。

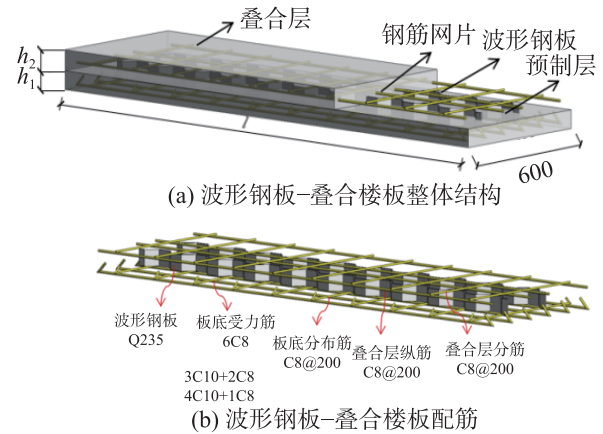


图1 试件尺寸和配筋

单位:mm

Fig. 1 Size and reinforcement of the specimens Unit:mm

叠合楼板的制作分为预制底板和叠合层两部分。试件预制底板厚度(h_1)统一为 60 mm,配筋率为 0.5%,保护层厚度为 15 mm;为提高结构整体刚度并防止吊装过程中板面开裂,在叠合层内配置直径为 8 mm 的 HRB400 钢筋,该钢筋同时承担纵筋与分布筋的功能。抗剪键采用 Q235 钢板和钢筋桁架 2 种形式,钢筋桁架的上弦杆、下弦杆及腹杆均采用 C8 钢筋,沿板长方向布置一列;试验过程中同时考虑多种变量的影响,包括受力筋配置(3C10+2C8, 4C10+1C8, 6C8)、叠合层厚度($h_2=60, 70, 80$ mm)、含钢率($\rho=0.04\%, 0.20\%, 0.30\%, 0.60\%, 0.90\%$)及铁尾矿砂置换率($\gamma=30\%, 40\%, 50\%, 60\%$)等。叠合楼板试件的主要参数如表 1。表 1 中:SB 表示抗剪键类型;B 表示抗剪键为波形钢板;G 表示抗剪键为钢筋桁架; l 表示叠合楼板的跨度; L_k 表示抗剪键沿长边方向布置的长度; h 表示叠合楼板的厚度; h_w 表示抗剪键的高度; n 表示抗剪键布置的列数。

表 1 叠合楼板试件的主要参数

Tab. 1 Main parameters of the composite slabs specimens

试件编号	$l \times b \times h / (\text{mm} \times \text{mm} \times \text{mm})$	$h_1 \times h_2 / (\text{mm} \times \text{mm})$	$\gamma / \%$	预制层受力筋	SB	n	h_w / mm	L_k / mm	$\rho / \%$	破坏形态
NCB-1	2 000×600×120	60×60	0	6C8	B	2	60	1 880	0.60	
TCB-1	2 000×600×120	60×60	50	6C8	B	2	60	1 880	0.60	受弯
TCB-2	2 000×600×130	60×70	50	3C10+2C8	B	2	65	1 880	0.60	破坏
TCB-3	2 000×600×140	60×80	50	4C10+1C8	B	2	70	1 880	0.60	
TCB-4	2 000×600×120	60×60	50	6C8	B	1	60	376	0.04	滑移
TCB-5	2 000×600×120	60×60	50	6C8	B	1	40	1 880	0.20	破坏

续表

试件编号	$l \times b \times h / (\text{mm} \times \text{mm} \times \text{mm})$	$h_1 \times h_2 / (\text{mm} \times \text{mm})$	$\gamma / \%$	预制层受力筋	SB	n	h_w / mm	L_k / mm	$\rho / \%$	破坏形态
TCB-6	2 000×600×120	60×60	50	6C8	B	1	60	1 880	0.30	滑移
TCB-7	2 000×600×120	60×60	50	6C8	B	3	60	1 880	0.90	破坏
TCB-8	2 000×600×120	60×60	30	6C8	B	2	60	1 880	0.60	
TCB-9	2 000×600×120	60×60	40	6C8	B	2	60	1 880	0.60	受弯
TCB-10	2 000×600×120	60×60	60	6C8	B	2	60	1 880	0.60	破坏
TCB-11	2 000×600×140	60×80	50	6C8	G	2	80	1 880	0.60	

1.2 材料基本性能测试

依据国家标准对试验所用材料的力学性能进行测试。其中:金属材料参照 GB/T 228.1—2010^[18] 进行拉伸试验,具体性能参数见表 2;混凝土材料参照 GB/T 50081—2019^[19] 进行测试,其水胶比统一为 0.5。

表 2 金属材料的力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of metallic materials

材料	屈服强度/ 极限强度/		弹性模量/	泊松比
	MPa	MPa		
受力筋C8	412	521	2.01×10^5	—
受力筋C10	412	528	1.99×10^5	—
波形钢板	239	336	2.02×10^5	0.31

各叠合板的预制底板及叠合层均采用强度为 C30 的特细铁尾矿砂混凝土浇筑,其在不同铁尾矿砂掺量下的力学性能测试结果如表 3。

表 3 不同掺量下特细铁尾矿砂混凝土的力学性能

Tab. 3 Mechanical properties of ultra fine iron tailings sand concrete at different contents

编号	水胶比	铁尾矿砂掺量/%	轴心抗压强度/MPa	劈裂抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa
T1	0.5	30	24.2	4.4	3.17×10^4
T2	0.5	40	25.8	4.6	3.23×10^4
T3	0.5	50	28.9	5.9	3.15×10^4

1.3 测点布置与加载方案

采用四分点加载方式,通过分级荷载制度进行控制,加载方式示意图如图 2(a)。试件变形测量方案如下:在纯弯段等间距布置 3 个位移计测量挠度,两端支座处各设置 1 个位移计以消除支座沉降的影响,所有位移计均与数据采集系统相连,测点布置如图 2(b)。

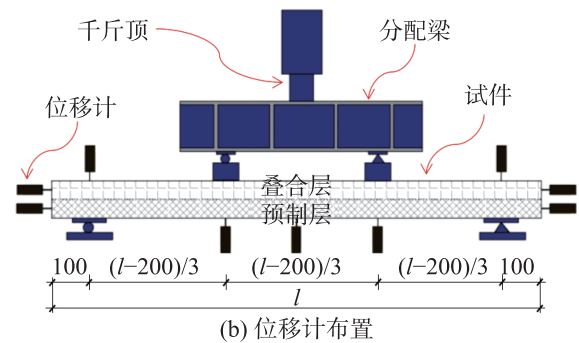
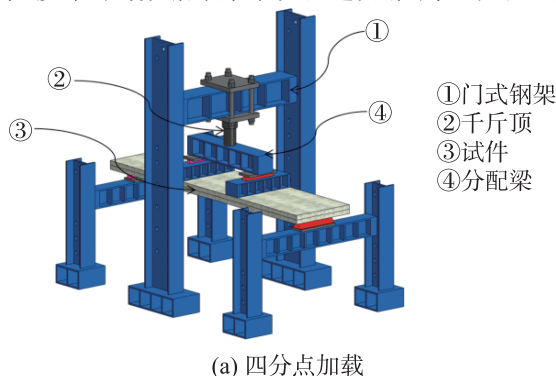


图 2 加载方式与位移计布置示意图 单位:mm

Fig. 2 Schematic diagram of the loading method and displacement gauge arrangement Unit:mm

为验证平截面假定,沿板高方向跨中截面布置 5 个应变片,如图 3(a);在叠合层上表面跨中区设置 3 个间隔 200 mm 的测点,用于测量受压区混凝土的应变,如图 3(b)。

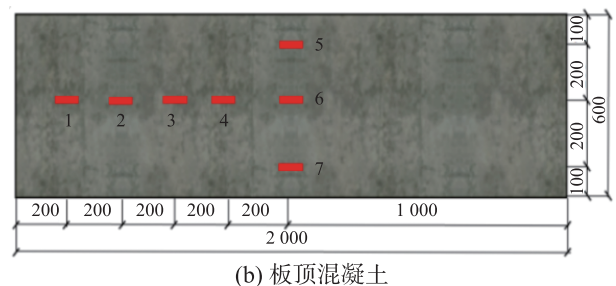
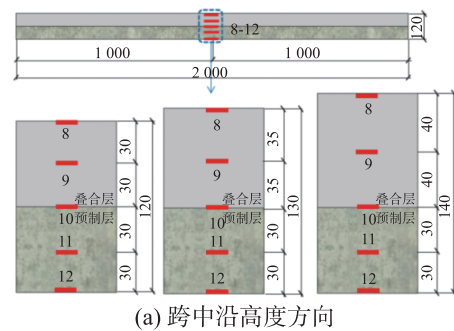


图 3 受压区混凝土应变片布置示意图 单位:mm

Fig. 3 Schematic diagram of strain gauge arrangement of concrete in compression zone Unit: mm

波形钢板、钢筋桁架和钢筋应变测点布置如图 4 所示。其中,跨中 (1/2) 作为关键测点,每个测点布置 3 个应变片,用于测量预制底板钢筋应变。

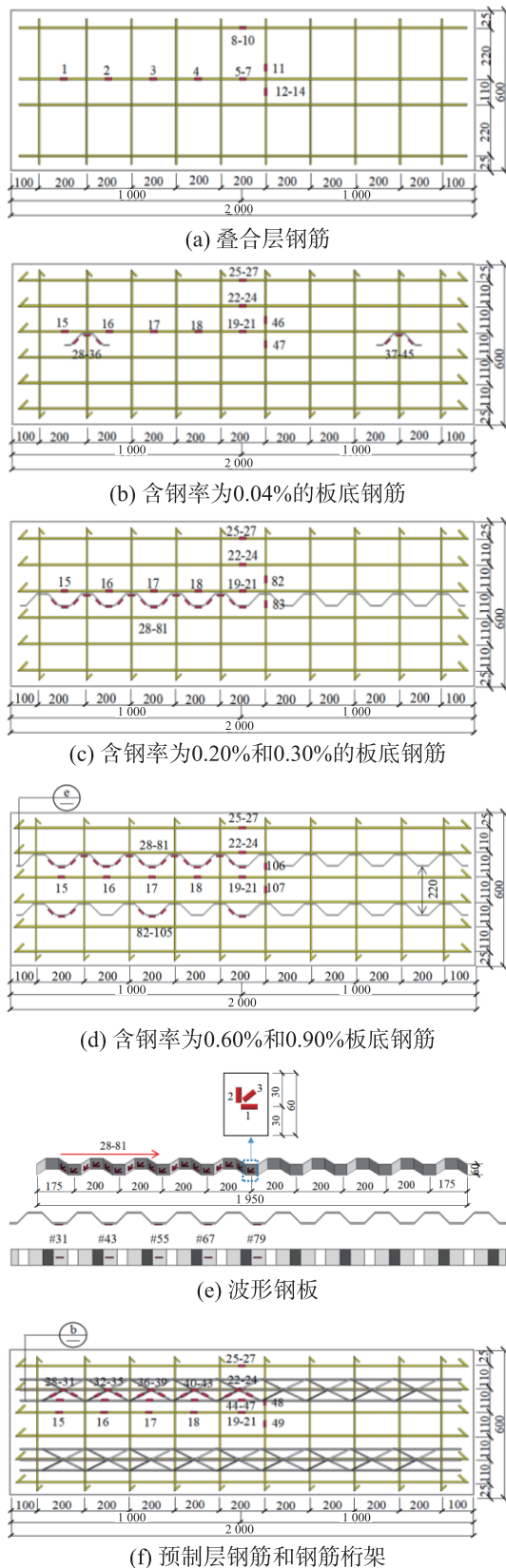


图4 波形钢板、钢筋桁架和钢筋应变片布置示意图 单位:mm
 Fig. 4 Schematic diagram of the corrugated steel plate, the reinforcing truss, and the strain gauge arrangement
 Unit: mm

为获取纵筋沿长度方向的应变分布,自跨中向支座方向等间距 200 mm 设置 5 个应变测点,如图 4(a)~(d)。波形钢板应变通过连续布置于波腹与波谷处的应变片进行采集,如图 4(e);钢筋桁架的应变测点布置于上弦杆、下弦杆和腹杆,共设置 5 个截面,每个截面布置 4 个应变片,如图 4(f)。

试验采用如下加载制度:在达到预估开裂荷载、屈服荷载及极限荷载前,每级荷载按预估极限承载力的 10% 递增,并维持稳定 5 min;当荷载临近上述关键状态时,加载增量调减为 5%,直至荷载下降至极限承载力的 80% 时停止试验。

2 结果与分析

2.1 破坏形态

根据试验结果,抗剪键类型及其布置列数的差异使试件破坏形态分为三类。当采用钢筋桁架作为抗剪键时(以试件 TCB-11 为例),试件表现为典型的受弯破坏特征——板底受拉钢筋与桁架下弦钢筋先后屈服,随后板顶混凝土压碎,同时受压区钢筋网片约束压碎区域的发展,其典型破坏形态如图 5。

当采用单列波形钢板作为抗剪键时(试件 NCB-1, TCB-1~TCB-3, TCB-6~TCB-10),该类波形钢板-特细铁尾矿砂混凝土叠合板同样发生受弯破坏,主要表现为受拉钢筋及波形钢板依次屈服,板顶混凝土被压碎,部分试件出现板底混凝土局部脱落现象;而受压区配置的钢筋网片有效抑制了混凝土压碎程度,使试件在破坏后仍保持较好的整体完整性,其典型破坏形态如图 6。

当采用双列或三列波形钢板作为抗剪键时(试件 TCB-4, TCB-5),叠合板发生滑移破坏。其破坏过程表现为:受拉钢筋与波形钢板先后屈服、预制层与叠合层间产生明显相对滑动并伴随水平裂缝发展,最终因上部混凝土压碎而导致试件失效,典型破坏形态如图 7。

与钢筋桁架叠合板相比,波形钢板叠合板的跨中极限挠度、受拉钢筋极限拉应变以及受压区混凝土极限压应变均有所提高,但其承载力略有降低;此外,在波形钢板叠合板中,发生滑移破坏的试件相较于受弯破坏的试件表现出更为急剧的破坏过程、更低的极限承载力以及更大的极限挠度与裂缝宽度。

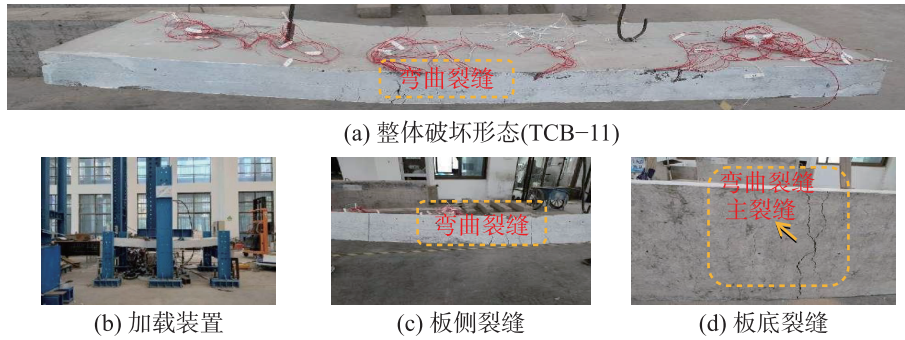


图5 钢筋桁架-特细铁尾矿砂混凝土叠合楼板受弯破坏典型形态

Fig. 5 Typical bending failure mode of reinforced joist-ultra fine iron tailings sand concrete composite slabs

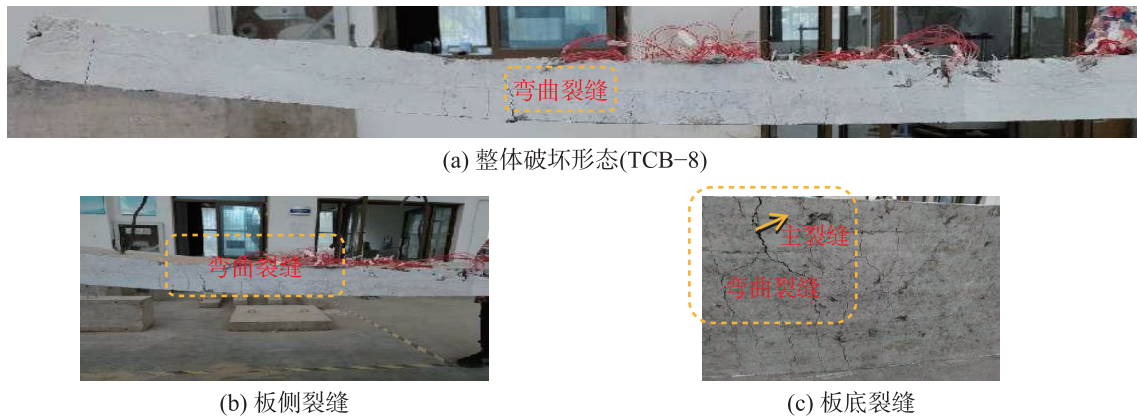


图6 波形钢板-特细铁尾矿砂混凝土叠合楼板受弯破坏典型受弯破坏形态

Fig. 6 Typical bending failure mode of corrugated steel sheet-ultra fine iron tailings sand concrete composite slabs

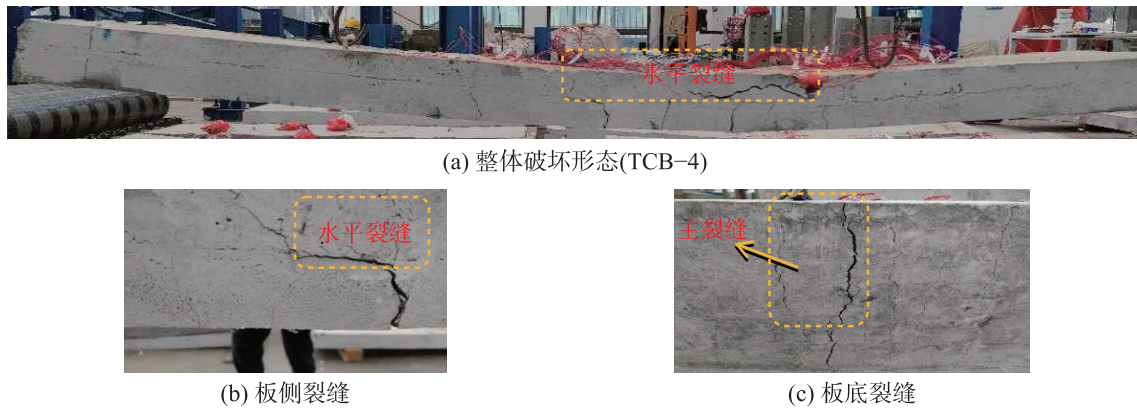


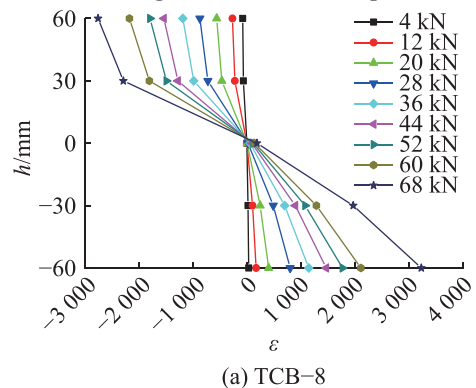
图7 波形钢板-特细铁尾矿砂混凝土叠合楼板滑移破坏典型滑移破坏形态

Fig. 7 Typical slip failure mode of corrugated steel sheet-ultra fine iron tailings sand concrete composite slabs

2.2 应变分析

2.2.1 平截面假定的符合性验证

图 8 为典型受弯试件 (TCB-8, TCB-9) 跨中截面的应变分布测定结果。如图 8 所示: 在整个加载过程中 (荷载从 0 kN 增至 68 kN), 试件跨中截面沿高度方向的混凝土应变随荷载增加基本呈线性增长; 各测点应变连线始终保持直线, 表明截面应变分布符合平截面假定。



(a) TCB-8

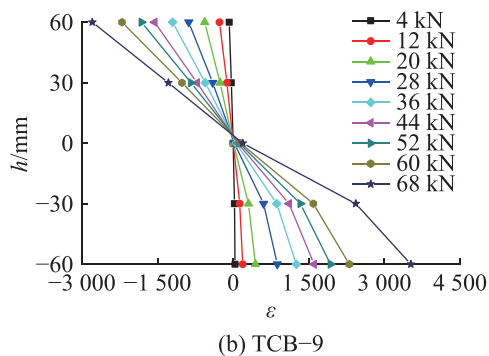


图8 受弯截面平截面假定验证

Fig. 8 Verification of flat section assumptions for flexural sections

2.2.2 受压区混凝土应变分析

图9为受压区混凝土的荷载-应变($N-\epsilon$)关系曲线,其变化过程可划分为4个典型阶段:在弹性阶段与裂缝发展阶段,曲线保持线性增长但斜率逐渐减小、曲率逐步增大;进入屈服与破坏阶段后,曲线偏离线性增长,斜率持续降低,混凝土应变持续增长直至压碎。该曲线的形态特征受混凝土类型、叠合层厚度、波形钢板含钢率、铁尾矿砂掺量及抗剪键类型等多因素影响,测试结果如图10。

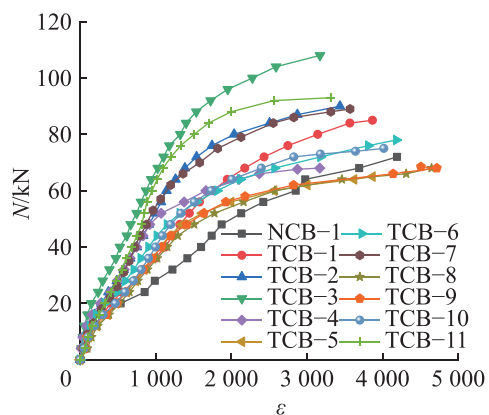
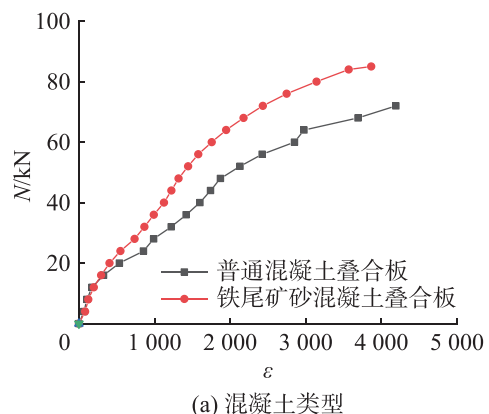
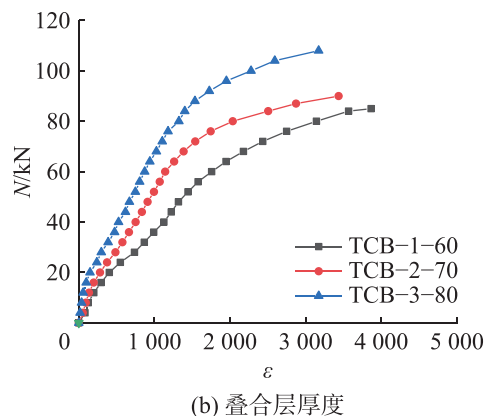


图9 受压区混凝土荷载-应变关系曲线

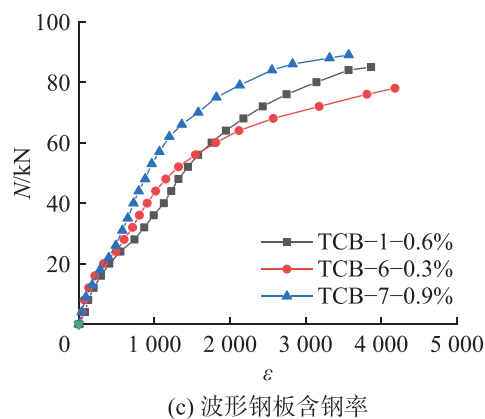
Fig. 9 Load-strain relationship curve of concrete in the compression zone



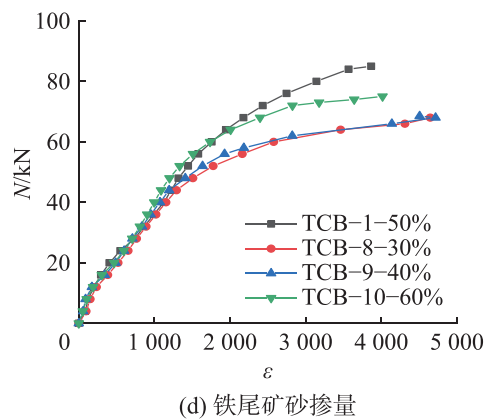
(a) 混凝土类型



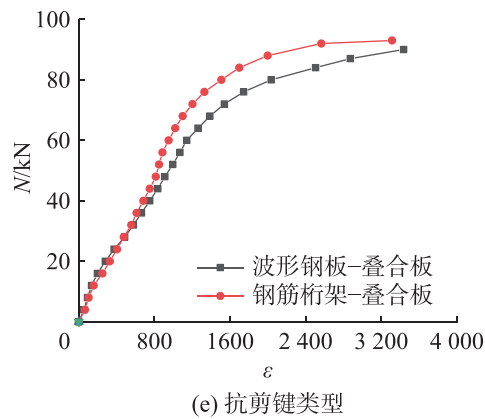
(b) 叠合层厚度



(c) 波形钢板含钢率



(d) 铁尾矿砂掺量



(e) 抗剪键类型

图10 各因素对受压区混凝土压应变的影响规律

Fig. 10 Influence patterns of various factors on the compressive strain of concrete in compression zone

由图 10(a)可知:在弹性阶段初期,由于荷载水平较低, $N-\varepsilon$ 曲线斜率迅速增大而应变变化不明显;随着加载进程进入裂缝发展、屈服及破坏阶段,各曲线逐渐产生分化,混凝土强度对受力性能的影响愈发显著。铁尾矿砂混凝土叠合板因其更高的密实度而表现出更大的屈服承载力,且应变发展较为缓慢,曲线斜率始终维持在较高水平,呈现更为陡峭的特征。具体表现为在相同荷载增量下,铁尾矿砂混凝土叠合板的应变增长幅度明显小于普通混凝土叠合板,例如当荷载从 60 kN 增至 72 kN 时,普通混凝土叠合板的应变增长幅度较铁尾矿砂混凝土叠合板高出 8.5%。

由图 10(b)可知:在弹性阶段,不同叠合层厚度试件的混凝土受拉应力均处于极低水平,应变变化不明显;随加载进程推进至裂缝发展阶段、屈服及破坏阶段,叠合层厚度的影响逐渐显现,随着厚度的增加,试件抗裂性能增强,应变发展速度减缓, $N-\varepsilon$ 曲线斜率相应增大。例如当施加荷载为 60 kN 时,叠合层厚度 60, 70 mm 的试件(TCB-1, TCB-2)应变值,较叠合层厚度 80 mm 的试件(TCB-3)分别提高了 154.7% 和 42.4%。

由图 10(c)可知:在弹性阶段,由于施加荷载较小,拉应力主要由混凝土承担;加载进入裂缝发展、屈服及破坏阶段后,随着荷载增加,拉应力主要由钢筋承担,此时曲线斜率随波形钢板含钢率的提高而增大,应变发展相应减缓。含钢率为 0.30%, 0.60% 的试件 TCB-1 与 TCB-6 曲线重合度较高,而含钢率为 0.90% 的试件 TCB-7 曲线明显分离,应变增加幅度相对较小。

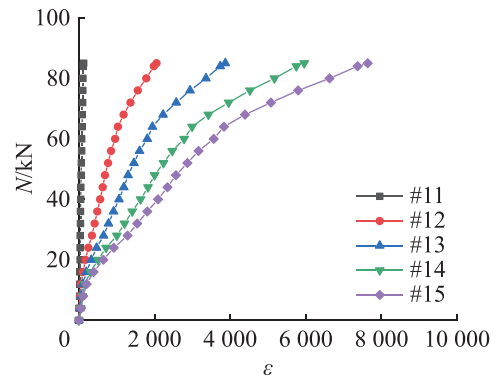
由图 10(d)可知:铁尾矿砂掺量在 30% 和 40% 时, $N-\varepsilon$ 曲线基本重合,应变变化趋势相近;但掺量增至 50% 时,混合砂达到饱和状态,曲线斜率明显增大,应变发展趋于平缓,这主要源于铁尾矿砂的细颗粒特性,随着掺量增加有效填充了骨料间隙,提升了混合砂密实度,从而增大了试件的开裂弯矩,延缓了波形钢板的应变发展,此时混凝土力学性能达到最优状态;但当掺量继续增加时,细颗粒出现过饱和现象,反而降低了混凝土的受力性能,加速裂缝发展,导致波形钢板提前进入应变增长状态,应变发展速度明显加快。

由图 10(e)可知:在弹性阶段与裂缝发展阶段,受压区混凝土应变值较小,抗剪键类型的影响不明显,各类试件的开裂弯矩与混凝土应变发展速度基本保持一致;进入屈服和破坏阶段,曲线开始出现分化,随着试件开裂和荷载持续增加,波形钢板-叠合板对应的 $N-\varepsilon$ 曲线斜率较小,表现出更显著的应变发展,例如在 80 kN 荷载作用下,波形钢板-叠合板的应变值达到钢筋桁架-叠合板的 1.35 倍,这可能

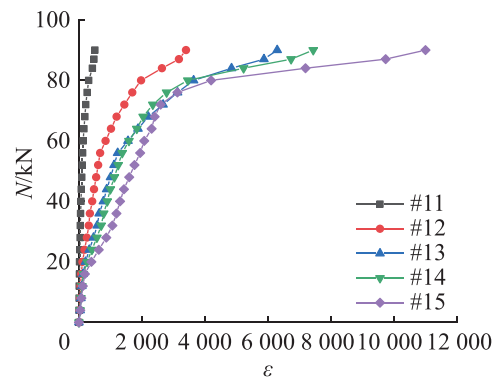
是由于钢筋桁架-叠合板具有更强的抗变形能力,其曲线拐点出现较晚,应变发展相对更为缓慢。

2.2.3 板底受拉钢筋应变分析

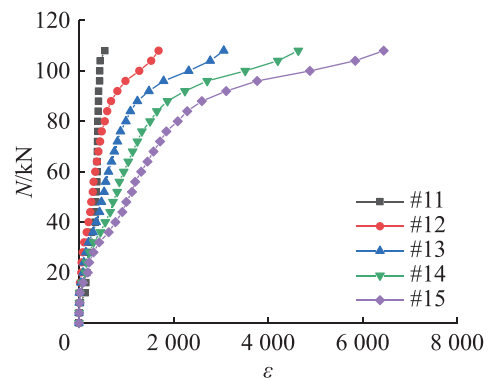
图 11 为板底受拉钢筋的 $N-\varepsilon$ 关系曲线,其测点布置如图 4。由图 11 可知:在弹性阶段各试件曲线基本重合;进入裂缝发展阶段后曲线逐渐分离,斜率开始降低;至屈服与破坏阶段曲线进一步偏离线性增长,斜率持续减小,且测点位置越靠近跨中其曲线斜率越小,表明试件在该区域的挠曲变形更显著。



(a) TCB-1



(b) TCB-2



(c) TCB-3

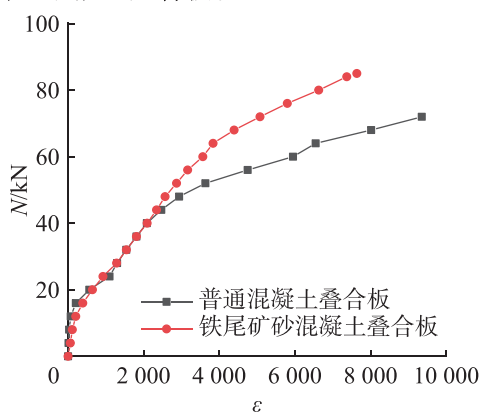
图 11 板底受拉钢筋应变发展规律

Fig. 11 Strain development of the longitudinal bottom tensile reinforcement

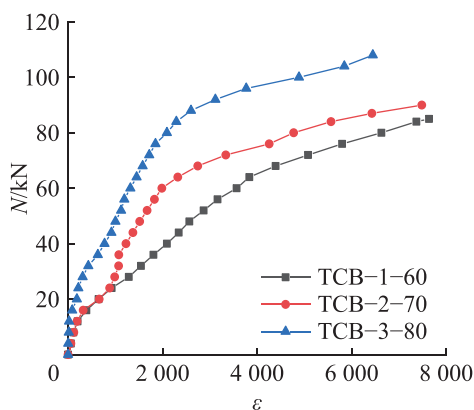
以板底受拉钢筋在跨中处 15#应变片记录的最大应变为研究对象,分析混凝土类型、叠合层厚度、

波形钢板含钢率及铁尾矿砂掺量对其纵向应变发展规律的影响,测试结果如图12。

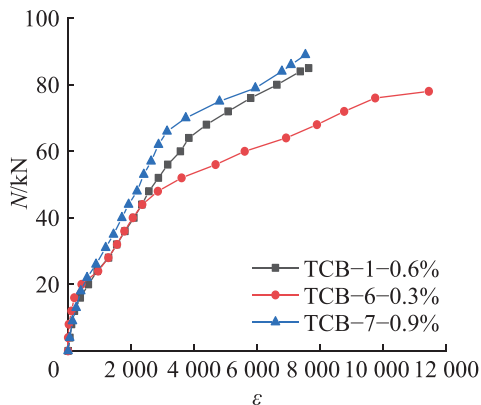
由12(a)可知:在弹性阶段与裂缝发展阶段,由于初始荷载较小,应变发展较为缓慢,混凝土类型对该阶段性能影响不显著;进入屈服和破坏阶段后,曲线逐渐产生分离,随着荷载的增大,混凝土性能的差异开始显现,铁尾矿砂混凝土叠合板对应的曲线斜率更大,受拉钢筋应变发展速度更为缓慢。例如当荷载为72 kN时,普通混凝土叠合板的应力增长幅度较铁尾矿砂混凝土叠合板高出84.3%,这主要得益于铁尾矿砂混凝土更高的密实度,其极限承载力优于普通混凝土叠合板。



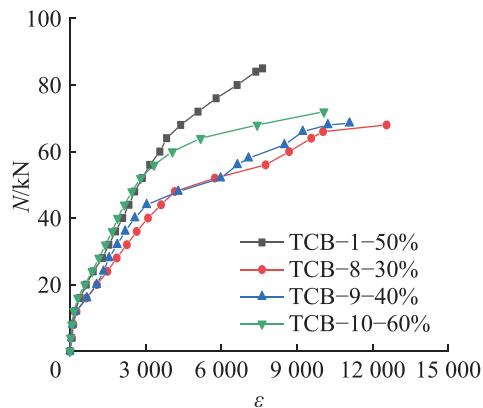
(a) 混凝土类型



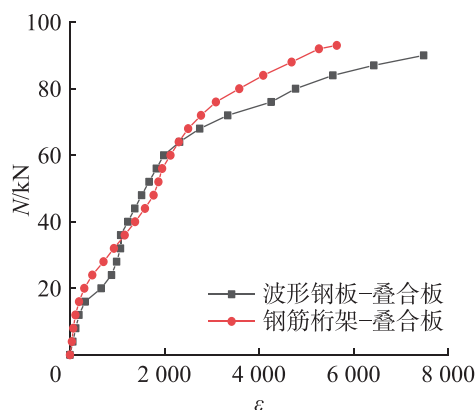
(b) 叠合层厚度



(c) 波形钢板含钢率



(d) 铁尾矿砂掺量



(e) 抗剪键类型

图12 各因素对受力钢筋应变发展规律的影响

Fig. 12 Effect of different factors on the strain development pattern of load-bearing reinforcement

由图12(b)可知:在弹性阶段初始荷载较小,应力变化不明显;进入裂缝发展、屈服和破坏阶段后,随着荷载增加,叠合层的作用效果逐渐显著,其厚度越大试件整体抗弯性能越强,极限承载力随之提高,极限拉应变相应减小, $N-\varepsilon$ 曲线斜率也明显增大。例如,当荷载增加4 kN时,叠合层厚度为60, 70, 80 mm的试件应力依次较基准状态提升11.2%, 16.5%和9.6%,其中叠合层厚度为80 mm的试件应变变化明显更为缓慢。

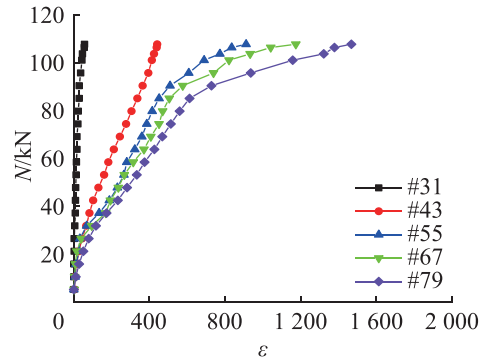
由图12(c)可知:在弹性阶段与裂缝发展阶段,随荷载增加应变变化缓慢, $N-\varepsilon$ 曲线基本重合,波形钢板含钢率的影响不明显;进入屈服和破坏阶段后,曲线逐渐分离,随着含钢率的增加,曲线斜率增大,应变增长速度相应减缓。例如,当含钢率为0.30%, 0.60%和0.90%的试件,其极限拉应变依次较基准状态提升了11.2%, 14.2%和28.6%。这主要是由于随着含钢率的增大,纵向布置的波形钢板能够分担部分受拉钢筋的应力,从而提升试件的极限承载力,并延缓极限拉应变的发展。

由图 12(d) 可知: 在弹性阶段初始荷载较小, 应变发展缓慢; 进入裂缝发展、屈服和破坏阶段后, 随铁尾矿砂掺量增加, $N-\varepsilon$ 曲线斜率呈先增后减的趋势, 相应钢筋应变发展速度则先减缓后加快。例如, 当荷载增加 12 kN 时, 铁尾矿砂掺量为 30%, 40%, 50%, 60% 的试件应变依次较基准提升 60.5%, 61.8%, 54.0% 和 122.9%。这是因为当掺量超过 50% 后, 混凝土内部骨料间啮合力降低, 裂缝扩展加速, 从而导致应变发展速度显著上升。

由图 12(e) 可知: 在弹性和裂缝发展阶段, 随荷载增加 $N-\varepsilon$ 曲线斜率减小, 各曲线基本重合, 应变发展速度基本一致, 抗剪键类型的影响不明显; 进入屈服和破坏阶段后, 曲线明显分离, 钢筋桁架-叠合板的曲线斜率大于波形钢板-叠合板, 其应变发展更为缓慢, 且破坏时对应的极限拉应变也更小, 具体表现为钢筋桁架-叠合板破坏时的极限拉应变为 $5\ 645\varepsilon$, 而波形钢板-叠合板为 $7\ 484\varepsilon$ 。这是由于混凝土在开裂前承担主要拉应力, 一旦裂缝出现, 裂缝截面混凝土退出工作, 拉应力转移至钢筋, 导致板底受拉钢筋应变急剧增大, 而钢筋桁架-叠合板在此过程中表现出更强的应力重分配与变形控制能力。

2.2.4 波形钢板剪切应变发展规律

各试件波形钢板水平剪切应变的 $N-\varepsilon$ 曲线如图 13, 测点布置如图 4(e)。



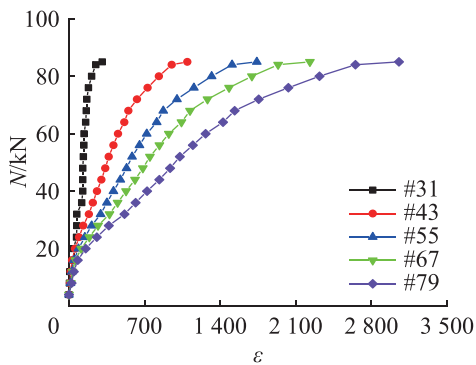
(c) TCB-3

图 13 波形钢板水平剪切应变发展规律

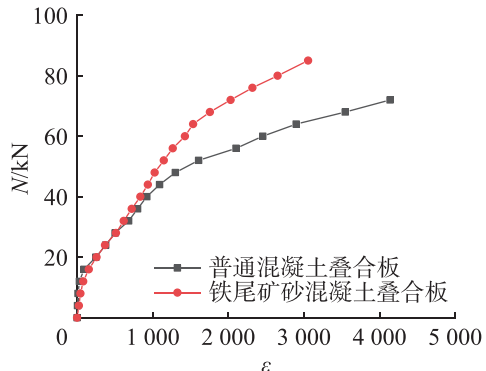
Fig. 13 Longitudinal development of horizontal shear strain in corrugated steel sheets

由图 13 可知: 在弹性阶段, 各试件 $N-\varepsilon$ 曲线近似线性, 整体斜率较大; 进入裂缝发展、屈服和破坏阶段后, 曲线逐渐分离, 斜率持续减小, 且越靠近跨中区域曲线斜率越低, 应变发展速度越快, 相应测点记录的极限拉应变也越大。

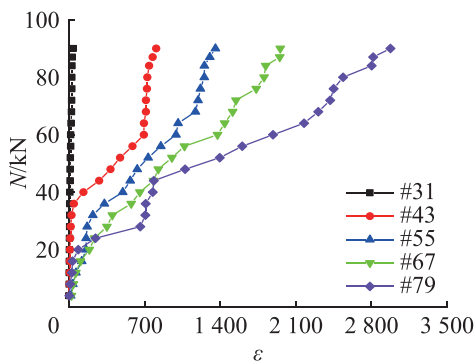
以波形钢板在跨中处 79#应变片所示的最大应变值为研究对象, 进一步分析混凝土类型、叠合层厚度、波形钢板含钢率、铁尾矿砂掺量对波形钢板水平剪切应变的影响, 测试结果如图 14。



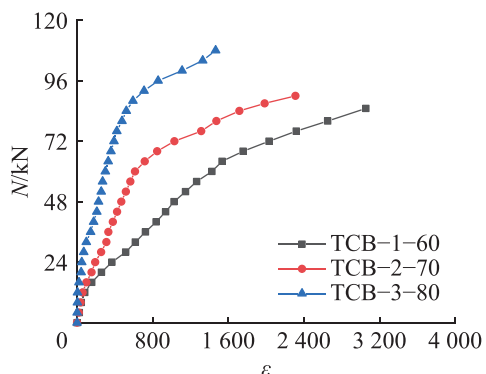
(a) TCB-1



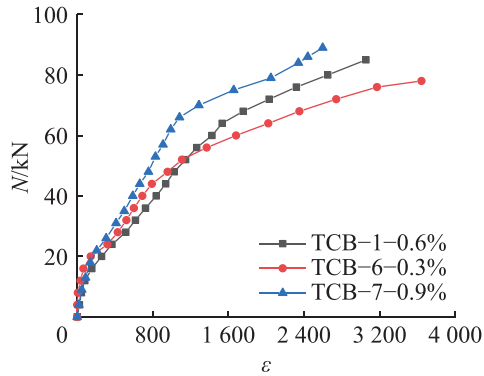
(a) 混凝土类型



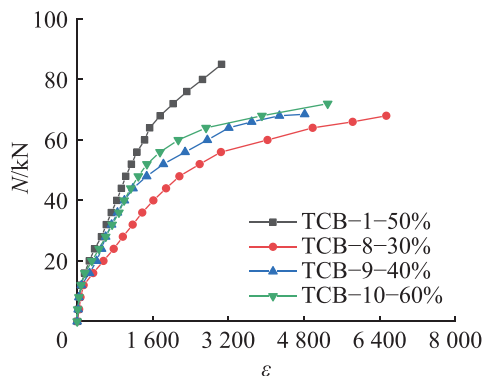
(b) TCB-2



(b) 叠合层厚度



(c) 波形钢板含钢率



(d) 铁尾矿砂掺量

图14 各因素对波形钢板应变发展规律的影响

Fig. 14 Effect of various factors on the strain development of corrugated steel sheet

由图 14(a) 可知: 在弹性与裂缝发展阶段, 由于施加荷载较小, 各试件曲线基本重合且斜率逐渐下降, 此时混凝土作为主要受力部件承担绝大部分应力; 试件开裂后, 随着混凝土退出工作, 板底受拉钢筋应变骤然增大并呈线性趋势。进入屈服和破坏阶段后, 曲线明显分离, 铁尾矿砂混凝土叠合板对应的曲线斜率更大, 应变发展更为缓慢。例如, 当荷载从 60 kN 增至 72 kN 时, 普通混凝土叠合板的应变约为铁尾矿砂混凝土叠合板的 2.8 倍。这主要因为相较于普通混凝土, 特细铁尾矿砂与机制砂搭配具有更优的颗粒级配, 提高了混合砂的密实度, 从而增强了试件的抗弯刚度, 延缓了裂缝的出现与发展。

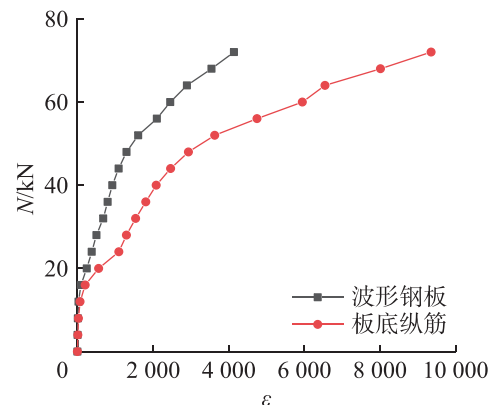
由图 14(b) 可知: 在弹性阶段由于施加荷载较小, 不同叠合层厚度试件的曲线斜率均较大, 近乎垂直, 表明拉应力主要由未开裂混凝土承担, 波形钢板产生的应变很小; 进入裂缝发展、屈服和破坏阶段后, 随着叠合层厚度增加, 试件的开裂弯矩相应提高, 对应波形钢板极限水平剪切应变随之减小, 曲线整体斜率逐渐增大。例如, 当荷载增加 4 kN 时, 叠合层厚度为 80, 70, 60 mm 的试件, 其水平剪切应变较基准分别增加 9.6%, 12.2%, 14.3%。这主要是由于

叠合层厚度增大导致受压区混凝土有效截面增大, 内力臂相应延长, 从而提升了试件整体抗弯刚度, 有效抑制了应变的发展。

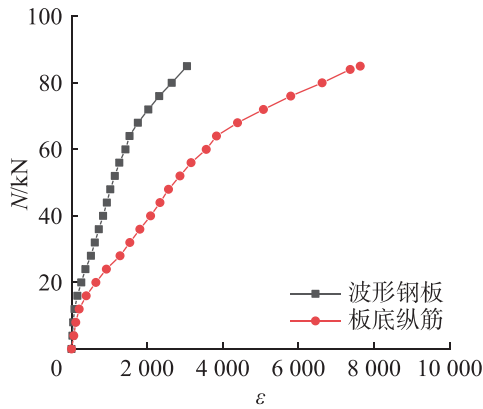
由图 14(c) 可知: 在整个受力过程中, 各试件的 $N-\varepsilon$ 曲线发展规律基本相似, 随着波形钢板含钢率的增加, 曲率斜率增大, 波形钢板的应变发展速度相应减缓。例如, 试件 TCB-7(含钢率 0.9%), TCB-1(含钢率 0.6%) 和 TCB-6(含钢率 0.3%) 的应力变化幅度较基准分别为 4.3%, 14.3%, 14.8%。这是由于纵向布置的波形钢板能够分担部分受力钢筋承担的应力, 随着含钢率的增加, 试件的极限承载力得到提升, 从而降低了波形钢板的极限水平剪切应变。

由图 14(d) 可知: 当铁尾矿砂掺量在 30%, 40% 和 60% 时, 各曲线位置较为接近, 应变变化差异不大; 但当铁尾矿砂掺量达到 50% 时, 混合砂达到饱和状态, 曲线斜率显著增大, 应变发展明显减缓。这主要是由于 50% 掺量下的铁尾矿砂与混合砂密实度最高, 混凝土的力学性能达到最佳, 从而有效抑制了应变发展; 而当掺量超过 50% 后, 细颗粒过量剩余, 破坏材料合理级配, 导致混凝土力学性能下降, 应变发展速度加快。

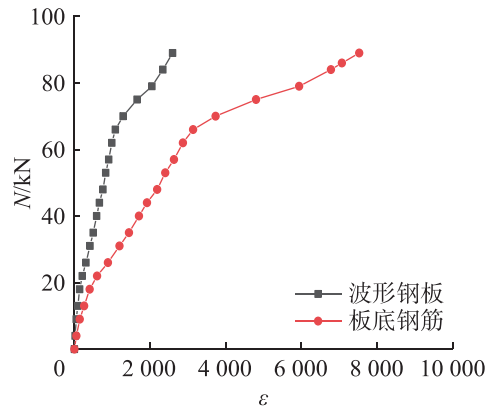
为进一步分析叠合楼板中不同受力材料的协同工作性能, 分析波形钢板与板底纵筋的应变发展规律, 结果如图 15。根据图 15 可知: 板底受拉钢筋与波形钢板均能有效承担试件应变, 但波形钢板的整体性能表现更为突出。在弹性阶段, 试件承受荷载较小, 两曲线基本重合, 应变变化均不明显; 进入裂缝发展、屈服和破坏阶段后, 曲线明显分离, 波形钢板的 $N-\varepsilon$ 曲线斜率较大, 应变发展速度更为缓慢, 表现出更优的力学响应特性。这是因为随着荷载增大, 裂缝截面处混凝土逐渐退出工作, 拉应力由板底受拉钢筋与波形钢板共同承担, 但由于板底受拉钢筋承担的拉应力更大, 使其率先进入屈服状态, 从而在一定程度上延缓了波形钢板的应变发展。



(a) NCB-1



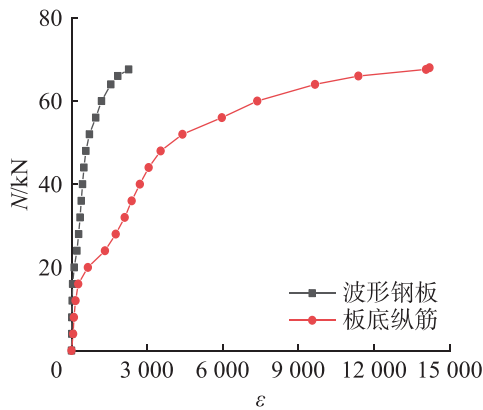
(b) TCB-1



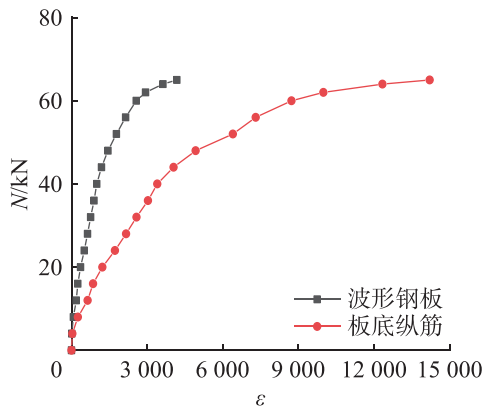
(f) TCB-7

图 15 波形钢板与板底纵筋应变对比

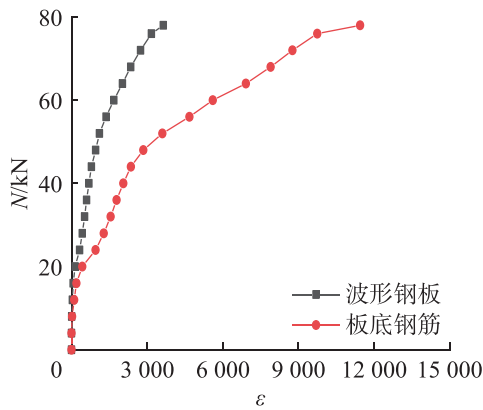
Fig. 15 Strain comparative between corrugated steel sheet and bottom longitudinal reinforcement



(c) TCB-4



(d) TCB-5



(e) TCB-6

3 结论

制作波形钢板-特细铁尾矿砂混凝土叠合楼板, 并进行抗弯性能试验, 分析抗剪键类型、叠合层厚度、波形钢板含钢率、铁尾矿砂掺量和混凝土类型等关键参数对试件破坏形态及材料应变发展规律的影响, 得到以下主要结论:

1) 试件的破坏过程经历了弹性、裂缝发展、屈服与破坏 4 个典型阶段。根据抗剪键类型及其布置方式的不同, 试件破坏主要表现为滑移破坏与受弯破坏 2 种典型模式。滑移破坏以板底受拉钢筋屈服和波形钢板局部屈服为主要特征, 同时沿叠合界面出现水平裂缝并伴随混凝土压碎现象; 而受弯破坏则表现为受拉钢筋与波形钢板均达到屈服状态, 部分试件板底混凝土出现局部脱落, 但板顶混凝土压碎不明显, 整体结构仍保持较好完整性。

2) 对受压区混凝土荷载-应变关系曲线 ($N-\epsilon$ 曲线) 的分析表明, 在弹性阶段, 各影响因素对曲线形态的作用均不明显; 但在裂缝发展、屈服和破坏阶段, 曲线特征显著改变。叠合层厚度和波形钢板含钢率的增加均会增大曲线斜率, 而铁尾矿砂掺量的影响则表现为曲线斜率随其增加先增大后减小。

3) 对板底受拉钢筋与波形钢板的 $N-\epsilon$ 曲线分析表明, 弹性阶段各因素对材料应变发展的影响较小; 进入裂缝发展、屈服与破坏阶段后, 随着叠合层厚度、波形钢板含钢率和铁尾矿砂掺量的增加, 曲线斜率相应增大, 应变发展速度减缓。当铁尾矿砂掺量为 50% 且叠合层厚度为 80 mm 时, 试件表现出最优的力学性能与变形特性。相比之下, 抗剪键类型对试件破坏过程和应变发展的影响有限。

参考文献:

- [1] LIU W J, WANG Z Z. Research progress on the substitution of iron tailings sand for natural sand to prepare concretes[J]. *International Journal of Science*, 2024, 11(9):64–68.
- [2] HUANG X Y, RANADE R, NI W, et al. Development of green engineered cementitious composites using iron ore tailings as aggregates[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 44:757–764.
- [3] LI B, ZHAO Z Y, TANG B, et al. Comprehensive utilization of iron tailings in China[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 199: 042055.
- [4] 崔士起, 刘传卿, 刘文政, 等. 分离式接缝叠合板垂直接缝方向抗弯刚度的试验及计算方法研究 [J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(9):75–84.
- CUI S Q, LIU C Q, LIU W Z, et al. Research on experiment and calculating methods of flexural stiffness in direction perpendicular to separating-type joints for concrete composite slab[J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(9):75–84.
- [5] 吕绍伟, 姜屏, 钱彪, 等. 铁尾矿砂力学特性及再生利用研究进展 [J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(2):466–470,512.
- LYU S W, JIANG P, QIAN B, et al. Research progress on mechanical properties and recycling of iron tailings sand[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 39(2): 466–470,512.
- [6] CHEN J H, YUAN Y X, ZHU Q, et al. High-temperature resistance of high-strength concrete with iron tailing sand[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 63:105544.
- [7] ZHAO S J, FAN J J, SUN W. Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 50:540–548.
- [8] 宁波, 闫艳, 左夏伟, 等. 铁尾矿砂混凝土力学特性实验研究 [J]. *矿产综合利用*, 2021(4):159–164,175.
- NING B, YAN Y, ZUO X W, et al. Experimental study on mechanical properties of iron tailings concrete[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(4): 159–164,175.
- [9] CHENG Y H, HUANG F, QI S S, et al. Durability of concrete incorporated with siliceous iron tailings[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 242:118147.
- [10] SHI H W, WANG H Y, XUE S F, et al. Durability evaluation of iron tailings concrete under freeze-thaw cycles and sulfate erosion based on entropy weighting method[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 443:137747.
- [11] 陶亚平, 赖天文. 铁尾矿砂再生混凝土的力学及耐久性能研究 [J]. *功能材料*, 2023, 54(3):3143–3148.
- TAO Y P, LAI T W. Study on mechanics and durability of iron tailings recycled concrete[J]. *Journal of Functional Materials*, 2023, 54(3):3143–3148.
- [12] ZUCCHERATTE A C V, FREIRE C B, LAMEIRAS F S. Synthetic gravel for concrete obtained from sandy iron ore tailing and recycled polyethylthephtalate[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 151:859–865.
- [13] SHETTIMA A U, HUSSIN M W, AHMAD Y, et al. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 120:72–79.
- [14] 王营, 顾晓薇, 张延年, 等. 铁尾矿砂水泥砂浆抗压强度及微观结构分析 [J]. *金属矿山*, 2022(1):60–64.
- WANG Y, GU X W, ZHANG Y N, et al. Analysis of compressive strength and microstructure of iron tailings sand cement mortar[J]. *Metal Mine*, 2022(1):60–64.
- [15] LIU J H, AN S H, ZHANG Y Y. Mechanism of regulating the mechanical properties and paste structure of supersulfated cement through ultrafine iron tailings powder[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2023, 140:105061.
- [16] XU F, WANG S L, LI T, et al. Mechanical properties and pore structure of recycled aggregate concrete made with iron ore tailings and polypropylene fibers[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 33:101572.
- [17] GU X W, ZHANG W F, ZHANG X L, et al. Hydration characteristics investigation of iron tailings blended ultra high performance concrete: the effects of mechanical activation and iron tailings content[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 45:103459.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. *Metallic Materials Tensile Testing Part 1: Method of Test at Room Temperature: GB/T 228.1—2010*[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. *Standard for Test Methods of Concrete Physical and Mechanical Properties: GB/T 50081—2019*[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.

责任编辑: 何莉