

文章编号: 1005-0523(2025)02-0015-20



装配式路面结构设计、材料及施工研究进展

于新^{1,2}, 何平平¹, 陈晨^{1,2}, 范霖², 刘雨松¹, 周子栋¹

(1. 长沙理工大学交通运输工程学院, 湖南长沙 410114; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏南京 210024)

摘要: 装配式路面技术作为一种高效、环保的道路建设方法, 近年来在全球范围内受到广泛关注。尽管已取得诸多研究成果, 但缺乏系统的归纳与总结。从路面结构设计理论、材料优选及施工工艺三个方面系统梳理了装配式路面技术的研究进展: 首先, 基于不同的地基理论模型, 分析了预制板力学响应的影响因素、疲劳验算方程及设计参数, 归纳了装配式路面的结构设计方法; 其次, 从调平层、预制板及接缝材料三方面, 总结了新型材料对路面力学性能及耐久性的影响; 最后, 系统阐述了装配式路面的施工工艺, 包括调平层的施工方式、路面板的吊装与连接工艺, 以及接缝处理技术。此外, 还对未来的研究方向提出了建议, 以期对装配式路面技术的应用与推广提供理论参考和实践指导。

关键词: 装配式路面; 结构设计; 材料创新; 施工关键技术; 可持续发展

中图分类号: U416

文献标志码: A

本文引用格式: 于新, 何平平, 陈晨, 等. 装配式路面结构设计、材料及施工研究进展[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(2): 15-34.

Research Progress in Structural Design, Materials and Construction of Prefabricated Pavement

Yu Xin^{1,2}, He Pingping¹, Chen Chen^{1,2}, Fan Lin², Liu Yusong¹, Zhou Zidong¹

(1. College of Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. College of Civil and Transportation, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: Prefabricated pavement technology, as an efficient and environmentally friendly method for road construction, has gained widespread attention globally in recent years. Despite significant research achievements, a comprehensive summary and synthesis were still lacking. This paper systematically reviews the research progress of prefabricated pavement technology from three key perspectives: pavement structural design theory, material selection, and construction techniques. Firstly, based on different fundamental theoretical models, the paper analyzes the factors influencing the mechanical response of precast slabs, fatigue verification equations, and design parameters, summarizing the structural design methods for prefabricated pavements. Secondly, the impact of novel materials on the mechanical properties and durability of pavements is summarized from the aspects of leveling layers, precast slabs, and joint materials. Finally, the paper systematically elaborates on the construction processes of prefabricated pavements, including the construction methods of leveling layers, lifting and connecting techniques for pavement panels, and joint treatment technologies. Additionally, the paper proposes suggestions for future research directions, aiming to provide theoretical references and practical guidance for the appli-

收稿日期: 2025-03-06

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(52408459); 湖南省自然科学基金青年基金项目(S2024JJQNJJ1224)

cation and promotion of prefabricated pavement technology.

Key words: prefabricated pavement; structural design; material Innovation; key construction technologies; sustainable development

Citation format: YU X, HE P P, CHEN C, et al. Research progress in structural design, materials and construction of prefabricated pavement[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(2): 15–34.

截至2023年末,我国公路总里程已达543.68万km,养护里程占总里程的99%^[1],公路养护任务繁重且面临诸多挑战,如长周期养护、快速养护、绿色养护等。其中快速养护尤为重要。沥青路面虽施工便捷且可实现快速通车,但其成本高、能耗高。相比之下,水泥路面成本低且耐久性好,但传统混凝土路面需较长的养护时间,封闭交通对出行造成极大不便^[2]。装配式路面技术的出现,有效解决了这一难题^[3-4]。该技术通过在工厂预制路面结构层,现场进行装配和接缝处理,实现快速建造,并具有拆卸性,便于维修、养护和更新^[5]。预制厂提供的标准养护条件还可提高混凝土构件的整体性能和品质。

装配式路面技术最早可追溯至上世纪30年代,苏联科学家采用六边形无筋混凝土拼装机场道面^[6]。目前,全球已有超过20个国家和地区应用了装配式水泥混凝土路面,但其主要用于路面修补或临时路面^[7],在高等级公路中的应用较少。这是因为很多工程及科学问题尚未解决,如缺乏整体结构设计规范、预制板接缝处易造成反射裂缝、高性能预制板材料的优选问题等。本文从装配式路面的结构设计方法、路面材料性能、路面施工工艺等方面对装配式路面进行系统综述,为装配式技术在路面的广泛应用提供参考。

1 结构设计方法

装配式路面的结构设计是确保其长期性能和使用寿命的关键环节。本节系统探讨了装配式路面结构设计的理论基础、力学响应分析及疲劳验算方法。首先,对比了实体连续地基模型、Winkler地基模型、Pasternak模型3种地基理论模型,并阐述了各自的适用场景。其次,综述了荷载特性、板块尺寸和温度梯度等多因素对预制板力学响应的影响。最后,总结了疲劳验算的方程及关键设计参数。

1.1 地基理论模型

实体连续地基模型基于弹性层状体系理论,假设地基为均质半无限弹性体,通过弹性模量和泊松比表征其刚度。该模型的核心优势在于能够真实反映地基的连续性变形特征,尤其适用于高模量刚性基层(如水泥稳定碎石层)或厚板结构($h \geq 0.3$ m)。然而,实体模型也存在显著局限性:计算复杂度高,需迭代求解积分方程,网格细化导致计算时长呈指数增长,且对非均质地基适应性较差。王鹏等^[8]指出,尽管弹性层理论法理论完备,但其参数 E_s 和 μ_s 依赖经验选取,难以精确表征土体的非线性特性。

Winkler地基模型将地基简化为独立弹簧系统,反力与位移呈线性关系,适用于柔性基层(如级配碎石)或薄板结构($h \leq 0.2$ m)。地基反应模量 k 的取值通常依赖平板载荷试验(PLT),但该模型忽略剪切刚度,导致板边/角应力预测偏差显著。Du等^[9]研究表明,当板角受载时,Winkler模型的应力误差达28%~35%,且地基反应模量的空间变异性($COV=20\%$)可使应力标准差达静力值的35%。为弥补Winkler模型的缺陷,王嘉新等^[10]建议采用Pasternak模型(引入剪切刚度 G)或Kerr三参数模型(分层弹簧-剪切单元)。研究表明,Pasternak模型在 $E_s=80$ MPa的地基中,板边应力误差从31%降至9%,计算耗时仅增加15%。

根据目前的研究,实体模型适用于高刚度厚板,计算精度高但复杂度大;Winkler模型适用于柔性薄板,计算简便但精度有限。实际工程中需根据地基特性、板厚及荷载条件选择合适的模型,或采用改进模型(如Pasternak模型)以平衡计算效率与精度。

1.2 装配式路面结构力学响应

装配式路面的力学响应受荷载特性、板块平面尺寸及厚度、温度等多因素耦合作用,其影响机制复杂且具有显著的非线性特征。下面将结合理论

与试验研究,系统阐述各参数对板体受力和变形的影响规律及优化方向。

1.2.1 荷载特性影响

荷载特性对装配式路面板的力学响应具有显著影响。在静载作用下,板底拉应力与荷载位置密切相关。轮载作用于板角时,应力可达板中的1.8倍;若接缝传荷效率低于95%,应力集中效应将进一步加剧。动载(如车辆冲击荷载)显著放大瞬态响应,频率5 Hz的正弦波动载可使板底拉应力较静载增加18%,且疲劳寿命下降50%~60%(Miner准则)。动载作用下,接缝剪力峰值达板中区域的2.3倍,若接缝填料弹性模量低于500 MPa,剪力集中系数进一步升至3.1^[11]。

荷载偏心作用时,板边挠度与应力梯度显著增大。采用双向传力杆(dowel bars)可提升接缝传荷效率至85%~95%,抑制接缝错台;而纯剪力型接缝

(如密歇根系统)在循环荷载下易出现填料劣化,需采用快速固化灌浆材料(如3 h抗压强度21 MPa的聚合物基复合材料)保障耐久性^[12]。

在装配式路面的设计中,荷载特性对路面板的力学响应具有显著影响,尤其是在接缝处的传荷效率直接影响路面的整体性能和耐久性。为了更直观地展示不同连接方式对荷载传递的影响,图1和表1对比了普通接缝、弹簧单元模拟传力杆以及榫卯连接方式在荷载传递效率、应力分布和施工工艺上的差异。传力杆连接方式在荷载传递效率上表现优异,尤其适用于高荷载路段,但其施工精度要求较高;而榫卯连接方式则凭借其施工简便性和成本优势,在六边形板体系中得到了广泛应用。

未来研究应进一步探讨动载频率、幅度与疲劳寿命的关系,优化接缝设计以提高路面板的耐久性和承载能力。

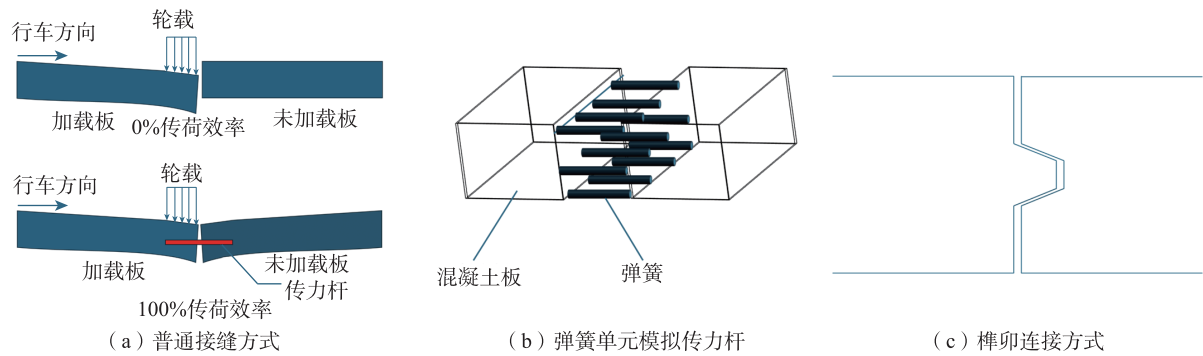


图1 不同的预制板连接方式
Fig. 1 Different plate connection methods

表1 不同连接方式与传荷计算方法

Tab.1 Different connection modes and load transfer calculation methods					
研究来源	路面类型	建模方式	传荷计算方式	接缝连接类型	关键参数与结论
Yaqoob等 ^[13]	普通接缝式水泥混凝土路面	三维有限元模型(C3D8R实体单元) 接触模型:库仑摩擦	基于应力与挠度的比值: $LTE = \frac{\Delta u_L}{\Delta_L}$	传力杆连接 (钢制环氧涂层)	传力杆位置(顶部/中部/底部) 传力杆直径(20~38 mm) 接缝宽度(2~12 mm) 结论:传力杆中部放置时LTE最高,直径增大LTE提升3%。
Li等 ^[14]	新型榫卯式预制水泥混凝土路面	三维有限元模型(C3D8R实体单元)+B31梁单元(钢筋)接触:榫槽摩擦(摩擦系数0.7)	基于应变转换的应力比值: $LTE = \frac{\Delta \epsilon_{unloaded}}{\Delta \epsilon_{loaded}}$	榫槽式接缝 (无传力杆)	横向榫槽接缝 纵向与横向榫槽传荷差异(LJ-MLTE>TJ-M) 结论:横向接缝LTE降低约1%,但显著减少板底拉应力。
Li等 ^[15]	复合路面(沥青层+水泥板)	三维有限元模型(C3D8R实体单元) 弹簧单元模拟传力杆(三向剪切)	结合弹簧刚度与挠度比值 $q = \frac{D}{s}$ 和 BP神经网络评估空隙	传力杆连接 (弹簧模拟)	空隙尺寸(200~1 000 mm)弹簧刚度(0.01~100 MN/m ²)结论:空隙导致LTE下降,弹簧刚度<0.1 MN/m ² 时LTE敏感度最高。

1.2.2 路面板尺寸影响

路面板尺寸(包括长、宽和厚度)对其承载能力有显著影响。增大路面板尺寸可有效分散荷载,减少应力集中,从而提高整体承载能力。王轩等^[16]通过试验研究发现,当路面板尺寸从1.0 m×1.0 m增大到1.5 m×1.5 m时,承载力显著提升。Huang等^[17]通过疲劳测试表明,尺寸为1.5 m×1.5 m的路面板疲劳寿命较1.0 m×1.0 m的路面板提高至250 000次荷载循环,裂缝扩展较缓慢。

然而,大尺寸板(如5.0 m×2.5 m)虽减少接缝数量,但局部应力集中显著,需通过预应力抵消拉应力^[14]。Dong^[18]等通过有限元分析发现,普通混凝土板长宽比大于1.5时,长边方向弯矩增长率超短边2倍;而预应力板的临界尺寸为1.0 m×1.0 m,超过后板底拉应力趋于稳定,变化幅度小于2%。

路面板尺寸对装配式路面板的影响是多方面的,尺寸较大的路面板通常具有更高的承载力、更均匀的变形分布和更长的疲劳寿命,但也增加了施工和运输的难度。因此,设计时需要平衡承载力、变形性能、稳定性和施工难度等因素,以确定最合适的路面板尺寸。

路面板厚度对其承载能力、变形性能和疲劳寿命具有直接影响。熊哲等^[19]研究表明,厚度为15、20 cm和25 cm的路面板最大承载力分别为350、450 kN和550 kN。刘永超等^[20]发现,厚度增加显著减小最大变形,25 cm厚路面板的最大中心位移仅为3.1 mm。李德志等^[21]认为,增加厚度可有效延长疲劳寿命。厚度为15 cm的路面板裂缝扩展较快,且沿荷载方向扩展,通常在50 000次荷载循环后,裂缝已明显增大,厚度为20 cm的路面板裂缝扩展较慢,50 000次荷载循环后,裂缝的长度增加约30%,厚度为25 cm的路面板裂缝扩展非常缓慢,在100 000次荷载循环后,裂缝的长度仅增加10%^[22]。然而,过度增加厚度会导致材料浪费和施工复杂度增加。未来研究应结合材料性能与工程需求,优化板厚设计以提高经济性和耐久性。

1.2.3 温度特性影响

温度梯度(即板顶与板底温差)对混凝土路面板的力学响应具有显著影响,在装配式路面结构设计中,温度梯度与荷载的耦合效应及其材料参数的适配性是需重点关注的问题。温度梯度会引发混凝土板的翘曲应力,其根本原因在于混凝土线膨

胀系数差异及层间约束作用。研究表明,正温度梯度(板顶温度高于板底)会导致板底产生拉应力,而负温度梯度则使板体向上翘起,产生拉应力并引发裂缝。张宇辉等^[23]通过现浇式机场水泥混凝土道面的试验测量与有限元仿真,分析了温度与飞机荷载的耦合效应,发现,在温度-荷载耦合场下,翘曲应力与飞机轮载应力的共同作用使耦合应力值比单独叠加的应力值低约4.93%。这表明温度与荷载的相互作用可通过应力重分布缓解局部峰值应力,但长期作用仍会加速疲劳损伤,降低路面剩余寿命。

极端环境下的温度梯度对混凝土路面板的影响也备受关注。Mahfuda等^[24]研究了热带气候下正温度梯度的影响,通过Abaqus三维有限元模型结合现场数据发现,当板顶温度达到50℃时,混凝土板的最大主应力接近断裂模量的83.34%。若叠加交通荷载(如边缘轮载),应力集中效应将进一步加剧,导致疲劳裂缝的产生。

与传统现浇混凝土路面依赖基层摩阻力与相邻板体约束不同,装配式预应力混凝土板通过纵向和横向预应力筋主动施加压应力,有效抵消了温度梯度引发的拉应力。此外,预制板采用刚性传力杆或环氧接缝,其接缝传荷效率通常高于90%,显著减少了因温度翘曲引发的接缝处应力集中。

研究表明,空气温度对装配式预应力混凝土路面板的温度分布有显著影响。Qin等^[25]通过一维热传导模型分析了日间温差的影响,发现温度梯度在路面板内会产生热应力,尤其在温差较大地区,表面与底部的温差会导致不同的变形模式。在负温差条件下,路面板表面温度较低时,板体会向上翘起,产生拉应力,加速裂缝形成。Kim等^[26]进一步指出,温度梯度直接影响路面板的热应力和变形,尤其是在昼夜温差较大的条件下。研究还表明,预应力损失、混凝土性能和基层刚度等因素会显著影响热梯度引发的热应力。因此,在装配式路面设计中,特别需要关注温度梯度与荷载的耦合效应以及材料参数与预应力筋的适配性。

1.3 预制板疲劳验算

随着路面使用年限的延长,疲劳损伤成为影响路面寿命和安全性的关键因素。准确预测装配式预制混凝土路面的疲劳寿命,尤其是基于不同疲劳

方程的评估,是提高路面设计和维护效率的核心课题。混凝土的疲劳性能涉及其在长期动态荷载作用下的力学行为。Kachkouch 等^[27]研究表明,疲劳损伤主要源于微裂纹的形成与扩展,这一过程随荷载持续作用逐步加剧,最终导致材料失效。

为有效预测混凝土的疲劳寿命,学者们提出了多种疲劳方程,如S-N曲线、Weibull分布等。Weibull方程因能考虑材料的随机性和实验误差而被广泛采用,其通过实验数据回归分析建立的模型为路面设计和维护提供了理论支持^[28]。装配式预制混凝土路面因其优异的抗疲劳性而备受关注。Zhao 等^[29]研究表明,采用复合基层设计的装配式预制混凝土路面结构在高交通荷载和温度变化共同作用下,能够有效分担动态荷载并减缓裂缝发展,从而延长使用寿命。

板材尺寸和接缝形式是影响装配式预制路面疲劳性能的关键设计参数。研究表明,圆形舌槽接缝形式在承载能力和疲劳抗性方面优于其他接缝形式^[28]。此外,频域分析方法通过对车辆荷载和路面振动频率的分析,提供了一种更为精细的疲劳预测模型,尤其适用于高频荷载下的疲劳寿命评估^[30]。

装配式预制混凝土路面的疲劳性能研究已经取得了显著进展。通过疲劳方程的建立与优化,特别是Weibull分布和频域分析方法的应用,研究者在提高疲劳寿命预测精度方面取得了重要成果。然而,随着路面材料和设计方法的不断创新,现有的疲劳模型仍需进一步完善,尤其是在多因素耦合和三维应力状态的考虑上。未来的研究应致力于开发更加精准的疲劳寿命预测模型,为道路建设和养护提供更为科学的依据。

2 装配式路面用材料

对于装配式路面板,过大的尺寸会给吊装、运输及施工带来不便。当采用小尺寸路面板时,路面接缝显著增加,在此情况下,平整度成为评估路面质量的关键技术指标。路面板下设置调平层,不仅起到荷载应力的传递及扩散作用,而且可以提高装配式路面整体结构的平整度。调平层采用何种材料,将直接影响路面的平整度。除了调平层,预制板本身材料以及板之间填缝料的选取对路面的力学性能及耐久性方面也起着至关重要的作用。因此,下面将重点阐述调平层材料、预制板材料及填

缝料的优选及对路面性能的影响。

2.1 调平层

调平层在装配式路面中起关键作用,其主要功能包括调整基层顶面高程、横坡和弯道超高,弥补不均匀沉陷,提高路面平整度,并保证基层厚度均匀性^[31]。调平层材料通常采用沥青^[32]或水泥砂浆,但沥青成本高且易受温度影响,因此水泥砂浆更为常用。然而,水泥砂浆调平层存在强度低、裂纹多及表面缺陷等问题^[33]。为改善其性能,可在砂浆中掺入石灰、微沫剂或抗裂聚丙烯纤维,以提高抗裂性能。此外,Wan 等^[34]提出采用经济型PP纤维增强ECC配合特细砂(superfine sand)作为调平层材料(SSPP-ECC),但其收缩应变较低(如图2所示),可能导致反射裂缝。Kharel 等^[35]使用煤焦部分替代水泥砂浆中不同比例的细砂,与传统水泥砂浆相比,添加5%的煤焦可使砂浆的抗压强度提高17.55%,抗弯强度提高17.57%。但与SSPP-ECC存在相同的问题,即强度的提升导致应变降低。调平层材料与上层预制板应变不同步,易产生反射裂缝,如何促进调平层与上层结构的协同变形,减少反射裂缝,还需进一步研究。

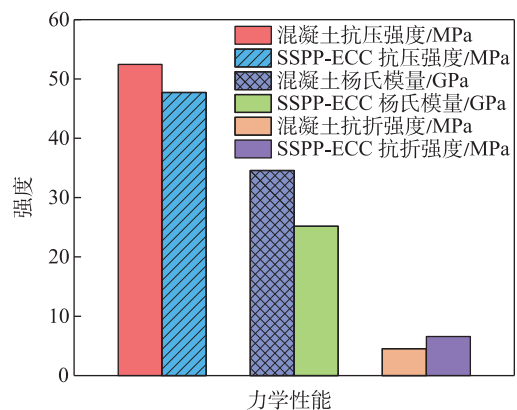


图2 力学性能测试结果^[34]

Fig. 2 Results of the basic mechanical properties test^[34]

2.2 装配式路面预制板

装配式路面板材料多采用混凝土。普通混凝土成本低,施工方便,但生产制备的预制板存在几个问题:首先,预制板的厚度及自重较大^[36],不利于吊装、运输;其次,预制板存在剥落的问题;另外,温度梯度高、生产质量差或混凝土收缩可能导致面板平整度不足而引起板面晃动^[37]。预应力混凝土、轻质混凝土及超高性能混凝土从不同角度提高混凝

土的性能,并且降低预制板的厚度及自重。下面重点阐述三种混凝土在装配式路面的应用进展及未来的研究方向。

2.2.1 预应力混凝土

预应力混凝土通过在混凝土硬化前或硬化后张拉钢筋或钢绞线,使其产生压应力,从而抵消外荷载引起的拉应力。这种预压应力能够延缓或防止混凝土裂缝的过早出现,显著提高结构的抗裂性能、刚度和耐久性。例如,在高速公路的长纵坡路段,车辆频繁制动和启动产生的较大纵向应力容易使普通混凝土路面产生裂缝,而预应力混凝土路面由于预压应力的存在,能够更好地抵抗这种拉应力,保持路面结构的完整性。

预应力混凝土在道路领域的应用最早出现在欧美的高速公路和机场建设中。例如,得克萨斯州乔治城路段试验点项目^[38]采用后张拉技术,不仅减少了路面厚度,还有效防止了裂纹的产生,提升了耐久性,且在使用15年后仍保持完好,实现了预制铺装的成功应用。国内研究起步较晚但发展迅速,东南大学的黄卫等^[39]自1990年起对预应力筋纵向布置的预应力混凝土路面进行了深入研究,并于1997年在南京禄口机场高速互通式立交匝道上修筑了我国第一条纵向装配式预应力路面。

将预应力混凝土应用在装配式路面板中,存在诸多优点:①抗裂性能提升,通过张拉钢筋或钢绞线产生预压应力,有效抵消车辆荷载等外荷载引发的拉应力,延缓或防止裂缝出现^[40];②结构刚度增强,预应力混凝土显著提高了装配式路面板的结构刚度,使其在承受车辆荷载时变形更小,尤其在重载交通道路上,能够更好地保持路面平整度,提升行车舒适性和安全性;③耐久性改善,预应力混凝土的抗裂性能减少了水损害和钢筋锈蚀等问题,增强了路面板的耐久性。在恶劣自然环境(如寒冷地区冻融循环、沿海地区盐蚀)中,预应力混凝土装配式路面板能更好地抵御环境侵蚀,降低维护成本;④板厚减小,采用预应力混凝土板铺设路面可显著减小板厚,特别适用于机场道面结构。

尽管预应力混凝土在装配式路面中具有诸多优势,但其应用也存在一些局限性:①成本较高,预应力混凝土需要大量预应力钢筋,生产工艺复杂,且需专业张拉设备和技术人员,导致预制构件成本较高;②施工质量控制严格,从预制构件生产到现

场安装,任何环节的偏差都可能影响预应力施加效果,进而影响路面板性能。因此,施工过程中需严格把控质量,确保预应力有效发挥。

综上所述,预应力混凝土在装配式路面中能够有效减少拉应力及变形,显著提升路面性能,但其施工工艺复杂且成本较高。未来需通过材料优化、工艺改进和标准化建设,进一步推动其在道路工程中的应用与发展。

2.2.2 轻质混凝土

轻质混凝土是一种以轻粗集料(如陶粒、聚苯颗粒、微珠、泡沫骨料等)替代传统骨料,结合普通砂、水泥和水配制而成的混凝土。其显著特性包括自重轻、强度高、耐久性好、抗震性能强、保温隔热性能优异以及经济效益良好。由于轻集料内部结构疏松且孔隙较多,轻质混凝土的密度比普通混凝土低约600 kg/m³,强度约为普通混凝土的80%^[41]。这些特性使其在装配式结构中具有广泛的应用潜力。

轻质混凝土被广泛应用于装配式建筑结构中。例如,谢红波等^[42]研究了装配式轻质混凝土复合保温外墙板系统,分析了其设计要点和性能指标,发现性能良好的保温外墙板可显著提升建筑的保温性能。牛晓娜^[43]对比了轻质混凝土梁与普通混凝土梁的力学性能,发现泡沫混凝土梁具有较低的密度和较大的延性,适合替代普通混凝土梁用于实际工程。

然而,轻质混凝土在装配式路面中的应用研究相对较少。范瑛宏等^[44]通过使用不同陶粒取代率的次轻混凝土制备装配式路面板,发现当陶粒取代率为30%时,次轻混凝土的工作性和承载能力均满足路用要求。

将轻质混凝土与装配式路面结构相融合,可以大大地减少装配式道路结构的自重,并且减轻地基的压力;同时有效减少装配式路面的热量传递,降低能源消耗。另外,其弹性模量较低的特征,使得在地震等外力作用下,能更好地吸收和耗散能量,提高装配式路面的抗震性能^[45]。未来研究应进一步探索其材料优化、结构设计和施工工艺,以推动其在道路工程中的广泛应用。

2.2.3 超高性能混凝土

超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)是一种具有超高强度、高耐久性和高韧性的水泥基工程材料。根据紧密堆积原理,通过

去除粗骨料,以及降低水胶比达到较高的密实度^[46],从而实现120~250 MPa的超高强度^[47-48]。同时掺加钢纤维,轴拉强度可以达到15~20 MPa^[49]。这些特性使UHPC在装配式路面应用中具有显著优势:一方面可减小混凝土板厚度和重量,降低吊装及运输过程中的开裂风险,同时节省约50%的材料用量^[50];另一方面,其高密实度赋予材料优异的抗冻融、抗荷载和抗腐蚀性能,有效解决了普通钢筋混凝土因冻融循环、重荷载和钢筋锈蚀导致的结构破坏问题^[51]。

UHPC的发展历程可追溯至1994年,Larrard等^[52]通过优化胶凝材料的颗粒尺寸分布,成功研发出抗压强度大于120 MPa的混凝土,并首次提出UHPC的概念。1997年,UHPC首次应用于加拿大人行桥,随后在韩国Seonyu大桥、日本坂田人行桥等工程中得到推广^[53]。目前,UHPC的应用已扩展至澳大利亚、荷兰、德国、中国、新西兰、马来西亚^[54-55],应用形式也从现浇混凝土扩展至装配式混凝土^[56]。比如,荷兰拉莫尔河大桥采用UHPC预制板替换受损桥面板,使用1年后未发现任何裂缝^[57],充分证明了装配式UHPC板的优异性能。

然而将UHPC应用于装配式混凝土路面中仍面临以下诸多挑战:①工作性控制。UHPC的工作性是确保其力学性能的关键因素。如果UHPC没有良好的工作性能,则会影响纤维的分散,降低纤维对混凝土韧性的提升作用^[58]。和普通混凝土类似,影响UHPC工作性的主要因素包括水灰比、减水剂掺量、原材料特性等,因此可通过调整上述因素得到合适的工作性。另外,纤维的加入会降低混凝土的坍落度^[59](如图3所示)。因此将UHPC应用于装配式路面时,搅拌过程中需要专业技术人员分批次加入钢纤维,以保证纤维的均匀分散^[51],而且要控制浆体总量,以免造成搅拌机故障^[60]。②成本优化。UHPC的高成本主要源于较高的水泥用量(1 100 kg/m³)以及昂贵的石英砂和钢纤维,这限制了其大规模生产和应用。为降低成本,可掺入固体废弃物等,如粉煤灰^[61]、碳酸钙粉^[62]、大理石粉^[63]等取代部分水泥,在保证力学性能和耐久性的同时实现经济效益最大化。③力学性能适配。针对装配式路面的不同应用场景,需要调整UHPC的力学性能。例如,桥面应用需要更高的强度和韧性,而公路路面则对强度和韧性的要求相对较低。研究表

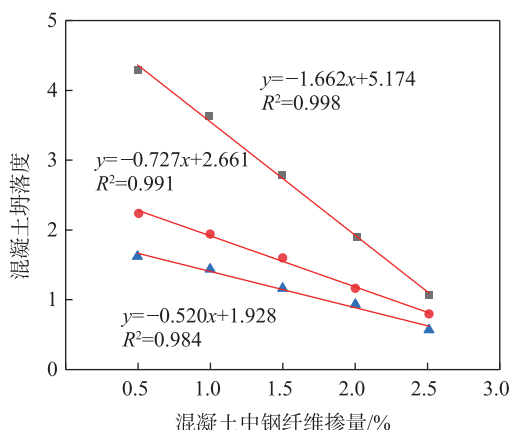


图3 纤维掺量与坍落度的关系^[59]

Fig. 3 The relationship between slump and fiber content^[59]

明,UHPC的抗压强度主要受水灰比、养护条件、养护时间以及钢纤维形状和掺量等因素影响^[64],而韧性则主要取决于纤维的掺量和形状^[65]。通过优化这些关键因素,可实现UHPC力学性能的精准调控,满足多样化工程需求。

综上所述,目前装配式路面采用的高性能混凝土都有相应的不足。如预应力混凝土存在设计要求高,维护困难等缺点。次轻混凝土虽能降低自重,但过多的轻骨料可能会导致强度降低。UHPC成本较高,工艺复杂。因此,性能满足要求、成本合理、施工便捷的高性能混凝土在装配式路面板中的应用亟待研究。

2.3 填缝料

装配式路面通过拼接技术将路面板组装成整体,但板块间的接缝若未能及时填充,会成为雨水渗入的通道,进而影响垫层和基层结构,甚至导致路面板翘动,缩短路面使用寿命并影响通车安全^[66]。填缝材料须具备体积小、易施工、黏结性能好、收缩小、平整度高及不渗水等特点^[67]。

传统水泥基填缝材料(如普通水泥砂浆)成本低且易获取,但抗拉强度低、易开裂且难以适应温度变形。为改善其性能,常通过添加聚合物或纤维进行改性,形成聚合物改性水泥基材料或纤维增强复合材料。彭光^[68]通过苯丙乳液、水泥和重质碳酸钙制备了聚合物水泥路面填缝材料(PCJS),发现当液粉比为1:0.45、水泥比例为60%时,PCJS的变形性能最佳,显著提升了黏结性能。尹新龙^[69]对比了3种聚合物改性水泥刚性填缝材料与普通砂浆,发

现改性材料在早期和后期强度上均表现优异,且具有高黏结性,适用于装配式道路板。高俊义^[70]对PVA纤维混凝土在城市地下综合管廊接缝处的应用进行了研究,发现其有效解决了早期开裂问题,提高了抗折强度并防止了微滑移破坏。尽管复合型材料能显著提升填缝料的黏结性能、强度和抗裂性能,但其成本较高且施工工艺复杂,限制了其广泛应用。

除水泥基材料外,填缝材料还包括热塑性材料(如改性沥青、沥青橡胶)、热固性材料(如聚氨酯、环氧树脂)和弹性体材料(如聚氯乙烯胶泥)^[71]。热塑性材料成本低且原材料易得,但施工时需现场加热,耐老化性能差,易出现脱落和开裂。热固性材料无需现场加热,灌缝质量高,黏结性能和抗渗性能优异,但对施工精度要求高,成本较高。弹性体材料弹性模量低,适应变形能力强,但长期暴露后易粉化,回弹能力和黏结性能下降^[67]。未来研究应致力于开发低成本、高性能且施工简便的新型填缝

材料,以满足装配式路面的多样化需求。

3 路面施工工艺

3.1 调平层的施工工艺

调平层作为装配式路面板与基层之间的过渡结构,其主要功能是为路面板提供均匀、平整的基础,确保精确安装并避免板块错位和沉降不均。调平层的施工质量直接影响路面的平整度、荷载传递效率和长期耐久性^[72-73]。调平层的施工方式主要包括浇筑式和注浆式。

浇筑式调平层核心工艺包括基层处理、砂浆摊铺及砂浆养护。基层处理要确保调平层与基层的良好黏结性^[74],同时做好标高控制。砂浆摊铺可采用机械化摊铺或人工摊铺方法^[75](如图4所示),摊铺过程应确保砂浆均匀覆盖整个施工区域^[76-77]。砂浆摊铺完毕之后的养护管理也至关重要,需通过覆盖塑料膜或定期洒水保持湿度,避免砂浆开裂,提高调平层的稳定性及耐久性^[78]。



(a) 人工摊铺



(b) 机器摊铺

图4 调平层砂浆摊铺类型^[75]

Fig. 4 Leveling layer mortar paving type^[75]

注浆式调平层通过压力灌注浆液,在路面板与基层之间形成密实的黏结层,尤其适用于局部沉降修复或空间受限的区域。其核心工艺包括钻孔布管、浆液配制、压力注浆和表面整平。其中浆液配制是注浆式调平层施工的关键环节,配出的浆液应具有良好的流动性、黏结力和渗透性^[79]。注浆过程中,需控制注浆速度,避免浆液外溢或填充不均^[80]。梁济丰^[81]采用连续注浆机对注浆孔进行CA砂浆注浆,通过观察注浆口是否冒浆判断灌注效果。同时使用FWD落锤式弯沉仪对板底的脱空情况进行检测,结果表明注浆整体均匀性较好。但在地势不平坦的情况下,这种依托经验法的注浆容易产生板块边角脱空、不密实现象。付夕原等^[82]针

对注浆充盈度低、控制条件难的问题,建立了板底浆液扩散理论模型(如图5(a)所示),并开发了带压力控制的注浆设备(如图5(b)所示),有效提高了注浆效果。

两种调平层施工方式的对比如表2所示。浇筑式调平层具有工艺简单、板面平整、成本低等优点。注浆式调平层具有渗透性强、填充效果好等优点,能显著提升路面板的稳定性与结构完整性^[83],但工艺要求高、成本高。注浆式调平层在局部修复和复杂工况下具有显著优势,而浇筑式调平层则更适合大面积施工。可根据工程需求灵活选择或结合两种技术,以实现最佳的路面修复效果。

对于浇筑式调平层,未来研究应进一步优化调

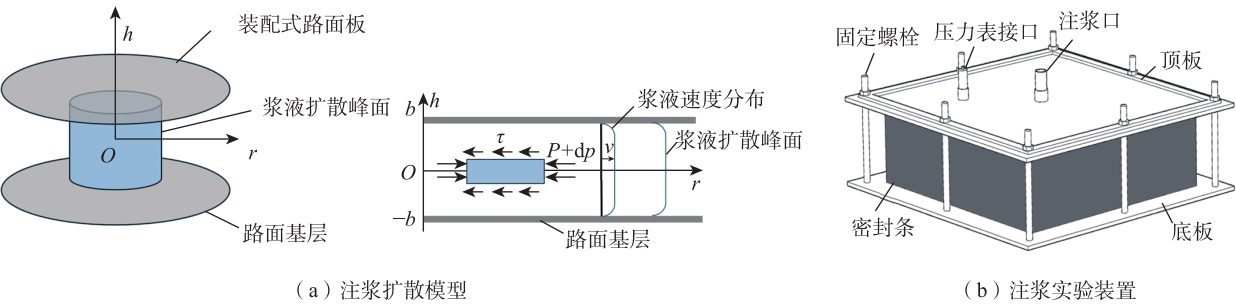


图5 基于压力控制的注浆工艺^[82]

Fig. 5 Grouting technology based on pressure control^[82]

表2 浇筑式和注浆式对比

Tab.2 Comparison between pouring and grouting methods				
施工方式	施工工艺	施工速度	平整度	养护条件
浇筑式	施工简便,设备要求低,无需板开孔	施工速度较慢,需边浇边铺	平整度控制较难,机器摊铺效果优	需覆膜和洒水养护
注浆式	施工复杂,设备要求高,需对板开孔	施工速度较快,砂浆自流平充盈	平整度较高,但可能部分脱空	无需覆膜和洒水

平层材料与施工工艺,提升施工效率和质量。对于注浆式调平层,未来研究应致力于优化注浆材料的性能,开发低成本、高流动性的环保型浆液,同时提升注浆设备的智能化水平,实现注浆参数的精准控制。目前,已有部分研究基于BIM或物联网等技术实现智能注浆,提高施工效率和质量。柏龙君等^[84]构建基于多无线技术的灌浆监测物联系统(如图6所示),通过实时数据采集与集中管理实现施工全过程可视化监测,有效降低布线成本并提升监测效率,为灌浆工程智能化管理提供技术支撑。刘平等^[85]提出基于BIM技术的装配式建筑全流程协同管理方法,通过邯郸某社区项目实践验证其在设计标准化、构件生产优化与施工信息化中的集成应用,有

效提升工程效率并降低建造成本,为同类项目提供可复用的技术路径与管理经验。徐华等^[86]针对传统装配式灌浆设备自动化程度低、流量控制不精准的问题,提出了一种基于模型预测控制(model predictive control, MPC)与比例-积分-微分控制(proportional-integral-derivative, PID)相结合的智能灌浆流量控制技术,通过闭环在线调整电动调节阀,实现流量快速稳定控制。

3.2 路面板的吊装工艺

在装配式混凝土路面施工中,吊装和拼装精度对工程质量具有决定性影响。传统吊装方法主要包括四点起吊、框架平衡梁起吊和叉车类起吊^[87]。四点起吊法适用于较大面积的路面板,能够均匀分布吊装力,但对吊点位置要求较高,且易产生较大拉应力,影响板材的整体性和稳定性。框架平衡梁起吊通过框架结构平衡吊装力,避免集中受力,适用于更大尺寸的板材。叉车类起吊操作简便,适用于小型板材,但精度较低,适用范围有限。不同起吊方式的优缺点对比如表3所示。

研究表明,传统吊装方法存在明显局限性。尹锦明等^[88]通过有限元分析发现,缩小板块尺寸可显著降低板内最大拉应力。李娣^[89]利用ABAQUS模拟吊装过程,确定了合理的吊点数量及位置,优化了吊装方法和施工流程。陈宽标^[90]进一步研究了四点起吊法下吊位比和板块尺寸对最大拉应力和挠度的影响,提出了最佳板块尺寸和吊位比。然而,传统方法需在路面板上预留吊装孔或预埋件,

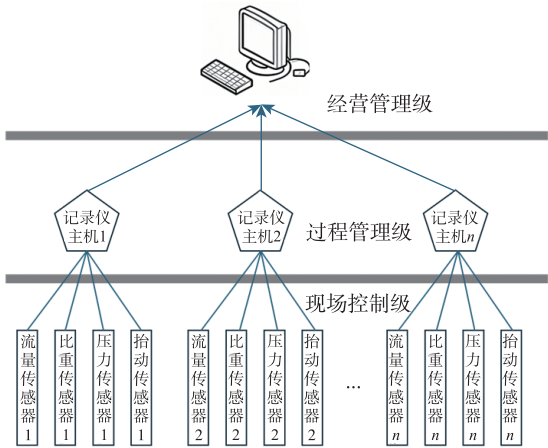


图6 灌浆检测系统整体结构^[84]

Fig. 6 Structure of grouting testing system^[84]

表3 不同起吊方式对比

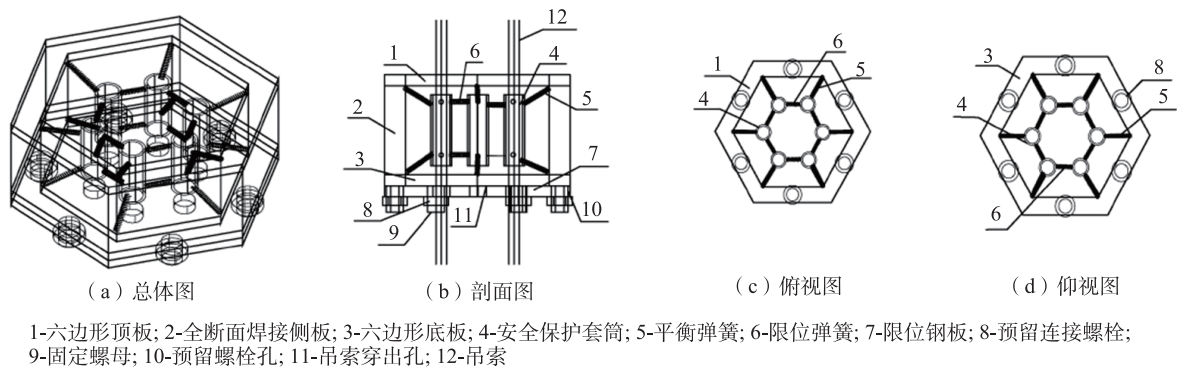
Tab.3 Comparison of different lifting methods

工艺特点	  		
	四点起吊	框架平衡梁起吊	叉车起吊
板块尺寸	中大型板块	超大型板块	小型板块
吊点要求	需预埋吊点	需预埋吊点	无需预埋吊点
操作成本	成本适中	成本较高,需要平衡框架模具费	成本较低
精度控制	适中	较好	较低
受力情况	但吊点应力集中显著,开裂风险增高	受力更均匀,但也存在吊点应力集中问题	受力集中,依靠叉车臂

可能破坏表面连续性,影响平整度和行车舒适度,并增加后期维护难度^[91]。

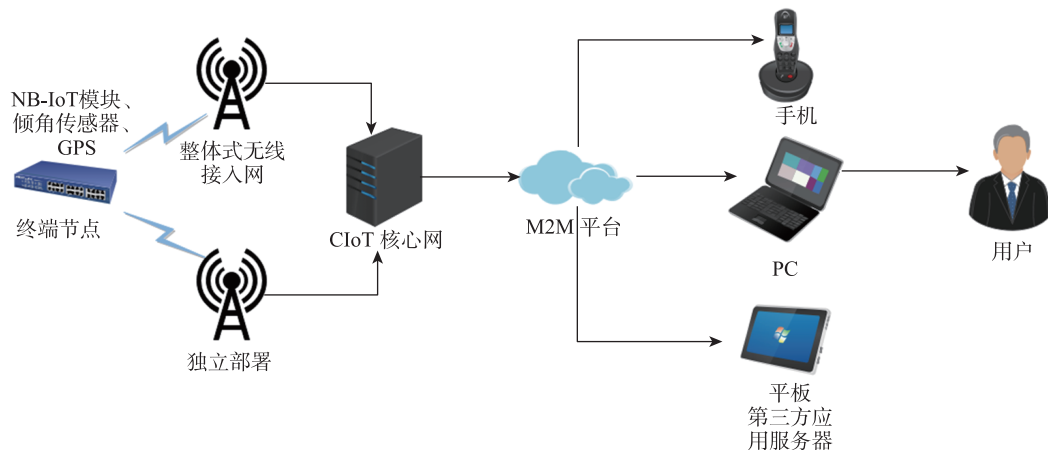
为克服传统方法的局限性,新型吊装技术逐渐成为研究热点。柯文汇等^[92]通过 ABAQUS 分析和实验验证,研究了不同尺寸路面板在四点通孔吊装下的力学行为。结果表明,板材在吊装过程中始终处于弹性变形阶段,未发生开裂,且吊装力与吊距及板材尺寸相关。李宏伟等^[93]设计了一种新型吊

索平衡装置(如图7所示),确保构件受力均匀,并通过强度验算精确设计吊点位置,保障吊装安全。刘倩倩^[94]针对实心板和空心板的吊装方式进行了优化设计,探讨了吊点位置、预埋吊件和吊装角度对吊装应力的影响,提出了适用于空心板的新型吊装方法。新型吊装方法通过减少对板材的破坏、优化力学性能、提高施工精度和降低维护难度,显著提升了施工的安全性和效率。

图7 吊索平衡装置^[93]Fig. 7 Sling balancing device^[93]

未来,智能化、模块化和绿色化将成为吊装技术发展的重要趋势。随着新型吊装技术的不断发展,智慧化吊装方法也在持续优化升级,逐步融入更多智能化技术手段。传统吊装作业虽然已经具备了较高的机械化水平,但仍然面临着操作风险高、管理复杂、效率不足等问题。张淦等^[95]研发集成 MCN-Lite 视觉模型与旋转编码器的起重吊装智能感知装备,通过协同分析人机运动特征实现误操

作行为识别(精度 95.17%、延迟 0.25 s),实验室验证其可有效降低吊装交互风险。刘诗楠等^[96]针对装配式建筑施工无线网络覆盖不足与高能耗问题,提出基于 NB-IoT 技术的低功耗广域物联解决方案(如图8所示),通过实时构件定位与智能监测实现施工全过程精细化管理,为“智慧工地”建设提供技术支撑,符合国家工程信息化发展方向,助力建筑产业智能化转型升级。李强年等^[97]提出 BIM 与

图8 NB-IoT应用网络架构^[96]Fig. 8 NB-IoT application network architecture^[96]

NB-IoT融合的装配式吊装安全智能管控体系,通过量化分析21项风险耦合关系(识别精度提升37%),实现毫米级构件轨迹追踪与动态预警,降低施工能耗23%。

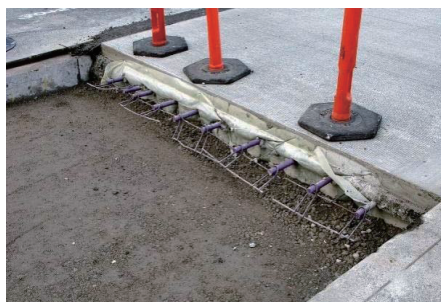
3.3 装配式路面板的连接技术与板缝处治

3.3.1 装配式路面板的连接技术

装配式路面板的连接方式从结构上可分为传力杆式和非传力杆式^[98],如图9所示。传力杆连接主要用于矩形板体系,具有较强的荷载传递能力,适用于高承载能力路面设计。通过传力杆减小接缝位移,减少板块间摩擦和不均匀沉降,但传力杆的尺寸、位置和角度对荷载转移效率有显著影响,要求较高的施工精度和设计水平。非传力杆连接多用于六边形板体系,常见形式包括骨料互锁式和榫槽式连接。其优点在于施工简便、成本较低,但主要依赖板块间的几何形状与材料锁合力传递荷载,力学支撑能力相对较弱。

传力杆式连接在高荷载路段中表现出色。例如,密歇根板系统通过带有顶部凹槽和嵌入传力杆的面板,采用快凝材料填充凹槽,有效传递接缝荷载,但对接缝精度和安装工艺要求较高^[99]。Yaqoob等^[13]通过有限元模拟研究了不同传力杆位置和尺寸对路面力学响应的影响,发现钢传力杆不仅能增强接缝传荷能力,还有助于板块对齐。赵鸿铎等^[100]提出了一种夹环连接式传力杆接缝,通过有限元分析和室内足尺试验验证了其优异的传荷性能(如图10所示)。

非传力杆式连接因其施工简便和成本优势,在六边形板体系中得到广泛应用(如图11所示)。Li等^[14]提出了一种新型舌槽式预制水泥混凝土路面板(如图12所示),通过物理和有限元数值模拟研究了榫槽对应力的影响,并探讨了板厚、节点刚度和基层弹性模量对极限承载力的影响。Jiang等^[28]通过有限元分析表明,节点形式的变化对最大挠度和

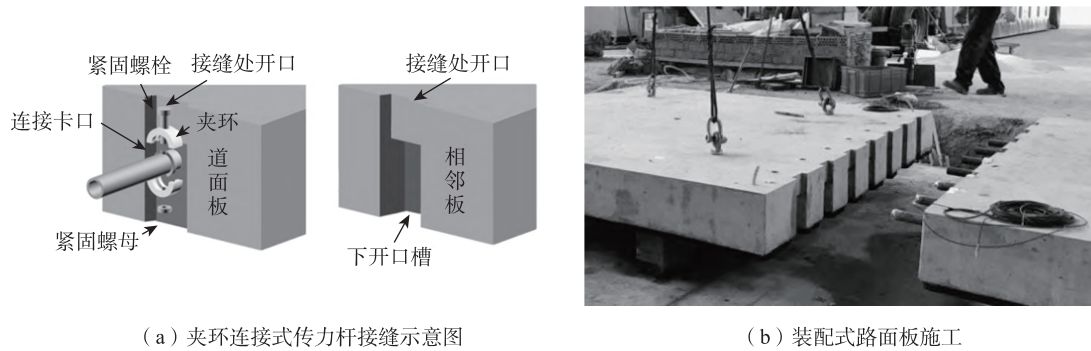


(a) 传力杆



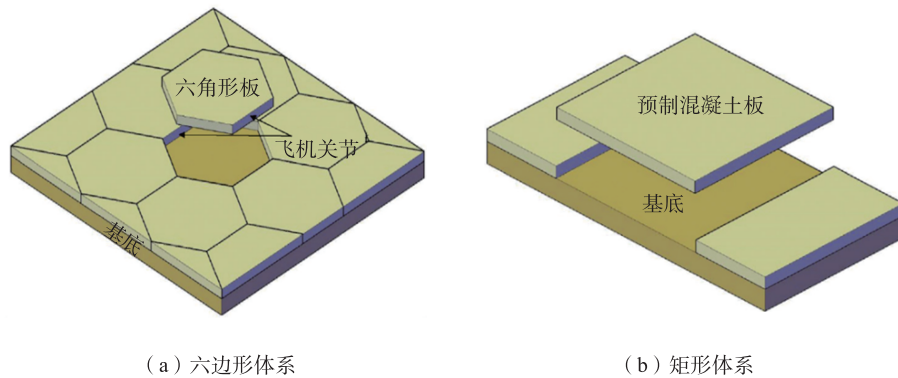
(b) 非传力杆式

图9 装配式板连接类型^[98]Fig. 9 Assembled plate connection type^[98]



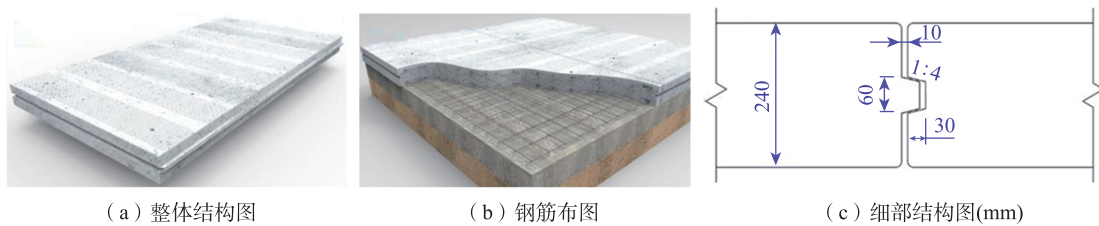
(a) 夹环连接式传力杆接缝示意图

(b) 装配式路面板施工

图 10 夹环连接式传力杆接缝设计^[100]Fig. 10 Design of precast cement concrete pavement joint with clamping ring connected dowel bar^[100]

(a) 六边形体系

(b) 矩形体系

图 11 路面板连接类型^[11]Fig. 11 Road panel link type^[11]

(a) 整体结构图

(b) 钢筋布图

(c) 细部结构图(mm)

图 12 新型舌槽式水泥混凝土路面板连接类型^[14]Fig. 12 Novel prefabricated cement concrete pavement^[14]

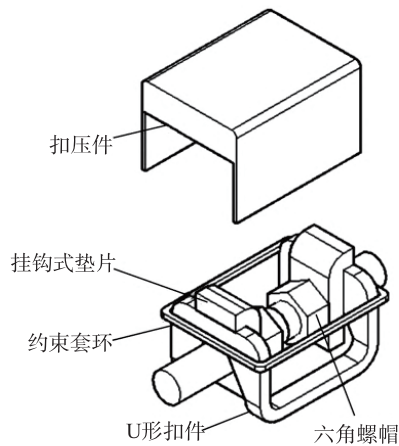
位移传递系数的影响较小,推荐采用圆形榫槽节点形式。Novak 等^[37]介绍了一种新型预制混凝土路面系统,通过专用接头和嵌入式钢耦合器实现力的传递。针对非传力杆式连接可能因摩擦力不足导致接缝失效的问题,方明镜等^[101]设计了一种“吊连共筋”体系(如图 13 所示),采用自主研发的扣压式连接件,显著提高了板间传荷能力。

综上所述,传力杆式和非传力杆式连接各有优缺点,未来研究应结合智能化、高性能材料和模块

化设计,推动装配式路面板连接技术的进一步发展和应用。

3.3.2 装配式路面板的板缝处治

装配式路面板通过预制板块拼接形成路面结构,接缝处理是确保路面质量和长期性能的关键环节^[5, 102]。接缝的密封性、强度及路面的稳定性、耐久性和抗渗性直接影响路面的使用寿命。有效的接缝处理能够防止水分渗透、冻融破坏及钢筋腐蚀,从而显著延长路面的使用寿命。Li 等^[103]提出了一

图13 连接件及机械连接结构形式^[101]Fig. 13 Connector and mechanical connection structure^[101]

种槽口式灌浆拼接方法,通过将水泥灌浆材料倒入接缝和槽口中,结合有限元法和三点弯曲试验,对比分析了装配式底板节点的破坏模式、荷载-位移特性、应变发展、应力分布和破坏过程。结果表明,该方法具有优异的抗开裂和抗弯曲能力,显著提升了接缝的力学性能。Xi等^[104]提出使用钢纤维自应力混凝土进行接缝浇筑(如图14所示),不仅能有效抑制接缝裂缝的扩展,还能实现板块的整齐对接。此外,其产生的自应力增强了预制板中预应力设计的连续性,进一步延长了路面的使用寿命。张富宾等^[105]对比分析了不同装配式结构接缝密封防水方法的适用性,并对受力和防渗一体化材料及设计方

法提出了展望,为接缝处理的综合性能提升提供了理论支持。综上所述,接缝处理技术通过材料改性和工艺优化,显著提升了装配式路面板的性能。

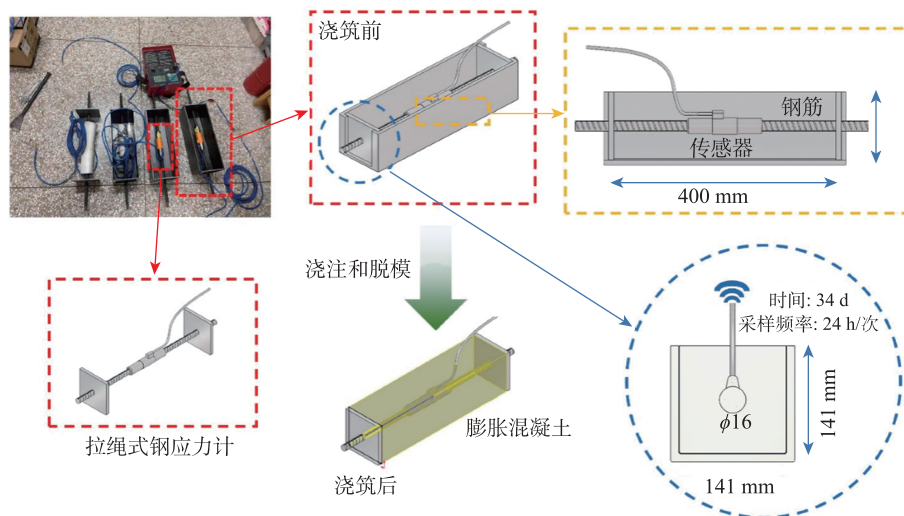
4 装配式路面发展趋势

目前关于装配式路面结构设计方法、路用材料、施工工艺等关键技术取得突破,但总体而言,离满足实际应用需求还存在差距,主要存在如下瓶颈问题。

1) 结构设计方法不完善:现有设计模型(如实体连续地基模型和Winkler地基模型)在计算精度与效率之间难以平衡,实体模型计算复杂度高,Winkler模型精度有限,且对非均质地基适应性较差。接缝设计和疲劳寿命预测模型在多因素耦合和三维应力状态的考虑上仍不完善,难以全面反映实际路面的复杂受力情况。

2) 路用材料不均衡:普通混凝土成本低但自重大、易开裂;预应力混凝土性能优异但成本高、施工复杂;轻质混凝土自重轻但强度较低;超高性能混凝土(UHPC)强度高但成本昂贵、工艺复杂。接缝材料在耐久性、抗渗性和力学性能方面仍需进一步提升。

3) 施工工艺不精细:传统吊装方法(如四点起吊)易产生拉应力,破坏板材表面连续性;调平层施工(如浇筑式和注浆式)在质量控制、材料性能和施工效率方面存在挑战;接缝处理技术(如槽口式灌浆和钢纤维自应力混凝土)对材料性能和施工精度

图14 混凝土自应力测量模具及设备^[104]Fig. 14 Concrete self-stress measurement mold and equipment^[104]

要求高,难以大规模推广。

为突破装配式路面面临的上述瓶颈问题,可以总体归纳如下4个方向的发展趋势。

1) 智能化与数字化:通过BIM、物联网和人工智能技术,实现结构设计、施工过程和路面性能的实时监测与精准控制,提高设计精度和施工效率。例如,开发智能吊装设备和注浆系统,优化接缝处理和疲劳寿命预测模型。

2) 高性能材料研发:推动低成本、高性能材料的应用,如自修复混凝土、纳米改性灌浆材料和复合轻质混凝土,提升路面的力学性能、耐久性和环境适应性。

3) 工艺优化与标准化:优化施工工艺,推动模块化、绿色化施工技术的应用,减少对板材的破坏和施工能耗。同时,制定标准化设计规范和施工流程,降低施工难度和成本。

4) 多功能一体化设计:结合结构设计、材料性能和施工工艺,开发适用于多样化工程需求的装配式路面系统,例如受力和防渗一体化的接缝设计,以及适应高荷载和恶劣环境的路面结构。

5 结语

装配式路面技术可有效解决路面快速养护问题,同时提升混凝土构件的整体性能和品质。本文综述了装配式路面在结构设计方法、材料优选及施工工艺三方面的研究进展,主要研究结论如下。

1) 结构设计方面,实体连续地基模型和Winkler地基模型分别适用于高刚度厚板和柔性薄板,Pasternak模型平衡了计算效率与精度。动载和温度梯度显著影响路面板应力分布和疲劳寿命,优化接缝设计和预应力筋布置可提升承载能力和耐久性。基于Weibull分布和频域分析的疲劳方程为设计提供理论支持,但多因素耦合下的疲劳寿命预测仍需深入研究。

2) 材料优选方面,水泥砂浆调平层存在多裂纹、强度低等问题,添加抗裂聚丙烯纤维等可改善性能,但反射裂缝问题仍需解决。预应力混凝土、轻质混凝土及UHPC可提升路面板性能并降低厚度,但工艺复杂、成本高,亟需开发成本合理、施工便捷的材料。新型填缝料提高了接缝抗渗性,但成本高、施工精度要求高。

3) 施工工艺方面,浇筑式调平层效率高但易开

裂,注浆式调平层填充好但成本高;吊装工艺通过优化设计和智能设备提升精度;传力杆式荷载传递强但施工复杂,非传力杆式简便但力学性能弱;接缝处理提升抗裂性和耐久性,但成本高。未来将向智能化、模块化和绿色化发展,推动高性能材料应用和工艺标准化,提供高效、经济的解决方案。

参考文献

- [1] 交通运输部. 2023年交通运输行业发展统计公报[J]. 中国水运, 2024 (15): 31-35.
- [2] 李星宇. 城市道路路面养护问题及对策研究[J]. 工程技术研究, 2024, 9 (21): 132-134.
LI X Y. Research on problem and countermeasure of urban road pavement maintenance[J]. Engineering and Technological Research, 2024, 9 (21): 132-134.
- [3] 王东辉, 柳旭东, 陈勇. 装配整体式混凝土结构的发展[J]. 混凝土, 2012(1): 113-115.
WANG D H, LIU X D, CHEN Y. Development of assembled precast concrete structure[J]. Concrete, 2012(1): 113-115.
- [4] BULL J W, WOODFORD C H. Design of precast concrete pavement units for rapid maintenance of runways[J]. Computers & Structures, 1997, 64(1/2/3/4): 857-864.
- [5] TAYABJI S, YE D, BUCH N. Precast concrete pavements technology overview and technical considerations[J]. PCI Journal, 2013, 58(1): 112-128.
- [6] SAPOZHNIKOV N, ROLLINGS R. Soviet precast prestressed construction for airfields[C]. 2007 Worldwide Airport Technology Transfer Conference, New Jersey, USA, April 16-18, 2007, Federal Aviation Administration American Association of Airport Executives : 2007.
- [7] SCHEXNAYDER C, ULLMAN G, ANDERSON S. Pavement reconstruction scenarios using precast concrete pavement panels[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2007, 12(4): 186-199.
- [8] 王鹏, 刘德朝, 王晓明. 装配式路面结构设计理论[J]. 中国科技期刊数据库 工业A, 2021(3): 255-257.
WANG P, LIU D C, WANG X M. Structural design theory of assembled pavement[J]. China Science and Technology Journal Database Industry A, 2021(3): 255-257.
- [9] DU C, LI Y Z, ZHANG C X. Parameters sensitivity analysis of prefabricated prestressed concrete pavement slab[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 330(2): 022057.

- [10] 王嘉新. 双层温克勒地基上双层薄板的弯曲问题[J]. 中南工业大学学报, 1997, 28(4): 396-397.
WANG J X. Bending problem of double-layer thin plate on double-layer winkler foundation[J]. Journal of Central South University of Technology, 1997, 28(4): 396-397.
- [11] FANG M J, ZHOU R, KE W H, et al. Precast system and assembly connection of cement concrete slabs for road pavement: A review[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2022, 9(2): 208-222.
- [12] 夏经纬, 夏仁宝. 水泥基灌浆材料在结构加固改造领域的应用探讨[J]. 新型建筑材料, 2022, 49(8): 84-86.
XIA J W, XIA R B. Discussion on the application of cement-based grouting material in structural reinforcement and reconstruction[J]. New Building Materials, 2022, 49(8): 84-86.
- [13] YAQOOB S, SILFWERBRAND J, BALIEU R G R. A parametric study investigating the dowel bar load transfer efficiency in jointed plain concrete pavement using a finite element model[J]. Buildings, 2024, 14 (4): 1039.
- [14] LI C M, LEI S X, XIAO Q H, et al. An experimental and numerical investigation on the load transfer efficiency of a novel prefabricated cement concrete pavement[J]. Structures, 2023, 53: 963-972.
- [15] LI H, FANG N R, WANG X C, et al. Load transfer efficiency analysis and void evaluation of composite pavement cement concrete slab[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2022(1): 4490485.
- [16] 王轩, 胡春华. 装配式水泥混凝土路面板力学响应分析与接缝优化[J]. 技术与市场, 2021, 28(1): 64-66.
WANG X, HU C H. Mechanical response analysis and joint optimization of assembled cement concrete pavement slab[J]. Technology and Market, 2019, 28(1): 64-66.
- [17] HUANG Y, LIU J Y, YANG X, et al. Characterization of permanent deformation of asphalt pavement with rigid base[J]. Construction and Building Materials, 2025, 460: 139808.
- [18] DONG Z J, GUO Z S, ZHANG H Q, et al. Optimal design of prefabricated base joint for asphalt pavement based on finite element method and field deflection test [J]. Construction and Building Materials, 2022, 345: 128301.
- [19] 熊哲, 周义. 装配式预应力预制空心楼板承载性能实验研究[J]. 广东土木与建筑, 2019, 26(11): 85-87.
XIONG Z, ZHOU Y. Experimental study on bearing capacity of prefabricated prestressed hollow slab[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2019, 26 (11): 85-87.
- [20] 刘永超, 贺文贤, 李泽源, 等. 装配式地连墙接缝变形特性研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2024, 41(2): 75-84.
LIU Y C, HE W X, LI Z Y, et al. Research on joint deformation characteristics of prefabricated diaphragm walls[J]. Journal of Architecture and Civil and Engineering, 2024, 41(2): 75-84.
- [21] 李德志. 高层建筑装配式混凝土梁疲劳力学性能试验研究[J]. 混凝土, 2022(8): 183-186.
LI D Z. Experimental study on fatigue mechanical properties of prefabricated concrete beams in high-rise buildings[J]. Concrete, 2022(8): 183-186.
- [22] ZHU H R, WEI G F, XU H, et al. The influence of inter-layer bonding conditions on the propagation laws of reflective cracks in semi-rigid base pavement based on the DEM and GPR[J]. Construction and Building Materials, 2024, 442: 137547.
- [23] 张宇辉, 赵媛媛, 顾欣. 温度-荷载耦合场下机场跑道剩余寿命评价模型[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(4): 725-733.
ZHANG Y H, ZHAO Y Y, GU X. Residual life evaluation model for airport runway under coupled temperature-load field[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(4): 725-733.
- [24] MAHFUDA A, SISWOSUKARTO S, SUHENDRO B. The influence of temperature variations on rigid pavement concrete slabs[J]. Journal of the Civil Engineering Forum, 2023, 9(2): 139-150.
- [25] QIN Y H, HILLER J E. Modeling temperature distribution in rigid pavement slabs: impact of air temperature [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(9): 3753-3761.
- [26] KIM K, CHUN S, PARK B, et al. Precast prestressed concrete pavement (PPCP): effect of thermal gradient on curling deflection and stress[J]. Construction and Building Materials, 2021, 274: 121966.
- [27] KACHKOUCH F Z, NOBERTO C C, DE ALBUQUERQUE LIMA BABADOPULOS L F, et al. Fatigue behavior of concrete: a literature review on the main relevant parameters[J]. Construction and Building Materials, 2022, 338: 127510.
- [28] JIANG S Q, WANG Y, WANG X H, et al. Numerical analysis on the structure design of precast cement con-

- crete pavement slabs[J]. *Coatings*, 2022, 12(8): 1051.
- [29] ZHAO H D, CHEN H Y, LI C C, et al. Structural optimization and performance evaluation of precast concrete pavement with composite base layer[J]. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 2023, 12(2): 525-533.
- [30] WEI B L, GUO C C, CUI C. Fatigue life prediction of long-life pavement using frequency-domain analysis[J]. *Chinese Journal of Engineering Science*, 2017, 19(6): 80-85.
- [31] 戴广学. 普通公路冷再生下基层找平层的设置与施工[J]. *北方交通*, 2014(4): 96-97.
- DAI G X. The setting and construction of lower subbase screed-coat under the cold-recycling of common highway [J]. *Northern Communications*, 2014(4): 96-97.
- [32] MERRITT D, MCCULLOUGH B F, BURNS N H. Feasibility of using precast concrete panels to expedite construction of Portland cement concrete pavements[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2001, 1761(1): 3-9.
- [33] 袁龙. 浅谈找平层的缺陷和提高找平层质量措施[J]. *科技传播*, 2011, 3(10): 148.
- YUAN L. On the defects of leveling layer and the measures to improve the quality of leveling layer[J]. *Public Communication of Science & Technology*, 2011, 3(10): 148.
- [34] WAN F H, ZHU Z Q, WANG W S, et al. Preliminary exploration of economic polypropylene- fiber- reinforced ECC with superfine river sand (SSPP-ECC) applied to a bridge pavement leveling overlay[J]. *Materials*, 2022, 15 (7): 2474.
- [35] KHAREL S, YU H, LAU C K, et al. Coal-derived char as new sand replacement material in cement mortars: a comprehensive experimental study[J]. *The Science of the Total Environment*, 2024, 954: 176472.
- [36] 范小响, 罗翥, 傅智, 等. 水泥混凝土路面预制拼装快速修复技术研究[J]. *公路交通科技 (应用技术版)*, 2006 (1): 33-38.
- FAN X X, LUO Z, FU Z, et al. Research on rapid repair technology of prefabricated assembly of cement concrete pavement[J]. *Highway Transportation Technology (Applied Technology Edition)*, 2006(1): 33-38.
- [37] NOVAK J, KOHOUTKOVÁ A, KŘÍSTEK V, et al. Precast concrete pavement-systems and performance review [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 236(1): 012030.
- [38] MERRITT D K, MCCULLOUGH B F, BURNS N H. Precast prestressed concrete pavement pilot project near Georgetown, Texas[J]. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 2003, 1823 (1): 11-17.
- [39] 黄卫, 钱振东, 牛赫东. 预应力混凝土路面的荷载分析及试验研究[J]. *土木工程学报*, 2000, 33(1): 88-92.
- HUANG W, QIAN Z D, NIU H D. Load analysis and experiment study of prestressed concrete pavement[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2000, 33(1): 88-92.
- [40] 魏希胜. 建筑施工中混凝土裂缝的控制技术[J]. *建材发展导向*, 2024, 22 (21): 97-99.
- WEI X S. Control technology of concrete cracks in building construction[J]. *Development Guide to Building Materials*, 2024, 22 (21): 97-99.
- [41] 温永钦, 郑杰. 轻集料混凝土的研究现状及其应用分析[J]. *四川水泥*, 2023(3): 14-16.
- WEN Y Q, ZHEN J. Research status and application analysis of lightweight aggregate concrete[J]. *Sichuan Cement*, 2023(3): 14-16.
- [42] 谢红波, 许红升, 夏勇. 装配式轻质混凝土复合保温外墙板系统构造技术探讨[J]. *广东建材*, 2024, 40(3): 1-4.
- XIE H B, XU H S, XIA Y. Discussion on the construction technology of prefabricated lightweight concrete composite thermal insulation exterior wall panel system [J]. *Guangdong Building Materials*, 2024, 40(3): 1-4.
- [43] 牛晓娜. 装配式建筑轻质混凝土预制梁力学性能分析[J]. *砖瓦*, 2024(5): 75-77.
- NIU X N. Mechanical properties analysis of prefabricated lightweight concrete beams in prefabricated buildings [J]. *Brick-Tile*, 2024(5): 75-77.
- [44] 范瑛宏, 彭鹏, 侯子义. 次轻混凝土在预制拼装快速修复技术中的应用[J]. *混凝土*, 2015(5): 134-136.
- FAN Y H, PENG P, HOU Z Y. Rapid repair technology for precast slab of specified density concrete[J]. *Concrete*, 2015(5): 134-136.
- [45] 周云, 张雄, 张永娟. 轻集料混凝土的研究和应用[J]. *上海建材*, 2008(2): 22-24.
- ZHOU Y, ZHANG X, ZHANG Y J. Research and application of lightweight aggregate concrete[J]. *Shanghai Building Materials*, 2008(2): 22-24.
- [46] DU J, MENG W N, KAMAL K H, et al. New develop-

- ment of ultra-high-performance concrete (UHPC)[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 224: 109220.
- [47] MISHRA O, SINGH S P. An overview of microstructural and material properties of ultra-high-performance concrete[J]. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 2019, 8(2): 97-143.
- [48] YAZICI H, YARDIMCI M Y, YİĞİTER H, et al. Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag[J]. Cement and Concrete Composites, 2010, 32(8): 639-648.
- [49] GANESH P, MURTHY A R. Tensile behaviour and durability aspects of sustainable ultra-high performance concrete incorporated with GGBS as cementitious material [J]. Construction and Building Materials, 2019, 197: 667-680.
- [50] AMRAN M, HUANG S S, ONAIZI A M, et al. Recent trends in ultra-high performance concrete (UHPC): current status, challenges, and future prospects[J]. Construction and Building Materials, 2022, 352: 129029.
- [51] AKHNOUKH A K, BUCKHALTER C. Ultra-high-performance concrete: constituents, mechanical properties, applications and current challenges[J]. Case Studies in Construction Materials, 2021, 15: e00559.
- [52] DE LARRARD F, SEDRAN T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model [J]. 1994, 24(6): 997-1009.
- [53] MUSHA H, KONO K, KAWAGUCHI T, et al. Sustainable UFC structures in Japan and its durability performance[C]. Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Kyoto. 2013: 18-21.
- [54] TAYEH B A, BAKAR B H, MEGAT JOHARI M A, et al. Utilization of ultra-high performance fibre concrete (UHPFC) for rehabilitation-a review[J]. Procedia Engineering, 2013, 54: 525-538.
- [55] LI Y, PIMIENTA P, PINOTEAU N, et al. Effect of aggregate size and inclusion of polypropylene and steel fibers on explosive spalling and pore pressure in ultra-high-performance concrete(UHPC) at elevated temperature[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 99: 62-71.
- [56] ZHANG Y Y, FAN W, ZHAI Y, et al. Experimental and numerical investigations on seismic behavior of prefabricated bridge columns with UHPFRC bottom segments [J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(8): 04019076.
- [57] CORVEZ D, MASSON B. UHPFRC solutions for the retrofit of nuclear reactor containment walls[J]. 2013: 147-156.
- [58] BOULEKBACHE B, HAMRAT M, CHEMROUK M, et al. Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(9): 1664-1671.
- [59] YU R, SPIESZ P, BROUWERS H J H. Mix design and properties assessment of ultra-high performance fibre reinforced concrete(UHPFRC) [J]. Cement and Concrete Research, 2014, 56: 29-39.
- [60] EL-TAWIL S, TAI Y S, MENG B, et al. Commercial production of non-proprietary ultra high performance concrete[R]. Michigan. Dept. of Transportation. Research Administration, 2018.
- [61] MUGAHED AMRAN Y H, ALYOUSEF R, ALABDUL-JABBAR H, et al. Clean production and properties of geopolymer concrete: a review[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 251: 119679.
- [62] YOUNESS D, MECHAYMECH A, AL WARDANY R. Flow assessment and development towards sustainable self-consolidating concrete using blended basalt and limestone-cement systems[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 283: 124582.
- [63] TALAH A, KHARCHI F, CHAID R. Influence of marble powder on high performance concrete behavior[J]. Procedia Engineering, 2015, 114: 685-690.
- [64] GRAYBEAL B. A. Material property characterization of ultra-high performance concrete[R]. United States. Federal Highway Administration. Office of Infrastructure Research and Development, 2006.
- [65] LIANG Y N, CHEN B C, JI T, et al. Effects of sand-binder ratio, water-binder ratio and volume percentage of steel fiber on the performance of RPC[J]. 2011, 39(5): 748-753.
- [66] 曹岩甫, 于海波, 丁科, 等. 装配式重载交通道路板施工技术及应用[J]. 建筑机械化, 2023, 44(3): 78-81.
- CAO Y F, YU H B, DING K, et al. Construction technology and application of prefabricated heavy load traffic road slab[J]. Construction Mechanization, 2023, 44(3): 78-81.
- [67] 费源. 水泥混凝土路面接缝病害分析及填缝料技术应用[J]. 现代交通技术, 2011, 8(1): 13-16.
- FEI Y. Joint disease analysis of cement concrete pave-

- ment and application of joint filling materials[J]. Modern Transportation Technology, 2011, 8(1): 13-16.
- [68] 彭光, 许金余, 任韦波. 聚合物水泥路面填缝材料变形性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(9): 2894-2899.
- PENG G, XU J Y, REN W B. Deformation property of polymer cement pavement joint sealant[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(9): 2894-2899.
- [69] 尹新龙, 杨永民, 罗磊, 等. 适应高流量车载的装配式路面刚性接缝材料的制备及性能研究[J]. 广东水利电力职业技术学院学报, 2025, 23(1): 44-47.
- YIN X L, YANG Y M, LUO L, et al. Preparation and performance study of prefabricated road rigid joint materials for high flow vehicles[J]. Journal of Guangdong Polytechnic of Water Resources and Electric Engineering, 2025, 23(1): 44-47.
- [70] 高俊义, 王建军, 银英姿, 等. 城市地下综合管廊接缝PVA纤维混凝土性能试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2019, 45(4): 93-96.
- GAO J Y, WANG J J, YIN Y Z, et al. Experimental study on performance of PVA fiber concrete for joints of urban underground integrated pipe gallery[J]. Sichuan Building Science Research, 2019, 45(4): 93-96.
- [71] 东希军. 公路水泥混凝土路面接缝和填缝料[J]. 科技信息, 2011 (20): 728-729.
- DONG X J. Joint and joint filler of highway cement concrete pavement[J]. Science & Technology Information, 2011(20): 728-729.
- [72] 万晨光, 申爱琴, 郭寅川. 桥面铺装调平层与沥青面层层间剪切行为[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(7): 1355-1360.
- WAN C G, SHEN A Q, GUO Y C. Shear behavior of leveling layer and asphalt pavement of bridge deck pavement[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(7): 1355-1360.
- [73] 秦仁杰, 应荣华, 李宇峙. 旧水泥混凝土路面罩面工程中调平层厚度确定方法研究[J]. 长沙交通学院学报, 2002, 18(4): 40-43.
- QIN R J, YING R H, LI Y Z. Study of design method for asphalt mixed layer thickness in cement concrete pavement overlay[J]. Journal of Changsha Communications University, 2002, 18(4): 40-43.
- [74] 李一鸣. 复合式沥青路面水泥混凝土基层面层处理技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- LI Y M. Research about the treatment of the cement concrete base course in composite asphalt pavement[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [75] 秦华, 陈焱. 超高性能水泥基自流平砂浆的试验研究[J]. 混凝土, 2024(7): 174-177.
- QIN H, CHEN X. Experimental study on ultra-high performance cement-based self-leveling mortar[J]. Concrete, 2024(7): 174-177.
- [76] 温乾钦. 道面滑模混凝土施工粘聚性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2021.
- WEN Q Q. Study on cohesive properties of slipform concrete for pavement in construction[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2021.
- [77] 潘俊铮. 振捣作用下混凝土流变性与均质性评价方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- PAN J Z. Research on evaluation methods of concrete rheology and homogeneity of concrete under vibration [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.
- [78] 张磊. 不同养护方式对水泥砂浆的性能影响及其机理研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2024.
- ZHANG L. Study on properties effects and mechanism of different curing methods on cement mortar[D]. Wuhan: Wuhan University of Light Industry, 2024.
- [79] 邓成进, 党发宁, 苗喆, 等. 堆石料注浆技术及注浆后力学性质试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(10): 1907-1913.
- DENG C J, DANG F N, MIAO Z, et al. Experimental study on grouting technology of rockfill and mechanical properties after grouting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(10): 1907-1913.
- [80] 刘军, 王健, 熊琳. 动水环境下渗透注浆浆液扩散影响因素分析[J]. 公路, 2015, 60(11): 239-243.
- LIU J, WANG J, XIONG L. Analysis of diffusion factors for permeation grouting in flowing water environment [J]. Journal of Highway, 2015, 60(11): 239-243.
- [81] 梁济丰. 装配式复合路面快速修复技术及应用[J]. 中华建设, 2020(5): 159-161.
- LIANG J F. Rapid repair technology and application assembled composite pavement[J]. China Construction, 2020(5): 159-161.
- [82] 付夕原, 赵鸿铎, 蔡爵威, 等. 基于压力控制的装配式路面板板底注浆工艺研究[J]. 交通科技, 2021(6): 36-41.
- FU X Y, ZHAO H D, CAI J W, et al. Grouting technology of precast pavement slab bottom based on pressure control[J]. Transportation Science & Technology, 2021

- (6): 36-41.
- [83] 李定侯, 张桂铭, 白柠诚, 等. 水泥混凝土路面多锤头破碎就地再生技术应用优化研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(6): 158-160.
- LI D B, ZHANG G M, BAI N C, et al. Study on application optimization of multi-hammer crushing in situ recycling technology for cement concrete pavement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development[J]. Highway Traffic Science and Technology (Applied Technology Edition), 2020, 16(6): 158-160.
- [84] 柏龙君, 周绍武. 基于物联网的灌浆监测系统的应用研究[J]. 水利水电技术, 2013, 44(4): 14-16.
- BAI L J, ZHOU S W. Study and application of Internet of Things (IOT) based grouting monitoring system[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(4): 14-16.
- [85] 刘平, 黄钰杰, 王浩宇. BIM技术在装配式混凝土建筑中的应用[J]. 混凝土, 2022(4): 138-141.
- LIU P, HUANG Y J, WANG H Y. Application of BIM technology in prefabricated concrete building[J]. Concrete, 2022(4): 138-141.
- [86] 徐华, 陈阳. 基于模型预测控制的装配式灌浆流量智能控制技术研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2025(1): 94-97.
- XU H, CHEN Y. Research on the intelligent control technology of prefabricated grouting flow based on model prediction control[J]. Automation & Instrumentation, 2025(1): 94-97.
- [87] 袁帅帅. 装配式水泥混凝土铺面快速修复技术研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2022.
- YUAN S S. Research on quick repair technology of precast concrete pavement[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2022.
- [88] 尹锦明, 姜毅, 韩光义. 装配式水泥混凝土路面板块吊装应力分析[J]. 施工技术, 2015, 44(S1): 393-396.
- YI J M, JIANG Y, HAN G Y. Stress analysis of fabricated cement concrete pavement slab in the process of lifting[J]. Construction Technology, 2015, 44(S1): 393-396.
- [89] 李娣. 水泥路面预制板拼接修复技术荷载应力多元回归研究[J]. 上海公路, 2021(3): 1-5.
- LI D. Research on the multi-regression of load stress for the technique of precast concrete slab splicing and repairing[J]. Shanghai Highways, 2021(3): 1-5.
- [90] 陈宽标. 水泥混凝土路面预制拼装快速修复技术的数值模拟分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- CHEN K B. Numerical simulation analysis of technologies for rapid repair of precast and assembled cement concrete pavement[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [91] 李广玉. 吊装角度对预埋吊件受力性能影响试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2020.
- LI G Y. Experimental study on the effect of lifting angle on the mechanical properties of inserts[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2020.
- [92] 柯文汇, 周然, 方明镜, 等. 预制混凝土路面板水平通孔吊装力学行为及验证[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2023, 43(1): 30-38.
- KE W H, ZHOU R, FANG M J, et al. Mechanical behavior and verification of horizontal through-hole hoisting of precast concrete pavement slab[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2023, 43(1): 30-38.
- [93] 李宏伟. 装配式建筑水平构件吊装关键问题及措施研究[J]. 铁道建筑技术, 2021(7): 154-158.
- LI H W. Research on key problems and measures of horizontal component hoisting in prefabricated building[J]. Railway Construction Technology, 2021(7): 154-158.
- [94] 刘倩倩. 装配式水泥混凝土路面板块结构与施工关键技术优化研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.
- LIU Q Q. Study on optimization of slab structure and key construction technology of precast cement concrete pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2023.
- [95] 张淦, 郭聖煜, 周晓洁, 等. 起重吊装风险协同感知智能装备研发与应用[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(6): 122-127.
- ZHANG G, GUO S Y, ZHOU X J, et al. Research and application of intelligent device for collaborative perception of safety risk in lifting operations[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(6): 122-127.
- [96] 刘诗楠, 刘占省, 赵玉红, 等. NB-IoT技术在装配式建筑施工管理中的应用方案[J]. 土木工程与管理学报, 2019, 36(4): 178-184.
- LIU S N, LIU Z S, ZHAO Y H, et al. Application scheme of NB-IoT technology in assembly building construction management[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2019, 36(4): 178-184.
- [97] 李强年, 王乔乔. 基于NB-IoT技术的装配式建筑吊装安全风险[J]. 工程管理学报, 2020, 34(6): 113-118.
- LI Q N, WANG Q Q. Safety risk management for hoist-

- ing construction of prefabricated buildings based on NB-IoT technology[J]. Journal of Engineering Management, 2020, 34(6): 113-118.
- [98] TAYABJI S, YE D, BUCH N. Joint load transfer and support considerations for jointed precast concrete pavements[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2012, 2305(1): 74-80.
- [99] GUO J C, CHAN T M, WANG Y H. Precast concrete pavement applications, design and joint load transfer characteristics[J]. Structures, 2024, 69: 107176.
- [100] 赵鸿铎, 涂巧毓, 马鲁宽, 等. 装配式水泥路面夹环连接式传力杆接缝设计及验证[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 398-406.
- ZHAO H D, TU Q Y, MA L K, et al. Design and verification of precast cement concrete pavement joint with clamping ring connected dowel bar[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2024, 52(3): 398-406.
- [101] 方明镜, 柯文汇, 周然, 等. 吊连共筋装配式水泥混凝土路面传荷性能研究[J]. 公路交通科技, 2024, 41(3): 43-49.
- FANG M J, KE W H, ZHOU R, et al. Load transfer performance on prefabricated cement concrete pavement with hanging and connecting shared reinforcement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2024, 41(3): 43-49.
- [102] PRIDDY L P, BLY P G, JACKSON C J, et al. Full-scale field testing of precast Portland cement concrete panel airfield pavement repairs[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2014, 15(9-10): 840-853.
- [103] LI M, MENG F Z, ZHANG L S, et al. Experimental and numerical study on flexural behavior of prefabricated bottom slabs with rabbeted grouting splicing joints[J]. Structures, 2024, 70: 107755.
- [104] XI Y F, REN S J, CHEN B L, et al. Application of steel-fiber-reinforced self-stressing concrete in prefabricated pavement joints[J]. Buildings, 2023, 13(9): 2129.
- [105] 张富宾, 肖建庄, 丁红梅, 等. 装配式混凝土结构防水技术现状及发展趋势[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(1): 1-13.
- ZHANG F B, XIAO J Z, DING H M, et al. Current status and development trend of prefabricated structure waterproof technology[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(1): 1-13.



通信作者: 于新(1975—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为长寿命路面养护技术、新型路面结构与材料、绿色建造技术(温拌和再生)、桥面铺装技术、智慧养护技术。E-mail: yx@csust.edu.cn。

(责任编辑: 李根)