

机场道面装配式修复技术研究综述

赵鸿铎, 成可, 高达辰

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海, 201804)

摘要 为明确装配式水泥混凝土道面的技术特点, 便于机场道面修复的技术选型, 开展了文献调研, 总结典型的装配式道面结构组合和接缝设计, 梳理施工质量控制和数字化管控技术, 并与其他道面修复技术在适配荷载、使用寿命和施工效率等指标进行对比分析。调研结果表明, 钢筋环焊接的接缝设计具备施工简便的优势, 预应力连接和可拆装传力构件能分别提升道面的抗弯拉性能和可复用能力, 采用切割机、起吊钢梁和起吊调平一体化构件等装置可以提升施工作业效率。在道面修复的应用场景中, 装配式混凝土道面适用于长期重型荷载, 并在大面积修复作业中具有优势, 可与快修混凝土材料配合作业, 提升机场道面的韧性恢复能力。

关键词 机场道面; 装配式修复; 结构组合; 质量控制

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.05.001

中图分类号 U416.216 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)05-0002-08

A Review of Precast Technology for Airfield Concrete Pavement Repairs

ZHAO Hongduo, CHENG Ke, GAO Dachen

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract In order to clarify the technical characteristics of precast concrete pavements and facilitate the selection of repair technologies in airfield concrete pavement repairs, a literature review is conducted. Typical pavement structure combination with connection joints are summarized. Construction quality control and digital management techniques are introduced, and comparisons among pavement repair technologies are made in terms of load adaptability, lifespan, and construction efficiency. The results show that welded clamps exhibit ease of use in construction process. With the use of pre-stressing joints and demountable devices, the bending resilience and reusability of pavements can be respectively enhanced. Construction work can be elevated efficiency by adopting cutting machines, lifting steel beams, and lifting devices. Regarding application scenarios, precast concrete pavements are suitable for long-time heavy loads and large repair operations. When such an advantage is combined with rapid repair concrete materials, the resilience recovery capability of airfield concrete pavements can be improved.

Key words airfield concrete pavement; precast repair; structure combination; quality control

收稿日期: 2024-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(52278457)

作者简介: 赵鸿铎(1976-), 男, 浙江宁海人, 教授, 博士生导师, 研究方向为机场道面。E-mail: hdzhao@tongji.edu.cn

引用格式: 赵鸿铎, 成可, 高达辰. 机场道面装配式修复技术研究综述[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(5): 2-9. ZHAO Hongduo, CHENG Ke, GAO Dachen. A Review of Precast Technology for Airfield Concrete Pavement Repairs[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(5): 2-9.

机场水泥混凝土道面采用现场浇筑或滑模摊铺技术建造,需要较长的养护时间且对施工环境有一定要求,无法满足机场道面在突发状况和极端恶劣环境下的快速修复需求。装配式水泥混凝土道面技术采用模块化和机械化的施工方式,将水泥混凝土耗时最长的凝结硬化过程放置在工厂中完成,再运输到现场吊装。该项技术的施工窗口一般在8 h以内,可以多线分工序平行流水作业,具备建造速度快和受环境影响小的特点,是机场道面快速修复的合适选择。

龙禹^[1]、Fang^[2]和Syed等^[3]通过文献综述,总结了装配式水泥混凝土板的形状尺寸、接缝构造、材料性质和损坏模式,对预制板本身开展了较多的分析讨论,但没有对结构组合形成较好的总结,较少讨论施工工艺和质量检测方面的内容。美国的联邦公路局^[4]和装配式混凝土协会^[5]在城市道路交叉口、高速公路收费站和匝道等场景开展了大量装配式路面修复的试点应用,形成了Super-Slab、Michigan Method、URETEK Method和Kwik Slab等比较完备的施工技术体系,并通过加速加载试验证明了装配式修复后的路面可以实现25~37年的服役寿命^[6]。赵鸿铎等^[7-11]围绕装配式水泥混凝土路面的结构组合、注浆、接缝和振动特性,提出了装配式复合路面结构,研发了板底注浆的维压控制技术,建立了基于振动的装配式路面感知和解析方法。然而,现有研究较多是面向公路路面的,针对机场道面快速修复的研究少,对该场景下装配式水泥混凝土道面的技术特点不清晰。

面向机场道面,翁兴中等^[12-16]围绕装配式道面的注浆材料和预应力技术开展了室内试验和工程应用,发现了板底粗糙程度和注浆材料类型是影响注浆粘结性能和结构承载能力的主要因素,揭示了预应力大小与接缝传荷能力存在显著关联性。李思李等^[17]自主研发了装配式重载混凝土道面快速智能养护装备,提高了道面板拆除和吊装的效率。美国陆军工程兵研究与发展中心^[18-20]开展了7块3.0 m×3.0 m×0.28 m装配式道面板修复的示范演习,通过凿除既有道面板边部分混凝土的方式,塑造出放置传力杆的上开口槽,并采用了板底坐浆和压路机碾压的调平工艺。足尺加载试验结果表明,装配式修复后的道面结构可以承受5 600~10 000次的重型飞机荷载作用,但上开口传力方式容易引起板块后浇位置处的混凝土剥落,造成结构在接缝位置的功能性能失效。Sensenay等^[21]采用下开口传力方式,完成了12块尺寸为6.0 m×7.5 m×0.36 m的装配式道面板修复,发现下开口的传力方式有利于减少接缝病害。日本国土交通政策综合研究所^[22]对6块尺寸为4.5 m×

2.5 m×0.25 m的装配式道面板进行了室内试验,采用了可拆装传力构件和板底注浆的施工工艺,验证了道面结构可承受10 000次的B747-400荷载作用,并发现了注浆孔、起吊点和接缝位置是道面板的薄弱环节。

快修混凝土材料^[23]、拼装式铝道面板^[24]和玻璃纤维道面板^[25]等也可以用于机场道面的快速修复。不同修复技术在适航机型、使用寿命、修复效率、作业时间和适用范围等方面存在差异,其所铺筑的道面存在不同的损坏模式,明确不同修复技术的技术特点和适用场景,有利于进行针对性的技术选型。本文总结了机场装配式混凝土道面典型的结构组合和接缝构造形式,汇总了装配式道面施工过程中需要的器械设备和施工要点,最后比较了装配式混凝土道面技术与其他道面修复技术的技术特点。

1 道面装配式修复的结构形式

1.1 典型结构组合

既有水泥混凝土道面的平面形状存在正六边形和矩形2种类型,矩形板占机场道面的多数。典型的结构组合包括传统基础水泥混凝土道面、梁基础水泥混凝土道面和复合道面3种形式,如图1所示。

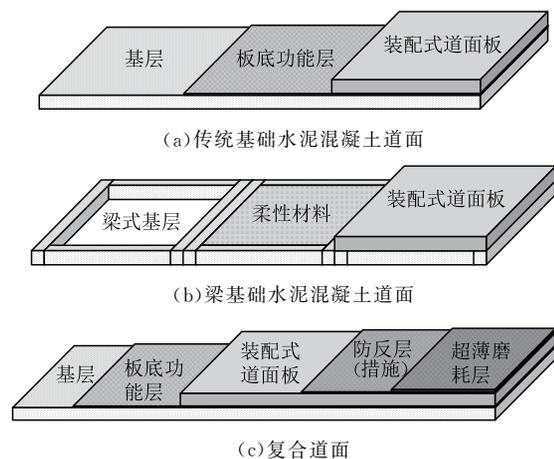


图1 装配式水泥混凝土道面的典型结构组合

Fig.1 Typical structure combinations of precast airfield

传统基础水泥混凝土道面结构是在比较均匀平整的基层上安装道面板,一般需要在破除既有道面和放置板块后进行调平和板底注浆,以保证道面板与基层充分接触。在不考虑道面板长期寿命的特殊情况下,可以在基层基本整平后,铺筑找平砂层、细集料、石灰土或橡胶卷材等柔性材料,直接置板而不注浆,实现快速开放交通的目标。

梁基础水泥混凝土道面结构是美国国家机场铺面测试中心基于等刚度理论提出的,其通过加速加载试验发现接缝位置容易发生病害,因此在板边和

板角的底部采用刚度较大的混凝土框架梁结构,在框架梁的内部铺筑刚度相对更低的柔性材料,使板块整体受力均匀,从而减少接缝病害^[26]。

复合道面结构用于满足机场沥青和复合道面的快速修复需求,在进行装配式混凝土道面的施工后,再铺筑一层防反层和沥青层,能较好地适配既有沥青面层。复合道面结构需要根据实际情况,有针对性地设置相应的反射裂缝预防或减缓措施。

1.2 道面接缝设计

装配式水泥混凝土道面的接缝设计如图 2 所示,当不设置传力构件时,可以采用集料嵌锁、特殊材料灌缝嵌锁和预制块嵌锁的方式进行连接。集料嵌锁的传荷系数在 60% 左右,梯形企口式连接的传荷系数可以达到 85%^[27]。

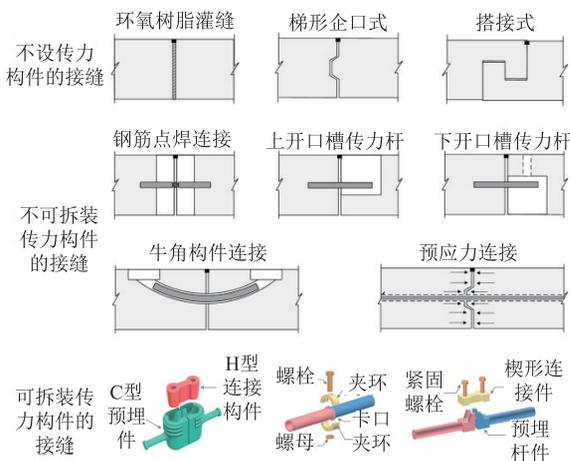


图 2 装配式水泥混凝土道面的接缝传力方法

Fig. 2 Joint load transfer methods of precast airfield

当道面板之间设置传力构件时,根据传力构件能否拆装和重复利用,分为不可拆装式和可拆装式。不可拆装传力构件一般会预留开口槽,并通过槽孔灌浆密封,主要包括钢筋点焊式、上开口槽传力杆、下开口槽传力杆、牛角构件连接和预应力连接等。苏联在 20 世纪 70 年代主要采用钢筋环点焊式的接缝设计方式,将板边钢筋环作为起吊和传力装置,具备施工简便和容许误差大的优势。

美国则在开口槽传力杆方面进行了较多尝试,并取得了一系列的专利技术。上开口槽因为在道面表面存在较多后浇材料,容易出现材料剥落病害。相较而言,下开口槽将后浇材料设置在了板块中部和底部位置,只在表面预留槽孔,因此一般具备更好的功能性能。开口槽的形状可以设置为长方体、圆柱体、窄缝和上窄开口等多种形式。

牛角式传力构件在设计时需要考虑板块尺寸和构件弯曲的曲率,保证能比较方便地拼装板块。采用预应力连接时,能赋予板块更好的抗弯拉能力,降低板块的厚度,研究发现在不显著减少预制板块服

役寿命的情况下,预应力技术可以降低 25%~30% 的道面厚度^[28-29]。同时,预应力能提供一定的传荷能力,平缝预应力连接的传荷能力为 0.55~0.61,企口缝预应力连接的传荷能力为 0.86~0.95^[14]。

当接缝设置了可拆装传力构件时,可以通过插销和螺栓的方式进行拆卸,并在传力构件顶部设置盖板,实现道面板的重复利用。可拆卸构件对预制精度要求高,在插销连接处一般会预留 0.5~1.0 cm 的施工误差冗余,同时构件内部也需要采用防水材料进行密封。

在装配式道面修复过程中,需要注重既有道面板与装配式道面板连接位置处的接缝设计,宜采用下开口槽传力杆的接缝,通过侧向钻孔装置在既有道面的板边塑造出放置传力杆的空间,随后放入涂覆植胶筋等材料的传力杆。

1.3 道面板的几何尺寸

在确定道面结构组合和接缝类型后,需要考虑修复区域几何布局、运输便捷性和平面尺寸效应,选择道面板的平面尺寸。一般采用 1/2 原板或整板尺寸,以保证道面板接缝位置对齐和多板协同受力。当板块存在远距离运输的需求,根据超限管理的相关条例规定,宽度在 3.75 m 以内时较易在高等级公路进行运输,宽度在 2.55 m 以内时运输会更加机动灵活。当板块可以就近建厂预制,并通过内部道路运输时,则较少受运输的限制,道面宽度宜与既有道面保持一致,一般为 4~6 m。

在道面板的平面尺寸效应方面,道面板的长度越大,温度收缩应力越大,邻板高程差异造成的平整度问题越难以被控制。因此,如果可以就近建厂预制,宜采用现行道面设计规范中 1:1~1:1.25 的宽长比。当远距离运输时,道面板可以采用 1:2 左右的宽长比,该宽长比在多个机场道面^[30-32]进行了工程应用,并通过室内足尺试验^[22],验证了其性能可以满足重型飞机长期行驶的需求。

装配式道面的厚度设计在考虑荷载应力和服役寿命的基础上,还需要兼顾既有道面厚度、板底功能层的厚度和在设计施工上的可行性。当基层开挖不可行时,装配式道面的厚度一般需要比修复区域内的既有道面薄 1~2 cm,从而为板底功能层预留出空间。此时,可以采用高标号的混凝土材料来增强混凝土板的强度。

2 道面装配式修复的质量控制方法

2.1 装配式修复的工艺和装备

道面装配式修复技术的工艺流程为“预制板块

—清理场地—检测和破除既有道面—处理基层—起吊调平和注浆—安装传力杆并处理接缝”,如图 3 所示。根据板块顶面与模具底模的接触关系,预制施工方法可分为正模法和倒模法,一般采用小型机具施工。正模法的工序更加简单,倒模法则能在板的表面形成更好的平整度,但需要额外设置预埋构件的定位架,并在板块浇筑成型后进行翻身作业。

在将板块运输到现场前,需要清理道面的散落物,进行回填材料和处治压实作业,形成平整的施工作业空间。同时,测量既有道面的形状尺寸信息,方便调度尺寸匹配的板块和统计板块数量。

机场道面待修复区域的尺寸信息一般利用钢卷尺和全站仪可以直接获取,并通过钻芯取样、超声波探测和探地雷达等方法进行补充。当存在快速修复的需求时,道面板的尺寸规格是预先库存和既定的,这与传统道面修复作业中“先测量道面信息,再浇筑板块”是不同的,因此需要妥善协调板块的平面尺寸和现场作业的施工效率。



图 3 装配式水泥混凝土道面的施工流程示意图

Fig. 3 Construction flow diagram of precast airfield

在破除既有道面的过程中,一般通过人工破除、镐头机和工程铲车相互配合作业。在此基础上,还可以采用抓斗破除和起吊钢梁破除装备,将道面板块从板底直接抄起,或者通过千斤顶液压设备将整板顶升和吊走,如图 4(a)和图 4(b)所示。这 2 种破除方法可以快速破除既有道面,具备施工效率高的优势,一般需要采用全厚度导轨式切割设备配合施工,精准分割道面板,同时利用侧向钻孔装置塑造传力空间,恢复既有道面的传荷能力,如图 4(c)和图 4(d)所示。相较于单头钻孔装置,多头排钻具备更好的钻孔效率,能节省现场作业时间。

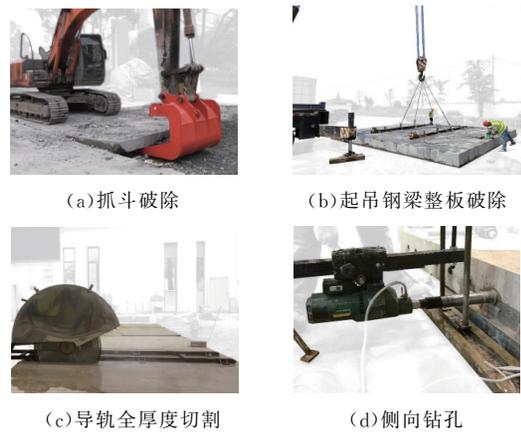


图 4 既有道面破除的施工装备

Fig. 4 Construction equipment for removing existing pavement

当道面破除完成后,需要烘干基层顶部存在的积水,凿除局部区域的隆起,实现基层的初步整平,随后可以开展道面修复的装配式施工。道面板起吊方法一般为四点式,有限元计算结果表明,钢缆绳与道面板的夹角不宜小于 60° ,吊点距板边的距离与该边长度的比值在 $1/6 \sim 1/5$ 时为宜,保证起吊过程中板底不会产生较大的弯拉应力^[33]。当道面板平面尺寸比较大,吊点数量多,或者钢缆绳与道面板的夹角低于 60° 时,可以采用平衡梁法,将道面板与平衡钢梁竖直接连接,降低板块受到的水平力。

装配式道面板底部与基层无法完全贴合,一般需要在置板后调平注浆,否则板底不均匀支撑容易诱发道面断板。图 5(a)为起吊调平一体化装置,采用调平螺杆顶升道面板,通过控制 4 个起吊调平点位的高程,使装配式道面板的高程与设计值保持一致。图 5(b)为板底维压注浆装置^[8],含有内螺纹四通阀、压力表和排气阀等器件,可以将板角压力控制在预设范围内,在尽可能增加板底注浆压力的同时,确保浆液不会冲破橡胶密封条和抬升道面板。

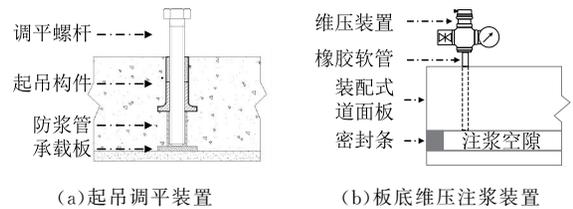


图 5 起吊调平和注浆装置

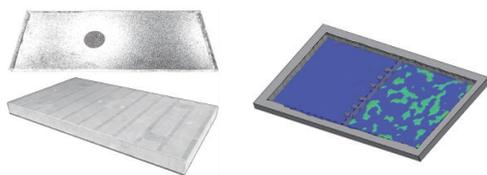
Fig. 5 Lifting and grouting devices

2.2 装配式修复的数字化管控方法

三维扫描、BIM 和结构状态监测等智能手段越来越多地被运用在装配式技术中,用于全方位地掌握装配式道面在设计、施工、验收和运营阶段的信息要素,以实现物料数量、施工精度和结构健康状况等多源信息的数字化管控,提升装配式道面修复技术的效率和长期质量。

三维扫描技术可以快速获得结构的点云信息,

用于实时检测结构尺寸和基层作业精度,常见的方法包括三维激光扫描技术、立体视觉技术和深度相机技术。赵基煊^[34]对开挖后的基层和预制道面板进行了三维激光扫描,如图 6(a)所示,结合降噪、边界提取等点云处理方法,提出了在施工现场对装配式道面基层不均匀性的快速评价方法。考虑三维激光扫描设备存在着设备价格昂贵的制约,焦宝^[35]提出采用双目深度相机,实现道面板与基层的虚拟装配和快速干涉检测,如图 6(b)所示。



(a) 基层和预制板块的点云 (b) 板块和基层的干涉检查

图 6 装配式道面三维重构和评价

Fig. 6 3D reconstruction and assessment of precast airfield

BIM 技术充分考虑了装配式道面结构设计、构件布设、施工组织和外部环境之间的交互关系,能实现细粒度、全过程的三维设计和管理。杨常绿^[36]提出了装配式道面的 BIM 三维设计方法,研发了三维模型的空间配准与协同方法和交付标准。同时,BIM 可以作为信息交互的平台,Kim^[37]采用三维激光扫描,实现了装配式结构尺寸误差和表观质量的数字化检测,并提出了点云数据的 BIM 存储和交付方法。Rausch^[38]则进一步基于三维点云数据,提出 BIM 模型形状和位姿的动态更新策略,通过案例分析发现可将施工误差从 50.4 mm 减少到 5.7 mm。

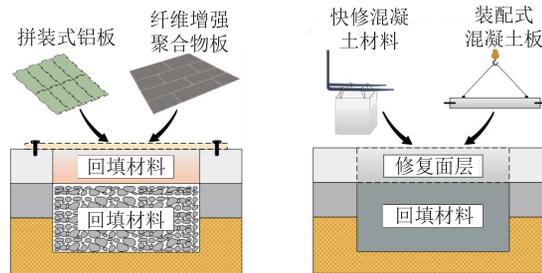
装配式道面板在室内可控环境下完成高精度预制,确保预埋应变计、分布式光纤等传感器件的存活率,在现场拼装和组网完成后,能实时感知道面板的温度、应变和振动信号,识别道面板脱空^[39]和接缝损伤^[40]等病害,为力学分析提供数据支撑,保障装配式修复道面的长期服役性能。

3 道面装配式修复技术的适配性分析

参照相关文献和报告,机场道面存在 4 种典型修复技术,其施工后道面结构组合可以分为 2 类,如图 7 所示。根据施工现场资源的可获得性,图 7 中的回填材料可以包括原道面散落的材料、压实土、稳定土、加筋土、压实集料、聚氨酯发泡材料以及干铺和湿铺预混填料等。

拼装式铝板和玻璃钢板修复技术是在铺设和压实回填材料后,在道面表面铺筑硬壳层,提升结构整体强度和防止道面 FOD。快修混凝土材料和装配式混凝土道面修复技术则是在回填材料施工后,直

接浇筑早强快硬材料或铺筑装配式混凝土道面板。



(a) 回填材料+防 FOD 层 (b) 回填材料+修复面层

图 7 不同道面修复技术的结构组合

Fig. 7 Structure combinations of different pavement

在结构组合的基础上,进一步总结了 4 种机场道面修复技术的特点,如表 1 所示。在承载能力方面,快修混凝土材料和装配式混凝土道面具备显著优势,在修复速度上快修混凝土材料最快。在施工成本上玻璃钢板最为昂贵,而远程运输方面装配式混凝土道面最不便捷。

铝板具有多种型号规格,单板重量普遍在 80 kg 以内,2~3 个人便可以拼装,具备便携的优点,但存在雨天抗滑能力不足的问题,特别是面向高速运行下的飞机,且修复后的高程与既有道面不平整。玻璃钢板常见的平面尺寸为 1.8 m×9.0 m,可以多板预先连接并折叠起来,运输到现场后能快速覆盖 100 m² 及以上的道面修复区域,在板厚和抗滑能力方面相较于铝板有了改善。

快修混凝土材料通过高强土工织物袋运输到现场进行拌合和浇筑,能修复任意形状的道面,具备地形适应能力强的特点。在施工过程中需要严格控制流动性、凝结时间和早期强度,同时较难在雨雪高寒的天气作业。装配式混凝土道面能快速修复大片的道面区域,满足恶劣条件下的作业需求,但其存储和运输占用空间大,且当现场无法精准进行切割作业时,仍需要用混凝土材料填补周边区域。

通过比较不同研究中飞机荷载模拟加载车的测试数据,发现铝板和玻璃钢板可以承载 1 000~6 300 次荷载作用,主要的损坏模式为道面的竖向变形和道面板自身的损坏。当轮辙深度超过 30 mm 时,会影响飞机起降的安全,此时结构已经不能继续服役。随着荷载次数进一步的增加,板块自身会产生裂缝和连接失效的病害。当板块与基层之间存在摩擦缺失或者脱空问题时,会加速结构的失效^[24]。

快修混凝土材料和装配式混凝土道面板具备承担高胎压重型荷载的能力,前者需要控制 2 h 早期强度和收缩率,防止材料的早期失效,控制收缩裂

缝;后者则需要按照道面疲劳寿命设计结构层厚度,在服役过程中检测和控制接缝传荷系数,确保多板协同受力。2种修复技术都容易发生后浇材料与既有道面交界位置处材料剥落的功能性病害,不利于飞机安全运行,需要提升交界面机械咬合和相互作用力,增加粘结强度。

根据不同的修复时限要求、飞机荷载条件和预期寿命,应采用不同的道面修复技术。当荷载次数少于2000次时,采用回填材料并覆盖拼装式铝板和玻璃钢板,可以较好地满足需求。面向重型荷载,且荷载作用次数大于3500次时,应采用快修混凝土材料和装配式混凝土道面技术进行修复。

表1 机场道面修复技术的特点

Tab. 1 Characteristics of airfield concrete pavement repair technologies

	拼装式铝道面板 ^[41]	玻璃钢道面板 ^[42]	快修混凝土材料 ^[43]	装配式混凝土道面板 ^[20-22]
以往研究中采用的板块尺寸(长×宽×高)/m ³	1) 1.1×2.3×0.05 2) 0.6×3.6×0.04	1) 2.0×5.5×0.01 2) 1.8×9.0×0.01		1) 3.0×3.0×0.28 2) 4.5×2.5×0.25 3) 6.0×7.5×0.36
运输重量	单板重量在80 kg内	单板重量为150~300 kg	每袋重量为200~1400 kg	单板重量为6~40.5 t
现场作业方式	人工拼装	工程叉车作业	工程叉车作业	起吊设备装配
修复8 m ³ 区域的时间/h ^[44]	8	8	5	8
适配荷载/kN	160(单轮荷载)	136(单轮荷载)	1223(双轴三轮荷载)	1223(双轴三轮荷载)
轮胎气压/MPa	2.24	0.66	0.97	0.97
荷载通过次数	1500~6300	1000~2000	>3500	5600~10000
基层CBR值	6~25	40~50	50~100	80~100
损坏模式	1) 道面轮辙 2) 板边角和连锁处的 裂缝与剥离	1) 道面轮辙 2) 板边角和连锁处的 裂缝与剥离	1) 交叉裂缝 2) 接缝破碎	1) 交叉裂缝 2) 接缝破碎 3) 沉陷或错台

4 结语

装配式水泥混凝土道面技术具备较强的承载能力、修复效率和抗气候干扰能力,在机场道面的快速修复上具备良好的应用前景。本文总结了道面装配式修复的典型结构组合和接缝设计方法,发现在平整基层上直接置板可以提高修复效率,适用于短期荷载作用。采用梁基层道面结构组合则能使板块受力均匀,减少接缝病害。钢筋环焊接的连接方法具备施工方便的优点,预应力企口接缝能发挥较好的传荷作用,降低道面板的重量,可拆装传力构件式接缝则能多次重复利用,减少接缝处的灌浆。

在装配式道面的质量控制方面,通过挖斗、起吊钢梁和全厚度导轨式切割装置能实现较高的道面破除精度。采用三维扫描技术、BIM和感知器件,能提高装配道面修复的作业效率。

通过与其他3种道面修复技术的对比分析,明确了装配式水泥混凝土道面修复技术适用于荷载作用次数较大的长期重型荷载,并能与其他的道面修复技术结合使用和相互补充,共同提升道面受外界影响时的韧性修复能力。

目前,道面装配式修复的结构组合和施工技术体系已比较成熟,但仍存在板块运输质量重、修复成

本高、板底注浆不充盈、板块后浇位置功能寿命不足和多板拼装的平整度控制难等技术难题。

未来研究可以围绕轻质结构和高强混凝土材料,通过分层浇筑和结构优化等手段,在不降低道面结构服役寿命的前提下,制备更加轻质的预制道面板块。同时,有必要设计更加低成本、可复用和耐腐蚀的传力构件,降低道面装配式修复的成本。

面向基层处置和板底注浆等施工难题,采用数字化的快速扫描和实时监测技术,增强对现场施工作业的控制,保障板底得到充分支撑。优化灌浆材料配合比和新老材料交界面的处理技术,减少后浇材料的剥落和损耗,增加装配式道面的功能寿命。研制现场定位划线、全厚度切割、多孔排钻和拼装限位的工艺装备,提升现场作业效率和精度,增强道面装配式修复的品质。

参考文献

- [1] 龙禹,谢毅,徐骏,等. 机场装配式道面现状及发展研究[J]. 路基工程,2022,(5):1-8.
LONG Y, XIE Y, XU J, et al. Development Status and Research of Airport Fabricated Pavement[J]. Subgrade Engineering, 2022, (5): 1-8. (in Chinese)
- [2] FANG M, ZHOU R, KE W, 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.
- [3] SYED A, SONPAROTE R. A Review of Precast Concrete Pavement Technology [J]. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 2020, 15(4): 22-53.
- [4] SHIRAZ T, DAN Y, NEERAJ B. Precast Concrete Pavement Technology [R]. Washington, DC: Transportation Research Board of The National Academies, 2012.
- [5] PETER S, MARK B. Manual for Jointed Precast Concrete Pavement (3rd Edition) [R]. Carmel: National Precast Concrete Association, 2019.
- [6] KOHLER E, HARVEY J, DUPLESSIS L, et al. Evaluation of Precast Concrete Slabs Using a Heavy Vehicle Simulator [C]//Accelerated Pavement Testing (APT) Third International Conference. Madrid: CEDEX, 2008.
- [7] 赵鸿铎, 夏昶, 付夕原, 等. 抑制反射裂缝的装配式复合路面接缝性能研究[J]. 中国民航大学学报, 2022, 40(5): 23-30.
- ZHAO H D, XIA C, FU X Y, et al. Joint Performance of Precast Composite Pavement and Reflection Crack Suppression[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2022, 40(5): 23-30. (in Chinese)
- [8] 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[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. (in Chinese)
- [9] 赵兰若, 赵鸿铎, 蔡爵威, 等. 考虑邻板高程差的装配式水泥路面行驶舒适性研究[J]. 公路交通科技, 2021, 38(3): 14-22, 48.
- ZHAO L R, ZHAO H D, CAI J W, et al. Study on Driving Comfort of Precast Concrete Pavement Considering Joint Faulting [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(3): 14-22, 48. (in Chinese)
- [10] 曾孟源, 赵鸿铎, 边泽英, 等. 基于分布式光纤的混凝土路面振动场感知与解析[J]. 中国公路学报, 2022, 35(7): 78-90.
- ZENG M Y, ZHAO H D, BIAN Z Y, et al. Sensing and Analysis of Concrete Pavement Vibration Field Based on Distributed Optical Fiber [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(7): 78-90. (in Chinese)
- [11] ZENG M Y, ZHAO H D, GAO D C, et al. Reconstruction of Vehicle-Induced Vibration on Concrete Pavement Using Distributed Fiber Optic [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(12): 24305-24317.
- [12] 朱懋江, 翁兴中, 张俊, 等. 装配式水泥混凝土道面灌浆层的粘结特性[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(6): 696-703.
- ZHU M J, WENG X Z, ZHANG J, et al. Bonding and Load Bearing Characteristics of Grouting Layer in Prefabricated Cement Concrete Pavement [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2019, 53(6): 696-703. (in Chinese)
- [13] 杨博瀚, 翁兴中, 付婕, 等. 装配式机场预应力混凝土道面承载性能的影响因素分析[J]. 材料导报, 2015, 29(22): 119-123.
- YANG B H, WENG X Z, FU J, et al. Analysis on the Influence Factors of Prefabricated Airport Prestressed Concrete Pavement Bearing Capacity [J]. Materials Reports, 2015, 29(22): 119-123. (in Chinese)
- [14] QU B, WENG X Z, ZHANG J, et al. Analysis on the Deflection and Load Transfer Capacity of a Prefabricated Airport Prestressed Concrete Pavement [J]. Construction and Building Materials, 2017, 157: 449-458.
- [15] HU C, WENG X Z, ZHANG J, et al. Experimental Study on Fatigue Strength of Airport Concrete Pavement Slab [J]. Construction and Building Materials, 2021, 270: 121493.
- [16] GUO T X, WENG X Z, QU B, et al. Full-Scale Investigation of Thermal Deformation and Load Transfer Performance of Prefabricated Prestressed Concrete Pavement for Airports [J]. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 2020, 146(3): 04020037.
- [17] 李思李, 田波, 谢晋德, 等. 一种四履带装配式混凝土道面板吊装设备: CN114671343A [P]. 2022-06-28.
- LI S L, TIAN B, XIE J D, et al. A Type of Concrete Pavement Slab Lifting Equipment with Four Crawler Belts: CN114671343A [P]. 2022-06-28. (in Chinese)
- [18] BLY P G, PRIDDY L P, JACKSON C J, et al. Evaluation of Precast Panels for Airfield Pavement Repair, Phase I: System Optimization and Test Section Construction [R]. Vicksburg: The US Army Engineer Research and Development Center, 2013.
- [19] PRIDDY L P, BLY P G, JACKSON C J, et al. Evaluation of Precast Panels for Airfield Pavement Repair, Phase II: Results of Accelerated Pavement Testing [R]. Vicksburg: The US Army Engineer Research and Development Center, 2013.
- [20] PRIDDY L P. Evaluation of Precast Portland Cement Concrete Panels for Airfield Pavement Repairs [R]. Vicksburg: The US Army Engineer Research and Development Center, 2015.
- [21] SENSENEY C T, SMITH P J, SNYDER M B. Precast Concrete Paving Repairs at Vancouver International

- Airport[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2021, 2675(9): 439-448.
- [22] HACHIYA Y, MATSUZAKI K, ITO A, et al. Application of High Strength RC Precast Slab Pavements in Airports[J]. Journal of Pavement Engineering JSCE, 2003, 8:183-193.
- [23] 刘庆涛,岑国平,蔡良才,等.道面抢修用自密实再生混凝土配制与应用[J].公路交通科技(应用技术版), 2011,7(3):33-35.
LIU Q T, CEN G P, CAI L C, et al. Formulation and Application of Self-Compacting Recycled Concrete for Pavement Repairs[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Application Technology Edition), 2011,7(3):33-35. (in Chinese)
- [24] 蔡良才,周少辉,许巍,等.铺设拼装式铝合金道面板的道面结构加载性能[J].交通运输工程学报, 2015, 15(6):1-9.
CAI L C, ZHOU S H, XU W, et al. Loading Performances of Pavement with Assembled Aluminum Mats [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(6):1-9. (in Chinese)
- [25] ZHANG J, XU W, GAO P W, et al. Full-Scale Test on Emergency Pavement Repair under Aeroplane Loading[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport, 2024, 177(2):101-113.
- [26] 陈昊昱, GUO Edward, 李琛琛, 等刚性铺面的平衡刚度设计理念与原型结构[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(9):1303-1311.
CHEN H Y, GUO E, LI C C, et al. Balance-Stiffness Design Concept and Prototype Structure of Rigid Pavement[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 50(9):1303-1311. (in Chinese)
- [27] 吴德芬, 罗翥, 彭鹏. 预制拼装技术在水泥混凝土路面快速养护中的应用研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2011,7(2):1-4.
WU D F, LUO Z, PENG P. Research on the Application of Precast Assembling Technology in the Rapid Maintenance of Cement Concrete Pavement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Application Technology Edition), 2011, 7(2):1-4. (in Chinese)
- [28] MERRITT D K, MCCULLOUGH B F, BURNS N H. Design-Construction of a Precast, Prestressed Concrete Pavement for Interstate 10, El Monte, California[J]. PCI Journal, 2005, 50(2):18-27.
- [29] MISHRA T, FRENCH P, SAKKAL Z. Engineering a Better Road: Use of Two-Way Prestressed, Precast Concrete Pavement for Rapid Rehabilitation[J]. PCI Journal, 2013, 58(1):129-141.
- [30] 彭科迪, 赵鸿铎, 曾孟源, 等刚性道面模态分析的有限元模型及其验证[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024: 1-9.
PENG K D, ZHAO H D, ZENG M Y, et al. Finite Element Model for Modal Analysis of Rigid Pavement and Its Validation[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024: 1-9. (in Chinese)
- [31] SAPOZHNIKOV N, ROLLINGS R. Soviet Precast Prestressed Construction for Airfields[C]//2007 Worldwide Airport Technology Transfer Conference. Washington D C: Federal Aviation Administration, 2007.
- [32] ŚWIERZEWSKI B. Reconstructing Airport Pavements Using the Technology of Prefabricated Concrete Slab [J]. Structure and Environment, 2020, 12(3): 111-123.
- [33] 吴世涛. 装配式水泥混凝土铺面结构与构造[D]. 上海: 同济大学, 2017.
WU S T. Research on Structure and Configurations of Precast Concrete Pavement[D]. Shanghai: Tongji University, 2017. (in Chinese)
- [34] 赵基焕, 柴子奇, 蔡爵威. 装配式道面基层标高不均匀性评价方法[J]. 交通科技, 2018, (3): 1-5.
ZHAO J H, CHAI Z Q, CAI J W. Assessment Method of Precast Concrete Pavement Subgrade Unevenness[J]. Transportation Science & Technology, 2018 (3):1-5. (in Chinese)
- [35] 焦宝. 基于深度相机的装配式铺面三维重构及评价技术[D]. 上海: 同济大学, 2020.
JIAO B. 3D Reconstruction and Dimensional Quality Assessment of Precast Concrete Pavement Using Depth Camera[D]. Shanghai: Tongji University, 2020. (in Chinese)
- [36] 杨常绿. 装配式水泥混凝土铺面三维设计中的 BIM 技术[D]. 上海: 同济大学, 2020.
YANG C L. BIM Technology in 3D Design of Precast Cement Concrete Pavement[D]. Shanghai: Tongji University, 2020. (in Chinese)
- [37] KIM M K, CHENG J C P, SOHNH, et al. A Framework for Dimensional and Surface Quality Assessment of Precast Concrete Elements Using BIM and 3D Laser Scanning[J]. Automation in Construction, 2015, 49: 225-238.
- [38] RAUSCH C, HAAS C. Automated Shape and Pose Updating of Building Information Model Elements from 3D Point Clouds [J]. Automation in Construction, 2021, 124: 103561.