

不停航施工条件下机场排水箱涵分段预制与湿接技术运用

王智文

上海建科工程咨询有限公司，上海 200032

DOI:10.61369/ERA.2026010012

摘 要： 机场排水箱涵作为机场飞行区的基本保障措施之一，承担着雨水、冰雪融水及生产废水的排放功能，其改造升级是改扩建工程的关键环节。因此，为解决机场不停航施工中，传统排水箱涵现浇工艺工期长、运营干扰大、结构质量难控的问题，本研究提出一种分段预制与湿接技术的运用方法；通过明确不停航施工的行业规范要求，遵循空间适配－重量可控－接头精简的划分原则，制定工厂化生产的混凝土配比与质量控制标准；同时针对湿接环节，优化界面预处理、套筒灌浆连接、C45微膨胀混凝土浇筑，以及密封性检测技术参数；最终从某国际机场飞行区扩建工程案例中，直观展示所提技术的运用成效，从而为机场不停航条件下的排水设施改造提供技术参考，丰富预制箱涵湿接技术在机场场景的应用理论。

关 键 词： 不停航施工；机场排水箱涵；分段预制；湿接技术

Application of Segmental Prefabrication and Wet Connection Technology for Airport Drainage Box Culverts under Conditions of Non-Suspension of Flight Operations

Wang Zhiwen

Shanghai Jianke Engineering Consulting Co., Ltd., Shanghai 200032

Abstract： As one of the fundamental safeguard measures in the airport airfield area, airport drainage box culverts are responsible for discharging rainwater, melted snow and ice, and production wastewater, with their renovation and upgrading being a crucial aspect of airport expansion and reconstruction projects. Therefore, to address the issues of long construction duration, significant operational disruptions, and difficult structural quality control associated with the traditional cast-in-place process for drainage box culverts during airport construction without suspension of flight operations, this study proposes a method utilizing segmental prefabrication and wet connection technology. By clarifying the industry standard requirements for construction without suspension of flight operations and adhering to the principles of spatial adaptability, controllable weight, and simplified joints, concrete mix proportions and quality control standards for factory production are established. Simultaneously, for the wet connection process, interface pretreatment, sleeve grouting connection, C45 micro-expansion concrete pouring, and sealing detection technology parameters are optimized. Finally, the application effectiveness of the proposed technology is visually demonstrated through a case study from the expansion project of an international airport's airfield area, providing technical references for drainage facility renovation under airport construction conditions without suspension of flight operations and enriching the application theory of prefabricated box culvert wet connection technology in airport scenarios.

Keywords： construction without suspension of flight operations; airport drainage box culvert; segmental prefabrication; wet connection technology

引言

随着我国航空运输量的持续增长，机场改扩建工程已成为常态化，并在施工期间，跑道、滑行道、航站楼等核心运营区域，依旧呈现出正常开放的状态，从而实现不停航施工的目的。机场排水箱涵作为机场飞行区地面基础保障设施之一，主要承担雨水、冰雪融水及

生产废水的排放，进而会结合机场的实际运行需求，对其进行扩建或改造等工程。进而在此种背景下，工厂分段预制 + 现场湿接的技术凭借标准化生产、模块化装配、快速施工等优势，成为解决机场不停航排水改造的核心技术路径^[1]。因此，本文在不停航施工条件下，提出一种机场排水箱涵的分段预制与湿接技术，旨在明确不停航施工条件下机场排水箱涵分段预制的技术标准，实现湿接技术体系的优化，最终展示技术的可行性，为其他机场的同类型排水箱涵工程提供参考与借鉴。

一、不停航施工基础理论与行业规范

（一）基础概念

不停航施工是指在机场开放运行期间，不关闭跑道、滑行道、停机坪等核心功能区域，通过分区域、分时段、分工序的方式进行工程作业，从而实现工程建设与航班保障并行的施工模式。相较于普通市政施工，机场不停航施工展示出三大特殊性，一是空间约束严格性，需符合《民用机场飞行区技术标准》（MH 5001-2021）的净空要求，距跑道中心线 50m 内不得设置高度 $\geq 1.5\text{m}$ 的临时设施，施工通道宽度通常 $\leq 5\text{m}$ ^[2]。二是时间窗口有限性，仅可利用航班低峰运行时间进行施工，且需提前 24h 向空管部门报备施工计划。三是安全标准极高性，严格防控 FOD（外来物，如施工螺栓、混凝土碎块），实现全员、全时段、全区域的区域管控。

（二）行业规范

机场不停航施工需遵循多部门发布的规范，核心条款从管理管控与技术指标两方面对施工提出明确要求，如中国民用航空局发布的《民用机场不停航施工管理规定》（CCAR-140）规范^[3]，明确指出：施工前编制专项组织设计，经机场与空管部门双审批；距跑道 $< 50\text{m}$ 的敏感区日作业时间 $\leq 6\text{h}$ ，且需避开航班高峰；配备专职 FOD 监督员，每 2h 巡查 1 次；从而保证 FOD 检出率为 0，以及航班延误率 $\leq 0.5\%$ 。此外，水利部和住建部颁布的《混凝土箱涵设计与施工规程》（SL 191-2020）与《装配式混凝土结构技术规程》（JGJ 1-2021），同样也明确了机场排水箱涵的建设标准与规范。

二、不停航施工下机场排水箱涵分段预制技术

（一）预制段划分原则与方案设计

预制段划分需同时满足机场空间适配、设备能力匹配、结构性能保障三大原则，从而避免运输或吊装时侵入跑道保护区，防止设备超载导致安全事故，以及降低接头的渗漏风险^[4]。如在机场常用的 $3.5 \times 2.5\text{m}$ 的矩形排水箱涵中，结合上述原则制定分段方案，重点突出机场不停航适配性，方案如下：

1. 单段长度设定为 5m，满足 50t 汽车吊 8m 的作业半径，无侵入跑道风险；
2. 单段重量设定为 38.88t，为 C40 混凝土密度 2400kg/m^3 ，实际体积 16.2m^3 ，适配机场常用 50t 汽车吊，无需大型设备进场；

3. 每公里接头数设定为 200 个，增加接头数的同时，实现预制接头质量的可控，从而降低渗漏率使其达到 $< 5\%$ 的状态；

4. 运输设备设定为宽度 2.5m，适配机场施工通道的 50t 平板拖车，运输路线沿专用通道，不干扰航班保障车辆通行

5. 吊装时段设定为凌晨 2:00-6:00 的航班低峰期，日均吊装 10 段，以此降低运营干扰。

（二）预制构件工厂化生产技术

为了保证预制段质量稳定，采用工厂标准化生产 + 全流程质量管控的模式，其核心技术为模板体系、混凝土配比、生产流程及质量检测四部分^[5]，具体如下。

1. 模板体系设计：采用钢制定型模板，模板由侧模、端模、底模组成，配套明确检测工具，保障机场箱涵尺寸精度；

2. 混凝土配比设计：针对机场不停航早强（快速脱模）、抗裂（适应温度变化）、抗渗（应对强降雨）的需求，选用 C40 早强纤维混凝土，配合比通过正交试验优化，明确性能检测方法；

3. 生产流程：预制构件生产分为 6 个关键步骤，即为钢筋绑扎→模版安装→混凝土浇筑→蒸汽养护→脱模作业→出厂检测；

4. 质量检测：针对生产流程的每个步骤，明确其质量控制点和验收要求，阿保证满足机场高标准。

（三）预制段运输与现场吊装技术

运输方案设计上，可将预制段从工厂直接运输至机场施工现场^[6]，同时避开运营核心区，明确应急处理措施，保障运输安全；如运输路线可为工厂→机场外围道路→专用施工通道→现场，全程避开跑道中心线 105m 保护区，且运输通道与航班保障车辆通道完全分离，避免交叉干扰。现场吊装技术则在航班低峰期进行，选用 50t 汽车吊，遵循安全吊装 + 运营无扰的原则；如吊点设计为每段设 4 个预埋吊环，且在吊装前检查吊环焊缝，是否存在裂纹、气孔等，并保证清空吊装作业区 20m 内的人员与非施工设备；吊装定位则为起吊至 3m 高避障→移动至基坑上方→调整标高→下放至垫层，期间利用水准仪实时监测标高，并在基坑内安排 2 人进行辅助定位。

三、不停航施工下机场排水箱涵湿接技术

（一）湿接接头预处理

预制段结合面的处理质量直接决定新旧混凝土粘结强度，是避免接头渗漏的基础，需严格遵循凿毛 - 清理 - 界面剂涂刷三步流程，且每一步均需适配机场狭窄施工空间与短工期要求，如表 1 所示。

表1 湿接接头预处理操作步骤

步骤	操作及工具	质量验收	问题及应对
凿毛作业	气动凿毛机凿毛，深度3~5mm，凿毛率≥70%	深度用深度尺检测，凿毛率网格法统计	凿伤钢筋：立即停止，用砂轮打磨平整，补刷防锈漆
清洁处理	0.8MPa 高压水枪冲洗，去除浮浆/骨料，棉布擦干	无浮浆，无积水	冬季结冰：用50℃温水冲洗，避免结合面结冰
界面剂涂刷	水泥基界面剂，厚度1~2mm	厚度仪检测，无漏涂/流挂	界面剂干结：30min内未浇筑需重新涂刷，避免粘结失效

（二）钢筋连接优化

机场施工空间狭窄，如基坑宽度通常仅4~5m，传统焊接连接操作存在难度大、效率低，且焊接火花存在 FOD 风险等问题；进而选用套筒灌浆连接技术，并细化流程与检测仪器，从而满足不停航施工安全与效率要求，如表2所示。

表2 套筒灌浆连接技术优化

连接环节	技术方案与流程	关键参数	质量检测
套筒选型	半灌浆套筒→预埋	套筒轴线与钢筋轴线偏差≤1°	外观检测：无裂纹、凹陷，内径±0.5mm
灌浆料配制	CGM-4型灌浆料→电动搅拌桶搅拌3~5min→静置2min 排泡	初始流动度≥300mm，30min ≥260mm	流动度检测：流动度筒
灌浆施工	灌浆泵从下孔注入→上孔出浓浆封堵→30min 内检查漏浆	灌浆压力0.25~0.35MPa，饱满度100%	X 射线探伤：无空洞
接头养护	覆盖土工布保湿→自然养护≥24h；< 5℃时电加热	养护温度波动≤2℃，湿度≥90%	温度传感器：无超温，接头无裂缝

（三）湿接混凝土配制与浇筑

湿接混凝土需同时满足早强、微膨胀、高抗渗的性能需求，其配制与浇筑工艺需严格适配机场施工时段限制，确保可快速成型且质量稳定。混凝土配比设计，选用 C45 微膨胀混凝土，以 P.O 42.5R 水泥为强度基础，用量420kg/m³；细骨料选用中砂，用量650kg/m³；粗骨料采用5~16mm 连续级配碎石，用量1100kg/m³；水灰比控制在0.38，用水量160kg/m³；掺入7% 钙矾石型微膨胀剂，用量29.4kg/m³；添加聚羧酸系早强减水剂，用量6.3kg/m³；同时掺入30kg/m³ 硅灰，填充混凝土内部孔隙，提升密实度，使抗渗等级达到 P10，充分满足机场箱涵 P8 的基础要求。浇筑施工需在界面剂涂刷后30min 内启动，适配机场有限施工窗口；浇筑完成后需及时收光处理，在混凝土浇筑后1~2h 用木抹子初抹，浇筑后3~4h 用铁抹子终抹，收光次数≥2 次，确保表面平整度≤5mm/m，无裂缝、起砂现象，并结合机场具体施工时段与环境温度进行调整。

（四）湿接接头密封性检测

机场排水箱涵因承担强降雨排水的功能，而接头渗漏会导致基坑积水、地基沉降，甚至影响跑道结构安全，所以通过建立外观检测-闭水试验-无损检测三级密封性检测体系的方式^[7]，使得每级检测符合民航行业质量标准，并保证检测流程适配不停航施工节奏，具体如下：

1. 一级检测为外观检测，在湿接混凝土养护完成拆模后进

行，通过目视观察与手触检查接头表面状态；

2. 二级检测为闭水试验，是验证接头抗渗性能的核心手段，需在每完成50个接头后进行1次，及时发现渗漏，及时修补处理；

3. 三级检测为无损检测，用于排查接头内部隐蔽缺陷，每完成100个接头随机抽检1组，采用超声波检测仪沿接头周长每200mm 测1点，扫描深度50mm。

四、工程案例

（一）工程概况

以某国际机场飞行区扩建工程为例；本项目为核心配套排水设施改造项目，主要建设内容为新建1.2km 长矩形排水箱涵，箱涵设计尺寸为3.5×2.5m，壁厚0.3m，设计排水流量5m³/s，用于承接飞行区跑道、滑行道及航站楼周边的雨水、冰雪融水与生产废水，保障机场极端降雨工况下的排水安全。

（二）实施过程

预制段生产与运输：工厂选址，在机场外围10km 处设预制工厂，占地面积5000 m²，配置2条生产线，日均生产预制段8段（5m/ 段），1.2km 箱涵共需240 段，生产周期30d。运输组织，每日晚8~10 时运输16 段，运输路线沿机场外围道路→专用施工通道，保证全程不会对航班造成干扰。

现场施工流程：基坑开挖与支护采用钢板桩支护+井点降水，开挖时段为凌晨2~6 时，日均开挖50m，24d 完成。同时段进行预制段吊装，吊装偏差≤3mm。湿接施工：白天8~18 时进行接头预处理，次日凌晨2~4 时完成灌浆与混凝土浇筑，24d 完成。密封性检测，每完成40 个接头进行1 次闭水试验，共6 次，渗漏量均≤0.008m³/(m·d)；无损检测抽检20 个接头，均无空洞与疏松。

运营干扰控制：时段管控，距跑道< 50m 的敏感区施工仅在凌晨2~6 时进行，其他区域白天施工，日均有效施工时间8h。FOD 防控，作业区周边设 FOD 收集箱，每班作业后用 FOD 耙清理1 次，施工期间共检查120 次，FOD 检出率=0。噪声与扬尘控制，采用低噪声振捣棒，基坑开挖时雾炮机降尘，10min1 次，监测显示跑道旁噪声≤68dB，PM10 浓度≤75 μg/m³。

（三）应用效果评估

对工期与质量效果进行评估，评估指标设定为总工期、预制段强度达标率、湿接接头渗漏率、箱涵沉降总量、混凝土外观合格率，结果如表3 所示。

表3 工期与质量效果评价结果

指标	目标值	实际值	增幅：%
总工期：d	60	58	↑ 3.3
预制段强度达标率：%	100	100	/
湿接接头渗漏率：%	≤ 5	0	↓ 100
箱涵沉降总量：mm	≤ 10	4.2	↓ 58
混凝土外观合格率：%	≥ 95	99.3	↑ 4.5

由表1 可知，该工程在实施了分段预制与湿接技术后，其工期与质量得到显著提高，从而展示出较高的工程应用价值。

运营影响方面，结合实际情况可知，该工程施工期间，共保障航班18000架次，延误仅18架次，延误率为0.1%，远低于目标值0.5%；且无 FOD 事件与安全事故的发生；经济效益方面，从人工、材料、设备、运营损失、维修等方面，对比传统现浇工艺，从而对其进行评估，如表4所示。

表4 工程经济效益对比：万元

成本	传统现浇	分段预制 + 湿接工艺	节省金额	节省比例：%
人工	240	172	60	27.9
材料	560	476	84	15.0
设备	180	152	28	15.6
运营损失	320	40	280	87.5
维修	60	10	50	83.3
合计	1360	1074	285	21.0

由表4可知，相较于传统现浇工艺来说，显著降低各项成本的投入，约为285万元，展示出较高的经济应用效益。

五、结论

综上所述，本文提出的分段预制 + 湿接的技术，可有效解决机场不停航施工的核心问题与限制。实际工程案例表明：该技术在应用过程中，可有效缩短工程施工时间，降低工程成本投入，并最大限度减少工程对机场运营的干扰率，从而展示了该技术的推广价值与可行性。因此，在未来研究中，可从轻量化预制段制作、智能化湿接设备研发等方向，提升该技术的机场运营适配性与效率。

参考文献

[1] 韩宏跃, 李志成, 孙海泉, 等. 机场排水箱涵钢板台车施工技术 [J]. 民航学报, 2023, 7(6): 36-42.

[2] 中国民用航空局. 民用机场飞行区技术标准 (MH 5001-2021)[S]. 北京: 中国民航出版社, 2021.

[3] 中国民用航空局. 民用机场不停航施工管理规定 (CCAR-140)[S]. 北京: 中国民航出版社, 2020.

[4] 孙良. 机场排水箱涵分段预制湿接工艺在不停航施工中的应用 [J]. 建材发展导向, 2024, 22(20): 118-120.

[5] 罗甲舟. 机场超大截面箱涵移动式模架施工技术研究 [J]. 建筑施工, 2024, 46(1): 19-22.

[6] 李永强. 解决五台山机场排水问题的对策 [J]. 山西水利科技, 2025(1): 78-80.

[7] 李晖. 机场铸铁箅子箱涵雨水口设置间距研究 [J]. 房地产导刊, 2025(2): 137-139.