

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2025.01.001

【重大工程专栏】（专栏主持人：王卫东）

# 乌鲁木齐国际机场北区改扩建工程航站区 高填方地基处理设计与实践

吴江斌<sup>1</sup>, 王卫东<sup>2</sup>, 胡耘<sup>1</sup>, 梁永辉<sup>3</sup>

(1. 华东建筑设计研究院有限公司, 上海 200011; 2. 华东建筑集团股份有限公司, 上海 200041;

3. 上海申元岩土工程有限公司, 上海 200011)

**摘要:** 乌鲁木齐国际机场北区改扩建工程位于天山山脉北麓荒漠冲积带边缘, 航站区工程面积 76.5 万 m<sup>2</sup>, 高填方土石方量 800 万 m<sup>3</sup>, 最大填方高度 25 m。针对高填方填筑体量大、功能分区多、与地下结构关系复杂等技术难题, 从新疆戈壁砾石混合土填料的工程特性和大型三轴试验入手, 开展了沉降经验公式、改进的高填方沉降分层总和法、基于邓肯-张模型的三维数值分析方法等 3 种高填方沉降分析方法研究, 计算结果与实测较接近。提出了“两期填筑和三阶段”总体建设工序, 及精细化的填料配置和填筑工艺技术, 分层碾压结合强夯补强措施较好地解决了高填方工后沉降控制难题。采用了核心区换填和大面积改进强夯处理技术, 解决了大面积超低含水量、强湿陷性粉土处理问题。一系列创新设计理念和工艺保障了高填方回填质量, 实现了变形控制与工期目标, 为航站楼主体结构施工创造了有利条件, 为类似高填方地基上的大型工程设计提供了范例。

**关键词:** 高填方; 戈壁砾石混合土填料; 湿陷性粉土; 填方与结构同步建设; 变形控制

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2025)01-0001-09

## Design and implementation of high fill foundation treatment for the terminal zone in the north area expansion and renovation project of Urumqi International Airport

WU Jiangbin<sup>1</sup>, WANG Weidong<sup>2</sup>, HU Yun<sup>1</sup>, LIANG Yonghui<sup>3</sup>

(1. East China Architecture Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200011, China; 2. Arcplus Group, Shanghai 200041, China;

3. Shanghai Shenyuan Geotechnical Engineering Co., Ltd., Shanghai 200011, China)

**Abstract:** The expansion and renovation project of Urumqi International Airport north area is located on the edge of the desert alluvial belt at the northern foot of the Tianshan Mountains. The terminal area covers an area of approximately 765 000 m<sup>2</sup>, with a high fill volume of 8 000 000 m<sup>3</sup> and a maximum fill height of 25 m. Focusing on the technical challenges such as large volume of high fill, multiple functional zones, and complex interactions with underground structures, the study of engineering characteristics and large-scale triaxial tests on gravel mixed soil fillers in Gobi Desert of Xinjiang were conducted. Based on this project, research on three kinds of settlement analysis methods were conducted, including the empirical formula method, modified layer-summation method, and three-dimensional numerical analysis method based on the Duncan-Chang model, and the calculated results were in close agreement with the measured settlement values. The overall construction process of “two-steps filling and three stages” as well as refined filling material and technology were proposed, and the combination of layered rolling and dynamic compaction effectively solved the problem of post construction settlement control in high filled area. Additionally, core area soil replacement and improved dynamic compaction technology were adopted in this project, which solved the problem of large-scale low moisture content collapsible silt treatment. The implementation of a series of innovative design concepts and advanced technologies ensured high-quality fill backfilling, achieved effective deformation control, met critical project scheduling milestones, and ultimately established optimal conditions for the construction of the terminal building's primary structural

收稿日期: 2024-09-26; 修回日期: 2024-12-02; 录用日期: 2024-12-03

基金项目: 云南省科技厅科技计划 (202303AA080012)。

作者简介: 吴江斌 (1974—), 男, 重庆人, 博士, 教授级高级工程师, 注册岩土工程师, 主要从事建筑地基基础工程、地基处理工程及地下工程的设计研究。E-mail: jiangbin\_wu@ecadi.com。

components. This project serves as a benchmark for the design of large-scale projects on similar high fill foundations.

**Key words:** high fill; gobi gravel mixed soil filler; collapsible silt; synchronous construction of filling and structure; deformation control

## 0 引言

我国西部地区占有国土总面积的 70% 以上, 但截至 2020 年, 其机场的旅客吞吐量和货邮吞吐量占比仅分别为 32.6% 和 15.7%<sup>[1]</sup>, 尚存在较大发展空间。随着“一带一路”战略的颁布和推进, 我国西部地区航空运输业正步入一个高速发展的阶段<sup>[2]</sup>。与中东部相比, 西部地区地形、地貌以及地质条件均较为复杂, 机场建设面临突出的岩土工程问题<sup>[3]</sup>。为了满足机场场地条件以及飞机起降落的净空要求, 一般要开山填谷, 土石方工程量巨大, 例如已建成的四川九寨黄龙机场, 填方总量约 2 763 万 m<sup>3</sup>, 最大填方高度约 104 m<sup>[4]</sup>; 昆明长水国际机场航站区填方总量约 1 600 万 m<sup>3</sup>, 最大填方高度约 70 m<sup>[5]</sup>; 承德普宁机场填方总量约 2 500 万 m<sup>3</sup>, 最大填方高度约 114 m<sup>[6]</sup>。

乌鲁木齐国际机场北区改扩建工程是国家“十三五”规划重点建设项目<sup>[7]</sup>, 包括航站区、工作区和飞行区 3 部分。新建高填方填筑体范围同步建设大型航站楼建筑、高架、地下市政道路、地铁、城铁等复杂地面和地下结构, 涉及复杂工况下的高填方地基与基础结构相互影响控制问题, 设计和施工面临全新技术挑战。

## 1 工程概况

### 1.1 航站区改扩建概况

乌鲁木齐国际机场北区改扩建工程航站区包含航

站楼和交通中心(图 1), 占地面积约 76.5 万 m<sup>2</sup>。航站楼采用主楼加三指廊的构型, 主楼建筑高度约 50 m, 指廊高度约 19 m。主楼地上 3 层、地下 1 层, 采用钢筋混凝土框架结构体系和桩筏基础。主楼底板与基础承台面之间设置隔震层。交通中心地上 4 层, 建筑高度约 30 m, 下方为同期建设的地下 2 层地铁 2 号线车站及转换厅; 南北两侧布置地上 6 层车库和酒店, 其中北车库设置 2 层人防地下室。

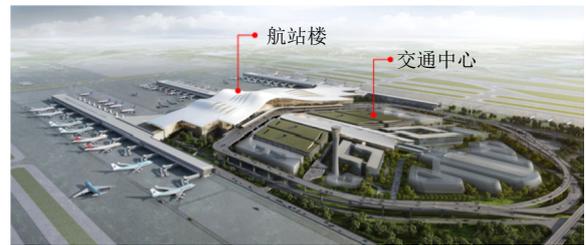


图 1 新建 T4 航站楼和北区交通中心效果图  
Fig. 1 Design sketch of new T4 terminal and north transportation center

### 1.2 工程地质概况

场地主要地层为杂填土、耕土、素填土、粉土和圆砾, 其物理力学参数如表 1 所示。场地内湿陷性粉土分布广泛, 厚度为 1.2~3.8 m 不等, 含水量大多为 1.5%~2%, 具有超低含水量和强结构性特征, 覆盖面积约 64 万 m<sup>2</sup>, 体量超 150 万 m<sup>3</sup>, 成为高填方不利下卧层, 造成安全隐患。圆砾磨圆度好, 级配良好, 一般粒径为 0.5~4.0 cm, 较大粒径约为 8~12 cm, 局部地段为卵石。圆砾层顶埋深为 0.5~5.4 m, 50 m 深度范围内未揭穿。

表 1 原场地地层物理力学参数表

Table 1 Physical and mechanical parameters of the original site strata

地层	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	承载力特征值 $f_{ak}/\text{kPa}$	变形模量/MPa	基床系数 $K_v/(\text{MN}/\text{m}^3)$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
粉土	17	140~180	$E_s=6$	20~30	15	15
圆砾	21	400~500	$E_0=40\sim60$	60~100	5	35

勘察期间 50 m 深度范围内未见地下水。根据周边水文观测井资料显示, 可知地下水水位为 80~120 m, 地下水对工程影响较小。

### 1.3 地势与高填方概况

建设场地位于天山山脉北麓边缘, 呈南高北低<sup>[8]</sup>, 场地面积约为 940 万 m<sup>2</sup>, 总填方量高达 1.9 亿 m<sup>3</sup>, 是当时已建和在建机场中填方总量最大的项目。如

图 2 所示, 航站区范围原地面海拔高程普遍达到 605~633 m, 场地最大高差约 28 m。为了与已建机场衔接, 航站楼普遍基底标高 637~639 m, 清表后需要进行 8~25 m 不等的高填方, 填方面积约 50 万 m<sup>2</sup>, 填筑方量 800 万 m<sup>3</sup>。

### 1.4 填筑料概况

填筑料均以原状圆砾为主(图 3), 从现场填

筑料中取样进行颗粒分析得到样本级配曲线如图 4 所示。不同料场取样的回填料级配具有较好的一致性, 且与原场地圆砾层相近, 填筑料样本的平均不均匀系数  $C_u=21.5$  (原场地圆砾层为 28.4), 平均曲率系数  $C_c=1.70$  (原场地圆砾层为 1.75), 颗粒级配良好。

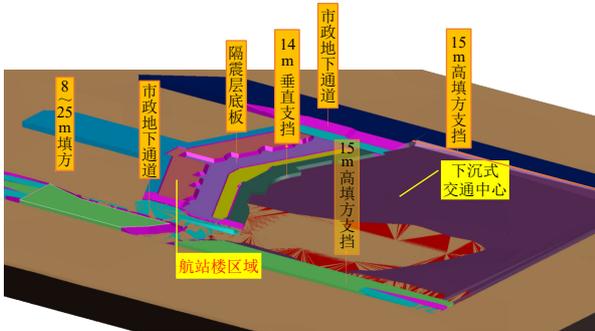


图 2 航站区场地高填方示意图

Fig. 2 Diagram of high fill at the terminal area



图 3 料场填料照片

Fig. 3 Photos of filling materials

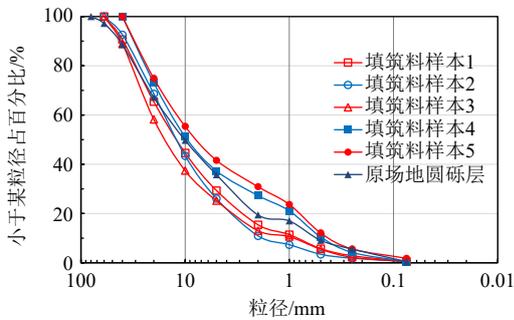


图 4 原场地圆砾层及填筑料颗粒级配曲线

Fig. 4 Particle grading curves of the original site's round gravel layer and filling materials

## 2 高填方设计

基于本工程特点, 项目提出了考虑高填方与基础及地下结构紧密衔接、同步建设的高填方场地形成和地基处理一体化设计方法。核心思想是基于考虑填筑过程的高填方沉降分析理论, 实现填筑体沉降总量和差异沉降最优化控制目标。设计技术体系包括强化原地基处理、填料优选设计、分层碾压+强夯补强设计、严谨的分区分层填筑密实工艺及搭接设计。

### 2.1 总体填筑工序设计

创新设计了契合填筑-地下结构空间关系和交叉施工影响的“两期填筑和三阶段”总体建设工序: I 期填筑→基础和地下结构施工→II 期填筑。

I 期, 大面积填筑至航站楼结构桩基承台底面, 为航站楼桩基施工创造条件; 穿越航站楼的市政地道范围土方则填至地道底, 并在地道两侧作预留; 航站楼共同沟填筑至首层结构底。

II 期, 待航站楼桩基及地下结构施工完成 (共同沟区域基坑开挖后施工结构), 填筑结构周边和基坑肥槽土方, 回填 I 期航站楼与飞行区高差处的边坡范围土方至设计标高 (见图 5)。穿越本设计范围区域的地铁区间隧道于填土完成后暗挖施工, 对填筑施工无影响。

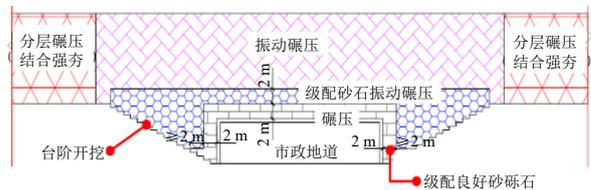


图 5 II 期地下结构周边填筑示意图

Fig. 5 Diagram of filling around the underground structure of Phase II

### 2.2 卵砾石混合料高填方沉降分析

提出了契合卵砾石混合料特性和大面积高填方特点的沉降分析方法, 实现高填方地基变形相对准确的预测, 为设计和施工提供理论支撑。

#### (1) 高填方工后沉降经验公式分析方法

在充分调查国内已有类似高填方工程经验以及现有高填方沉降预估方法的基础上, 基于多个山区机场高填方工程实测值总结的经验公式, 和考虑粗粒土、碎石料材料特性的经验公式, 有针对性地选择了适合本工程卵砾石混合料的经验公式并对高填方工后沉降进行初步预估 (表 2), 以填筑高度  $H=20\text{ m}$  为例, 计算工后沉降约为  $20\sim 89\text{ mm}$ , 其中劳顿-列斯特公式以及德国和日本经验公式未体现填筑料特性, 计算结果相比其他方法较大。

#### (2) 改进的高填方沉降分层总和和分析方法

根据工程经验, 高填方工后沉降与总沉降和呈一定比例关系, 而规范分层总和法没有考虑高填方施工过程<sup>[1]</sup>, 计算结果不合理。建立了与高填方场地形成过程相适应、可考虑原地基和填筑体压缩模量随填筑过程动态变化的总沉降预测方法, 由于所受应力大、密实度高, 即越靠近底部压缩模量越大, 计算工后沉降约  $49\text{ mm}$ 。编制了相关的软件并获得了软件著作权, 提高了分析的精度和效率。

表2 高填方工后沉降估算方法及结果

Table 2 Estimation methods and results of post construction settlement in high fill site

序号	估算方法	计算公式	S/mm
1	劳顿-列斯特公式	$S=0.001H^{3/2} \times 10^3$	89
2	德国和日本经验公式	$S=H^2/3\ 000 \times 10^3$	133
3	谢春庆等 <sup>[9]</sup> 的公式	$S=H^2/(3E^{2/3})$	14
4	贺广零等 <sup>[10]</sup> 的公式	$S=4.493+0.672H^2/E$	13
5	机场高填方经验公式	$S=H^2/E^{2/3}$	41
6	统计关系	$S=0.1\% \sim 0.4\% H \times 10^3$	20~80
7	云南类似工程经验类比	$S=0.1\% \sim 0.15\% H \times 10^3$	20~30

注:  $H$ 为填方高度, m;  $S$ 为高填方工后沉降量, mm;  $E$ 为填筑体的变形模量, MPa。

### (3) 基于邓肯-张模型的三维数值分析方法

开展了填筑过程的三维数值模拟, 采用了适用于粗粒料特性的邓肯-张模型, 基于面板堆石坝材料邓肯模型参数的统计, 开展了卵砾石粗粒料大三轴试验(图6), 结合现场原位试验, 较为真实地获取了填料的物理力学参数, 并基于ABAQUS软件进行邓肯张  $E-\mu$  模型二次开发, 采用带误差控制的改进 Euler 积分算法, 据此进行高填方三维数值分析, 计算工后沉降约 47 mm。



图6 卵砾石混合料大三轴试验

Fig. 6 Large triaxial test of gravel mixture

采用上述方法综合计算工后沉降约为 20~50 mm, 实测工后沉降小于 20 mm, 约 0.1% $H$ , 与几种分析方法得到的下限值较接近, 为上部结构的安全提供了保障, 形成了可用于卵砾石粗粒料高填方沉降估算的系列方法。

### 2.3 多种工艺相结合的填料夯压实处理方案

航站楼区域工后使用期(按 30 年计)沉降量不大于 150 mm, 差异沉降不大于 1.5‰, 大面积填料的压实工艺及控制指标是工后沉降的控制关键。针对新疆戈壁卵砾石混合土填料的复杂级配特征以及填筑区域结构特点, 创新提出了分期、分区、分层精细化填料优化设计和多种工艺相结合的

夯压实处理方案。结合“两期填筑和三阶段”总体建设工序, 提出了针对性的填料分选要求和强夯压实工艺, 具体如下:

I 期, 大面积回填填料采用卵砾石混合土, 填筑工艺采用分层振动碾压结合强夯补强(图7)。单层虚铺厚度 400 mm, 采用 20 t 振动压路机碾压, 机具走速 $\leq 3$  km/h, 碾压遍数为 12~14 遍。分层振动碾压至 3 m 采用强夯补强, 强夯能级为 3 000 kN·m 能级, 夯锤直径为 2.5 m, 夯点间距为 3.5 m, 正方形布置, 隔行跳打, 每点夯 10~12 击, 且最后两击平均沉降量 $\leq 30$  mm 控制, 强夯结束后将夯坑推平, 整平场地。



图7 分层振动碾压结合强夯补强工艺

Fig. 7 Layered vibration rolling combined with dynamic compaction technology

II 期, 采用级配良好填料分层碾压填筑工艺。市政地道、地下结构周边等 I 期和 II 期填筑交界面搭接处采用台阶式碾压, 需反挖后二次填筑, 台阶宽度不小于 1 m, 高度不大于 0.5 m。其中地下结构周边 5 m 及其结构顶上 2 m 范围采用碾压处理, 单层虚铺厚度不大于 200 mm。地下结构顶 2 m 以上范围及其周边 5 m 范围以外, 当具备条件时可采用振动碾压处理, 单层虚铺厚度不大于 200 mm, 采用 20 t 振动压路机碾压, 机具走速 $\leq 3$  km/h, 碾压遍数为 12~14 遍。

提出并采用了减小工后沉降的强夯补强工艺。分层振动碾压达到 3 m 后开展了 3 000 kN·m 能级的强夯试验, 强夯产生沉降不小于 40 mm, 验证了强夯补强的必要性。基于试验, 将单层碾压虚铺厚度由 300 mm 增大至 400 mm, 减小碾压面积约 700 万  $m^2$ , 大幅提高工效。强夯补强使填筑体提前发生沉降约 120~200 mm, 为实测工后沉降小于 20 mm 创造了条件。

### 2.4 多级梯次边坡支挡与高边坡加筋扶壁式挡墙结构设计

从停机坪至交通中心过渡的多级道路复杂的填

方设计地势, 形成了约 1 340 延长米的边坡工程, 采用了放坡、悬臂挡墙、扶壁挡墙、加筋土扶壁式挡墙 (图 8) 相结合的多级梯次支撑体系。



图 8 加筋土扶壁式挡墙

Fig. 8 Reinforced earth counterfort retaining wall

边坡高度大于 12 m 的区域, 在新疆首次采用扶壁式挡墙联合土工格栅加筋土复合支撑结构设计。在挡墙尺寸保持合理尺度、安全储备满足规范要求的前提下, 经济高效地突破了常规支撑结构支

护高度超规范的问题。开展加筋土扶壁式高边坡挡墙原位试验, 验证了计算方法与设计参数的可靠性。与该项目其他区域采用的桩板挡墙相比, 每延米节约钢筋混凝土约 8 m<sup>3</sup>, 节省工程量约 25%。

### 3 填筑试验段研究

为验证处理工艺并为填筑体处理设计参数优化提供依据, 进行了填筑体填筑试验, 以确定合适的虚铺厚度、碾压遍数、夯击能级、测试指标、强夯振动影响范围等参数。填筑体填筑试验类型划分为 B、C 2 个试验区块, 试验区总面积为 7 200 m<sup>2</sup>, 填筑体试验内容及试验分区如表 3 所示, 平面布置示意图如图 9 所示。各分两阶段进行, B 区先进行振动碾压试验, 再进行分层振动碾压结合强夯补强试验; C 区先进行冲击碾压试验, 再进行分层冲碾结合强夯补强试验。

表 3 填筑体试验内容及试验分区  
Table 3 Content and zones of the filling test

类型	分区	面积/m <sup>2</sup>	工艺	备注
碾压试验	B	50×60	振动碾压	虚铺厚度30~50 cm
	C	60×70	冲击碾压	虚铺厚度60~100 cm
碾压结合强夯试验	B	50×60	分层振动碾压结合强夯补强	填筑3 m, 分区采用1 000 kN·m满夯补强和3 000 kN·m点夯补强
	C	60×70	分层冲击碾压结合强夯补强	填筑4 m, 分区采用2 000 kN·m和4 000 kN·m点夯补强

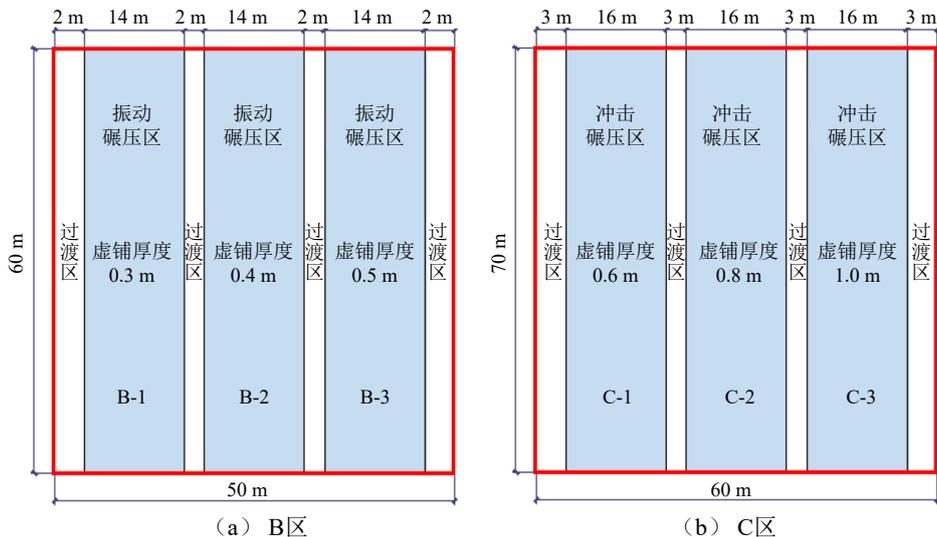


图 9 填筑体填筑试验平面布置示意图

Fig. 9 Layout plan of the filling test

实测填筑料最优含水率平均值为 4.6%, 室内击实试验得到的最大干密度平均值为 2.36 g/cm<sup>3</sup>。图 10 为两种碾压工艺得到的固体体积率与虚铺厚度及碾压遍数的关系。

如图 10 (a) 所示, 现场 B 区分层振动碾压超过 8 遍后, 固体体积率达到 87%, 干密度达到 2.30 g/cm<sup>3</sup>。其后随着碾压遍数的增加, 在 8~12 遍时, 虚铺厚度为 300 mm、400 mm 区域的固

体体积率进一步增加,虚铺厚度为 500 mm 区域反而有所下降,压实度的变化可能与检测点的离散性有关。试验表明,虚铺厚度小于 500 mm 时,振动碾压压实效果与虚铺厚度的关系并不明显,8~12 遍能达到较好的压实效果。

如图 10 (b) 所示,现场 C 区冲击碾压达到 20 遍后,固体体积率达到 86%,干密度达到  $2.28 \text{ g/cm}^3$ 。虚铺厚度 600 mm、800 mm 区域,在碾压 30 遍后固体体积率达到最大值 89%;1 000 mm 区域在碾压 25 遍后固体体积率达到最大值 89%,随后有所下降。试验表明,虚铺厚度为 600~1 000 mm 时,冲击碾压 20~30 遍可达到与振动碾压相同的压实效果,两种分层碾压工艺皆可行。重型动力触探对比试验结果表明,冲击碾压压实效果略优于振动碾压。

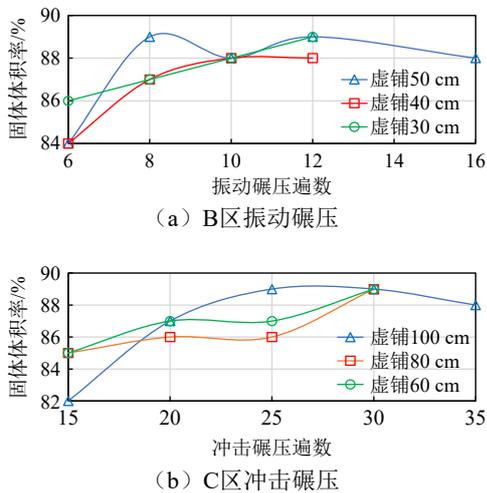


图 10 固体体积率与虚铺厚度及碾压遍数的关系

Fig. 10 Relationship between solid volume fraction, virtual paving thickness, and number of rolling passes

基于上述压实试验,确定了设计采用的控制指标如下:大面回填区域回填料的固体体积率 $\geq 0.85$ ,干密度 $\geq 2.25 \text{ g/cm}^3$ ,承载力 $\geq 300 \text{ kPa}$ ,变形模量 $\geq 60 \text{ MPa}$ ;肥槽区域回填料的固体体积率 $\geq 0.83$ ,干密度 $\geq 2.20 \text{ g/cm}^3$ ;挡墙后填土压实度 $\geq 0.95$ ,固体体积率 $\geq 0.84$ ,干密度 $\geq 2.20 \text{ g/cm}^3$ 。

强夯补强的夯沉量约 60 mm,表明强夯能进一步减小大面积回填工后沉降。强夯补强对表层土有扰动,1.0 m 以下动探击数基本大于 30 击,密实性好。强夯后的载荷试验表明,夯后地基承载力特征值均不小于 400 kPa,B 区平均变形模量为 159 MPa,C 区平均变形模量为 113 MPa,满足设计要求。

考虑到场地有地铁、市政通道等同步建设的建(构)筑物,对强夯的环境影响进行了监测和评

估,强夯影响范围见图 11,其中 B 区  $3 000 \text{ kN}\cdot\text{m}$  强夯振动主频率在 12~34 Hz,安全距离按振速矢量和  $24 \text{ mm/s}$  控制<sup>[12]</sup> 约为 32 m;C 区  $4 000 \text{ kN}\cdot\text{m}$  强夯振动主频率在 5.3~39 Hz,安全距离按振速矢量和  $24 \text{ mm/s}$  控制<sup>[12]</sup> 约为 45 m。

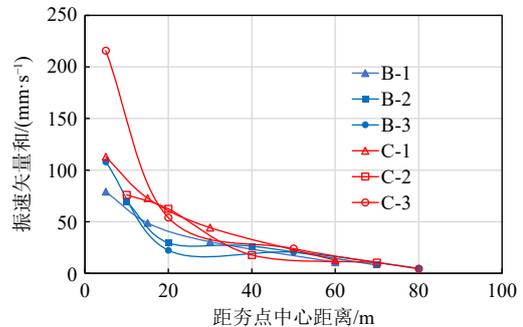


图 11 填筑体强夯影响范围

Fig. 11 Impact range of dynamic compaction on filling body

## 4 湿陷性粉土处理

原场地表层存在杂填土(厚度 0.5~5.4 m)和耕土(厚度 0.2~0.8 m),表层土成分复杂,土性不一,原则上全部清除,以满足后期使用要求。原场地处理设计重点在于湿陷性粉土层的处理。

原场地浅层填土下方的湿陷性粉土,对其处理一般有换填法和原位处理法,前者质量可靠性高、场地均匀性好,但造价高且工期长,后者处理厚度大,施工简单、工效高,且造价相对便宜<sup>[13-14]</sup>。为确定粉土湿陷性处理的可行性,及确定合理的施工工艺和参数,在实施前需进行现场试验。

### 4.1 湿陷性粉土强夯处理试验研究

设置了 A1、A2 两个试验区(表 4),平面尺寸均为  $20 \text{ m}\times 20 \text{ m}$ ,强夯能级分别为  $2 000 \text{ kN}\cdot\text{m}$  和  $3 000 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ,对应处理粉土层厚度不大于 2 m 和 2~3 m(应对现场可能出现的情况)。前 2 遍采用点夯,夯点间隔 3.5 m,正方形布置,第 2 遍夯在第 1 遍夯点之间插点(图 12),收锤标准按最后 2 击平均沉降量 $\leq 5 \text{ cm}$  控制,最后 1 遍满夯能级为  $1 000 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ,夯印搭接 1/3,每点 3 击。

实测粉土最优含水率平均值为 12.75%,最大干密度平均值为  $1.922 \text{ g/cm}^3$ 。如图 13 所示,强夯处理后,平均干密度 A1 区提高 7.6%、A2 区提高 8.5%;孔隙比 A1 区降低 15%、A2 区降低 17%。夯前 A1、A2 区粉土平均湿陷系数分别为 0.091 4 和 0.092 7,夯后分别为 0.048 8 和 0.021 4,降幅分别为 46.6% 和 79.6%,根据规范<sup>[15]</sup> 判定,A1 区由湿陷性强烈降低为中等,A2 区由湿陷性强烈降低为轻微。

表 4 原地基粉土强夯试验分区

Table 4 Partition of dynamic compaction test for in-situ loess foundation

分区	粉土厚/m	面积/m <sup>2</sup>	点夯能级/(kN·m)	夯点间距/m
A1	≤2	20×20	2 000	3.5
A2	2~3	20×20	3 000	3.5

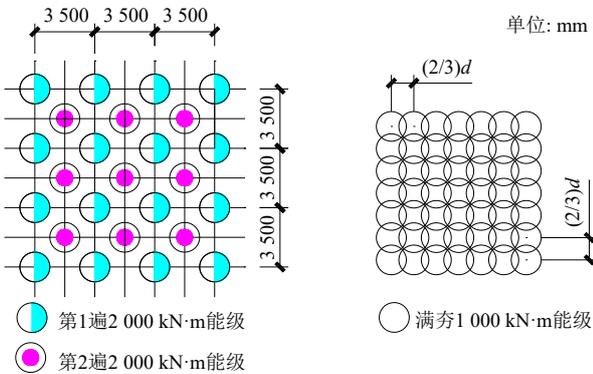


图 12 原地基处理试验区夯点布置图

Fig. 12 Compaction points of original foundation treatment in experimental area

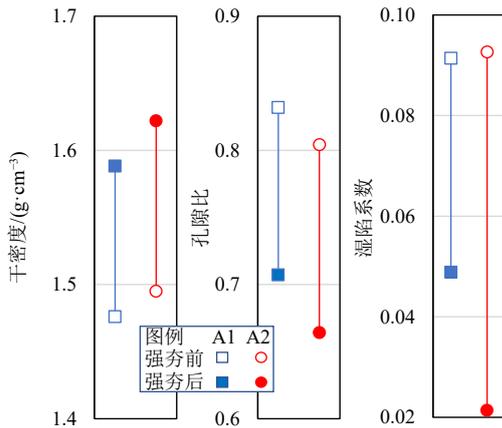


图 13 粉土层强夯前后主要物理力学参数对比图

Fig. 13 Comparison of main physical and mechanical parameters of silty soil before and after dynamic compaction

强夯后在 500 kPa 的高填方填筑体荷载作用下, 粉土层浸水湿陷附加沉降 7.27 mm (0.5 m<sup>2</sup> 板)、22 mm (2 m<sup>2</sup> 板), 与处理前原地浸水荷载试验比较, 浸水荷载提高 2.5 倍, 附加沉降量显著降低, 按照 0.017B (B 为载荷载板宽度) 判断湿陷起始压力均不小于 500 kPa, 粉土湿陷性基本消除。据荷载试验结果, 夯后场地承载力特征值均不小于 250 kPa, 平均变形模量 A1 区为 71 MPa、A2 区为 77 MPa, 超过设计要求。

为评估原地基强夯施工对混凝土结构的影响范围, 开展了环境影响监测。根据振动监测曲线 (图 14) 可知, 振动主频率在 10~50 Hz 范围内, 根据标准<sup>[12]</sup>, 按振速矢量和 24 mm/s 控制, A1 区

2 000 kN·m 强夯的安全距离约为 28 m, A2 区 3 000 kN·m 强夯的安全距离约为 35 m。根据土体深层水平位移监测曲线, 强夯引起的土体侧向位移不明显, 最大土体侧向位移为 2.5 mm, 距离夯点 6 m 处, 距离 35 m 以外, 最大侧向位移小于 1 mm。

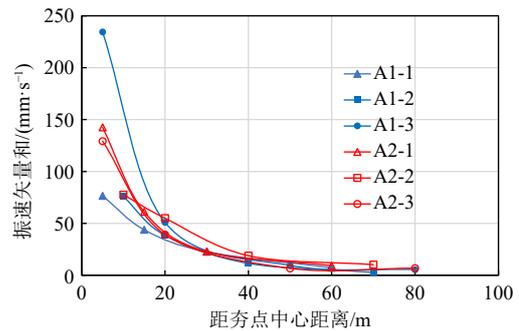


图 14 粉土层强夯施工振动影响范围

Fig. 14 Impact range of vibration during dynamic compaction on silty soil

#### 4.2 湿陷性粉土处理设计

针对湿陷性粉土分布面积广, 不同功能分区要求不同等特点, 采用换填、强夯、垫层强夯相结合的处理工艺 (图 15)。航站楼隔震层、挡墙和市政地道等区域约 25 万 m<sup>2</sup> 采用挖除换填处理, 满足了高沉降控制要求。其余约 49 万 m<sup>2</sup> 采用强夯处理工艺, 施工速度快、费用低, 原地基粉土层处理后压实度≥0.95, 承载力≥250 kPa, 压缩模量≥15 MPa, 粉土层全部消除湿陷性。

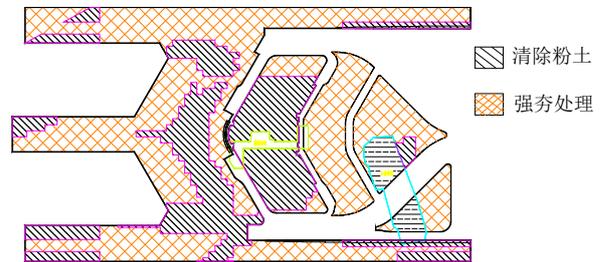


图 15 粉土分区处理平面示意图

Fig. 15 Plan of silt zoning treatment

邻近跑道的湿陷性粉土裸露区域, 面积约 8 万 m<sup>2</sup>, 直接强夯工艺不能完全消除其湿陷性, 采用了改进的垫层强夯工艺, 先回填 0.4 m 厚碎石, 然后洒水增加至最优含水量, 再进行强夯, 对保证处理效果、确保既有跑道不停航施工起了关键作用。

精细化设计减小了约 48 万  $\text{m}^3$  湿陷性粉土的换填处理。

## 5 实施效果

项目自 2018 年 3 月开始首块区域原地基处理, 至 2020 年 11 月完成高填方填筑及挡墙施工, 仅仅 32 个月即完成了航站区的高填方场地形成 (图 16), 实现岩土工程工期目标, 为后续航站楼及交通中心主体结构的顺利施工打下了坚实基础。



图 16 工程建设实景

Fig. 16 Photo of construction scene

现场试验结果表明, 处理后的粉土湿陷系数最大下降 76.9%, 湿陷性完全消除。实测原地基最大沉降仅为 44 mm, 满足了机场高填方地基对沉降控制的要求。填筑体高度 20 m 位置, 预估填筑体沉降 20~50 mm, 实测最大沉降 20 mm, 约为 0.1% $H$ , 与考虑填筑体压缩模量随应力状态变化的分层总和法及采用邓肯-张模型的有限元法计算得到的工后沉降结果相近, 解决了高填方填筑体工后沉降及不均匀沉降控制的难题。

项目的成功实践为新疆类似高填方地基上的大型工程设计建造提供了成功的范例。创新改进的强夯工艺减小了约 48 万  $\text{m}^3$  湿陷性粉土的换填处理。结合大量的施工与监测数据, 对回填工艺进行动态优化设计, 将单层虚铺厚度由 300 mm 增大至 400 mm, 减小碾压面积约 700 万  $\text{m}^2$ ; 将每 3 m 进行一次强夯补强调整为每 5~6 m, 减少强夯面积约 116 万  $\text{m}^2$ 。加筋土扶壁式高边坡挡墙较常规的桩板挡墙节省钢筋混凝土 25%。一系列精细化设计施工总计节省工程造价约 8 000 万元, 缩短工期 9 个月以上。

## 6 结论

乌鲁木齐国际机场北区改扩建工程涉及超大规模高填方, 填筑体量大、功能分区多, 高填方填筑

体内存在拟建地铁、城铁、市政地道、航站楼地下室、管廊等大量地下结构, 设计和施工面临全新挑战。项目从新疆特有的戈壁卵砾石混合土填料的工程特性入手, 开展了大型三轴压缩试验、分层夯压实工艺和填筑密实效果研究, 高填方沉降理论分析方法研究, 以及湿陷性粉土强夯处理工艺和效果的现场试验研究, 结合全过程工程实践, 取得了如下成果:

(1) 针对航站区地上地下结构与高填方地基同步建设的复杂空间关系和交叉施工影响问题, 创新提出了考虑高填方与基础及地下结构紧密衔接的“两期填筑和三阶段建设”总体工序, 减少了常规施工带来的大挖大填, 相比传统的“先填后挖”方案, 可减少约 180 万  $\text{m}^3$  土石料的回填开挖, 同时还保证了回填的质量和效果。

(2) 针对新疆戈壁料卵砾石混合土的工程特性, 形成了高填方工后沉降经验公式、改进的高填方沉降分层总和分析方法、基于邓肯-张模型的三维数值分析方法等 3 种契合大面积高填方特点的沉降分析方法, 实现高填方地基变形相对准确的预测, 实测工后沉降与计算得到的下限值较接近, 为上部结构的安全提供了保障。

(3) 针对新疆戈壁卵砾石混合土填料的复杂级配特征以及填筑区域结构特点, 开展了不同厚度振动碾、冲击碾、振动碾结合强夯补强、冲击碾结合强夯补强等精细化的填筑工艺试验, 指导了 800 万  $\text{m}^3$  粗粒料回填的工艺设计、施工参数确定及质量控制指标的制定。填筑体工后最大沉降小于 20 mm, 强夯补强措施较好地解决了高填方地基沉降及不均匀沉降控制的难题。

(4) 针对高填方地基下大面积超低含水量、强湿陷性粉土地基处理问题, 提出了核心区换填+大面积改进强夯处理方法, 粉土湿陷系数最大下降 76.9%, 湿陷性完全消除。精细化的试验数据证明了强夯处理工艺的可行性, 减小了约 48 万  $\text{m}^3$  湿陷性粉土的换填处理。实测原地基最大沉降仅为 44 mm, 满足了机场航站区高填方地基对沉降控制的要求。

(5) 针对南北停机坪与交通中心区域的 1 340 延长米边坡, 采用了放坡、悬臂挡墙、扶壁挡墙相结合的多级梯次支挡体系。其中约 603 延长米范围挡土墙高大于 12 m, 采用加筋土减少土压力, 形成加筋土扶壁式挡土墙, 开展了 1:1 的现场试验段, 突破了规范对扶壁式挡土墙最大高度的限定。与该项目其他区域采用的桩板挡墙相比, 每延米节约钢筋混凝土约 8  $\text{m}^3$ , 合计节省造价约 1 080 万。

## 参考文献

- [1] 张静. 西部地区航空运输量对经济发展的溢出效应研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古财经大学, 2022.  
ZHANG Jing. Study on the spillover effect of air transport on economic development in the western region[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Finance and Economics, 2022.
- [2] 洪晓龙. 乌鲁木齐建设丝绸之路经济带交通枢纽中心的战略和实施途径[J]. 交通与运输(学术版), 2017(1): 32-34.  
HONG Xiaolong. Transport strategy and implementation approach for Urumqi to build transport hub center of silk road economic belt[J]. Traffic & Transportation, 2017(1): 32-34.
- [3] 王昊. 西南山区机场高填方边坡稳定性影响因素研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.  
WANG Hao. Study on the factors influencing the stability of high fill slope in southwest mountainous airport[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [4] 李秀珍, 许强, 孔纪名, 等. 九寨黄龙机场高填方地基沉降的数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2188-2193.  
LI Xiuzhen, XU Qiang, KONG Jiming, et al. Numerical modeling analysis of settlements of high fill foundation for Jiuzai: Huanglong airport[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(12): 2188-2193.
- [5] 王萌. 某机场高填方边坡稳定性数值法和极限平衡法对比分析[J]. 地基处理, 2022, 4(增刊 1): 65-71.  
WANG Meng. Comparative analysis of numerical method and limit equilibrium method for stability of high fill slope in an airport[J]. Journal of Ground Improvement, 2022, 4(S1): 65-71.
- [6] 杨校辉. 山区机场高填方地基变形和稳定性分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.  
YANG Xiaohui. Analysis of foundation deformation and stability of high fill of airport in mountainous area[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017.
- [7] 赵民合. “十一五”机场布局建设的重点[J]. 综合运输, 2006(6): 17-21.  
ZHAO Minhe. The key points of airport layout construction during the 11th Five-Year Plan[J]. Comprehensive Transportation, 2006(6): 17-21.
- [8] 乌鲁木齐地窝堡国际机场北区改扩建工程航站区详细勘察报告[R]. 乌鲁木齐: 新疆建筑设计研究院股份有限公司, 2017.  
Detailed investigation report for the terminal area of the north zone expansion project of Urumqi Diwopu International Airport[R]. Urumqi: Xinjiang Architectural Design Institute Co., Ltd., 2017.
- [9] 谢春庆, 刘汉超, 甘厚义. 高填方块碎石夯实地基变形的研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(1): 38-41.  
XIE Chunqing, LIU Hanchao, GAN Houyi. Study on deformation of ground under high fill of block and detritus[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(1): 38-41.
- [10] 贺广零, 李倩妹, 洪芳, 等. 山区变电站高填方地基工后沉降分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(4): 45-49.  
HE Guangling, LI Qianmei, HONG Fang, et al. Analysis of post-construction settlement of transformation substation high fill foundation in mountainous areas[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(4): 45-49.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Ground Treatment of Buildings: JGJ 79—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑工程容许振动标准: GB 50868—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for Allowable Vibration of Building Engineering: GB 50868—2013[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [13] 马鹏兵, 徐晓, 曹静远. 高能级强夯处理晋中深厚湿陷性黄土地基的试验研究[J]. 地基处理, 2023, 5(增刊 2): 19-25.  
MA Pengbing, XU Xiao, CAO Jingyuan. Experimental study on high energy level dynamic compaction treatment of deep collapsible loess foundation in Jinzhong[J]. Journal of Ground Improvement, 2023, 5(S2): 19-25.

- ZHANG Jiru, ZHU Jie, HUANG Li, et al. Evolution of micro pore structure of soft clay and its fractal features under consolidation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(4): 394–400.
- [31] WANG J B, FAN P X, WANG M Y, et al. Experimental study of one-dimensional compression creep in crushed dry coral sand[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2020, 57(12): 1854–1869.
- [32] 张先伟, 孔令伟, 郭爱国, 等. 不同固结压力下强结构性黏土孔隙分布试验研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(10): 2794–2800.
- ZHANG Xianwei, KONG Lingwei, GUO Aiguo, et al. Experiment study of pore distribution of strong structural clay under different consolidation pressures[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(10): 2794–2800.
- [33] LEI X Y. The types of loess pores in China and their relationship with collapsibility[J]. *Scientia Sinica (Series B)*, 1988, 31(11): 1398–1408.
- [34] 周建, 邓以亮, 曹洋, 等. 杭州饱和软土固结过程微观结构试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(6): 1998–2005.
- ZHOU Jian, DENG Yiliang, CAO Yang, et al. Experimental study of microstructure of Hangzhou saturated soft soil during consolidation process[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(6): 1998–2005.
- [35] CHAPUIS R, GILL D. Hydraulic anisotropy of homogeneous soils and rocks: influence of the densification process[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 1989, 39(1): 75–86.



(上接第 9 页)

- [14] 徐文涛, 董宝志, 于永堂, 等. 直接强夯法处理低含水量大厚度湿陷性黄土的效果分析[J]. *地基处理*, 2022, 4(增刊 1): 134–143.
- XU Wentao, DONG Baozhi, YU Yongtang, et al. Effect analysis of direct dynamic compaction on collapsible loess with low moisture content and large thickness[J]. *Journal of Ground Improvement*, 2022, 4(S1): 134–143.
- [15] 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. 湿陷性黄土地区建筑标准: GB 50025—2018[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 Building Construction in

Collapsible Loess Regions: GB 50025—2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.

### 专栏主持人 王卫东



王卫东(1969—), 男, 辽宁辽阳人, 博士, 教授级高级工程师, 全国工程勘察设计大师, 全国创新争先奖获得者, 国家级人才计划入选者, 现任华东建筑集团股份有限公司总工程师, 同济大学、东南大学和上海交通大学兼职教授、博士生导师, 长期在工程一线致力于深基坑工程、建筑地基基础工程和地下空间工程的设计与研究。E-mail: [weidong\\_wang@arcplus.com.cn](mailto:weidong_wang@arcplus.com.cn)。