

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2022.02.007

【工程应用】

机场工程地基处理技术方案对比分析

张鹏恒¹, 马立杰¹, 聂亚伟²

(1. 华北理工大学 建筑工程学院, 河北 唐山 063210; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710061)

摘要: 泡沫轻质土是一种轻型绿色多孔混凝土材料, 填筑后自流平免振捣, 减轻路基重量, 减少差异性沉降。本文结合机场除冰坪扩建项目, 为解决工程存在的废土回填、压实度不达标等问题, 从整体地基承载力的角度进行分析, 提出 3 种软土地基处理方案, 从现场试验段的施工工艺、处理结果、工程造价等角度对换填山皮石、水泥固化土、泡沫轻质土进行了对比分析, 换填山皮石厚度超过 70 cm 时可满足施工设计要求, 由于施工工艺、现场环境等不可控因素导致水泥固化土强度和道基反应模量明显下降, 泡沫轻质土的施工效果较好, 且工程造价相比于其他 2 种方案较为经济。

关键词: 泡沫轻质土; 机场工程; 施工工艺; 软土地基; 地基处理; 试验; 工程造价

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)02-0139-06

Comparative analysis of ground treatment technology for airport engineering

ZHANG Peng-heng¹, MA Li-jie¹, NIE Ya-wei²

(1. School of Civil Engineering, North China University of Technology, Tangshan 063210, Hebei, China;

2. College of Highway, Chang'an University, Xi'an 710061, Shanxi, China)

Abstract: Foamed light soil is a kind of light green porous concrete material, and it can be leveled automatically without vibration after filling. It also can reduce the weight and differential settlement of roadbed. Based on an airport deicing area expansion project, three soft soil ground treatment schemes were proposed to solve the problems of waste soil backfilling and substandard compaction. The bearing capacity of the whole foundation is analyzed from the perspectives of construction technology, treatment results, and project cost through field tests. Comparative analysis of the replacement of mountain screes, cement-solidified soil, and foamed light soil were carried out. The replacement of mountain rock with a thickness of more than 70 cm can satisfy the construction design requirements. Due to uncontrollable factors such as construction technology and site environment, the strength of cement-solidified soil and the reaction modulus of roadbed has been significantly reduced. The construction effect of foamed lightweight soil is better, and the project cost is more economical than the other two options.

Key words: foam light soil; airport engineering; construction technology; soft soil foundation; ground treatment; testing; engineering cost

0 引言

我国航空技术的迅速发展, 航空民用化越来越成熟, 越来越多人选择航空远距离出行。针对机场建设遇见的地基不良土质(主要指滨海湖沼中天然含水率高、压缩性高、孔隙率大、抗剪强度低的软土)按处理的作用机理可分为土的改良、

土的置换、土的补强三类, 天津滨海机场三期改扩建工程土基处置项目为达到三期工程大面积开挖的土壤充分利用、减少外弃土造成的环境污染并实现近零排放、解决压实度不足、降低工程造价的目的, 提出了 3 种常用地基处理方案: 换填山皮石、泡沫轻质土、水泥固化土。

收稿日期: 2021-12-10

作者简介: 张鹏恒(1996—), 男, 河南濮阳人, 硕士研究生, 主要从事道路工程方面的研究。E-mail: 3073754470@qq.com。

1 工程概况

该项目位于天津市东丽区,年平均气温约为 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$,1月最冷月平均 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均降水量在 $360\sim 970\text{ mm}$ 之间。冬季下雪对机场运营影响很大,机场除冰效率高低将直接影响航班的正常。目前的机场除冰主要在机位上定点除冰,为了保证机场于雪天正常运营并减少除冰液对环境的污染及对站坪的损坏,天津机场拟考虑扩建除冰坪,以满足冬季除冰作业需求。

本次拟建场地地处华北平原,属冲击、海积低平原,原为低洼坑塘。2014年机场二期扩建时对该区域进行填土和平整,整体上四周较高,标高介于 $3.33\sim 2.15\text{ m}$,中部地势略低,标高介于 $2.09\sim 0.76\text{ m}$,静止水位埋深 $0.10\sim 1.90\text{ m}$,相当于标高 $1.68\sim 1.22\text{ m}$,南侧现有除冰坪站地面高程为 3.0 m 。该机场道面应满足《民用机场岩土工程设计规范》^[1]设计指标要求:密实度不小于 96% ;道基反应模量 k_0 不小于 40 MN/m^3 ;工后沉降不大于 300 mm 。

2 工程地质

根据勘察资料和《天津市地基土层划分技术规范》(DB/T 29—191—2009)分析,该场地埋深 25 m 范围内地基土按成因年代分为6层,自上而下分述:人工填土层(Q^m)、全新统上组陆相冲积层(Q_4^3al)、全新统中组海相沉积层(Q_4^2m)、全新统下组沼泽相沉积层(Q_4^1h)、全新统下组陆相冲积层(Q_4^1al)、上更新统第五组陆相冲积层(Q_3^5al)。本场地存在以下特殊土,全场均有分布

的人工填土,厚度 $1.5\sim 3.5\text{ m}$,底板标高为 $1.31\sim -0.52\text{ m}$,该层从上而下可分为2个亚层:①₁杂填土,厚度一般为 $1.0\sim 1.5\text{ m}$,呈杂色,松散状态,由砖块、废土等组成。本亚层土质杂乱,均匀性差,难以利用。①₂素填土,厚度一般为 $1.0\sim 2.6\text{ m}$,呈褐色,软塑状态,局部呈可塑、流塑状态,无层理,粉质黏土、黏土质为主,局部夹淤泥质土,含植物根属高压缩性土,且人工填土填垫年限整体大于 10 a ,浅部种植土长期受植物活动扰动。现场取土进行室内试验得到三期改扩建处原状土的基本物理力学指标如表1所示。

在现场对不经过任何处治的原状土经传统工艺碾压后测试其压实系数。根据《公路土工试验规程》^[2]的要求,压实指标监测采用灌砂法,压实度采用重型击实仪监测,测得原状土的天然含水率为 21.5% ,最优含水率为 18% ,最大干密度为 1.688 g/cm^3 ,压实系数 91% 。地基承载力欠佳,在荷载作用下变形较大,无法测出道基反应模量,若不经过任何处治,满足不了设计要求,不能直接用于机场土基施工,现场状况如图1所示。



图1 现场碾压状况

Fig. 1 In-situ rolling

表1 原状土的物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical indexes of undisturbed soil

有机质含量/(g/kg)	液限/%	塑限/%	天然含水率/%	最优含水率/%	最大干密度/(g/cm ³)	塑性指数	液性指数	CBR _{2.5}
11.4	30.8	18	19.44~30.87	17.3	1.696	12.8	0.888~0.005	4.4~6.0

3 地基处理方案

机场土基工程中,很多原地面土的压实系数达不到 $95\%\sim 98\%$ ^[3],为此经常采取大厚度换填山皮石的方案,该方案需要远距离运输大量山皮石,会产生大量的挖方废土,还增加了工程造价。通过在原地面顶部换填一定厚度的山皮石和泡沫轻质土,从整体地基承载力的角度分析结构体承

载力是否满足设计要求,水泥固化土方案可解决开挖出来的淤泥质废土改良再利用的技术难题。

3.1 换填山皮石

原状土经传统工艺碾压后,挖掘机依次挖除顶面 $30、50、70、90\text{ cm}$ 的原状土,然后依次换填山皮石,碾压后测压实系数和道基反应模量。使其在换填一定厚度山皮石后,原状土和山皮石组成的结构体承载力满足设计要求。从整体地基承

承载力角度出发, 满足了承载力要求, 同时又验证了一次性填料压实的施工可行性。

施工程序: 施工准备→测量定位→不良地质材料挖除→换填山皮石及压实→换填后表面处理。

施工工艺: 首先测量放样标出填方范围, 杂填土挖出用自卸汽车运至弃土场。通过烘干法和李氏密度瓶法分别得出山皮石的含水率为 2%、密度为 2.72 g/cm³。山皮石运至摊铺现场, 碾压前视运输远近和天气状况适当调整加水量, 保证压实前达到最优含水率。碾压顺序要先低后高、先两侧后中央, 大型推土机摊平, 个别不平处人工配合找平。用 18 t 以上振动压路机慢速碾压 6~9 遍, 两侧多压 2~3 遍, 期间铺撒填隙料后人工或机器扫匀再碾压, 局部填隙料不足处找补, 表面平整均匀, 无浮石、沙窝及梅花现象。

施工结果: 不同厚度分层压实后用灌水法和承载板法分别测得压实度和道基反应模量, 山皮石固体体积率 ≥ 83%, 道基反应模量 $k_0 \geq 40 \text{ MN/m}^3$, 本区域原状土在填筑山皮石的情况下, 山皮石厚度大于 70 cm 时可以满足设计要求。所测压实度与道基反应模量见表 2。现场施工及试验检测见图 2。

3.2 泡沫轻质土

泡沫轻质土作为一种新兴材料^[4], 因轻质高强自流动易自立、施工迅速、绿色无污染在改扩建工程中得到施工单位的青睐^[5]。为验证其适用于机场非道面影响区, 开展了试验段研究, 要求工后的轻质泡沫土坚硬, 无压缩性, 遇水无软化, 抗水、土腐蚀性稳定, 在施工 28 d 后, 应达到抗压强度 1.0、1.5 和 2.0 MPa。

本次泡沫轻质土填筑厚度为 1 m, 采用下式计算, 地下水位埋深较大, 故式中 h_3 取 0。

$$(h_1+h_2)\gamma + h_3\gamma_a + T_P\gamma_P + h_f\gamma_f = h_2\gamma_0 + h_3\gamma_{0a} \quad (1)$$

式中: h_1 为泡沫轻质土地面以上填筑厚度, m; h_2 为泡沫轻质土地面以下水位以上填筑厚度, m; h_3 为泡沫轻质土地面以下水位以下填筑厚度, m; T_P 为路面结构厚度, m; γ_P 为路面结构重度, kN/m³; γ_f 为路基填土重度, kN/m³, 一般取 18~19; h_f 为车辆荷载换算填土荷载的等代厚度, m, 一般取 0.8; γ_0 、 γ_{0a} 为地基土天然重度、饱和重度, kN/m³。

施工程序: 施工准备(基槽开挖、清理, 侧向挡板安装, 设备调试, 材料储放)→泡沫轻质

土制备→泵送、浇筑→养护→检验和成品保护。

表 2 不同厚度的山皮石压实度及道基反应模量

Table 2 Compaction degree and road-base reaction modulus of different thicknesses of mountain screes

换填深度/cm	压实度/%	道基反应模量/(MN/m ³)
30	90	<26.77
50	92	31
70	94	45
90	94	75



图 2 现场碾压施工和灌水法、承载板法的检测
Fig. 2 In-situ rolling construction and inspection of irrigation method and bearing plate method

施工工艺: 软管直接泵送。浇筑时应注意: (1) 禁止雨天浇筑, 温度 15℃以上; (2) 软管出口埋入泡沫轻质土内不小于 20 cm, 减少消泡; (3) 分层浇筑, 高度不宜超过 1 m, 在水泥浆初凝时间内确保单个浇筑层浇筑完成; (4) 浇筑至顶层人工扫平, 软管采用向后直拉进行移动; (5) 整个浇筑层终凝后才能进行上层的浇筑施工。浇筑中禁止喷射方式浇筑, 未固化的泡沫轻质土尽量减少走动, 禁止在其表面进行机械或车辆作业。施工时正处夏季高温, 浇筑体水化热大, 易因内外温差产生裂缝, 故每层浇筑完成后须覆盖塑料薄膜或无纺土工布进行保湿养护, 浇筑至设计标高后养护时间不应小于 7 d^[6]。

施工结果: 现场浇筑时取料进行室内试验, 28 d 抗压强度满足试验设计要求且重度较小, 约为普通填土的三分之一, 在满足强度的前提下, 能够有效减少路基的附加应力, 进而有效控制路基沉降^[7]。硬化后进行水泥稳定碎石基层施工, 整

体效果良好。现场施工配合比及结果见表 3，图 3 是现场泡沫轻质土的制备、浇筑图片。



(a)



(b)

图3 泡沫轻质土制备及浇筑

Fig. 3 Preparation and pouring of foamed light soil

3.3 水泥固化土

在淤泥质土中配置一定比例的固化剂、石灰、水泥可改变其工程力学性质及强度^[8]。施工前经室内试验，按干土：水泥：石灰=1：4%：8%进行混合掺拌，固化剂的使用量为 500 mL/m³ 进行室内试验，测量最大干密度为 1.72 g/cm³ 和最优含水量为 17%，7 d 无侧限抗压强度可达到 2.92 MPa，具体数据见表 4。通过室内击实试验测得含有水泥的击实曲线见图 4，固化土最优含水率为 17%，最大干密度为 1.72 g/cm³。

施工顺序：原材料准备→基底准备→固化土制备、碾压→检测→养护。

施工工艺：在 10 m×10 m×1 m 基坑内进行基

底处理，清理杂物并碾压密实，分 3 次虚铺，松铺厚度 40 cm，第一层铺筑须表面刮平后再摊铺。为避免固化土成橡皮土，严格控制施工含水率与最佳含水率在-4%~+2%范围内，现场填方土按室内试验配合比进行机械混拌，用挖掘机将拌合晾晒好的固化土倒入事先准备好的自卸车。为保证碾压效率可用推土机推平，低速预压 4~5 遍，振动压路机进行填方压实应遵循紧跟、慢压、高频、低幅的原则，从路外侧向中心碾压，碾轮距填方边缘不小于 500 mm，防止滑坡，边角处应人工或小型夯实机具夯实。每层填土压实后，用承载板法测道基反应模量和环刀法测压实度。水泥固化土压实成型后用塑料布防雨并养生不少于 14 d，养生期封闭交通。

施工结果：水泥固化土换填的结果已满足此次设计要求，道基反应模量 60.89 MN/m³ > 40 MN/m³，压实度均大于 96%，掺入一定量水泥的固化土可显著提高原状土的力学性质，增强土的稳定性^[9]。但是由于现场施工条件限制，没有碎石机械对固化土充分均匀拌合，只能用挖掘机搅拌，由于接连下雨，含水率远大于最优含水率的情况下使水泥与固化剂作用明显抑制，导致强度大大降低，以至于现场的固化土 7 d 无侧限抗压强度无法采集。具体数据见表 5，表中最后 1 行是水泥固化土经 28 d 养护后测得的结果，前 4 行是换填后立即检测的结果。

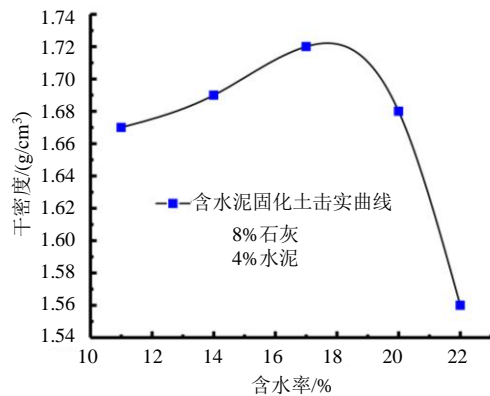


图4 室内击实仪法结果

Fig. 4 Results of laboratory compactor method

表3 现场抗压强度结果

Table 3 Results of on-site compression strength

编号	水/(kg/m ³)	水泥/(kg/m ³)	发泡剂/(kg/m ³)	设计强度/MPa	试验结果	
					压力值/kN	28 d 抗压强度/MPa
1	492.31	320	20.5	1.0	27.16	2.6
2	553.82	360	16.5	1.5	28.28	2.7
3	615.38	400	12.5	2.0	30.08	2.9

表 4 水泥固化土无侧限抗压强度

Table 4 Unconfined compression strength of cement stabilized soil

水泥固化土试块	压力环读数/	无侧限抗压强度值/
	0.01 mm	MPa
试块 1	0.99	2.84
试块 2	1.00	2.86
试块 3	1.06	3.03
试块 4	0.98	2.81
试块 5	1.07	3.06
平均值	1.02	2.92

表 5 水泥固化土不同换填深度下的检测结果

Table 5 Test results of cement-solidified soil at different replacement depths

换填深度/cm	压实度/%	含水率/%	道基反应模量/(MN/m ³)
0	93.4	23.70	28.9
30	95.3	21.70	29.6
60	96.8	19.75	32.0
90	97.5	22.25	40.2
90 (28 d)	97.2	17.95	89.0

表 6 地基处理方案技术对比分析

Table 6 Technical comparative analysis of foundation treatment schemes

方案名称	换填山皮石	泡沫轻质土	水泥固化土
优点	施工速度快, 工艺流程简单, 适用浅层处理, 较小的填筑面积, 处理效果良好	智能化施工, 方便快捷, 无需振捣, 节省工期, 受雨期影响较小, 适用性强, 整体均质处理效果良好	使软土具有一定强度, 整体性、水稳性好, 提高地基承载力
缺点	长距离大量运输, 增加运输费用且资源稀缺, 产生大量废弃土	造价较高, 施工需专业人员	造价较高, 对原材料含水率要求高, 易受雨期影响
工期	工期较短, 检测合格即可后续施工	工期较短, 不少于 7 d 养护且达到设计强度即可后续施工	工期较短, 经 28 d 检测合格即可后续施工
环保	对环境有一定影响, 产生废弃土, 需大量石料	主体为无机材料, 生产不会产生有害物质, 无分解物, 作为环保材料很理想	水泥、石灰对环境污染较大, 施工易起尘起砂
数量	375 m ³	100 m ³	100 m ³
造价	山皮石 50 元/t、80 元/m ³ 人工机械 30 元/m ³ 运输 50 元/m ³ 单价 160 元/m ³ 总价 60 000 元	混凝土搅拌站 100 元/m ³ 轻质土制备 120 元/m ³ 单价 220 元/m ³ 总价 22 000 元	水泥 500 元/t、30.5 元/m ³ 石灰 300 元/t、37.2 元/m ³ 固化剂 30 万/t、500 ml/m ³ 人工机械 30 元/m ³ 单价 247.7 元/m ³ 总价 24 770 元

4 地基处理方案技术经济对比分析

3 种地基处理方案技术经济比较见表 6, 从 3 种地基处理方案试验段完成情况和检测结果来说, 从开始的地基承载力无法满足到可用于飞行区机场道面影响区填筑, 可谓试验成功。

3 种方案的工程造价: 水泥固化土 > 泡沫轻质土 > 换填山皮石; 施工难易程度: 水泥固化土 > 换填山皮石 > 泡沫轻质土; 受外界影响: 水泥固化土 > 泡沫轻质土 > 换填山皮石; 现场效果: 泡沫轻质土 > 换填山皮石 > 水泥固化土。

尽管换填山皮石造价最低, 但是整个三期扩建工程挖出土方约 600 余万吨, 选用此方案将需要 960 万吨的山皮石, 庞大数量增加运输成本, 所以适用于小体积浇筑。水泥固化土造价最高, 对环境产生一定的影响。而对于新工艺、新材料、新技术的泡沫轻质土, 高流动性可方便现场浇筑, 特别适合大体积现场浇筑的工程^[10]。

5 结 论

结合施工现场试验段对 3 种地基处理方案的

工后质量、工期、环保等方面进行比较, 综合考虑得出现浇泡沫轻质土为最优方案, 取得较好的地基处理效果。泡沫轻质土作为机场回填材料施

工,受天气影响较小,没有振捣碾压步骤,施工速度快;固化后可自立,重度可控制在填土重度的三分之一,进而减轻路基重量,减少差异性沉降。

参考文献

- [1] 中国民用航空局. 民用机场岩土工程设计规范: MH/5027—2013[S]. 北京: 中国民航出版社, 2013.
Civil aviation administration of China. Civil Airport Geotechnical Design Specification: MH/5027—2013[S]. Beijing: China Civil Aviation Publishing House, 2013.
- [2] 交通运输部公路科学研究院. 公路土工试验规程: JTG 3430—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
Research institute of highway ministry of transport. Highway Geotechnical Test Regulations: JTG 3430—2020[S]. Beijing: China Communications Press, 2020.
- [3] 吴忠华. 机场跑道垫层的气泡轻质混合土导热性能试验与分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
WU Zhong-hua. Experiment and analysis of thermal conductivity of air bubble lightweight mixed soil for airport runway cushion[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [4] 马云燕. 现浇泡沫轻质土在广明高速公路罗格收费广场应用效果研究[D]. 广州: 广州大学, 2017.
MA Yun-yan. Research on the application effect of cast-in-situ foam light soil in Luoge toll plaza of Guangming expressway[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2017.
- [5] 李剑超. 泡沫轻质土及其在改扩建工程中的应用分析[J]. 城市道桥与防洪, 2021(7): 318-320, 30.
LI Jian-chao. Foam light soil and its application analysis in reconstruction and expansion projects[J]. Urban Roads, Bridges and Flood Control, 2021(7): 318-320, 30.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 气泡混合轻质土填筑工程技术规程: CJJ/T 177—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of housing and urban rural development of the People's Republic of China. Technical Specification for Filling Engineering of Air Bubble Mixed Light Soil: CJJ/T 177—2012[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2012.
- [7] 姜云晖. 泡沫轻质土在加固深厚软土地基中的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
JIANG Yun-hui. Research on the application of foamed light soil in the reinforcement of deep and soft soil[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [8] 文嘉毅. 工业废料固化淤泥质土研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
WEN Jia-yi. Research on silty soil solidified by industrial waste[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [9] 王延宁, 蒋斌松, 胥新伟, 等. 挤密砂桩加固水下软土大型原位载荷试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 1): 320-326.
WANG Yan-ning, JIANG Bin-song, XU Xin-wei, et al. Large-scale in-situ load test study on strengthening underwater soft soil with compacted sand piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1): 320-326.
- [10] 裘友强. 软土地基上泡沫轻质土路基工程特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
QIU You-qiang. Research on engineering characteristics of foam light soil subgrade on soft soil foundation[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.