

改良滨海盐渍土路基填料试验研究与工程应用

巩伟¹, 焦淑贤², 汪日灯¹

(1.中交机场勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230; 2.中交第四航务工程勘察设计院有限公司)

摘要: 针对罗伯茨国际机场盐渍土路基溶陷、盐胀、腐蚀等病害,开展不同石灰、粉煤灰掺量下盐渍土的击实、CBR及无侧限抗压强度试验研究。结果表明:石灰掺量一定时,改良盐渍土的最佳含水率随粉煤灰掺量的增加而升高,最大干密度随粉煤灰掺量的增加而减小;改良盐渍土无龄期下CBR均在31%以上,7d龄期下CBR均高于45%,石灰掺量大于6%时,盐渍土的CBR值不升反降;盐渍土的无侧限抗压强度随龄期不断增长,粉煤灰会抑制盐渍土的早期强度,而提升盐渍土的最终强度;经工程应用验证,采用石灰、粉煤灰改良盐渍土路基切实可行。

关键词: 滨海盐渍土; 路基改良; CBR值; 无侧限抗压强度; 试验研究

1 引言

罗伯茨国际机场路基主要为盐渍土,其工程特性受温度及湿度影响较大,主要表现为难于碾压、强度较低、水稳性差。当温度或湿度变化时,盐渍土易发生盐胀,使土体表层结构破坏和疏松,造成路面溶陷、盐胀、腐蚀等病害。对于机场这种具有特殊使用要求的工程,较小的盐胀或溶陷会导致机场道面形成错台、断板等危害,严重时影响飞机飞行安全,因此,对罗伯茨机场盐渍土地基进行改良具有重要工程意义。

盐渍土是一种具有环境敏感性的特殊土,其工程性质受到广大学者及工程人员的关注,主要集中在3

个方面:①对盐渍土工程性质的影响因素进行分析。钱晓明等通过正交试验研究了压实度、含水率、含盐量及冻融循环次数对硫酸盐渍土强度特性的影响,发现盐渍土的黏聚力受上述因素影响较大,而内摩擦角变化不明显;吴亚平等研究了颗粒级配对粗粒盐渍土溶陷特性的影响,表明级配类型中粗颗粒的占比增大时,粗颗粒的骨架作用会抑制溶陷的发生,溶陷量会随之减小;②利用室内试验及理论分析等手段揭示盐渍土盐胀变形机理。张俊等发现和田地区道面出现鼓胀、错台及断板的主要原因为道面结构层中的某一层发生了盐胀;张沛然等发现盐渍土在自然气候条件下的水—热场变化特征与盐胀变形规律,表明盐渍土可分为起步发展期、稳步发展期、快速发展期及塌陷变形发展

- *****
- [6] 韩雪,杜顺成,樊军.沥青路面矿料级配优化设计研究[J].四川理工学院学报(自然科学版),2017(4).
- [7] 谭积青.粗集料形态与沥青混合料级配组成虚拟力学试验的基础方法研究[D].华南理工大学博士学位论文,2006.
- [8] 周焯.粗集料针片状颗粒含量对沥青混合料性能的影响[J].交通标准化,2011(3).
- [9] JTG E20—2011 公路工程沥青与沥青混合料试验规程[S].
- [10] TG E42—2005 公路工程集料试验规程[S].
- [11] JTG F40—2004 公路沥青路面施工技术规范[S].
- [12] PAVEMENT TECHNOLOGY INC.(PTD).ASPHALT

- PAVEMENT ANALYZER USER,S GUIDE[Z],2011.
- [13] Mohammad L.N.,Elseifi M.A.,Raghavendra A.,et al. Hamburg Wheel—Track Test Equipment Requirements and Improvements to AASHTO T324[R],2015.
- [14] Alossta A.. Evaluation of Warm Mix Asphalt Versus Conventional Hot Mix Asphalt for Field and Laboratory—Compacted Specimens[D]. Arizona State University Master's Dissertation,2011.
- [15] 沈佳,王慧.APA车辙试验方法的研究进展[J].中外公路,2016(2).
- [16] 林有贵,杜荣耀,等.基于芯样的汉堡车辙试验广西地区沥青混合料抗车辙标准研究[R],2019.

收稿日期:2019-06-27(修改稿)

作者简介:巩伟,男,硕士,助理工程师. E-mail: 2543991632@qq.com

期 4 个阶段;吕擎峰等采用核磁共振技术对固化盐渍土的微观结构特征进行检测,表明颗粒间的胶结情况对固化效果的影响远大于孔隙特征;③ 基于盐渍土盐胀变形机理,提出改良盐渍土工程特性的措施。周琦等对滨海盐渍土进行改良试验研究发现滨海盐渍土经石灰、水泥和 SH 综合固化处理后,其强度和水稳性能达到规范要求;张莎莎等分析了火山灰对盐渍土路基填料的作用机理,发现石灰或石灰+火山灰改良剂可显著减少砾砂类硫酸盐渍土的盐胀量,并降低盐胀敏感温度区间。上述研究虽在完善盐渍土溶陷、盐胀机理、促进盐渍土路堤路基技术等方面均取得了较为丰硕的成果,但关于道面平整度要求严格的机场盐渍土路基方面的研究鲜见报导,且较少关于盐渍土地基改良的工程案例研究。

鉴于此,该文开展不同石灰、粉煤灰掺量下盐渍土的击实、CBR 及无侧限抗压强度试验研究,对比分析滨海盐渍土机场路基的改良方案,基于效益—费用比优选最佳石灰、粉煤灰掺量,并对改良盐渍土路基含盐量、压实度等改良效果进行检测,以期为类似盐渍土路基改良提供理论及实践参考。

2 试验设计

2.1 试验方案

采用罗伯茨国际机场盐渍土作为试验的原材料,研究石灰、粉煤灰对盐渍土工程特性的改良效果,试验方案见表 1。为降低试验误差,各组试验做 3 组平行试验,试验结果取 3 组试验的平均值。

表 1 试验方案

编号	石灰掺量/%	粉煤灰掺量/%	编号	石灰掺量/%	粉煤灰掺量/%
A1	3	3	C1	8	8
A2	3	6	C2	8	16
A3	3	9	C3	8	24
B1	6	6	D1	10	10
B2	6	12	D2	10	20
B3	6	24	D3	10	30

注:石灰及粉煤灰含量为石灰及粉煤灰占盐渍土试样的质量百分比。

2.2 试验方法

(1) 重型击实试验

试样采用干法制备,将风干土样放在橡皮板上碾散后过 5 mm 筛,按照试验方案拌和特定质量的石灰

与粉煤灰,按预估最优含水率制备一组含水率相差约 2% 的试样,装入塑料袋中静置 24 h 以上,然后采用重型击实标准分 3 层进行击实,测定最大干密度和最优含水率,并为其其他工程特性试验做准备。

(2) CBR 试验

采用路面材料强度仪测试改良盐渍土的 CBR 值,采用击实试验制成最优含水率的试样。试样浸水 24 h 后测其膨胀量,再将泡水后的试样在特定荷载下进行贯入试验,转动手轮使贯入杆以 1.25 mm/min 的速度压样,测记百分表读数。

(3) 无侧限抗压强度试验

采用应变控制式无侧限抗压强度仪开展改良盐渍土的无侧限抗压强度试验,通过数显式压力试验机分 3 层制作直径 40 mm,高 100 mm 的无侧限抗压强度试样。试验过程中,以轴向应变 0.1 mm/min 的转速转动手轮,记录百分表读数,当百分表达达到峰值或读数稳定时,继续试验一直到 5% 应变值后停止试验,控制试验时间在 20 min 内。

3 试验结果与分析

3.1 最佳含水率与最大干密度

表 2 为石灰、粉煤灰改良盐渍土的最佳含水率与最大干密度。

表 2 改良盐渍土击实结果

编号	最佳含水量/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	编号	最佳含水量/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)
A1	17.4	1.75	C1	17.1	1.71
A2	18.0	1.73	C2	19.2	1.62
A3	18.2	1.71	C3	19.6	1.59
B1	17.5	1.71	D1	18.7	1.68
B2	18.0	1.68	D2	18.9	1.60
B3	18.4	1.63	D3	19.4	1.53

由表 2 可知:不同石灰、粉煤灰掺量下,改良盐渍土的最佳含水率变化范围为 17.1%~19.6%,最大干密度变化范围为 1.53~1.75 g/cm³;石灰掺量一定时,改良盐渍土的最佳含水率随粉煤灰掺量的增加而升高,最大干密度随粉煤灰掺量的增加而减小;粉煤灰掺量一定时,石灰掺量越高,改良盐渍土的最佳含水率越低,最大干密度越小。

3.2 CBR 值

CBR 值反映路基抗局部剪力的性能,是衡量路基

填料强度的重要指标。经石灰及粉煤灰改良后的盐渍土 CBR 值见表 3。

表 3 改良盐渍土 CBR 试验结果

编号	CBR 值/%	
	无龄期	7 d 龄期
A1	40.311	48.233
A2	35.719	46.182
A3	31.380	45.339
B1	42.162	65.261
B2	40.181	63.522
B3	40.114	61.321
C1	40.548	62.580
C2	38.269	60.331
C3	35.721	60.122
D1	41.050	61.251
D2	37.952	59.481
D3	36.821	56.541

由表 3 可知:各组方案盐渍土无龄期下 CBR 值均在 31%以上,7 d 龄期下 CBR 值均高于 45%;石灰掺量一定时,无龄期及 7 d 龄期的土体 CBR 值均与粉煤灰掺量呈负相关关系,粉煤灰掺量越高,CBR 值越小;不同方案下改良盐渍土 7 d 龄期 CBR 值均比无龄期 CBR 值高出 10%,其中石灰掺量与粉煤灰掺量均为 6%的方案下,7 d 龄期 CBR 值达到最大,无龄期 CBR 值为 42.16%,7 d 龄期下 CBR 值为 62.26%;石灰掺量由 3%增加至 6%时,盐渍土的 7 d 龄期 CBR 值增长幅度大于 15%,而石灰掺量再增加时,盐渍土的 CBR 值不升反降。

3.3 无侧限抗压强度

无侧限抗压强度指土在无侧限条件下抵抗轴向压力的极限强度,可作为评价改良盐渍土强度特性的指标,能够快速地反映其抵抗破坏的能力和特性。经过 7、28、90 及 180 d 的养护后分别对其进行无侧限抗压强度试验,结果见表 4。

由表 4 可知:盐渍土无侧限抗压强度随龄期不断增长;石灰掺量越高,盐渍土无侧限抗压强度越大;石灰掺量一定时,早期强度随粉煤灰掺量的增加而降低,最终的强度随粉煤灰掺量的增加而升高,表明粉煤灰可抑制盐渍土的早期强度,而提升盐渍土的最终强度。其原因为粉煤灰虽具有活性,但本身并不具水硬性,与水拌和后亦无法产生一定的强度,但随着养护龄期的增加,随着粉煤灰的增加,盐渍土强度明显增大。

表 4 改良盐渍土无侧限抗压强度试验结果

石灰参 量/%	编号	不同龄期(d)无侧限饱水抗压强度/MPa			
		7	28	90	180
3	A1	0.950	1.210	1.570	2.234
3	A2	0.940	1.180	1.689	2.358
3	A3	0.850	1.000	1.823	2.456
6	B1	1.030	1.628	2.205	2.925
6	B2	1.009	1.596	2.312	3.159
6	B3	0.900	1.457	2.458	3.342
8	C1	1.060	1.690	2.360	3.214
8	C2	1.020	1.620	2.408	3.386
8	C3	0.990	1.579	2.524	3.521
10	D1	1.340	1.720	2.870	3.458
10	D2	1.240	1.960	3.269	3.832
10	D3	1.120	2.370	3.746	4.206

4 工程应用

4.1 工程概况

罗伯茨国际机场是利比里亚共和国最主要的国际机场,位于该国首都,是西非最大机场之一。但在内战期间,机场受到严重破坏。目前设施陈旧,规划混乱,跑道、滑行道破损严重,严重影响飞机的起降安全,亟需对机场进行升级改造。利比里亚罗伯茨国际机场改扩建项目的实施将会大大改善机场安全通航条件。

罗伯茨国际机场现有 04/22 号沥青跑道长 3 353 m、宽 45 m,两侧设有 7.5 m 宽的道肩,飞行区等级为 4E。连接跑道和机坪的滑行道系统包括 4 条联络滑行道。此次机场修复工程主要包括原有跑道道面修复,新建联络道及跑道 04 端掉头坪工程,道面均采用沥青混凝土结构。经过现场勘察,项目所处场地土大部分为盐渍土。

4.2 盐渍土地基改良方案分析

关于盐渍土地基处理的方法有很多种,例如换土法、化学处理法、强夯法、土工聚合物加筋法、碎石桩法等,归纳各方法的适用性和局限性见表 5。

根据现场场地情况及对原有道面利用程度,该工程拟采用换土法和固化剂法两种方案。为保证工程质量,同时降低成本,经过技术经济比选后确定,对于机场跑道滑行道出现严重损毁的部分进行路面全部挖除,挖除部分回填碎石基础,然后对路面重新铺装。对

表 5 盐渍土地基改良方法比较

改良方法	优点	缺点	利比里亚机场适用情况
换土法	根本上消除病害隐患	施工慢,造价高	现场面积大,换填土方多,施工作业面大,成本高
化学方法	土体中掺入化学药品,将易溶盐转化为难溶盐,消除土体膨胀	成本和安全不可控,对环境有影响	主要针对厚度大的硫酸盐渍土,局限性比较大,处理效果不可控制
固化剂法	技术成熟,可就地解决病害	依赖项目所在地是否存在固化剂,并且缺乏不同固化剂对不同土质的固化效果研究	利比里亚国严重缺乏水泥,进口水泥价格昂贵;但项目地石料充足便宜,可利用设备生产石灰和粉煤灰
增加地基高度	整体提高地基高度,降低盐渍土病害对地基的危害	治标不治本,增加成本	不符合实际情况,新建部分高程应以现有机场道面标高为准
土工布及隔膜隔断层	整体强度增强,削弱基础不均匀沉降	对隔断层要求较高	主要针对硫酸盐渍土,局限性比较大
强夯法	设备简单、工艺方便、加固效果好,使用经济	强夯对地面有强大冲击,对周围构筑物有一定影响,振动噪音较大	项目多为修复项目,与原有道面距离较近,采用强夯法将对原有构筑物造成影响

于新建跑道滑行道部分基础,由于面积较大,统一采用石灰粉煤灰对盐渍土地基进行改良。

4.3 效益—费用比分析

改良盐渍土的强度反映的是土体抵抗外荷载的能力,而无侧限抗压强度可准确地反映强度特性,故可采用无侧限抗压强度作为盐渍土路基改良效益的评价指标。此外,改良盐渍土是一个过程,不宜采用初期强度,而龄期比较长的强度又和现代交通建设采用的更快的开放交通相违背。综合考虑,采用改良盐渍土 28 d 的无侧限抗压强度作为评价指标,见表 6。

表 6 不同方案下改良盐渍土 28 d 无侧限抗压强度

方案	无侧限抗压强度/MPa	方案	无侧限抗压强度/MPa
A1	1.210	C1	1.690
A2	1.180	C2	1.620
A3	1.000	C3	1.579
B1	1.628	D1	1.720
B2	1.596	D2	1.960
B3	1.457	D3	2.370

由表 6 可知:石灰掺量为 3%、粉煤灰掺量为 9% 时,改良盐渍土 28 d 的无侧限抗压强度最低(1 MPa);石灰掺量为 10%、粉煤灰掺量为 30% 时,改良盐渍土 28 d 的无侧限抗压强度最高(2.37 MPa)。

为了简化计算,仅考虑材料费用。根据调查,石灰价格约 60 元/t,粉煤灰 25 元/t。现计算 10 000 t 土方的费用。以石灰掺量 3%,粉煤灰掺量 3% 为例,

10 000 t 土方需要石灰 300 t,粉煤灰 300 t,费用为 2.55 万元。按照此方法依次计算费用见表 7。由表 7 可知:不同方案的费用随石灰及粉煤灰掺量的增加逐渐提高,石灰掺量 3%,粉煤灰掺量 3% 时,费用最低为 2.55 万元;石灰掺量 10%,粉煤灰掺量 30% 时,费用最高为 13.50 万元。

为综合考虑效益及费用要求,定义效益—费用比(η)作为综合评价指标。效益—费用比按式(1)计算:

$$\eta=\sigma/C \tag{1}$$

式中: η 为效益—费用比; σ 为 28 d 的无侧限抗压强度; C 为材料费用。

表 7 不同方案费用

方案	费用/万元	方案	费用/万元
A1	2.55	C1	6.80
A2	3.30	C2	8.80
A3	4.05	C3	10.80
B1	5.10	D1	8.50
B2	6.60	D2	11.00
B3	8.10	D3	13.50

效益—费用比计算结果见表 8。由表 8 可知:方案 A1、A2、B1 的效益费用比为 0.3 以上,其余均小于 0.3。综合考虑改良盐渍土无侧限抗压强度、CBR 值及经济性,同时利用盐渍土改良后填筑地基,可以很大程度地减少淤泥弃运及土方运输过程中对道路环境的影响,以及取土及弃土对生态环境的影响,具有一定的社会环境效益。综上所述该项目最终选择方案 B1(石

灰掺量为 6%、粉煤灰掺量为 6%)作为改良盐渍土的最佳方案。

表 8 不同方案效益—费用比

方案	效益—费用比	方案	效益—费用比
A1	0.47	C1	0.25
A2	0.36	C2	0.18
A3	0.25	C3	0.15
B1	0.32	D1	0.20
B2	0.24	D2	0.18
B3	0.18	D3	0.18

4.4 效果评价

(1) 含盐量检测

在项目施工过程中,加强对盐渍土及固化剂均匀性的检测,对于道床以下的盐渍土,采取每 1 000 m³ 随机抽查 1 组;对于道床以上的每 500 m³ 随机抽查 1 组,每组采用 3 个土样进行分析。对于检测过程中发现改良未达标或者改良不均匀的盐渍土,须进行重新处理,以保证道床部分盐渍土分布均匀。

(2) 压实度检查

盐渍土改良地基的压实情况是施工过程中非常重要的一个环节。影响压实度的主要因素包括:填料的粒径、含水率、每层的压实厚度、压实机具、压实遍数等。在施工过程中,碾压采用 20 t 龙工 QX520 振动碾,激振力为 351/200 kN,振动碾的行驶速度控制在 1.5~2.0 km/h,碾压遍数为 4、6、8 遍。经过现场检测,压实度均大于 98%,满足规范要求。

(3) 改良效果检验

经过对已经完工部位的跑道、滑行道道肩及场区道路连续观测,在飞机或者车辆的频繁作用下,道面基础没有出现鼓胀开裂、塌陷变形;道肩道面未出现松散剥蚀;飞行场区未出现翻浆等病害。

5 结论

为改良滨海盐渍土机场路基填料工程特性,进行不同石灰、粉煤灰掺量下盐渍土的击实、CBR 值及无侧限抗压强度试验,并分析滨海盐渍土机场路基的改良效果,得到以下结论:

(1) 石灰掺量一定时,改良盐渍土的最佳含水率随粉煤灰掺量的增加而升高,最大干密度随粉煤灰掺

量的增加而减小。

(2) 改良盐渍土无龄期下 CBR 值均在 31%以上,7 d 龄期下 CBR 值均高于 45%,石灰掺量大于 6%时,盐渍土的 CBR 值不升反降。

(3) 盐渍土的无侧限抗压强度随龄期不断增长,粉煤灰会抑制盐渍土的早期强度,而提升盐渍土的最终强度。

(4) 综合考虑社会环境、地质情况、施工难易性及经济要求等因素,确定采用固化剂法对盐渍土进行改良。通过 CBR 试验、无侧限抗压强度试验及经济效益分析,确定石灰、粉煤灰最优配比。经工程应用验证,采用石灰、粉煤灰改良盐渍土路基切实可行,研究成果可为滨海盐渍土路基改良提供理论指导。

参考文献:

- [1] 平树江,申爱琴,耿恩朋.滨海地区加固盐渍土的路用性能[J].中外公路,2008(3).
- [2] 王生俊.滨海地区盐渍土用作路基填料试验研究[J].公路交通科技,2006(7).
- [3] 钱晓明,张卫兵,郑子昂,等.冻融条件下硫酸盐渍土强度特性试验研究[J].中外公路,2018(1).
- [4] 吴亚平,梁浩,魏明强,等.级配对粗颗粒硫酸盐渍土溶陷特性的影响[J].铁道工程学报,2019(1).
- [5] 张俊,翁兴中,刘军忠,等.和田地区道面损坏机理与盐渍土工程特性研究[J].中外公路,2014(5).
- [6] 张沛然,黄雪峰,杨校辉,等.盐渍土水—热耦合效应与盐胀变形试验[J].岩土力学,2018(5).
- [7] 吕擎峰,周刚,王生新,等.固化盐渍土核磁共振微观特征[J].岩土力学,2019(1).
- [8] 周琦,韩文峰,邓安,等.滨海盐渍土作公路路基填料试验研究[J].岩土工程学报,2006(9).
- [9] 张莎莎,谢山杰,杨晓华,等.火山灰改良粗粒硫酸盐渍土路基填料及其作用机理研究[J].岩土工程学报,2019(3).
- [10] 李秉宜,宣剑裕,郑文斌,等.改良高液限黏土水稳性试验研究[J].四川大学学报(工程科学版),2016(4).
- [11] 李敏,王宸,杜红普,等.石灰粉煤灰联合固化石油污染滨海盐渍土的力学特性[J].岩石力学与工程学报,2017(S1).
- [12] 宋爱苹,张亚飞,等.冻融条件下水泥土及掺粉煤灰水泥土的强度特性[J].中外公路,2017(4).
- [13] 文桃,曹亚鹏,应赛,等.多次冻融循环下硫酸盐渍土盐—冻胀特性试验研究[J].中外公路,2018(2).
- [14] 韩信,等.海外总承包项目设计合同及取费探讨[J].中外公路,2018(5).