

广州国际机场浅层淤泥质土地基强夯试验研究*

杨国荣, 刘海迅, 秦汉昌

(中国民航机场建设集团公司, 北京 100101)

摘要:广州新白云国际机场拟建三跑道, 等级为4F。三跑道北段地基内存在浅层淤泥质土, 需要经过处理, 才能满足跑道的要求。地基处理设计前, 根据地质条件、工程特点与工期要求, 选择结构填石强夯法进行地基处理试验。通过观测及检测成果分析, 表明结构填石强夯适合浅层淤泥质土地基处理, 经处理后的地基能满足跑道的要求, 而且工期短、造价低。该试验为三跑道北段地基处理设计与施工提供了可靠的依据、参数和经验, 为在高饱和度的软塑~流塑状态的粘性土地上建设对变形控制要求严格的大面积工程, 进行了有效的探索。

关键词: 浅层淤泥质土; 结构填石强夯; 观测; 夯沉量; 标贯

中图分类号: TU431 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2010)增2-1619-06

Test Study of Dynamic Compaction in Shallow Muddy Soil at Guangzhou International Airport

Yang Guorong, Liu Haixun, Qin Hanchang

(China Airport Construction Corporation of CAAC, Beijing 100101, China)

Abstract: There was a 3rd runway of grade 4F planned to be built for the New Baiyun International Airport in Guangzhou. There was a shallow muddy soil in the foundation needed for treatment to satisfy the requirements to runway. Before the design of soil treatment, the structural stonefill dynamic compaction had been chosen for test based on the geological conditions, engineering features and construction time requirements of the northern part of the 3rd Runway. By observation and analyzing detection results of the shallow muddy soil after dynamic compaction, it had been found that the structural stonefill dynamic compaction was suitable to shallow muddy soil treatment, the shallow muddy soil after dynamic compaction could satisfy the requirements of airport runway, so as to shorten construction period with low cost. The test provided reliable bases, parameters and experience to the design and construction of soil treatment for the northern part of the 3rd Runway. The test was an effectively exploratory research of soil treatment to high saturation of flexible plastic ~ current-state of clay in building large area project in which deformation is controlled strictly.

Keywords: shallow muddy soil; structural stonefill dynamic compaction; observation; dynamic compaction settlement; standard penetration test(SPT)

1 引言

广州新白云国际机场拟在现有东跑道以东380 m处建设三跑道, 等级为4F, 设计采用水泥混

凝土道面。根据建设计划, 2006—2007年先建设三跑道北段(包括防吹坪), 长度为703.5 m、宽度75 m。

三跑道北段原地面大部分较为低洼, 鱼塘密

* 收稿日期: 2010-06-03 (修改稿)

作者简介: 杨国荣(1964-), 男, 浙江义乌人, 硕士, 高级工程师, 主要从事机场岩土工程的设计、咨询、试验工作。

E-mail: yangguorongbc@sina.com

布,接近塘底的地层内有淤泥质土、淤泥层(简称“浅层淤泥质土”),属于高饱和度的软塑~流塑状态的粘性土,高含水量、高孔隙比、高压缩性、承载力低,不利于土方填筑与道面结构层施工;工后道面沉降与不均匀沉降明显,不利于飞机安全运行。

机场跑道安全要求高、对地基沉降、不均匀沉降要求严格,而且该施工期短,因此,选择合适的地基处理方法及参数,基本消除浅层淤泥质土的沉降,不均匀沉降控制在允许范围内,满足工后沉降要求,就成为能否在规定时间内达到三跑道北段建设目的的关键。

根据地质条件、工程要求,经过沉降计算,选择若干可能采用的地基处理方法进行工程、技术、经济对比分析,选定工期最短、造价较低的“结构填石强夯法”进行试验。

2 三跑道北段地质条件与工程特点与要求

2.1 工程地质条件

2.1.1 地形地貌

三跑道北段的中南部(长约500 m),原有地形皆为鱼塘,水面约占95%,塘底标高7~12 m,塘深度2~5 m,水深1.5~3 m,塘河埂高程约10.50~12.50 m;北部(长约200 m)为稻田、道路,地面高程11.50~12.80 m。

2.1.2 地层

①填土层(Qml):主要成分为耕植土、杂填土,灰黑色、土黄色,由粘性土、砂粒堆积而成,欠固结。分布于北部,范围较小。

②淤泥(Q^{al}):分布于塘底部,淤泥厚度0.3~0.7 m(大部分0.5~0.6 m),灰黑色,流塑状。

③粘土、中细砂(Q^{cl}):粘土,从三跑道北段南端向北延伸,长度约400 m,厚度0.5~2.5 m;中细砂,位于粘土以北,沿跑道方向长度约135 m,厚度0.2~1.80 m。

④淤泥质粉质粘土(Qal):主要为淤泥质土,局部为淤泥(简称“浅层淤泥质土”),厚度0.4~9.8 m(平均3.93 m),黑色、灰白色,呈饱和状态,富含腐植质。

淤泥质土,软塑状, $w = 34.0 \sim 50.6\%$ (平均43.6%), $e = 1.141 \sim 1.450$ (平均1.274)。

淤泥,流塑状, $w = 55.6 \sim 104.9\%$ (平均74.5%), $e = 1.501 \sim 2.928$ (平均2.150)。

标贯击数1~3击。浅层淤泥质土体积128 310 m³。

⑤砂层(Q^{sl}):中砂、细砂为主,夹有砾砂、粗砂、粉土,及粉质粘土透镜体。灰白、棕褐等色,松散状,局部稍密~中密,饱和,分选性差。该层层位稳定,厚度变化较大3.60~12.30 m(平均厚3.44 m)。平均 $w = 8.3\%$ 。标贯击数3.8~19.6击(平均10.8击)。

⑥粉质粘土层(Q^{cl+dl}):以粉质粘土为主,局部相变为粘土,夹有碎石、卵石及岩块。紫红色,可塑~硬塑状。该层不稳定,平均层厚5.06 m。平均 $w = 34.7\%$,平均 $\rho = 1.8 \text{ g/cm}^3$,平均 $e = 0.961$,平均 $a_{1-2} = 0.56 \text{ MPa}^{-1}$,平均 $c = 31.3 \text{ kPa}$,平均 $\phi = 10.0^\circ$,平均 $I_L = 0.69$,属高压缩性土。标贯击数8.4~22.3击(平均15.6击)。

该层常发育土洞,多属全充填及半充填型,少数无充填型,充填物为软塑~流塑的粘土夹砂,局部有砾石、岩块,洞高0.50~10.50 m。

⑦基岩(C):为下石炭统大塘阶石磴子段(C_{1ds})灰岩,裂隙、溶洞发育。洞高0.60~9.40 m,有全充填、无充填和半充填3种状态,充填物为软塑~流塑的粘土夹砂,局部含砾石、岩块。

2.1.3 水文地质条件

地下水主要为第四系孔隙承压水及深部基岩裂隙水。耕植土、素填土、粉质粘土、淤泥质土为相对弱透水层及相对隔水层,砂层为透水层及主要储水层,水量较丰富,分布较普遍。裂隙水及岩溶水较丰富。静止水位埋深0.10~5.50 m,补给排泄与降水及邻近地下水有关。

2.2 跑道对地基的要求与工期安排

2.2.1 跑道对地基的要求

F类飞机荷载主要影响深度为7 m;规范^[2]要求道面结构层下土基压实度(按深度)分别为0.98(0~1 m),0.95(1~5 m),0.93(5 m以下),并要求均匀、密实、稳定;国际民用航空组织要求土基强度类型为“中强度”(顶面反应模量60~120 MN/m³)^[3]。民航要求4E级以上机场飞行区道面工后残余沉降量不超过5 cm,任意相邻两点间的相对沉降差不超过1.5‰。

2.2.2 工期安排

2006年11月底至2007年1月底,地基处理方案讨论、试验研究、设计、施工。

2007年2月1日到15日,土方填筑施工。^[2]

月 16 日至 4 月底,观测土基沉降。

2007 年 5 月开始道面结构层施工(土洞溶洞另行设计处理)。

2.3 道面结构层、土方设计概况

三跑道道面设计高程为 13.07 ~ 14.32 m。面层厚度 42 cm,上下基层皆为 20 cm 厚的水泥稳定碎石。填土方(包括塘内)厚度 4 ~ 7 m。

2.4 存在的地基问题

(1) 拟建三跑道北段内的塘水及底部的淤泥,需要排除、清除。

(2) 浅层淤泥质土,分布范围广、厚度不均、埋深变化较大(顶面埋深 0.2 ~ 3 m,底面埋深 0.5 ~ 13 m),在填土方、道面结构层荷载下易于发生沉降与不均匀沉降。按规范法,计算若干代表性钻孔处的最终固结沉降量为 5.7 ~ 30.9 cm,固结时间 1 ~ 5 年。

(3) 若清除浅层淤泥质土,可以消除沉降与不均匀沉降,但其工程量大(包括上覆的③粘土、中细砂,大于 150 000 m³),而且地下水水位高,造价高,施工难度大,工期不允许。

3 地基处理方法比选

3.1 地基处理方法对比

在地基处理设计前,针对存在的地基问题,选择可能采用的“结构填土石强夯”(先铺第一层块石、厚度 1.0 m,后铺第二层碎石、厚度 0.8 m,再铺第三层土、厚度 1 m;考虑强夯引起地下水易于溢出块碎石层,浸泡填土层,因此取消填土层,块石层厚改为 1 ~ 1.5 m,碎石层厚改为 1.5 m)、“堆载预压”、“碎石桩”三种方法进行讨论,并进行工程、技术、经济、工期对比分析,见表 1。

表 1 地基处理方法对比

Table 1 Contrast of soil treatment ways

| 项目 方法 | 质量效果 | 施工可操作性 | 单价(包括土方) | 工期 |
|------------|---------------------|------------------|--|--------|
| 结构填石 强夯 | 有可能基本消除沉降,但机场上无成功经验 | 施工程序简单、难度大、制约因素少 | 约 210 元/m ² (1 500 kN·m) 约 255 元/m ² (2 000 kN·m) | 2 个月以内 |
| 堆载(超载)预压 | 能消除沉降 | 施工程序简单、难度大、制约因素少 | 单价约 200 元/m ² | 5 年 |
| 碎石桩 | 桩体内能消除沉降,桩体外不能消除沉降 | 塘底较深,施工难度极大 | 单价 600 ~ 800 元/m ² | 6 个月以上 |

(备注:强夯区内填石厚度比其他区大 0.5 ~ 1 m)

3.2 强夯加固地基的原理与处理淤泥质土的现状 及存在的难点

从 1969 年法国 Menard 公司发明强夯以来,得到广泛的应用,其原理是利用夯锤(10 ~ 40 吨)从 10 ~ 40 m 高度落下,给地基以强大的冲击能,动力加固、挤密、排水、固结;其有效加固深度按以下公式计算: $D = \alpha \sqrt{M * h} / 10$, 其中: D 为有效加固深度(m), M 为锤重(kN), h 为落距(m), α 为系数,根据不同的土质取值 0.34 ~ 0.8。非饱和土处理效果显著,应用广泛。

对于变形控制要求不严的工程,可强夯置换法处理高饱和度的软塑 ~ 流塑状态的粘性土地基。但对于对地基变形(沉降与不均匀沉降)要求严格

的机场 4F 跑道(并且工期短)工程,目前,尚无成功先例,也无经验可供借鉴。

3.3 考虑采用结构填石强夯的原因

虽然存在困难,但是考虑到③粘土、中细砂(Q^{nl})上抛填一定厚度的块碎石层后适合强夯;强夯对浅层淤泥质土及⑤砂层(Q^{nl})具有强大的冲击、挤压作用,可使浅层淤泥质土部分挤入块碎石层及砂层,并达到块碎石层与浅层淤泥质土的“整体下沉”;夯后块碎石层推平后,易于填土与密实度控制,达到土基均匀、稳定;在块碎石层、填土层的荷载作用下,加速浅层淤泥质土的排水、固结;在道面结构层施工前,能基本消除沉降,满足不均匀沉降要求。

4 地基处理试验方案

4.1 试验目的

为三跑道北段地基处理设计、施工、观测取得依据、参数、经验,根据规范^[1]要求,进行地基处理试验。

4.2 试验范围及其地质条件

选择浅层淤泥质土分布、厚度有代表性的地段(A1区、A2区)进行试验。

A1区:A3616~3642.5, B6675~6702.5; 地层:③粘土厚度1~2m, ④浅层淤泥质土厚度5~9m(计算沉降量18.9~27.2cm), ⑤砂层。A2区:A3630~3642, B6628~6653; 地层:③粘土厚度

1.5~2.7m, ④浅层淤泥质土厚度3~4m(计算沉降量12.1~16.5cm), ⑤砂层。

4.3 试验方案及参数:

(1)清除塘底淤泥,疏干基底;

(2)A1区:先抛填块石,粒径约0.5m,厚度1~1.8m;再填块碎石,粒径小于0.4m,厚约1.6m;A2区:先抛填块石,粒径约0.5m,厚度0.8~1.3m;再填块碎石,粒径小于0.4m,厚约1.2m。

(3)强夯设计参数,见表2,并要求:锤底静压力25~40kPa;第一遍点夯、推平后即可进行第二遍点夯。

表2 强夯设计参数

Table 2 Design parameters of dynamic compaction

| 分区 | 夯型 | 单击夯能(kN·m) | 夯点布置 | 夯点间距 | 夯击遍数 | 夯击方式 | 单点击数 |
|----|----|------------|------|--------|------------|-------|------|
| A1 | 点夯 | 2 000 | 正方形 | 3.5 m | 第一遍 第二遍 | 隔点不隔行 | 6~10 |
| | 满夯 | 600 | 搭接型 | 1/3 锤径 | 一遍 | | 3~5 |
| A2 | 点夯 | 1 500 | 正方形 | 3.0 m | 第一遍 第二遍 | 隔点不隔行 | 5~8 |
| | 满夯 | 500 | 搭接型 | 1/3 锤径 | 一遍 | | 3~5 |

(4)达到击数要求(若点夯单击下沉量>35cm,夯坑内填石续夯)。

(5)收敛标准:点夯最后两击平均下沉量≤7cm。满夯最后两击平均下沉量≤5cm。

(6)每遍点夯、满夯后皆推平,A1区、A2区分别按7×7m、10×10m方格网测量推平高程。

4.4 试验检测指标:

(1)强夯后块碎石层,干密度≥2.2g/m³,固体体积率≥83%。

(2)强夯后的浅层淤泥质土,标贯≥6击,静探

锥尖阻力当量值≥2MPa。

5 试验施工、观测与检测结果分析、土基与道面沉降情况

5.1 试验施工

2006年11月30日开始填石,12月2日进行强夯,3日完成;未出现异常情况,场地适合强夯。

5.2 观测与效果分析

强夯过程中,观测了点夯、满夯每个夯点每次夯击的夯坑下沉量。代表性点夯观测数据见表3。

表3 代表性点夯夯坑下沉量

Table 3 Settlement of ground by representative rums

| 区号及夯点号 | 下沉量(cm) | 击数 | | | | | | |
|--------|---------|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| A1区 | 单击下沉量 | 33 | 31 | 23 | 18 | 17 | 9 | 5 |
| 18号夯点 | 累计下沉量 | 33 | 64 | 87 | 105 | 122 | 131 | 136 |
| A2区 | 单击下沉量 | 27 | 25 | 19 | 16 | 11 | 8 | 3 |
| 41号夯点 | 累计下沉量 | 27 | 52 | 71 | 87 | 98 | 106 | 109 |

可见 2 000 kN·m、1 500 kN·m 点夯至 7 击 每遍点夯后、满夯后,皆推平、测量地面高程,时,已收敛。夯坑深度与收敛情况比较理想。 并计算点夯后地面下沉量,见表 4、表 5。

表 4 A1 区点夯后地面下沉量

Table 4 Ground settlement caused by point rums at the area A1

| 测量点号 | 坐标 | | 填石 总厚度(m) | 点夯后地面下沉量(m) | | |
|--------|-------|-------|--------------|-------------|--------|-------|
| | A | B | | 第一遍点夯后 | 第二遍点夯后 | 合计 |
| 1 | 3 635 | 6 685 | 2.97 | 0.231 | 0.278 | 0.509 |
| 2 | 3 628 | 6 685 | 2.93 | 0.201 | 0.299 | 0.500 |
| 3 | 3 635 | 6 692 | 3.20 | 0.209 | 0.257 | 0.466 |
| 4 | 3 628 | 6 692 | 2.95 | 0.246 | 0.278 | 0.524 |
| 5 | 3 635 | 6 699 | 3.17 | 0.218 | 0.247 | 0.465 |
| 6 | 3 628 | 6 699 | 2.81 | 0.251 | 0.291 | 0.542 |
| 平均值(m) | | | 3.01 | 0.226 | 0.275 | 0.501 |

表 5 A2 区点夯后地面下沉量

Table 5 Ground caused by point rums at the area A2

| 测量点号 | 坐标 | | 填石 总厚度(m) | 点夯后地面下沉量(m) | | |
|--------|-------|-------|--------------|-------------|--------|-------|
| | A | B | | 第一遍点夯后 | 第二遍点夯后 | 合计 |
| 1 | 3 630 | 6 650 | 2.57 | 0.229 | 0.199 | 0.428 |
| 2 | 3 640 | 6 650 | 2.42 | 0.234 | 0.198 | 0.432 |
| 3 | 3 640 | 6 630 | 2.40 | 0.237 | 0.186 | 0.423 |
| 4 | 3 630 | 6 630 | 2.05 | 0.249 | 0.338 | 0.587 |
| 5 | 3 640 | 6 640 | 2.19 | 0.261 | 0.191 | 0.452 |
| 6 | 3 630 | 6 640 | 2.24 | 0.263 | 0.298 | 0.561 |
| 平均值(m) | | | 2.31 | 0.246 | 0.235 | 0.481 |

A1 区、A2 区满夯引起的地面下沉量平均值分别为 5.3 cm、4.7 cm。

可见通过强夯,填石层、浅层淤泥质土的夯沉量基本上达到 50 cm 以上,效果明显。

5.3 检测与效果分析

(1)强夯后块碎石层总体厚度 A1 区 2.0 ~ 2.5 m, A2 区 1.5 ~ 2.0 m,均匀性、整体性好;干密度皆大于 2.2 g/m³、固体体积率皆大于 83%。

(2)强夯后,2007 年 1 月试验区原浅层淤泥质土的标贯、静探检测结果如下:①标贯:A1 区(检测点 A3624/B6694,浅层淤泥质土位于填石层下 0 ~ 2.25 m 深度):N = 6 击(填石层下深度 0.95 ~ 1.25 m,下同)、8 击(1.95 ~ 2.25 m);A2 区(检测点 A3630/B6660,浅层淤泥质土位于填石层下 0 ~ 2.80 m 深度):N = 6 击(0.95 ~ 1.25 m)、7 击

(1.95 ~ 2.25 m)。②静探:A1 区(检测点 A3631/B6691,浅层淤泥质土位于填石层下 0 ~ 2.20 m 深度):锥尖阻力 $Q_c = 3.00 \sim 3.40$ MPa(平均 3.24 MPa)、侧壁摩阻力 $f_s = 120 \sim 170$ kPa(平均 152.56 kPa);A2 区附近(A2 区内未做检测,现取其东侧点 A3631/B6691 检测结果。该点与 A2 区强夯参数相同,晚 1 月施工,浅层淤泥质土位于填石层下 0 ~ 2.50 m 深度):锥尖阻力 $Q_c = 2.80 \sim 3.30$ MPa(平均 3.09 MPa)、侧壁摩阻力 $f_s = 80 \sim 180$ kPa(平均 146.66 kPa)。

5.4 试验区土方填筑、道面结构层施工及其沉降情况

5.4.1 土方填筑与土基沉降

2007 年 1 月试验区与三跑道其他地段统一进行土方填筑,2007 年 2 月完工。2007 年 4 月 11 日

~7月20日,共5次观测全区土基顶面高程(观测计划略有调整),总沉降量为3~22 mm,后3次每次沉降0~3 mm。

5.4.2 道面结构层施工与沉降

按计划2007年5月开始道面结构层施工,由于各地段填土方顶面沉降稳定时间不同(连续3次观测沉降皆为0~3 mm视为稳定),道面施工分块展开,2007年10月完工。2007年12月27日开始观测道面沉降,至2008年5月30日,按规范^[4]判定,沉降稳定。A1区、A2区总沉降量分别为2.5~4.7 cm、2.0~3.5 cm。

6 结束语

通过试验可见:

(1)结构填石强夯法适合处理浅层淤泥质土地基,施工简单易行,并易于观测、检测,可操作性强;

(2)点夯、满夯下沉量显著;

(3)块碎石层干密度、固体体积率达到要求,形成“硬板”,整体性强,与浅层淤泥质土达到整体下沉,均匀性、稳定性好;

(4)强夯、填土施工(动荷载),以及填土层、块碎石层的静荷载,有利于浅层淤泥质土的加速排水、固结,工后其标贯击数明显提高,静探锥尖阻力明显增大,达到中等地基强度;

(5)通过道面沉降观测,沉降、不均匀沉降满足要求;

(6)强夯试验,从填石至满夯完毕,用时4天,时间短暂;

(7)结构填石强夯造价较低。

虽然规范^[1]说明强夯置换法只适用于高饱和度的软塑~流塑状态的粘性土地上对变形控制要求不严的工程,但该试验目的明确,设计参数适当,施工顺利,观测、检测效果较为理想。在高饱和度的软塑~流塑状态的粘性土地地区,建设对沉降变形要求严格的大面积工程,该试验进行了有效的探索。

参考文献(References)

- [1] 中华人民共和国建设部. 建筑地基处理技术规范(JGJ 79—2002)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.
- [2] 中国民用航空局. 民用机场水泥混凝土道面设计规范[S]. 北京:中国民用航空局,2010.
- [3] 国际民用航空组织. 国际民用航空公约 附件十四:机场(第四版)[M],2004.
- [4] 中华人民共和国建设部. 建筑变形测量规范(JGJ 8—2002)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.

(上接第1586页)

如下:

本段软土地基路堤填土高度一般6-10米,采用排水预压处理后,计算稳定安全系数及工后沉降量不能满足稳定要求,也不满足沉降要求。综合软土性质等因素,采用水泥搅拌桩进行处理,经计算,搅拌桩直径取50 cm,一般路段桩间距1.2 m。路堤底部铺设0.5 m砂垫层,砂垫层顶部铺设三层双向土工格栅采用双向聚酯焊接土工格栅PET50-50,经处理后,路堤稳定安全系数及工后沉降量能满足规范要求。

7 结 语

本文从地形条件、岩性及水文地质、物质来源等因素对软基的形成机制进行了分析评价。总之,在相似类型的地质环境条件下容易形成厚度较大,甚至厚度更大的软土路基。通过本次的软基形成机制分析及工程措施建议,为今后在软土地区勘察

工作中积累经验,遇到类似的地质条件下软土路基勘察提供技术参考。

参考文献(References)

- [1] 常士骧,张苏民. 工程地质手册(第四版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [2] 中交公路规划设计院有限公司. 公路桥涵地基与基础设计规范(JTG D63-2007)[S]. 北京:人民交通出版社,2007.
- [3] 建设部综合勘察研究院,同济大学. 静力触探技术标准(SY-T0058-98)[S]. 北京:石油工业出版社,1998.
- [4] 铁道部第四勘测设计院. 铁路工程地基土十字板剪切试验规程(TB10051-97)[S]. 北京:中国铁道出版社,1997.
- [5] 朱根桥. 乐昌至广州高速公路樟市至花东段T16合同段S3-1软基设计说明-16,2009.