

不同回填土条件下 软土区强夯加固效果测试与对比分析

李芳, 于元峰, 张延记, 王文明

(首钢地质勘察院北京爱地地质勘察基础工程公司, 北京 100144)

摘要:为了探讨在软土区山皮土与细砂2种不同回填土土质条件下的强夯加固效果,在同一滨海区开展了2种回填土土质条件下的现场强夯对比试验。并对现场不同试验区强夯前后标准贯入试验(SPT)与浅层平板载荷试验结果进行分析与对比研究。根据所得出的结论,提出了进一步提高强夯后地基处理效果的建议。

关键词:强夯加固;标准贯入试验;载荷试验;软土;变形模量;液化

中图分类号:TU472 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2013)09-0072-04

Test of Dynamic Compaction Effects in Soft Ground under Different Backfill Conditions and the Comparative Analysis/LI Fang, YU Yuan-feng, ZHANG Yan-ji, WANG Wen-ming (Shougang Geological Prospecting Institute, Beijing 100144, China)

Abstract: In order to investigate the dynamic compaction effects under 2 different backfills of hill-skill soil and fine sand in soft ground, the field comparative tests were made in the same littoral area. The results of standard penetration test (SPT) before and after dynamic compaction and the shallow plate loading test were analyzed; and the comparative tests were also conducted. Based on the conclusion, the suggestions are put forward to further improve the foundation treatment effects after dynamic compaction.

Key words: dynamic compaction; standard penetration test; loading test; soft ground; deformation modulus; liquefaction

0 引言

强夯加固效果的影响因素比较复杂,可分为外因与内因两类。对于外因,主要是施工工艺因素,包括锤重、锤形、锤底面积、落距、夯点布置、夯点击数、夯击遍数(单位面积夯击能)、单点夯击能、间歇时间、夯坑填料等;对于内因,主要是与地基土有关的因素,包括土的物理力学性质、不同土层的厚度与埋藏顺序、地下水位等。目前现场试验研究多集中强夯施工工艺与现场检测方面,而对于不同土层的厚度与埋藏顺序,特别是在滨海地区存在软弱下卧层及地下水等复杂条件下不同回填土地基强夯研究还很少开展,而这些是滨海回填地区强夯设计与施工急需解决的突出问题。为此,本文针对2个不同回填土条件下的地基进行现场强夯对比试验,通过强夯前后标准贯入试验与浅层平板载荷试验结果的综合分析,确定了相应地质条件下强夯对不同回填土地基加固的效果,为该地区及类似区域的地基处理提供经验借鉴。

1 工程概况

试验区位于滨海地区,表层分布有大面积的软土,包括淤泥及淤泥质土,其顶标高 $-0.2 \sim 0.2$ m,厚 $0.5 \sim 2$ m,其下为有轻微到中等液化的④层细砂层。场地拟填土标高为 2.8 m,填土后,回填土和淤泥质土将形成 $3.5 \sim 5.0$ m厚的松散及软弱土层,必须对其进行加固处理,并需要消除下部④层细砂的液化。为了确定合理的强夯地基处理方法及参数,特作地基处理试验。

根据夯前的钻孔勘察,10 m深度范围内的地层如下:回填土①层;淤泥质粉土②层,软塑~流塑,灰黑色,有腥臭气味,局部淤泥质粉砂薄层和淤泥质粉质粘土薄层互层;细砂④层,稍密~中密,灰色,为了统计的方便将④层根据标高范围分成④₁(②层底至 -2.75 m)、④₂($-2.75 \sim -3.75$ m)、④₃($-3.75 \sim -4.75$ m)、④₄($-4.75 \sim -5.75$ m)、④₀($-5.75 \sim$ ⑤层顶);粉质粘土⑤层,软塑,深灰色。

试验区部分区域有地表水流,④层细砂的静止水位高程为 -0.5 m。

收稿日期:2013-04-26

作者简介:李芳(1978-),女(汉族),内蒙古人,首钢地质勘察院北京爱地地质勘察基础工程公司主任工程师、工程师、国家注册岩土工程师,地质工程专业,从事岩土工程勘察、设计工作,北京市石景山区晋元庄路23号,lf4993@163.com。

第一试验区回填土①层为山皮土,直径 > 10 mm 的碎石约占 50%,且含有较多的粘性土。回填过程中没有碾压,地基承载力特征值 $f_{ak} = 80$ kPa。

第二试验区回填土①层为细砂,砂质不均,含粘性土团块及植物根,地基承载力特征值 $f_{ak} = 80$ kPa。

2 强夯试验方案

2.1 第一试验区

本区采用山皮土两步回填、两步强夯的方法。第一步填土到标高约 1.4 m,采用 1500 kN·m 夯击能,夯点间距 5 m × 5 m,两遍点夯,夯完第一遍点后推平场地再夯第二遍点,每点夯 5 ~ 6 击;第二步填土到标高约 2.6 m,采用 2500 kN·m 夯击能,夯点间距 5 m × 5 m,两遍点夯,每点夯 6 ~ 8 击,最后满夯一遍。夯点布置示意图见图 1。

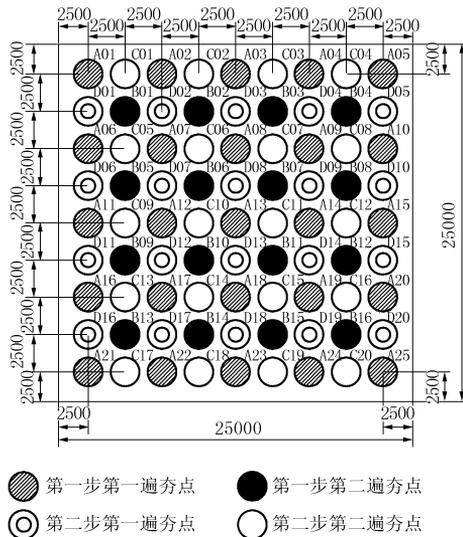


图 1 试验区夯点平面布置示意图

2.2 第二试验区

本区采用细砂分两步回填、两步强夯的方法。试验区分 3 个小区,第一步填土平均标高为 1.5 m,强夯时,第一小区采用 2000 kN·m 的夯击能,每点夯 5 ~ 6 击,不复夯;第二小区采用 2500 kN·m 夯击能,每点夯 4 ~ 5 击且各点均复夯一次;第三小区采用 2500 kN·m 夯击能,每点夯 4 ~ 5 击,不复夯。夯点间距 5 m × 5 m,两遍点夯。第二步填土平均标高 2.78 m,采用 2500 N·m 夯击能,夯点间距 5 m × 5 m,两遍点夯,每点夯 6 ~ 8 击,最后满夯一遍。夯点布置与第一试验区相同。

3 检测方法及其结果分析

3.1 检测方法

试验区主要采用标准贯入试验及静载荷试验的方法对地层进行检测。

3.1.1 标准贯入试验

孔深 5 ~ 10 m,每米一个标准贯入试验(可根据实际地层调整试验位置)。标准贯入试验采用 63.5 kg 的重锤,以 76 cm 的高度自由下落,锤击底端安装有标准贯入头的钻杆,依次观测并记录贯入 15、10、10、10 cm 深度的锤击次数,将后 3 个 10 cm 深度的锤击次数累加得出标贯击数,用 N 表示。标准贯入试验能够检测地层的地基承载力,评价地基的震液化效应,评价强夯处理效果、影响深度。

3.1.2 浅层平板载荷试验

载荷板面积 0.25 m²,最大加载 400 kPa。浅层平板载荷试验是模拟地基的受力情况,通过观测载荷板的沉降与施加于其上的载荷的观测,来直接确定其地基承载力和变形模量,用以评价强夯效果。地基土的变形模量 E_0 按下式计算:

$$E_0 = 10 \times (1 - \mu^2) P / (sd)$$

式中: μ ——泊松比,砂土取 0.3; P ——承压板上总荷载, kN; s ——最大荷载下沉降量, cm; d ——承压板直径, cm。

3.2 结果分析

3.2.1 第一试验区

(1) 通过钻孔取心分析,本试验方法能使回填土夯入淤泥质土约 40 cm,复夯后能增加置换深度 25 cm(夯前回填土厚约 1.4 m,淤泥质土厚 1.58 m)。

(2) 标准贯入试验数据分析。现将夯前、第一步夯后及第二步夯后不同土层的标准贯入试验的统计结果列于表 1。

表 1 第一试验区不同土层标准贯入试验统计结果

层号	土层性质	夯前击数 N		第一步夯后击数 N		第二步夯后击数 N	
		个数	平均值 / [击·(30 cm) ⁻¹]	个数	平均值 / [击·(30 cm) ⁻¹]	个数	平均值 / [击·(30 cm) ⁻¹]
①	回填土	10	13.1	9	18.3	14	20.2
②	淤泥质土	16	2	18	3.2	16	9.3
④ ₁	细砂	15	17	16	23.8	7	27.8
④ ₂	细砂	15	24.6	16	27.3	9	34.4
④ ₃	细砂	13	26.3	12	28	8	33.3
④ ₄	细砂	12	27.9	14	30	5	31.4
④ ₀	细砂	15	30.7	14	28.8		

根据表 1 中的数据对比可以发现,第二步强夯后的①层回填土标贯击数 N 值达到 20.2,为中密状态,比夯前的 13.1 击(稍密)有了明显的提高;②层

淤泥质土的 N 值由夯前的 2 变为 9.3, 强度增加明显; ④₁ 层、④₂ 层、④₃ 层、④₄ 层砂不同深处的 N 值分别由夯前的 17、24.6、26.3、27.9 变为第二步夯后的 27.8、34.4、33.3、31.4, 分别增加 63%、39.8%、26.6%、12.5%。

(3) 浅层平板载荷试验数据分析。试夯结束后在试验区内布置 3 个静力载荷试验点, 根据设计要求试验最大荷载为 200 kPa 的 2 倍量进行加载并完成回弹试验, 获得的 3 个静载点载荷-沉降关系曲线见图 2。

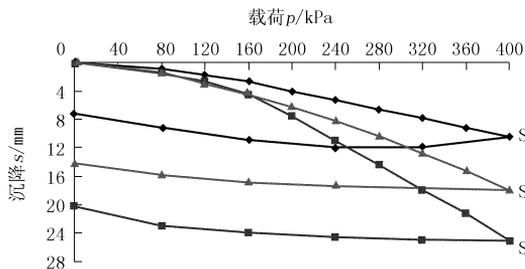


图2 第一试验区静载点实测载荷-沉降关系曲线

对上述浅层平板载荷试验的 $Q-s$ 曲线分析, 利用相对变形控制法得出各组地基承载力实测值。根据各实测值依据相关规范, 确定地基承载力特征值 200 kPa。变形模量平均值 12.44 MPa。详见表 2。

表2 第一试验区浅层平板载荷试验结果统计表

试验点号	最大加载/kPa	最大沉降量/mm	承载力特征值/kPa	特征值对应沉降量/mm	变形模量/MPa
1-1	400	10.49	200	4.03	15.20
1-2	400	25.07	200	7.63	9.98
1-3	400	17.94	200	6.25	12.13

3.2.2 第二试验区

(1) 通过钻孔取心, 回填土夯入淤泥质土约 0.4 m (夯前回填土厚约 1.36 m, 淤泥质土厚 1.6 m)。

(2) 标准贯入试验数据分析。夯前、第一步夯后及第二步夯后不同土层的标准贯入试验的统计结果列于表 3。

表3 第二试验区不同土层标准贯入试验统计结果

层号	土层性质	夯前击数 N		第一步夯后击数 N		第二步夯后击数 N	
		个数	平均值 / [击·(30 cm) ⁻¹]	个数	平均值 / [击·(30 cm) ⁻¹]	个数	平均值 / [击·(30 cm) ⁻¹]
①	回填土	10	4.20	8	6.00	16	10.06
②	淤泥质土	10	1.80	8	2.38	8	5.50
④ ₁	细砂	10	16.20	8	20.50	8	25.75
④ ₂	细砂	10	23.00	8	26.75	8	30.00
④ ₃	细砂	10	25.50	8	27.13	8	29.63
④ ₄	细砂	10	25.80	8	25.75	8	27.85
④ ₀	细砂	6	20.83	6	21.80		

根据表 3 中夯前夯后的数据对比可以看出: ①层填土夯前标贯击数 4.2, 夯后增加到 10; ②层淤泥质土夯前标贯击数为 1.8 击, 夯后增加为 5.5 击; ④₁ 层到 ④₄ 层, 标贯击数夯前分别为 16.2、23.0、25.5、25.8, 夯后分别为 25.8、30.0、29.6、27.9, 分别增加 59%、30%、16%、8%。

同时, 从夯前、第一步夯后及第二步夯后的标贯数据对比可以看出, 第一步强夯对地层强度的提高有限, 其贡献率约 1/3, 而第二步强夯对地层强度的提高较明显, 贡献率约 2/3。

(3) 浅层平板载荷试验数据分析。试夯结束后在试验区内布置 3 个静力载荷试验点, 根据设计要求试验最大荷载为 200 kPa 的 2 倍量进行加载, 获得的 3 个静载点载荷-沉降关系曲线见图 3。

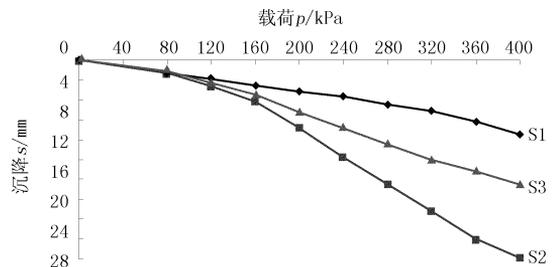


图3 第二试验区静载点实测载荷-沉降关系曲线

对强夯试验区内 3 组浅层平板载荷试验 $Q-s$ 曲线分析, 利用相对变形控制法得出各组地基承载力实测值。根据各实测值依据相关规范, 确定地基承载力特征值 200 kPa。变形模量平均值 14.43 MPa。详见表 4。

表4 第二试验区浅层平板载荷试验结果统计表

试验点号	最大加载/kPa	最大沉降量/mm	承载力特征值/kPa	特征值对应沉降量/mm	变形模量/MPa
2-1	400	7.50	200	4.18	17.8
2-2	400	19.91	200	6.81	11.1
2-3	400	12.46	200	5.27	14.4

4 结论与建议

4.1 结论

(1) 对地基承载力的影响。通过对 2 个试验区的标准贯入试验和浅层平板载荷试验结果分析表明, 不同回填土的表层回填土和 ④₁ 层细砂密实度提高较明显, 淤泥质土层的承载力稍有提高, 但不太明显, 随着孔隙水压力的消散, 承载力可逐步提高。从地表起算, 7 m 范围内的地层均能得到有效的加固, 其夯前夯后地基承载力特征值见表 5。

表5 夯前夯后地基承载力特征值对比表

层号	土层性质	夯前承载力特征值 /kPa	夯后承载力特征值 /kPa
①	回填土	80	200
②	淤泥质土	30	120
④	细砂	160	200

(2)对地震液化效应影响。2个试验区均存在轻微~中等液化的④层细砂,经强夯后④层细砂标准贯入击数 N 明显提高,大于液化判别标准贯入锤击数临界值,根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010)中的有关液化判别方法确定,均能消除场地饱和细砂的地震液化。

(3)地层土性的变化。第一试验区在标准贯入试验和现场取样时,均能发现在回填的山皮土与淤泥质土结合处部位土质含水量高且软的现象,此部位的土层标贯击数为3~5击。经现场研究发现,由于山皮土中含有粘性土,在强夯过程中致使淤泥质土在上部排水不畅,直接在淤泥质土上部造成新的软弱层;而在第二试验区,回填细砂与淤泥质土结合处未出现上述现象。

通过钻探取样发现夹有细砂薄层的②层淤泥质土,夯后的含水量较夯前有所减少,部分已经从淤泥质粉土转变为普通粉土。

(4)强夯工艺对本区域软土和下部细砂层的加固机理。本区域淤泥质土由淤泥质粉质粘土、淤泥质粉土、松散粉细砂层交互沉积,较之纯粹的淤泥,因其夹有粉细砂薄层,渗透系数要大很多。另外,强夯时,瞬间的冲击能量能够使土层中的孔隙水压力迅速升高,在土层中形成裂隙,使渗透系数比之通常状态时有很大的提高。由于以上两方面的原因,使得本区域淤泥质土的排水固结作用得以较快的进行,在强夯作用下得以加固。同时,因本区域上部软

土有较好的渗透性,使得在强夯作用下,下部④层细砂也能够排水,从而达到密实的效果。

(5)从标准贯入试验结果可看出,回填土为山皮土对提高软土及下部细砂的强度较回填土为细砂的效果显著。从浅层平板载荷试验结果可看出,回填土为细砂对地基变形控制比回填土为山皮土的效果明显。

4.2 建议

综上所述,建议在此区域采用强夯地基处理方案时,为提高强夯处理的效果,应在淤泥质土表层铺设1.2~1.5 m厚的细砂或砂卵石,使淤泥质土得以两面排水,加速其排水固结,并尽可能在回填过程中进行碾压,然后在上层再回填山皮土,填土到场地标高后再强夯处理。根据试验区现场施工情况,由于淤泥质土含水率高,强夯后大量出水,建议施工单位采取积极的排水措施降低水位,可以通过挖沟挖坑排水或打井排水。

总之,通过对2种不同性质回填土的现场试验结果分析,可为该区域内乃至类似工程场地的强夯地基处理工程设计、施工提供宝贵的借鉴经验。

参考文献:

- [1] 年延凯,李鸿江,杨庆,等.不同土质条件下高能级强夯加固效果测试与对比分析[J].岩土工程学报,2009,(1).
- [2] 颜波,林沛远,于海涛,等.强夯地基处理夯沉量及夯击能量耗散分析[J].岩土工程学报,2011,3(33).
- [3] 李小霞.强夯置换法在软弱地基处理中的应用[J].路桥科技,2012,(3)(中).
- [4] JGJ-2002,建筑地基处理技术规范[S].
- [5] GB 50007-2011,建筑地基基础设计规范[S].
- [6] GB 50202-2002,建筑地基基础工程施工质量验收规范[S].
- [7] GB 50011-2010,建筑抗震设计规范[S].

长白山天池火山科学研究“第一钻”顺利竣工

中国地质调查局沈阳地质调查中心消息(2013-09-09) 沈阳中心承担的国土资源部公益行业基金“长白山火山监测与现今活动性研究”项目的“长白山火山基础地质研究”课题成功完成了长白山天池火山晚新生代火山地层层序科研钻探工程,该钻是长白山天池火山研究的科研第一钻。

长白山天池火山是世界上规模最大的活火山之一,至今国内外对长白山火山层序、喷发旋回及形成过程的认识均基于地表地质考察,深部认识也只局限于物探资料。沈阳中心在通过专家论证的基础上,多次与长白山管理委员会和长白山林业局等相关部门的协调沟通,最终决定在天池北坡进行4个科研钻孔施工。通过该科研钻探,取得宝贵的“第一手”

实物资料及测温信息,为天池火山的形成过程及危险性评估提供基础资料,为长白山地区地热资源开发和利用提供新方向。

四个钻孔全面竣工,总计完成了1295.7 m的全心钻井工作,各钻孔的取心率均超过90%。CZK07钻孔进尺644.80 m; CZK06钻孔进尺403.00 m; CZK05钻孔进尺220.20 m; CZK04钻孔进尺27.70 m。其中,CZK07和CZK05均贯穿天池火山晚新生代火山地层,并在CZK07钻孔644 m处得到测温结果为102℃,在CZK6钻孔120 m处发现熔岩隧洞。本次科研钻的顺利竣工,将成为天池火山基础地质、现代火山及火山灾害预警研究进程中跨时代的一步。