

粉喷桩加固地基工程失败实例及分析

迟旭全

(中国船舶工业总公司勘察研究院,上海 200063)

【摘要】 阐述了一个粉喷桩加固吹填土地基失败的工程的设计、施工、和测试,通过分析测试结果找出失败所在,得出几点经验教训。主要经验是对吹填土的加固处理不能按一般软弱土来考虑,务须做室内水泥土抗压强度试验以确定桩身水泥掺入量,并做现场试桩工作以确定单桩承载力。

【关键词】 粉喷桩 水泥粉体喷射搅拌法 水泥掺入量

【Abstract】 This paper expounds the design, the construction and the tests of a failing cement injection piles engineering, Some experience gained in the analyses about the tests can help us in other similar engineering

【Key words】 Cement injection piles Cement ash mixing method additional weight of Cement

0 前言

在上海市,水泥粉体喷射搅拌法在处理3~6层建筑物的软土地基中取得了一些成功实例,但是这种地基处理方法由瑞典人于1967年首先提出到现在不过只有30年的历史,在我国从1983年改装成第一台粉体喷射搅拌机算起才不到15年的历史,所以我们在实践中获得的经验不足,还缺乏对它的全面了解。本文所述的就是一个水泥粉喷桩加固吹填土地基工程失败的实例,通过对它的分析,希望能对以后同类工程的设计与施工有所益处。该工程加固费用加上测试等其它费用合计300多万元,还影响了四个多月的工期,损失很大。后来调换设计单位重新设计,改为用预制桩基础。

1 工程概况

该工程位于上海市浦东新区,东临东海,近处只有350m。建筑场地是在海滩围堤后,新近人工吹填堆积形成的,地势较为平坦,地面平均标高约4.45m。表层吹填土厚度3.00~3.80m,含水量高,固结度极差,呈松散状态,采用水泥粉体作为固化剂来处理该层。加固区域面积总和约1157m²,总桩数13701

根。在该场地上拟建的建筑物如表1所示。基础形式为片筏基础。

表1 拟建建筑物一览表

建筑物单元	层数	高度/m	建筑面积/m ²
教学楼(B、C)	2	13.5	4213
行政办公楼(E)	1	9.0	775
食堂(F)	1	11.7	1619
中央机房(H)	1	7.5	287
走廊(D)	1	3.5	1338
停车场(P)			

2 场地工程地质条件

地层结构如下:

第①层为吹填土层,主要成份为粘质粉土、砂质粉土和粉质粘土,松散,饱和,均一性差,固结度极差,厚度为3.00~3.80m。

第②层为灰色粘质粉土,含云母、贝壳碎屑,稍密,饱和,厚度为5.60~7.45m。

两层土主要物理力学性质指标见表2。

3 加固方案

粉喷桩桩径500mm,桩长5.0m,设计桩顶标高3.75m。桩顶标高以下有效桩长4.5m。水泥用425号普通硅酸盐水泥,原水泥掺量为45kg/m,相当于被加固土重的

表 2 土层物理力学性质指标

指标	层 次	
	①	②
$w/\%$	52.8~30.4	33.8~28.2
$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	18.9~16.7	19.2~18.5
e	1.52~0.87	0.96~0.81
$w_L/\%$	44.4~33.0	
$w_p/\%$	24.3~19.7	
$I_p/\%$	20.1~13.3	
I_L	>1	
p_s/MPa	0.38~0.19	3.41~1.84
$N_{63.5}$ (实测)	0.5~1.5	15~3
f/kPa		100

12.5%,后来水泥掺入量作了两次调整:第一次是在设计技术交底会上,施工以前,施工单位根据自己的经验认为加固这样的吹填土层水泥掺入量偏少,设计单位就将水泥掺量提高到 50kg/m,相当于被加固土重的 13.9% (停车场 P 单元掺量仍为 45kg/m);第二次是在完成了 1971 根桩之后,经轻便动力触探测试发现桩身击数局部普遍偏低,施工单位讲是水泥掺量少造成的,设计单位又将水泥掺量提高到 52kg/m,相当于被加固土重的 14.4% (停车场 P 单元掺量为 47kg/m)。各加固单元具体情况如表 3 所示。

表 3 场区粉喷桩加固设计方案

单元名称	桩数	桩间距/m	桩土	设计复合
			置换率/%	地基承载力/kPa
教学楼(B)	2805	0.80×0.80	33.3	90
教学楼(C)	2850	0.80×0.80	33.3	90
行政办公楼(E)	1204	1.00×1.00	19.8	90
食堂(F)	1861	1.00×0.80	25.4	90
中央机房(H)	2192	1.00×1.00	19.8	90
走廊(D)	1692	1.20×1.10	17.3	90
停车场(P)	1097	1.20×1.20	14.8	70

4 施工情况

施工使用上海探矿机械厂生产的 GPF—5 型步履式钻机及 YP—1 型粉体发送器, W—1.6/10 型空气压缩机, 1m³ 的贮气罐等配套设备。由于工期短,投入七套设备,昼夜施工,历时 50d 全部完成桩的施工任务,平均每台钻机 24h 完成约 40 根桩。施工中使用的关键技术参数如表 4 所示。

操作工艺作了二次调整,曾先后使用了

三种工艺:

第①种工艺,停车场 P 单元水泥掺量为 45kg/m 外,其它单元水泥掺量为 50kg/m,停灰面以下 2.0m 复搅复喷。这种工艺施工了 1971 根桩,集中在 B、C、E、P 四个先施工的单元中。

第②种工艺,水泥掺入量同①工艺,只是复喷长度加长到 3.0m。这种工艺施工了 2191 根桩。

表 4 施工中使用的关键技术参数

项目	提升速度 /(m·min ⁻¹)	叶轮转数 /(r·min ⁻¹)	送灰压力 /MPa	停灰面深度 /m	桩深度 /m	单桩用时 /min
参数	1.47	150~200	0.15~0.35	0.3	5.3	10~13

第③种工艺,水泥掺入量每 m 增加 2kg,复喷长度同②工艺 3.0m。这种工艺施工了 9539 根桩。

由于送灰器没有水泥用量自动计量仪器,施工中采用每 2 根桩往灰罐中投加一次水泥的方法,控制平均单桩水泥用量。

5 测试及测试结果统计与分析

本粉喷桩加固工程进行的测试项目有三大项和二附属小项:三大项是桩身轻便动力触探、复合地基和单桩承载力、桩身取芯;二附属小项为天然地基轻便动力触探、吹填土天然地基承载力。

5.1 轻便动力触探测试

在已完成的桩中,于成桩 7 天任意抽取总数的 2% 进行测试,测试的位置在桩径的 1/4 处,从桩头停灰面开始,记录 10kg 重的落锤,落距 50cm,探头贯入 10cm 深度的锤击数,测试深度 5.0m。根据触探击数 N_{10} 用对比法判断桩身强度,同时判断桩身的均匀程度。设计上提供的标准如下:设计桩顶标高以下 0.0~1.5m 范围内大于 10 击, 1.5~3.5m 范围内 7 击至 10 击, 3.5~4.5m 范围内大于 10 击。连续 3 个 10cm 的击数都小于 7 击的桩分布情况统计如表 5 所示。表 5 反映出以下三点规律:

表5 三种工艺测试对比表

单元名称	各单元总测试桩数	施工工艺种类	各工艺测试桩数	各工艺中 $N_{10}<7$ 击桩数	各工艺 $N_{10}<7$ 击的桩数占同工艺测试桩数的百分比/%	各单元 $N_{10}<7$ 击桩数占单元测试桩数百分比/%
B	57	①	11	9	81.8	36.8
		②	9	3	33.3	
		③	37	9	24.3	
C	44	①	22	15	68.2	43.2
		②	13	4	44.4	
		③	9	0	0	
E	29	①	18	9	50.0	38.0
		②	6	2	33.3	
		③	5	0	0	
F	28	①				10.7
		②	2	0	0	
		③	26	3	11.5	
H	46	①				10.9
		②				
		③	46	5	10.9	
D	31	①				6.5
		②				
		③	31	2	6.5	
P	22	①	12	12	100	77.5
		②	6	5	83.3	
		③	4	0	0	

(1)第①种施工工艺所完成的桩中出现 $N_{10}<7$ 的桩数最高。

B、C、E单元各占81.8%、68.2%和50.0%，P单元测试12根全部 $N_{10}<7$ 高达100%。

(2)第②种施工工艺桩同①施工工艺桩相比，出现 $N_{10}<7$ 的桩比例明显下降，但是各单元百分比仍很高。

B单元下降了48.5%，C单元下降了23.8%，E单元下降了16.7%，P单元下降了16.7%。

(3)第③种施工工艺桩出现 $N_{10}<7$ 的桩比例最低。

B单元最高为24.3%，其次为F、H单元各为11.5%和10.9%，D单元为6.5%，其它为0。

以上三点表明：随着施工工艺的改变， $N_{10}<7$ 的桩数逐渐减少，特别是增加水泥用量后的③工艺完成的桩，增加水泥前共测试

99根桩，其中59根 $N_{10}<7$ 击占总数的59.6%，增加水泥后测试158根桩，其中19根 $N_{10}<7$ 击占总数的12.0%。

5.2 复合地基和单桩载荷试验

载荷试验目前是确定工程质量最有效最可靠的方法，普遍为各类桩基工程测试所采用。本工程复合地基和单桩载荷试验在28d后及时进行，复合地基载荷试验采用单桩复合地基承载力的测试方法，共测试了9个点；单桩承载力测试了2个点，其结果如表6。从表6中我们可以发现：B、C单元测试的3个点不管是①工艺还是③工艺的桩复合地基承载力均大于设计承载力90kPa，而E、F、H、P单元所测试的6个点无论①工艺，②工艺还是③工艺的桩均未达到设计承载力的要求。这项试验结果按照任何一本验收规范，本工程都将为不合格工程，也就是它给本工程判了死刑。但是为什么会出现这样的测试结果呢？其原因何在请看下面的分析：

表 6 复合地基和单桩载荷试验布置

单元名称	测试位置桩号	施工工艺种类	复合地基承载力/kPa	桩号	施工工艺种类	单桩承载力/kN
B	B1312	①	150			
	B1912	③	140			
C	C2209	①	109	C840	②	32
E	E638	①	55	E290	①	60
	E940	②	69			
	E618	③	58			
F	F835	③	75			
H	H1607	③	61			
P	P559	①	52			

要确定复合地基承载力首先要先确定单桩容许承载力,《规范》(指上海市标准《地基处理技术规范》,下同)中给出 9.2.5 公式如下:

$$P_a = U_p \cdot \sum q_{si} \cdot l_i + \alpha \cdot A_p \cdot q_p$$

用来估算粉喷桩承载力 P_a 。式中各参数含义及取值如下:

U_p —— 桩周长;

q_{si} —— 桩周第 i 层土的容许摩阻力:本场地桩周土层只有两层,第②层为灰色粘质粉土,该《规范》中没有对该层土 q_s 值作出规定,参照《地基基础设计规范》(DBJ08—11—89)中该土层对灌注桩的极限摩阻力取值范围 15~30kPa,除以安全系数 2 得 q_{s2} 的取值范围 7.5~15kPa,在公式中代入 $q_{s2}=12\text{kPa}$,第①层为吹填土层,固结度极差,饱和松散,目前正处于固结之中,本应该考虑其对桩身的负摩阻力作用,在公式中 q_{s1} 取 0;

l_i —— 桩周土层的厚度,本工程粉喷桩进入第②层土中深度 1.4~2.2m,取 1.8m;

α —— 为桩端天然地基承载力折减数,根据《规范》提供的取值范围 0.4~0.6,取其值为 0.5;

A_p —— 桩截面积;

q_p —— 桩端天然地基土承载力,第②层土的地基承载力为 100kPa。

将以上各项参数代入 9.2.5—2 公式中,算得单桩容许承载力 $P_a=43.7\text{kN}$ 。如表 6,从工程桩中抽取的两根桩的实测单桩容许承载力值分别为 32kN、60kN,平均为 46kN,基本与理论计算相符合。

复合地基承载力的估算值,由《规范》提供的 9.2.6—1 公式计算。公式及式中各参数如下:

$$f_{sp} = m \cdot P_a / A_p + \beta(1-m)f_s$$

m —— 桩土面积置换率;

β —— 桩间土承载力折减系数,在 0.5~1.0 中取值 0.8;

f_s —— 桩间天然地基土容许承载力。由于吹填土土质极差,两次勘察阶段的勘察均未能提供其承载力值,通过实测取其平均值为 43.8kPa。

将以上各参数值代入 9.2.6—1 式,计算出单桩承载力 P_a 从 32kN 到 60kN 时,各单元复合地基承载力 f_{sp} 值如表 7。

表 7 各单元复合地基承载力 f_{sp} 估算值表

单元名称	m	P_a/kN	f_{sp}/kPa	f_{sp} 平均值/ /kPa
B、C	0.333	32~60	77.5~125.1	101.3
E、H	0.198	32~60	60.4~88.6	74.3
F	0.254	32~60	67.5~103.8	85.4
P	0.148	32~60	54.0~75.1	64.6

表 7 同表 6 比较,将惊奇地发现理论估算的值与实际测试的结果是多么的吻合!吻合表现在:a. 只有 B、C 单元的复合地基承载力能够达到 90kPa,其它单元则不能;

b. F 单元理论计算值高于 E、H 单元的理论计算值,F 单元实际测试值也高于 E、H 单元的。

那么为什么 B、C 单元可以达到而其它单元不能呢? 因为 B、C 单元的桩土置换率大

于其它各单元。同样的水泥掺量,同样的施工工艺,不同的置换率要在同一场地达到同样的地基承载力,是不可能的!

5.3 桩身取芯

桩身取芯在成桩 28d 后进行的,选取做过轻便动力触探的 29 根桩取芯,其中 8 根是触探击数局部较低的桩,2 根为击数均大于 10 击的桩,19 根是一般性的桩。取芯结果表明 10cm 击数大于 10 击的桩身水泥土凝结较好,呈硬块状;而击数较低的桩段桩芯采取率低,芯软、湿易破碎,一般可见水泥土凝结的颗粒。桩芯硬块部分做无侧限抗压强度试验,其值均在 $2\text{N}/\text{mm}^2$ 以上。

5.4 吹填土地基载荷试验与天然地基轻便动力触探

吹填土地基载荷试验在全部桩打好后,为了分析工程质量问题,由设计提出做的,因为勘察报告中没有给出该值。实测两点,都在标高 3.75m 处测试吹填土的承载力,1[#]点选在加固区外靠近场地中间的位置,结果为 37.5kPa;2[#]点选在加固区外靠近场地边上,附近有 1.0m 深的排水沟,固结程度要比 1[#]点高,测出的值为 50kPa。

未加固区天然地基轻便动力触探试验的目的是判断桩身轻便动力触探击数是否大于天然吹填土轻便动力触探击数的一倍以上。这个试验也是为了有助于分析工程质量问题而做的,其依据为《规范》条文说明第 9.4.2 条“七天时的桩身 N_{10} 大于原天然地基击数 N_{10} 的一倍以上,则桩身强度已能达到设计要求。”一共测试了 4 个点,其结果统计如下:地表 0~0.6m,每 10cm 1~5 击;地表 0.6~

2.4m,每 10cm 0.5~1 击;地表 2.4~3.3m,每 10cm 2~7 击。如果按照这条标准,则全部粉喷桩均达到加固要求。

6 二点经验教训

(1)粉喷桩在处理吹填土时要慎重使用,要通过现场做试验桩以确定单桩承载力,做室内水泥土的抗压强度试验以确定桩身水泥掺入量,不能只根据《规范》中处理一般软弱土要求,确定工程加固方案,要高度重视吹填土的特殊性。

(2)粉喷桩较短时,应该采用全桩长复搅复喷的施工工艺。

《规范》中虽然有对施工工艺的一般要求,但对只有 5.0m 长度的短桩来讲,只按照《规范》中要求桩头、桩底复喷去施工还是不够的。目前粉喷桩施工设备大多没有喷灰量自动计量仪器,桩短提升时间短,要将桩身各段水泥掺量控制在要求的范围内是件困难的事,特别是施工任务紧张,单桩施工过程中经常调节操作参数也难免出现差错。如果只复喷一段,操作人员又不能及时调节量,复喷与提升送灰用量一样,那么势必造成局部灰量严重不足。全长复搅复喷给施工带来方便不但可以避免上述问题,而且可以使水泥土搅拌的均匀,工程质量上也有保证。

收稿日期:1997-01-15

(上接第 23 页)

5 结束语

膨胀土是一种非饱和土,所具有的吸水膨胀和失水收缩的工程地质特性都是在非饱和状态下才能呈现出来。如果膨胀土在完全干燥(充分收缩)或完全饱和(充分膨胀)的环

境下就失去了特有的胀缩特性。1995 年 9 月巴黎“国际膨胀土会议”决定更名为“国际非饱和土会议”,1998 年将在北京召开第二届会议。我们应以丰硕的研究成果迎接第二届“国际非饱和土会议”的召开。

收稿日期:1996-12-03