

# 粉喷桩复合地基强度时效性增长分析<sup>①</sup>

颜 华<sup>1</sup>, 柳家海<sup>2</sup>, 周泊锷<sup>2</sup>

(1.江苏煤炭地质勘探五队,江苏 镇江 212111; 2.常州市基础工程公司,江苏 常州 213017)

**摘要:**通过对不同龄期粉喷桩及桩间土的强度进行试验分析,发现粉喷桩强度具有时效性增长,同时桩间土强度提高十分明显,且强度也具有时效性增长。

**关键词:**粉喷桩; 桩间土; 复合地基; 强度; 时效性增长

中图分类号: TU472

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)增刊 2-0177-04

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.增刊 2.0177

## The Growth in Strength of Dry Jet Mixing Pile Composite Foundations over Time

YAN Hua<sup>1</sup>, LIU Jia-hai<sup>2</sup>, ZHOU Ji-kun<sup>2</sup>

(1.Jiangsu No.5 Coal Geological Exploration Team, Zhenjiang 212111, Jiangsu, China;

(2.Changzhou Foundation Engineering Co., Changzhou 213017, Jiangsu, China)

**Abstract:** According to the experimental analysis of the strength of dry jet mixing (DJM) pile and the soil between piles of differing age, it was found that the strength of the DJM pile grew over time. The strength of the soil between the piles was also obviously improved over time.

**Key words:** DJM pile; soil between piles; composite foundation; strength; growth over time

### 0 引言

复合地基中桩体与桩间土同时承担荷载是复合地基的基本特征,也是其本质。

从粉喷桩复合地基计算公式中可看出:由桩身材料强度确定的单桩承载力与由桩周土和桩端土的抗力所提供的单桩承载力相比,取其较小值。

在  $R_a = \eta f_{cu} A_p$  公式中,  $f_{cu}$  为与粉喷桩桩身水泥土配比相同的室内加固土试块在标准养护条件下 90 d 龄期的立方体抗压强度平均值;  $\eta = 0.20 \sim 0.30$ 。当水泥选取 32.5 级,掺入量 65 kg/m,淤质土含水量 40% 左右时,经试验得出  $f_{cu} = 1\ 910$  kPa,则  $R_a = 94$  kN。

《建筑地基处理技术规范》理解与应用培训读本:“…关于混合体以外土的性状有无改善的问题,经测试认为,虽然固化材料可以从混合体向周围渗透,但其反应缓慢,渗透范围有限,应用中不予考虑,

因此桩间土仍采用天然地基的力学指标,至于粉喷桩水泥粉吸水所产生的影响也忽略不计”。

但实践证明:粉喷桩桩身强度随着时间的延长明显增长,同时桩间土地基承载力有很大提高。

### 1 粉喷桩桩间土强度的时效性增长实例分析

《建筑地基处理技术规范》<sup>[1]</sup>:“…经测试认为,虽然桩间土承载力大于天然土承载力,但变化不大,故应用不予考虑,因此桩间土仍采用天然地基的力学指标”。

但实践证明,采用改进型粉喷桩工艺施工,桩间土地基承载力有很大提高。

#### 1.1 粉喷桩桩间土与天然土 $N_{10}$ 试验对比

根据常州及邻近地区若干个粉喷桩工程桩间土与天然土  $N_{10}$  试验的对比测试,得到以下结果(表 1)。

① 收稿日期:2015-04-01

作者简介:颜 华(1977—),江苏句容人,工程师,长期从事工程勘察、设计,地基与基础工程施工。

表 1 粉喷桩加固前后桩间土  $N_{10}$  变化表

Table 1  $N_{10}$  variation of soil between piles with and without DJM piles

工程名称	土性	天然土 $N_{10}$	桩间土 $N_{10}$	桩间土 $N_{10}$ /天然土 $N_{10}$
常州市公安局综合楼	填土, 淤质土	28.83	46.33	1.61
常州市四中体育馆	填土, 淤质土	14.70	25.61	1.79
常州盐业公司办公楼	填土, 淤质土	25.33	42.36	1.67
泰兴江海开发公司商住楼	粉土, 填土	17.79	29.49	1.66

从表 1 可看出粉喷桩处理后的桩间土  $N_{10}$  将提高 60% 左右。

1.2 粉喷桩桩间土与天然土静力触探试验对比

常州永光车业车间二, 5~6 层, 框架结构, 单柱荷载 5 300 kN, 柱距 9 m × 9 m, 建筑面积 16 422 m<sup>2</sup>, 横跨两个工程地质单元, 即 Q<sub>3</sub> 正常沉积区  $f_{ak} = 250$  kPa, 采用天然地基; 暗塘分布区  $f_{ak} = 70$

kPa, 采用粉喷桩复合地基加固处理,  $f_{sp,k} = 210$  kPa。当沉桩深度大于 7.5 m 时经计算  $R_a = 114$  kN,  $m = 0.36$ ; 当沉桩深度小于 7.5 m 时(一般 3.5~5 m 左右),  $R_a = 70$  kN,  $m = 0.55$ 。粉质桩施工结束后, 在原勘察孔附近桩间土内做静力触探试验, 将原状土与桩间土曲线及数值对比(图 1, 表 2)。

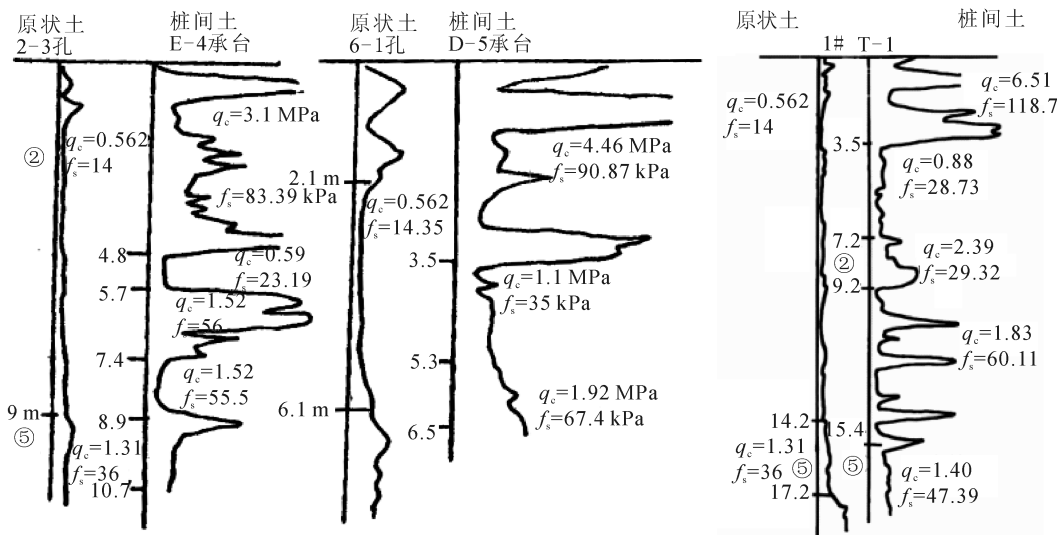


图 1 永光车业粉喷桩加固前后静探值对比曲线

Fig.1 Comparison between CPT value curves in Yongguang Garage with and without DJM piles

表 2 粉喷桩加固前后静探值对比

Table 2 Comparison between CPT values with and without DJM piles

项目	②淤质土		⑤粉质黏土	
	$q_c$ /MPa	$f_s$ /kPa	$q_c$ /MPa	$f_s$ /kPa
原状土	0.562	14	1.31	36
桩间土	加权平均 2.78	加权平均 61.44	1.4	47.39

从图 1 和表 2 可看出粉喷桩处理后桩间土的  $q_c$  和  $f_s$  均有很大提高。

2 粉喷桩强度增长的时效性试验实例

(1) 江苏金坛凤凰城住宅小区二期, 建筑面积

40 883 m<sup>2</sup>, 局部位于软土分布区  $f_{ak} = 70$  kPa。原设计采用静压法预应力管桩处理软基, 后采用粉喷桩局部处理软基。设计要求  $f_{sp,k} = 200$  kPa,  $R_a = 100$  kN,  $m = 0.362$ , 桩端进入软土相邻下伏持力层 1 m。为正确评价粉喷桩单桩及单桩复合地基的承载力效果, 共进行 14 组单桩、17 组单桩复合地基静载荷试验, 其曲线均呈平缓状。将检验结果最大加荷除以设计要求荷载均大于 2, 说明承载力满足设计要求且具有一定的安全储备。试验龄期从 39 天到 171 天不等, 随着龄期的增加沉降明显减小, 有关试验数据见图 2 及表 3。从中可以看出, 随着龄期的增长, 在相同荷载作用下沉降量明显减小, 表明随着龄期的增长, 桩间土强度及桩身水泥土强度明显增

加,31~90 天区间强度增长明显,90~171 天区间强度增长变缓。

表 3 单桩承载力-龄期-沉降关系

Table 3 Relationship between bearing capacity of single piles, age, and settlement

桩号	31	25	10	17	13	19
单桩极限承载力/kN	250	200	275	275	250	275
龄期/d	34	39	76	82	93	171
沉降/mm	39.11	21.42	15.95	16.03	15.13	11.14

占地 217 亩,8 个单体建筑物均跨越两个工程地质单元,即  $Q_3$  正常沉积区 ( $f_{ak}=250$  kPa) 与古湖沼相软土分布区 ( $f_{ak}=70$  kPa)。软土分布区采用粉喷桩加固处理。

同一场地不同龄期的三组粉喷桩静载荷试验结果表明,同一场地同一荷载作用下,粉喷桩静载荷试验沉降量随着龄期的延长明显变小,龄期达 210 余天粉喷桩强度仍在增长。现将三幢建筑不同龄期静载荷试验成果对比如下(表 4)。

(2) 常州飞牛纺织服饰有限公司青龙新厂区,

表 4 同一场地不同龄期粉喷桩静载荷试验成果

Table 4 Results of the static loading test on DJM piles at different ages on an identical site

桩号	1 294	1 471	1 572	784	1 574	33	95	141
有效桩长 m	7.02	3.31	6.76	11.34	9.56	9.85	4.65	11.46
桩端持力层	前织	⑤层粉砂	③层粉质粉土	⑤层粉砂	剑杆	⑥层粉砂	⑥层粉砂	三层办
试验状态	车间	单桩	复合地基	复合地基	织机	⑥层粉砂	③层粉质粉土	⑥层粉砂
龄期/天	35	35	35	60	53	212	225	211
最大沉量/mm	18.12	16.84	19.82	11.64	10.53	8.16	7.89	4.41

注:单桩最大加荷 220 kN,单桩复合地基最大加荷 400 kPa,压板面积  $0.7 \times 0.8$  m<sup>2</sup>。

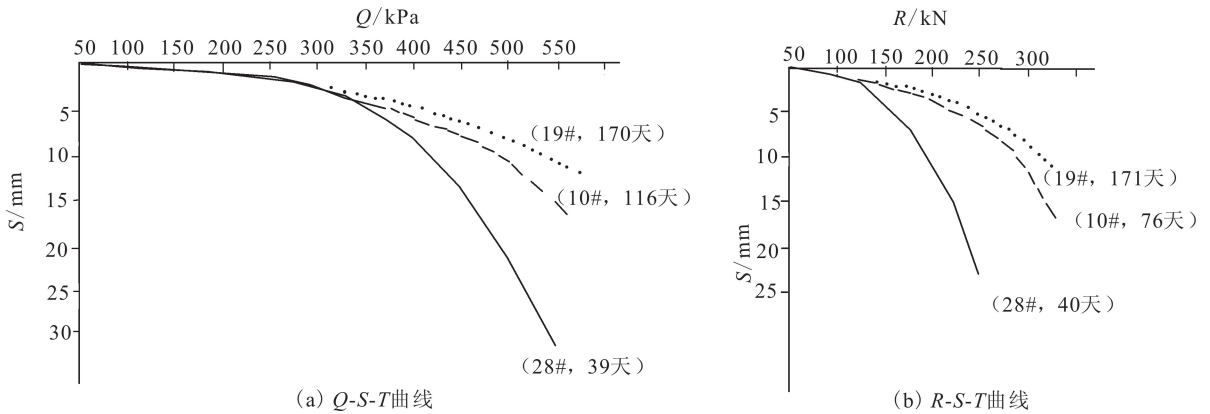


图 2 凤凰城粉喷桩静载荷试验 Q(R)-S-T 曲线对比图

Fig.2 Comparison between Q(R)-S-T curves of the static loading test on DJM piles in Phoenix community

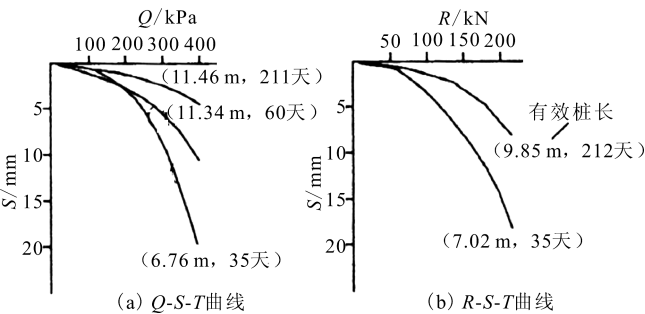


图 3 粉喷桩静载荷试验 Q(R)-S-T 曲线对比图

Fig.3 Comparison of Q(R)-S-T curves from the static loading tests on DJM piles

3 曲线对比可以看出,随着龄期的增长,在相同荷载作用下沉降量明显减小,桩身水泥土强度明显增加,35~60 天区间强度增长明显,60~220 天区间强度增长变缓。

### 3 粉喷桩强度增长时效性机理分析

#### 3.1 粉喷桩桩间土强度的增长机理分析

粉喷桩施工过程中有足够的气压及气量,高压气体对周围土体产生明显的挤压、剪切、劈裂作用,同时钻头旋转对周围土体产生环向剪切力,对桩周土体也产生一种气压劈裂作用,使桩周形成裂隙,并随之扩展、甚至贯通,水泥粉随高压空气通过劈裂裂

Q(R)-S-T 静载荷试验曲线分类见图 3。从图

隙渗入桩周土内,形成线状水泥石网络(或条带状水泥石)。水泥与土体发生物理化学反应,随着时间的增长水泥水化要吸收大量水分,随着含水量降低,桩间土的强度将提高,同时桩体水泥水化,使水泥石团粒化,土颗粒逐渐变大,加速水的毛细上升运移,促使桩间土水分向桩体运移,使含水量不断减小,故随着粉喷桩休止时间的延长,桩间土在不断的排水固结作用下强度也逐渐提高。

### 3.2 粉喷桩桩身强度的增长机理分析

一方面,粉喷桩施工的钻头为螺旋状叶片,在上提喷粉过程中,叶片以下形成高压雾状水泥粉腔,能使雾状水泥粉均匀扩散到被切割的土层中,使水泥石成千层饼状,层厚约 1.5 cm。同时钻杆反向提升叶片旋转,能使水泥石及时压实。另外桩端 0.5 MPa 的气压也能压实水泥石,通过压缩固结作用使粉喷桩桩身强度得到不断提高。

另一方面,水泥与土体发生物理化学反应,随着时间的增长水泥水化要吸收大量水分。随着桩身水泥石含水量降低,在排水固结的作用下桩身强度得到进一步提高。

## 4 结 语

(1) 粉喷桩施工过程中由于大量高压气流使水泥进入桩间土中,随着粉喷桩龄期的增长,通过水泥的水化作用及排水固结作用,使得粉喷桩的桩身强度及桩间土强度得到不断增强。

(2) 桩间土静力触探值在粉喷桩施工前后对比表明软土底部及桩端持力层强度明显提高。可能是因深度越大,孔底压力越大,使压缩空气产生气动搅拌,而提高了桩端 2~3 m 范围内桩间土强度。

(3) 粉喷桩桩体作为桩间土的排水固结通道,

桩间土通过排水固结作用使得其强度得到进一步提高,这个过程是缓慢的、长期的,但效果良好,能为粉喷桩复合地基提供很大的安全储备,使建筑物沉降明显减小。

(4) 大量实践表明,水泥石强度随着龄期的增长而增大。规范认为龄期超过 90 天后水泥石强度增长缓慢,因而在设计计算公式中取标准养护龄期 90 天时的抗压强度  $f_{cu}$  作为计算标准。超过 90 天后水泥石强度的稳定性如何,一直为工程界所关注,我们的实际资料表明休止 2 130 天左右,水泥石强度是龄期 90 天水泥石强度的 1.52~1.88 倍。我国规范中虽未考虑长期效应水泥石强度的增长,但可将其当作一种很大的安全储备。同时也可看出用规范规定的 28 天龄期所获得的单桩承载力特征值及复合地基承载力特征值过于保守。

## 参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国行业标准.建筑地基处理技术规范(JGJ 79-2012)[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.复合地基技术规范(GB/T 50783-2012)[S].北京:中国计划出版社,2012.
- [3] 刘松玉,钱国超,章定文,等.粉喷桩复合地基理论与工程应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [4] 黄富华,盛文兰,黄洪兵,等.粉喷桩强度的时效性试验研究[C]//第八届全国地基处理学术讨论会论文集.合肥:合肥工业大学出版社,2004.
- [5] 郭巍.常州东坡公园仰苏阁杂填土用粉喷桩加固处理的工程实录[C]//第 11 届全国地基处理学术讨论会论文集.海口,2010.
- [6] 张洪亮,邵丕栋,吕生祥,等.粉喷桩在金坛凤凰城软基处理中的应用[J].常州工学院学报,2008,21(5):23-28.
- [7] 马敏,吴敏刚,柳家海,等.粉喷桩工程事故频发的原因及消除事故的对策[J].苏州大学学报:工科版,2010,30(5):173-181.