粉喷桩桩周土施工效应室内模型试验研究

邓永锋，刘松玉，洪振舜
（东南大学交通学院，江苏 南京 210096）

摘 要：粉喷桩在高速公路软土地基处理工程中得到广泛应用，但是目前对粉喷施工效应问题没有清晰的认识。针对粉喷桩施工效应问题，设计了粉喷桩室内模型试验机并采用大直径PVC管开挖取原状样进行粉喷桩施工试验。通过粉喷桩施工的模型试验，发现对于天然沉积的软土而言施工后桩周土的物理性质没有产生变化，但是桩周土的强度在距桩边一定的范围内强度降低，并且随着喷粉压力增大而增大，离桩边距离减小而增大。

关键词：粉喷桩；施工效应；室内模型试验
中图分类号：TU415 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2008)01－0143－05

作者简介：邓永锋(1978－)，男，福建清流人，讲师，从事地基处理理论研究。E-mail: noden@163.com。

Installation effect of dry-jet-mixing columns by laboratory model tests

DENG Yong-feng, LIU Song-yu, HONG Zhen-shun
(Transportation College, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The dry-jet-mixing columns have been widely used in the soft clay improvement of highway engineering, but the installation effect has not been understood deeply. A model machine was established to study the installation effect. Before the laboratory model tests, the block soils were sampled by the large diameter PVC tubes, and the samples were preserved from disturbance. After the lab oratory model tests, it was found that the physical properties of the surrounding soils were the same as those before installation, but their strength decreased. It was also emphasized that the strength of the surrounding soils decreased with the increase of jet pressure and the decrease of distance between the test point and the column border.

Key words: dry-jet-mixing column; installation effect; laboratory model test

0 引 言

水泥土搅拌桩在软土地基处理工程中得到了广泛应用，但在应用过程中存在如搅拌桩施工效应等问题。水泥土搅拌桩根据施工工艺可以进一步分为粉喷桩和浆喷桩两种，其中粉喷桩采用干粉施工，而浆喷桩采用浆液施工。水泥土搅拌桩施工效应问题，不少学者注意到水泥土搅拌桩施工效应问题，并开展了室内外试验研究。沈水龙[1-2]采用现场测试（Ariake软土）和室内模拟（重塑土）的方法对日本的双搅拌翼的浆喷桩施工后桩周土物理力学特性进行了系统的研究，研究表明对于室内重塑土试验而言，桩周土强度有所提高，离桩边越近强度提高越多，当桩距比超过2时，土体强度变化不大，而对原位具有强结构性Ariake软土而言，桩周土强度会降低。宋修广[3]进行了桩周土现场取样的室内三轴固结快剪试验，试验表明桩周土强度比原状土强度提高。邓永锋等[4-5]通过水泥土搅拌桩施工后桩周土原位静力触探试验（CPT），发现桩周土强度比原状土降低。

综上所述，目前对水泥土搅拌桩桩周土强度变化没有统一的认识，为此本文设计了粉喷桩室内模型试验机，并用PVC管从现场取得大直径原状样进行室内模型试验，重点研究粉喷桩施工对桩周土强度的影响。

1 粉喷桩模型试验机和试验试样制备

目前国内水泥土搅拌桩桩机（粉喷桩系列）一般为铁道部武汉工程机械研究所桩机厂生产的PH-5A型桩机，该桩机主要参数如表1所示，其钻头为螺纹形。

根据模型条件相似比条件，取模型尺寸相似比为10，可以得到模型试验机主要尺寸[6]，如表2所示。

根据该模型比研制的粉喷桩模型试验机的全景图、钻头尺寸与实物图分别如图1～3所示。模型试验机由模型主要由加压系统、粉罐和搅拌桩机三部分组成。加压系统主要控制粉罐内压力，量程为0.05～1 MPa；在压力作用下，水泥经由粉罐、输粉管沿空心钻杆到喷口，喷射到待搅拌的土体中，从而形成粉喷

收稿日期：2007－04－06

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 粉喷桩桩机主要参数

Table 1 Main parameters of the dry-jet-mixing machine

桩机型号	地基加固深度/m	成桩直径/mm	钻机转速/(r • min^{-1})	提升速度/(m • min^{-1})	钻杆规格/mm
PH-5A 型	14.5	500	18,40,61, 90,134	1.96,1.32 0.9,0.6,0.27	114×114

表 2 模型桩机主要参数

Table 2 Main parameters of the model machine

名称	钻杆行程/mm	成桩直径/mm	钻机转速/(r •min^{-1})	提升速度/(mm •min^{-1})	钻杆规格/mm
模拟设备	800	60	4，6，9	60,90,137	20×20

桩桩身。室内模型机施工与现场粉喷桩桩机成桩机理和过程基本一致。

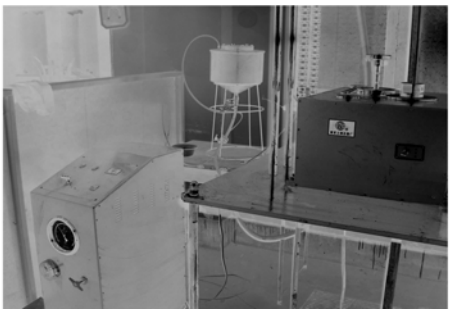


图 1 模型机全景图

Fig. 1 Sketch of the model machine

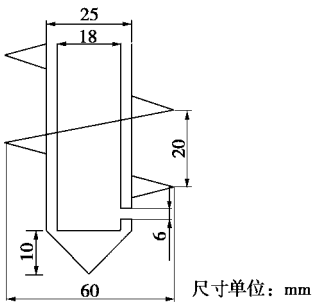


图 2 模拟桩机钻头主要尺寸

Fig. 2 Parameters of auger of the model machine



图 3 搅拌头

Fig. 3 Auger of the model machine

粉喷桩施工土样为连云港典型的浅层海相软土，取土位置在连盐高速公路连云港段 K4+325，已有研究表明该软土具有很高的结构性，灵敏度为 5。试验土样平均物理力学参数为：含水率为 63.4%，液限为 70.1%，塑限为 30.1%，孔隙比为 1.709，渗透系数为 4.6×10^{-7} cm/s，无侧限抗压强度为 30.6 kPa。

室内模型采用原状土进行试验，为此设计了外径为 33 cm，壁厚约为 2 mm，长度为 30 cm 的 PVC 管，并在现场进行静压式开挖取土。具体方法为取样前先将地表开挖至 2～2.5 m 深处的软土层，再用挖掘机静压预制的 PVC 管 40 cm，然后逐个把土样从土体中取出。取出土样后用石蜡把样封好，再把土样运回试验室。运输过程中在木箱和底部铺设一定厚度的稻草，以避免了运输对土样的扰动。PVC 取样筒的尺寸如图 4 所示，取样过程如图 5 所示。

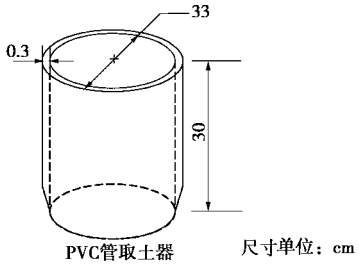


图 4 取样的 PVC 管

Fig. 4 PVC tube for sampling

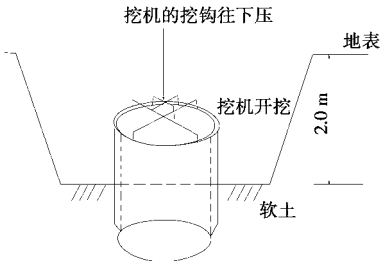


图 5 PVC 管取样

Fig. 5 Sampling by PVC tube

模型试验主要包括以下几个步骤：孔压计埋设，模型试验和试验后取样试验。为了模拟粉喷桩桩施工中桩周土孔压变化，在距桩边 2.0，3.5，6.0，8.5 和 10 cm 埋设了常州江南电子仪器厂和同济大学联合研制的应变式微型孔压计（孔压计示意图如图 6）。孔压计埋设后土样如图 7 所示。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

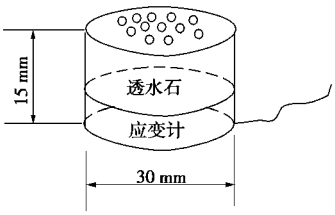


图 6 微型孔压计示意图

Fig. 6 Micro piezometer



图 7 孔压计埋设后土样

Fig. 7 Soil sample after installation of piezometers

2 搅拌桩施工及成桩

试样准备结束后，在土样的中间点进行搅拌桩施工，施工采用单喷双搅的工艺，即在钻头下钻到底部后提升喷粉，而后再下钻和提升进行复搅。搅拌桩施工速度为 137 mm/min。钻头下钻如图 8 所示，钻头提升如图 9 所示。施工过程中对桩周土已埋设的孔压计进行监测以分析桩周土孔隙水压力变化规律。

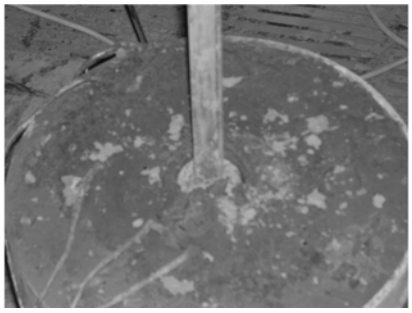


图 8 钻头下钻

Fig. 8 Auger drilling

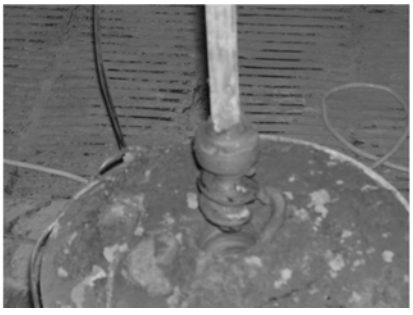


图 9 钻头提升

Fig. 9 Auger heaving



图 10 施工后桩芯

Fig. 10 Dry-jet-mixing column

模拟喷粉试验结束后 7 d 桩芯如图 10 所示，图 10 表明室内模型试验进行的搅拌桩施工生成桩体与现场基本一致，并且具有一定的强度。在模拟喷粉结束后第 7 天对距桩边 4.0，6.5 和 9.0 cm 的土体取样，进行室内试验。试验内容包括土体含水率、液塑限、重度和无侧限抗压试验。

3 模拟试验结果分析

本文试验进行了喷粉压力为 0.1，0.15，0.2，0.25，0.3 和 0.4 MPa 的粉喷模型桩试验。在施工期间监测桩周土超静孔压变化，并在施工结束 7 d 后进行桩周土的物理力学参数试验。本节根据试验得到数据总结分析粉喷桩的施工效应。

（1）桩周土体超孔隙水压力的变化

为了便于分析，在此定义两个参数：桩距比θ和超孔压比η。其中θ为测试点距桩中心的距离 r 与粉喷桩半径 R_c 的比值，即$\theta=r/R_c$，此处 R_c 为 3 cm。超静孔压比η为试验测得的超静孔隙水压力 u 与土体前期固结压力 P_c 的比值，即$\eta=u/P_c$，此处 P_c 为 50.0 kPa。本试验测试超孔隙水压力的位置距桩中心的距离分别为 5.0，6.5，9.0，11.5，13.0 cm，对应桩距比θ值分别为 1.67，2.18，3.0，3.83，4.33。

图 11 为各喷粉压力下粉喷模型桩机施工过程中超静孔压比随时间的变化曲线图。从图 11 中可以得出以下结论：①粉喷桩搅拌施工时会引起桩周土产生超静孔隙水压力，最高值可达到十几千帕；②超静孔压有一个响应范围，此响应范围距桩中心大致为 9 cm 处（$\theta=3$），即超静孔隙水压力的响应范围半径不超过 3 倍粉喷桩半径；③在喷粉结束后很短时间内超静孔隙水压力便消散完成，本试验中超静孔隙水压力从产生至消散完毕所经历时间不超过 4 min；④产生最大的超静孔隙水压力随离桩中心距离的增大而逐渐减少。

（2）桩周土物理性质的变化

模型粉喷桩施工完毕 7 d 后，对桩周土的体积质

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

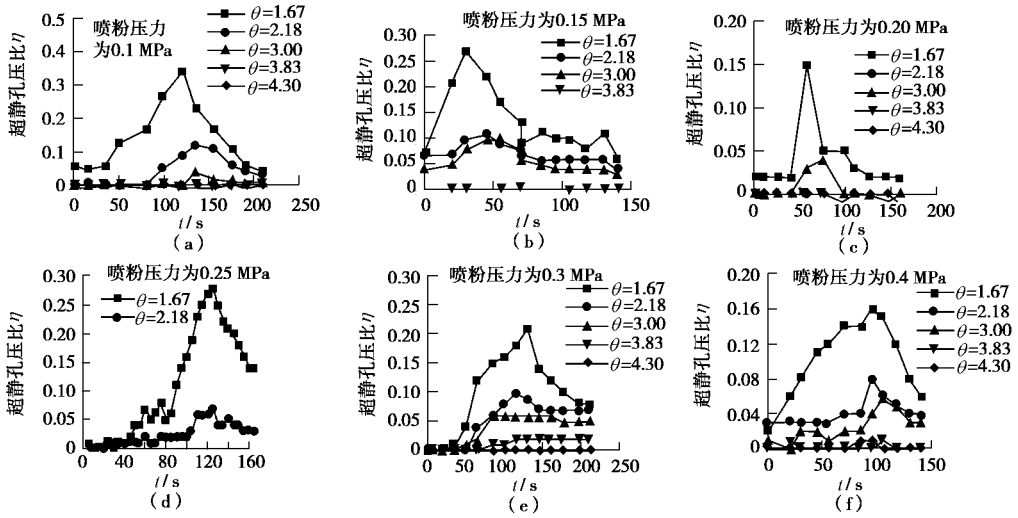


图 11 不同喷粉压力下超孔压比随时间的变化曲线

Fig. 11 Pore pressure during installation of dry-jet-mixing columns

表 3 不同喷粉压力下桩周土物理性质随边距比θ的变化

Table 3 Properties of surrounding soil after installation of dry-jet-mixing columns

喷粉压力/MPa	比重			含水率/%			液限/%		
	θ=2.33	θ=3.17	θ=4.0	θ=2.33	θ=3.17	θ=4.0	θ=2.33	θ=3.17	θ=4.0
0.10	2.61	2.60	2.57	59.1	57.0	58.0	68.1	70.4	67.1
0.15	2.63	2.61	2.62	67.8	67.2	68.5	73.2	73.1	73.2
0.20	2.66	2.67	2.68	68.5	70.4	67.1	72.2	71.5	73.9
0.25	2.66	2.67	2.68	72.5	73.7	74.8	75.5	72.6	76.0
0.30	2.64	2.64	2.65	53.8	53.6	54.7	61.0	61.8	62.4
0.40	2.68	2.67	2.65	58.5	58.0	57.1	73.4	73.4	73.9

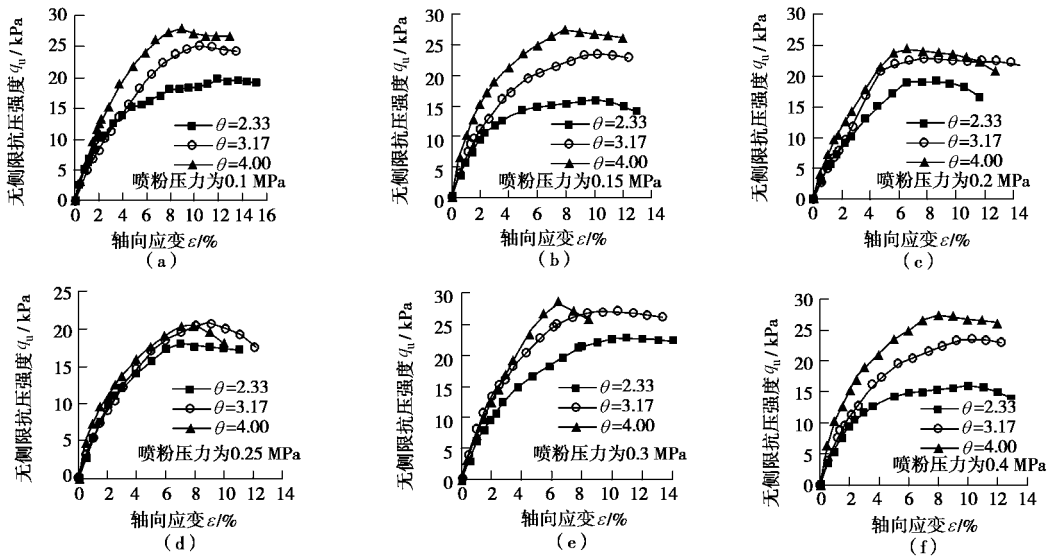


图 12 不同喷粉压力下无侧限抗压强度随边距比的变化

Fig. 12 Unconfined compression strength of surrounding soil after installation of dry-jet-mixing column

量、含水率和液限进行测定，结果如表 3 所示。

从表 3 可以看出，粉喷桩施工对桩周土的物理性质影响很小，体积质量、含水率和液限几乎没有变化。这说明粉喷桩搅拌施工对桩周土的吸水作用、水泥的膨胀作用和水泥中阳离子的扩散作用比较小。

（3）桩周土强度的变化

粉喷桩搅拌施工时，钻头旋转的剪切力和粉气流高压喷射压力会对桩周土体产生扰动。成桩结束 7 d 后用薄壁取样筒在距桩中心 7，9.5 和 12 cm 处取桩周土并进行无侧限抗压强度试验，试验仪器为应变控制式无侧限抗压仪。各喷粉压力下不同桩距比处桩周土无侧限抗压试验曲线如图 12 所示。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

从桩周土体无侧限抗压强度随桩距比和喷粉压力的变化结果（图 12）可以看出：①距桩越近桩周土体的无侧限抗压强度越低，说明扰动程度越大；②从无侧限抗压强度随喷粉压力的变化结果看，总体趋势是喷粉压力越大土体所受的扰动越大；③现场测得原状土体的无侧限抗压强度为 30.6 kPa，而本试验中不同的喷粉压力下桩距比为 4.0 处桩周土体的 q_u 值也在 30 kPa 左右，这说明粉喷桩施工对桩周土体的扰动有一定的影响范围，在距桩边 6.5 cm 以内，即桩距比 $\theta \leqslant 3.16$ 时，土体受施工扰动较大，超出此范围土体基本不受施工扰动。

将图 12 进一步整理得到喷粉压力对桩周土无侧限抗压强度 q_u 的影响关系，如图 13 所示。

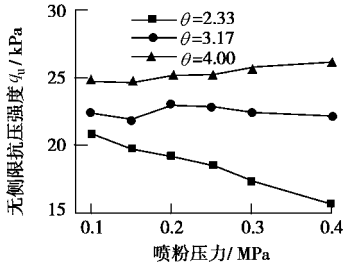


图 13 喷粉压力对无侧限抗压强度的影响

Fig. 13 Influence of jet pressures on unconfined compression strength of soil

从图 13 可很明显地看出：①桩周土体受施工扰动随喷粉压力增大而增大，特别是对于桩距比 θ 为 2.33 处的土体，这一规律十分的明显，此处土体的无侧限抗压强度随喷粉压力的增加几乎成线性降低；②当桩距比 θ 大于 2.33，即土体距桩边的距离超过 4.0 cm 时，土体受施工扰动不大。该扰动可以认为是由取样和运输造成。

4 结　论

粉喷桩在高速公路工程的软基处理中得到广泛应用，但目前对粉喷桩的施工效应问题没有清晰的认识。为此本文设计室内粉喷桩桩机，并用大直 PVC 管从现场开挖取原状样进行室内模型试验，本文重点研究了粉喷桩施工对桩周土物理力学性质影响。通过本文分析得到以下结论。

（1）粉喷桩施工时，超静孔隙水压力的响应范围半径不超过 3 倍粉喷桩半径，最大超静孔压随离桩边距离的增大而逐渐减少。施工结束后超静孔压迅速消散。

（2）搅拌桩施工对桩周土的物理性质影响很小，体积质量、含水率和液限几乎没有变化。

（3）搅拌桩施工后，在 3 倍搅拌桩半径内的桩周土体无侧限抗压强度降低，且距桩越近桩周土体的无侧限抗压强度越低。

（4）桩周土体受施工的扰动程度随喷粉压力的增大而增大，特别是对于桩距比 θ 小于 2.33 处的土体这一规律十分的明显，此处土体的无侧限抗压强度随喷粉压力的增加几乎成线性降低。

参考文献：

[1] SHEN Shui-long. Behavior of deep mixing columns in composite clay ground[D]. Japan: Saga University, 2000.

[2] SHEN Shui-long, MIURA N, HAN Jie, KOGA H. Evaluation of property changes in surrounding clays due to installation of deep mixing columns[C]// Proc Geofrontier, ASCE Special Publication, GSP 120, 2003, **1**: 634－645.

[3] 宋修广. 水泥粉喷桩的理论研究与分析[D]. 南京: 河海大学岩, 2000. (SONG Xiu-guang. Study and calculation on the composite ground with deep jet method pile[D]. Nanjing: Hohai University, 2000. (in Chinese))

[4] 邓永锋. 水泥土搅拌桩桩土相互作用理论与应用研究[D]. 南京: 东南大学交通学院, 2005. (DENG Yong-feng. Research on theory and application of interaction principle between deep mixing columns and surrounding soils[D]. Nanjing: Southeast University, 2005. (in Chinese))

[5] DENG Yong-feng, LIU Song-yu, HONG Zhen-shun. In-situ soil strength after deep mixed columns installation[C]// Proc Geo Congress, ASCE Special Publication, GSP 187, 2006: 253－257.

[6] 林韵梅. 试验岩石力学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984. (LIN Yun-mei. Experimental rock mechanics[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1984. (in Chinese))

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net