

粉喷桩施工对桩周土体扰动的试验与数值模拟研究

张庆松¹, 李术才¹, 刘松玉², 杜广印²

(1. 山东大学 岩土工程中心, 济南 250061; 2. 东南大学 岩土工程研究所, 南京 210096)

摘 要: 软基处理是高速公路建设中的关键技术问题, 粉喷桩是一种经常被采用的方法。通过现场试验, 研究了粉喷桩施工过程中和施工结束后桩周土孔隙水压力的增长消散规律以及桩周土体强度随龄期的变化规律, 并用数值分析的方法进行了进一步分析, 得到了孔隙水压力与深度和距桩水平距离的变化关系, 从试验和理论两个方面揭示了桩周土受粉喷桩施工扰动的变化规律。

关 键 词: 现场实验; 数值模拟; 喷粉桩; 孔隙水压力; 桩周土强度

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Study on test and numerical simulation of soil disturbed around pile by dry jet mixing pile construction

ZHANG Qing-song¹, LI Shu-cai¹, LIU Song-yu², DU Guang-yin²

(1. Research Center of Geotechnical and structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Research Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Soft foundation treatment is a key technology problem in highway construction; dry jet mixing pile is often applied to soft foundation treatment. By the in-situ test, the dissipation laws of pore water pressure in the course of dry jet mixing pile construction and the developing laws of soil strength along with time are studied. According to the numerical simulation analysis, the developing laws of pore water pressure along with depth and horizontal distance are obtained. The developing laws of the soil strength because of disturbance by the dry jet mixing pile construction are revealed from the test aspect and theory aspect.

Key words: in-situ test; numerical simulation; dry jet mixing pile; pore water pressure; soil strength around pile

1 引 言

粉喷桩是一种利用压缩空气输送粉体固化材料, 并通过搅拌叶片使固化材料与软土搅拌混合在一起, 并形成水泥土桩体加固软土地基的方法。大量工程实践表明, 粉喷桩法具有施工简单、快速等优点, 能有效地提高软土地基的稳定性, 减少和控制沉降量^[1, 2]。另一方面, 粉喷桩施工过程中, 桩机进入土体时, 会产生巨大的侧向挤压力, 同时喷粉的过程也有高压气体作用于周围土体上, 在过去的研究中, 这种应力的存在是一直被忽视的^[3]。本文通过现场试验研究施工对桩周土体扰动的规律, 包括施工过程和施工后桩周土孔隙水压力增长消散

规律、桩周土体受施工扰动后的强度变化规律, 并通过数值分析进行了验证。

2 场区地质条件

某高速公路软土段位于古泻湖平原区, 软土厚度为 10~13 m, 最大含水率为 86.4 %, 最大孔隙比达 2.12, 试验段内土层主要可分为 3 层, 分别为灰黄~黄褐色亚黏土、灰~灰黑色亚黏土、灰~灰黑色淤泥质亚黏土, 软土的力学性质极差, 给该段软基处理带来了很大的困难。经分析论证, 拟采用粉喷桩处理该段软土地基, 在施工前做了单桩和群桩试验, 以确定粉喷桩施工对桩周土的影响和复合地基承载力是否满足要求。

3 试验方案

(1) 为了确定单根粉喷桩施工时, 周围土体孔隙水压力增高的范围大小以及孔压增长消散规律, 分别在距桩芯 1, 2, 4 m 处施工钻孔, 埋设孔压计, 埋设深度分别为 2.5, 5, 7.5, 10.5 m, 其剖面布置图见图 1。

(2) 为了揭示施工对桩周土体的影响范围和影响程度以及桩周土强度随粉喷桩龄期的变化规律。试桩施工结束后, 对桩周土分别进行了 1, 4, 7, 14, 28 d 的静力触探和十字板剪切试验。

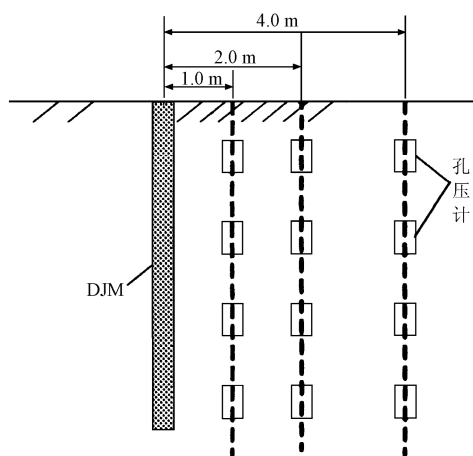


图 1 试桩周围孔压计埋设布置图

Fig.1 Diagram of bore water pressure instrument location

4 试验结果与分析

4.1 喷粉桩施工过程中孔压变化规律

粉喷桩施工过程中会产生侧向应力, 桩周土体在侧向压力的作用下会产生固结, 根据桩周土体孔隙水压的观测结果可以判断土体固结的程度和时间, 进一步可确定粉喷桩施工的影响范围和大小。图 2~4 分别为距试验桩 1, 2, 4 m 的超孔隙水压力消散曲线。

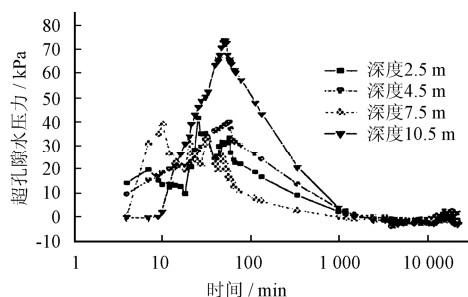


图 2 试桩 1#孔孔隙水压消散曲线

Fig.2 Dissipation curve of pore water pressure of No.1 hole

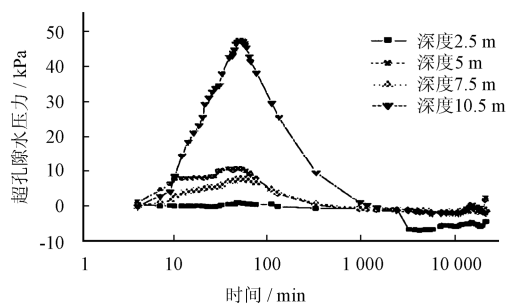


图 3 试桩 2#孔孔隙水压消散曲线

Fig.3 Dissipation curve of pore water pressure of No.2 hole

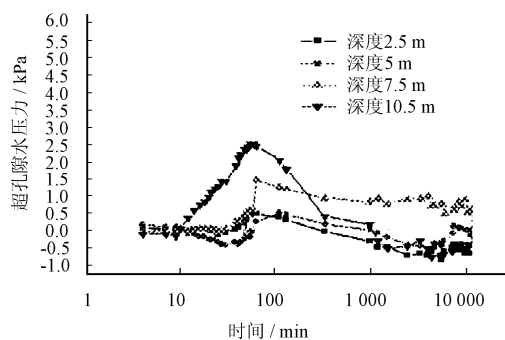


图 4 试桩 3#孔孔隙水压消散曲线

Fig.4 Dissipation curve of pore water pressure of No.3 hole

在整个施工过程中, 分析孔压的变化可知:

(1) 桩施工所产生的侧向压力是桩周土体固结的动力。施工使周围土体的孔隙水压力增大, 并且在施工结束后逐渐消散。

(2) 孔隙水压力的增长幅度随距桩芯距离的增大而减小, 在距桩芯 1 m、孔深 10.5 m 处, 超孔隙水压力最大值达 74 kPa, 最大值在施工过程中达到。

(3) 粉喷桩施工的影响范围: 根据观测结果, 距桩芯 4.0 m 的 3 号孔孔压变化非常微小, 并且在很短的时间内消散结束。可以断定, 单纯粉喷桩施工的影响范围大约在周边 4 m 之内。

(4) 孔压消散结束的时间随着与桩芯距离的不同而不同, 距桩芯越近, 消散时间越长, 全部消散结束的时间约为 2 d。

(5) 高压喷气可以提高土体的超孔隙水压力值, 缩短达到最大值的时间和消散时间, 有利于加大土体固结的程度和缩短固结时间。

4.2 桩周土强度变化规律

试桩施工结束后, 对桩周土分别进行了 1, 4, 7, 14, 28 d 的静力触探和十字板剪切试验, 以揭示施工对周围土体的影响范围和影响程度以及桩周土强度的变化规律。表 1 为距桩边 0.5 m 处土层分层

静探结果统计,距桩边 0.2, 1.0, 2.0 m 处的试验结果在本文中不再列出。

表 1 距桩边 0.5 m 土体静探结果统计表
Table 1 Statistics of static cone penetration test

土层 编号	锥尖阻力 q_c / MPa				侧壁阻力 f_s / kPa			
	原状土	7 d	14 d	28 d	原状土	7 d	14 d	28 d
①	0.32	0.30	0.83	0.40	18.1	20.62	19.36	27.56
②-1	0.27	0.30	0.46	0.23	7.19	8.58	7.64	6.64
②-2	0.31	0.30	0.29	0.33	4.39	4.22	4.33	8.11
③	1.66	1.48	1.73	1.60	52.9	47.89	49.14	60.56

表 2 为试桩抗剪强度成果统计,表中列出了上部两个土层抗剪强度在施工前和施工后不同时期的变化。

表 2 试桩 1 抗剪强度成果表
Table 2 Statistics of vane shear test of pile 1

与桩边 的距离	龄期土 层编号	C_u / kPa			
		施工前	4 d	14 d	28 d
0.2 m	①	20.9	22.9	25.4	10.2
	②	16.8	18.4	20.3	7.8
0.5 m	①	20.9	35.0	29.5	25.96
	②	16.8	24.3	20.0	19.0
1.0 m	①	20.9		24.8	24.6
	②	16.8		24.9	22.1
2.0 m	①	20.9		27.3	24.08
	②	16.8		23.8	23.2

通过对试桩的桩周土的静力触探和十字板剪切试验,可以看出:

(1) 桩周土的静探试验获得的锥尖阻力和侧壁阻力曲线表明:受打桩施工扰动的原状土在第 7 d 开始逐渐恢复,随着龄期的增长,桩周土强度总体呈现增大的趋势。

(2) 距桩边 0.2 m 和 0.5 m 处的土体,其静探锥尖阻力和侧壁阻力变化幅度较大;1.0 m 和 2.0 m 处变化较小,桩周土的强度增长幅度随着与桩边距离的增加而减小。

(3) 随着龄期的增长,桩周土体的抗剪强度也呈增大的趋势,距桩边 0.5 m 处土体抗剪强度提高的幅度最大。该处土体的灵敏度也是逐渐降低的。

(4) 桩周土在粉喷桩施工后变化过程是:首先受施工扰动强度降低,随着孔隙水压的消散,土

体开始固结,强度恢复,离桩近的土体随着时间的延长强度将逐步提高。

5 数值模拟分析

为了进一步分析粉喷桩施工对桩周土的影响,应用数值分析方法对问题进行了深入分析。采用应力和渗流耦合的方法实现固结分析^[4~8],为了简化计算,在合理和满足工程精度的前提下,作如下基本假定:

(1) 单桩施工可以作为轴对称问题来处理;

(2) 土体为饱和土体;

(3) 土体材料是均匀各向同性的弹塑性材料,符合修正的剑桥模型;

(4) 粉喷桩施工的过程可以视为一个分段的侧向挤土过程。

5.1 孔压随着桩水平距离的变化规律

计算结果得到了桩周土体孔隙水压力在施工中和施工后的变化规律。图 5 和图 6 为不同时刻不同深度处孔压随水平距离的变化曲线。

从图中可以看出,某一深度处的孔隙水压力随着桩水平距离的增大而减小,在距离桩约 5 m 处的孔压变化很微小,说明粉喷桩施工的影响范围在 5 m 之内。由相同时刻孔压的增幅可以看出,随深度的增加,超孔隙水压力呈现出增加的趋势。

5.2 孔压随深度的变化规律

为了研究随深度的增加超孔隙水压力的变化规律,图 7 和图 8 分别给出了距桩 1, 2 m 处孔隙水压力随深度和时间的变化曲线,图中最下部的曲线为初始时刻的静压曲线,其他几条曲线为不同时刻受施工影响后的孔压值。即成桩过程中几个时刻的孔隙水压力值。

从图中可以看出,超孔隙水压力随深度的增加逐渐增大,增大的趋势基本呈线性,这也在现场中测到的深部超孔压大于浅部超孔压的事实相吻合。随着距桩水平距离的增大,超孔压的增幅逐渐减小,距桩 5 m 处的孔隙水压力增加幅度很小,不同深度处的差别也很小,进一步验证了粉喷桩施工的影响范围约 4~5 m 左右。从总的计算结果看出:

(1) 整个施工过程中,孔隙水压力自浅部到深部依次达到最大值;

(2) 距桩距离近的超孔压大于远处的超孔压,即施工有一个有效的影响范围;

(3) 深部的超孔压值大于浅部的超孔压值;

(4) 施工结束后,孔压随时间逐渐消散,桩周土完成固结过程。

(5) 当计算时间步到 1 000 min 时, 各点处的超孔压基本上都降至 5 kPa 以下, 说明施工结束后经过 1 d 左右的时间打桩的影响即消失。

计算结果与现场实测孔压曲线存在差异, 主要原因是: 有限元计算模型与所用的土层参数和实际地层及土层参数存在差异; 以分段挤土的方法模拟施工只是一种近似的方法, 难以十分准确地反映粉喷桩的真实施工过程。

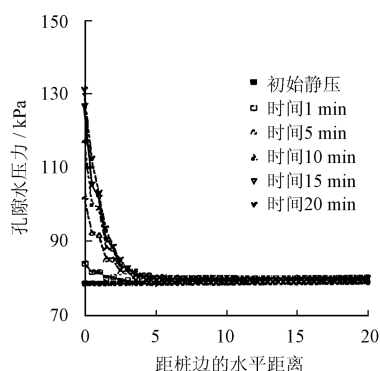


图 5 7.5 m 深度处孔压随水平距离的变化

Fig.5 Super bore water pressure curve in the depth of 7.5 meter with horizontal distance

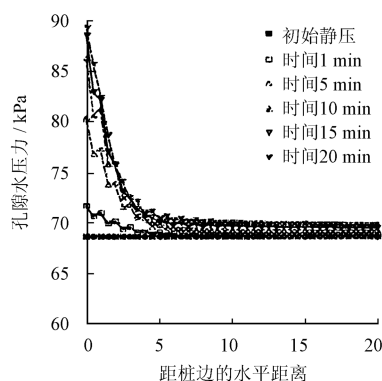


图 6 8.5 m 深度处孔压随水平距离的变化

Fig.6 Super bore water pressure curve in the depth of 8.5 meter with horizontal distance

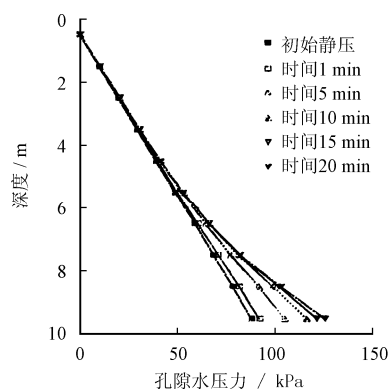


图 7 距桩 1 m 处孔隙水压力随深度的变化

Fig.7 Super bore water pressure curve with depth away from pile 1 meter

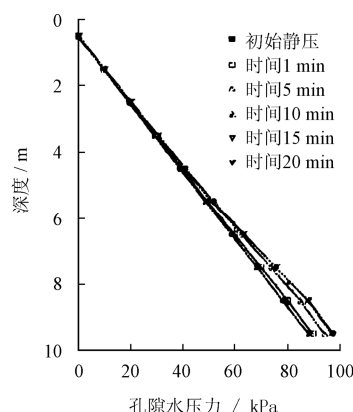


图 8 距桩 2 m 处孔隙水压力随深度的变化

Fig.8 Super bore water pressure curve with depth away from pile 2 meter

5 结 论

(1) 现场测试获得了粉喷桩施工过程中和施工后桩周土的孔隙水压力增长消散规律, 通过桩周土体不同龄期的静力触探和十字板剪切试验, 得到了打桩施工扰动后的土体强度变化规律。

(2) 应用数值分析方法, 模拟了粉喷桩的施工过程和施工后桩周土的固结过程, 得到了孔隙水压力的增长消散规律, 孔隙水压力随深度和水平距离的变化规律。

(3) 试验和数值分析证明了粉喷桩施工产生的侧向压力和高压喷气压力是桩周土体固结的动力, 可以充分利用这种侧向压力, 在桩周设置排水路径, 以加快土体的固结, 从而达到变不利为有利和提高粉喷桩处理效果的目的。

参 考 文 献

- [1] 刘松玉. 公路地基处理[M]. 南京: 东南大学出版社, 2000.
- [2] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [3] 刘松玉. 水泥土搅拌法加固高速公路软土地基的测试研究[J]. 地基处理, 1999, (2): 42—47.
- [4] 朱泓, 殷宗泽. 打桩效应的有限元分析[J]. 河海大学学报, 1996, 24(1): 56—61.
- [5] 许清侠. 有限元分析打桩及打桩后桩周土再固结[J]. 建筑科学, 2000, (1): 35—39.
- [6] 姚笑青. 饱和软土中沉桩引起的孔隙水压力估算[J]. 岩土力学, 1997, 18(4): 31—35.
- [7] 唐世栋, 何连生, 傅纵. 软土地基中单桩施工引起的超孔隙水压力[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 725—732.
- [8] 徐永福, 傅德明. 结构性软土中打桩引起的超孔隙水压力[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 52—55.