

粉喷桩加固高速铁路软土地基的效果分析

张强¹, 陈泽新¹, 许旭明¹, 曹志刚², 范昌杰²

(1. 福建永强岩土股份有限公司, 福建 龙岩 364000; 2. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058)

摘要: 本文结合非洲吉布提港区铁路连接线工程, 对路堤荷载作用下粉喷桩加固高速铁路软土地基的应力分布和变形特性进行研究。通过 PLAXIS 3D 有限元软件, 建立了路堤荷载下粉喷桩加固软土地基的模型, 并分析了路堤荷载作用下粉喷桩及软土地基的应力分布, 对比了加固前后地基变形发展情况, 以及桩端位于不同持力层时的地表沉降, 进而对粉喷桩加固软土地基的效果进行评价。研究表明, 当桩端持力层位于角砾岩中时, 加固后的地表沉降明显减小, 且粉喷桩能有效改变软土地基中的应力分布。本文提出了粉喷桩加固高速铁路软土地基应力分布和变形特性分析模型, 研究成果可为国内外类似工程提供一定经验。

关键词: 路堤荷载; 软土地基; 粉喷桩; 有限元模拟

中图分类号: U455.4

文献标识码: A

文章编号: 2096 - 7195(2019)02 - 0044 - 05

作者简介: 张强(1977 -), 男, 本科, 高级工程师, 国家一级注册建造师, 主要从事岩土工程现场施工管理等相关工作。E-mail: yqytzq@163.com。

Effect of dry jet mixing method improving soft soil foundation of high speed railway

ZHANG Qiang¹, CHEN Ze-xin¹, XU Xu-ming¹, CAO Zhi-gang², FAN Chang-jie²

(1. Fujian Yongqiang Geotechnical Co., Ltd. Longyan 364000, China; 2. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China.)

Abstract: Based on the railway connection line project in Djibouti, Africa, this paper studies the stress distribution and deformation characteristics of high-speed railway soft soil foundation improved by dry jet mixing method (DJM) under the action of embankment load. Based on PLAXIS 3D finite element software, the model of soft soil foundation improved by DJM method under embankment load was established. The stress distribution of powder jetting pile and soft soil foundation under embankment load was analyzed, the development of foundation deformation before and after reinforcement, and the comparison of surface settlement when the pile tips are located in different bearing layers was compared. Then the effects of DJM method to improve the soft soil foundation are evaluated. This study shows that when the pile tip is located in the breccia, the surface settlement after reinforcement is significantly reduced, and the powder jetting pile can effectively change the stress distribution in the soft soil foundation. In this paper, the analysis model of stress distribution and deformation characteristics of high-speed railway soft soil foundation improved by dry DJM method is proposed. The research results can provide some experience for similar projects at home and abroad.

Key words: embankment load; soft soil foundation; powder jetting pile; finite element simulation

0 引言

软土路基沉降分析是道路工程中的设计重点, 路基差异沉降若得不到有效控制将严重影响道路的使用性能与行车安全^[1-2]。粉喷桩即粉体喷射搅拌桩^[3], 由于其使用干粉为固化剂能充分吸收软土中的水分, 对于含水量较高的软土来说, 该地基处理方式效果比其他地基处理方法效果更好, 故被广泛应用于沿海地区的高速公路软土地基处理。目前对于粉喷桩的工作机理研究成果很多。刘观仕^[4]等采

用 FLAC 3D 程序分析了桩长、桩距、桩侧摩阻力、铺设土工格栅与否及填土速率等对新老路基变形协调的影响。蒋天恩^[5]通过现场观测试验对粉喷桩的受力特性和加固效果进行了研究, 试验表明采用粉喷桩加固桥头软基可以大大降低地基沉降和侧向变形, 粉喷桩受力以中上部压缩为主, 桩土应力比随荷载变化而动态调整。张硕^[6]通过有限元法分

析了粉喷桩复合路基加固区和下卧层压缩量的变化规律,并给出了粉喷桩复合路基沉降计算的普遍表达式,通过大量的计算得出表达式中的修正系数。郭金玲^[7]采用 MIDAS/GTS 软件分析研究了粉喷桩在施工过程中喷水泥粉时的喷射压力大小对地基变形的影响,以及由于喷射压力产生的超孔隙水压力扩散范围与消散时间的基本规律。

目前的研究基本基于路堤荷载下对粉喷桩桩土应力比^[8-11]进行研究,对于道路荷载下的粉喷桩加固体变形沉降分析和地基应力分布研究较少。本文依据非洲吉布提港区铁路连接线这一工程实际,通过 PLAXIS 3D 有限元软件,建立路堤荷载下粉喷桩复合地基分析模型,模拟粉喷桩加固体与地基应力分布。通过对路堤荷载下天然未处理地基与粉喷桩加固后地基两种情况进行对比分析,研究粉喷桩加固软土地基路堤的沉降变形规律,以及路堤荷载下粉喷桩对于软土地基的加固机理,研究成果可为国内外类似工程提供一定经验。

1 工程概况

1.1 工程地质

初步地质勘查报告显示场地主要工程地质层分层情况如下:①0~3 m,人工填土,褐色,稍湿,松散~稍密,主要成分为碎石及粉土,碎石砾径 2~7 cm,碎石含量约占 65%,淤泥,灰黑色,软塑,主要成分为黏粒,夹 10%左右细砂;②3~9 m 淤泥,灰黑色,软塑,主要成分为黏粒,干强度中等,无振摇反应,有光泽,含 35%圆砾,粒径 2~3 mm;③9~13 m 主要是角砾岩,褐黄色,强风化,岩芯呈碎块状,块径 2~6 cm;④13~14 m 玄武岩,灰褐色,强风化,岩芯呈碎块状,块径 2~7 cm;⑤14~15 m 玄武岩,青灰色,弱风化,块状构造,节理发育,岩芯呈短柱状,节长 6~12 cm, RQD 基本为 0。

1.2 桩基参数

粉喷桩初步设计桩长 6 m,桩端持力层位于②淤泥层中,桩直径为 500 mm,桩间距 1200 mm,采用 42.5 级普通硅酸盐水泥。

2 有限元建模

通过 PLAXIS 3D AE 建立有限元模型,如图 1 所示。模型 Y 方向长度取 80 m, X 方向宽度取 40 m, Z 方向深度取 20 m,①素填土和②淤泥采用小应变土体硬化模型(HSS 模型),③角砾岩采用摩尔库

伦模型,④玄武岩采用节理岩体模型,具体土层参数详见表 1。

路堤采用实体单元模拟,路堤高 2 m,底面宽 12 m,顶面宽 10 m。粉喷桩采用将线单元赋予摩擦桩属性来模拟,初步设计桩长 6 m,直径 0.5 m,桩间距 1.2 m,布置在模型正中间 12 m×6 m 的范围内共 147 根,如图 2 所示。

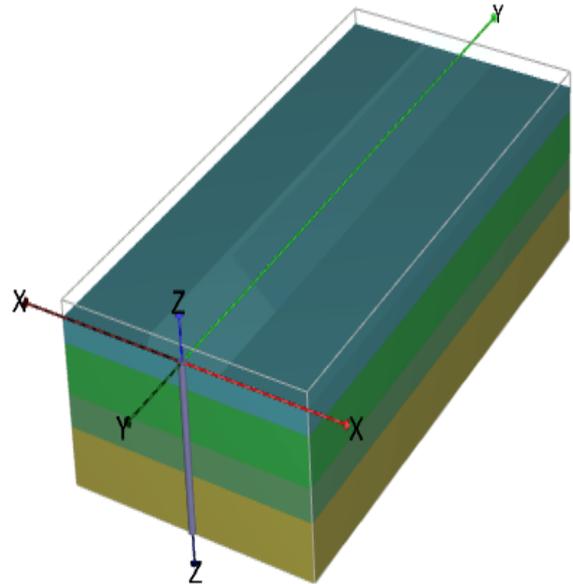


图 1 有限元模型

Figure 1 Finite element model

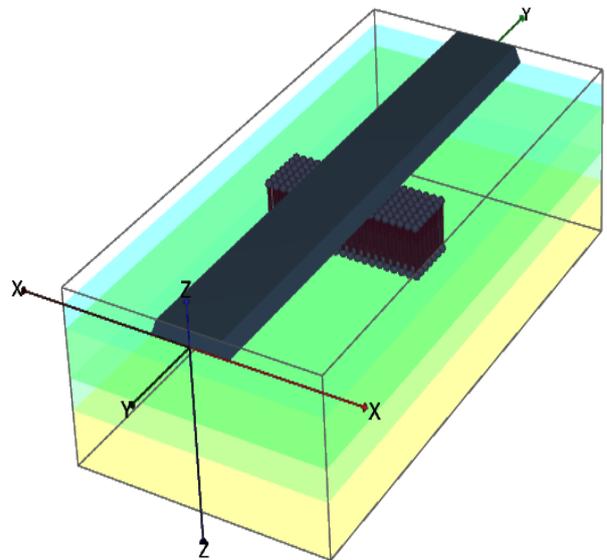


图 2 粉喷桩及路堤荷载布置

Figure 2 Dry jet mixing piles and embankment load arrangement

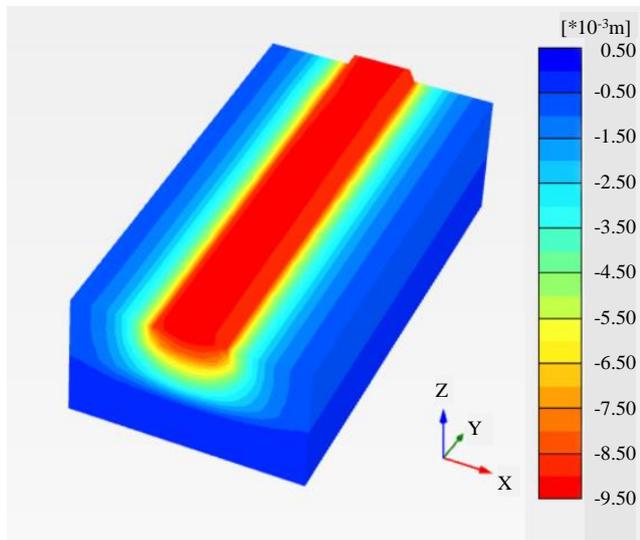
表 1 土层参数表

Table 1 Soil parameters

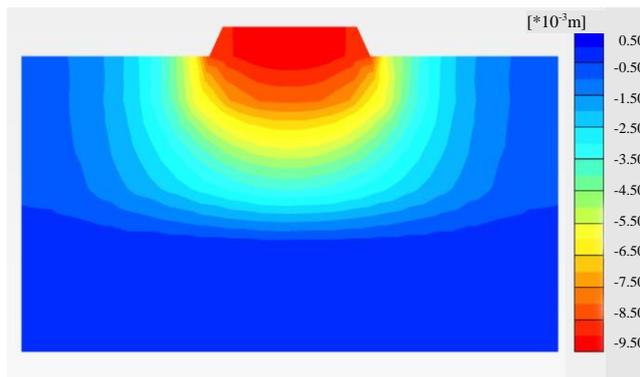
土层编号	厚度 /m	γ /(kN m^{-3})	E' /MPa	E_{50}^{ref} /MPa	$E_{\text{oced}}^{\text{ref}}$ /MPa	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ /MPa	c' /kPa	φ' / $^{\circ}$	ψ' / $^{\circ}$	$\gamma_{0.7}$ / 10^{-4}	$G_{0\text{ref}}$ /kPa	K_0	R_f
① 素填土	3.0	18.0	—	4.90	3.92	49.00	4	30	0	3	85	0.50	0.9
② 淤泥	6.0	17.3	—	4.40	3.30	38.00	3	20	0	3	50	0.66	0.9
③ 角砾岩	4.0	21.2	30.00	—	—	—	30	35	5	—	—	1.00	—
④ 玄武岩	7.0	28.7	50.00	—	—	—	—	—	—	—	—	1.00	—

3 粉喷桩加固软土地基效果评价

图 3 是未采用粉喷桩加固软土地基时，施加路堤荷载后的位移云图。



(a) 整体位移云图

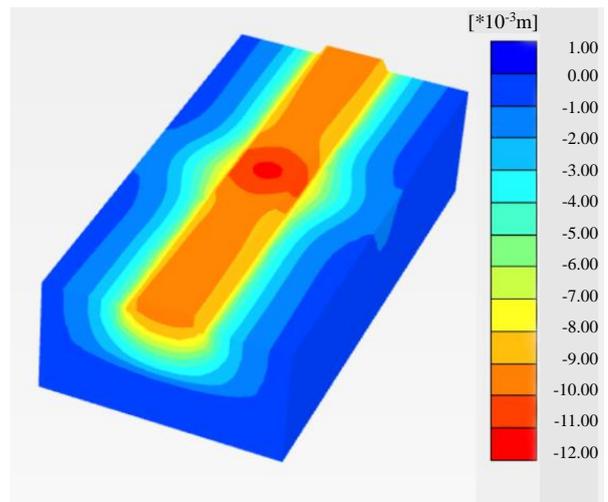


(b) 横断面位移云图

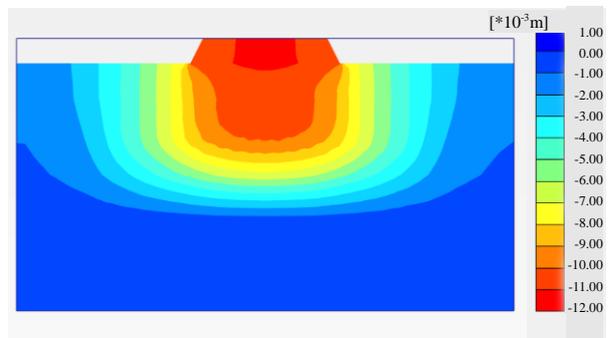
图 3 未采用粉喷桩加固时的地表沉降云图

Figure 3 Surface settlement cloud map when no cement injection pile is used

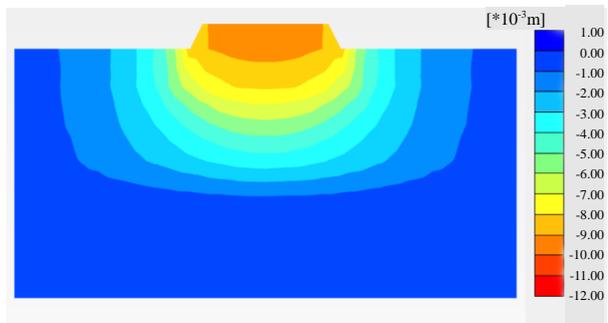
图 4 是采用设计桩长 6 m，桩端持力层位于②淤泥层的粉喷桩加固软土地基，并施加路堤荷载后的位移云图。



(a) 整体位移云图



(b) 加固区横断面位移云图



(c) 非加固区横断面位移云图

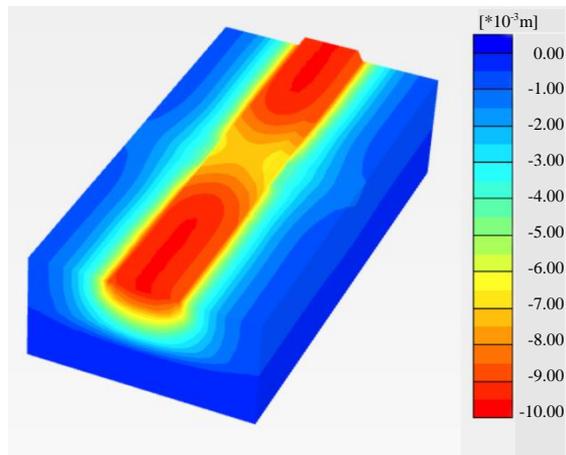
图 4 采用 6 m 深粉喷桩加固后的地表沉降云图

Figure 4 Surface settlement nephogram strengthened by 6 m depth dry jet mixing pile

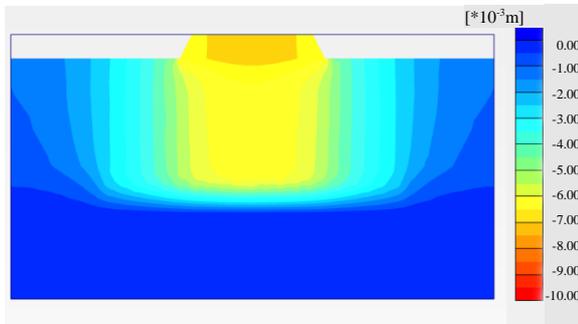
对比图 3 和图 4, 未采用粉喷桩加固软土地基时, 地表最大沉降为 9.48 mm; 采用 6 m 桩长的粉喷桩加固软土地基后, 粉喷桩加固区域地表最大沉降为 11.25 mm, 未加固区域地表最大沉降为 9.53 mm。施加路堤荷载后, 粉喷桩加固区域相比未采用粉喷桩加固时, 地表最大沉降反而增大了 18.7%。

因此, 需要改进粉喷桩设计参数, 改为桩长 10 m, 桩端持力层位于③角砾岩中, 其他参数不变。

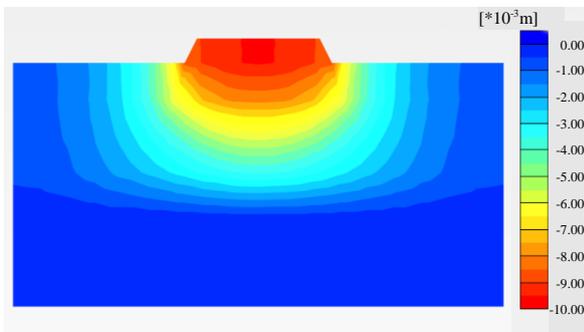
图 5 是采用设计桩长 10 m, 桩端持力层位于②角砾岩层的粉喷桩加固软土地基, 并施加路堤荷载后的位移云图。



(a) 整体位移云图



(b) 加固区横断面位移云图



(c) 非加固区横断面位移云图

图 5 采用 10 m 粉喷桩加固后的地表沉降云图

Figure 5 Surface settlement nephogram strengthened by 10 m powder jet pile

对比图 3 和图 5, 未采用粉喷桩加固软土地基时, 地表最大沉降为 9.48 mm; 采用 10 m 桩长的粉喷桩加固软土地基后, 粉喷桩加固区域地表最大沉降为 7.34 mm, 未加固区域地表最大沉降为 9.58 mm。施加路堤荷载后, 粉喷桩加固区域相比未采用粉喷桩加固时, 地表最大沉降减小了 22.6%, 加固效果显著。

图 6 是三种工况下的横断面地层变形对比图, 横坐标为模型中的 X 轴坐标。从图中可以看出, 当粉喷桩桩端持力层位于物理性质较好的角砾岩中时, 加固区地表沉降曲线有明显的改善, 反之, 当桩端持力层位于淤泥层中时, 加固区地表沉降反而有较大幅度的增大。

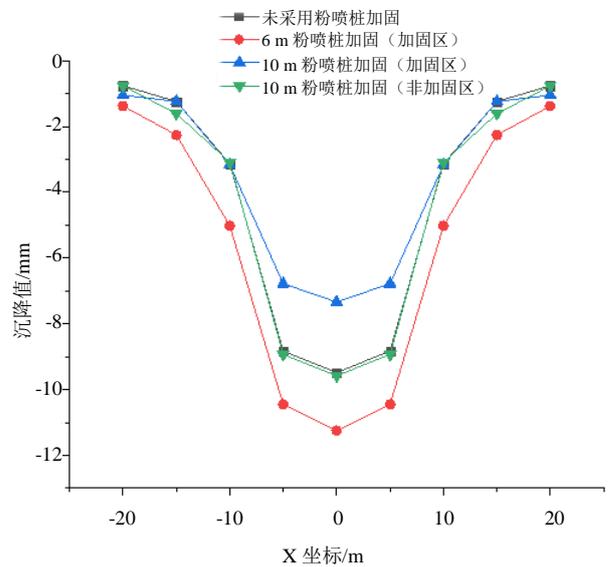


图 6 横断面地层变形对比图

Figure 6 Cross-section deformation comparison chart

4 桩顶应力分析

取粉喷桩桩端持力层位于③角砾岩层的情况, 对施加路堤荷载前后的桩顶应力变化进行分析。

图 7 是粉喷桩加固地基后, 未施加路堤荷载时的桩顶应力分布图; 图 8 是施加路堤荷载后的桩顶应力分布图。

对比图 7 和图 8, 结合数值模拟计算结果, 结果表明: (1) 未施加路堤荷载时, 加固区域桩顶应力整体分布较为均匀, 其桩顶最大应力为 -16.36 kN/m²; (2) 采用粉喷桩加固地基时, 施加路堤荷载后应力较大的区域集中在路堤覆盖的加固区域, 其桩顶最大应力达到了 -61.81 kN/m², 即路堤荷载使粉喷桩桩顶最大应力增大了 2.78 倍; (3) 粉喷桩加固区域外, 路堤边坡处的土体应力大于路堤正下方的土体应力。

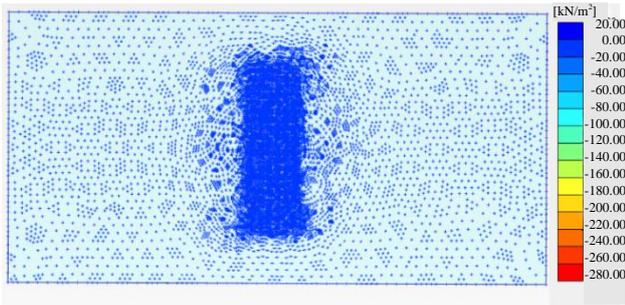


图7 桩顶应力分布（施加路堤荷载前）

Figure 7 Pile top stress distribution (before the embankment load is applied)

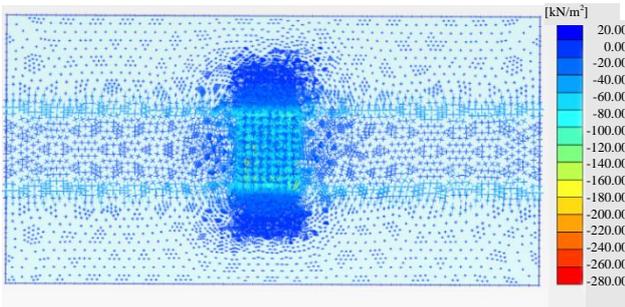


图8 桩顶应力分布（施加路堤荷载后）

Figure 8 Pile top stress distribution (after the embankment load is applied)

5 结论

本文通过 PLAXIS 3D AE 建立有限元模型，对路堤荷载作用下粉喷桩加固地基的承载特性和影响机理展开了研究，得出以下结论：

(1) 采用粉喷桩加固软土地基时，桩端持力层的选择非常重要，当桩端持力层位于物理性质较好的岩石层时，路堤荷载作用下的地表沉降较未加固或者桩端持力层位于淤泥层时，均有明显的改善。

(2) 常规路堤荷载会使路堤下方加固区域内

的粉喷桩桩顶应力增大 2~3 倍，在软土路基工程中需要格外注意由此带来的地层破坏。

(3) 路堤边坡处的土体应力大于路堤正下方的土体应力，因此设计施工过程中，需要对路堤边坡处的土体进行进一步地加固。

参考文献

- [1] 贾鹏云. 高速公路软土地基沉降分析及处理对策[J]. 山西交通科技, 2012, 1: 49-51.
- [2] 陈睿. 基于 ABAQUS 对高速公路软土地基拓宽变形性状的应用研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2014.
- [3] 陈仲颐, 叶书麟. 基础工程学[M]. 北京: 北京中国建筑工业出版社, 1997.
- [4] 刘观仕, 孔令伟, 李雄威, 丁锋, 顾建武. 高速公路软土路基拓宽粉喷桩处治方案分析与验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 2: 309-315.
- [5] 蒋天恩. 粉喷桩复合地基试验研究与数值模拟分析[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [6] 张硕. 粉喷桩复合路基沉降的预测与计算[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2013.
- [7] 郭金玲. 粉喷桩加固软土地基对周围结构及地基的影响分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
- [8] 俞亚南. 粉喷桩加固软土路基试验研究与沉降分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [9] 冯瑞玲, 谢永利, 杨晓华. 尹中高速公路粉喷桩复合地基桩土应力比现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 22: 4190-4196.
- [10] 王建华. 粉喷桩加固高速公路机理与有效桩长分析[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [11] 李雪刚. 粉喷桩加固软基的工程应用与计算分析[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2007.