

复合成孔灌注桩技术工程应用研究

宋振亚¹, 张浩^{1*}, 王中¹, 周同和²

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学综合设计研究院有限公司, 河南 郑州 450002)

摘要: 湿陷性黄土地基处理时, 受到扬尘、噪音等环境治理的影响, 挤密(灰)土桩、夯实水泥土桩等常规处理方法的应用逐渐受到限制。针对基底下分布有限厚度湿陷性黄土的工况, 提出一种上部静压挤土、下部长螺旋取土复合成孔的灌注桩技术, 将挤土密实效应和竖向增强作用有效结合, 应用于湿陷性黄土地基的复合地基加固或桩基础。较常规湿陷性地基处理方法相比, 该技术有较好的质量保证, 施工中不易发生缩孔、断桩等问题。工程实践与现场试验分析表明, 该技术适用于处理基底以下一定厚度的湿陷性黄土地基, 亦适用于受扬尘、噪音等环境治理限制条件下的湿陷性地基处理工程, 可为类似场地地基处理方案提供参考。同时对挤密桩间距的设计方法进行了分析, 提出目标干密度的概念并应用于挤密桩间距的确定。

关键词: 地基处理; 湿陷性; 复合成孔; 灌注桩; 桩间距; 目标干密度

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)01-0049-06

Application of cast-in-situ pile technology with combined hole-forming

SONG Zhen-ya¹, ZHANG Hao^{1*}, WANG Zhong¹, ZHOU Tong-he²

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China;

2. Zhengzhou University Comprehensive Design and Research Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450002, Henan, China)

Abstract: In the treatment of collapsible loess ground, the application of conventional treatment methods such as compacted soil (or lime-soil) piles and rammed cement-soil piles is gradually restricted due to the impact of environmental such as fugitive dust and construction noise. A combined hole-forming cast-in-situ technology which combines compacting effect and vertical reinforcement effect was developed to treat the collapsible ground with limited thickness. The effective combination of the compaction effect of the soil and the vertical reinforcement is applied to the composite foundation reinforcement or pile foundation of the collapsible loess foundation. Compared with conventional collapsible foundation treatment methods, this technology has better quality assurance. Problems such as shrinkage holes and broken piles are not easy to occur during construction. The results of engineering application and field test show that this technology is suitable for the treatment of collapsible loess foundations with a certain thickness below the base, and also for the treatment of collapsible foundations under the constraints of environmental control such as dust and noise. This work can provide a reference for the foundation treatment scheme of similar sites. The design method of the pile spacing is also discussed. The concept of target dry density is proposed and applied to determine the spacing of compacted piles.

Key words: ground improvement; collapsible; combined hole-forming; cast-in-situ pile; pile spacing; target dry density

0 引言

湿陷性地基处理一直是岩土工程技术人员关注的难点和热点。目前, 湿陷性黄土地基的处理途径主要有3个: 土体加密、土体加固和荷载传递。其

中, 土体加密即在有效利用原地基的基础上, 通过一些技术手段提高地基土的密实度, 消除地基土的湿陷性并提高承载力, 如强夯法、挤密(灰)土桩法、DDC法等^[1-3]。土体加固则是向地基中添加胶结性材料(如水泥、粉煤灰等)以起到增强土体整

收稿日期: 2022-02-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51608490)。

作者简介: 宋振亚(1999—), 男, 河南新乡人, 硕士研究生, 从事地基基础工程方面的研究。E-mail: songzhenya0223@163.com。

*通信作者: 张浩(1985—), 男, 河南郑州人, 博士, 副教授, 从事地基基础工程方面的研究。E-mail: tmzhanghao@zzu.edu.cn。

体性,消除湿陷性的作用。荷载传递法是采用桩基础穿过湿陷性黄土层,将上部结构荷载直接传递至下部坚实的地基土层中,如钻孔(挖孔)灌注桩、夯扩灌注桩等^[4-5]。虽然工程中采用素土、灰土等挤密桩和夯实水泥土桩等技术日益趋于成熟,但是受到扬尘、噪音等环境治理的影响,这些技术手段逐步受到限制。

近年来,随着湿陷性黄土地基工程实践的深入,采用挤密(灰)土桩消除湿陷性后再设置刚性桩的多桩型复合地基,消除或部分消除湿陷性后再设置桩基的技术(如沉管挤土灌注桩、预制管桩等)^[6-8],应用越来越广泛。前者采用多桩型的复合地基,虽然能充分发挥挤密桩和刚性桩的特点和优势,但施工中各工序的交互影响不可避免,且设计与质量控制更为复杂,扬尘等问题仍没有得到很好的解决;后者同样具有一定的局限性,主要表现在后续施工桩易对已完成灌注桩产生挤土效应而可能发生缩颈或断桩。

据此,本文针对浅部有限厚度湿陷性地基提出一种上部湿陷性土层采用挤密成孔、下部非湿陷性土层采用长螺旋取土干作业复合成孔的灌注桩技术,即在设计的湿陷性土层处理深度范围内,采用静压桩机将圆形“铅笔状”钢管压入土中、拔出后形成桩孔,再用长螺旋钻机进行下部取土形成下部桩孔,而后进行后注浆灌注桩施工。该技术与传统沉管灌注桩、预制桩的施工不同,可以预先批量成孔后再浇筑混凝土桩,这样可有效避免后续桩的施工对已形成强度桩的损伤,且复合成孔灌注桩即可直接应用于桩基础,也可与桩间土形成刚性桩复合地基,应用前景更为广泛。

1 复合成孔工艺原理

复合成孔工艺流程如图1所示。

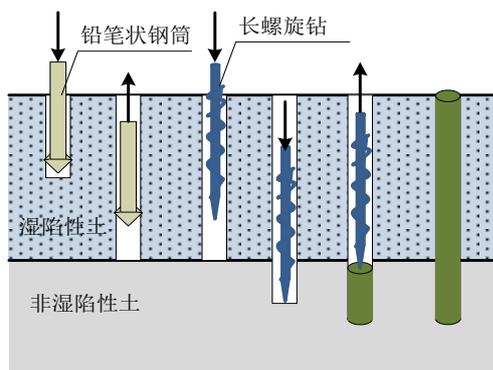


图1 成孔工艺

Fig. 1 Construction process

首先,采用静压机在设计桩位处进行沉管,为便于施工和起管,采用“铅笔状”钢筒;待钢筒沉管至上部湿陷性土层的下标高时,拔出沉管,采用长螺旋钻进行上部修孔和下部取土,直至桩长设计深度;拔出长螺旋钻杆,泵送桩身混凝土,插入钢筋笼及注浆管(可根据需要),形成灌注桩。根据工程需要,采用桩基形式或复合地基。

该复合成孔灌注桩技术具有以下特点:

(1)与传统沉管灌注桩、预制桩等相比,挤土效应可有效控制在湿陷性土层范围内,湿陷性土层以下成孔施工不会产生挤土作用,且由于混凝土灌注施工是在大面积成孔完成后进行的,因此不会发生后续桩施工对邻近已施工桩的挤断、偏位、上浮等现象,也不会形成大量空孔的卸荷造成桩侧阻力的降低问题。

(2)灌注桩混凝土施工前,采用长螺旋对湿陷性土以下非湿陷性土层进行取土成孔,可以对已经形成的挤土孔进行修孔(依靠螺杆),因此不会发生桩径减小现象。

(3)后注浆工艺弥补了因大量空孔卸荷引起的桩侧阻力的降低。

(4)与土桩、灰土桩+CFG二元桩复合地基比较,工序简单、施工速度较快、不产生扬尘、不产生振动噪音。

2 工程应用实践

2.1 工程概况

郑州绿城翰林国际城位于荥阳市荥泽大道与汜河路交叉口西北角,由13栋地上30层,地下1层建筑组成,采用钢筋混凝土剪力墙结构。场区总体平坦,局部地势略高,地貌单元属黄河冲洪积平原。现场勘探深度范围地层可分为9层,其中第①层为第四系全新统冲积(Q_4^{al+pl})而成的粉质黏土,②~⑨层为第四系晚更新世冲积(Q_3^{al+pl})而成的粉土、粉质黏土。场地①~④土层具有湿陷性,各勘探孔自重湿陷量的计算值 Δ_{zs} 均小于70mm,湿陷量计算值 Δ_s 均小于300mm,湿陷等级为I级轻微湿陷场地。

根据工程设计,建筑基础位于第③层黄土状粉土上,天然地基承载力特征值160kPa,地基处理原设计方案为灰土挤密桩+CFG桩的多桩型方案,但是根据原设计方案进行施工时,因噪音太大,受到周边居民阻止而无法正常工作,因此地基处理变更为复合成孔后注浆灌注桩复合地基方案,设计桩径

400 mm, 桩间距 1.2 m, 桩长 12.0 m。典型地质剖面如图 2 所示, 各层地基土物理力学指标如表 1 所示。

可以看出, 桩身范围内上部 8 m 位于具有湿陷性的黄土状粉土层内, 而下部 4 m 位于非湿陷性的粉质黏土层中, 因此成桩施工时上部 8 m 采用静压挤土法成孔, 下部 4 m 采用长螺旋干作业成孔, 如图 3 所示。考虑到上部结构的承载要求, 桩基采用后注浆灌注桩, 即待成孔完成后, 插入注浆管至孔底原状土中一定深度, 并在底部 0.5 m 高度范围填 5~20 mm 级配碎石, 以保护注浆孔防止堵塞。桩身采用商品混凝土泵送灌注施工, 而后进行桩底后注浆成桩。

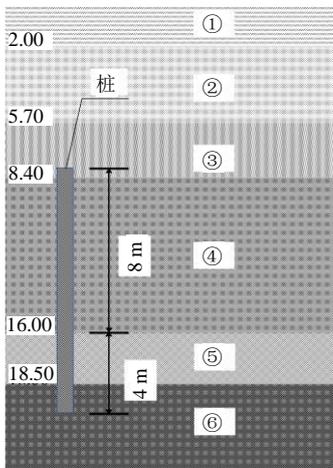


图 2 典型地质剖面图

Fig. 2 Typical geological profile



(a) 上部挤密成孔



(b) 下部长螺旋干作业成孔

图 3 复合成孔施工

Fig. 3 Combined hole-forming

2.2 现场湿陷性试验

为了揭示复合成孔灌注桩技术对局部湿陷性地基的加固效果, 在工程现场开展试验研究。为便

于对比分析将试验分为两组, 分别布置在基础范围内和基础范围外, 基础范围内 3 个区域, 如图 4 (a) 所示, 试验区域桩体采用梅花形布置。

通过挖探采取土样进行室内压缩试验, 压缩试验压力从 50 kPa 逐级加压至 500 kPa, 以揭示各分级加荷下地基土的湿陷系数。湿陷性试验取样分别在试验区位置选取 12 个检测点进行, 其中 6 个点位于外围桩跟中心桩的中点位置, 其余 6 个点位于相邻三桩形心处, 如图 4 (b) 所示。

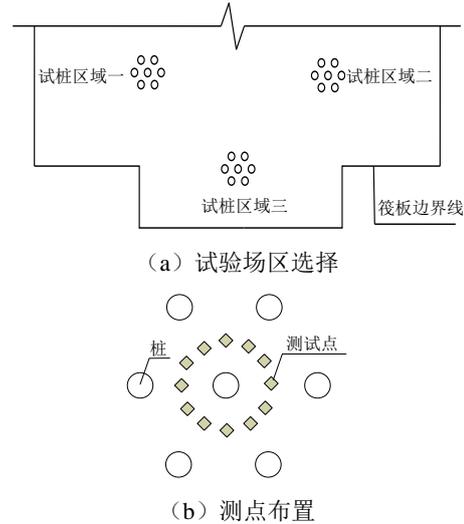


图 4 试验区平面示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the test area

同时, 在试验区三附近未进行地基处理位置选取 1 个检测点进行湿陷性对比分析, 每个检测点均从基底以下 1.0 m 位置开始取样, 取样间距 1.0 m, 依次取 9 个土样进行试验。

如图 5 所示为 13 个检测点采集的 117 个土样的湿陷试验结果。其中, 复合成孔灌注桩加固区的 12 个检测点在起始压力 500 kPa 时, 均无湿陷性; 而在无地基处理的检测点处, 深度为基底以下 1.0 m 和 2.0 m 的土样湿陷起始压力分别为 495 kPa 和 409 kPa, 具有湿陷性。据此, 可判定处理后桩间土湿陷性已消除。

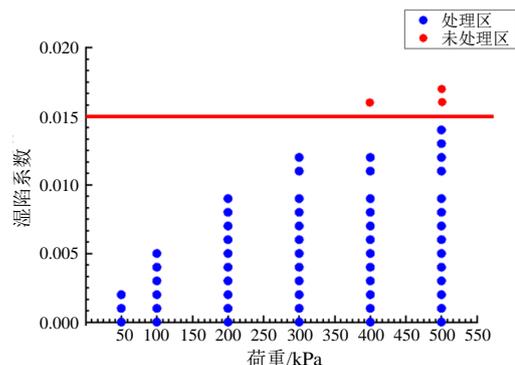


图 5 湿陷性试验结果

Fig. 5 Test results of collapsibility

表1 土层参数
Table 1 Soil parameters

层号	土层名称	土层厚度/m	干重度/ (kN/m ³)	孔隙比 e	地基承载力 特征值/kPa	侧阻力 极限值/kPa	后注浆侧阻 增强系数	压缩模量 E_{s1-2} /MPa	桩端阻力 极限值/kPa
③	黄土状粉土	2.70	15.0	0.765	160	42	1.5	11.2	—
④	黄土状粉土	7.60	14.8	0.799	200	62	1.5	14.5	3 600
⑤	粉质黏土	2.50	15.9	0.677	180	66	1.5	7.2	1 900
⑥	粉质黏土	4.20	15.5	0.719	210	82	1.5	8.3	4 000

2.3 现场承载力试验

在上述3个试验区同时开展竖向增强体单桩静载荷试验和单桩复合地基静载荷试验,以确定承载力特征值。试验采用慢速维持荷载法^[9],逐级等量分级加载进行,分级荷载为最大加载量或预估极限承载力的1/8,第一级取分级荷载的两倍。

根据《河南省建筑地基基础勘察设计规范》(DBJ 41/138—2014)^[10]估算单桩竖向承载力为909 kN,复合地基承载力为500 kPa。如图6和图7所示,由静载荷试验得出单桩竖向承载力特征值1 000 kN,单桩复合地基承载力900 kPa,大于规范估算值,满足设计要求。

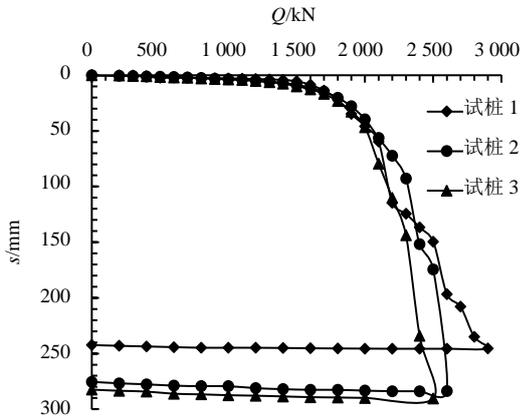


图6 单桩静荷载试验 $Q-s$ 曲线

Fig. 6 $Q-s$ curves of static loading test of single pile

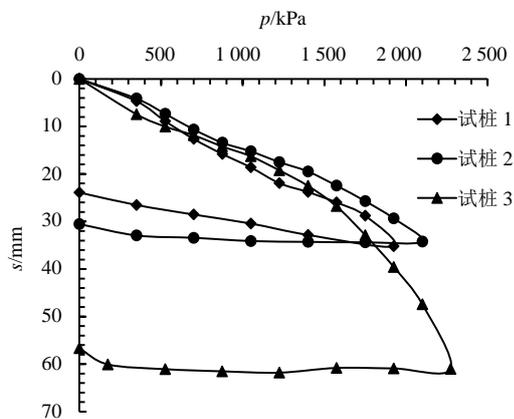


图7 复合地基静荷载试验 $p-s$ 曲线

Fig. 7 $p-s$ curves of static loading test of composite foundation

2.4 最小桩间距确定

挤密孔的桩间距对湿陷性土层湿陷性的消除具有重要的影响^[11],工程实践中可通过现场挤密试验确定。《湿陷性黄土地区建筑规范》(GB 50025—2004)^[12]对挤密土桩、灰土桩孔的间距给出了估算公式:

$$s = 0.95 \sqrt{\frac{\eta_c \rho_{dmax} D^2 - \rho_{d0} d^2}{\eta_c \rho_{dmax} - \rho_{d0}}} \quad (1)$$

式中: d 为预钻孔直径; D 为挤密后填料孔直径; ρ_{d0} 为挤密前桩间土各土层干密度平均值; ρ_{dmax} 为击实试验确定的最大干密度; η_c 为挤密后桩间土平均挤密系数,要求不宜小于0.93。

针对本文工艺,可将规范方法转化为挤土密度系数法,即将勘察报告中湿陷深度面以下一定范围、含水量接近的非湿陷性土的容重作为挤密处理后桩间土容重目标值,以密度系数求桩间距。按等边三角形布置分析:

$$\rho_m = \rho_0(1+m) \quad (2)$$

式中: ρ_0 为挤密前桩间土各土层干密度平均值; ρ_m 为挤密后干密度目标值。

$$m = \frac{\pi d^2}{2\sqrt{3}s^2} \quad (3)$$

$$n = s/d \quad (4)$$

$$n = \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{3}\sqrt{2m}} \quad (5)$$

$$s \approx 0.95 \frac{1}{\sqrt{m}} d \quad (6)$$

据此,根据表1中地基土层参数,将挤密前桩长范围内湿陷性土干密度平均值(取第④层黄土状粉土干密度值14.8 kN/m³)和挤密后干密度目标值(取第⑤层非湿陷性土的干密度值15.9 kN/m³),代入式(2),由式(3)、式(5)计算得到面积置换

率 $m=0.074$, $n=3.5$, 选择桩径 $d=0.4$ m 时, 由式(6)计算得到桩间距 $s=1.4$ m, 实际选择 $s=1.2$ m。

采用孔隙比方法, 不难推导出面积置换率:

$$m = \frac{e_{01} - e_{02}}{(1 + e_{01})} \quad (7)$$

取 $e_{01}=0.799$ (取第④层土) 和目标值 $e_{02}=0.677$ (取第⑤层土) 代入式(7), $m=0.068$, 由式(5)计算 $n=3.65$, 选择桩径 $d=0.4$ m 时, 式(7)计算得到桩径 $s=1.46$ m, 计算结果比干密度法稍大。

综上所述, 利用目标干密度方法确定面积置换率, 再通过置换率确定桩间距、桩径的方法具有一定的实用性, 可应用于本文复合成孔灌注桩桩间距、桩径的设计计算。

3 结 论

(1) 现场实践表明, 采用上部挤密成孔、下部螺旋钻机干作业复合成孔的灌注桩技术, 可处理基底以下一定厚度 (<16 m) 的湿陷性地基, 具有施工速度快、单桩承载力高等特点, 适用于受扬尘、噪音等环境治理限制条件下的湿陷性地基处理工程。

(2) 与常规的湿陷性地基处理方法 (如灰土桩+CFG 桩、挤土预制桩、挤土沉管灌注桩等) 相比, 复合成孔灌注桩技术具有较好的质量保证, 施工中不易发生缩孔、断桩等问题。

(3) 运用挤密成孔桩间距定理, 考虑桩间距对湿陷性消除的影响, 提出采用目标干密度指标进行设计的理论方法, 简单、方便、实用。

(4) 挤密后土层干密度目标值的确定还有待进一步研究, 以完善工程设计理论。

参考文献

[1] 米维军, 贾璠, 贾燕, 等. 宝兰客专黄土隧道地基静压挤密处理效果探讨[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(11): 98-101, 119.
MI Wei-jun, JIA Jun, JIA Yan, et al. Discussion on the effect of static compression and compaction on the foundation of the loess tunnel of Baolan Passenger Dedicated Line[J]. Chinese Journal of Railway Engineering, 2015, 32(11): 98-101, 119.

[2] 米海珍, 杨鹏. 挤密桩处理湿陷性黄土地基的现场试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 1951-1956.
MI Hai-zhen, YANG Peng. Field test research on collapsible loess foundation treated with compacted

piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(7): 1951-1956.

[3] 杨鹏. 高速铁路 DDC 桩加固黄土地基承载及沉降特性研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.
YANG Peng. Study on bearing and settlement characteristics of loess foundation strengthened by DDC piles for high-speed railway[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2015.

[4] 任鹏. 黄土地基超长基桩竖向承载特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
REN Peng. Research on vertical bearing characteristics of super-long piles in loess foundation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.

[5] 朱彦鹏, 杨校辉, 马天忠, 等. 黄土塬地区大直径长桩承载性状与优化设计研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(4): 1012-1023.
ZHU Yan-peng, YANG Xiao-hui, MA Tian-zhong, et al. Research on bearing properties and optimal design of large-diameter long piles in the Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(4): 1012-1023.

[6] 任连伟, 赵文成, 顿志林. 多桩型复合地基在湿陷性黄土中的应用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2013, 41(2): 140-144.
REN Lian-wei, ZHAO Wen-cheng, DUN Zhi-lin. Application of multi-pile composite foundation in collapsible loess[J]. Journal of Hohai University: Natural Science Edition, 2013, 41(2): 140-144.

[7] 周茗如, 王晋伟, 樊乐涛, 等. 二元桩复合地基在湿陷性黄土中的应用研究[J]. 施工技术, 2017, 46(11): 119-123.
ZHOU Ming-ru, WANG Jin-wei, FAN Le-tao, et al. Application research of binary pile composite foundation in collapsible loess[J]. Construction Technology, 2017, 46(11): 119-123.

[8] 张恩祥, 何腊平, 龙照, 等. 黄土地区刚-柔性桩复合地基的承载机理[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(4): 70-80.
ZHANG En-xiang, HE La-ping, LONG Zhao, et al. Bearing mechanism of rigid-flexible pile composite foundation in loess area[J]. Chinese Journal of Transportation Engineering, 2019, 19(4): 70-80.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Technical Specification for Building Pile Foundation: JGJ 94—2008[S]. Beijing:

