

长螺旋钻孔压灌桩施工对砂土液化的影响分析

祖保利

(1. 中冶吉信健康产业有限责任公司,河北 廊坊 065001;2. 北京建筑大学,北京 100044)

摘要:长螺旋钻孔压灌桩在砂土地层施工中,可导致砂土从固态转变为液态,对工程质量造成潜在威胁。文章以河北省中国医学科学院项目为工程背景,介绍了长螺旋钻孔压灌桩施工技术的工艺流程,对砂土在饱和状态下液化的机理及影响因素进行阐述,设计了一个长螺旋钻孔压灌桩施工的模型并进行试验。通过观察实验现象和处理数据,结果表明:不同的桩距和螺旋钻杆转速对饱和砂土液化程度不同,桩距减小导致土体的约束作用增强,加剧饱和细砂的液化程度,钻杆转速增大,饱和细砂所受到的扰动和剪切力会相应增强,导致其液化现象变得更为严重。本文结论可为今后类似工程施工提供参考。

关键词:长螺旋钻孔压灌桩;砂土液化;模型试验;钻杆转速;桩间距

中图分类号:TU753.3

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2026)03-0072-07

doi:10.13402/j.gcjs.2026.03.033

Analysis of the impact of long spiral drilling and grouting pile construction on sand liquefaction

ZU Baoli

(1. Zhongye Jixin Healthindustry Co., Ltd., Langfang 065001, Hebei, China; 2. Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: During the construction of long spiral drilling pressure grouting piles in sandy soil stratum, sand can be transformed from solid to liquid, potentially threatening the of the project. This article takes the project of the Chinese academy of medical Sciences in Hebei province as the engineering background, and first introduces the process flow of the construction technology of long spiral drilling pressure grouting piles; Secondly, the mechanism and influencing factors of soil liquefaction under saturated conditions were elaborated. Finally, a model for the construction of long spiral drilling and pressure grouting piles was designed and tested. By observing experimental phenomena and processing data, draw the conclusion; different pile spacing and spiral drilling rod speed have different effects on the degree of liquefaction of saturated sand, reduction of pile spacing results in enhanced confining effect of soil, exacerbating the liquefaction degree of saturated fine sand, and the increase in the rotation of the drilling rod will correspondingly enhance the disturbance and shear force applied to the saturated fine sand, resulting in more severe liquefaction phenomenon. The content of this paper can be referred to similar engineering construction in the future.

Key words: long spiral drilling pressure grouting pile; sand liquefaction; model test; drill pipe rotation speed; pile spacing

近年来,长螺旋钻孔压灌桩施工技术以其高效、环保、成本较低的特点被广泛应用于各类桩基工程

中。然而这种施工方法在某些地质条件下,特别是含有砂土的地层中,由于钻机的振动和桩料的压入,

收稿日期:2025-10-28

作者简介:祖保利(1983—),男,在职研究生,工程师,从事建设工程项目管理工作的。

砂土地层可能受到扰动,孔隙水压力的上升和有效应力减小,导致砂土从固态转变为液态,进而触发液化机制,对工程质量造成潜在威胁。因此,细砂在饱和状态下的液化问题限制了长螺旋钻孔压灌桩施工技术的推广。关于砂土液化问题,一些学者进行了大量研究探讨。汪闻韶^[1]阐述了砂土液化的机理、判别方法;王震^[2]论述了孔隙水压力的抑制;李雨润等^[3]研究得出:在相同的条件下,较厚的饱和砂土在发生液化后,群桩承台的动力影响更加显著。

基于前人的研究,本文将结合实际工程介绍长螺旋钻孔压灌桩的施工技术,分析饱和砂土液化的机理和影响因素,再通过设计长螺旋钻孔压灌桩施工的模式试验,观察其试验现象和处理数据,分析不同的桩距和螺旋钻杆转速对饱和砂土液化程度的不同影响,以期为今后的类似工程提供参考和借鉴。

1 工程概况

1.1 项目概述

项目为河北省中国医学科学院项目,业态为医疗卫生综合体,主要包含门诊楼、医技楼、住院楼、放疗楼、化疗楼、体检楼、缓和医疗楼、医疗服务楼、辅助用房等。放疗楼地下室有亚洲最大的质子治疗中心,基坑最大深度为 22 m,涉及的工程桩型众多,比如 CFG 沉管桩、长螺旋钻孔压灌桩、带导管的旋挖桩、不带导管的旋挖桩、

三轴搅拌桩、型钢桩、水泥土深层搅拌桩。门诊大厅、体检大厅、放疗大厅为大型双曲面钢结构,多专业交叉作业,涉及重大设计变更和结构加固,专项工程施工复杂。

本文研究对象为门诊医技楼的长螺旋压钻孔灌桩,本楼建筑面积约为 69 934.21 m²,地下面积约为 20 184.58 m²,地上面积约为 49 749.63 m²,地上 5 层,地下 2 层,框架剪力墙结构,基础为长螺旋钻孔压灌桩+防水板基础。

1.2 工程地质概况

工程场地地形较平,主要土层由第四系冲洪积粉砂层、粉土层、黏土层组成。现场地面标高为 9.2~14.3 m。地层特征自上而下如表 1 所示。

项目标高为绝对标高 13.30 m,基坑开挖深度约为-10.1 m 左右。场地类别为三类,抗震设防烈度为 8 度,地下水位大概在-5.6 m 左右。

1.3 桩基设计基本要求

桩基为长螺旋钻孔压灌桩,桩长约为 20 m,桩径为 0.6 m,为端承摩擦桩,桩间距 1.8 m(3 倍桩径),混凝土强度 C35,桩数共计 3 031 根。以冲洪积粉质黏土夹粉细砂⑤为桩端持力层,主要桩的设计参数如表 2 所示。

2 长螺旋钻孔压灌桩施工技术

长螺旋钻孔压灌桩施工工艺是一种综合性的施工方法,其核心在于一套协同工作的施工体系,

表 1 各土层特征(自上而下)

地层指标	承载力特征值/kPa	平均厚度/m	桩端极限侧阻力标准值/kPa	桩端极限端阻力标准值/kPa	抗拔系数(平均)
人工填土①	—	1.7	—	—	0.75
种植土②	—	2.1	10	—	0.75
冲洪积粉土③	100	3.6	15	—	0.75
冲洪积粉质黏土夹粉砂④	120	21.2	22	150	0.70
冲洪积粉质黏土夹粉细砂⑤	160	22.4	31	340	0.70

表 2 门诊医技楼桩基设计参数

桩编号	混凝土强度等级	直径/mm	长度/m	竖向承载力特征值/kN	抗拔承载力特征值/kN
Zk-1	C35	600	20	750	—
Zk-1a	C35	600	20	750	150
ZH-1b	C35	600	20	750	300
ZH-1c	C35	600	20	750	450

这一体系主要由长螺旋钻孔打桩机、混凝土泵等关键设备共同构成。长螺旋钻孔打桩机如图 1 所示。钻机的部件主要由钻杆、钻头、动力装置、排气阀、弯头、以及卷扬机组成,在这些部件中,弯头、钻头和排气阀尤为关键,堪称长螺旋钻机的核心部件。钻头在长螺旋钻孔压灌桩施工工艺中占据举足轻重的地位,在钻入过程中,钻头内置的单向阀门处于关闭的状态,从而有效防止钻杆里进入地下水和土体。桩孔内土被螺旋的叶片带到地上,钻头到桩底标高后,就打开单向阀门,通过弯头泵送混凝土并提升钻杆,混凝土通过钻头流出到桩孔内,填充并压实桩体,压入钢筋笼后最终形成坚固的压灌桩。当混凝土通过弯头顺利进入钻杆内部时,它会沿着钻杆自由降落,形成压灌桩的主体部分。通过设置排气阀能够有效排出钻杆内的空气,防止空气滞留导致桩身出现残缺或不完整的情况。最后移开钻机,用专用设备把桩的钢筋笼压入混凝土内,形成压灌桩。

图 2 为长螺旋钻孔压灌桩的主要施工过程。具体的成桩工艺主要包括:1)打桩机移动定位;

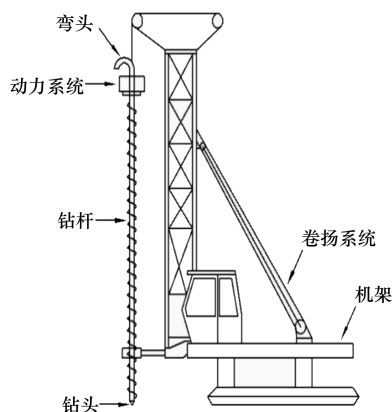


图 1 长螺旋钻孔打桩机装置示意

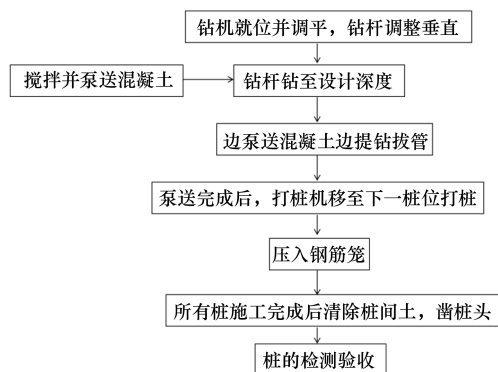


图 2 长螺旋钻孔压灌桩施工流程

2) 钻杆钻至设计深度; 3) 清除钻孔周围的堆土; 4) 连接输送泵并输送混凝土至钻杆里面; 5) 边输送混凝土边向上提升钻杆到桩顶; 6) 压入钢筋笼。

3 砂土液化机理及影响因素

3.1 砂土液化机理

砂土液化的机理是在振动荷载作用下,饱和的砂土由固态向液态转变的复杂过程。在这个转变过程中,其内部的孔隙水压力会显著增大,有效应力急剧减小,导致原本具有一定抗剪强度的饱和砂土,会失去原有的抗剪能力。这种转变不仅改变了砂土的物理状态,也对其力学性质产生了显著影响,可能导致地基失稳、结构破坏等严重后果。

砂土液化的机理可细致划分为 3 种不同的情况:

(1) 砂沸现象是由于地下水位的上升,使得饱和砂土内部的孔隙水压力加大。当这种孔隙水压力达到或超过砂土上方的覆盖压力时,这些饱和的砂土便会出现往上浮的现象,好像煮沸的水一样。

(2) 砂的流滑现象,发生在不能有效排水的状态,当饱和的砂土在剪切力的作用下,其内部的砂土颗粒会重新组合并发生体积变小。这一过程中,孔隙内水压力会显著加大,而有效的应力则相应变小,导致饱和的砂土发生流滑的现象。

(3) 循环发生性,是指在不能有效排水条件下,饱和砂土受到循环剪切作用时的一种表现。在这种作用下,砂土会交替出现体积膨胀和缩小的现象。这种液化主要特点为砂土有限度的不连续变形和不连续的瞬态液化,常见于密实的砂土层。

3.2 饱和砂土振动液化影响因素

经过大量研究与丰富工程实践,发现饱和砂土在振动作用下发生液化受到多个关键因素的共同影响。

3.2.1 土性条件

土体的物理性质、密实度以及微观结构特征共同决定了其在振动荷载作用下的液化可能性。土颗粒越粗,不均匀系数越大,其动力稳定性就越好,土体发生液化的几率相对较小;而土颗粒越细,不均匀系数越小,其动力稳定性就越差,

土体发生液化的几率相对较高。

3.2.2 初始上覆应力

原始饱和砂土上面土层厚度的大小与其液化的可能性成反比，即上覆土层越厚，液化风险越小。反之，上覆土层越薄，液化风险越大。

3.2.3 动荷载情况

动荷载传递的波形，对饱和砂土的液化影响程度存在显著差异^[4]。具体来说，冲击型波对饱和砂土的影响最为显著，其液化风险相对较高；振动型波对饱和砂土的影响稍弱，仍具有一定的液化潜力；而正弦型波对饱和砂土的影响最小，引发液化可能性相对较低。

3.2.4 排水条件

排水的具体条件涵盖水在土中渗流的边界、在土中的透水性，及渗透的途径，在长时间振动荷载条件下，假如土体的排水能力良好，孔隙水压力便能迅速消散，有助于维持土体的稳定性，从而使饱和砂土展现出较强的抗液化能力。

4 长螺旋钻孔压灌桩施工模型试验

4.1 试验目的

由于项目的长螺旋钻孔压灌桩数量多，工程量大，穿过土层含粉砂和粉细砂，且地下水位较高，为了确定钻机的最优转速和验证设计桩间距的可行性，通过模型试验，模拟钻孔压灌桩在饱和粉细砂中的施工，对不同桩的间距、不同的钻杆转速等参数，研究饱和粉细砂液化的不同程度。

4.2 试验方案设计

4.2.1 试验分组

将试验内容分为 5 组，具体分组如表 3 所示。分别比第 1~5 组的试验结果，分析在单桩和群桩的施工中，饱和细砂液化与钻杆转速的关系；分别比第 2~5 组的试验结果，分析在群桩施工

中，饱和细砂液化与桩间距的关系。

4.2.2 传感器和桩位布置

对于第 1 组为单桩布置，图 3 为桩位的布置简图和孔隙水压力计布置简图；对于第 2~5 组为群桩布置，图 4 为桩位的布置简图和孔隙水压力计布置简图。

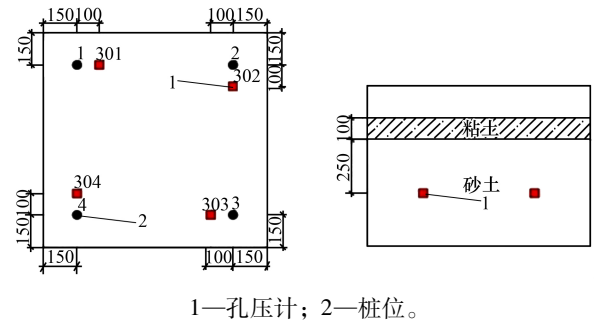


图 3 第 1 组桩位和孔隙水压力计的布设 mm

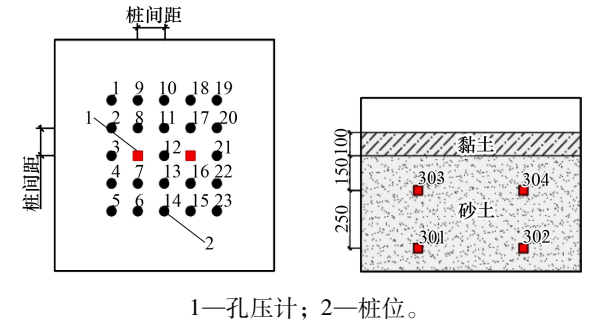


图 4 第 2~5 组桩位和孔隙水压力计的布设

4.3 试验设备

4.3.1 刚性模型箱

试验桩直径为 40 mm，设计的模型箱主要用于从侧面和底部对饱和砂土进行约束，因此采用了刚性材料来制作。模型箱具体尺寸为 1 000 mm × 1 000 mm × 750 mm(长×宽×高)，这样的尺寸设计能够充分满足试验需求。在材料选择上，模型箱由厚度为 3 mm 的钢板和厚度为 10 mm 的有机玻璃板组合而成，既保证了模型的坚固性，又方便试验过程中的观察与操作。

表 3 试验分组

分组	转速/(rad·min ⁻¹)	布桩方式	桩间距	砂土类别
第 1 组	24、35、55、75	单桩	—	细砂
第 2 组	18、35、55、75	满堂	2d	细砂
第 3 组	18、35、55、75	满堂	3d	细砂
第 4 组	18、35、55、75	满堂	4d	细砂
第 5 组	18、35、55、75	满堂	5d	粉砂



图 5 刚性模型箱

4.3.2 打桩机

长螺旋钻孔桩的关键设备是打桩机。该打桩机应有转速可读取和转速可变的功能。由长螺旋钻杆、减速齿轮电机、数显调速器、连接件、固定架和手拉葫芦等部件组成，如图 6 所示。



图 6 长螺旋钻孔打桩机

4.4 试验步骤

4.4.1 试验前土样制备

按照《土工试验方法标准》^[5]的相关要求，试样在达到饱和状态前，必须至少在水中浸泡两昼夜，即保持 48 h 静置让其充分饱和。为确保土样充分饱和，需要定期对水面高度进行测量，并同步对传感器中的应变变量进行观察，当水面高度和应变变量基本稳定不变时，土样饱和视为基本完成^[6-7]（图 7）。



图 7 饱和后的土样

4.4.2 施工的步骤

土体充分饱和后，把表面多余水分清除，对土层表面进行平整。再依据上面试验的组别确定桩位，在桩位中心点做上标记，如图 8 所示；首先将横向固定架安装在模型箱上，确保它牢固可靠。将组装好的竖向固定架固定在横向固定架上，形成一个稳固的支撑结构。最后，通过微调横向和竖向固定架的位置，确保钻杆的中心精准地对准预先设定的标记位置，如图 9 所示。



图 8 确定桩位示意



图 9 桩机就位

在钻杆钻头接触土层表面时，暂停操作并记录当前时间。随后，接通电机电源，启动钻机进行钻孔作业。由于钻杆上有螺旋式样的叶片，其作业高度为 0.5 m。当土层表面与螺旋式样叶片的顶端平时，表示钻杆已达到预定的设计深度。提钻速度必须严格控制在 3.3 ~ 5.8 cm/s 的范围内。

在完成混凝土的灌注后，清除土层表面多余的混凝土，确保桩顶与土层表面平整对齐。在清除过程中，注意保持桩顶横截面为直径 40 mm 的圆形，并严格避免桩顶在水平方向上产生任何位移。将钻机准确地定位到下一个桩位上，然后对上述的施工步骤进行重复。图 10 为桩施工完后土层表面。

当完成桩施工以后，隔 2 min 左右对孔隙内的水压力观察一次，如果孔隙内水压力不再发生变



图 10 桩施工完成后的土表面

量时，就可以认为试验完成。试验完成后，把水龙头打开排水 48 h，再将桩从砂土中挖出，如图 11 所示。



图 11 试验结束后挖桩

4.5 试验现象

(1) 试验的时候，在振动的荷载的作用下，饱和砂土发生如图 12 ~ 15 所示的 4 类液化的物理现象^[8]。饱和细砂的状态分别为整块状、半块状、淤泥状、糊状。



图 12 饱和细砂整块状



图 13 饱和细砂半块状



图 14 饱和细砂淤泥状

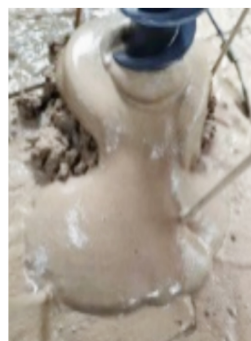


图 15 饱和细砂糊状

(2) 在桩的顶部，土 - 箱交界的地方及混凝土的中心部位，出现了冒水，冒水致使土层上表面出现一层水，如图 10 所示。

(3) 多桩钻进的时候，孔与孔中间有时出现孔连通，这会致使钻出的细砂中含有混凝土，颜色为青色(图 16)。



图 16 窜孔现象

4.6 施工影响因素分析

(1) 转速对饱和细砂液化的影响。在不同转速条件下的饱和细砂模型试验中，转速从 24 rad/min 逐渐提升至 75 rad/min，原本保持整块状的饱和细砂开始发生显著的形态变化，逐渐转变为类似淤泥的松散状态；随着转速的增加，在进行混凝土灌注时注意到，桩顶混凝土出现冒水现象的时间明显缩短。在更高的转速下，饱和细砂中的水分更容易被挤出，导致冒水现象更为迅速。饱和细

砂的液化越来越明显和严重。

(2) 桩间距对饱和细砂液化的影响。分析比较群桩 2、3、4、5 d 桩间距饱和细砂中的试验结果,发现桩间距由 5 d 减小到 2 d 时,试验过程中钻取出的细砂状态发生了明显的改变,原本呈整块状的细砂逐渐转变为类似淤泥的状态,冒水现象变得更加突出。当桩的间距不断减小,液化的程度逐渐明显和加重。

4.7 实际施工方案及效果

采用长螺旋钻孔压灌桩施工,通过施工模型试验,得出如下结论:1) 综合考虑桩承台的经济性和对砂层的液化影响,桩间距取 1.8 m(3 倍桩径)是比较合适的;2) 综合考虑施工进度和对砂层的液化影响,钻机的转速控制在 35 ~ 55 rad/min 比较合适。图 17 为长螺旋钻孔压灌桩施工。

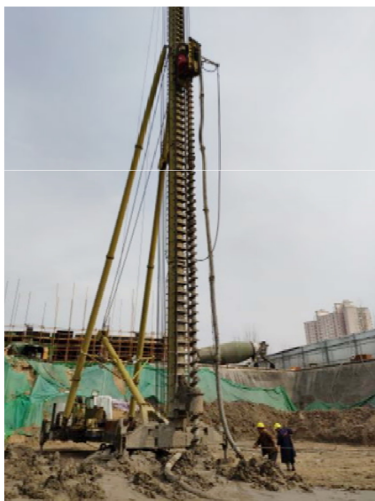


图 17 长螺旋钻孔压灌桩施工

施工完成后经检测,桩身完整性良好,局部缩颈缺陷经复测确认无结构性影响,单桩竖向承载力实测值均大于设计值,满足工程安全要求。

5 结 语

本文结合工程实例,分别介绍了长螺旋钻孔

压灌桩施工技术与砂土的液化机理;通过实验室内模拟长螺旋钻孔压灌桩在饱和砂土中施工过程,研究了桩间距和转速两个因素对饱和粉细砂液化程度的影响,当钻杆的转速增大时,饱和细砂所受到的扰动和剪切力会相应增强,从而导致其液化现象变得更为严重。另一方面,桩间距的减小导致土体的约束作用增强,也会加剧饱和和细砂的液化程度。

参考文献:

- [1] 汪闻韶. 砂土液化问题研究[C]//中国土木工程学会. 海峡两岸土力学及基础工程地工技术学术研讨会论文集. 北京:中国水利水电出版社,1994:131-138.
- [2] 王震. 多类型桩加固饱和粉土地基抗液化性能研究[D]. 东营:中国石油大学(华东),2016.
- [3] 李雨润,强东峰,邹泽,等. 不同厚度饱和砂土中群桩结构动力响应试验研究[J]. 地震工程学报,2018,40(4):625-630.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [5] 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S]. 北京:中国计划出版社,2019.
- [6] KRAMER S L, SEED H B. Initiation of soil liquefaction under static loading [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 114(4):412-430.
- [7] JOHARI A, REZVANI P J, JAVADI A. Reliability analysis of static liquefaction of loose sand using the random finite element method [J]. Engineering Computations, 2015, 32(7):2100-2119.
- [8] 丰土根,张礼明. 振动频率对饱和松砂动力特性影响试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2013,11(3):11-14;76.