

# CFG 桩施工产生环境问题的机理分析及应对措施

孙瑞民<sup>1</sup>, 杨凤灵<sup>1</sup>, 邓小涛<sup>2</sup>

(1. 华北水利水电学院, 河南 郑州 450011; 2. 中国石油天然气管道工程有限公司, 广东 珠海 509015)

**摘要:**根据多年施工经验,长螺旋钻管内泵压 CFG 桩施工技术应用到郑州地区饱和粉土等软土层时,常出现桩周地面沉降、周边建筑物和路面开裂以及管道错位等环境问题。通过对长螺旋钻管内泵压 CFG 桩施工引起环境问题的机理进行综合分析,提出相应措施,并对长螺旋钻管内泵压 CFG 桩在饱和粉土等软土层中的适应性作出评价。

**关键词:**CFG 桩;长螺旋钻管内泵压施工;环境问题;机理分析;应对措施;适应性评价

**中图分类号:**TU472 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2009)02-0024-05

**Mechanism Analysis on Environmental Problems Caused by CFG Pile Construction and the Countermeasures/** SUN Rui-min<sup>1</sup>, YANG Feng-ling<sup>1</sup>, DENG Xiao-tao<sup>2</sup> (1. North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric power, Zhengzhou Henan 450011, China; 2. China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, Zhuhai Guangdong 509015, China)

**Abstract:** According to the years construction experience, when the technology of pump pressure CFG pile in continuous auger drilling pipe is applied in the stratum of saturated clay in Zhengzhou area, a series of environmental problems would come forth, such as ground settlement around piles and adjacent buildings, pavement cracking and pipeline dislocation. By the comprehensive study on the mechanism of environmental problems caused by construction of pump pressure CFG pile in continuous auger drilling pipe, the countermeasures are put forward, and the adaptability evaluation on this technology in saturated silty soil is made.

**Key words:** CFG pile; pump pressure construction in continuous auger drilling pipe; environmental problem; mechanism analysis; countermeasure; adaptability evaluation

## 0 引言

长螺旋钻管内泵压 CFG 桩是近 10 年来发展起来的一项复合地基新技术。然而当该技术应用到郑州地区的饱和粉土等软土层时却出现了桩周地面沉降、周边建筑物和路面开裂以及管道错位等环境问题。据不完全统计,近 5 年来,在郑州因长螺旋钻管内泵压 CFG 桩施工引起环境问题的工程 20 多项,给建设和施工单位造成了巨大经济损失,严重阻碍了 CFG 桩复合地基技术在郑州以及周边地区的进一步推广和应用<sup>[1]</sup>。为了探讨长螺旋钻管内泵压 CFG 桩在施工过程中出现环境问题的机理,对郑州地区的饱和粉土进行了颗粒分析试验、扫描电镜试验、X 射线衍射试验、动三轴试验,分析了饱和粉土各个粒组含量情况、微观结构、矿物组成、动力学特性。进而紧密结合工程实践,分析了郑州以及周边地区的饱和粉土在 CFG 桩施工过程中所表现出的工程特性;通过现场孔隙水压力试验和运用 FLAC 模拟分析了施工中桩周土体的变形位移规律。

## 1 CFG 桩施工产生环境问题的机理分析

### 1.1 以往的研究观点

针对长螺旋钻管内泵压 CFG 桩施工引起的环境问题,曾有研究人员提出过不同观点,但是都缺少必要的实践和试验的有力支持,其解释也难以让人信服。下面简要介绍 2 种观点。

#### 1.1.1 传统“剪切液化”观点

此观点认为,在 CFG 桩施工过程中,孔隙水压力增加,土体达到液化,液化使土体的强度丧失,进而地面发生沉降破坏。而通过孔隙水压力测试得出,在 CFG 桩施工的钻进和泵送提钻阶段,产生的超孔隙水压力都没有使土体达到液化标准。因此,用传统的“剪切液化”观点解释桩周土体变形位移是行不通的。

#### 1.1.2 “空桩-基坑效应”观点

高层建筑往往设有 1 层或 2 层地下室,基础埋深大致为 6~9 m,所以 CFG 桩施工时,虽然设计桩顶标高之上往往超灌一定高度,但每根桩都有 4~7

收稿日期:2008-07-07

基金项目:河南省科技攻关项目“长螺旋钻管内泵压 CFG 桩复合地基技术在饱和粉土中的适应性研究”(编号:0524450008)

作者简介:孙瑞民(1956-),男(汉族),河北魏县人,华北水利水电学院高级工程师,地质工程专业,博士,从事岩土工程方面的研究工作,河南省郑州市北环路 36 号。

m 的空桩。所谓空桩就是指桩顶部没有灌注混凝土的钻孔。当桩机在其上行走时,可能引起空孔塌落。具有空桩的施工场地类似“蜂窝煤”,一是空桩部分相当于临空面,二是钻孔内灌注混凝土后,由于混凝土塌落度较大,初期凝固时,将导致桩周土体含水量增加,引起土体一定时间内强度降低,而未凝固的混凝土并不能提供足够的侧向压力来维持桩周土体的稳定,这就造成了 CFG 桩施工场地周围土体发生了较大的变形。整个 CFG 桩施工场地类似于已开挖的基坑,其深度与空桩深度相同<sup>[2]</sup>。

通过现场试验也否定了这种观点,理由如下。

(1) 在 CFG 桩施工过程中将混凝土料泵送至地表,也就是说施工时不留空桩,结果发现在施工场地仍出现了裂缝。

(2) 通过 FLAC 模拟,结果显示对桩长 6 m 的桩有 1 m 的空桩,变形增加量不明显<sup>[3]</sup>,这也说明预留的空桩对长螺旋钻管内泵压 CFG 桩施工中引起的土体位移很小。

### 1.2 CFG 桩施工产生环境问题的机理分析

根据多年的工作经验和施工过程中对桩周土体孔隙水压力的变化规律测试,结合 FLAC 模拟结果,认为“剪切扰动 - 抽吸渗流”是长螺旋钻管内泵压 CFG 桩施工产生环境问题的主要原因,分析如下。

#### 1.2.1 剪切扰动使桩周土具有流动的可能

通过对孔隙水压力变化规律的分析表明,当螺旋钻头到达孔隙水压力计埋设位置或其附近时,孔隙水压力升高<sup>[3]</sup>,这就造成土体强度降低。当钻头离开孔隙水压力计埋设位置后,该层土受到螺旋叶片和叶片之间土体的持续波状剪切扰动。即施工钻进过程中,对于孔壁土体的某一点来说,螺旋叶片和叶片之间土体对其反复扰动,所以其受到的力不是定值。当螺旋叶片触及到这一点时,该点受到的作用力大,当叶片之间的土体接触到这一点时,该点受到的作用力小。这样对桩周土体来说就好象受到了强—弱—强—弱…的扰动,可称之为波状剪切扰动。这种剪切扰动的能量以波状形式进行传播,使桩周土体的结构发生破坏,进而引起土体的强度降低。距离桩越近,能量越大,桩周土受到的破坏越大;距离桩越远,能量越小,桩周土受到的扰动就越小。特别像饱和粉土、粉细砂等土层,更容易受到扰动而结构发生变化,呈现流塑状态,流动性增强,为土体向钻孔方向流动创造了条件。这种剪切扰动尽管未使土体达到液化标准,但很大程度上降低了土体强度。

在 CFG 桩施工过程中出现环境问题的场地取

土样,经手轻轻一拍,水就会慢慢析出,甚至用小刀轻轻划一道缝,在缝的表面就会有水析出,见图 1。可见这类粉土受到扰动后很容易变成流塑状态。



图 1 受扰动的粉土

#### 1.2.2 抽吸为桩周土的流动提供了动力

实践表明,无论是钻进过程还是泵送提钻过程,都会发生抽吸作用,见图 2、3、4。所谓抽吸作用是指长螺旋钻管内泵压 CFG 桩在饱和粉土等软土层中施工时,在钻进和泵送提钻过程中,由钻进输土或提钻形成的抽吸力,引起钻孔临空部位和钻孔底部

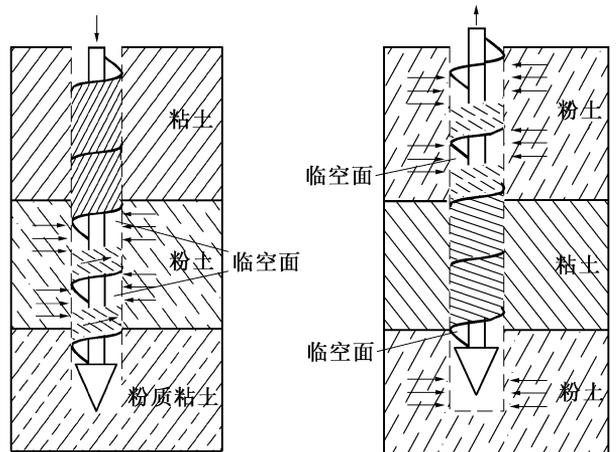


图 2 钻进过程的抽吸作用

图 3 泵送提钻阶段的抽吸作用



图 4 螺旋叶片之间的土体状态

形成真空,从而因压力差使桩周具有液化态势的土体向孔内移动,这种现象称为抽吸作用。钻进抽吸的依据就是当钻头钻进到孔隙水压力计所处位置以下,直到桩底,孔隙水压力都呈缓慢下降趋势。泵送提钻开始瞬间,孔隙水压力发生突降,直到混凝土高度到达孔隙水压力计埋设位置,孔隙水压力升高到初值或大于初值,这种现象说明了泵送提钻过程抽吸作用的存在。

不管是钻进抽吸还是泵送抽吸都是引起渗流和流土的主要原因。由于抽吸作用在孔内或孔周附近产生低压带,距离桩较远的地方相对来说就是高压带。在压力差的作用下,孔隙水由高压带向低压带快速渗流。渗流引起的渗透力将土的结构破坏,使桩周土体也随之向钻孔方向流动。也就是说,某些特殊土层的结构在水力作用下发生了破坏,一些细小颗粒很容易被水带走,形成巨大的通道,造成土和水一块流入钻孔中,将这种现象称之为流土。只是这种流土发生在水平方向上,与传统意义上的流土有所不同,而且这种流土发生的速度很快。例如河南新闻培训中心大楼从1998年7月28日开始施工第一根桩时就发现附近的管井抽水变浑涌砂,说明渗流和流土的现象是客观存在的。

### 1.2.3 渗流和流土是地面沉降的原因

长螺旋钻管内泵压 CFG 桩施工对周围环境的影响,首先表现为场地及其周围地面产生环状裂缝。通过对数个工程实例的研究发现,有的场地 CFG 桩刚施工完一二根桩时,周围的地面和路面开裂,这种现象单一用剪切扰动是无法解释的,只有将剪切扰动使饱和粉土强度降低,抽吸作用造成流土结合起来考虑,才能说明 CFG 桩施工对周围环境产生影响的原因。

随着桩周土和水不断向钻孔流动,使桩周流动土层与上覆土层在水平方向形成虚脱或软弱层,施工期间窜孔的发生就说明两桩之间的土层存在水平连通或流动。虚脱和软弱层的产生,使该土层不能承载上覆土体的自重,而产生差异沉降,引起地面裂缝。根据有效应力原理,随着孔隙水压力降低,有效应力将增加,在有效应力的作用下,土体也将趋于密实。地面沉降和裂缝形成示意图见图5。

裂缝的发生、发展和空间分布与饱和粉土层的工程特性、厚度、埋藏深度和地层组合及桩长、桩间距都有一定的关系。一般饱和粉土对剪切扰动比较敏感,当土层厚度大、埋深浅、设计桩长较长时,剪切扰动和抽吸作用持续时间也随之加长,渗流半径加

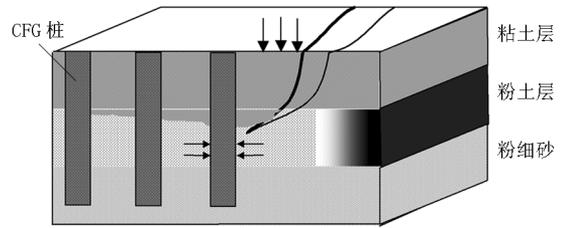


图5 地面沉降和裂缝形成示意图

大,就会产生第二条或第三条裂缝。

### 1.3 CFG 桩施工产生环境问题的影响因素

从 CFG 桩施工产生环境问题的机理分析可知,施工工艺和饱和粉土是2个重要的影响因素。

#### 1.3.1 饱和粉土是产生环境问题的内因

饱和粉土受扰动后很容易变成流塑状态,这种工程特性为长螺旋钻管内泵压 CFG 桩施工产生环境问题提供了物质条件。以郑州地区的饱和粉土为例,主要特点如下。

(1) 它们属于黄河冲洪积和河漫滩静水相的沉积物,形成于第四纪全新世,为新近沉积土。饱和粉土的结构主要是以粉粒之间的接触为主,粘土颗粒大多较杂乱地堆积在砂颗粒周围,部分附着在砂颗粒的表面,因缺乏凝聚材料而使整体结构较为松散<sup>[3]</sup>。这种结构的土体一旦遇到振动或流动的动水压力,便会很容易破坏或流动,尤其在受到螺旋叶片扰动时很容易发生结构的破坏,使强度降低。

(2) 饱和粉土属于级配不良的土,密实度小,强度低,渗透稳定性差<sup>[3]</sup>。在抽吸作用下,很容易发生渗流破坏,造成向桩孔方向的流土。

(3) 饱和粉土的粘粒含量在9%左右时,抗液化能力最差。虽然在螺旋叶片不断扰动下饱和粉土没有达到液化标准,但是其强度降低,呈流塑状态。

#### 1.3.2 CFG 桩施工工艺是产生环境问题的外因

在郑州地区,水泥高压旋喷桩、水泥土搅拌桩和钻孔灌注桩施工过程中,虽然都会对桩周土产生不同方式的扰动,但没有发现对周边环境产生影响。究其原因主要是因为水泥高压旋喷桩和水泥土搅拌桩为不排土桩,而钻孔灌注桩虽然为排土桩,但孔内泥浆对桩周土起到侧限作用。所以,桩周土体不能向孔内运动,因此就不会引起地面沉降和裂缝的产生。由此可以得出这样的结论:长螺旋钻管内泵压 CFG 桩施工工艺是引起环境问题的主要原因之一。

长螺旋钻管内泵压 CFG 桩施工过程中,螺旋叶片剪切排土<sup>[4]</sup>产生2个问题:一是剪切扰动使桩周饱和土体强度降低,使土呈流塑状,具有流动的可能;二是螺旋排土为桩周土向孔内流动提供了空间。

当长螺旋钻进到饱和粉土层时,孔隙水压力升高,水土分离,土的体积减小,造成钻进到该土层的螺旋叶片间不能被孔内土充满,为桩周土向孔内流动提供了空间(见图2、3、4)。

## 2 CFG桩施工引起环境问题的控制措施

根据长螺旋钻管内泵压CFG桩造成环境问题的机理和影响因素,结合工程实践经验,提出控制措施如下。

### 2.1 减小施工对饱和粉土的扰动

#### 2.1.1 采取跳打的施工工艺

施工顺序大体上可分为2种类型:一是连续施打,如图6(a)所示,从1号桩开始,依次2号、3号、……,连续打下去;二是间隔跳打,如图6(b)所示,可以隔一根桩,也可以隔多根桩<sup>[5]</sup>。

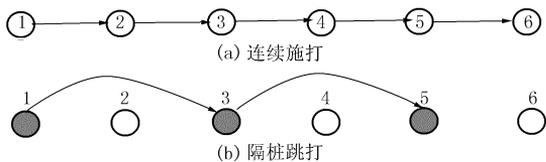


图6 施工顺序示意图

采取跳打的施工工艺,一方面是为了在离已打桩尽可能远的地方施打下一根桩,减小已打桩桩周土受到重复扰动,并降低剪切扰动能量的叠加;另一方面,第一遍桩施打完,开始第二遍桩施工时,已打桩的桩身已达到一定的强度,对桩周土具有侧限作用,同时已被扰动的桩周土也有所恢复。通过静力触探试验也验证了这一点。

#### 2.1.2 选择合理的桩间距

CFG桩因其桩身强度和桩长的可调性,所以在设计时应遵循大桩长、大间距的设计理念。当建筑荷载和地层条件满足时,应尽量大桩距布桩,这和跳打的作用是相同的。例如,郑州某工程,按1.3 m桩间距施工时,窜孔时有发生,后来设计单位调整了桩长,将桩间距调整为1.6 m,按此桩间距施工,窜孔现象就很少发生了。

#### 2.1.3 减少重复钻进的概率

CFG桩施工过程中重复钻进增加了对桩周饱和粉土的剪切扰动,造成孔隙水压力升高,土体强度进一步降低。一般造成重复钻进的原因多是混凝土堵管和钻门打不开造成的,因此应采取减少堵管和钻门打不开的可能性。

#### 2.1.4 减小动应力

根据对饱和粉土的动力学特性研究可知,在某

一定的动应力作用下,振动次数足够多并不能引起饱和粉土过大的应变,如果能减小CFG桩施工对桩周土的作用力,桩周土体就不会发生过大的应变或位移。因此,采用小直径螺旋钻杆成孔,降低转速,就能减小螺旋叶片在切割土体时的动应力,减小剪切能量积累<sup>[6]</sup>。

#### 2.1.5 减小施工中的抽吸作用

(1) 选择合理的钻进速度和提升速度。

饱和粉土受到剪切扰动和抽吸作用的时间越长,其强度降低的越多,向孔内流土越多。如果将向下钻进的速度提高,那么桩周孔壁某点土体在钻进过程中受到的扰动和抽吸作用的时间就会减短,因此在遇到饱和粉土层时应加快向下钻进速度,从而减小对桩周土体的扰动时间。

然而钻杆的提升速度却不宜太快,应保证提钻速度和混合料的泵送速度相匹配,使钻头埋在混合料中的深度在1.0 m左右,使泵送混合料的压力对钻杆起到一定的顶升作用,有经验的机械操作手可以在这种作用的辅助下去确定提升速度。工程实践证明,提升速度一般为1.8~2.5 m/min。

(2) 选择合理的提钻方式。

螺旋钻机的提钻方式有2种:直接提钻和回转提钻。直接提钻是提钻时螺旋钻具停止回转,只靠提升卷扬机将螺旋钻具提升至孔外。回转提钻是指提钻时螺旋钻具一边回转,一边靠提升卷扬机将螺旋钻具提升至孔外。目前,在实际的施工过程中,直接提钻是最常用的一种提钻方式。但是,直接提钻会使螺旋叶片上的土体被孔壁压密成柱塞,在提升钻具时,会产生很大的阻力,造成较大的抽吸作用,这样容易使孔塌陷或钻机失稳。因此,以回转提钻的方式为宜<sup>[7]</sup>。

#### 2.1.6 选择合理的泵送高度

工程实践中发现,当基础持力层是饱和粉土时,施工时容易产生缩径,这可能是2种原因引起的:其一,提钻速度与泵送速度不匹配,提钻速度过快;其二,就是泵送混凝土的高度控制不当,停泵时间过早,混凝土的灌注仅靠自重下落,而当混凝土因自重产生对桩周土的压力小于土体的侧限作用时,就容易使桩周土体向桩体收缩,形成缩径。所以应将停泵高度控制在桩顶标高以上10 cm,以保证混凝土带压灌注。

#### 2.1.7 施工中的辅助方法

CFG桩施工的措施应与基坑支护的设计和施工结合起来,使两者达到技术和经济的统一。

(1)设置降水井。通过降水,可以降低施工场地的地下水位,使饱和粉土、粉细砂等土的含水量降低,当土体受到扰动时,可有效的控制土体呈流塑状态的可能。

(2)打隔断墙。施工中的抽吸作用在饱和粉土和粉细砂中引起渗流和流土,造成地面沉降。所以,若能采取隔断措施减小抽吸作用的影响范围,就能有效降低对周围土体的影响。因此,在工程实践中经常将基坑支护的止水幕墙,作为 CFG 桩施工中的隔断措施进行统一的设计和施工。

(3)清除钻孔弃土。钻孔弃土对窜孔或沉降具有不利影响,在施工过程中应及时清理。

#### 2.1.8 施工设备的改进

长螺旋钻管内泵压 CFG 桩施工过程中,对于桩周土体上的某一点来说,它受到的影响是波状触动的形式,受到扰动的大小与螺距的大小是分不开的。螺距大,对于桩周土体的扰动就小,但是它不利于土体输送;螺距小,对桩周土体的扰动大,但有利于土体的输送。因此有必要对螺距进行选择,针对不同的土层采取不同的螺距<sup>[7]</sup>。

钻具的旋转速度越大,对桩周土的施加的动荷载越大,所以应针对不同的土层采用不同的转速。实现旋转速度的不同,可以通过控制动力装置的转速来实现。

如果能根据下部土层受扰动的强度变化情况,来调整提钻速度和泵送压力,就能有效的控制桩身质量问题和桩周土体变形位移,这可以通过配置可视化设备和传送装置来实现自动化控制。

### 3 长螺旋钻管内泵压 CFG 桩在饱和粉土中适应性评价

到目前为止,长螺旋钻管内泵压 CFG 桩技术在饱和粉土中适应性的问题还没有得到客观评价。在郑州地区,采用长螺旋钻管内泵压 CFG 桩复合地基时,主要存在 2 种倾向:一种倾向是对场地的岩土工程条件和建筑物的结构形式及基础形式不作分析,对场地周边环境不作调查,在不采取任何措施的情况下,盲目进行 CFG 桩复合地基的设计和施工,造成了重大的工程事故;另一种倾向是全面否定,宁肯加大工程投资,也不愿采用长螺旋钻管内泵压 CFG 桩复合地基。以上 2 种倾向都阻碍了 CFG 桩复合地基技术在郑州地区饱和粉土等软土层中的应用。

通过对郑州及邻近地区长螺旋钻管内泵压 CFG 桩施工引起环境问题机理和影响因素的研究

分析,结合工程实践,对其适应性作出如下评价。

(1)长螺旋钻管内泵压 CFG 桩是郑州地区应该大力推广的一种地基处理技术,它在饱和粉土中是适用的,但应掌握其适用条件。在工程设计之前,应该从技术、经济和工期 3 方面对采用 CFG 桩复合地基方案进行可行性分析。

(2)工程设计时应主要从 3 个方面进行分析:第一,查清场地的岩土工程条件,特别应对饱和粉土层进行认真研究,研究内容包括埋藏深度、厚度、地下水埋深、物理力学性质等;第二,查清施工场地的周围环境状况,根据饱和粉土的工程特点和拟定的设计方案对其影响范围作出科学判定,判断已有建筑物是否在施工的影响范围;第三,建筑物的荷载、基础型式、基础埋深等。

(3)施工工艺方面,应采取跳打、确定合理的钻进提钻速度、采用小直径螺旋钻杆成孔等手段来减少施工对桩周土影响。

### 4 结语

(1)长螺旋钻管内泵压 CFG 桩施工产生环境问题的原因不是传统的“剪切液化”和“空桩效应”,而“剪切扰动-抽吸渗流”是 CFG 桩施工产生环境问题的主要原因。

(2)长螺旋钻管内泵压 CFG 桩施工会产生环境问题与施工场地中饱和粉土等软土层的存在和长螺旋钻管内泵压 CFG 桩的施工工艺有关。

(3)根据施工引起环境问题的机理和影响因素,提出了相应的控制措施,得出长螺旋钻管内泵压 CFG 桩施工技术在饱和粉土中是适用的。对该项技术在郑州地区及类似地层中的推广应用具有指导意义。

### 参考文献:

- [1] 张景伟,张凯祥,等. CFG 桩在郑州市区环境岩土工程应用问题研究[J]. 中州大学学报,2005,2(1):116.
- [2] 潘广灿,张金来. 郑州市东区某长螺旋成孔 CFG 桩工程质量事故原因[J]. 岩土工程界,2005,(7):58-59.
- [3] 孙瑞民. 长螺旋钻管内泵压 CFG 桩在饱和粉土中的适应性研究[D]. 武汉:中国地质大学(武汉),2007.
- [4] 邓小涛,张俞,孙瑞民. 防止长螺旋 CFG 桩施工造成环境问题的措施[J]. 山西建筑,2007,(5):80-81.
- [5] 娄国充,方纳新. 粉煤灰混凝土桩复合地基加固机理分析[J]. 粉煤灰综合利用,2003,(5).
- [6] 南京水利科学研究所土工研究所. 土工试验技术手册[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
- [7] 刘建华,朱维申,李术才. 岩土介质三维快速拉格朗日数值分析方法研究[J]. 岩土力学,2006,27(4):525-529.