

软土地区 CFG 桩群孔效应引发周边土体变形机理研究

孙宏宾¹, 郑刚^{1,2}, 程雪松¹, 王凡俊¹

(1. 天津大学 土木工程系, 天津 300072;

2. 天津大学 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要:软土地区 CFG 桩施工, 桩顶以上部分空桩孔不及时回填会造成群孔效应。通过单孔和群孔效应数值模拟, 并加以工程实测分析, 初步得到了群孔效应引发周边土体变形机理。土体变形由空桩孔孔壁内缩引起, 并在竖向和水平向应力拱的作用下达达到稳定状态。单孔孔壁变形最大值和最大值位置主要受孔深影响。多孔共存孔心距较小时, 周边土体水平和竖向应力拱相互影响削弱导致每个空孔的内缩变形均大于单孔时的变形值, 这是群孔效应引发周边土体变形严重的主要原因。随孔数增多, 周边土体的竖向和水平向变形均增大, 最大变形值位置与地表间距离减小。孔数超过 400 后, 最大值位置位于地表。孔底标高以上且距群孔边界 2 倍孔深以内的区域为群孔效应的主要影响区。

关键词:CFG 桩; 群孔; 软土; 土体变形

中图分类号:TU411 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2018)01-0039-09

0 引言

我国沿海地区经济发达、工程活动频繁, 也是广阔的软土分布区。软土土质软弱, 施工前一般先进行加固处理^[1], 且该地区地层变形极易受工程施工影响。CFG 桩应用于建筑物桩基础和复合地基中, 且一般在基坑开挖前施工。其桩顶标高一般位于基坑坑底附近, 桩身填料灌注至桩顶标高以上 0.8~1.0 m^[2], 至少 0.5 m^[3]。至于桩顶至地表的空桩孔有时由于土质等原因无法回填, 便在土体中形成了大量空孔同时存在的情况, 称之为群孔现象。各个空桩孔引起的孔周土体应力释放、变形等相互叠加放大, 以及随时间增强, 引发周边土体严重变形的问题, 称为群孔效应。与边坡^[4]、基坑、地连墙^[5-7]等大规模工程相比, 群孔效应影响相对较小, 但由于施工周边环境趋于严格, 软土地区该影响已不容忽视。CFG 桩有振动沉管法和长螺旋钻管内泵压 2 种^[8], 本文主要针对长螺旋钻管内泵压 CFG 桩群孔效应进行研究。

基于土体硬化模型, 本文首先用 Plaxis3D 分析了空桩孔引发周边土体变形机理、空桩孔孔壁变形模式及其影响因素, 然后在多孔合并简化的基础上, 研究了大量桩孔同时共存时周边土体的变形随孔数的变化, 以及深层土体的变形模式, 并分析了群孔效应主要影响区, 最后通过工程实例进行了分析验证。

1 空桩孔影响机理分析

建立单孔和两孔模型, 单孔模型主要分析孔壁内缩引发周边土体变形的影响机理和孔壁变形规律。两孔模型用来分析多孔同时存在时, 其对周边土体的变形影响相互叠加放大, 进而得出群孔效应的影响机理。

收稿日期: 2016-10-20 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.2018.01.08

基金项目: 国家自然科学基金 (51508382, 41630641); 中国博士后科学基金 (2014M561186)

作者简介: 孙宏宾(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事地下工程的研究。E-mail: 13702161775@163.com

孙宏宾, 郑刚, 程雪松, 等. 软土地区 CFG 桩群孔效应引发周边土体变形机理研究[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2018, 31(1): 39-46.

1.1 数值模型介绍

单孔模型及网格划分如图 1, 取 1/4 模型, 孔径 0.4 m, 孔深 8 m。孔心为坐标原点, 模型 x 、 y 方向取 5 倍孔深, z 方向 2 倍孔深, 邻近桩孔网格加密。两孔模型及其网格划分如图 2, 取整个模型, 孔径 0.4 m, 孔深 8 m, 孔心距 4 倍孔径。模型 x 、 y 方向取距孔边界 5 倍孔深, z 方向 2 倍孔深, 邻近桩孔网格加密。

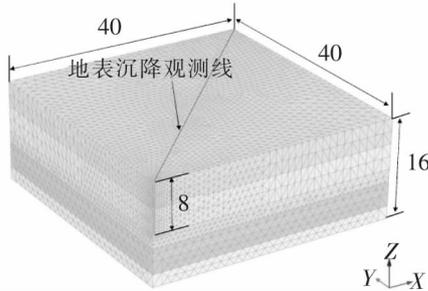


图 1 单孔有限元基准模型(单位:m)

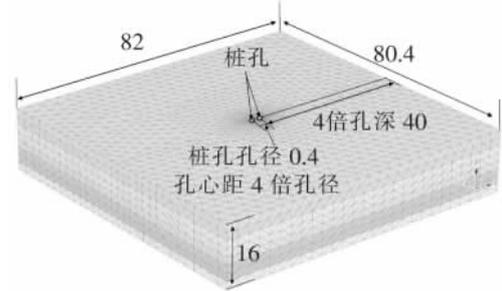


图 2 双孔有限元基准模型(单位:m)

采用硬化模型, 为简化, 考虑软土地区多为透水性较差的饱和软黏土, 取不排水条件下的总应力指标 (内摩擦角 $\phi=0^\circ$), 考虑其不排水强度 c_u 沿埋深线性增加^[9], 分布假定如式(1)所示^[10]。

$$c_u = 5 + 2.0z \quad (1)$$

式中, z 为深度。剪切模量 G 近似取 150 倍 c_u ^[11], 泊松比 ν 取 0.495。土层 2 m 一层, 计算 G 时用本层土 c_u 均值。 E_{50}^{ref} 为三轴试验参考围压下 50% 强度的割线模量, 近似取 $2(1+\nu)G$ 。 E_{oed}^{ref} 为固结仪实验在考虑围压下切线模量, 近似等于 E_{50}^{ref} 。 E_{ur}^{ref} 为卸载/重加载模量, 近似取 $3E_{50}^{ref}$ ^[12]。计算中不考虑地下水影响, 地下水位线设在模型底以下。模型计算步骤均分为地应力平衡和成孔 2 步。

1.2 单孔孔壁变形机理分析

图 1 对角线纵剖面, 提取剖面上空桩孔附近区域的位移矢量图如图 3。单孔孔壁失去支撑内缩, 孔周边土体应力释放, 总体上呈现向孔内方向位移。最大位移位于孔边缘, 且距地表一定距离的地层深处。提取孔壁单元节点沿孔径方向的位移 (以向孔内方向位移为负), 并采用 Lorents 函数曲线拟合, 如图 4。孔壁沿孔径位移最大值出现在距地表一定距离处, 最大位移位置与地表的距离约为 0.8 倍孔深, 即 6.4 m。取对角线竖向剖面 and -6.4 m 水平剖面, 提取空孔附近主应力矢量图如图 5 和图 6。可以看出, 孔周边土体主应力方向发生了偏转, 在竖向和水平向均形成了明显的土拱。孔周土体在水平和竖向两个应力拱的共同作用下达到稳定状态, 应力拱起到了抑制和减小孔壁内缩变形的作用。



图 3 单孔引发土体位移矢量图

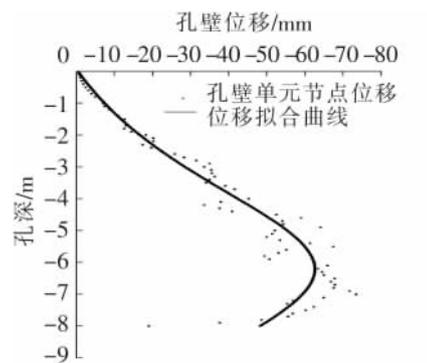


图 4 单孔孔壁沿孔径方向位移曲线

1.3 单孔孔壁变形影响因素分析

本节从孔径、孔深、土体强度 3 方面分析单孔孔壁变形的变化规律。计算模型采用图 1 所示模型, 模型边界随孔深增大而增大。计算所采用的桩孔参数取值见表 1。

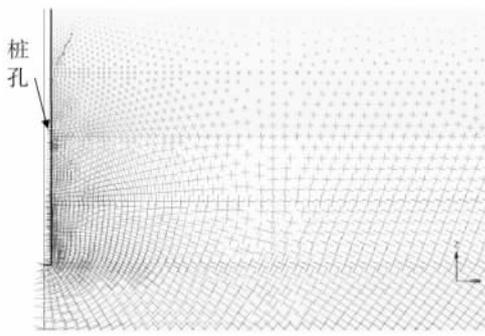


图 5 单孔周边土体竖向剖面上的主应力矢量图

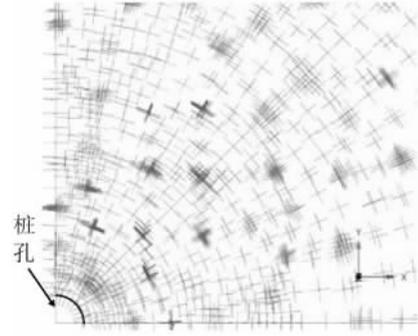


图 6 单孔周边土体-6.4 m 水平面上的主应力矢量图

表 1 计算模型变量取值表

桩孔因子变化		土体强度分布变化/kPa
孔径/m	孔深/m	
0.35	5	$5+1.5z$
0.40	8	$5+2.0z$
0.50	10	$5+2.5z$
0.60	15	$5+3.0z$
—	—	$5+3.5z$

单独变化孔径、孔深、土体强度,孔壁变形曲线如图 7。孔径增大,孔深增大,土体强度减小,孔壁沿孔径方向变形均增大,土体强度变化影响最大。最大位移位置距地表距离占孔深比例变化不大,始终位于地表以下 0.75 至 0.8 倍孔深的位置处。孔壁位移越大,土体水平应力释放越大。当 CFG 桩空桩孔无法及时回填时,其深度不宜过大。当单孔单独存在时(孔径不超过 0.6 m),要特别注意孔壁附近地表以下 0.75 至 0.8 倍的孔深位置附近地下设施的保护。对于单个较大直径其它桩孔,已有学者做过研究^[13]。

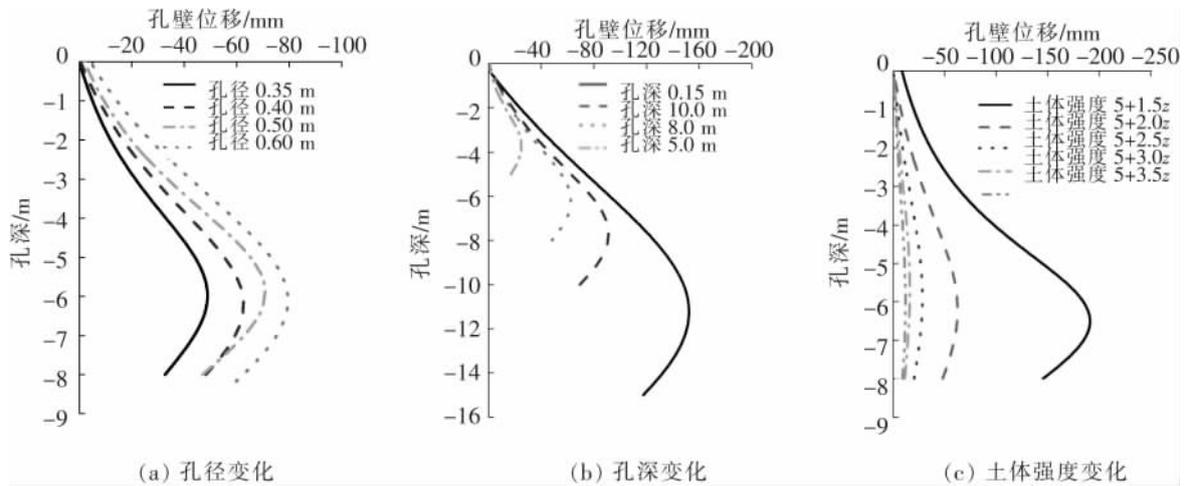


图 7 不同孔径、孔深、土体强度下单孔孔壁沿孔径方向位移曲线

1.4 双孔的相互影响机理分析

两孔共存,引发孔周土体应力释放等相互作用、叠加放大,影响更严重。本节采用图 2 所示模型研究两孔共存时空孔效应的叠加机理及周边土体变形规律。取 $y=40.2$ m 纵剖面,空桩孔附近土体位移矢量如图 8。同单孔,最大位移位置位于孔壁附近,且距地表一定距离的地层深处。

将土体总位移分解为竖向沉降和水平方向变形分析,土体沉降云图如图 9(a)。x 方向的土体水平变形为沿孔径方向向孔内的变形,如图 9(b)。由图 9(a)可见,两孔共存引发的周边地层沉降分布在孔底标高水平面以上,靠近孔壁位置沉降最大,最大沉降位置位于孔壁处,且距地表一定深度地层深处。孔底以下地层,孔底附近区域呈现隆起。由图 9(b)可以看出,两孔共存引发的周边地层水平变形,以两孔之间的

中心线成近似对称分布。水平方向的最大位移仍位于孔壁处,且距地表一定距离的地层深处。

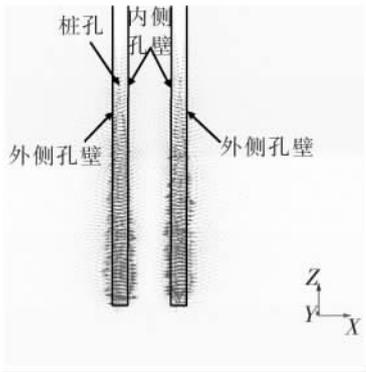


图 8 2个孔引发土体位移矢量图

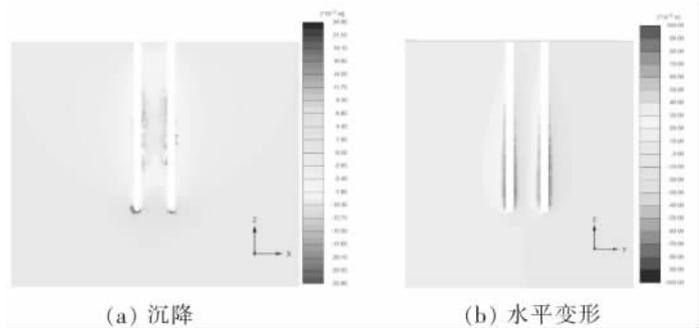


图 9 2个孔引发土体沉降和水平变形

提取单孔和两孔共存孔壁水平变形曲线如图 10。可见,两孔共存孔壁变形增大,其中内侧孔壁水平变形较外侧孔壁小。以图 2 模型为基准,单独改变孔心距大小,得到孔心距为 2 倍、4 倍、6 倍、7 倍孔径时,外侧孔壁水平位移曲线的变化与单孔孔壁的关系如图 11。孔心距越大,孔之间的相互影响越小,孔壁变形最大值越小,最终趋于和单孔单独存在时孔壁变形一致。

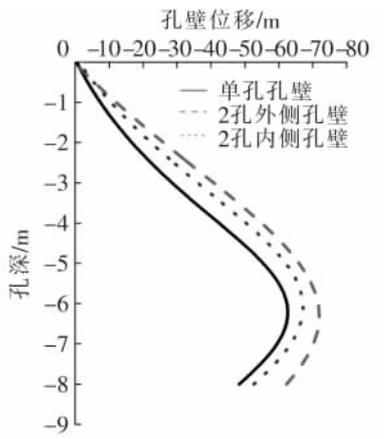


图 10 2个孔共存时孔壁沿孔径方向位移曲线

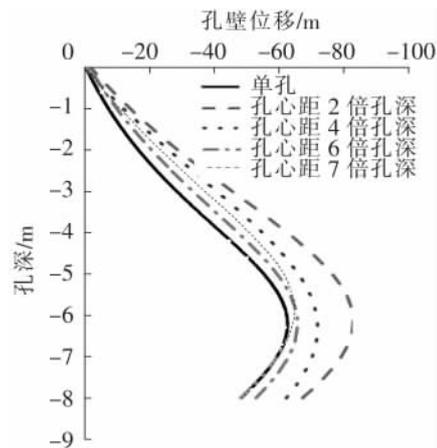


图 11 不同孔心距下孔壁沿孔径方向位移曲线

取 $y=40.2\text{ m}$ 纵剖面和 $z=-6.4\text{ m}$ 水平剖面,双孔附近主应力矢量图分别如图 12、图 13。主应力矢量发生偏转,土体在竖向和水平两个方向应力拱下达到稳定。由于空孔效应影响相互叠加,原有的单孔应力拱在两孔之间受到破坏。竖向剖面上,由于两孔之间的距离有限,孔间应力拱几乎无法形成。水平剖面上,环向应力拱宽度受到孔间距离限制,也有一定程度削弱。水平和竖向剖面上土体应力拱均受到破坏或削弱,阻止孔周土体向孔内变形的能力减弱,由此导致各孔内缩变形均较单孔时增大。可见,在多孔存在情况下,空孔周边土体中水平和竖向上的土应力拱的相互影响与削弱是导致群孔效应的重要原因。

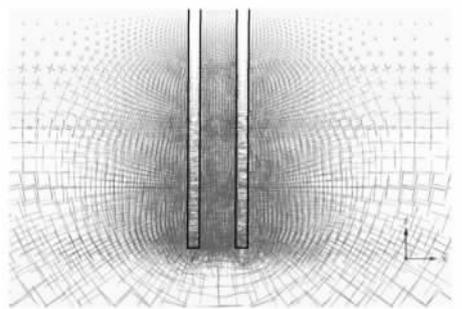


图 12 2个孔共存时周边土体纵剖面主应力矢量图

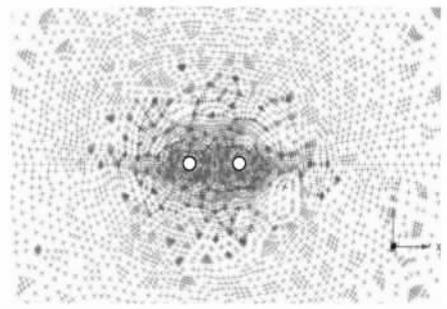


图 13 2个孔共存时周边土体-6.4m 水平面主应力矢量图

2 群孔周边土体变形分析

2.1 群孔数值模型介绍

本节对大量桩孔共存引发群孔效应建模分析时,取孔径 0.4 m,孔深 8 m,模拟了 4 个至 2 500 个孔共存情况。孔心距 4 倍孔径,方形排列。土质参数取值同单孔。为提高收敛速度,取土体强度分布模式 5+3.0z(kPa)。取 1/2 模型, x 、 y 方向模型边界距群孔边界 5 倍孔深, z 方向 2 倍孔深。如图 14,群孔边界面为与最外排孔心连线垂直距离 0.5 倍孔心距的群孔边界线所在竖向剖面。模型简化:孔数小于 100,六边形孔代替圆孔,即孔型简化;孔数大于等于 100,25 孔合 1 多孔合并,并用六边形孔代替圆孔。原则是简化前后引发周边土体变形相同。具体简化方法如图 14, β 为孔型转化系数, γ 为多孔合并转化系数。简化后的 2 500 孔模型如图 15。提取部分模型简化前后群孔边界面中心线上的竖向和水平变形,如图 16。简化前后群孔边界面中心线上的竖向沉降模式和水平变形模式一致,且数值相差不大,可以满足研究需要。

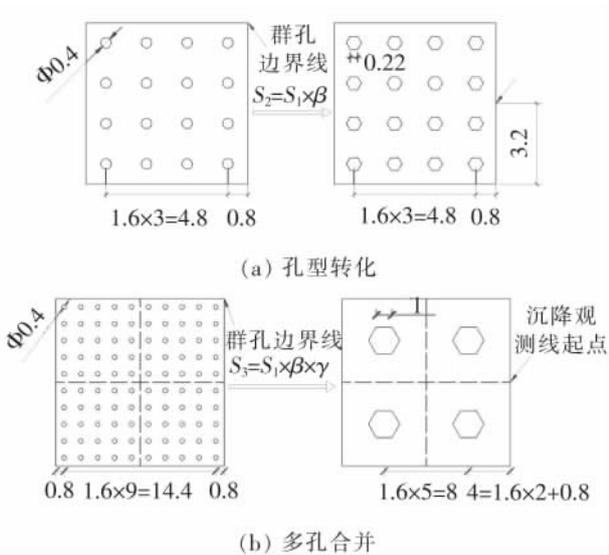


图 14 孔型简化和多孔合并简化(单位:m)

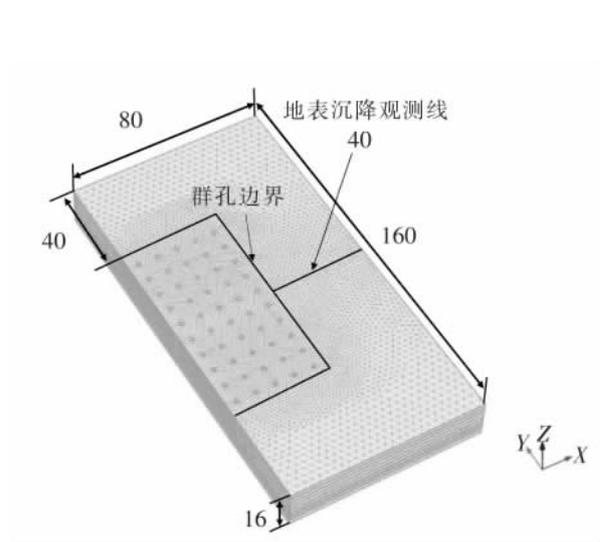
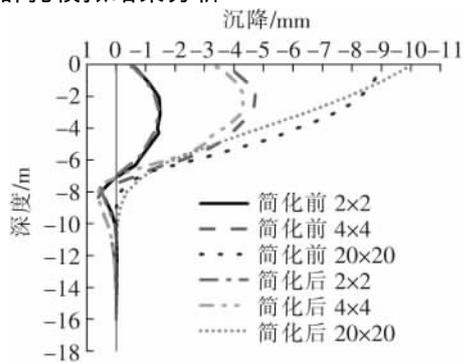
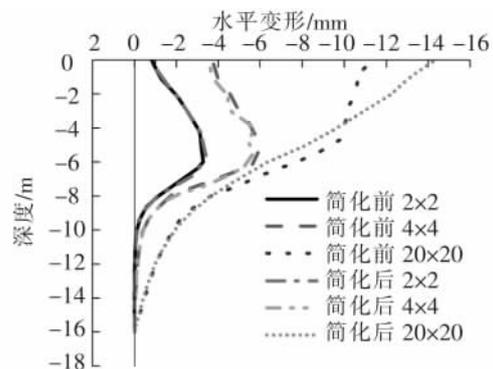


图 15 群孔有限元模型示意图(单位:m)

2.2 群孔模拟结果分析



(a) 沉降对比



(b) 水平变形对比

图 16 简化前后群孔边界面中心线上沉降和水平变形对比曲线

提取 100 孔模型群孔边界面上 z 方向沉降和 x 方向水平变形如图 17。沉降和水平变形均主要分布在孔底标高以上区域,其中中心线处最大。孔底以下土体部分区域较小隆起,如图中 a 区域。

提取边界中心线上,孔数为 4、16、100、400、2 500 时沉降和水平变形曲线如图 18。孔数较少时(100 以下),沉降值较小,孔底标高附近微小隆起。最大沉降位置在距地表一定距离处。随孔数增多沉降区域增大,沉降值增大,最大值位置向地表移动。孔数大于等于 400 时,隆起消失,最大沉降值位置位于地表。

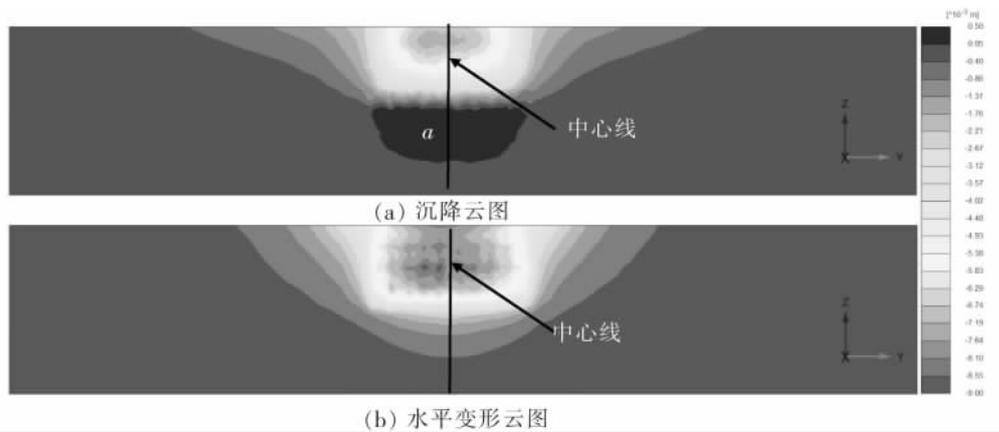


图 17 100 孔共存时群孔界面土体沉降和水平变形云图

孔数较少时,水平变形较小,最大水平变形位置位于距地表一定距离处。随孔数增多最大水平变形增大,最大值位置与地表距离减小。孔数大于等于 400 时,最大变形位置位于地表。实际大多是成千上百个桩孔共存,故群孔效应引发周边土体变形以最大沉降和最大水平变形位置均位于地表模式为主。

以 2 500 个桩孔共存为例,分析图 15 地表沉降观测线所在剖面上的沉降和水平变形,可得出与群孔边界不同距离处的深层土体变形,如图 19。整体上为三角形变形模式,最大竖向变形和水平变形位置均位于地表,群孔边界处。孔底标高以上区域,随着与群孔边界距离的增大,土体竖向变形和水平变形均逐渐减小;孔底标高以下,土体竖向变形与水平变形均较小;主要竖向变形区和水平变形区均位于群孔孔底标高以上,距群孔边界 2 倍孔深以内的区域,称之为群孔效应主要影响区。

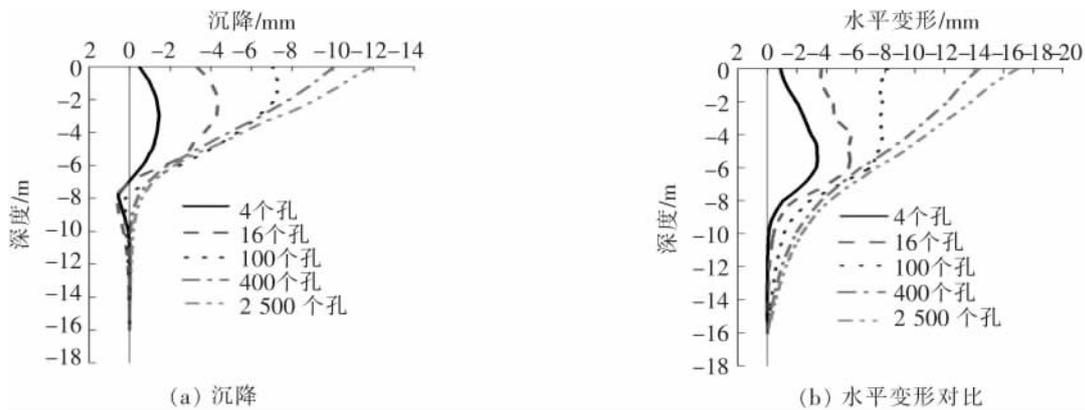


图 18 不同孔数下群孔界面中心线土体沉降和水平变形

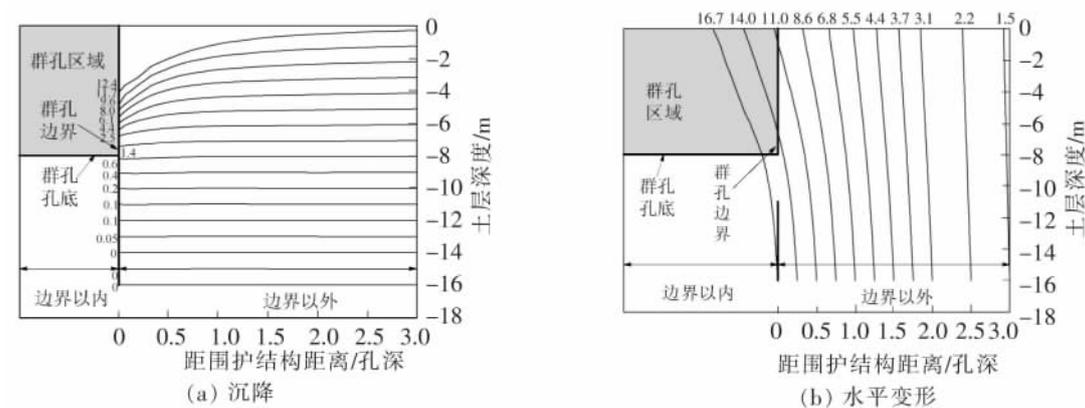


图 19 2 500 孔共存时周边土体沉降和水平变形

3 工程案例分析

某市基坑工程,开挖深度 12 m,周边建筑概况如图 20 所示。选取长螺旋钻管内泵压 CFG 桩作基础桩,共 2 000 余根,桩径 400 mm,桩间距 4 倍桩径。CFG 桩基坑开挖前施工,混合料填到基坑底部以上 4 m,桩顶与地表间 8 m 空桩孔由于孔径较小、土体较软等原因未回填。通过 34 个沉降点监测发现,由于大量空孔存在,使土体水平应力释放,基坑第一步开挖仅 2.95 m 后,基坑周边地表即发生较大沉降,如图 20,监测点旁标记数字为该监测点实测沉降值,可见地表的沉降值远远超出了仅进行基坑开挖造成影响。

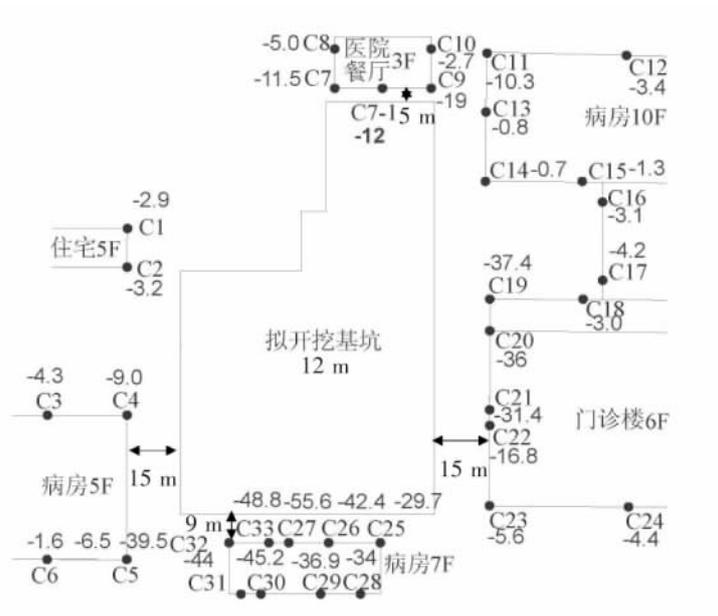


图 20 工程概况及沉降实测值

应用前文孔型转化及多孔合并的简化方法,本节基于硬化模型用 Plaxis3D 对该基坑中 CFG 桩施工群孔效应进行了模拟。模拟分为地应力平衡、围护结构生成、CFG 桩成孔、降水开挖 2.95 m 4 个分析步。由于围护结构生成产生影响较小,仅提取监测点位置处 CFG 桩成孔后沉降模拟值、降水开挖后总沉降模拟值,并将降水开挖后的总沉降模拟值和对应监测点的实测值进行了对比分析,见表 2。

表 2 监测点沉降值对比

序号	监测点	桩孔生成后/mm	基坑开挖 2.95 m 后/mm	实测值/mm	模拟值与实测值 差异比例/%	桩成孔沉降 比例/%
1	C7	-6.5	-11.2	-11.5	2.6	58.0
2	C19	-14.1	-27.1	-37.4	27.5	52.0
3	C20	-16.2	-28.2	-36.0	21.7	57.4
4	C21	-16.0	-28.5	-31.4	9.2	56.1
5	C26	-18.2	-37.2	-42.4	12.3	48.9
6	C28	-12.1	-25.9	-34.0	23.8	46.7
7	C29	-12.3	-27.9	-36.9	24.4	44.1
8	C32	-16.9	-33.3	-39.5	15.7	50.8
9	C33	-18.1	-37.1	-48.8	24.0	48.8

对比监测点的模拟值和实测值可以发现,大部分监测点的实测值和模拟值较为接近。通过 CFG 桩群孔效应所引发沉降占第一步开挖后群孔效应与基坑开挖引起的总沉降的比例可以看出,CFG 桩群孔效应引起的沉降占总沉降的 50% 左右,个别点甚至达到了近 60%。由此可见,CFG 桩成孔产生的群孔效应对周边环境的影响是不容忽视的。通过该工程案例的模拟分析可见,基于多孔合并法的有限元模拟可以对 CFG 桩群孔效应对周边环境的影响进行一定的定性研究和定量分析。

4 结论

采用有限元模拟了 CFG 桩施工过程中产生的群孔效应。通过单孔和双孔的对比,分析了群孔效应影响机理,并通过对大量群孔共存情况的模拟总结了群孔效应引发的周边土体变形模式。结论如下:

(1)空桩孔周边土体变形由孔壁内缩引起。单孔孔壁变形随孔径、孔深增大而增大,随土体强度增大而减小,变形最大值和最大值位置均主要受孔深影响;双孔共存,空孔效应叠加,除孔径、孔深外,其孔壁变形还受孔心距影响,孔心距越大,孔间影响越小,孔壁变形越趋于和单孔单独存在时一致。

(2)空桩孔周边土体在水平和竖向两个应力拱共同作用下达到稳定状态。双孔共存时,水平和竖向土体应力拱均受到破坏或者削弱,阻止孔周土体向孔内变形的能力减弱,由此导致各孔内缩变形均较单孔时增大。这是群孔引发周边土体严重变形的重要机理之一。

(3)通过工程实例验证可见,基于多孔合并法的有限元模拟可以对大量桩孔共存时群孔效应引发周边深层土体变形进行定性和定量分析,且该方法能使模拟大幅简化。

(4)定义距最外排孔孔心连线 0.5 倍孔心距的直线所在的竖向剖面为群孔边界,边界面上沉降与水平变形最大值均位于中心线附近,随孔数增多,最大值增大,最大值位置与地表间距离逐渐减小。孔数大于等于 400 时,群孔边界面上最大沉降和最大水平变形均位于地表。群孔周边土体变形呈三角形模式。变形主要发生在孔底标高以上且距群孔边界 2 倍孔深范围内,此区域为群孔效应主要影响区。

对于群孔效应影响机理和引发周边土体变形规律的研究,基于纯黏性土硬化模型,仅考虑了成孔瞬间桩顶以上空桩孔引发的周边土体塑性变形,对于桩孔坍塌和 CFG 桩施工过程中的影响未作考虑。当土质中含有渗透系数较大的土层时,需作进一步研究。此外,文中孔型转化和多孔合并转化系数均需通过试算使用,更加简易方便地应用于工程设计中的群孔效应简化计算方法也尚待研究。

参 考 文 献

- [1]全震. 胶黄线软土路基的设计[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版, 2014, 27(S1): 231-233.
- [2]中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [3]中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ106—2003 建筑桩基检测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [4]张昀青, 李维珍, 闫静昌, 等. 边坡可靠性指标及敏感性因素分析[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版, 2015, 28(1): 62-65.
- [5]Lei G H, Sun H S, Ng C W W. An approximate analytical solution for calculating ground surface settlements due to diaphragm walling[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 61(3): 108-115.
- [6]Powrie W, Kantartzi C. Ground response during diaphragm wall installation in clay Centrifuge model tests[J]. Geotechnique, 1996, 46(4): 725-739.
- [7]刘国彬, 鲁汉新. 地下连续墙成槽施工对房屋沉降影响的研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(2): 287-289.
- [8]惠云杰. 水泥粉煤灰碎石桩(CFG 桩)施工机械装备选型研究[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版, 2014, 27(S1): 191-192.
- [9]Ladd C. Stress-strain modulus of clay in undrained shear[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1964 (SM5): 103-131.
- [10]Cheng X S, Zheng G, Soga K, et al. Post-failure behavior of tunnel heading collapse by MPM simulation[J]. Sci China Tech Sci, 2015, 58: 2139-2152.
- [11]Ladd C C. Stability evaluation during staged construction[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 117(4): 540-615.
- [12]Byrne P M, Cheunga H, Yan L. Soil parameters for deformation analysis of sand masses[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1987, 24(3): 366-376.
- [13]路平, 郑刚. 立交桥桩基础施工及运营期对既有隧道影响的研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 923-927.

(下转第 54 页)

The results show that the displacement of the first retaining pile can be reduced with the increase of the length of the second retaining pile, bench width and the inclined angle of retaining pile, and the bench width and the inclined angle of retaining pile are main influence factors. The impact of the ratio of the first excavation depth to the second excavation depth on the displacement of first retaining pile is related to the length of the second retaining pile and bench width.

Key words: foundation pit; unbraced multistage supporting structure; finite difference method; deformation

~~~~~  
(上接第 46 页)

## Study on the Mechanism of Soil Deformation Caused by the Borehole Group Effect of CFG Piles in Soft Soil Area

Sun Hongbin<sup>1</sup>, Zheng Gang<sup>1,2</sup>, Cheng Xuesong<sup>1</sup>, Wang Fanjun<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. MOE Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The hollow boreholes above pile head, which are usually left unbackfilled in the soil strata during the construction of CFG piles, could lead to the borehole group effect in soft soil area. The mechanism for the borehole group effect causing the deformation of surrounding soil is investigated through a series of simulations of single hole or group holes and the analysis of an engineering case. The soil deformation is caused by the shrinkage of the borehole wall and reaches a steady state under the action of the horizontal and vertical stress arching. For the single borehole, the maximum deformation value and the distance between the maximum value position and ground surface are mainly influenced by the hole depth. For the borehole group, the shrinkage of each hollow borehole becomes greater than that of the single hole because the horizontal and vertical stress arching surrounding each hole will influence and destroy each other when the hole center distance is relatively small. This should be the important mechanism for the borehole group effect. As the hole number increases, the maximum settlement and horizontal displacement in the soil increases, but the distance between the maximum value position and the ground surface decreases. The maximum value position moves to the ground surface when the hole number is greater than 400. The zone above the elevation of the hole bottom as well as within the horizontal distance of twice the hole depth is the main influence zone of the borehole group effect.

**Key words:** CFG Piles; borehole group; soft soil; soil deformation