

群孔效应对周边环境影响的控制措施研究

郑刚^{1,2}, 李溪源^{1,2}, 王若展^{1,2}, 程雪松^{1,2}, 张涛^{1,2}, 王凡俊^{1,2}

(1. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072;

2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘要:在软土地区进行桩基施工时会留下大量空孔,工程案例及已有研究表明,当群孔大量存在时,其对周边环境可能造成的影响相当可观,但减小其影响的措施却尚未得到系统研究。利用 Plaxis 3D 有限元软件对群孔效应进行了探索分析,针对群孔效应对周边环境的影响,提出了几种较为经济有效的控制措施,包括在桩基施工前提前施工围护结构、提前施工第一道支撑及空孔回填。提前施工围护结构对控制群孔效应对周边环境的影响具有显著效果,提前施工第一道支撑,可以进一步增加围护结构的抗侧移刚度,大幅度减小围护结构的水平变形;采用空孔回填措施时,回填整个群孔区域外围一定排数空孔即可起到较好的效果。实际工程中,上述几种控制措施可根据实际情况综合使用。

关键词:软土;桩基施工;CFG 桩施工;群孔效应;控制措施

中图分类号: TU47 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2020)02-0008-08

0 引言

软土具有高地下水位、高含水率、高孔隙比、高压缩性、高灵敏度、低强度、低透水性的特点^[1-2],土体受工程活动影响较大,在我国沿海地区及内陆临江滨湖地区大量分布。在如今工程用地紧张、周边环境复杂、变形控制严格的条件下,钻孔灌注桩成孔、CFG 桩钻孔等工程活动引起的周边地层变形已不容忽视^[3-4],在某些条件下甚至成为影响变形的主要因素。

灌注桩施工成孔对周边土体及环境的影响已经得到了一些学者的重视。蒋红心等^[5]收集了一些工程实测数据,其中南洋广场的钻孔灌注桩孔径在 30 h 之后从刚开始时的 1 m 减小到了 0.84 m,直径减小了 0.16 m。河南路地铁的钻孔灌注桩孔径更是从刚开始的 1 m 缩小到了 0.7 m,缩径达到了 0.3 m。闫静雅^[3]设计了 2 组试验来探索钻孔灌注桩对临近隧道的影。一组为在临近隧道 1 m 位置处进行直径 1.8 m 的灌注桩成孔,另一组为在 0.45 m 位置处施工相同直径的灌注桩孔。对比 2 组试验的结果可以发现,1 m 处钻孔时引起的隧道变形为 1.6 mm,而 0.45 m 处钻孔时,隧道临近钻孔这一侧的管片发生了向钻孔侧的水平变形,导致隧道水平方向的直径增加了 3 mm,而竖直方向的直径减小了 2 mm。章荣军等^[6]收集了武汉地铁二号线循礼门站桩基施工时的实测数据,实测数据表明,灌注桩成孔引起桥墩的沉降量为 10.6 mm,而桥墩的沉降由钻孔灌注桩成孔过程引起的可达 47.1%。

当灌注桩或 CFG 桩作为建筑物的桩基时,一般情况下,在基坑开挖之前自地面开始施工灌注桩及 CFG 桩,群桩基础的桩顶标高位于基坑底部附近,而施工完成后桩顶至地表的空孔需利用其他土体进行回填。但在实践中也经常存在由于各种原因回填不及时的现象,特别是软土地区桩数多、桩径小、桩孔可能出现坍塌时,回填较为困难,从而造成回填不及时,也有部分工程采用防护盖板、围挡等作为防止机械和人员掉落的措施,从而未对桩孔进行回填。桩孔的回填不及时或者不回填均会在地层中形成大量空桩

收稿日期:2018-10-16 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20180122

基金项目:国家自然科学基金(51508382);天津市自然科学基金(18JCQNJC07900)

作者简介:郑刚(1967—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为土力学及岩土工程。E-mail:zhenggang1967@163.com

郑刚,李溪源,王若展,等.群孔效应对周边环境影响的控制措施研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2020,33(2):8-15.

孔同时存在的情况,称为群孔现象^[1]。

目前较为常见的钻孔灌注桩^[7],长螺旋 CFG 桩^[8]在施工时都会留下大量空孔,这种大量空孔同时存在导致应力释放叠加、互相扰动而引起的周边土体较大变形,并随时间变化影响更加明显的现象叫做群孔效应^[1],如图 1 所示。

目前,由于城市中建筑规模日益庞大,群桩基础动辄由成百上千根钻孔桩组成。

例如,上海中心大厦作为一座超高层地标式摩天大楼,主楼采用钻孔灌注桩作为承重桩基,主楼桩总数 955 根,桩径 1 000 mm。其中核心筒下 A 型桩 247 根,成孔深度 86 m,有效桩长 56 m;核心筒外 B 型桩 708 根,成孔深度 82 m,有效桩长 52 m^[9]。天津 117 大厦主塔楼共采用了 941 根灌注桩,桩径 1 000 mm,桩端埋深约 100 m,有效桩长约 76 m^[10]。同时,工程界已经开始认识到大量空孔同时存在时会对周围环境造成不容忽视的影响,部分学者对这一问题进行了探索分析,也收集了一些工程实测数据,例如郑刚等^[1]对某施工面积约 5 200 m² 的基坑工程周边建筑物及土体沉降进行观测。此工程 2 000 余根 CFG 桩施工完毕后桩顶上部遗留了 8 m 深的空桩孔,开挖第一步基坑至 2.95 m 深度时,基坑周边地表及建筑物沉降严重,其中基坑南部 9 m 处楼房最大沉降量为 55.6 mm。经数值模拟分析发现,群孔效应引起了周边地表及建筑物较大的沉降,其引发的沉降量占群孔效应和第一步基坑开挖总沉降量的 50%左右,有的甚至达到近 60%,可见由于 CFG 桩施工桩顶以上部分不能完全及时回填遗留大量空孔引起群孔效应造成的影响不容忽视。

通过上述研究可见,当群孔大量存在时,其对周边环境可能造成的影响相当可观,但目前减小这种影响的措施却还没有得到系统的研究。然而,对于环境控制严格的工程,经济有效地控制群孔对周边环境影响的措施具有非常重要的意义。基于不提高工程造价或造价提高很小的前提,提出了在桩基施工前预先施工围护结构、在群孔外围进行空孔回填以及提前施工第一道支撑这 3 种控制方法,并分别探索分析了这几种控制措施的效果。

1 围护结构对群孔效应影响的控制作用研究

1.1 有限元模型的建立

采用 Plaxis 3D 有限元软件进行数值模拟。数值模拟土体采用 Modified Cam-Clay 模型,排水类型采用不排水 A 类。土体饱和重度 γ_{sat} 取 17.5 kN/m³。 $e-\ln p$ 关系图中 NCL 及 CSL 线斜率 λ (压缩指数)取 0.25,回弹再压缩曲线 OCL 线斜率 κ (膨胀指数)取 0.05, $p'-q$ 平面临界状态线切线斜率 M 取 0.65,泊松比 ν 取 0.3^[11],水位位于地表。此外,若模拟时采用正常固结土,则邻近地表处的土体强度将过低,与实际工程差距较大,因此决定选用弱超固结土。超固结土的不排水强度与其应力历史有关^[12], $\frac{(\tau_u/\sigma_{vi})}{(\tau_u/\sigma_{vi})_n} = (OCR)^m$,其中, τ_u 为不排水强度; σ_{vi} 为应力; OCR 为超固结比; n 表示正常固结。

为了模拟实际工程中土体不排水强度随深度 z 逐渐增加的特征,采用如下方法获取模型中土体的初始状态。将初始孔隙比 e_0 设为 2.62^[11](高岭黏土有效应力为 0 kPa 时的近似孔隙比),在地表均布施加 150 kPa 荷载,忽略土体不排水行为使其在超载下充分固结,加载结束后撤除地表 150 kPa 荷载,在土体自重应力下重新固结,最终形成的不排水强度沿深度的分布如图 2 所示,不同深度处的土体不排水强度略大于

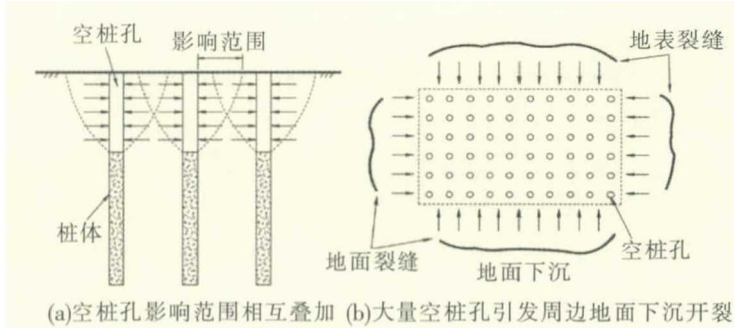


图 1 群孔效应示意图

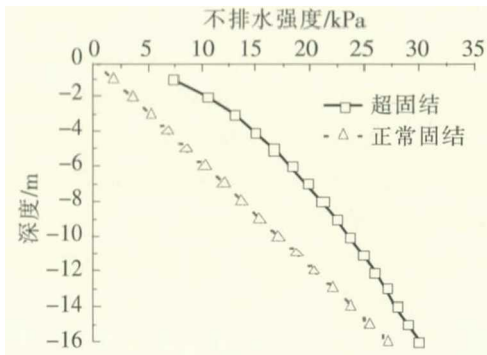


图 2 正常固结土和超固结土强度对比

正常固结土。

此次计算模拟 CFG 桩施工遗留在地层中的大量空孔,孔内无泥浆护壁。孔径采用 0.4 m,空孔深 8 m,孔间距取 4 倍孔径 1.6 m,如图 3 所示。当分析成孔引起的周边土体变形时,定义群孔边界线为距最外排空孔孔心 2 倍孔径距离。为了减小边界效应,模型边界水平方向距群孔边界至少 2 倍开挖深度。围护结构采用地连墙,利用板单元模拟,厚 0.8 m,深 16 m,混凝土重度取 25 kN/m³,弹性模量取 30 GPa,泊松比 ν 取 0.2。地连墙设置于群孔边界线处。模型计算步骤均分为施工地下连续墙(部分工况)和不排水条件下桩孔开挖两步。

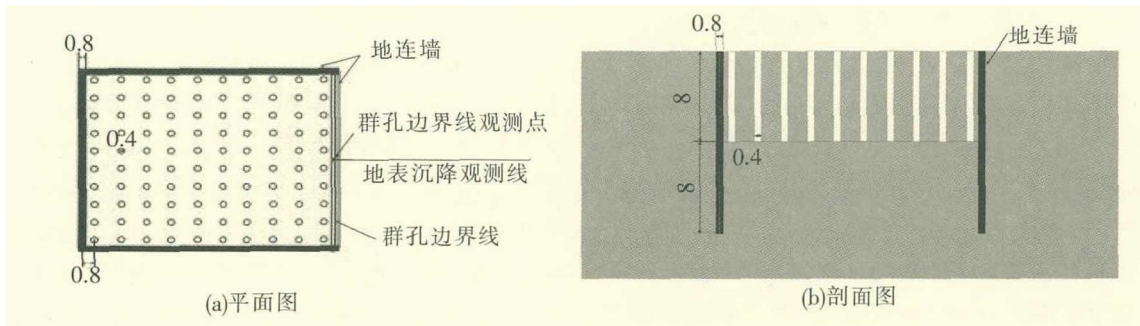


图 3 群孔及围护结构(单位:m)

1.2 不同工况控制效果对比

为了分析提前施工围护结构对群孔效应导致的周边环境变形的控制效果,分别计算了 100 孔、225 孔、400 孔、625 孔时不提前施工围护结构和提前施工围护结构 2 种工况下,群孔沉降观测线上地表沉降和群孔边界面(提前施工围护结构时则为围护结构)的变形。地表沉降具体对比分析如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,提前施工地连墙与否对地表沉降有较大的影响,未提前施工地连墙时,由于大量空孔同时卸荷导致的坑外地表的沉降呈现出明显的三角形分布,而提前施工地连墙则使地表沉降由三角形分布转化为凹槽形分布。沉降最大值也因此大幅度减小,在 100 孔的情况下由 15 mm 骤减至仅 1 mm,减小幅度高达 90%。而在 625 孔时也由 22 mm 减小至 8 mm,减小幅度也达到了 60%,减小了一半以上。

不同孔数下提前施工地连墙与未提前施工时群孔边界面上的水平位移对比如图 5 所示。

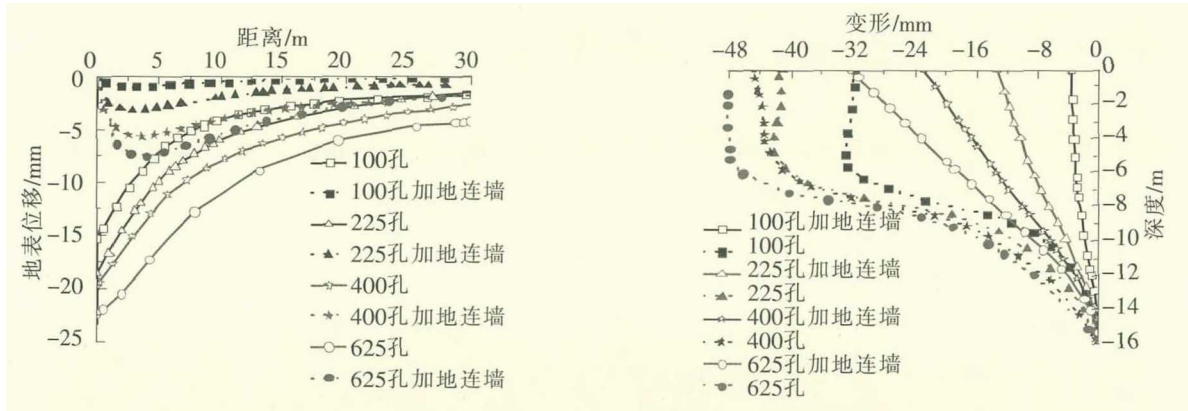


图 4 不同孔数下提前施工地连墙与不提前施工引起的地表沉降观测线上的沉降值对比

图 5 不同孔数下提前施工地连墙与不提前施工引起的群孔边界面上的水平位移对比

从图 5 中可以看出,当未提前施工地连墙时,孔底标高以上的土体由于群孔的卸荷作用向坑内的位移较大,而孔底以下的土体由于与上部土体存在粘聚力及一定程度的摩擦,在上部土体的带动下也会有向坑内土体变形挤压的趋势,但整体而言效果较弱,因此群孔边界面上的土体水平位移在孔底以下下降幅度很快。而提前施工地连墙后,孔底以上坑内土体卸荷导致的周围土体向坑内的变形使得地连墙呈现出悬臂式的变形,孔底以下土体对地连墙的变形有较强的限制作用,由于地连墙的刚度较大,上部土体的变形也因此大幅度减小。总体来说,地连墙的作用使得基坑范围内下部土体和上部土体共同承担了上部土体的卸荷作用,因此最大位移减小。这也是地表沉降大幅度减小的一个原因。

此外,即使提前施工了地连墙,随着孔数增多,地表沉降仍有一定程度的增加,群孔边界处的变形随孔数增加也有一个较为明显的增长,这些都在一定程度上说明了群孔效应的影响。

综上所述,提前施工地连墙对群孔效应引起的周边地表的沉降有着很好的控制作用,且地连墙等基坑围护结构作为后续基坑开挖时不可或缺的工序,其提前施工并不会引起工程造价的变化。

为了更进一步研究提前施工地连墙对群孔效应的影响,在 100 孔工况下分别分析了地连墙深度 8 m、10 m、12 m、14 m、16 m 时地表沉降观测线上的地表位移以及群孔边界面处的水平变形。地表沉降及边界面上水平位移如图 6、图 7 所示。

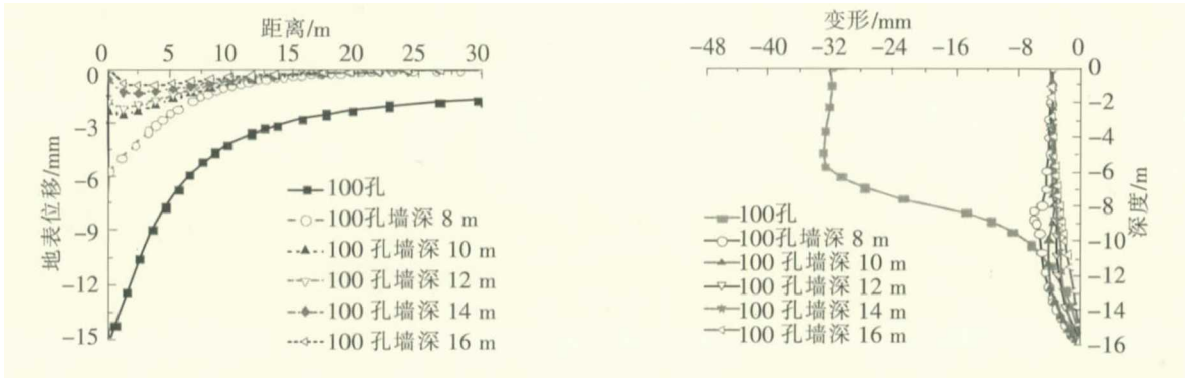


图 6 100 孔时地表沉降随地连墙深度变化规律 图 7 100 孔时群孔边界面处水平位移随地连墙深度变化规律

从图 6、图 7 中可以看出,由于孔底以上坑内土体并未完全开挖,因此即使地连墙仅有 8 m 深,即与空孔相同深度,其对减小群孔效应对周边土体的影响仍有很大的作用,使得地表沉降由没有地连墙时的 15 mm 减小至 6 mm,群孔边界面处的水平位移也大幅度减小,由没有地连墙时的 32 mm 减小至 4 mm。但值得注意的是,虽然 8 m 深的地连墙大大削弱了群孔效应对周边的影响,但其地表沉降模式仍是三角形分布,而由于没有嵌固深度,其水平变形也呈现出踢脚型变形模式。当地连墙深度大于 8 m,即有了一定的嵌固深度后,地表沉降变形模式由三角形分布转化为凹槽形分布。而地连墙的变形模式也由踢脚型逐渐转变为最终的悬臂式。

综上所述,桩基施工提前施工地连墙等围护结构作为一种较为经济的方法,对控制群孔效应对周边环境的影响有很显著的效果,且当地连墙嵌固比较大时这一效果更加明显。

2 提前施工第一道支撑对群孔效应影响的控制作用研究

群孔效应类似于基坑开挖^[1],而在围护结构顶部加上支撑可以大幅度增加围护结构抗侧移刚度,进而减小群孔效应对周边环境的影响。

为了分析提前施工第一道支撑对群孔效应导致的周边环境变形的控制效果,故本节对提前施工第一道支撑对群孔效应的控制效果进行分析。支撑采用点对点锚杆模拟,采用十字正交支撑模式,支撑间距为 6 m,EA 取 4.9×10^6 kN^[13-14],布置方式见图 8。

本节分别对比了 900 孔、1 600 孔、2 500 孔时无控制措施、提前施工地下连续墙、提前施工地下连续墙和第一道支撑 3 种工况下,群孔沉降观测线上地表沉降和群孔边界面的变形。地表沉降具体对比分析见图 9。

从图 9 中可以看出,提前施工第一道支撑对地表沉降有较大的影响。未采取控制措施时,由于大量空孔同时卸荷导致的坑外地表的沉降呈现出明显的三角形分布,而提前施工地连墙则使地表沉降由三角形分布转化为凹槽形分布。同时提前施工第一道支撑后,沉降最大值进一步减小。在 900 孔的情况下,当提前施工地连墙时,地表沉降最大值为 9 mm,同时提前施工第一道支撑后,地表最大沉降减小为 5 mm,减小幅度达到 45%;而在 1 600 孔和 2 500 孔的情况下,地表沉降也分别由 10 mm、11 mm 减小为 7 mm、8 mm,减小幅度接近 30%。3 种工况下群孔边界面上的水平位移对比如图 10 所示。

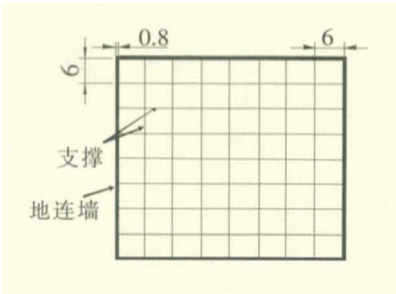


图 8 支撑布置图(单位:m)

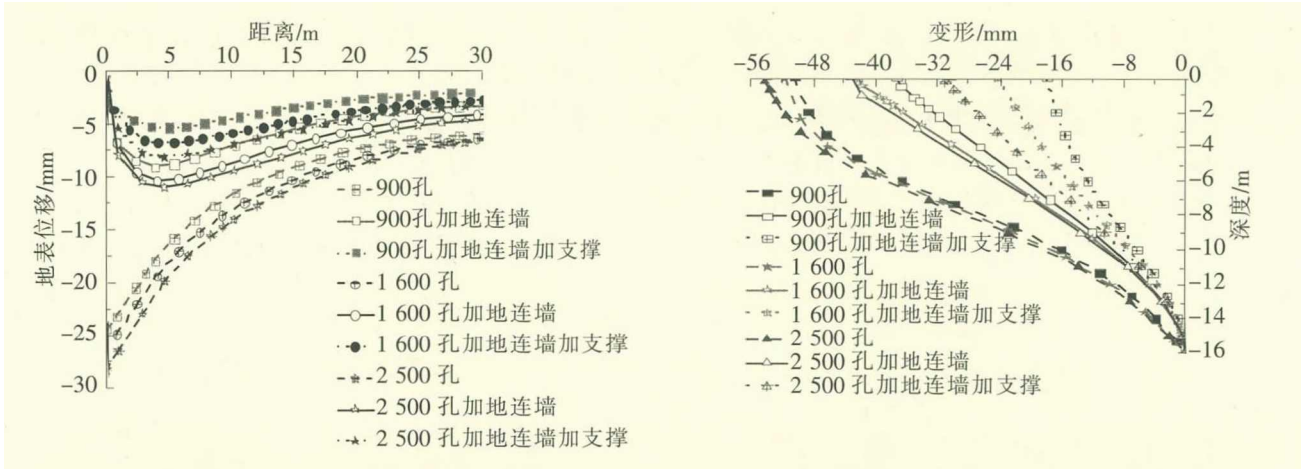


图 9 施工地连墙及加支撑时地表沉降的变化规律

图 10 施工地连墙及加支撑时群孔边界面上的水平位移

从图 10 中可以看出,当仅施工地连墙时,3 种工况下群孔边界面上的水平位移最大值分别为 37 mm、40 mm、42 mm,同时施工第一道支撑时,水平位移最大值分别减小为 18 mm、24 mm、30 mm,减小幅度分别为 51%、40%、29%,减小幅度较大,但随着孔数的增多,提前施工第一道支撑的控制效果越来越弱,这些都在一定程度上说明了群孔效应的影响。

综上所述,提前施工第一道支撑对群孔效应引起的周边土体变形有着很好的控制作用,且第一道支撑作为后续基坑开挖时不可或缺的工序,其提前施工并不会引起工程造价的变化。

3 部分空孔回填对群孔效应影响的控制作用研究

3.1 空孔回填效果分析

群孔效应产生的原因主要是由于桩基施工后坑底至地表范围的空孔未能及时回填,因此及时回填空孔应为减小群孔效应对周围环境影响的一个措施。但大量空孔全部回填在工期较紧的工程中实行起来有一定的难度,且成本较高,这也是实际工程中会出现大量空孔同时存在的一个重要原因。因此,探索出耗时较少,同时又能在一定程度上减弱群孔效应对周围环境影响的回填方法就显得十分迫切且有意义。本节首先针对 625 孔的工况进行回填的效果分析,回填范围分别为群孔最外围 1 排、3 排、5 排空孔,回填示意图如图 11 所示,具体回填效果变化规律如图 12、图 13 所示。

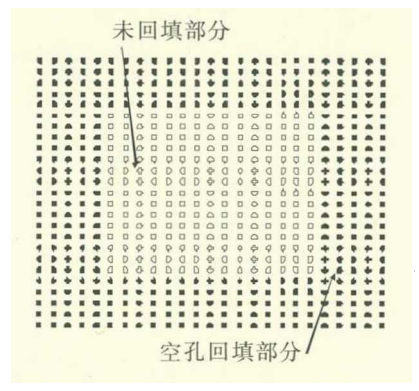


图 11 空孔回填示意图

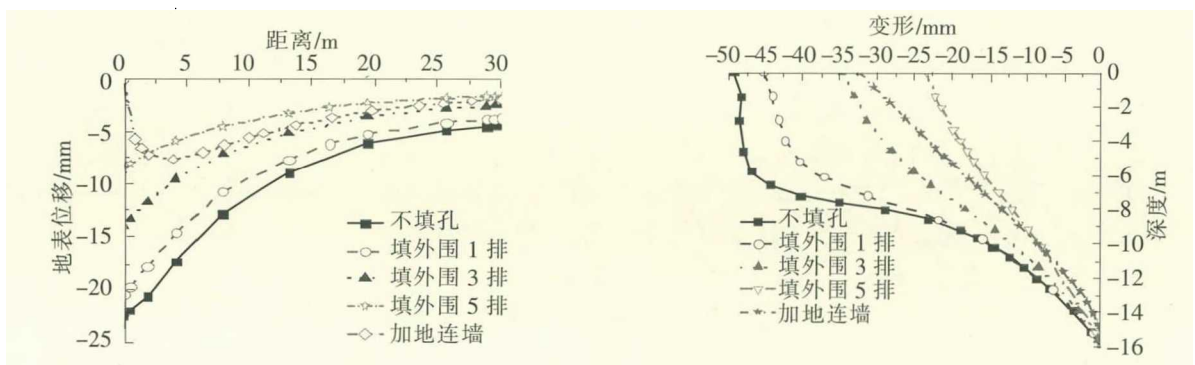


图 12 地表沉降随填孔范围及提前施工地连墙的变化规律

图 13 群孔边界面水平位移随填孔范围及提前施工地连墙的变化规律

从图 12、图 13 中可以看出,随着外围回填排数的增加,地表沉降和群孔边界处水平位移逐渐减小,且效果较为明显,当外围空孔回填 3 排时,其对群孔效应的减弱效果已经接近提前施工地连墙,而回填 5 排时其效果已经优于提前施工地连墙,不同之处在于提前施工地连墙使得地表沉降变为凹槽型分布,而

仅回填空孔变形模式仍为三角形分布。综上所述,空孔回填对减小群孔效应对周边环境的影响有着显著的作用,而且无需回填所有的空孔,仅回填最外围若干排空孔即可取得较好变形控制效果。部分空孔回填的方法经济有效,但具体回填多大范围能达到较为理想的控制效果与土质条件和孔数等有关,在实际工程运用时需要视具体条件进行相应条件下的分析研究。

3.2 不同孔数回填效果对比

上述 625 孔模型中,当空孔外围回填 5 排时,空孔回填范围已占有空孔的较大比例。如今大面积桩基础施工动辄成百上千根灌注桩,当空孔较多时,回填外围一定数量空孔是否可以取到较好效果仍需进行进一步研究。为了分析大量空孔存在时,回填外围数排空孔对群孔效应导致的周边环境变形的控制效果,分别计算了 900 孔、1 600 孔、2 500 孔 3 种工况下回填外围数排空孔时群孔沉降观测线上地表沉降和群孔边界面的变形。

在上述模型计算过程中,当孔数较多时,为了避免边界效应模型尺寸往往较大,而孔径又较小,因此在网格划分阶段往往需要加密,这就导致模型单元数量巨大,运算速度较慢。且软件的网格划分能力限制了进一步研究更多孔同时存在时的影响。因此,利用有效的简化计算方法显得极为重要。郑刚等^[1]提出了多孔合并的方法,以 25 孔合并为 1 孔为例, $S_2 = 25 \times S_1 \times \gamma$,其中, S_2 为合并后单孔的面积, S_1 为合并前单孔的面积, γ 为多孔合并转化系数。通过大量计算得出了多孔合并转化系数与孔径、孔深、泥浆护壁情况、孔净距以及土体强度有关,与孔数变化无关的结论。由于文中采用的土体强度与郑刚等^[1]在文章中采用的土质条件并不相同,因此为了得出多孔合并的转化系数进行了大量的模型计算,通过对比分析得出在本文所使用的土质条件下,即前期超载为 150 kPa 时,转化系数为 $\gamma = 1$ 的结论,多孔合并示意图如图 14 所示。由于篇幅有限,计算转化系数的模型计算结果不在此处列出。

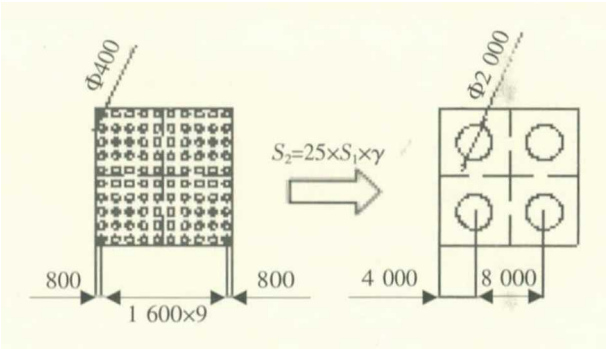


图 14 多孔合并示意图(单位:mm)

采用 25 孔合并为 1 孔的方法计算 3 种工况,空孔回填外围 5 排或 10 排时的效果变化规律如图 15、图 16 所示。

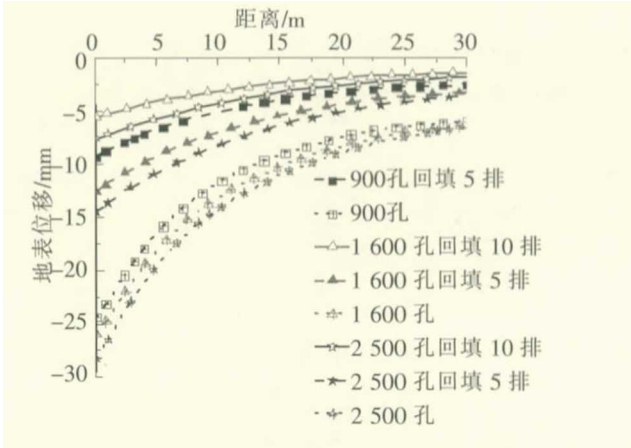


图 15 不同孔数下地表沉降
随填孔范围的变化规律

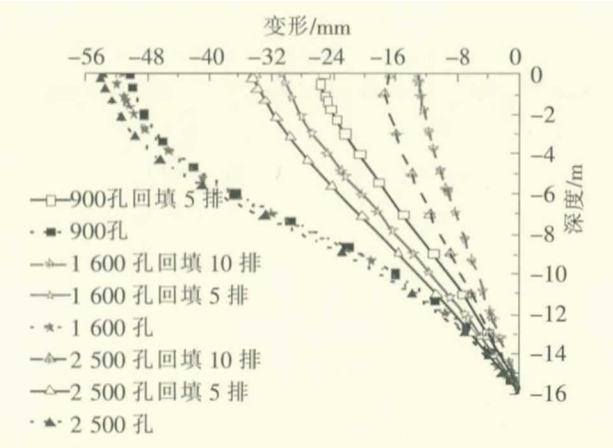


图 16 不同孔数下群孔边界面上的
水平位移随填孔范围的变化规律

由图 15、图 16 可以看出,当空孔较多时,回填外围 5 排空孔后,周边土体沉降和群孔边界处水平位移虽然有了大幅降低,但仍然较大,当回填外围 10 排空孔时,控制效果更加显著。故随着空孔数量的增多,需适当增大回填排数以更有效地控制周边土体位移。

3.3 同时施工地连墙和部分空孔回填效果分析

由上述分析得,当空孔数量较多时,需要增大回填数量以取得较为有效的周边土体位移控制效果。

而回填大量空孔难度大,成本高,故本节对同时施工地连墙和部分空孔回填条件下,群孔沉降观测线上地表沉降和群孔边界面的变形进行分析。

如图 17 所示,当大量空孔存在时,回填空孔外围少数几排空孔时,对减小群孔效应对周边环境的影响有一定的作用,但土体位移仍然较大,且变形模式仍为三角形分布。当同时施工地下连续墙,3 种工况的最大位移分别由 9 mm、12 mm、14 mm 减小为 4 mm、6 mm、7 mm,减小幅度均达到了 50%,且地表沉降模式由三角形分布转变为凹槽型分布。

群孔边界面上的水平变形对比如图 18 所示,当同时采取回填外围数排空孔和提前施工地下连续墙的控制措施时,3 种工况下群孔边界面上的水平变形最大值分别由 26 mm、31 mm、33 mm 减小为 20 mm、26 mm、27 mm,虽然变形最大值有所减小,但减小幅度较小,说明围护结构的抗侧移刚度还需增加。

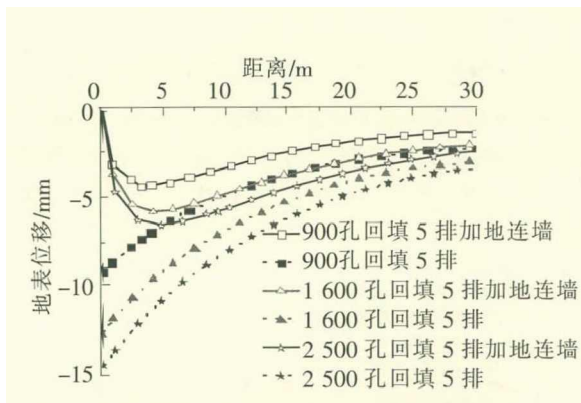


图 17 空孔回填及施工地连墙时地表沉降的变化规律

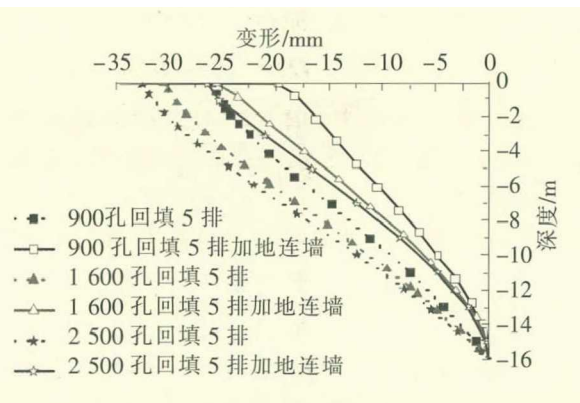


图 18 空孔回填及施工地连墙时群孔边界面上的水平位移

4 结论

在尽量少增加工程费用的前提下,提出了 3 种减小群孔效应对周边环境的影响的方法,分别为提前施工地连墙、提前施工第一道支撑和回填最外围几排空孔,具体结论如下:

(1) 桩基施工提前施工围护结构作为一种较为经济的方法,对控制群孔效应对周边环境的影响有很显著的效果。围护结构的作用使得群孔底部的下部土体和上部土体共同承担了上部土体的卸荷作用,最终基坑外土体位移大幅减小。

(2) 当空孔数量较多或基坑外环境控制严格,仅采用提前施工地下连续墙无法满足坑外土体变形的控制需求时,可采取提前施工第一道支撑的方法进一步增强围护结构的抗侧移刚度,进而大幅度减小围护结构的水平变形,减小群孔周边地表沉降。

(3) 空孔回填对减小群孔效应对周边环境的影响有着显著的作用,回填最外围几排空孔即可取得一定的效果。此方式经济有效,但具体回填多大范围能达到足够的控制要求与土质条件、孔径及孔深大小、群孔数量有关,在实际工程运用时需要视具体条件进行相应条件下的分析研究。

(4) 工程中,上述几种控制措施可根据实际情况综合使用,例如当空孔数量较多时,需回填较大数量空孔以达到较好的控制效果,但回填大量空孔难度大,成本也相对较高,可采取同时提前施工地下连续墙和空孔回填的控制措施。

参 考 文 献

- [1] 郑刚, 王凡俊, 孙宏宾, 等. 软土地区 CFG 桩群孔效应引发的地表沉降[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2017, 50(8): 796-805.
- [2] 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, 54.
- [3] 闫静雅. 桩基础全寿命期对邻近已有隧道的的影响研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [4] 冯志先, 申海森, 万林海, 等. 软土地区 CFG 桩施工对周围环境影响分析[J]. 华北水利水电大学学报: 自然科学版,

2004, 25(1):58-60.

[5]蒋红心,胡中雄. 钻孔孔壁的稳定性分析[J]. 工程勘察, 1999(3):7-10.

[6]章荣军,郑俊杰,丁烈云,等. 成孔切槽引起邻近桩基沉降规律及控制措施[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2011, 39(4):114-118.

[7]李光照,郑刚. 软土地区深基坑工程存在的变形与稳定问题及其控制——基坑施工全过程可产生的变形[J]. 施工技术, 2011, 40(7):5-9.

[8]邓小涛. 长螺旋钻管内泵压 CFG 桩施工引起工程问题试验研究[D]. 北京:中国地质大学, 2008.

[9]顾建平,王志勇. 上海中心大厦项目主楼桩基的选型与评估——特大超长后注浆钻孔灌注桩基础在超高层建筑的应用[J]. 建筑施工, 2009, 31(7):530-532.

[10]王卫东,吴江斌. 超高层建筑大直径超长灌注桩的设计与实践[C]//2013 第九届海峡两岸地工技术/岩土工程交流研讨会论文集. 上海:华东建筑设计研究院, 2013:8-14.

[11]Daly M P, Powrie W. Centrifuge model tests on embedded retaining walls supported by earth berms[J]. Géotechnique, 2002, 52(2):89-106.

[12]Wroth C P. The interpretation of in situ soil tests[J]. Geotechnique, 1984, 34(4):449-489.

[13]Do T N, Ou C Y, Lim A. Evaluation of factors of safety against basal heave for deep excavations in soft clay using the finite-element method[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(12):2125-2135.

[14]Do T N, Ou C Y, Chen R P. A study of failure mechanisms of deep excavations in soft clay using the finite element method[J]. Computers & Geotechnics, 2016, 73:153-163.

Research on Control Measures of Influence of Borehole Group on Surrounding Environment

Zheng Gang^{1,2}, Li Xiyuan^{1,2}, Wang Ruozhan^{1,2}, Cheng Xuesong^{1,2}, Zhang Tao^{1,2}, Wang Fanjun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety, Ministry of Education, Tianjin 300072, China;

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A large amount of hollow boreholes are left after the construction of piles if piles are utilized as the foundations of buildings. Engineering cases and previous research show that a large number of hollow boreholes have considerably influence on the surrounding environment. However, the measures to reduce the influence have not been systematically studied. In this paper, the mechanism of borehole-group effect is investigated using Plaxis 3D. To alleviate the response of the surrounding environment induced by the borehole-grout effect, several economical and effective control measures are proposed, including the pre-construction of retaining structures, pre-construction the first level of struts and backfilling hollow holes after the construction of the pile foundation. To be specific, the pre-construction of retaining structures has a significant effect on the influence of the control borehole grout effect on the surrounding environment. In addition, pre-construction of the first level of struts can greatly increase the lateral stiffness of retaining structures and further reduce the horizontal deformation of retaining structures. Backfilling a certain number of rows of hollow holes can also result in a considerable effect. In the engineering, the above several control measures can be used comprehensively according to the practical situation.

Key words: soft clay; pile foundation installations; CFG pile construction; borehole-group effect; control measures