

# 深层搅拌桩施工挤土效应分析

李鸿博 高广运 王立明

(同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

**【摘要】** 深层搅拌桩作为软土地基处理的一种新方法, 正越来越多地被应用到基础工程中去。实践证明, 深层搅拌桩也存在挤土效应。结合工程实例, 对相关的墙体侧向位移和管道沉降的监测数据进行了分析, 总结出了搅拌桩挤土效应的特点及其在不同的施工工艺所表现出来的规律, 并分析了可能导致这些规律的原因。用 Sagaseta 的源-汇理论得到的位移计算公式对这些规律进行了研究。

**【关键词】** 地基处理; 搅拌桩; 挤土效应

**【中图分类号】** TU 473.1

## Analysis of Soil-squeezing Effects in Mixing Pile Construction

Li Hongbo Gao Guangyun Wang Liming

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092 China)

**【Abstract】** The deep mixing pile, which is a new groundwork construction method, generally used in soft soil, is being widely popularized in foundation construction fields. It has been proved that mixing pile construction would also cause soil-squeezing effects. On the basis of research and analysis by former scholars, the monitor data of wall lateral displacement and pipe sedimentation related to an engineering project are analyzed and the characteristics of the soil-squeezing effects as well as the rules of it are summarized under different construction crafts. Finally, these rules are researched by the formulas of displacement based on Sagaseta's source-sink image technique.

**【Key Words】** foundation treatment; mixes pile; effect of soil-squeezing

## 0 引言

深层搅拌桩作为一种新型的地基处理形式, 自 1980 年在我国获得成功后, 得到了广泛的应用。对于深层搅拌桩的施工, 往往基本忽略了它对周围环境的影响。但随着无数施工过程的积累, 人们逐渐认识到, 深层搅拌桩的施工也会产生一定的挤土效应, 导致周围土体的侧向位移和地表隆起。在地下管线和地下设施密集的地方进行深层搅拌桩的施工, 如果不能很好地控制搅拌桩的施工, 挤土效应将造成很大的危害, 因此有必要对深层搅拌桩的挤土效应作系统的研究。

## 1 工程实例分析

### 1.1 工程概况

该工程为某城市地铁车站的施工, 施工区域周边环境保护是施工过程中的重要环节。施工的车站紧贴已有的一个地铁车站, 在施工过程中将对已有车站造成影响, 在车站基坑施工过程中对其进行保

护是监测的主要任务之一。另外施工基坑周围有大量的地下管线, 基坑施工过程中需加强对上述管线的保护。

车站基坑开挖采用搅拌桩维护。在基坑周围已有车站的地下连续墙上布置了位移测点, 在周围管线上布置了沉降测点。

本工程搅拌桩采用“两次喷浆, 三次搅拌”, 即“两喷三搅”, 搅拌桩长约 16 m, 13 到 16 m 由于围护需要, 喷浆量增加一倍。

### 1.2 数据分析

从搅拌桩的施工工艺看, 搅拌桩下沉时由于注入了相当体积的浆液, 而且在注入浆液的同时, 注浆压力也会对周围地层产生挤压作用, 因此使得原有的地层产生附加应力和体积扩张, 导致了地下连续墙的侧向位移和地下管线的沉降。在此过程中, 还会产生超孔隙水压力, 由于饱和粘性土的不排水性, 孔隙水压力的积聚加剧了搅拌桩的挤土效应。对搅

拌桩挤土效应大小存在内因和外因两方面的影响,内因如注浆量、水灰质量比、水泥掺入量等,外因如施工距离、施工流向等。由于在施工过程中水灰质量比、水泥掺入量都是一定的,下面我们将着重从外因来讨论它对搅拌桩的挤土效应的影响,并且还将总结挤土效应表现出来的一些规律。

### 1.2.1 施工距离对挤土的影响

1-7(表示1月7日)到1-10,搅拌桩在离S13较远的地方施工,S13隆起值基本没有变化;1-12到1-15,搅拌桩施工地点在S13测点附近,隆起值不断增大且接近最大值,然后随着施工地点离测点越来越远,1-17后隆起值开始回落(见图1)。

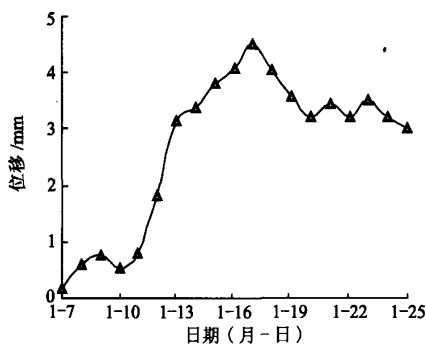


图1 S13位移曲线

以下各图中,横坐标表示日期,纵坐标表示位移,其中Q为地下连续墙墙体位移测点,位移为正表示远离基坑方向位移,S为管线沉降测点,位移为正表示垂直隆起。

可以发现,施工地点离测点距离相当远,可以基本忽略它对测点处的影响,而隆起值的变化主要集中在测点附近施工的时段,所以可以认为:某处受搅拌桩的挤土作用,只是在接近该处的一定范围内(范围大小受很多因素影响)的搅拌桩施工会对该处产生挤土效应,距离越近,挤土效应越明显,超过一定的距离,施工对其基本没有影响。

### 1.2.2 施工流向对挤土的影响

在其它因素相同的情况下,不同施工流向会对挤土效应的大小产生影响。取了两组距离很接近的测点,即认为其它影响因素大致相同,考虑不同流向对它们隆起值的影响。

S13附近搅拌桩是朝同一个方向施工,而S14附近是由两边同时向中间施工,可以看出,S14隆起值出现的最大值明显比S13大,由此可见,由两边同时向中间施工挤土效应更明显(见图2)。

同时,如果先施工内排桩,然后再进行外排的搅拌桩施工,由于内排桩会形成一个屏障,挤土效应也会减弱<sup>[1]</sup>。

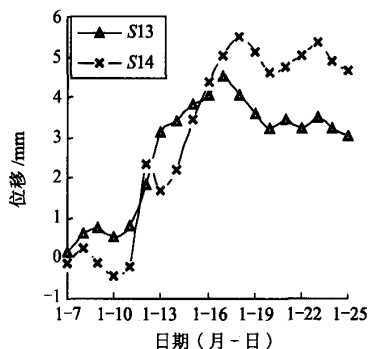


图2 S13、S14不同施工流向下位移曲线

### 1.2.3 成桩数量对挤土的影响

成桩数量的多少对挤土效应的大小有着直接的影响。

Q3测点处地下连续墙在不同深度处的位移变化曲线见图3。

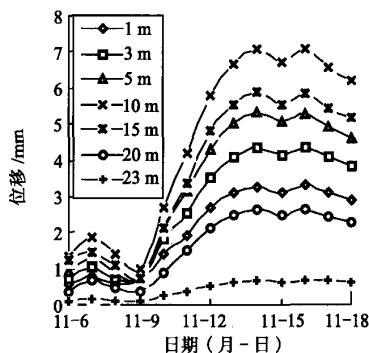


图3 Q3位移曲线

11-6在Q3附近施工最里层单排桩时,Q3位移很小,变化不大,挤土效应很小,11-7、11-8没有施工,位移马上回弹,而11-9到11-12在Q3附近施工余下几排桩,成桩数量是单排时的2倍多,位移量急剧增加,接近最大值。可以认为,施工的搅拌桩数量越多,挤土效应就越大。一次连续成桩数量的增加,位移值和隆起值也会急剧增加,两者不是同一量级的增长。在上面的例子中,搅拌桩的一次成桩数量增加了一倍多,但位移却增加10倍左右,挤土效应的增加非常明显。

### 1.2.4 沿深度的影响规律

Q9测点处地下连续墙沿深度出现的最大位移,统计见图4。

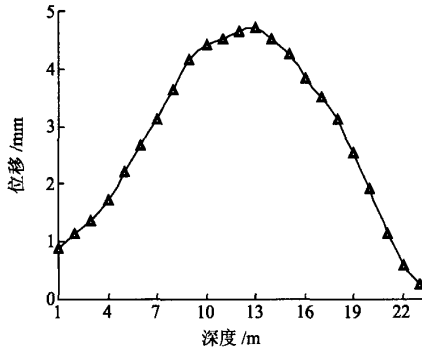


图4 Q9 测点最大位移

由图3和图4可以看出:

- 1)沿着深度连续墙水平位移变化规律是基本一致的;
- 2)除了接近地表和底部范围出现的水平位移很小外,沿着搅拌桩深度的其它区域都有较明显的位移,且挤土效应对周围土体侧向位移影响最大的区域出现在桩的中部。

统计测点 Q3、Q4、Q8、Q9、Q10、Q11、Q12 出现最大位移的位置见图5。

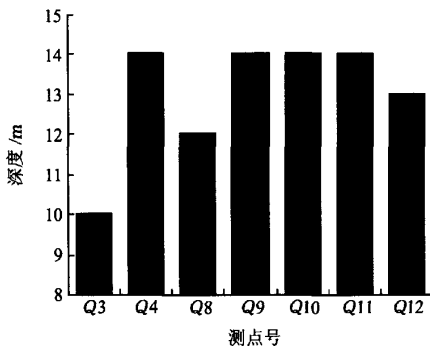


图5 测点最大位移

由图5可以看出,地下连续墙出现最大水平位移的位置大约在13~14 m左右。

考虑现场因素,原因可能有以下几点:

- 1)施工因素:13~16 m 搅拌桩施工时由于结构的需要,喷浆量增加一倍,因此该段受到的扰动应该更大;
- 2)土质条件的因素:该段属于中高压缩性土,压缩模量小,变形容易。

综合以上因素,如果把地下墙最下端看作固定段,位移最大值应该出现在13~16 m,与实测数据吻合。

### 1.2.5 滞后现象的分析

在分析过程中,我们发现某些位移出现滞后现

象。搅拌桩不在测点附近施工,位移或隆起值没有立刻停止,而是有1~2天继续增长。

Q3附近的搅拌桩在11-12全部完成,但Q3的水平位移在11-13仍然有增长,直到11-14才开始回落。挤土效应有一天左右的滞后(见图4)。

滞后效应在国内相关文章中尚未见论述,但随着今后施工过程中对周围环境保护要求的不断提高,搅拌桩施工挤土效应的滞后现象受重视的程度必将越来越高。从监测数据可以看出,搅拌桩施工时挤土效应的滞后效果不是很明显,只有在大批连续成桩时才表现出来,当成桩数量很小时,基本可以忽略。

### 1.2.6 回弹

搅拌桩远离该处施工,挤土效应逐渐衰减时,位移会出现回弹。

1-17以后搅拌桩的挤土效应逐渐消失,隆起值不断回弹,但幅度很小,并逐渐趋于平缓(见图6)。

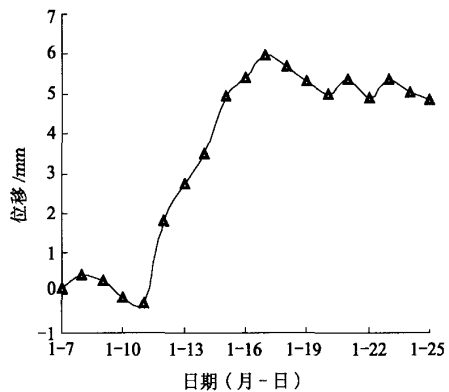


图6 S15 沉降曲线

孔隙水压力的影响是出现回弹现象的主要原因<sup>[2]</sup>。在施工期间挤土会产生超孔隙水压力,由于不饱和和粘性土的不排水性,孔隙水压力不断增大,增加了挤土效应,而当停止施工,孔隙水压力会慢慢消散,土中应力减小,因此位移会有一些的回弹,但是孔隙水压力的消散比积聚慢的多,因此回弹很缓慢,并且也不会恢复到原来的数值,而是到一定的数值就基本不再变化,因此回弹量也只会到一定的数值,希望位移能回弹到原来的状态是不可能的。

### 2 理论分析

分析打桩对环境的影响以往多利用圆孔扩张理论<sup>[3]</sup>,研究打桩在土体中产生的挤压力,从而推算土体的位移。经典的圆孔扩张理论有一个缺点,即将一维的圆孔扩张解应用于桩体贯入这样一个三维问题,导致其解只与径向坐标有关,而与竖直坐标无关,并忽略了孔壁竖向摩擦力的影响<sup>[4]</sup>。因此使用

圆孔扩张理论来分析搅拌桩的挤土效应,特别是在群桩施工,以及综合考虑其它因素的情况下,显得非常困难。

本文利用 Sagaseta 的源-汇理论,考虑搅拌桩施工的挤土效应。详细推导过程请参见文献[5]。由此得到的单根搅拌桩施工时引起的土体中某点的位移为:

竖向位移

$$\Delta z = -\frac{1}{16}r_0 \left\{ \frac{1}{[\rho^2 + (z - L_0)^2]^{1/2}} + \frac{1}{[\rho^2 + (z + L_0)^2]^{1/2}} - \frac{2}{[\rho^2 + z^2]^{1/2}} \right\} \quad (1)$$

水平位移

$$\Delta \rho = \frac{1}{16}r_0^2 \left\{ \frac{z + L_0}{[\rho^2 + (z + L_0)^2]^{1/2}} - \frac{z - L_0}{[\rho^2 + (z - L_0)^2]^{1/2}} \right\} \quad (2)$$

式中  $r_0$  为搅拌桩的模拟桩径,设桩长为  $h$ ,一根桩所需的水泥及水的总质量为  $W$ ,浆液的密度  $\rho_{浆}$ ,根据体积相等模拟桩径可由下式得到:

$$r_0 = \sqrt{W / (\rho_{浆} h \pi)} \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为计算点与桩的水平距离, m;  $z$  为计算点距桩顶即地面的高度, m;  $L_0$  为搅拌桩的桩长, m。

根据文献[5]对该公式的分析结果,越接近桩体,地表隆起值越大;对于桩周土体的水平位移,除了接近地表和桩尖下部区域水平位移较小外,桩身的绝大部分,都会产生一定的水平位移,且在中部达到最大。水平位移会随着离桩轴线距离的增加而逐渐减小。这与 1.2.1 节, 1.2.4 节分析的现象都是相符的。

考虑群桩效应时,可以利用以下的公式计算[6]:

$$\Delta z = K_{z1} K_{z2} \sum_{i=1}^m \Delta z_i \quad (4)$$

$$\Delta \rho = K_{\rho1} K_{\rho2} \sum_{i=1}^m \Delta \rho_i \quad (5)$$

式中:  $K_{z1}$ 、 $K_{\rho1}$  分别为施工流向对竖向位移和水平位移的修正系数;  $K_{z2}$ 、 $K_{\rho2}$  分别为连续成桩数量对竖向位移和水平位移的修正系数。

这些系数即综合考虑了 1.2.2 节、1.2.3 节所述的影响,这也是对挤土效应影响最为明显的两个因素。笔者认为应该根据不同的工程情况总结这些系数。

同时对于不同地质条件、孔隙水压力的变化以

及 1.2.5 所述的滞后现象等等因素,由于条件太复杂,公式都没有考虑到,有待于今后继续研究。

### 3 结 语

本文根据监测数据,总结了搅拌桩挤土效应的一些规律,同时利用由 Sagaseta 的源-汇理论得到的位移计算公式对这些规律做了理论分析:

1) 在深层搅拌桩的施工因素的影响下,离施工桩的距离越近,一次连续成桩的数量越多,挤土效应越大,造成的墙体水平位移和管线的隆起值就越大。同时不同的施工流程也会对挤土效应的大小造成一定的影响。

2) 周围土体受搅拌桩挤土效应影响出现最大水平位移的深度,应该出现在搅拌桩中部附近,同时如果某一深度注浆量显著增加,该段扰动也会显著增大,综合地层的因素,即压缩模量的大小,可以估计出现最大位移的深度。

3) 挤土效应会有一定的滞后,并且在附近没有搅拌桩施工时,位移和隆起值有一定的回弹。

相应于这些因素,施工中可以采取一些措施来减少挤土效应的影响,如减少成桩数量,减缓成桩速率,挖设卸压槽等等<sup>[1,7]</sup>。

由于该研究课题在工程实践上有重要的意义,今后需要搜集更多更全面的资料:如不同的地质条件、不同的石灰质量比、不同的施工速率等等进行全面的分析;寻求更合适的力学模型,从理论上对搅拌桩施工时土体周围的情况进行更准确的模拟;对群桩效应作进一步的探讨;拟合出实用的公式,对施工进行指导等。

### 参 考 文 献

- 1 罗 哲. 深层搅拌桩施工对周围环境影响分析. 土工基础, 1998, 12(3): 1~5
- 2 姚笑青, 胡中雄. 饱和软土中沉桩引起的孔隙水压力的估算. 岩土力学, 1997, 18(4): 30~35
- 3 胡中雄. 土力学与环境土工学. 上海: 同济大学出版社, 1997
- 4 施建勇. 沉桩挤土效应研究综述. 大坝观测与土工测试, 2001, 25(3): 5~9
- 5 黄院雄, 许清侠, 胡中雄. 饱和土中打桩引起桩周围土体的位移. 工业建筑, 2000, 30(7): 15~19
- 6 蒋锋平. 大面积深层搅拌桩施工对地铁隧道影响的研究: [学位论文]. 上海: 同济大学地下建筑与工程系, 2004
- 7 蒋建平, 高广运. 桩基工程引起的环境问题及其防治技术. 建筑技术, 2004, 35(3): 173~175

收稿日期: 2005-03-28