

## 软土基坑坑外加固对基坑变形的影响分析

摘要：在软土基坑施工过程中，由于地铁盾构进出洞以及为了保护基坑周围建筑物等原因，常常会进行坑外加固。坑外加固能提高土体强度，也会对基坑变形产生影响。结合上海地铁某车站端头井加固的工程实例，分析坑外加固对基坑变形造成的不利影响，并在此基础上提出减少坑外加固影响的控制措施。

关键词：坑外加固；挤土效应；基坑位移

搅拌桩加固[1]以布置灵活、加固效果显著的优点，在软土地区地下工程中得到了广泛应用，但其负面影响却一直未引起关注。盾构进出洞区域采用搅拌桩加固，在施工过程中会产生侧向挤土效应，对基坑地下连续墙围护位移变形有显著影响。尤其当搅拌桩加固与基坑同时施工时，由于施工工艺顺序、施工周期等不合理因素造成的影响则更为明显，甚至会危及基坑安全。因此，协调好盾构进出洞或基坑内部搅拌桩加固施工的工序及流程非常重要，应充分考虑搅拌桩加固施工对车站地下连续墙围护位移变形的影响，必要时采取更为安全合理的加固施工工艺。

本文结合实际工程，根据实测数据，着重分析合理安排施工工艺的重要性。

### 1 工程概况

上海某地铁车站，两头设有两个端头井（即盾构工作井），北端头井外包尺寸为 14.9m×30.36m，底板埋深为 16.989m；南端头井外包尺寸为 14.9m×24 m，底板埋深为 16.058m。围护结构采用 800mm 厚的地下连续墙，支撑体系采用直径 609mm 钢管，端头井设置 5 道。本车站基坑变形控制保护等级为二级[2]，车站基坑地下连续墙最大水平位移 $\leq 3\%oH$ （H 为基坑深度）。基坑各土层的分布情况见表 1。

表 1 车站各土层分布情况

土层 层号	土层 名称	层厚 /m	层底标高 /m	粘聚力 $C_u$ /kPa	内摩擦角 $\varphi_u/(\circ)$
①-1	杂填土	0.50~1.70	2.94~1.60		
①-2	黄色杂填土	0.50~1.50	2.34~0.10		
②-1	褐黄色粘土	0.60~2.20	0.52~0.18	16	4.8
②-3a	灰色粘质粉土	3.70~5.50	-3.70~-5.18	23	0.0
③	灰色淤泥质粉质粘土	0.80~2.30	-5.14~-6.25	25	0.0
④	灰色淤泥质粘土	6.60~8.90	-12.5~-14.4	28	0.0
⑤-1a	灰色粘土	2.30~4.60	-16.2~-17.6	37	0.0
⑤-1b	灰色粉质粘土	3.70~6.00	-20.8~-23.0	56	0.0
⑦	粉砂	未钻穿	未钻穿	未钻穿	未钻穿

本车站南北端头井墙外侧为盾构进出洞加固区域，均为搅拌桩加固，平面位置如图 1 所示。盾构进出洞加固区宽 6m，加固深度范围为盾构洞圈上下左右各 3m 范围。

### 2 车站端头井施工情况

本车站工程施工中对测斜、地面沉降、支撑轴力等进行严密的监测控制，并利用远程监控管理系统，采用信息化施工。

由于施工工期紧迫，本车站南端头井深层搅拌桩加固在 10 月 20 日开始施工，11 月 5 日结束，而基坑于 10 月 28 日开挖，11 月 18 日结束，浇筑混凝土垫层。开挖施工与搅拌桩加固有长达一个星期的施工重叠期。南端头井地下墙位移测点布置如图 1 所示。



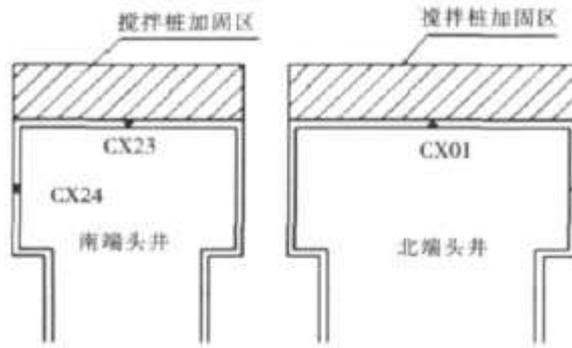


图1 端头井测点布置图

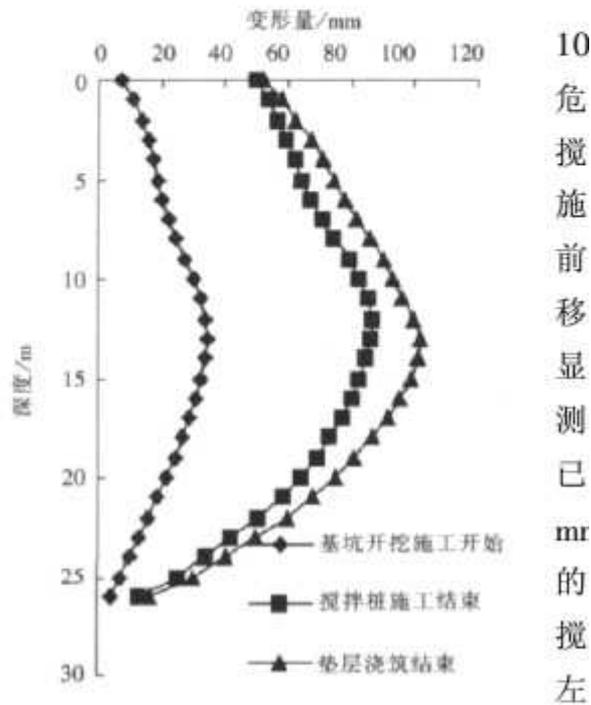


图2 南端头井 CX23 测斜孔地下墙变形图

### 3 实测数据分析

从图2中可以看出,测点变形较大,到垫层浇筑完成后,该测点累计变形已达101.90 mm,严重危及基坑安全。在搅拌桩加固开始施工后,基坑开挖前,地下连续墙位移已经有较为明显的变化,CX23测点位移最大值已经高达34.39mm,占总变形量的33.7%,且位于搅拌桩中部13 m左右深度处。

从搅拌桩的施工工艺看[3],搅拌桩下沉时由于注入了相当体积的浆液,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,因此使原有地层产生附加应力和体积扩张,导致地下连续墙的侧向位移。在此过程中,还会产生超孔隙水压力,由于饱和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。

根据 Sagaseta 的源-汇理论,得到的单根搅拌桩施工时引起的土体中某点位移为:

竖向位移

$$\Delta_z = \frac{1}{16} r_0 \left( \frac{1}{[\rho^2 + (z-L_0)^2]^{\frac{3}{2}}} + \frac{1}{[\rho^2 + (z+L_0)^2]^{\frac{3}{2}}} - \frac{2}{[\rho^2 + z^2]^{\frac{3}{2}}} \right)$$



水平位移

$$\Delta_h = \frac{1}{16} r_0^2 \left\{ \frac{z+L_0}{[\rho^2+(z+L_0)^2]^{\frac{3}{2}}} + \frac{z-L_0}{[\rho^2+(z-L_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \right\}$$

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  $\rho$  密，根据体积相等，模拟桩径可由下式得到：

$$r_0 = \sqrt{W/(\rho_{浆} h \pi)}$$

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

根据文献[4]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，这与上面的分析是吻合的。

从基坑开挖到搅拌桩施工结束，地下墙变形量为 52.77 mm，已占总变形量的 51.8%。这一阶段地下连续墙位移骤然变化，日均变化量非常大，已远超过正常的基坑位移速率。这是由于搅拌桩加固和基坑开挖同时施工长达一个星期。一方面搅拌桩加固所产生的侧向挤土效应，会导致基坑向坑内变形；另一方面基坑开挖卸载，被动区土压力减弱，从而释放了搅拌桩的侧向挤压力。

随基坑开挖深度不断加大，搅拌桩引起的挤土效应先在浅层得以释放，随后不断下移，到 11 月 5 日基坑开挖到 8m 深度处，此时的浅层位移受搅拌桩挤土影响较大，开挖面以上地下连续墙向坑内平移。因被动区卸载，开挖面以下 5m 为土质较差的灰色淤泥质粉质粘土和灰色淤泥质粘土层，使墙体最终呈“肚”状凸起。

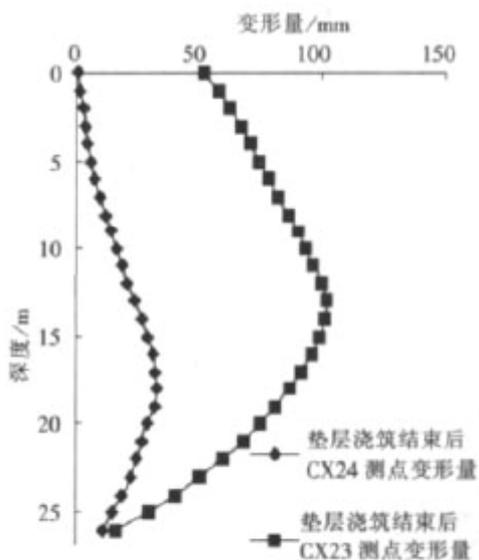


图3 CX23、CX24 测斜孔地下墙变形对比图

搅拌桩施工结束后，基坑位移变化速率有所缓和，基坑变形趋于正常，从搅拌桩加固结束到基坑垫层浇筑完成，地下连续墙变形只有 14.74mm，仅占总变形量的 14.5%。曲线两头小，中间大，墙体变形的最



大值在开挖面附近。刚开始开挖时,墙体变形较小,随着开挖不断加深,地下连续墙最大变形值下移,由11月5日的11m下移至13m的深处。这是由于该阶段搅拌桩施工已结束,搅拌桩经过初凝,由此产生的膨胀挤土效应减弱,对基坑围护结构位移影响逐渐消失,该阶段基坑变形基本全部由基坑开挖引起。

图3给出了CX24、CX23测点变形情况的对比。南端头井测点CX23的位移由基坑开挖和搅拌桩加固引起,而测点CX24的位移主要是由车站基坑开挖引起。从图中可以看出,CX24测点的总变形量为32.76mm,占CX23测点总变形量的32.1%。北端头井墙外侧也为盾构进出洞搅拌桩加固;但北端头井在基坑开挖前,搅拌桩加固施工已完成20d,此时开挖搅拌桩已达到养护期限,其曲线形式与一般基坑的规律相吻合。

#### 4 控制措施

由于坑外搅拌桩加固会对基坑变形产生影响,为尽可能地减小这种影响,可以采取如下措施。

(1)合理安排施工顺序,应将盾构进出洞加固时间安排在车站围护结构完成并达到混凝土养护要求后,且要在端头井开挖前进行,从而避免盾构进出洞搅拌桩加固对基坑变形造成过大影响。严禁搅拌桩加固施工与基坑开挖同时进行。

(2)合理规划搅拌桩的施工流程和次序,选择合理的位置允许释放搅拌桩产生的挤压应力,使应力有所释放,减少对基坑变形的影响。

(3)若因工期或其他施工要求,必须进行不合理施工交叉时,则应考虑以其他对周边环境影响较小的加固施工方法,例如采用取土置换的SMW工法进行加固。

#### 5 结论

(1)从南北端头井搅拌桩加固施工影响比较发现,由于施工工序安排不合理,南端头井地下连续墙位移过大,不仅危及基坑安全,且会对以后内部结构施工带来困难。基坑外侧搅拌桩加固施工时,基坑开挖卸载,被动区土压力减弱,从而释放了搅拌桩的侧向挤压应力,导致地下连续墙位移变形骤然加大。即使不进行基坑开挖,被动区土体不减弱,搅拌桩的侧向挤压应力对地下连续墙的影响也相当大,应加以重视。

(2)搅拌桩加固对基坑变形的影响与施工工序和工期有很大关系。若施工工期安排不当会产生不良影响。

(3)搅拌桩加固施工时,为尽可能减小搅拌桩施工对基坑变形的影响,应将盾构进出洞加固时间安排在车站围护结构完成并达到混凝土养护要求后,且应在端头井开挖前进行。严禁搅拌桩加固施工与基坑开挖同时进行。

#### 参考文献

- [1] 朱林海.被动区压力注浆在深基坑中的应用研究.同济大学硕士学位论文,2000.
- [2] 刘建航,侯学渊.基坑工程手册[M].北京:中国建筑出版社,1999.
- [3] 李鸿博,高广运,王立明.深层搅拌桩施工挤土效应分析[J].岩土工程技术,2005,19(4):200-203.
- [4] 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[J].工业建筑,2000,30(7):15-19.

