

【摘要】针对软土地区地下大型轨道交通枢纽车站多个深基坑关联的复杂施工实际，参考有限元数值分析的结果，制定了相关的施工顺序、土体加固、分层分块开挖、地下水控制及支撑结构等施工技术，基坑总体变形控制良好，且节省了工期。

【关键词】软土地铁枢纽站群联深基坑施工技术变形控制

## 1 工程概况

上海市轨道交通主题公园站（见图1）位于黄浦江东岸济阳路西侧主题公园内。车站由6号线、8号线和11号线相交组成。其中6、11号线车站沿东西向走行，为地下三层双岛式站台；8号线沿南北向走行，为地下二层岛式站台。



图1 主题公园站平面

主题公园站基坑工程由五个关联基坑组成。6、11号线车站基坑外包宽度为41.8 m，车站本体长度150 m，车站中心基坑深23.36 m，围护结构采用1 000 mm厚地下连续墙，地墙深约41 m；支撑体系采用6道支撑，其中1、4道为钢筋混凝土支撑，其余为钢管支撑。

西端的存车线段基坑宽11.4 m，长143.2 m，东端的明挖区间基坑宽11.4 m，长106.59 m，存车线段和明挖区间基坑深度与车站基坑相同，围护结构采用800 mm厚地下连续墙，地墙深约36 m。存车段基坑标准段设5道支撑，其中2、3道为混凝土支撑，其余为钢管支撑，端头并设6道钢支撑。明挖区间隧道设6道支撑，其中1、2道为混凝土支撑，其余为钢管支撑。

8号线车站南、北区基坑长度分别约为357.4 m和39.6 m，基坑深度为13.5 m，围护结构采用600 mm和800 mm厚地下连续墙，墙深约26 m。支撑体系采用4道钢管支撑。

本场地为滨海平原地貌类型，钻遇的地层均为第四纪沉积物。场地土层自上而下分布情况如下。

- ①1层杂填土：层厚约1.55 m，松散，以粘性土为主，含少量石块及植物根系，局部以建筑垃圾为主。
- ①2层浜填土：层厚约0.68 m，松散，以黑色淤泥质土为主，含有机质。
- ②层粘质粉土：层厚约1.60 m，可塑，厚层状，含氧化斑及粉土斑团，稍光滑，韧性中等，干强度中等。
- ③1层淤泥质粉质粘土：层厚约1.55 m，流塑，薄层状，含粉土斑团，稍光滑，韧性中等，干强度中等，无摇震反应。
- ③2层砂质粉土：层厚约1.32 m，流塑，无层理，含云母，夹不均匀淤泥质粉质粘土，无光泽，韧性低，干强度低，摇震反应较迅速。
- ④层淤泥质粘土：层厚约11.46 m，流塑，薄层~鳞片状，土质较均匀，光滑，韧性高，干强度高，无摇震反应。
- ⑤1层砂质粉土与粉质粘土互层：层厚约11.07 m，软塑，薄层状，无光泽、韧性低，干湿强度低，摇震反应较迅速。

⑤2层砂质粉土夹粉质粘土：层厚约 28.62 m，软塑，薄层状，含云母，无光泽、韧性低，干湿强度低，摇震反应较迅速。

⑤31层粉质粘土：层厚约 10.82 m，软塑，细鳞片状，含有机质，偶含钙泥质斑团及植物碎屑，稍光滑，韧性中等，干湿强度中等，无摇震反应。

场地潜水主要赋存于②、③1、③2、④层土中，其主要补给为大气降水。地下水位埋深为 0.20~2.05 m，地下水对混凝土及钢筋混凝土结构中的无腐蚀性，对钢结构具弱腐蚀性。

根据现场勘察资料，微承压水层由⑤1层砂质粉土与粉质粘土互层、⑤2层所属的各亚层砂质粉土夹粉质粘土层共同组成。微承压水稳定水位的埋深为 4.80 m。⑤32层砂质粉土与粉质粘土互层、⑦砂质粉土与⑨层粉砂之间缺失粘性土层构成承压水层，与上覆的微承压水层具有一定的水力联系，承压水位在地表以下 3.50 m 左右。

## 2 工程特点

(1) 涉及五个关联基坑的施工，施工工期紧迫且工程量巨大，如何从技术方案、施工生产调度上进行多方面优化，是抢工期的重要因素。

(2) 五个关联基坑平面呈交叉大“十”字，结构形式非常复杂。

(3) 五个基坑中 6、11 号线车站基坑开挖面积、深度均为最大，为超大型深基坑，对于基坑开挖，应严格按照设计要求及“时空效应”进行，确保基坑安全。

(4) 施工区域内工程地质条件复杂，勘探深度内缺失⑥层土，且⑦层土不仅埋藏较深，空间分布也不稳定，⑤层土厚度较大，30 m 左右以下各土层序不完整，层位不稳定。

(5) 五个关联基坑围护结构共用，基坑施工过程中后施工的基坑可能对已经施工完成的基坑产生影响，引起结构破坏。

## 3 关键施工技术

### 3.1 地下连续墙施工

为了方便现场调度，缩减工期，五个关联基坑地下连续墙同时施工，地墙施工结束后开始基坑土方开挖。根据现场条件共进场 3 台成槽机，分 4 个工作面同时施工。通过有限元分析发现相邻的关联基坑地下连续墙连接处将会产生较大的应力集中，因此该处的地墙进行了特殊处理。为了增大该处地墙强度，地墙槽段采用“T”型槽段，如图 2 所示。

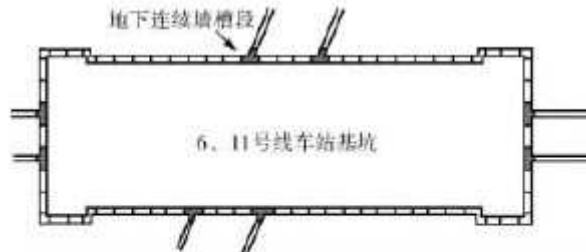


图 2 地墙槽段

### 3.2 土体加固

为增加基坑开挖过程中基坑围护结构的稳定性，防止坑内土体隆起现象发生，6 号、11 号线车站基坑底部采用低掺量高压旋喷桩加固，采用两重管旋喷注浆法， $\phi 1200$  mm，桩体搭接 200 mm。

加固范围基坑底部以下 3 m，标准段采用抽条加固。8 号线车站、6 号线明挖段和端头井采用格栅状加固。为了减缓全关联基坑相邻基坑地墙相交位置的应力集中情况，端头井与标准段相接处的外侧采用梯形加固。加固后土体 28 d 龄期的无侧限抗压强度 1.5 MPa。

盾构的进出洞口采用深层水泥土搅拌桩施工工艺，桩孔直径为 650 mm，搭接 20 cm。进出洞口加固范围均为 6 m，深为盾构底部以下 3 m，左、右、上由盾构边缘向外各 3 m。加固后土体无侧限抗压强度为 0.5~0.8 MPa，进出洞口 3 m



以上加固区的水泥掺量 7%，进出洞口其余至坑底以下 3 m 水泥掺量 12%~14%，渗透系数  $K \leq 10^{-8}$  cm/s。进出洞口加固区与端头井之间的连接处采用旋喷注浆的方法进行加固。

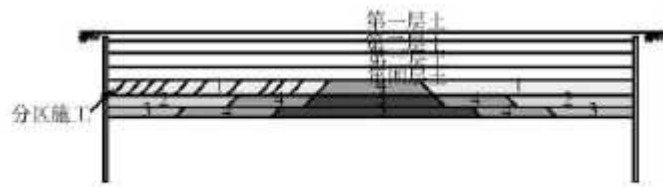


图3 6、11号线车站基坑土方开挖顺序

### 3.3 基坑降水

根据本工程的基坑开挖及基础底板结构施工的要求，降水目的有：①加固基坑内和坑底下的土体，提高坑内土体抗力，从而减少坑底隆起和围护结构的变形量，防止坑外地表过量沉降；②有利边坡稳定，防止纵向滑坡；③在基坑开挖施工时做到及时降低连续墙内基坑中的地下水位，方便挖掘机和工人在坑内施工作业，保证基坑的开挖施工的顺利进行；④及时降低下部承压含水层的承压水水头，防止基坑底部突涌的发生，以确保施工时基坑底板的稳定性。

根据本工程的实际地质情况，在 8 号线车站基坑内布置了 22 口降⑤1 微承压水的减压井，井深均为 36.00 m。在 6、11 号线车站基坑以及存车线段基坑和明挖区间基坑外布置了 11 口降⑤3-2 层承压水的减压井，井深均为 60.00 m。

采用围护明挖法施工时，需及时疏干开挖范围内土层的地下水，保证基坑的干开挖施工的顺利进行。6 11 号线车站基坑内布设 31 口降水井，8 号线车站基坑内设 41 口降水井，存车线段基坑内布设 7 口降水井，明挖区间基坑内布设 6 口降水井，在主题公园出入口、附属设施以及环行下沉式广场的基坑内布置 17 口降水井，各降水井井深暂定为 12.00 m。

### 3.4 施工顺序

轨道交通主题公园站为三线换乘交通枢纽，工程规模大，基坑众多，要根据每个区域的不同特点划分为多个基坑多阶段施工。参考前期所做数值分析，最终确定基坑施工流程为：6 号线明挖区间基坑→6 号线存车段基坑→6、11 号线车站基坑→8 号线车站南、北两区基坑同时施工→6、11 号线车站四个风井（地下 2 层）→其它出入口及风井（地下 1 层）。此方案基本按照先深后浅，对称施工的原则来施工基坑。

### 3.5 基坑开挖

为了保证群关联深基坑工程施工安全，控制基坑位移，保护周边环境，基坑开挖需遵循以下原则：①车站及区间基坑开挖严格按照“时空效应”的理论，分层分段施工，并要随挖随撑。②土方开挖必须在地下连续墙及墙顶圈梁达到设计强度后方可进行。挖土前必须进行充足的降水，确保水位降到当前挖土层层底以下 1~2 m。③支撑施工要先撑后挖，开槽支撑的原则进行。施工时先挖一条土槽放置支撑。当两根支撑安装完成后，挖去支撑中间的土体。④土方开挖施工时，坑边 20 m 范围内严禁堆放弃土和堆放重物。⑤严格控制土坡坡度，确保边坡稳定。⑥严禁挖土机械碰撞支撑、立柱、井点管、地下墙、桩等结构。⑦坑底留 20~30 cm 人工修土至设计标高。⑧距坡脚 5 m 设排水沟，集水井距围护结构 5 m，确保基坑干燥。⑨在每个限定长度的开挖段中严格按开挖程序进行开挖，每一层开挖底面标高不低于该层支撑的底面，第一层开挖后，按一小段(最长不超过 12 m)，在 16 h 内开挖完成，即于 16 h 内安装支撑，施加支撑预应力，第二层及以下各层开挖每小段长读 $\leq 6$  m，在 12 h 内完成挖土，8h 内安装完成支撑。⑩每层土的放坡按 1:2 进行，总放坡坡度 1:3.5。

6、11 号线车站基坑开挖面积最大，且开挖深度最深，是决定整个工程的关键部位。为了限制其结构变形，且不影响工期，该基坑土方采用分层、分块、对称、均衡开挖，基坑从立面分七层开挖。上四层土整体分层开挖，下三层（第四道混凝土支撑以下）由两侧向中间分区分层放坡退挖，放坡坡度为 1:1，总坡度 1:3.5。下三层土从端头井开始开挖，以结构诱导缝为界，挖土与支撑完成一段，即开始垫层及结构施工，依次向标准段推进，开挖顺序如图 3 所示，后三层土按图中标数字由小到大施工，且均采用分区施工。

## 4 信息化施工



工程监测是深基坑工程信息化施工的重要组成部分。迄今为止基坑工程的研究尚有许多不明确的地方,复杂的地质条件又给选择支护结构方案和合理设计参数的选择带来一定的限制。鉴于深基坑工程的复杂性和不确定性,深基坑工程中的工程监测就显得尤为重要。主体车站施工前,沿基坑边共布置 73 组测斜点、73 个墙顶位移监测点、1 个基坑外承压水位监测点、19 组支撑轴力监测点、20 个立柱沉降监测点、68 组地表沉降监测点。

为不使信息间断,我们在深基坑施工过程中连续量测地面、支护结构及邻近建筑物的工作状况,并将观测数据迅速处理,与警戒值进行对比分析,以对深基坑的整体工作状况和基坑周边环境作出安全性评价。进而根据评价的结果,采取相应的措施。

与此同时,利用监测数据反分析验证设计假设和修正设计参数,根据修正后的设计参数预测后续施工阶段深基坑的工作状况。

根据预测结果,对当前设计和施工方案的合理性进行评价,进一步优化原设计方案和合理调整施工参数,使深基坑工程处于最佳状态。

## 5 结语

上海轨道交通主题公园站基坑工程涉及五个关联基坑的施工,通过模拟数值分析可知,施工过程中基坑总体变形控制良好。

(1) 合理的施工顺序的选择有利于群关联基坑工程现场组织调度,极大地节省了工期。

(2) 地下连续墙关节节点的特殊处理和土体加固保证了后续基坑施工过程中相邻已经完成车站结构的安全。

(3) “分层、分块、对称、平衡、限时”施工各关联基坑,充分利用了“时空效应”原理,有效地解决了上海饱和软土地区全关联深基坑工程的变形控制问题。

