

# 复杂边界条件下地铁车站超深基坑开挖方案研究

张钰典

(上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 200235, 上海//工程师)

**摘要** 在城市轨道交通工程建设过程中,不可避免地会有大量的超深、超大基坑工程紧邻风景名胜、河道及既有建构物等重要风险源。采用有限元分析软件 MIDAS/GTS 对同期设计、建设的南通轨道交通 2 号线体育公园站和地块开发项目的基坑开挖方案(合坑开挖、分坑开挖)进行了围护结构变形测算以及周边环境影响分析比选。结合工程自身特点及实际情况,最终确定了综合风险最低的分坑开挖实施方案。

**关键词** 城市轨道交通; 车站; 深基坑; 数值模拟

**中图分类号** TU941; U231<sup>+</sup>.4

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2020.07.034

## Research on Metro Station Super Deep Foundation Pit Excavation under Complex Boundary Conditions

ZHANG Yudian

**Abstract** In the rapid development of urban rail transit construction, many important risk sources such as the large number of super deep and large foundation pit projects close to scenic spots, rivers and existing buildings will certainly emerge. In this paper, the finite element analysis software MIDAS/GTS is used to calculate the deformation of enclosure structure and analyze the influence of surrounding environment for the designed and constructed Sports Park Station on Nantong rail transit Line 2, and the foundation pit excavation in a plot development project in the same period, the latter adopts combined pit excavation and separate pit excavation. Combined with the characteristics and actual situation of the projects, the implementation scheme of separate pit excavation is finally determined which has the lowest comprehensive risk.

**Key words** urban rail transit; station; deep foundation pit; numerical simulation

**Author's address** Shanghai Tunnel Engineering & Rail Transit Design and Research Institute, 200235, Shanghai, China

城市轨道交通工程不可避免地会有大量的深基坑位于周边环境复杂、施做条件苛刻的城市中心城区内,不可避免地会遇到需与既有规划项目同期设计、同期建设(以下简称“同建”)的情况。例如,

上海轨道交通 9 号线打浦桥站与卢湾区 55 街坊地块(月光中心)同期建设项目、上海轨道交通 14 号线陆家嘴站与新鸿基陆家嘴金融贸易区 X2 地块(国金中心 IFC)同期建设项目、常州轨道交通 1 号线文化宫站与天宁区常州民防局的文化宫地块同期改造项目等。本文以南通轨道交通 2 号线体育公园站为例,通过对该站点的设计过程详细论述,以期为其同类工程设计提供技术参考。

## 1 工程概况

体育公园站为南通轨道交通 2 号线一期工程第 8 座车站,位于青年中路、跃龙路交叉口东北象限的 5A 级濠河风景区体育公园地块内,为地下 3 层岛式车站。体育公园总占地 6.5 hm<sup>2</sup>,由地面景观休闲区及地下展览区、停车区 3 部分组成。该地铁车站主体从中部斜穿体育公园地块,若想施做车站则需整体破除既有一层地下室结构,对公园整体破损严重。经综合考虑权衡,车站拟定与地块协同设计、同期建设。同建的体育公园站基坑总开挖面积约 1.6 万 m<sup>2</sup>,东西向长约 188.6 m,南北向长约 120.0 m,开发部分的基坑深约 13.6~17.1 m,车站主体基坑深约 24.1~26.9 m。体育公园站及周边环境详见图 1。



图 1 体育公园站地块平面图

2 工程地质与水文地质

拟建工程基坑位于南通市崇川区体育公园地块

内,场地地层分布较为稳定,浅部地基土属中软土,中部为粉砂。但场地北临濠河,为临岸场地,综合工程风险相对较高。场地土层的物理力学参数见表 1。

表 1 体育公园站土层物理力学参数表

土层号	土层名称	$\omega/\%$	$C/\text{kPa}$	$\theta/(\text{^\circ})$	$K_0$	渗透系数建议值/(cm/s)	$K_H/(\text{MPa/m})$	$K_V/(\text{MPa/m})$	$m/(\text{MPa/m}^2)$
③ <sub>2</sub>	粉砂	24.1	3.0	34.5	0.36	$4\times 10^{-3}$	35	30	7
③ <sub>4</sub>	粉砂	24.1	3.0	34.5	0.36	$5\times 10^{-3}$	50	45	8
④ <sub>1</sub>	粉质黏土	35.1	15.9	20.9	0.46	$5\times 10^{-6}$	12	10	3
⑤ <sub>1</sub>	粉砂夹粉土	26.8	5.0	32.0	0.36	$3\times 10^{-3}$	35	30	7

注: $\omega$  为含水量; $C$  为黏聚力; $\varphi$  为内摩擦角; $K_0$  为静止侧压力系数; $K_H$  为水平基床系数; $K_V$  为垂直基床系数; $m$  为比例系数

拟建场地范围内主要水系资源有地表水、潜水以及承压水三种形式。

其中:潜水主要赋存于浅部粉土、粉砂层中;拟建场地承压水一般赋存于 30 m 左右深度以下的砂土、粉土层中。本工程基坑开挖期间最不利位置抗承压水突涌破坏安全系数不满足安全要求,基坑内需设置降压井。为控制降承压水对周边环境的影响,地下连续墙通过增设素混凝土段来增加绕流路径。

3 基坑开挖支护方案综合比选

综合考虑基坑所在地理位置、土质条件、开挖深度,以及开挖方式、周边环境、施工节点等因素,本着“安全可靠、方案合理、技术先进、便于施工”的原则,基坑整体采用“地下连续墙+内支撑”的结构作为主要支护方案。

结合体育公园站同建深基坑的自身特点,在设计初期对两套总体可行的深基坑设计方案进行深入分析研究和比选。本文从两套方案中摘取两个主要方面进行对比:①同建深基坑施做前对既有地下室结构破除方案的研究;②同建深基坑施做过程中合坑方案与分坑方案对周边环境的影响分析。本文对周边环境的影响分析选用大型通用有限元分析软件 MIDAS/GTS 作为计算平台,围护、支护结构内力核算选用同济启明星 8.2 软件作为计算平台。

3.1 地下室破除方案

3.1.1 合坑破除方案

合坑破除方案中,地下室的破除思路为先施做同建基坑外圈的地下连续墙,待地下连续墙围闭后再采取明挖法将基坑内的地下室整体放坡挖除。破除地下室方案需处理两个风险点:①对既有浅基础建筑物五松别业的保护问题,本方案选择较为传统的隔离桩措施来降低地下连续墙施做及基坑

开挖期间对五松别业的影响,同时也将通向地面的露天楼梯进行回填夯实,后期地下连续墙完成后将隔离桩冠梁与地下连续墙冠梁连接,形成双排围护体系来控制五松别业的结构沉降;②因施工场地受限,需解决施做地下连续墙采用的重型机械在尚未破除的地下室顶板上的施工作业问题。因既有地下室顶板厚度仅为 0.25 m,覆土厚度为 0.50 m,其强度不满足重型机械施做需要,需进行顶板结构加固处理。为避免后期浪费,本方案对重型机械施做范围内的地下室内部采用可回收的型钢门式桁架进行加固,施工地面处增设 20 mm 厚钢板进行受力分摊,以确保施工安全。

3.1.2 分坑破除方案

分坑破除方案中地下室破除思路相比合坑破除方案较为简单,采用地下室基坑整体素土回填,清障后施做地下连续墙,后期按图 4 所示依次施工基坑 1→基坑 6→基坑 4→基坑 3→基坑 2→基坑 5 的顺序单独破除各自范围内的地下室结构。分坑破除方案中破除地下室也需处理两个风险点:①对既有浅基础建筑物五松别业的保护,其处理方案同合坑破除方案;②地下室内的素土无法夯实,掀顶板时坑内土体侧向支撑力较弱,需在侧墙与底板间增设混凝土斜抛撑辅助受力。

3.2 对周边环境的影响分析

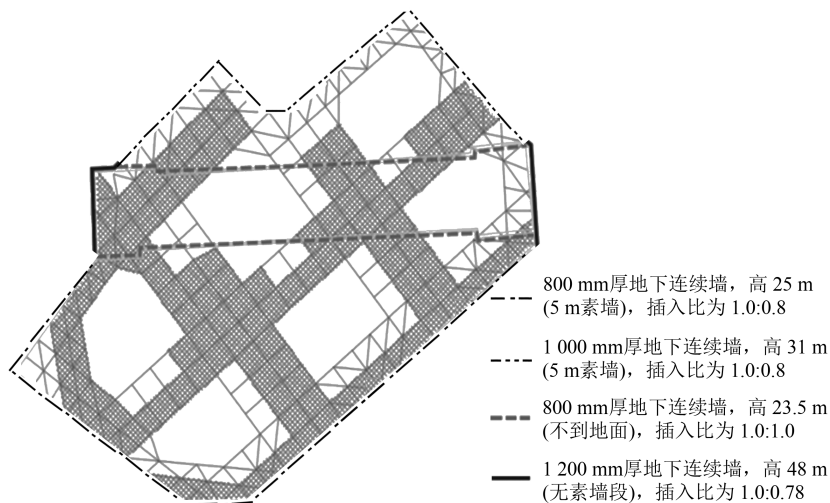
3.2.1 合坑破除方案分析

3.2.1.1 拟采用的基坑支护方案

合坑破除方案中围护结构沿基坑周边布置,其中,车站主体的坑中坑单独布设两排短墙,布设方案及围护的部分技术指标如图 2 所示。基坑竖向设置两道混凝土支撑:第一道混凝土支撑截面为 0.9 m×0.9 m,上方局部铺设 0.4 m 厚栈桥板;第 2 道混凝土支撑截面为 1.1 m×1.1 m。车站主体落低基坑段再增设 1 道混凝土支撑+2 道钢支撑+1 道换撑。

有铺盖板处设置 600 mm×600 mm 格构柱,立柱桩为  $\phi$  1 000 mm 钻孔灌注桩,桩长 30 m;非铺盖板处设置 400 mm×400 mm 格构柱,立柱桩为  $\phi$  800 mm 钻孔

灌注桩,桩长 25 m。合坑破除方案基坑整体安全等级为一级,地面沉降需控制在  $0.15\%H$  ( $H$  为基坑深度)内,围护结构最大水平位移需控制在  $0.15\% H$  内。



注: 地铁车站基坑深度为 24.1~26.9 m; 商业开发段基坑深度为 13.7~17.1 m

图 2 合坑方案基坑支护平面图

### 3.2.1.2 合坑破除方案数值模型

根据同建基坑及车站几何尺寸的特点,结合基坑开挖施工对临近环境影响范围的现场监测经验,同建基坑深度范围为 13.6~26.1 m,东西向最宽处为 188.6 m,南北向最宽处为 120.0 m。经综合考虑,本模型计算深度取 97 m,东西向计算宽度取 508 m,南北向计算宽度取 480 m。对计算区域内涉及的土体、河道、河堤、基坑围护结构、基坑支护结构、车站结构、合建工程结构均进行了三维精细建模。其中,土体采用实体单元;河堤、地下连续墙、车站的顶/中/底板侧墙、合建结构的顶/中/底板侧墙采用板单元;车站结构中的梁柱、合建结构的梁柱、支护结构中的水平向支撑及围檩等采用梁单元。综合考虑计算精确度,合坑破除方案中模型的单元数量为 13.1 万个,建立的基坑周边建构筑物、濠河及河道模型如图 3 所示。

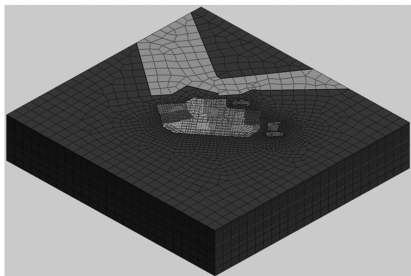


图 3 合坑破除方案基坑数值模型

具体基坑开挖模拟步骤为:阶段 1——建立数字模型,设置初始应力;阶段 2——生产合建结构、围护结构,位移清零;阶段 3——基坑开挖至首道支撑处,架撑,开挖至第二道支撑处,架撑,开挖至同建坑底,浇筑底板;阶段 4——开挖车站部分土体,架撑,直至坑底;阶段 5——浇筑车站结构至同建结构处,依次向上浇筑剩余部分结构,拆撑,直至顶板封顶后拆除首道支撑。基坑开挖过程中,对周边环境的影响最大的是阶段 4,同建围护结构自身变形、内力最大的是阶段 5。

### 3.2.1.3 数值模拟分析结果

经模拟计算分析,在基坑开挖回筑过程中,基坑整体变形最大点发生在靠近中国体育博物馆南通馆侧地下连续墙处,最大水平位移量约为 21.7 mm;通过同济启明星 8.2 软件内力分析,得到最大正弯矩为 1 296 kN·m,发生在第 2 道混凝土支撑下方,最大负弯矩为 -904 kN·m,位于坑底附近(计算结果取值在基坑东侧 1 m 厚地下连续墙处断面);对周边建构筑物影响最大处为五松别业,最大水平向位移量约为 8.3 mm,最大沉降量为 15.6 mm,差异沉降量为 8.2 mm。

### 3.2.2 分坑破除方案分析

#### 3.2.2.1 拟采用的基坑支护方案

分坑破除方案中围护结构沿基坑周边布置,基

坑1—基坑6间增设0.8 m厚地下连续墙进行工区分隔,基坑中部的车站主体地下连续墙为1.0 m厚且直通地面,布设方案及围护的部分技术指标如图4所示。基坑2—基坑6竖向设置2道混凝土支撑,第1道混凝土支撑截面为0.8 m×0.8 m,第2道混凝土支撑截面为1.0 m×1.0 m;基坑1采用“2道混凝土支撑+4道钢支撑+1道钢换撑”方案;部分桁架节

点处设置截面为400 mm×400 mm格构柱,立柱桩为 $\phi$  800 mm钻孔灌注桩,桩长30 m。分坑破除方案中基坑1、基坑2、基坑4的安全等级为一级;基坑3、基坑5、基坑6的安全等级为二级;地面沉降需控制在0.25%  $H$  内;围护结构最大水平位移需控制在0.25%  $H$  内。

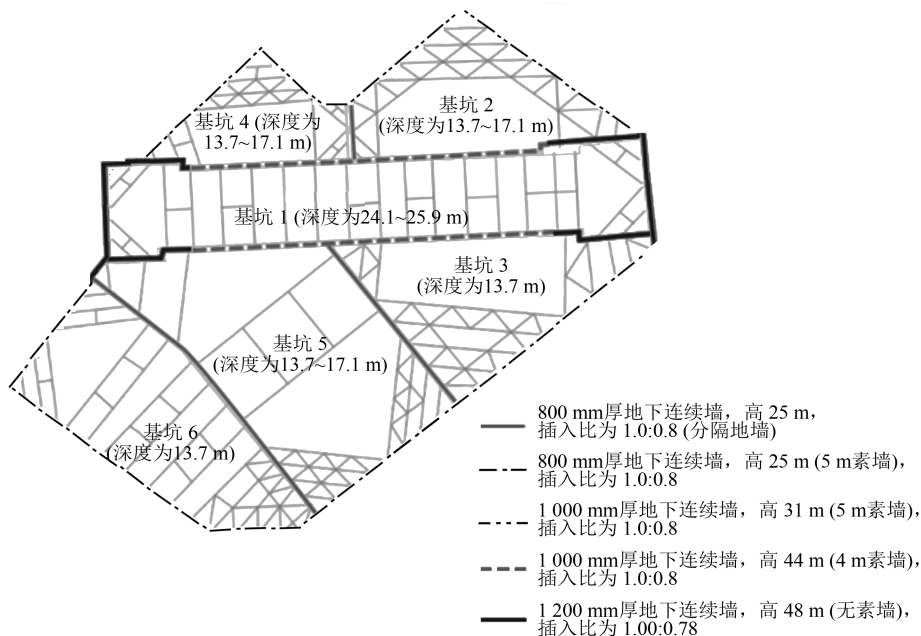


图4 分坑破除方案基坑支护平面图

### 3.2.2.2 分坑破除方案数值模型

分坑破除方案建模形式与合坑破除方案基本一致,划分单元数量为15.2万个,模型如图5所示。

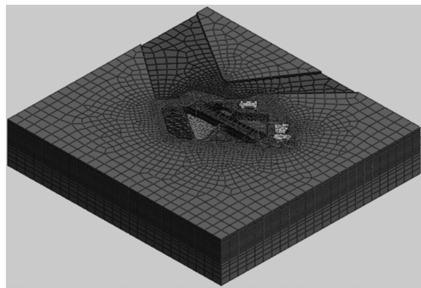


图5 分坑破除方案基坑数值模型

具体基坑开挖模拟步骤为:阶段1——建立数字模型,设置初始应力;阶段2——生产合建结构、围护结构,位移清零;阶段3——开挖车站主体基坑,开挖首层土体,架设首道支撑,依次开挖、架撑直至坑底,并开始回筑车站结构,依次拆撑,浇筑车站结构直至封顶,拆除首道支撑;阶段4——施做基

坑6,直至封顶,拆除首道支撑;阶段5——施做基坑4;阶段6——施做基坑3;阶段7——施做基坑2;阶段8——施做基坑5;阶段9——拆除分割地下连续墙,将同建结构整合连接完成。在所有基坑依次开挖过程中,对五松别业影响最大的是阶段4,对中国体育博物馆南通馆影响最大的是阶段7,同建围护结构东侧自身变形、内力最大的是阶段9。

### 3.2.2.3 数值模拟分析结果

为保证方案对比的一致性,分坑破除方案也选取中国体育博物馆南通馆侧地下连续墙的计算结果进行读取,其最大水平位移量约为13.9 mm,基坑1与基坑2累积变形量为18.7 mm。通过同济启明星8.2软件内力分析,得到最大正弯矩为1 140 kN·m,仍然发生在第2道混凝土支撑下方,最大负弯矩为-877 kN·m,位于坑底附近处(计算结果取值在基坑东侧1 m厚地下连续墙处断面);对周边建构筑物影响最大处为五松别业,最大水平向位移量约为6.5 mm,最大沉降量为11.6 mm,差异沉降量为5.2 mm。

3.3 方案比选

基于上述对比可知,合坑破除方案在地下室的破除作业中工序较为复杂,因除型钢门式桁架加固后的地下室顶板可进行施工堆载外,其它区域为确保安全需适当控制施工作业体量,故施工场地利用效率较低,增加了施工组织难度。分坑破除方案采取整体回填后再开挖的思路,在基坑围护体系施做前需进行大量的土体回填作业,后期还需再次挖除,预计会增加部分工程投资,但回填整平后的场地施工环境更好,可提高施工组织效率,经沟通后也更受施工方的欢迎。

合坑破除方案与分坑破除方案对周边环境的影响还是存在着一定的差异。通过查阅相关文献可知,基坑开挖对周边建构筑物的影响主要是通过开挖过程中所产生的水平位移来体现的,坑内土体损失量越大、损失的时间越久,基坑自身侧向变形越大,这会导致构筑物基础下方的土体越松弛,越靠近基坑开挖侧松弛度越大,从而造成浅基础房屋的水平位移增加及不均匀沉降的发生。结合计算结果可知,分坑破除方案因土体损失率较低、暴露时间较短、支撑有效刚度较大等因素,其累积后的变形量仍然小于合坑破除方案结果。相关数据对比详见表 2。

表 2 合坑、分坑破除方案对周边环境影响数据对比表			
比较点	比较项目	合坑破除方案	分坑破除方案
五松别业处	水平位移/mm	8.3	6.5
	沉降量/mm	15.6	11.6
	差异沉降量/mm	8.2	5.2
基坑东侧地下连续墙(墙厚 1 m 处)	水平位移/mm	21.7	13.9(18.7)
	最大正弯矩/(kN·m)	1 296.0	1 140.0
	最大负弯矩/(kN·m)	-904.0	-877.0

注: 括号中数值为分坑破除方案累积变形后的总位移量

因基坑工程方案的制定及选择往往不局限于数值分析,很多施工现场的实际情况往往也决定着方案的取舍。相比分坑破除方案,合坑破除方案在材料经济性、施工工序简便性上具有一定的优势,同时合坑破除方案下主体结构可同期浇筑、结构间接缝较少、完整性更好。但考虑到本项目位于南通市中心城区,地块西侧的跃龙路、南侧的青年路均为城市主干路,在施工期间易发生工程车辆与社会

车辆集中抢占高峰期道路资源的情况,从而造成次生工程风险的发生;另外,位于市中心的合坑破除方案周边实际有效的施工组织场地是有限的,围挡内的施工功效难以完全展开,实际工程进度与计划进度存在差异。分坑破除方案可先于合坑破除方案近一年完成车站主体结构的施工,可提前提供相临近区间的盾构施工场地布置,故该方案更具可实施性,对于保证南通轨道交通 2 号线整体工程筹划更具优势,施工容错性亦更高。

4 结语

本文通过数值模拟的方式,对南通轨道交通 2 号线体育公园站同建基坑方案,进行了围护结构变形测算、周边环境的影响分析的综合比选。由分析可知,分坑破除方案对基坑自身变形控制更好,对周边环境的影响更小,虽工程造价有所提升,会增多同建主体结构间的施工缝造成后期的渗漏风险,但基于其工期可控,抵抗各种风险的能力较强等特点,最终更受项目各方青睐,因此将该方案作为最终的实施方案。

针对大体量的基坑设计,合坑、分坑破除方案并无绝对的优势与劣势,随着社会发展,城市中心地区的超深、超大基坑建设项目会越来越多,因其周边环境复杂,相应的工程风险所造成的损失及社会影响往往过大,从而造成每一个城中项目的安全性及其抵抗各自风险的能力成为了各方最重要的考察标准。

参考文献

[1] 江智鹏. 基坑开挖方式对轨道交通结构变形影响分析[J]. 铁道工程学报, 2019(6): 89.

[2] 黄启舒, 孟庆生. 采用不同支护方案下基坑开挖对周边建筑桩基和地表影响的数值分析[J]. 湖南交通科技, 2019(3): 178.

[3] 翟杰群, 贾坚, 谢小林. 隔离桩在深基坑开挖保护相邻建筑中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2010(1): 162.

[4] 刘爽, 李伟玲, 廉恒, 等. 城市中心复杂环境下深基坑工程施工关键技术研究[J]. 建筑施工, 2018(11): 20.

[5] 祝兰兰. 复杂环境下深基坑“双坑合一”开挖施工技术[J]. 建筑施工, 2019(7): 35.

(收稿日期: 2020-01-17)