

排桩-内支撑结构的内力与变形监测及应用可行性探究

沈益明 郝柏园

江苏中煤地质工程研究院有限公司

摘要:在基坑开挖的过程中,受限于环境和空间的限制,支护的难度较大。为了解决支护问题,需要以深基坑工程的实际情况为依据,合理选择支撑结构体系。故本文将排桩-内支撑结构为分析对象,采用计算模型的方式探究该支撑结构体系在模拟开挖过程中的内力和变形,通过模拟结果探究排桩-内支撑结构体系是否能保证建筑的施工安全,为工程项目的基坑开挖和顺利施工提供有效支持。

关键词:排桩-内支撑结构;深基坑;变形;水平位移

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.21.016

在施工过程中,保证地下结构施工的安全性,将基坑开挖对周遭环境的影响降到最低,避免因基坑开挖导致基坑的支护结构发生变形问题,进而引发工程事故,是工程项目管理及施工管理中的首要任务。为了优化基坑设计,提高基坑开挖的安全度,将通过模拟施工分析排桩-内支撑结构的内力和变形,将其与实例工程的监测数据进行验证,从而明确方案的可靠性。

一、工程概况

项目场地南段分布有未拆迁完成的C-3-1地块二期项目部的办公及生活区活动房,其余周边均为市政道路、无既有建筑。拟建项目为高层建筑,楼层数在30层以上,项目有3幢高层住宅楼,并与配套商业连为一体,且层数差超过10层,其中1~5号楼与纯地下室连为一体,层数差同样超过10层,二层地下室的基坑工程位于软土地区,故拟建的高层建筑、配套商业及地下室工程重要性等级为一级,场地属中等复杂场地,中等复杂地基。

二、地基与基础变形特征分析及预测

拟建建筑属高层建筑,其变形特征主要表现为整体倾斜,必要时应控制沉降量。在采用桩基础或独立基础均以中风化花岗岩或微风化花岗岩等作为桩端持力层时,均具低压缩性或不可压缩,按当地工程经验,估计整体倾斜和总沉降量均能满足规范的要求^[1]。

而配套商业建筑及纯地下室的荷载较小,其变形特征主要表现为相邻柱基之间的沉降差,因主要持力层面变化大,可能选择不同的持力层,将产生差异沉降,

可采取在基岩出露段设置褥垫层、调整基础底面积或选择桩基等有效的结构措施,当采用上述建议的基础型式及基础持力层时,基础总沉降量不大,建议设计时按规范要求^[2]进行验算。

但因纯地下室与主楼建筑、主楼与配套商业建筑为整体式结构,二者高差均较大,有一定的沉降差异;同时当主楼采用桩基、附属商业及纯地下室采用浅基时,二者的基础型式及持力层不一样,也将产生差异沉降,设计和施工时应考虑采取适当的处理措施,以协调沉降变形,减小不均匀沉降,如在主楼与纯地下室之间的地下部分采用后浇带处理,在地上部分的配套商业与主楼之间设置沉降缝,施工时采取不同建筑物或建筑部分的建造顺序,适当扩大高层建筑部分的基底面积,或采用变刚度调平设计,建议基础设计时进行沉降验算。拟建建筑在基础及上部施工期间应进行变形观测,并加强对周边已建建(构)筑物的变形观测^[3]。

三、基坑工程安全等级及稳定性评价

(一) 基坑工程概况及基坑工程安全等级

拟建工程地下室基坑平面呈近似长方形,占地面积约18472m²。拟建工程设两层地下室,地下室底板底面标高-2.60~-3.10m,场地现有地坪标高为5.11~8.21m,周边道路现状标高6.54~7.67m,地下室从现状地面起最大开挖深度约10.80m。地下室边界与西北侧的人行道最近距离约7.5m、与东侧的人行道最近距离约6.9m、与南侧的人行道最近距离约7.5m,北侧距离售楼部最近距离约7.5m,北西侧与位于用地红线内的地下人行通道的下行坡道边线最近距离约3.6m。

除场地红线外的市政道路人行道见有地下管线外,场地内未发现明显的地下埋藏物,地下室周边环境条件相对简单。基坑侧壁土层为杂填土、素填土(填砂)、淤泥质黏土、粉质黏土、含泥中粗砂、残积砂质黏性土、全风化及砂土状强风化花岗岩等,其中杂填土、素填土(填砂)、淤泥质黏土等为软弱土层,基坑底土层主要为淤泥质黏土和残积砂质黏性土,基坑周边开挖深度约9.20~10.80m,北西侧和东侧为市政主干道,基坑破坏结果严重,根据地下室周边环境条件及场地岩土工程、水文地质条件,拟建基坑工程安全等级为一级,基坑重要性系数1.1。

(二) 基坑稳定性评价

按朗肯土压力理论，基坑侧壁土的开挖临界深度的计算公式为 $z_0=2C/(\gamma\sqrt{k_0})$ ，杂填土、素填土（填砂）、淤泥质黏土及粉质黏土、含泥中粗砂、残积砂质黏性土、全风化花岗岩、砂土状强风化花岗岩的开挖临界深度 z_0 分别为1.13m、0.62m、1.21m、3.45m、0.71m、3.22m、4.08m、5.63m，其中含泥中粗砂层及以上地层的开挖临界深度均小于拟建基坑开挖深度范围内各层土的开挖厚度，因此基坑在垂直开挖后局部稳定性及整体稳定性均将处于失稳状态，应采取支护措施，以确保基坑开挖施工时各侧边土体稳定。拟建基坑经开挖后，局部基坑底地层为淤泥质黏土软弱土，当未采取任何支护措施时，基坑底淤泥质黏土易产生隆起现象，当采用支护结构时，支护结构的入土深度临界值为18.15m。基坑底局部地段分布有含泥中粗砂，其赋存的地下水具有承压性，易产生坑底渗透变形破坏，在基坑支护设计时应确保支护结构长度能满足抗渗透及抗突涌稳定性要求。拟建场地承压水头最大值为4.02m，以DK5地层为例，当基坑开挖到-2.60m时，含水层顶板至地下室底板的厚度1.65m，承压水的水头压力为40.2kN，而底板到含水层间的土体自重为28.5kN，因此承压水对坑底将产生突涌破坏，故设减压井降低承压含水层水头高度。基坑开挖范围内侧壁地层素填土（填砂）及杂填土为中等透土层，淤泥质黏土、粉质黏土、残积砂质黏性土为弱透土层，地下水位于基坑开挖面以上，基坑开挖过程中坑壁土体在地下水的渗流作用下，填土层易产生流土、流砂甚至管涌，淤泥质黏土层易产生流泥等渗透变形破坏，根据国标GB50287土的渗透变形公式 $J_{cr}=(GS-1)(1-n)$ 进行判别，淤泥质黏土的临界水力比降 $J_{cr}=(2.55-1)*(1-0.548)=0.70m$ ，以钻孔DK5为例，基坑开挖到位后坑内外水头差为6.63m，会产生流泥现象，应采取止水帷幕等有效的抗渗流措施。

四、基坑围护体系设计方案

基坑采用排桩—混凝土内支撑支护体系，支护桩选择钻孔灌注桩，混凝土强度为C30，桩直径为1000mm，有效桩长是31m，桩与桩的间距是1.5m。本基坑开挖深度约为9.20~10.80m，基坑从上往下设置2道支撑，若只设1道支撑，则基坑变形较大，不能满足规范要求，因此设置2道支撑的竖向位置成为控制变形的重点，一般支撑位置会根据侧向土压力、内力位移分布情况进行设置，将第2道支撑设置在土压力、内力位移的最大处，但同时还要考虑到后期施工因素，如果2道支撑的竖向间距过小，则不利于土方开挖及后期地下室的施

工，因此应用有限元计算模型结果，根据土压力、内力位移分布情况将支撑设置在土压力、内力位移的最大处，以此减小基坑周边位移^[4]。

在支撑的拆除过程中，需要防止因为瞬间应力释放过大而造成的排桩—内支撑结构局部变形，甚至是开裂的问题。在拆撑过程中，设计人员需合理设置换撑带，待换撑带达到设计强度后方可拆撑，同时应加大监测频次，防止因变形过大引发基坑坍塌事故。排桩—内支撑结构在拆撑过程中采用专用千斤顶进行支顶，根据实际情况给予加力顶紧，最后将调整钢垫板取出，再将千斤顶进行卸力，卸力过程中根据支撑结构变形情况适当停止，然后继续卸力到结束为止^[5]。

五、水平支撑结构计算

采用有限元计算方式进行计算，综合性分析及计算排桩竖向支挡结构、周遭土体作用和水平支撑，将支护中的内支撑结构、支护结构、开挖面下桩侧土抗力的刚度矩阵用 $[K_n]$ 、 $[K_z]$ 、 $[K_t]$ 表示，位移矩阵和荷载矩阵用 $\{W\}$ 和 $\{F\}$ 表示，其计算公式如下：

$$(1) ([K_n]+[K_z]+[K_t])\{W\}=\{F\}$$

通过内力计算得到截面（ZCL）的最大弯矩、轴力、剪力和扭矩如表1所示。

表1 支撑内力的计算结果

类型	最大扭矩/kN.m	最大剪力/kN	最大轴力/kN	最大弯矩/kN.m
ZCL-1	59	57	1798	232
ZCL-2	27	114	34	173
ZCL-3	127	27	1355	346

同时得到支撑处腰梁（YL）的最大弯矩、轴力、剪力和扭矩如表2所示。

表2 腰梁内力的计算结果

类型	最大扭矩/kN.m	最大剪力/kN	最大轴力/kN	最大弯矩/kN.m
YL-1	117	463	980	429
YL-2	509	507	549	592
YL-3	18	1003	708	1701
YL-4	614	649	2217	1506

表1和表2是作为支撑配筋最不利组合下的计算结果，根据其计算结果控制支护变形，可以保证支撑结构和腰梁组件的安全。立柱有相当大的重量和较大的刚度，其位移不会对角撑产生影响，因此基层土上移量并不大。在具体的施工过程中，基坑的周遭地下土体在基坑开挖以前始终是处于静止平衡的状态，但是在土方开挖时及土方开挖后，土体的静止平衡状态会被破坏，土体的内部压力在基坑开挖中会不断卸载。此时的土压力类型会从原本的静止土压力向主动土压力转化，如果压力不平衡，将会影响到支护的安全，因此为了在支护中

始终保持压力的平衡，在基坑开挖后要卸载土压力，将土压力向钢筋混凝土的水平支撑体系转移，即在基坑开挖后，钢筋混凝土的水平支撑轴力会不断增长，因此需要监测轴向力，在达到一定数值后，支护结构会出现变形。

对水平位移和竖向位移加以监测，监测工作委托第三方有资质的专业单位负责，获取到准确的监测数据

后，通过设计、施工以及监理上的共同分析得出结果，在符合工程安全的前提下对支撑体系加以整改。监测工作开始于基坑施工开挖前，开挖前取得的监测值为初始值，监测次数在2次及以上，同时需要绘制“位移—时间”和“位移速率—时间曲线”，并对数据做回归分析，以便得到最终的位移值，并让曲线的变化规律得以确定，其监测内容如表3所示。

表3 支护形式基坑监测内容

坡顶竖向位移	累计值 (mm)	绝对值35	坡顶水平位移	累计值 (mm)	绝对值43
	变化速率 (mm/d)	绝对值3		变化速率 (mm/d)	绝对值4
支撑轴力	角部支撑kN	210	深层水平位移	累计值 (mm)	绝对值24
	中部支撑kN	/		变化速率 (mm/d)	绝对值3
邻近建筑物位移	累计值 (mm)	绝对值35	周边地表竖向位移	累计值 (mm)	绝对值30
	变化速率 (mm/d)	绝对值3		变化速率 (mm/d)	绝对值3
周边管线	累计值 (mm)	绝对值10	地表裂缝	累计值 (mm)	绝对值10
	变化速率	绝对值3		变化速率 (mm/d)	持续发展

主要监测项目包括邻近建筑物位移、基坑周边地表竖向位移、坡顶垂直位移和坡顶水平位移。沿基坑周边布置约4个沉降观测点，在关键部位需要进行加密操作，沉降观测点可同时检测水平和垂直

位移。可根据监测数据及时调整施工进度和施工工况，指导现场信息化施工，其报警值如表4所示。而通过模型计算值与实测值比较，得到如表5所示结果。

表4 支护结构的监测报警值

邻近建筑物位移		基坑周边地表竖向位移		坡顶垂直位移		坡顶水平位移	
累计值/mm	速率/mm·d ⁻¹	累计值/mm	速率/mm·d ⁻¹	累计值/mm	速率/mm·d ⁻¹	累计值/mm	速率/mm·d ⁻¹
25	2	25	2	25	2	30	3

表5 模拟与实测的结果对比

编号	预测值/mm	实测值/mm	误差/%
ZCL-1	17.82	20.72	14.00
ZCL-2	11.53	13.35	13.63
ZCL-3	12.32	14.41	14.50
YL-1	17.82	20.91	14.78
YL-2	12.41	15.02	17.38
YL-3	18.08	19.80	8.69
YL-4	14.13	12.89	9.62

根据模拟与实测的结果对比可知，桩排-内支撑支护结构的位移幅度并不大，预测值和实测值的误差均在15%以下，未超过预警值，符号预期效果。

六、结语

基坑支护施工时应应对邻近建筑物及构筑物进行沉降及变形监测，在基坑开挖过程中应对基坑侧壁土压力及地下水位进行监测，监测点数量及监测要求应符合设计及规范规定。当采用桩排-内支撑支护结构时，应对支护桩及最大弯矩、轴力、剪力和扭矩进行监测，监测数量及要求应符合规范及有关规定，以确保基坑围护的安

全。

参考文献

[1] 彭文韬, 魏昆. 深基坑排桩-内支撑支护结构空间变形的应用研究[J]. 工业安全与环保, 2018 (01): 69-73.

[2] 赵伟强. 深基坑支护中排桩加内支撑加锚杆组合结构综合支护施工技术探究[J]. 建材与装饰, 2018 (23): 15-16.

[3] 张敏. 排桩-混凝土内支撑支护结构体系的稳定性研究[D]. 云南大学, 2020.

[4] 李鹏飞, 朱良武, 张明聚等. 基坑工程排桩内支撑围护结构局部破坏安全风险评价方法研究[J]. 铁道勘察, 2022 (01): 1-7.

[5] 李铮. 排桩-内支撑结构在深基坑支护中的应用[J]. 中国煤炭地质, 2022 (S1): 129-132.

[6] 张润鹏. 排桩+内支撑组合结构应用于支护工程施工的要点分析[J]. 中国建筑装饰装修, 2022 (22): 158-160.