

[文章编号] 1003—4684(2020)02-0096-05

考虑空间效应的基坑支护优化设计与施工

宋倩云¹, 徐国兴², 王翠英¹

(1 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068; 2 湖北楚程岩土工程有限公司, 湖北 武汉 430300)

[摘 要] 针对软土地层深基坑施工变形较大的特点,设计与施工中考虑空间尺寸效应,可有效控制基坑变形,降低造价。阐述基坑开挖的空间尺寸与抗隆起安全系数的关系,据此对基坑平面分区开挖;深基坑方案设计中考虑空间效应,采用内支撑“对撑+边桁架+局部角撑”的支护形式;并对支撑轴力、横撑水平距离及支护结构的稳定性进行了验算;开挖施工考虑空间效应,采用“盆式开挖”,遵守“平面分区,竖向分层,留土护臂,限时对撑”的施工原则;将基坑场地划分的 A、B、C、D 四个施工区对应的施工阶段 1、2、3、4 进行监测,结果表明第 5 d、第 10 d、第 15 d 和第 20 d 围护结构的监测值与设计预测值基本吻合。

[关键词] 空间效应;盆式开挖;限时对撑;变形控制

[中图分类号] TU47 [文献标识码] A

上海大部分深基坑工程均处于地下 30 m 以内的流塑及软塑黏土层中。由于软黏性土具有较大的流变性,则基坑工程中的支护结构和周围地层的变形在很大程度上取决于施工工序和施工参数。因此,在基坑设计施工过程中,必须考虑时空效应所带来的影响并制定相应的解决措施。已有许多学者在基坑的空间尺寸对基坑支护结构、周围地层的位移及基坑稳定性的影响做了较深入的研究。如方银钢^[1]在时空效应的影响下采用钢支撑轴力伺服系统、设置隔离桩等措施对土体分层分块卸荷,以此控制基坑变形;贾坚^[2]利用时空效应法开挖技术,解决复杂地区基坑变形控制问题;高文华等^[3]运用三维有限元分析模型对支护结构内力和变形时空效应的影响规律进行探索;史子庸^[4]对深基坑内支撑支护结构变形规律与优化设计进行了研究;李成巍等^[5]介绍了紧邻地铁隧道的复杂环境条件下,两侧超大深基坑同步开挖的总体设计思路,以及针对变形控制目标采取的技术措施;包宸豪^[6]基于数值模拟和层次分析法对双侧基坑最优开挖方案进行研究。

目前工程界在软土地区深基坑工程中,为控制地层位移保护基坑周围环境,在基坑开挖前用高压旋喷注浆法,沿坑底 2~4.5 m 厚的土体,满膛加固,有的在开挖过程中施加密集的大规模型钢支撑等处理方法。如照此做法,在上海地区基坑施工时,需加固大量土体,不仅花费高额加固费用,而且还将延长施工周期。笔者以上海某深基坑工程为背景,探究

考虑空间效应的优化设计及“盆式挖土与限时对撑”的施工技术,有效地控制基坑变形,降低造价,为类似基坑设计与施工提供参考。

1 基坑开挖的空间尺寸与抗隆起安全系数的关系

深基坑开挖的空间效应是指土体及支护结构的应力场与位移场不但与最终状态有关,而且与达到最终状态的路径、结构尺度等有关,即所谓空间效应。基坑中软黏土开挖顺序、分块尺寸与基坑的稳定性和墙后地面沉降都有一定的关系。

Eide 等曾对长条形、方形和长宽比为 2 的矩形基坑的抗隆起进行研究,提出了抗隆起安全系数 F_s 。计算公式^[7]为:

$$F_s = \frac{C_u N_c}{\gamma H + q} \quad (1)$$

式中: C_u 为不排水抗剪强度, kPa; γ 为土体重度, kN/m³; H 、 B 、 L 为基坑开挖深度、宽度、长度, m; q 为地面超载, kPa; N_c 为与尺寸相关的待定参数。

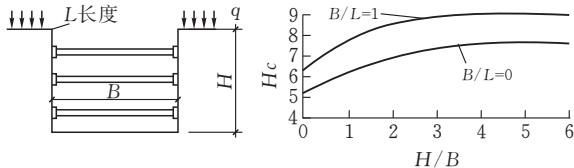


图 1 基坑尺寸长、宽、深与 N_c 关系曲线

图 1 为基坑尺寸长、宽、深与 N_c 关系曲线。对

[收稿日期] 2019—09—02

[第一作者] 宋倩云(1997—), 女, 湖北潜江人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方向为深基坑工程

[通信作者] 王翠英(1965—), 女, 湖北武汉人, 湖北工业大学教授, 研究方向为深基坑工程

于 $H/B=1$ 及 $B/L \rightarrow 0$ 的条形基坑,图 1 中查出 $N_c=6.4, F_{s0}=C_u \cdot 6.4/\gamma H$; 对于 $H/B=1$ 及 $B/L=1$ 为方形基坑,图 1 中查出 $N_c=7.7, F_{s1}=C_u \cdot 7.7/\gamma H$; $F_{s0}、F_{s1}$ 分别为条形、方形基坑抗隆起安全系数。

由式(1)可知: $F_{s0}/F_{s1}=7.7/6.4=1.21, H/B=1$ 的方形基坑($B/L=1$)的抗隆起安全系数比 $H/B=1$ 的条形基坑($B/L \rightarrow 0$)大 21%。

2 考虑空间效应的基坑设计与施工

根据基坑开挖深度、面积大小和周边环境条件等因素优化基坑支护结构型式,考虑空间效应,采用盆式开挖,分层分段,留土护壁,限时对撑的基坑挖土方案,从而达到控制基坑变形的目的。

2.1 考虑空间效应的深基坑支护设计

2.1.1 方案设计 采用内支撑“对撑+边桁架+局部角撑”支护形式。

设计考虑的内容如下:

1) 根据设计要求,对设计提出的总的变形控制量进行分解,根据施工流程和工况提出分阶段的定量控制指标,用以指导分阶段的施工作业;

2) 信息化施工的具体安排。首先进行基坑系统的分析和先期预控设计,然后施工过程中实施动态监测和过程控制。

2.1.2 支撑轴力的计算 采用等值梁法计算支撑轴力。首先计算出各土层的主动土压力和被动土压力,然后求出土压力零点 O 位置。图 2 为等值梁法计算简图。

等值梁 AO , 根据平衡方程计算支撑轴力

$$N = \frac{E_a(h+u-a)}{h+u-h_0} \tag{2}$$

式中: E_a 为库伦主动土压力, kN/m ; h 为基坑深度, m ; u 为坑底至压力零点的距离, m ; a 为主动土压力合力作用点至桩顶的距离, m ; h_0 为支撑点距桩顶的距离, m 。

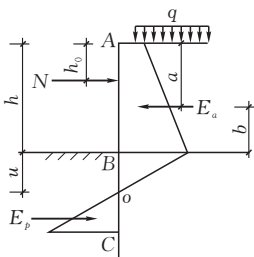


图 2 等值梁法计算简图

2.1.3 横撑水平距离的确定 设横撑水平间距为 d , 根据支护结构平衡条件, 则

$$\sum_i^n X = 0$$

$$\sum_i^n E_{ai} \cdot d = \sum_i^n N_i + \sum_i^n E_{pi} \cdot d$$
$$d = \frac{\sum_i^n N_i}{\sum_i^n E_{ai} - \sum_i^n E_{pi}} \tag{3}$$

即

式中: $\sum E_a$ 为支护桩墙一侧的主动土压力合力标准值, kN/m ; $\sum E_p$ 为支护桩墙另一侧被动土压力合力标准值, kN/m 。

2.1.4 支护结构的稳定性验算 稳定安全系数

$$k = \frac{\sum_i^n E_{pi} + \sum_i^n N_i}{\sum_i^n E_{ai}} \geq 1.3 \tag{4}$$

式中: N_i 为第 i 个支撑对支护桩墙的水平作用力, kN/m 。

2.2 考虑空间效应的深基坑施工

1) 盆式开挖 先开挖基坑中间部分的土, 基坑周围内侧留土坡, 土坡最后挖出, 称盆式开挖。本基坑基坑开挖面积大、无法放坡; 结合基坑的实际分布情况, 在考虑周边环境与实际施工条件之后, 首先将基坑分为若干个区域, 一一进行数字编号, 并严格按照分区编号大小顺序从小到大依次施工, 编号数字相同区域需要同时施工, 图 3 为盆式开挖施工图。

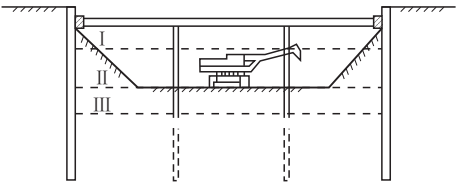


图 3 盆式开挖施工图

2) 分层开挖 本基坑土质较软弱、开挖深度较大, 并且施工条件不适合分块分段施工混凝土垫层。分层开挖是整体浇灌混凝土垫层的基础, 分层的厚度必须严格根据地下土质情况进行稳定性计算之后确定。软土地基的分层厚度一般控制在 2 m 以内, 而硬质土可以控制在 5 m 以内。

3) 土方开挖与支护的配合 开挖进程和支护结构施工协调, 可以形成循环作业, 节省工期。所有支护桩、立柱桩、水泥土搅拌桩、降水井必须在基坑开挖前完成。

2.3 环境保护的信息化施工与监测

图 4 为基坑信息化施工流程图。

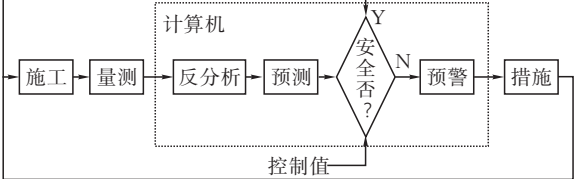


图 4 基坑信息化施工流程图

3 工程实例

3.1 工程概况

上海某工程占地面积 21 562 m²,总建筑面积 87 650 m²。工程北毗邻宋氏住宅保护建筑,东侧紧邻 M15 规划地铁线,南为主干道,西靠申康宾馆保护建筑,同时与拟建 12 号线对接。

该基坑工程近似于长方形,南北长约 120~190 m,东西宽约 110 m。地下部分开挖深度 23 m,基坑开挖面积约 16 572 m²,周边延长米约 600 m,地层情况详见表 1。

表 1 地层计算参数					
层号	土层名称	计算深度/m	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	C/kPa	$\Phi/(\text{°})$
1	填土	3.5	18.5	7.0	15.0
2	粘土	6.0	19.6	16.0	17.5
3	淤泥质粘土	9.5	16.2	15.8	19.0
4	砂质粉土夹粉砂	12.8	17.0	19.6	23.5
5	灰~灰绿色粉质粘土	23.2	18.0	34.0	21.0

3.2 考虑空间效应的深基坑设计与施工

3.2.1 深基坑支护结构设计方案 综合考虑本次

表 2 内支撑和围檩参数				
部位	支撑/围檩中心标高/m	主要支撑截面/mm	连杆截面/mm	围檩截面/mm
第一道钢筋砼支撑	-1.20	1000×800	750×750	1200×800
第二道钢筋砼支撑	-6.50	1200×900	750×750	1400×900
第三道钢筋砼支撑	-11.50	1300×900	800×800	1500×900
第四道钢筋砼支撑	-15.70	1300×900	800×800	1500×900

此外还有栈桥、支撑立柱、换撑、支撑拆撑(篇幅所限略)。

3.2.3 支撑力计算

1)计算工况 挖土标准工况与地下室施工顺序:开挖至-1.55 m 时,开槽施工第一道支撑、围护桩压顶梁;分层分块开挖至-6.85 m 时,开槽施工第二道围檩及支撑;待强度达到后,分层分块开挖至-11.85 m 时,开槽施工第三道围檩及支撑;待达到强度后,分层分块开挖至-16.05 m 时,开槽施工第四道围檩及支撑;达到强度后,分层开挖至坑底处,并立即浇注垫层、施工底板及换撑带等。

2)1-1 剖面支撑力 本算例选取 1-1 剖面,采用等值梁法计算支撑轴力。基坑周边地面荷载取 20 kPa,连续墙深度 41.8 m。

第一道支撑力 N_1 计算。开挖至-6.85 m,第二道支撑还未施工、强度未达到期间,第一道支撑处于最不利状态。采用朗肯土压力理论、水土合算计算土压力,计算得各土层主动、被动土压力强度见图 6,等值梁法计算简图见图 7。

土压力零点位置

基坑工程情况、周边环境条件及基坑开挖施工顺序,围护设计采用地下连续墙(两墙合一)+十四道钢筋砼水平内支撑的围护形式;内支撑布置采用“对撑+边桁架+局部角撑”,连续墙边缘采用围檩的形式进行加固,支撑平面布置及施工分区图见图 5。

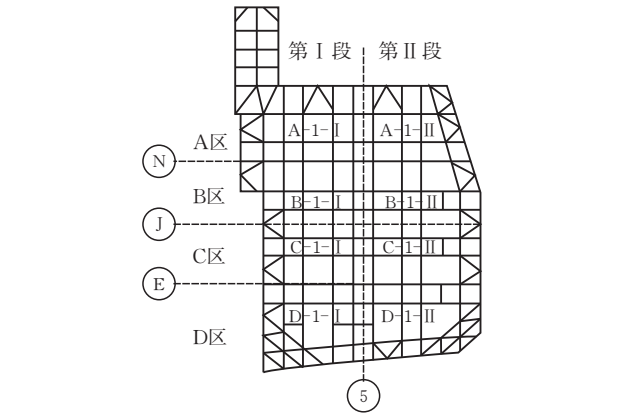


图 5 支撑平面布置及施工分区图

3.2.2 支撑体系 该工程地下四层,开挖深度 23 m,围护设计设置四道钢筋砼支撑,支撑和围檩参数详见表 2。

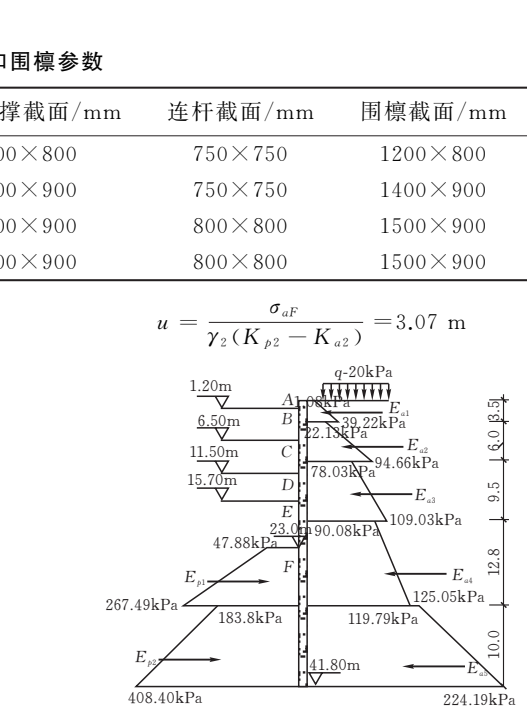


图 6 主、被动土压力分布情况

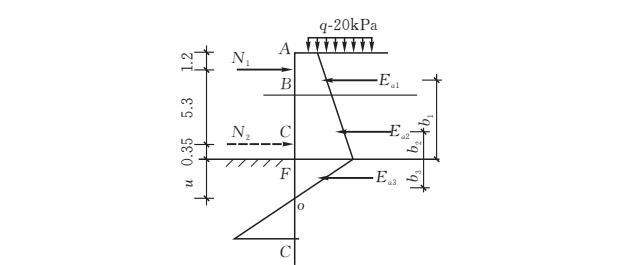


图 7 1-1 剖面等值梁法计算简图

采用逐层开挖支撑力不变法 $E_{a1} =$

70.52 kN/m, $b_1=4.55$ m, $E_{a2}=206.90$ kN/m, $b_2=1.52$ m, $E_{a3}=309.63$ kN/m, $b_3=1.02$ m。对等值梁 AO 的 O 点取矩,由(2)式得

$$N_1 = \frac{E_{a1}(b_1+u) + E_{a2}(b_2+u) + E_{a3}(b_3+u)}{u+h_c} = 243.2 \text{ kN/m}$$

b_1 、 b_2 、 b_3 分别为土压力 E_{a1} 、 E_{a2} 、 E_{a3} 合力作用点距开挖面的距离;同理求得: $N_2=856.3$ kN/m, $N_3=1125.7$ kN/m, $N_4=1160.5$ kN/m

$$\sum_i^n N_i = 3385.7 \text{ kN/m}$$

横撑水平距离的确定。

由图 6 算得每层主动、被动土压力如: $E_{a1}=70.52$ kN/m, $E_{a2}=350.38$ kN/m, $E_{a3}=983.52$ kN/m, $E_{a4}=1376.83$ kN/m, $E_{a5}=1809.91$ kN/m, $E_{p1}=1387.62$ kN/m, $E_{p2}=2901.65$ kN/m, $\sum_i^n E_{ai}=4591.16$ kN/m, $\sum_i^n E_{pi}=4289.27$ kN/m。

由式(3)得,

$$d = \frac{\sum_i^n N_i}{\sum_i^n E_{ai} - \sum_i^n E_{pi}} = \frac{3385.70}{4591.16 - 4289.27} = 11.22 \text{ m}$$

稳定性验算由式(4)得

$$k = \frac{\sum_i^n E_{pi} + \sum_i^n N_i}{\sum_i^n E_{ai}} = \frac{4289.27 + 3385.70}{4591.16} = 1.67 > 1.3$$

内支撑结构满足稳定性要求。

3.3 考虑空间效应的深基坑施工

3.3.1 平面分区 本基坑长约 120~190 m,宽约 110 m,根据基坑施工要求,土方开挖与支撑施工过程中拟将该基坑场地由北至南划分为 A、B、C、D 四个施工区(图 5)。N 轴线以北为 A 区,N~J 轴线范围为 B 区,J~E 轴线范围为 C 区,E 轴线以南为 D 区。为了提高施工进度,每个施工区域又以 5 号轴为界划分为东、西两个平行施工段 I、II,平面分区具体划分示意图见图 4。

3.3.2 竖向分层估算 主体基坑最长 120 m,宽约 110 m, $B/L=0.92$, $H/B=0.21$,插入法查图 1 得 $N_c=6.2$,最大分块长、宽分别为 55 m、30 m,取 F_s 为 1.2,开挖深度范围内土层黏聚力 C_u 厚度加权平均值为 18.0 kPa,根据式(1),分块每层开挖深度 $H=4.89$ m。

基坑土体开挖共分为五层,每层开挖深度 4.6 m ($4.6 \text{ m} < 4.89 \text{ m}$),第一层与第五层开挖一次到底;第二层~第四层,每层再分二小层分层开挖。

3.3.3 留土护壁,盆式开挖 盆式开挖中间土体并施工对应的支撑,四周留 5 m 宽左右的土堤,并且沿开挖面放 1:1.5 的坡,以减少基坑围护结构的变形;基坑严禁超挖,最后 150 mm 厚土层采用人工清挖,以控制标高。由于上海地区黏性土的流变性,应用时空效应,随挖随撑,盆边支撑 48 h 内形成,限时支撑。

3.4 监测结果

设计提出的总的变形控制量,分解至施工流程和各工况分阶段的定量控制指标中;图 4 基坑场地划分的 A、B、C、D 四个施工区分成阶段 1、阶段 2、阶段 3、阶段 4 进行监测,第 5 d、第 10 d、第 15 d 和第 20 d 天围护结构的监测结果分别见图 8、图 9、图 10 和图 11;监测结果表明,围护结构变形监测值与设计预测值相吻合,均在规范允许范围。

工程实施情况和监测结果表明,考虑了空间效应内支撑布置形式以及施工方法,可减小、控制深基坑变形,合理地解决了土方开挖及施工过程对周围建筑物和交通所造成的影响,降低了造价。

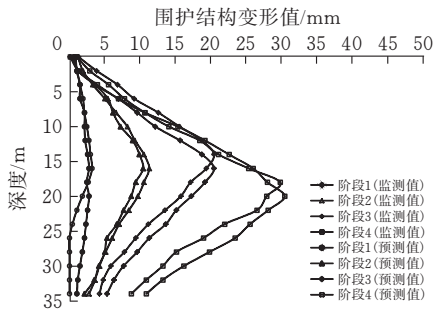


图 8 第 5 d 基坑围护结构变形监测值与预测值对比

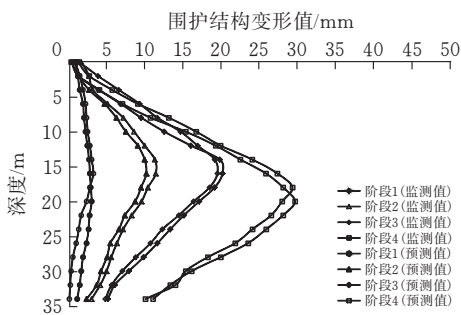


图 9 第 10 d 基坑围护结构变形监测值与预测值对比

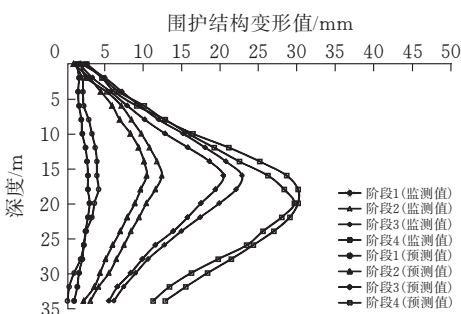


图 10 第 15 d 基坑围护结构变形监测值与预测值对比

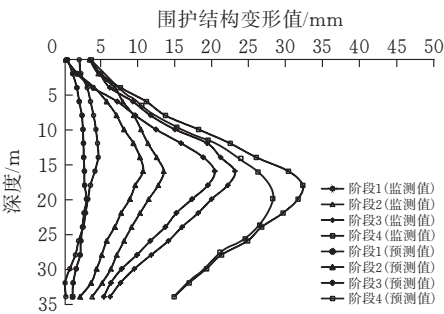


图 11 第 20 d 基坑围护结构变形监测值与预测值对比

4 结论

1)阐述基坑开挖的空间尺寸与抗隆起安全系数的关系,分析得出方形基坑的抗隆起安全系数比条形基坑大 21%;用该方法估算了开挖平面分区尺寸;

2)深基坑方案设计中考虑空间效应,采用内支撑“对撑+边桁架+局部角撑”的支护形式;并对支撑轴力、横撑水平距离及支护结构的稳定性进行了验算;

3)考虑空间效应采用“盆式开挖”的施工原则,做到“平面分区,竖向分层,留土护臂,限时对撑”,控制围护结构变形及周围地表沉降;

4)设计提出的总变形控制量,分解至施工流程和各工况分阶段的定量控制指标中。第 5 d、第 10 d、第 15 d 和第 20 d 围护结构的变形实测值结果表明,与设计预测值相吻合,并在规范允许范围。

[参 考 文 献]

[1] 方银钢.软土地区深大基坑变形控制措施研究[J].工程技术研究,2019,4(7):13-15.

[2] 贾坚.软土时空效应原理在基坑工程中的应用[J].地下空间与工程学报,2005,8(4):490-493.

[3] 高文华,杨林德,沈蒲生.软土深基坑支护结构内力与变形时空效应的影响因素分析[J].土木工程学报,2001,10(5):90-96.

[4] 史子庸.深基坑内支撑支护结构变形规律与优化设计研究[D].北京:中国地质大学,2018.

[5] 李成巍,李伟,梁志荣.软土地区隧道两侧深基坑同步施工设计与分析[J].地下空间与工程学报,2018(S1):193-199.

[6] 包宸豪.双侧深大基坑邻近既有地铁站安全影响研究[D].北京交通大学,2016.

[7] 刘国彬等.基坑工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2009:711-712.

Optimization Design and Construction of Foundation Pit Support Considering Spatial Effect

SONG Qianyun¹, XU Guoxing², WANG Cuiying¹

(1 School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China ;
2 Hubei Chucheng Geotechnical Engineering co. LTD, Wuhan 430300, China)

Abstract: Aiming at the large deformation of deep foundation pit in soft soil layer, the space size effect is considered in design and construction, which can effectively control the deformation of foundation pit and reduce the cost. In this paper, the relationship between the space size of foundation pit excavation and the anti-lifting safety factor is expounded. According to this, the foundation pit plane is excavated. The space effect is considered in the design of deep foundation pit. The inner support is used to support the support + side truss + local angle. The support axial force, horizontal distance of horizontal support and stability of supporting structure are checked; In excavation construction, the spatial effect is considered, "pot excavation" is adopted, the construction principle of "planar partition, vertical stratification, retaining arm guards and time-limited support is followed; the construction phases 1, 2, 3 and 4 corresponding to the four construction areas A, B, C and D of the foundation pit site are monitored. The results show that the monitoring values of the enclosure structure on the 5th, 10th, 15th and 20th days were basically consistent with the design prediction values.

Keywords: spatial effect; basin excavation; limited time support; deformation control