

引文格式:李吉林,尹爱月,魏焕卫,等.开挖宽度对异形基坑L形转角区支护结构变形影响研究[J].建筑科学与工程学报,2024,41(4):159-170.

LI Jilin, YIN Aiyue, WEI Huanwei, et al. Study on influence of excavation width on deformation of supporting structure in L-shaped corner area of shaped foundation pit[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(4): 159-170.

DOI:10.19815/j.jace.2022.05017

开挖宽度对异形基坑L形转角区支护结构变形影响研究

李吉林¹, 尹爱月¹, 魏焕卫², 郑晓², 李青原²

(1. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013; 2. 山东建筑大学 土木工程学院, 山东 济南 250101)

摘要:为研究不同开挖宽度对基坑L形转角区支护结构变形规律的影响,基于滨州市某异形深基坑工程项目的现场实测数据,分析了基坑开挖过程中L形转角区阴阳角位置处支护结构变形规律的差异性;建立了不同基坑宽深比(B/H , B 和 H 分别为基坑宽度和深度)的L形转角基坑模型,研究了不同宽深比条件下转角位置处阴阳角相互作用条件下支护桩水平变形的空间分布规律,进一步明确基坑L形转角区支护桩不同深度处水平变形受影响范围。结果表明:当 $B/H < 1.0$ 时,阳角侧支护桩浅部水平变形受转角效应影响的范围随 B/H 的增加呈现出明显减小的趋势,其值近似满足 $2.4H - B$;当 $B/H > 1.0$ 时,阳角侧支护桩浅部水平变形受转角效应影响的范围约为 $1.5H$;坑内底部支护桩水平变形受基坑宽深比影响不明显,受转角效应影响的范围约为 $0.6H$;当 $B/H < 1.0$ 时阴角侧支护桩浅部水平变形受影响范围约为 $1.6H$,当 $B/H > 1.0$ 时其水平变形受影响范围约为 $0.6H + B$;坑内开挖底面位置处阴角侧支护桩水平变形受影响范围约为 $0.6H + B$,受宽深比变化影响不明显。

关键词:异形基坑;变形规律;数值模拟;转角效应

中图分类号: TU473.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2024)04-0159-12

Study on influence of excavation width on deformation of supporting structure in L-shaped corner area of shaped foundation pit

LI Jilin¹, YIN Aiyue¹, WEI Huanwei², ZHENG Xiao², LI Qingyuan²

(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Corp., Ltd., Jinan 250013, Shandong, China;

2. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, Shandong, China)

Abstract: In order to study the influence of different excavation widths on the deformation law of the supporting structure at the L-shaped corner area of the foundation pit, based on the field measurement data of a shaped deep foundation pit project in Binzhou city, the variability of the deformation pattern of the supporting structure at the negative and positive corner positions during the excavation of the foundation pit was analyzed. The L-shaped corner pit model with different width-to-depth ratios (B/H , B and H are the width and depth of foundation pit respectively) of foundation pit was established, the spatial distribution law of the horizontal

deformation of the supporting piles under the conditions of interaction between the negative and positive corner under different width-to-depth ratios was studied. The affected range of horizontal deformation of the supporting piles at different depths in the L-shaped corner area of the foundation pit was further clarified. The results show that when $B/H < 1.0$, the range of the horizontal deformation of the shallow part of the supporting piles on the positive corner side affected by the corner effect shows a clear tendency to decrease with the increase of B/H , its value approximately satisfies $2.4H - B$. When $B/H > 1.0$, the horizontal deformation of the shallow part of the supporting piles on the positive corner side is affected by the corner effect in a range of about $1.5H$. The horizontal deformation of the supporting piles at the bottom of the pit is not significantly affected by the width-to-depth ratio of the foundation pit and is affected by the corner effect in a range of about $0.6H$. When $B/H < 1.0$, the horizontal deformation of the shallow part of the support piles on the negative side is affected in a range of about $1.6H$, and when $B/H > 1.0$, its horizontal deformation is affected in a range of about $0.6H + B$. The horizontal deformation of the support piles on the negative side at the location of the bottom of the excavation in the pit is affected in a range of about $0.6H + B$, which is not obviously affected by the change of the width-to-depth ratio.

Key words: shaped foundation pit; deformation pattern; numerical simulation; corner effect

Author resume: LI Jilin(1977-), male, senior engineer, E-mail: lijilin@sdepci.com.

0 引言

基坑是具有长、宽、深的三维空间结构,三维空间受力复杂。大量工程实践与理论研究表明,在基坑开挖过程中由于基坑的平面形状、几何尺寸、开挖深度以及开挖步骤等各种原因会引起基坑性质发生改变,具有明显的空间效应^[1-2]。

目前已有大量学者对基坑的空间特性进行相关研究^[3-5],任彦华等^[6]采用三维有限元方法研究了空间效应对深基坑支护挡墙内力的影响,发现深基坑开挖过程中沿挡墙方向上空间效应的主要影响范围约为2倍坑深。俞建霖等^[7]认为随着基坑长宽比的增大,空间效应逐渐减弱,基坑变形趋近于按二维平面应变问题分析的结果。杨晓华等^[8]通过对桩锚支护结构的深基坑监测数据进行处理分析发现,支护桩水平最大位移发生在基坑两侧的中间位置以及坑角处,具有明显的空间效应特点。李连祥等^[9]以济南某大型坑中坑基坑项目为例,利用 PLAXIS 3D 有限元软件进行数值模拟,发现最大位移出现在等刚度支护结构中点位置,桩身整体水平位移和弯矩在靠近坑角位置处逐渐减小。Shi 等^[10]以合肥市某地铁换乘站的基坑工程为例,研究了施工期间侧墙位移、地表沉降以及支撑轴力的变化规律,表明坑角效应的存在导致结构位移和地表沉降发生变化。Tan 等^[11]通过分析上海市某软土地区狭窄深基坑

的角部空间效应发现,坑角存在一定的硬化效应,导致坑角附近侧墙位移最小,而跨中附近位移最大。楼春晖等^[12]以温州某大型深基坑工程为例,通过分析监测数据发现基坑边角对围护结构变形以及地表沉降具有明显限制作用。Zhang 等^[13]提出考虑土-结构三维耦合数值模型,并以青岛市地铁北站为例研究了交叉开挖的坑角效应,分析交叉角度对结构变形的影响,结果表明其坑角处结构的变形随着交叉角角度的增加而减小。刘念武等^[14]研究了开挖深度对空间效应的影响,并测量两个狭长形地铁车站深基坑不同位置处土体的侧向位移、土体沉降等,通过分析监测数据发现,边角效应能够减小侧向位移的平面应变比,土体沉降和侧向位移的空间效应存在一定相关性。葛晓永等^[15]通过有限元数值模拟方法研究了不同长宽比和深宽比基坑开挖后支护结构的变形,结果表明随着基坑长宽比的增加,长边支护结构的最大水平位移变化显著,且明显大于短边的最大水平位移。

转角效应发生在异形基坑形状变异区或转角区等,此类区域支护结构受力及因开挖扰动引起的周边地层变形均与基坑常规区域存在较大差异。因此对于存在转角区域的异形基坑而言,其空间效应尤为明显^[16]。然而现有研究多为针对具体深基坑工程的现场实测数据分析及数值模拟分析^[17-18],研究成果多集中在揭示异形深基坑空间效应作用机理及

变形特性方面,且研究对象具有一定的局限性。本文基于滨州市某异形深基坑工程现场实测数据分析结果,建立不同深宽比条件下L形转角基坑三维仿真模型,对基坑的开挖过程进行模拟,通过对比分析不同深宽比条件下基坑L形转角区开挖施工过程中围护结构侧向变形及支撑轴力,研究不同基坑开挖宽度条件下围护结构变形特性的发展演化规律,揭示转角效应对基坑围护结构受力变形的影响。

1 工程概况

1.1 工程场地及地质概况

山东省滨州市某翻车机异形深基坑工程位于北海经济开发区张东公路与滨州北铁路交叉口,该工程为翻车机输煤系统项目,包含一处翻车机房及转运站、管带机、泵房等附属建筑。基坑形状特异,在基坑西侧存在L形转角区域,该区域东西方向长约86 m,南北方向长约48 m,基坑北侧开挖深度约22 m,开挖宽度约13 m,西南侧开挖深度约14.5 m,开挖宽度约为22.5 m,基坑L形转角区域平面形状及监测点位置布置如图1所示。

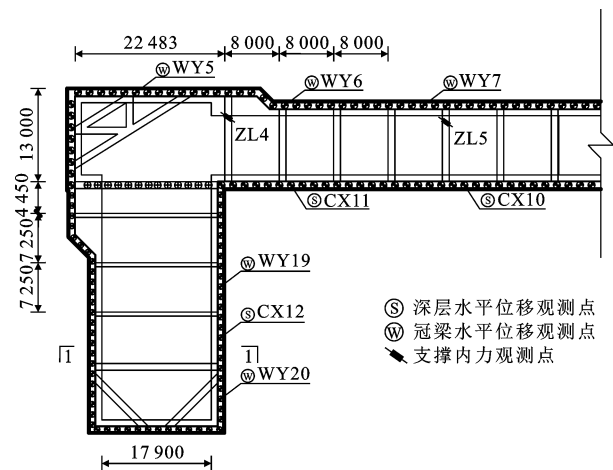


图1 基坑L形转角区域平面形状及监测点布置
(单位:mm)

Fig. 1 Plane shape of L-shaped corner area of foundation pit and layout of monitoring points (unit:mm)

根据工程勘察报告可知,拟建场地的主要地层属于第四系黄河三角洲沉积土层,按一般工程地质性质差异自上而下共分为7层,各土层的物理力学性质指标如表1所示。该场地地下水类型属于第四纪潜水,稳定水位埋深为3.0 m。

1.2 支护方案及施工工况

基坑整体的支护方式采用支护桩和混凝土支撑的支护形式,其中北侧采用4道混凝土支撑支护,西南侧采用2道混凝土支撑和立柱桩共同支护,支撑

表1 各土层力学参数

Table 1 Mechanical parameter of each soil layer

土层编号	土层名称	重度 $\gamma/$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	层厚/m
1	素填土	18.20	0.20	9.60	0.90
2	粉质黏土	18.30	17.60	6.00	3.50
3	粉土	19.10	7.40	20.60	6.60
4	粉质黏土	18.50	18.40	7.30	5.30
5	粉土	19.30	7.00	21.00	2.50
6	粉质黏土	18.30	21.10	8.00	6.30
7	粉土	18.80	7.50	24.10	13.10

的水平中心间距为8.0 m,剖面1-1处具体支护形式及部分结构尺寸如图2所示。基坑内部高差位置采用悬臂桩支护,由于场地地下水较浅,沿基坑四周布置单排水泥土搅拌桩止水帷幕,坑内采用管井疏干降水,坑外回灌井回灌地下水。

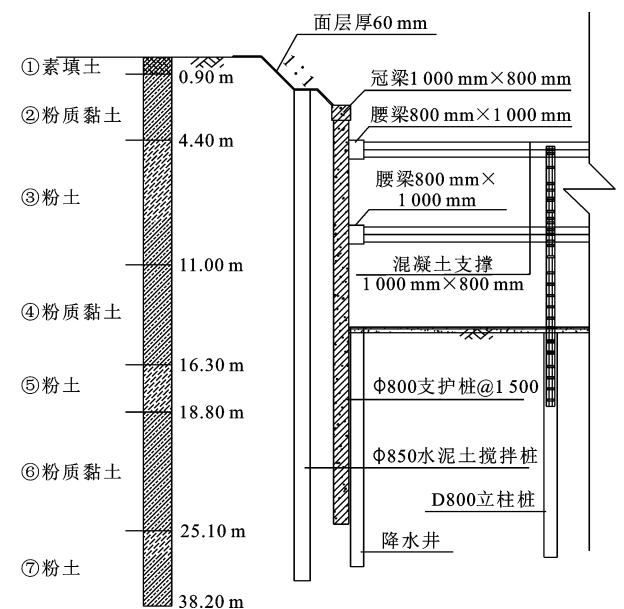


图2 内支撑支护剖面

Fig. 2 Section of inner supporting structure

主要施工步骤分为支护桩和止水帷幕施工,采用降水井进行降水,分步开挖和围护结构支撑布置。本文主要对L形基坑区域的南北侧冠梁水平位移的监测数据进行分析,基坑西南侧具体施工工况信息如表2所示。

1.3 现场监测结果分析

根据现场施工过程中不同时期的监测数据,对比深层水平位移观测点处5#、6#、7#冠梁的水平位移,规定桩体向坑内方向变形为正,其变化曲线如图3所示。

从冠梁水平位移监测结果中可以看出:随开挖深度的不断增加,5#、6#、7#测点处冠梁水平位移

表 2 施工工况

Table 2 Construction conditions

施工阶段	工况描述	开挖深度/m
工况一	放坡开挖	2.5
工况二	施工冠梁	5.0
工况三	施工第一道支撑	9.5
工况四	施工第二道支撑	14.5

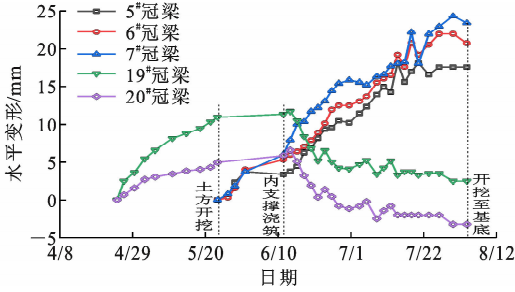


图 3 测点处冠梁水平位移变化曲线

Fig. 3 Variation curve of horizontal displacement of crown beam at measurement point

向坑内有逐渐增大的发展趋势,6#测点位置更加接近阳角位置处但受阳角效应的影响并不明显;位于基坑西北侧阴角附近5#测点冠梁水平位移总体小于较远处6#、7#测点处冠梁的水平位移;截至施工结束阶段,对比6#、7#测点数据,5#测点处冠梁水平位移的减小幅度分别约为15.5%和25.1%,可以看出阴角能够有效抑制其附近桩体发生水平位移。位于基坑南侧19#、20#测点数据在土方开挖结束后呈下降趋势,主要是由于该异形基坑不规则的开挖施工流程对基坑造成了明显的不对称卸荷,导致东侧支护桩桩体向坑外方向产生明显变形。通过监测数据对比分析可以发现,基坑南侧阴角附近20#测点冠梁的水平位移也明显低于较远处19#测点处冠梁的水平位移,表明阴角处存在较为明显的空间效应,会对其影响范围内支护桩的水平变形发展产生影响。

测斜位移监测点10#、11#处围护桩水平位移变化曲线如图4所示。由图4可知:第一道支撑下土体开挖后,由于基坑西南侧土体已经开挖,不规则开挖方式导致北侧土压力产生的荷载大于南侧土压力产生的荷载,基坑两侧存在的荷载差异通过支撑传递给该侧支护桩^[19],从而使阳角附近11#测斜点处支护桩浅部背离开挖侧变形,而10#测斜点处支护桩浅部表现为向开挖侧变形,表明阳角处转角效应对支护桩的变形产生了明显影响。

不同施工工况条件下,基坑阳角附近4#、5#处第一道支撑的轴力监测数据的变化曲线如图5所

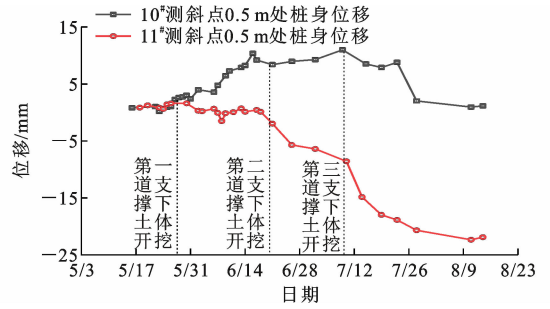


图 4 测点处测斜位移变化曲线

Fig. 4 Variation curve of measured oblique displacement at measurement point

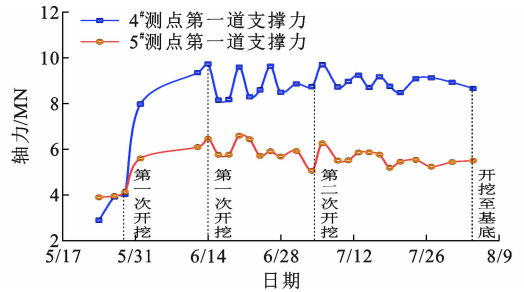


图 5 测点处支撑轴力变化曲线

Fig. 5 Variation curve of supporting axial force at measurement point

示。由图5可知,受施工工况的影响,两测点的轴力值均呈波动变化,且4#测点第一道支撑的轴力远大于5#测点第一道支撑的轴力,截至施工结束阶段,相比于5#测点,4#测点处第一道支撑的轴力增大幅度约为57.5%,说明转角区阳角附近存在的转角效应对其影响范围内的支撑轴力有较为明显的影响,因此在实际工程中应特别注意阳角附近支撑轴力监测值的变化,防止轴力突变导致支撑破坏影响基坑整体稳定性。

2 有限元分析

为研究不同基坑开挖宽度条件下基坑支护结构L形转角区域的变形规律,采用PLAXIS 3D建立L形转角基坑模型,对比分析不同基坑宽深比条件下转角效应对基坑支护结构变形及支撑轴力的影响规律。

2.1 基坑尺寸的确定及平面布置

基于现场工况对模型进行适当简化,基坑围护结构采用支护桩加混凝土支撑支护体系,确定基坑开挖深度 $H=12\text{ m}$,分别建立基坑开挖宽度 B 为 $0.5H$ 、 $0.75H$ 、 H 、 $1.25H$ 、 $1.5H$ 、 $1.75H$ 、 $2H$ 、 $2.25H$ 、 $2.5H$ 的9组模型进行模拟分析。

基坑阴角两侧支护结构 L_1 、 L_2 长度均为120

m, 支护桩嵌固深度取 10 m, 桩顶 0 m 处设置冠梁, 并分别在基坑深度为 -2.5 m 和 -7 m 处设置腰梁与支撑, 支撑水平布置间距为 3 m。需要说明的是, 建立不同基坑开挖宽度的模型时, 随着基坑开挖宽度增加超过一定距离后, 不同开挖宽度的模型在阴角附近部分相同位置处支护桩无法架设对撑, 为便于对比分析支护桩的水平变形, 在相同位置处设置角撑以代替对撑的功能; 角撑节点处统一设置立柱桩, 且当基坑开挖宽度大于 15 m 时, 为保证支撑在自重作用下不产生过大弯矩, 使支撑杆件的长细比满足相关规定, 在对撑中部增设立柱桩。L 形基坑平面布置(以 $B=9\text{ m}$ 为例)如图 6 所示, 基坑模型宽深条件如表 3 所示。

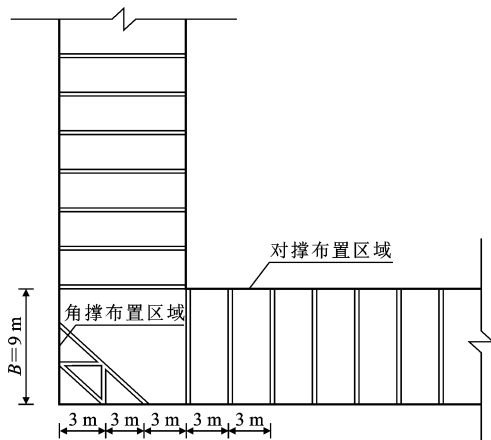


图 6 L 形转角区基坑平面布置

Fig. 6 Layout of foundation pit in L-shaped corner area

表 3 基坑模型尺寸信息

Table 3 Dimensional information for foundation pit models

编号	开挖宽度 B/m	开挖深度 H/m	角撑布置	对撑下增设立柱桩
1	6	12	1 道	无
2	9	12	2 道	无
3	12	12	3 道	无
4	15	12	4 道	无
5	18	12	5 道	1 根
6	21	12	6 道	1 根
7	24	12	7 道	1 根
8	27	12	8 道	1 根
9	30	12	9 道	1 根

2.2 模型的建立及参数信息

为减小边界效应对计算结果的影响, 模型水平及竖直方向尺寸均取 4 倍左右开挖深度, 确定计算模型尺寸为 $170\text{ m} \times 170\text{ m} \times 50\text{ m}$ 。为简化计算及便于分析, 计算模型的土层采用单一均质的砂土且不考虑地下水, 根据 PLAXIS 3D 基础教程中某工程案例确定其相关参数, 选用土体硬化(H-S)模型。

砂土重度 γ 取 $17\text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$, 内摩擦角 φ 取 34° , 剪胀角 ψ 取 4° , 黏聚力 c 取 1 kPa , 三轴固结排水试验割线模量 $E_{50} = 43\text{ MPa}$, 切线模量 $E_{\text{ocd}} = 43\text{ MPa}$, 卸载再加载模量 $E_{\text{ur}} = 129\text{ MPa}$, 其余土体参数均采用软件默认值。按现场基坑支护设计方案进行相关参数的选取, 根据等效刚度理论, 将支护桩等效为板单元进行模拟, 板厚 d 取 0.47 m , 弹性模量 $E = 30\text{ GPa}$ 。冠梁、腰梁、支撑以及立柱桩开挖面以上部分建模过程中采用梁单元进行模拟, 立柱桩开挖面以下部分建模过程中采用 Embedded 桩单元, 桩底均采用固定约束防止其发生位移, 构件具体参数信息见表 4。

表 4 构件参数信息

Table 4 Information of component parameters

构件名称	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	截面尺寸	弹性模量 E/GPa
冠梁	25	1 000 mm \times 800 mm	30
腰梁	25	800 mm \times 1 000 mm	30
支撑	25	1 000 mm \times 800 mm	30
立柱桩	25	800 mm \times 800 mm	30

计算模型不考虑地下水等因素的影响, 考虑计算精确度对板单元网格进行加密处理, 模型的边界条件采用 PLAXIS 3D 中默认边界约束, 即侧面采用水平方向的约束, 底部采用固定约束, 上表面自由, 有限元网格划分(以 $B=18\text{ m}$ 为例)如图 7 所示。

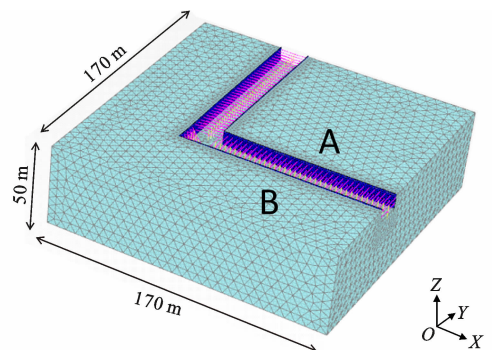


图 7 L 形转角基坑三维计算模型

Fig. 7 3D calculation model of L-shaped corner foundation pit

由于计算模型为对称结构, 仅取阳角 A 侧支护桩以及阴角 B 侧支护桩的水平变形值进行分析。模拟开挖过程中通过激活和冻结相应材料单元完成施工步, 整个模拟过程遵循“先架撑后开挖”的原则。为尽量减少相关因素的影响, 各开挖工况均对 L 形转角基坑进行整体开挖, 计算模型的具体模拟工况如表 5 所示, 规定阴角点处为相对坐标原点 ($X=0$), 支护桩向坑内方向水平变形为正向。

表 5 模拟工况

Table 5 Simulated working conditions

施工阶段	工况描述	开挖深度/m
工况一	施工支护桩、冠梁	0.0
工况二	施工腰梁及第一道支撑	2.5
工况三	施工腰梁及第二道支撑	7.0
工况四	开挖至基底	12.0

为保证数值模拟可以较好地反映基坑开挖过程中的复杂受力情况,将数值模拟计算结果与实测数值进行对比。由于实际工程中基坑西南侧开挖宽度为 17.9 m,故选取基坑开挖宽度为 18 m 的计算模型与之对比,12[#] 测点处测斜位移监测值与模型相应位置处支护桩水平变形模拟值对比如图 8 所示。由于二者地层条件不同,且 12[#] 测点受其附近阴角影响,导致实测曲线与模拟曲线存在一定差异,但其总体的变化趋势是一致的,且数值上也相差不大,证明了数值模拟的可靠性。

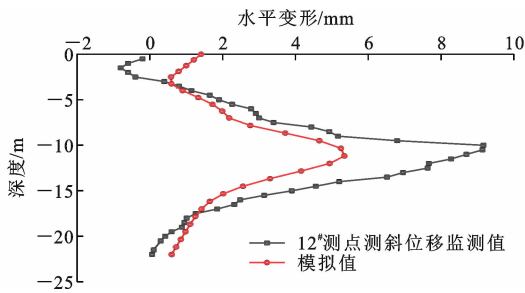


图 8 测斜位移监测值与模拟值对比

Fig. 8 Comparison between measured oblique displacement monitoring values and simulated values

基坑采用内支撑支护体系,由于阴角和阳角自身的坑角效应以及支撑产生的相互作用,导致其附近存在一定的转角效应。同样地,以基坑开挖宽度为 18 m 的计算模型为例,阳角 A 侧支护桩以及阴角 B 侧支护桩的水平位移计算云图如图 9 所示。由图 9 可知,阳角及阴角附近支护桩水平位移相比远处有明显差异,在坑角附近范围内受转角效应影响较明显,且支护桩浅部与坑底处水平位移受影响范围同样存在一定差异。

3 数值模拟结果分析

3.1 阳角侧支护桩水平变形分析

在深度 $h=0$ m(冠梁)、 -12 m(坑底)处沿基坑开挖长度方向的阳角侧支护桩水平变形如图 10 所示。对于内支撑支护体系的 L 形基坑,阳角处转角效应主要表现为阳角处空间效应以及内支撑约束的共同作用。

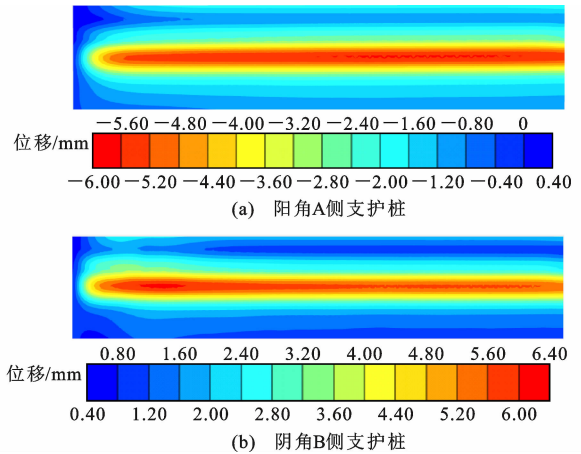


图 9 支护桩水平位移计算云图

Fig. 9 Cloud map for calculation of horizontal displacement of supporting piles

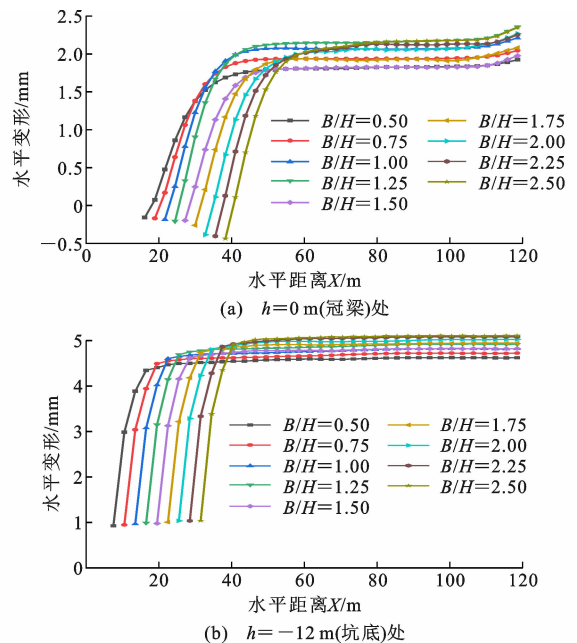


图 10 阳角侧支护桩水平变形变化曲线

Fig. 10 Variation curve of horizontal deformation of supporting piles on positive side

受基坑不规则开挖影响, $h=0$ m 处的冠梁在阳角角点附近表现为向坑外的负方向变形,且负向变形随着基坑宽深比的增加有进一步增大的趋势,但由于坑内土体卸荷,受坑外主动土压力作用,冠梁总体表现为向坑内的正向变形。受阳角处转角效应的影响,阳角附近支护桩水平变形较小,随着与阳角角点距离的增加,水平变形呈现出明显的上升趋势;在超出某一范围后变形趋于相对稳定^[20],在末端因受到模型边界效应的影响而表现出增大趋势,但不会对转角区域的模拟结果产生影响。当基坑开挖宽度增加至 18 m 时($B/H=1.50$),冠梁水平变形趋于

稳定后其值相对较小,表明在支撑中部增设立柱桩,一定程度上可减少支撑自重对支护桩变形的影响,从而导致其水平变形较小。总体来看,在不同 H/B 条件下,冠梁水平变形趋于稳定后的变形值随基坑宽深比的增加而有逐渐增大的趋势,但增幅相对较小。

由图 10(b)可知, $h = -12$ m 处坑底桩体水平变形变化曲线与冠梁处总体趋势较为相近,但坑底处受不规则开挖的影响相对较小,其水平变形随着与阳角角点距离的增加呈上升趋势,且同样在超出某一范围后达到最大值并趋于稳定,基本符合阳角处转角效应的变化规律^[21]。对比不同 B/H 条件可以看出,增设立柱桩会减小坑底处桩体的水平变形,从总体来看,其仍随 B/H 的增加而表现出增大趋势。

综上所述,当超出阳角角点一定距离后,桩体水平变形达到最大值并趋于稳定,且基坑开挖宽度大于 24 m 时,稳定后的桩体水平变形差值相对较小,表明基坑宽深比大于 2.0 时,基坑宽度效应不再明显^[22]。当水平变形值趋于稳定后,可认为支护桩的水平变形不受阳角处转角效应的影响,故定义此变形稳定的区段为支护桩体的“长边效应”区域。

3.2 阳角侧支护桩水平变形受影响范围分析

阳角附近支护桩水平变形的变化趋势主要受阳角处转角效应的影响,为研究阳角侧支护桩水平变形受转角效应影响的范围,首先确定 L 形基坑计算模型的边界效应影响范围。依次取边界附近各测点,对比不同测点处支护桩沿深度方向的水平变形。

以基坑开挖宽度 6 m ($B/H = 0.5$) 为例,其阳角侧边界附近支护桩水平变形如图 11 所示。开挖面以上部分支护桩受边界效应的影响,其水平变形随测点位置变化有明显不同,但开挖面以下部分几乎不受边界效应影响。当测点位于距离边界 10.5 m 处时,随着测点与边界的距离增加,桩体水平变形总体无明显变化,即可认为此时支护桩处于边界效应影响范围之外,同理依次取不同 B/H 条件,发现边界效应影响范围均为 10.5 m,此范围外的测点在分析变形趋势时不再考虑边界效应的影响。为定量分析不同 B/H 以及不同深度条件下支护桩水平变形受转角效应影响的范围,通过引入转角效应影响系数来确定任意位置处支护桩水平变形与“长边效应”范围内支护桩水平变形的比值关系^[23],其表达式为

$$k = \frac{s_x}{s} \quad (1)$$

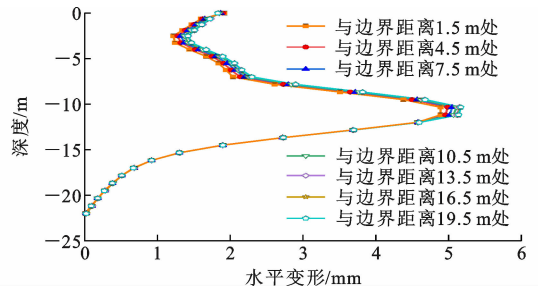


图 11 阳角侧边界附近支护桩水平变形

Fig. 11 Horizontal deformation of supporting pile near boundary on positive side

式中: k 为转角效应影响系数,对于 L 形基坑,当 k 稳定处于 0.90~1.10 时,支护桩处于“长边效应”范围; s_x 为任意位置处支护桩水平变形值; s 为“长边效应”范围内支护桩的水平变形值。

通过分析已确定支护桩受边界效应影响的范围,将范围以外水平变形相对稳定的部分视为“长边效应”区段。任取该区段内支护桩的水平变形值,以与阳角角点距离 88.5 m 处支护桩的水平变形 s_x 为例,根据公式(1)可得阳角侧支护桩在冠梁 ($h = 0$ m)、坑底 ($h = -12$ m) 处的转角效应影响系数变化曲线,如图 12 所示。对于阳角侧支护桩,当转角效应影响系数 k 小于 0.90 时可认为支护桩的水平变形受阳角处转角效应影响,而当其值稳定大于 0.90 时,认为支护桩处于“长边效应”范围内,即不受阳角处转角效应的影响。距离模型边界 10.5 m 范围内,受模型边界效应的影响,支护桩的水平变形随水平距离的增加有略微增大的趋势,影响系数 k 也呈现相应的增大趋势。当基坑开挖宽度为 6 m ($B/H = 0.50$) 时,在与阳角角点距离 22.5 m 范围内, $h = 0$ m 处转角效应影响系数 k 均小于 0.90,当与阳角角点距离大于 22.5 m 时,转角效应影响系数 k 均大于 0.9,由此确定该处受转角效应影响的范围 a 约为 22.5 m。

取各测点处转角效应影响系数 k 值,确定阳角侧支护桩在冠梁 ($h = 0$ m)、坑底 ($h = -12$ m) 处水平变形受影响的范围 a ,如图 13 所示。由图 13 可知:冠梁 ($h = 0$ m) 处在 $B/H = 0.50$ 的情况下支护桩水平变形受阳角处转角效应影响的范围 a 最大,约为 $2H$,且当 $B/H < 1.00$ 时,阳角处转角效应影响范围 a 随 B/H 的增加呈现出明显减小的趋势,其值近似满足 $a = 2.4H - B$;当 $B/H > 1.00$ 时,阳角处转角效应影响范围 a 约稳定在 $1.5H$;坑底 ($h = -12$ m) 处支护桩水平变形受基坑宽深比的影响不明显,受转角效应的影响范围 a 约为 $0.6H$ 。

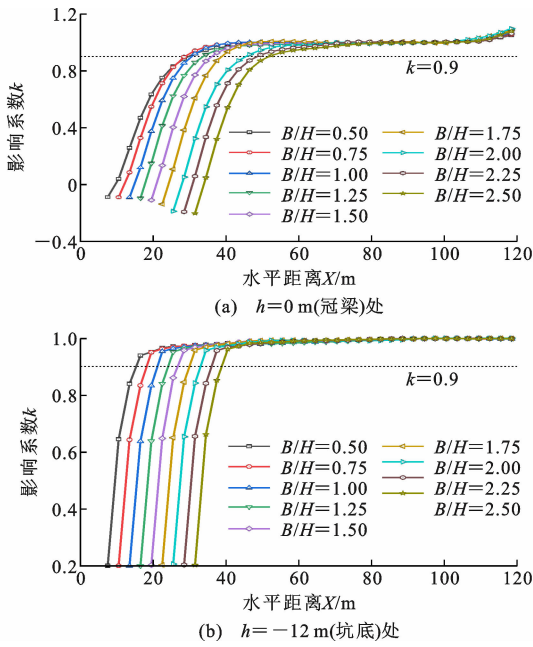


图 12 阳角侧支护桩转角效应影响系数变化曲线
Fig. 12 Variation curve of influence coefficient of corner effect of supporting pile on positive side

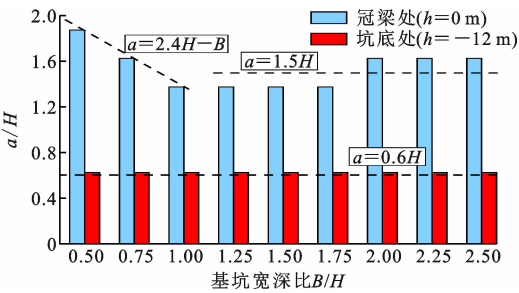


图 13 阳角侧支护桩水平变形受转角效应影响范围
Fig. 13 Range of horizontal deformation of positive side support piles affected by corner effect

3.3 对撑轴力空间分布规律分析

为研究不同 B/H 条件下阳角处转角效应对支撑轴力空间分布的影响,取对撑支护形式部分的支撑轴力进行分析,规定支撑轴力受压为正。由前述可知,“长边效应”区段内支护结构不受转角效应的影响,因此取该区段内对撑轴力为基准,将其余对撑轴力与之相比,得到不同 B/H 条件下深度 $h = -2.5$ 、 -7 m 处对撑轴力比的变化曲线,如图 14 所示。

排除边界效应影响范围内支撑对转角区模拟结果的影响,由图 14 可知,各 B/H 条件下,阳角角点处支撑轴力明显大于其余位置支撑的轴力,其原因为基坑不规则开挖导致阳角角点处基坑两侧荷载差异过大,同时阴角侧支护桩受角撑支护形式的影响导致其水平变形较大,支撑受挤压效应明显。对于

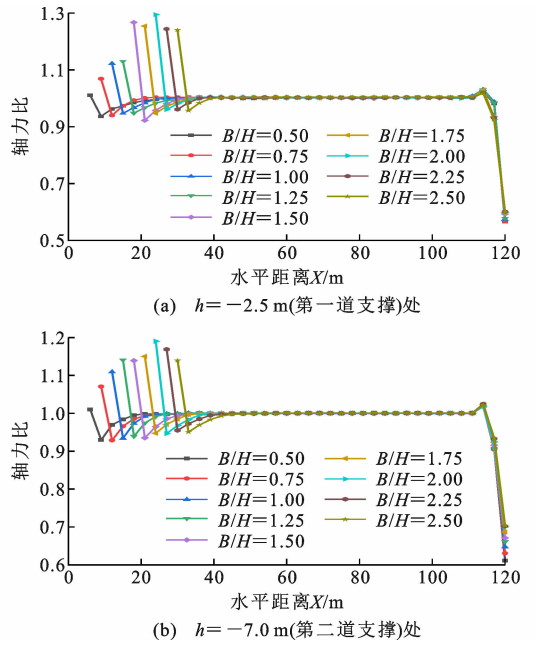


图 14 对撑轴力比的变化曲线
Fig. 14 Variation curve of axial force ratio of symmetrical brace

其余位置处的支撑,由于受阳角处转角效应的影响,随着与阳角角点距离的增加,支撑轴力的变化趋势主要表现为先逐渐增大,而后进入“长边效应”区段并趋于稳定。

为进一步研究阳角角点处支撑轴力的突变情况,分析轴力幅度随 B/H 的变化曲线,如图 15 所示。

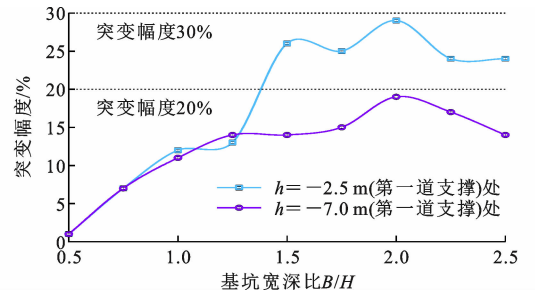


图 15 突变幅度变化曲线

Fig. 15 Variation curves of mutation amplitude

由图 15 可知:当对撑中部未设置立柱桩,即 $B/H < 1.50$ 时,随着基坑宽深比的增大,各深度下阳角角点处支撑轴力的突变幅度均出现明显的增大趋势。对于第一道支撑,当对撑中部增设立柱桩后,即 $B/H > 1.50$ 时,阳角角点处支撑轴力突变幅度出现明显增长,其原因为立柱桩在一定程度上限制了支撑的变形,阳角角点处支撑受挤压效应强于其余位置处的支撑,其轴向压力增大效果明显,突变幅度整体稳定在 $20\% \sim 30\%$ 。对于第二道支撑,受增

设立柱桩的影响较小,各 B/H 条件下其阴角角点处支撑轴力的突变幅度均小于 20%。

3.4 阴角侧支护桩水平变形分析

在深度 $h=0$ m(冠梁)、 -12 m(坑底)处沿基坑开挖长度方向的阴角侧支护桩水平变形情况如图 16 所示。对于内支撑支护体系的 L 形基坑,阴角处转角效应同样表现为阴角处空间效应以及内支撑约束的共同作用。

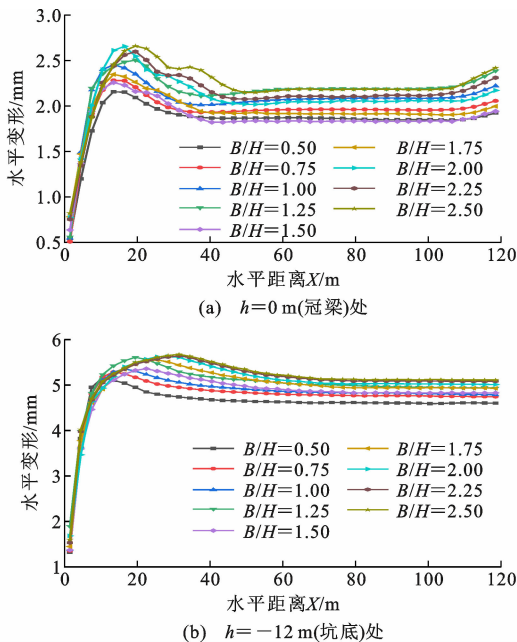


图 16 阴角侧支护桩水平变形变化曲线

Fig. 16 Variation curve of horizontal deformation of supporting piles on negative side

受阴角处转角效应的影响,各深度下阴角附近支护桩水平变形较小,随着与阴角角点距离的增加,支护桩水平变形呈明显上升趋势,在一定距离处达到最大值而后逐渐减小并趋于稳定,这是由于随着距离增加,阴角处空间效应逐渐减弱但阴角附近采用角撑的支护形式,其对支护桩水平变形的约束效果相对弱于对撑支护,导致阴角附近一定距离处出现支护桩水平变形的峰值。当增设立柱桩后($B/H > 1.50$),图 16(a)中水平变形下降段出现明显的“下凹”现象,其原因为立柱桩抑制了支撑的变形,同时由于支护形式发生变化,阳角角点处支撑对支护桩水平变形的约束效果更明显。当距离超出转角效应的影响范围后,支护桩水平变形趋于稳定,进入“长边效应”区段,且末端的支护桩受模型边界效应影响表现出略微增大的趋势,但对转角区域的模拟结果无影响。从总体来看,各深度下阴角侧支护桩水平变形趋于稳定后的变形值随 B/H 的增加同样呈现

增大的趋势。

以“长边效应”区段内阴角侧支护桩水平变形为基准,取同深度下支护桩最大水平变形值与之相比,得到该深度下支护桩最大水平变形比,不同 B/H 条件下各深度阴角侧支护桩水平变形最大位置及其最大水平变形比的变化曲线如图 17、18 所示。

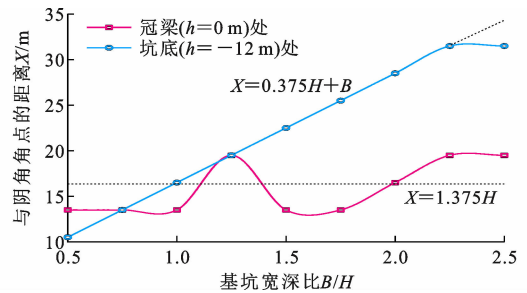


图 17 阴角侧支护桩水平变形最大位置

Fig. 17 Location of maximum horizontal deformation of supporting pile on negative side

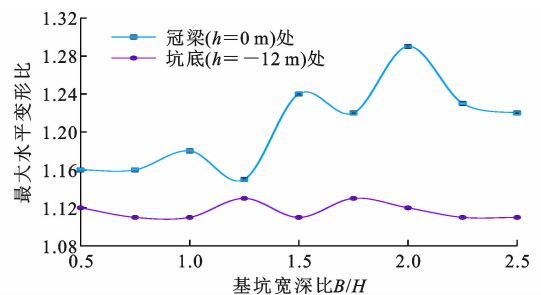


图 18 阴角侧支护桩的最大水平变形比

Fig. 18 Ratio of maximum horizontal deformation of supporting pile on negative side

由图 17 可知,支护桩冠梁($h=0$ m)处受支撑约束作用,其水平变形最大位置受基坑宽深比 B/H 的影响不明显,从总体来看,水平变形最大位置在距离阴角角点约 16.5 m 处,即 $1.375H$ 。对于坑底($h=-12$ m)处,支撑约束作用相对较弱,其水平变形最大位置与基坑宽深比 B/H 近似呈线性关系,各 B/H 条件下,水平变形最大位置约在距离阴角角点 $0.375H+B$ 处。由图 18 可知,对于冠梁($h=0$ m)处,当支撑中部未设置立柱桩时,最大水平变形比稳定在 1.16 左右。当增设立柱桩后,最大水平变形比呈现明显的增大趋势,整体处于 1.20~1.30 范围内,其原因为立柱桩在一定程度上减少了“长边效应”区段内支护桩的水平变形,但其对水平变形最大处影响相对较小。对于坑底($h=-12$ m)处,由于受增设立柱桩的影响较小,随基坑宽深比 B/H 的增加,最大水平变形比变化不明显,整体稳定在 1.12 左右。

3.5 阴角侧支护桩水平变形受影响范围分析

阴角附近支护桩水平变形的变化趋势主要受阴角处转角效应的影响,为研究阴角侧支护桩水平变形受转角效应影响的范围,同样首先确定模型的边界效应影响范围。依次取边界附近各测点,对比不同测点处支护桩沿深度方向的水平变形,如图 19 所示。以基坑开挖宽度 6 m ($B/H=0.5$) 为例,由于基坑剖面在边界附近为对称结构,故阴角侧支护桩水平变形的变化趋势与阳角侧支护桩较为接近。同样,当测点位于距离边界 10.5 m 处时,随着测点与边界的距离增加,桩体水平变形无明显变化,即可认为此时支护桩处于边界效应影响范围之外,依次取各基坑宽深比,边界效应影响范围均为 10.5 m,位于此范围外的测点在分析变形趋势时不再考虑边界效应的影响。

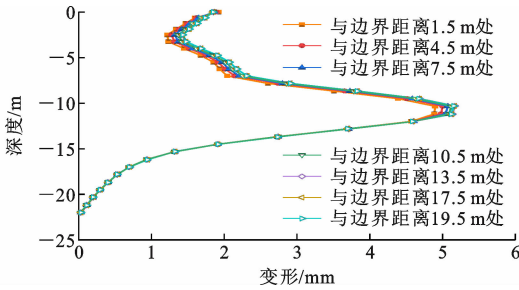


图 19 阴角侧边界附近支护桩水平变形

Fig. 19 Horizontal deformation of supporting pile near boundary on negative side

边界效应影响范围以外水平变形相对稳定的区域同样可视为“长边效应”区段,此时任取该区段内的支护桩水平变形值,以与阴角角点距离 88.5 m 处支护桩的水平变形 s_x 为例,根据公式(1)可得阴角侧支护桩在冠梁 ($h=0$ m) 和坑底 ($h=-12$ m) 处的转角效应影响系数变化曲线,如图 20 所示。

由于阴角附近采用角撑的支护形式,阴角附近支护桩水平变形受转角效应的影响,其转角效应影响系数 k 呈现先增加至最大值而后逐渐减小并趋于稳定的变化趋势。对于阴角侧支护桩,当转角效应影响系数 k 稳定处于 0.90~1.10 范围内时,认为支护桩处于“长边效应”范围内,不受阴角处转角效应的影响。距离模型边界 10.5 m 范围内,受模型边界效应的影响,影响系数 k 也呈现相应的增大趋势。当基坑开挖宽度为 6 m ($B/H=0.50$) 时,在距阴角角点 19.5 m 范围内, $h=0$ m 处转角效应影响系数 k 逐渐增加并达到最大值,随后减小至约 1.10。当与阴角角点距离大于 19.5 m 时,转角效应影响系

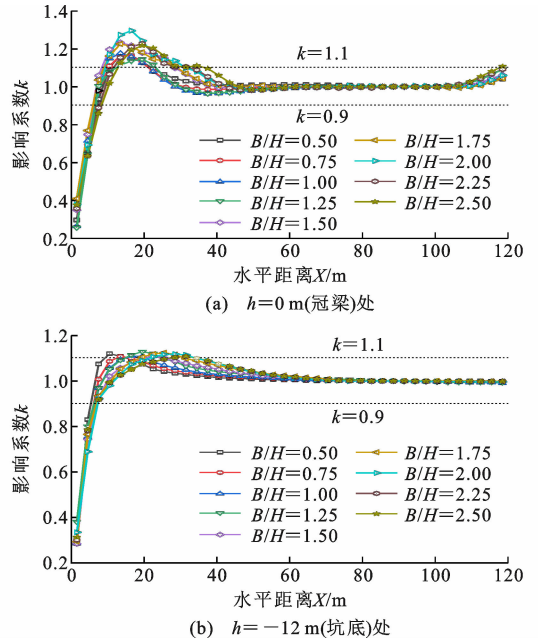


图 20 阴角侧支护桩转角效应影响系数变化曲线
Fig. 20 Variation curve of influence coefficient of corner effect of supporting pile on negative side

数 k 稳定处于 0.9~1.10 范围内,由此确定该处受转角效应影响的范围约为 19.5 m。取各测点处转角效应影响系数 k 值,确定阴角侧支护桩在冠梁 ($h=0$ m) 和坑底 ($h=-12$ m) 处转角效应的影响范围,如图 21 所示。

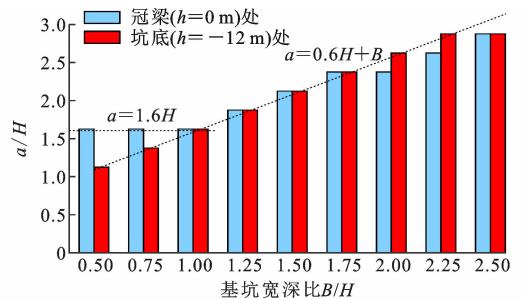


图 21 阴角侧支护桩水平变形受转角效应影响范围
Fig. 21 Range of horizontal deformation of negative side support piles affected by corner effect

由图 21 可知,冠梁 ($h=0$ m) 处在 $B/H < 1.00$ 时支护桩水平变形受阴角处转角效应影响的范围 a 约为 $1.6H$,当 $B/H > 1.00$ 时,阴角处转角效应的影响范围 a 近似满足 $0.6H+B$,表现出与阳角侧不同的变化规律。坑底 ($h=-12$ m) 处支护桩水平变形受阴角处转角效应影响的范围 a 约为 $0.6H+B$,受基坑宽深比变化影响不明显。

4 结语

(1) 由于阴阳角的相互作用,内支撑支护体系的

L形基坑转角区域会存在转角效应,导致转角附近支护桩水平变形与“长边效应”区段内支护桩的水平变形存在明显差异。

(2)转角区域支护桩浅部受基坑宽深比 B/H 影响较明显,且 $B/H=1.00$ 可作为支护桩浅部水平变形受转角效应影响的界限值。当 $B/H<1.00$ 时,阳角侧与阴角侧支护桩浅部水平变形受转角效应影响范围分别约为 $2.4H-B$ 和 $1.6H$;当 $B/H>1.00$ 时,其值分别为 $1.5H$ 和 $0.6H+B$ 。

(3)转角区域支护桩坑内开挖面位置处受基坑宽深比 B/H 影响不明显,阳角侧与阴角侧支护桩坑内开挖面位置处水平变形受转角效应影响范围分别约为 $0.6H$ 和 $0.6H+B$ 。

(4)对于内支撑支护体系的异形基坑L形转角区,受转角效应的影响,阴角附近支护桩浅部与坑内开挖面位置处的水平变形最大位置不同,设计及施工过程中对相应位置的支护结构参数优化时应采取针对性措施。

(5)对于内支撑支护体系的异形基坑L形转角区,阳角角点处对撑轴力明显大于其余位置处对撑轴力,在实际工程中要注意该处轴力监测值的变化,防止轴力突变过大导致支撑破坏,进而影响基坑稳定性。

参考文献:

References:

[1] FINNO R J, BLACKBURN J T, ROBOSKI J F. Three-dimensional effects for supported excavations in clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(1): 30-36.

[2] 杨雪强,刘祖德,何世秀.论深基坑支护的空间效应[J].岩土工程学报,1998,20(2):74-78.
YANG Xueqiang, LIU Zude, HE Shixiu. Research about spatial effect of deep pit supporting [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(2): 74-78.

[3] 刘维正,葛孟源,万家乐,等.考虑空间效应的桩锚支护深大基坑变形特性及影响因素数值分析[J].铁道科学与工程学报,2021,18(12):3188-3200.
LIU Weizheng, GE Mengyuan, WAN Jiale, et al. Numerical analysis of deformation characteristics and influencing factors of deep and large foundation pit considering spatial effect[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(12): 3188-3200.

[4] 祁瑞武,邓会元,戴国亮.巨型基坑开挖对周围环境空间效应影响分析[J].水利与建筑工程学报,2021,

19(2):178-184.

QI Ruiwu, DENG Huiyuan, DAI Guoliang. Analysis of giant foundation pit excavation influence on the spatial effect of surrounding environment[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2021, 19(2): 178-184.

- [5] 蒋希雁,张雷刚,任晓亮.基于MIDAS/GTS对悬臂式支护基坑空间效应的研究[J].建筑技术,2017,48(9):1002-1005.
JIANG Xiyuan, ZHANG Leigang, REN Xiaoliang. Research of spatial effect for excavation of cantilever retaining structure by MIDEAS/GTS[J]. Architecture Technology, 2017, 48(9): 1002-1005.
- [6] 任彦华,李军,樊继良,等.深基坑工程中空间效应的影响分析[J].地下空间与工程学报,2015,11(增1):177-182.
REN Yanhua, LI Jun, FAN Jiliang, et al. Analysis on space effect in deep foundation pit[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(S1): 177-182.
- [7] 俞建霖,龚晓南.基坑工程变形性状研究[J].土木工程学报,2002,35(4):86-90.
YU Jianlin, GONG Xiaonan. Research on deformation of foundation-pit engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(4): 86-90.
- [8] 杨晓华,陈藤,刘龙海,等.某深基坑桩锚支护结构监测分析[J].湖南工业大学学报,2013,27(5):18-23.
YANG Xiaohua, CHEN Teng, LIU Longhai, et al. Analysis on monitoring of a deep foundation pit with pile-anchor retaining structure[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2013, 27(5): 18-23.
- [9] 李连祥,张永磊,扈学波.基于PLAXIS 3D有限元软件的某坑中坑开挖影响分析[J].地下空间与工程学报,2016,12(增1):254-261,266.
LI Lianxiang, ZHANG Yonglei, HU Xuebo. Finite element analysis of a pit-in-pit excavation based on PLAXIS 3D [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(S1): 254-261, 266.
- [10] SHI X, RONG C X, CHENG H, et al. Analysis on deformation and stress characteristics of a multi-braced pit-in-pit excavation in a subway transfer station[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 8844461.
- [11] TAN Y, WEI B, DIAO Y P, et al. Spatial corner effects of long and narrow multipropped deep excavations in Shanghai soft clay[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2014, 28(4): 04014015.

- [12] 楼春晖,夏唐代,刘念武. 软土地区基坑对周边环境影响空间效应分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增1):249-252.
LOU Chunhui, XIA Tangdai, LIU Nianwu. Spatial effects of deformation due to excavation in soft clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S1):249-252.
- [13] ZHANG M, WANG X H, YANG G C, et al. Numerical investigation of the convex effect on the behavior of crossing excavations[J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2011, 12(10):747-757.
- [14] 刘念武,龚晓南,俞峰,等. 内支撑结构基坑的空间效应及影响因素分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(8):2293-2298,2306.
LIU Nianwu, GONG Xiaonan, YU Feng, et al. Analysis of spatial effects in strutted excavation and related influential factors[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(8):2293-2298,2306.
- [15] 葛晓永,王兴亚,宋林辉,等. 狭长型地铁基坑的空间效应量化研究[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(20):8614-8620.
GE Xiaoyong, WANG Xingya, SONG Linhui, et al. Quantitative study on spatial effect of elongated metro foundation pit[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(20):8614-8620.
- [16] 李佳宇,陈晨. 坑角效应对基坑周围建筑物沉降变形影响的研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(12):2238-2246.
LI Jiayu, CHEN Chen. Response of settlement and displacement of adjacent buildings of excavations to corner effect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(12):2238-2246.
- [17] 吴瑞拓,顾晓强,高广运,等. 基于HSS模型的上海地铁深基坑开挖变形分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2021, 38(6):64-70.
WU Ruituo, GU Xiaoqiang, GAO Guangyun, et al. Analysis of deep excavation deformation of Shanghai metro station using HSS model[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(6):64-70.
- [18] 李连祥,成晓阳,黄佳佳,等. 济南典型地层基坑空间效应规律研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(2):94-102.
LI Lianxiang, CHENG Xiaoyang, HUANG Jiajia, et al. Study on spatial effect of foundation pit in typical strata of Jinan[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(2):94-102.
- [19] 姚爱军,张新东. 不对称荷载对深基坑围护变形的影响[J]. 岩土力学, 2011, 32(增2):378-382,388.
YAO Aijun, ZHANG Xindong. Influence of asymmetric load on supporting deformation for deep foundation pit [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2):378-382,388.
- [20] 豆红强,王浩,吴福宝,等. 带多阳角的综合管廊垂直交叉节点深基坑的坑角效应分析[J]. 工程地质学报, 2018, 26(6):1657-1665.
DOU Hongqiang, WANG Hao, WU Fubao, et al. Corner effects of deep excavations with multi exposed corners in square crossing of utility tunnel[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(6):1657-1665.
- [21] 王晓伟,童华炜. 考虑深基坑坑角效应的支护结构变形计算[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(3):479-484.
WANG Xiaowei, TONG Huawei. Deformation calculation of supporting structure considering deep excavation pit corner[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(3):479-484.
- [22] 胡敏云,苟长飞,严昱翔,等. 基坑宽度效应对基坑稳定性影响的有限元分析[J]. 地基处理, 2020, 2(1):1-8.
HU Minyun, GOU Changfei, YAN Yuxiang, et al. Finite element analysis of the effect of foundation pit width on its stability[J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2020, 2(1):1-8.
- [23] 李涛,杨依伟,贾奥运,等. 空间效应下狭长深基坑地表三维变形预测[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(6):1101-1110.
LI Tao, YANG Yiwei, JIA Aoyun, et al. Prediction of three-dimensional surface deformation of long and narrow deep foundation pit under spatial effect[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(6):1101-1110.