

# 考虑阴角与阳角耦合作用的明挖基坑 坑角效应研究

冯威<sup>1</sup>,周坤<sup>1</sup>,李海龙<sup>1</sup>,伍星<sup>2</sup>,黄阜<sup>2\*</sup>

(1.中建五局华南建设有限公司,广东深圳 518002;2.长沙理工大学土木与环境工程学院,湖南长沙 410114)

**摘要:**目前,大部分基坑空间效应的研究只考虑基坑的阴角或阳角单独对围护结构产生的影响,对于阴角与阳角耦合作用下基坑围护结构和周边土体变形特征的研究未见报道。针对这一现状,该文基于深圳地铁13号线公明广场明挖基坑项目,构建了三维数值模型,通过分析基坑开挖过程中坑内阳角和阴角耦合作用对基坑围护结构和周边地表变形的影响,获得了地连墙侧向位移在阴角与阳角相对位置变化情况下的变形规律,并提出了阴角与阳角影响系数的计算公式。研究表明:平行于基坑长边阳角壁壁长的增加仅影响阳角所在基坑坑壁的地连墙侧向位移;阳角壁壁长的增加对于控制基坑长边的水平位移有利,但对于控制基坑短边位移不利;地连墙墙后1m处地表沉降随平行于基坑长边的阳角壁壁长增加而增加,且最大位移发生点从基坑中部向阳角所在位置方向移动。

**关键词:**明挖基坑;空间效应;坑角效应;阳角;阴角;地层变形

中图分类号:U452

文献标志码:A

## Study on Pit Corner Effect of Open-Cut Foundation Pit Considering Coupling Action of Internal and External Corners

FENG Wei<sup>1</sup>, ZHOU Kun<sup>1</sup>, LI Hailong<sup>1</sup>, WU Xing<sup>2</sup>, HUANG Fu<sup>2\*</sup>

(1. China Construction Fifth Division South China Company, Shenzhen, Guangdong 518002, China; 2. School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

**Abstract:** At present, most studies on the spatial effect of open-cut foundation pits focus only on the influence of either internal corners or external corners on the supporting structure, while the coupling effect of internal corners or external corners on the deformation characteristics of the retaining structure and surrounding soil has not been thoroughly investigated. Based on the Gongming Square open-cut foundation pit project of Shenzhen Metro Line 13, this study constructed a three-dimensional numerical model. The influence of the coupling action between the internal and external corners during excavation on the deformation of the retaining structure was analyzed. The deformation pattern of lateral displacement of the diaphragm wall under different relative positions of the internal and external corners was obtained, and a calculation formula for the influence coefficients of the internal and external corners was proposed. The results show that an increase in the wall length of the external corner parallel to the long side of the pit only affects the lateral displacement of the diaphragm wall on the pit side where the external corner is located. Increasing the wall length of the external corner is beneficial to control the horizontal displacement along the long side but is unfavorable for controlling displacement along the short side. Surface settlement at 1 m behind the diaphragm wall increases with the wall length of the external corner (parallel to the long side), and the point of maximum displacement shifts from the central part of the pit toward the location of the external corner.

**Keywords:** open-cut foundation pit; spatial effect; pit corner effect; external corner; internal corner; stratum deformation

收稿日期:2023-07-15 修回日期:2024-04-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51878074)

作者简介:冯威,男,高级工程师.E-mail: fw19860126@163.com

\*通信作者:黄阜,男,博士,教授.E-mail: hfcust@csust.edu.cn

## 0 引言

随着中国城镇化进程的加速,各大城市中不断涌现出越来越多的城市地下工程。目前大多数城市地下空间工程采用明挖法施工的浅埋结构,明挖法施工必然涉及大量的基坑开挖,而部分地下工程空间大、结构复杂,导致工程实践中出现越来越多的深大异形基坑。为了确保施工安全,这些深大异形基坑在开挖过程中,大多基于时空效应,采用分步开挖法进行施工。在分步开挖过程中,基坑内部土体会出现阴角和阳角两种形式的坑角。已有研究表明,基坑开挖过程中地连墙的最小横向和垂直变形往往出现在阴角处<sup>[1]</sup>。而阳角会导致围护结构后方土压力急剧增加,给基坑围护结构的施工安全带来风险。因此,在基坑设计和施工过程中,必须考虑阴角和阳角的坑角效应对基坑围护结构的影响。

坑角效应作为空间效应的一种表现形式,其本质是支护结构在外荷载作用下向坑内发生位移时,坑角处土体受边界约束作用而产生较小位移,导致坑角土体与坑周土体之间发生相对变形<sup>[2]</sup>。实际工程中,坑角效应表现为以基坑坑角为拱脚、墙后土体呈弧线状态的土拱效应<sup>[3]</sup>。理论计算是研究坑角效应的重要方法之一,许多学者已开展了相关研究。Tan等<sup>[4]</sup>对现场监测数据进行回归分析,建立了考虑坑角效应的基坑开挖诱发邻近管道变形的经验计算公式;李涛等<sup>[5]</sup>在现有地表沉降二维平面计算方法的基础上,引入 $k$ 值定量描述空间效应影响,推导出空间效应影响下狭长深基坑周围地表沉降的三维预测方法;杨雪强等<sup>[6]</sup>基于坑壁土体的三维破坏模式,结合极限分析理论和极限平衡理论,提出了考虑空间效应的土压力计算公式;雷明锋等<sup>[7]</sup>在杨雪强研究的基础上引入等效内摩擦角,将成层黏性土等效为均质无黏性土,进一步提出了黏性土层中长大深基坑的空间效应系数简化计算公式。

由于实际工程中基坑形状复杂,理论计算不能充分考虑阳角效应的影响<sup>[8]</sup>。为此,许多学者结合数值模拟、模型试验和现场监测等方法对该问题展开研究<sup>[9-12]</sup>。范东岭<sup>[13]</sup>基于某深基坑实测数据,将阴角与阳角位置处水平位移的比值作为阳角坑角效应的衡量标准,认为阳角坑角效应对基坑变形具有不利影响;贾敏才等<sup>[14]</sup>采用数值模拟与室内模型试验相结合的方法,研究了井结构基坑墙后土压力的空间分布规律,并分析墙后土压力坑角效应对围护结构

内力的影响;Szepesházi等<sup>[15]</sup>利用三维有限元软件,研究了基坑阳角附近围护结构的力学特征,发现阳角处存在显著的弯矩集中现象,且在开挖深度底部的1/3处产生极限弯矩;韩鹏程<sup>[16]</sup>以南通市某异形基坑工程为背景,对异形基坑变形规律及不同阳角角度对应的坑角效应进行了分析。研究表明:土压力与坑角效应的影响范围随着坑角角度的增大而减小,坑角效应的影响范围为 $1.05H$ ( $H$ 为基坑深度);高幸等<sup>[17]</sup>采用现场实测数据与有限差分软件相结合的方法研究了基坑阴角角度与空间效应影响系数的关系,并推导出空间效应影响系数、坑角距离和基坑角度之间的函数关系式。综上可知,目前已有研究主要关注基坑开挖过程中阴角或阳角各自对基坑围护结构的受力和变形的影响,而较少考虑阴角与阳角的耦合作用对围护结构和坑周土体变形的影响。

针对这一研究现状,本文依托深圳地铁13号线二期公明广场站新建基坑零距离下穿既有6号线工程,构建了新建基坑零距离下穿既有6号线的三维数值模型。通过分析基坑开挖过程中坑内阳角和阴角耦合作用对围护结构和坑周土体变形的影响,提出量化阴角与阳角耦合作用的分析方法,揭示地连墙侧向位移在阴角与阳角相对位置变化情况下的变形规律。该研究成果对基坑支护结构的设计优化和施工安全评估具有重要工程实践价值。

## 1 基坑开挖过程中阴角与阳角耦合作用情况下坑角效应分析

### 1.1 数值模型

公明广场站位于深圳市长春中路与松白路十字路口,沿长春中路南北向敷设。土层主要由素填土、中粗砂、粉质黏土、全风化花岗岩、强风化花岗岩和中风化花岗岩构成。Huang等<sup>[18]</sup>研究表明:Plastic-hardening本构模型可以根据加载和卸载条件采用不同的弹性模量值,比Mohr-Coulomb本构模型更接近塑性理论。为了更好地模拟基坑坑底卸荷回弹现象,本文模型也采用Plastic-hardening本构模型,无坑周荷载与坑底加固。

公明广场站地质参数如表1所示。基坑长 $L=20$  m,宽 $B=10$  m,深 $H=24$  m。为消除尺寸效应,数值模型整体长、宽、高为:100 m、50 m、35 m。基坑平面图如图1所示,其中阴影区域为坑外土体。图1中 $\theta_1$ 为基坑阴角; $\theta_2$ 为基坑阳角; $L_0$ 、 $B_0$ 分别为阳角壁长边与短边长度; $L$ 、 $B$ 分别为基坑的长边与短边长度;

表1 公明广场站地质参数  
Table 1 Geological parameters of Gongming Square Station

类别	土体参数							
	$H/m$	$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	$E_{50}^{ref}/MPa$	$E_{oed}^{ref}/MPa$	$E_{ur}^{ref}/MPa$	$\mu$	$\varphi/(^\circ)$	$c/MPa$
素填土	1	17.5	5.0	5.0	20	0.30	14	23.7
中粗砂	3	20.6	25.0	25.0	80	0.27	25	8.0
粉质黏土	2	18.9	2.6	2.6	10	0.31	13	20.0
全风化花岗岩	5	19.5	50.0	50.0	150	0.27	24	0.5
强风化花岗岩	8	24.0	80.0	80.0	180	0.30	30	0.5
中风化花岗岩	5	26.0	100.0	100.0	300	0.30	30	0.5

注: $E_{50}^{ref}$ 为三轴固结排水剪切试验割线模量; $E_{oed}^{ref}$ 为固结试验切线模量; $E_{ur}^{ref}$ 为三轴固结排水卸载再加载的参考割线模量。

$\alpha_L$  和  $\alpha_B$  分别为阴角、阳角的位置系数; $M_1 \sim M_5$  为研究点。

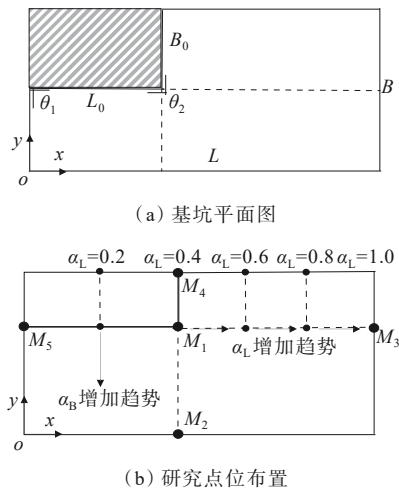


图1 基坑阴角与阳角平面示意图

Figure 1 Schematic plan view of internal and external corners of foundation pit

### 1.2 阳角对阴角的影响分析方案

根据坑角处空间效应对基坑围护结构的影响,可将坑角效应分为阴角坑角效应与阳角坑角效应。图2为阴角处土体潜在滑裂面与土拱效应示意图。当基坑坑壁较长时,土体滑裂面与平面应变状态相似,呈直线状态。但现实中基坑长度是有限的,基坑中部土体变形较大,而基坑坑角处土体受边界的约束,变形相对较小。由于土体的不均匀沉降满足以基坑坑壁两侧坑角为拱脚的土拱效应形成条件,因此在基坑阴角壁后方形成了土拱效应<sup>[19]</sup>。在发生阴角坑角效应的情况下,地连墙侧向变形最小值出现在阴角处,对基坑围护结构具有保护作用。图3为阳角处土体潜在滑裂面示意图,与阴角相比,阳角墙底位置处存在应力集中现象,因此阳角坑角效应对围护结构变形相对不利。赵乃志等<sup>[20]</sup>指出,阳角坑角效应的主要影响范围与对边距离(即与阴角的相对

位置)有关;王芳等<sup>[21]</sup>根据阳角位置,阳角壁壁长与基坑几何尺寸的关系将阳角分为3类,如图4所示。当阳角与阴角相连且较为接近基坑另一侧壁时为a类,当阳角与阴角同时存在于基坑中部时为b类,当阳角位于基坑坑角处时为c类。图中阴影区域为基坑外部土体。根据公明广场站的实际工程情况构建的三维数值模型如图5所示。按照上述分类,本文研究对象为c类阳角。阳角位置可通过图1中 $M_1(L_0, B-B_0)$ 坐标确定。为便于研究阳角与阴角相互作用下围护结构的变形特征,定义阴角与阳角位置系数 $\alpha_L$ 和 $\alpha_B$ ,其计算公式如下:

$$\alpha_L = \frac{L_0}{L}, \alpha_B = \frac{B_0}{B} \quad (1)$$

当 $\alpha$ 为0或1时,阳角壁长边长度 $L_0$ 为零或等于基坑长边长度,因此基坑中不存在阳角,也没有阴角与阳角的相互作用。随着 $\alpha$ 值的增大,阳角壁逐渐增长,阳角与基坑壁逐渐靠近。为研究基坑阳角与阴角耦合作用下基坑围护结构与地表沉降的变形特征,根据位置系数 $\alpha$ 值设置3组工况 $A_i, B_i, C_i$ 进行数值模拟,3种工况对应的具体 $\alpha$ 值如表2所示。

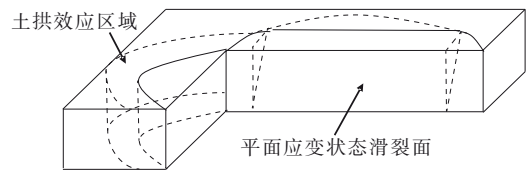


图2 阴角潜在滑裂面和土拱效应图

Figure 2 Potential slip surface and soil arching effect at internal corner

## 2 结果分析

### 2.1 阳角与阴角位移影响系数

基坑阳角与阴角位置的变化对基坑长边与短边上阳角对应点[图1(b)中 $M_2$ 和 $M_3$ ]的变形特征有重要影响。因此,本文利用工况 $A_1$ 与 $A_3$ 对比了有无阳

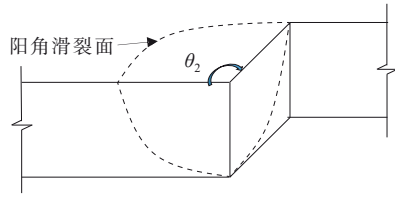


图3 阳角潜在滑裂面示意图

Figure 3 Potential slip surface at external corner

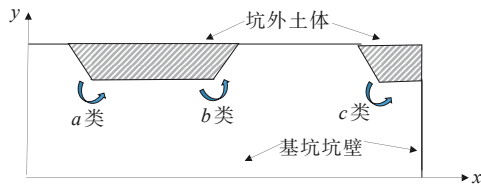


图4 阳角分类图

Figure 4 Classification of external corners

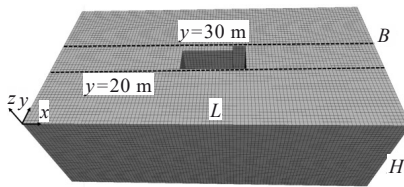


图5 三维数值模型

Figure 5 Three-dimensional numerical model

表2 阳角与阴角相互作用研究方案

Table 2 Study scheme for interaction between internal and external corners

序号	$\alpha_L(\alpha_B=0.2)$	序号	$\alpha_B(\alpha_L=0.2)$	序号	$\alpha_L, \alpha_B$
A <sub>1</sub>	0	B <sub>1</sub>	0	C <sub>1</sub>	0,0
A <sub>2</sub>	0.2	B <sub>2</sub>	0.2	C <sub>2</sub>	0.1,0.2
A <sub>3</sub>	0.4	B <sub>3</sub>	0.4	C <sub>3</sub>	0.2,0.4
A <sub>4</sub>	0.6	B <sub>4</sub>	0.6	C <sub>4</sub>	0.3,0.6
A <sub>5</sub>	0.8	B <sub>5</sub>	0.8	C <sub>5</sub>	0.4,0.8
A <sub>6</sub>	1.0	B <sub>6</sub>	1.0	C <sub>6</sub>	0.5,1.0

角情况下,基坑长边地连墙侧向的位移,如图6所示。图中的  $y$  对应图5整体坐标系中的取值,  $y=20\text{ m}$  为不存在阳角的基坑长边所在平面,  $y=30\text{ m}$  为存在阳角的基坑长边所在平面。

从图6可以看出:基坑阳角仅会影响  $y=30\text{ m}$  所在基坑坑壁的侧向位移,而对不含阳角的  $y=20\text{ m}$  所在坑壁变形几乎没有影响,因此可将  $y=20\text{ m}$  时不含阳角的坑壁位移作为阴角与阳角相对位置变化情况下阳角所在地连墙位移变化的衡量标准。当不存在阳角时,矩形基坑变形是对称的,此时  $M_2$ 、 $M_3$  分别与  $M_4$ 、 $M_5$  位移相等,当存在阳角时,阳角  $M_1$  处  $x$ 、 $y$  方向

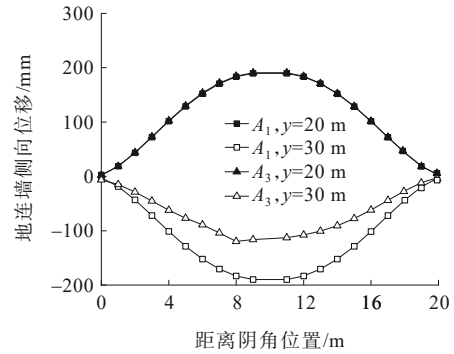


图6 有无阳角时地连墙位移对比图

Figure 6 Comparison of diaphragm wall displacement with and without external corners

的位移分别与  $M_5$  沿  $x$  方向、 $M_3$  沿  $y$  方向的位移相等,因此可用阳角处的位移来表示存在阳角情况下地连墙的变形。上述研究表明:将阳角与阳角对应点的位移比值作为衡量阳角坑角效应的标准更为合理。因此,本文定义了阴角与阳角位移影响系数  $\lambda$ ,以研究基坑阳角与阴角位置变化对坑角效应的影响,计算位置点示意图如图1(b)内的虚线所示。 $\lambda$  的计算公式如下:

$$\lambda_x = \frac{M_1^x}{M_2^x}, \lambda_y = \frac{M_1^y}{M_2^y} \quad (2)$$

式中:  $M_1^x$ 、 $M_2^x$  为  $M_1$  位置处沿  $x$  方向的最大位移;  $M_1^y$ 、 $M_2^y$  为  $M_1$  位置处沿  $y$  方向的最大位移;  $\lambda_x$  为沿  $x$  方向的位移影响系数;  $\lambda_y$  为沿  $y$  方向的位移影响系数。当  $\lambda_x = 1$  时,阳角与阳角对应点沿  $x$  方向上的最大位移相等,说明阳角对存在阳角地连墙的位移没有影响,此时坑壁变形只受阴角坑角效应的影响;当  $\lambda_x > 1$  时,阳角处沿  $x$  方向上最大位移值大于阳角对应点的最大位移值,表示阳角的存在加剧了坑角土体与坑周土体之间的不均匀沉降,阳角坑角效应对围护结构沿  $x$  方向上的变形产生了不利影响;当  $\lambda_x < 1$  时,阳角处沿  $x$  方向上最大位移小于阳角对应点位移,说明阳角的存在约束了坑周土体的位移和变形,加强了阴角坑角效应对  $x$  方向上土体变形的限制,此时阳角坑角效应减小了围护结构在  $x$  方向上的变形。 $\lambda_y$  可以量化阳角坑角效应对围护结构沿  $y$  方向变形的影响程度。

### 2.2 阳角位置变化对于地连墙侧向位移的影响

图7为基坑短边地连墙侧向位移随位置影响系数  $\alpha_L$  增加而变化的对比图,  $\alpha_L$  变化趋势见图1(b)。

从图7可以看出:随着阳角壁壁长  $L_0$  的增加,基坑短边中点水平位移从  $12\text{ mm}$  增加到  $13.8\text{ mm}$ ;阴角位置  $\theta_1$  处的水平位移从  $2\text{ mm}$  增加到  $17\text{ mm}$ 。这是由

于阳角壁壁长  $L_0$  的增加导致墙后土压力增大,造成地连墙逐渐向坑内倾斜。

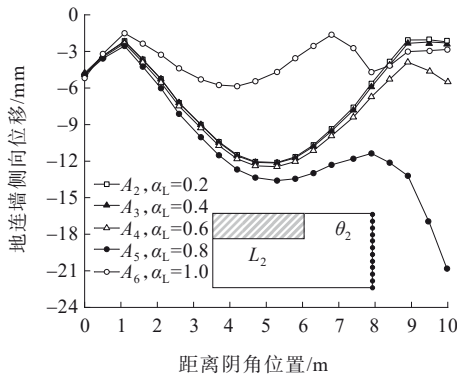


图7 地连墙侧向位移图

Figure 7 Lateral displacement of diaphragm wall

图8为阳角  $M_1$  处位移影响系数  $\lambda$  随着位置影响系数  $\alpha_L$  增加的变化规律。

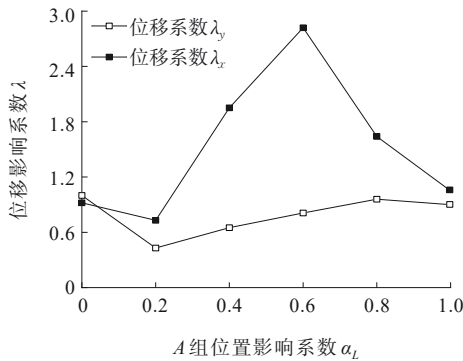


图8 A组位移影响系数对比图

Figure 8 Comparison of displacement influence coefficients for group A

从图8可以看出:随着  $\alpha_L$  的增加,  $\lambda_x$  从1减小后逐渐增加至2.8,这说明当  $\alpha_L$  较小时阳角  $M_1$  处沿  $x$  方向的位移小于阳角对应点  $M_2$  的位移。当阳角壁壁长  $L_0$  接近基坑长度60%时达到最大值,此时对地连墙  $x$  方向的不利影响最为明显。  $\lambda_y$  随着  $L_0$  的增加始终小于1,说明沿  $y$  方向上阳角处位移始终小于阳角对应点的位移,此时阳角坑角效应对围护结构有利。

图9为阳角  $M_1$  处  $\lambda$  随  $\alpha_B$  变化规律图。

从图9可以看出:当  $\alpha_B > 0.55$  (即  $B_0 > 5.5$  m) 时,阳角  $M_1$  处沿  $x$  方向的位移大于阳角对应点的位移,对围护结构变形不利。其余情况下  $\lambda$  均小于1,有利于阴角坑角效应对基坑围护结构的作用。

图10为  $\alpha_B = \alpha_L$  等速增加情况下,阳角  $M_1$  处位移影响系数  $\lambda$  的变化图,其阳角坑角效应的作用规律与

图9几乎一致。

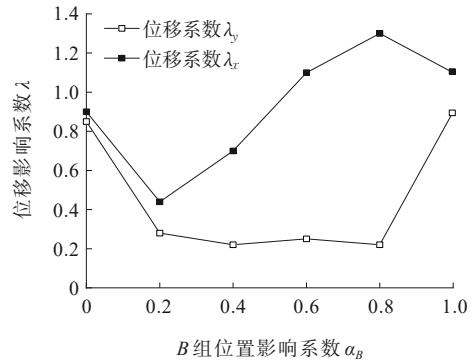


图9 B组位移影响系数对比图

Figure 9 Comparison of displacement influence coefficients for group B

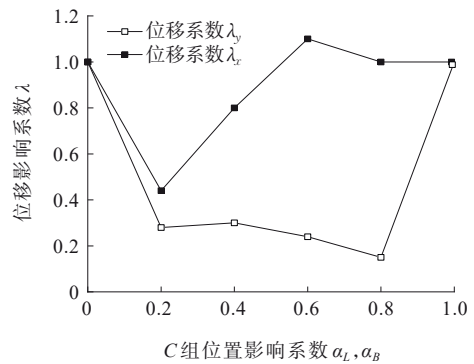
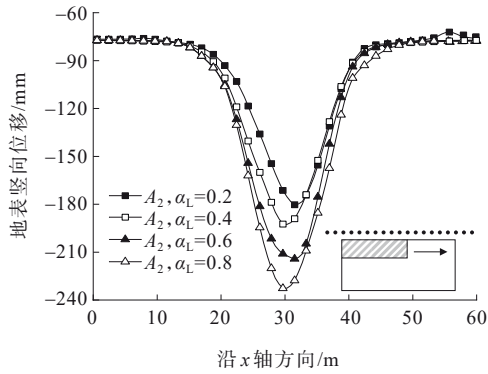


图10 C组位移影响系数对比图

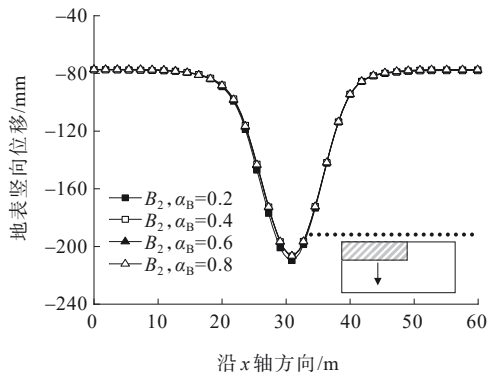
Figure 10 Comparison of displacement influence coefficients for group C

### 2.3 阳角位置变化对于地表竖向位移的影响

基坑开挖对坑外土体的影响一般限定在一个范围内<sup>[22]</sup>。丁勇春等<sup>[23]</sup>提出以基坑开挖深度  $H$  为判别标准,主要影响区为  $0 \sim 0.75H$ 。因此,本文将阳角所在地连墙墙后1m位置处作为地表沉降的标志点进行研究。从图11(a)可以看出:随着位置影响系数  $\alpha_L$  的增大,地表沉降量明显增大,且最大位移发生点逐渐从坑壁中部向阳角壁增长的反方向移动。这是阳角的存在导致地连墙后土体发生不均匀沉降,阴角与阳角距离越近,阳角坑角效应对地表竖向位移的不利影响越明显,阳角抑制了阴角坑角效应对基坑围护结构的正面作用。图11(b)为地表沉降随  $\alpha_B$  增大的变化图。从图11(b)可以看出:地表沉降几乎不受平行于基坑短边方向阳角壁壁长增加的影响。此时墙后1m处地表竖向位移不受阳角坑角效应的影响。



(a)  $L_0$ 对竖向位移的影响



(b)  $B_0$ 对竖向位移的影响

图11 地表竖向位移对比图

Figure 11 Comparison of vertical surface displacement

### 3 工程实例分析

公明广场站为深圳市城市轨道交通13号线北延线第8座车站,采用明挖顺筑法施工。该基坑紧邻并下穿既有6号线区间隧道,总体长57 m,标准段宽20 m,盾构扩大段宽27 m,属于深大异型基坑。采用地连墙加内支撑的支护形式,其中第1道和第3道为钢支撑,第2道和第4道为混凝土支撑。该车站地质参数见表1。基坑及周边环境监测点布置见图12。

图12中三角形表示地表沉降监测点,圆形表示地连墙侧向位移监测点。本文依托该工程和地质参数构建了公明广场站的三维数值模型。通过模拟实际工况的开挖步骤,获得了基坑围护结构变形数据,并将该模型数据与基坑监测数据进行了对比分析。在此基础上,探讨该工程实例中阳角位置对基坑长边地连墙位移的影响规律,以及在阳角位置确定时,基坑长边地连墙墙后1 m位置处地表沉降随基坑开挖深度的变化。三维模型如图13所示。

图14为地连墙DLQ-6监测点处水平位移的数值模拟结果与实测数据对比图。

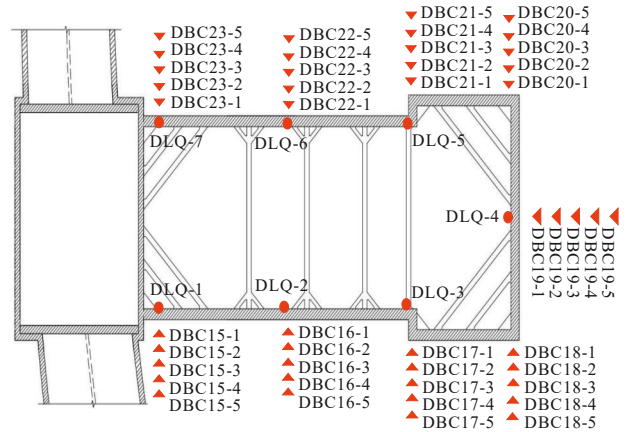


图12 基坑平面图与监测点布置图

Figure 12 Plan of foundation pit and layout of monitoring points

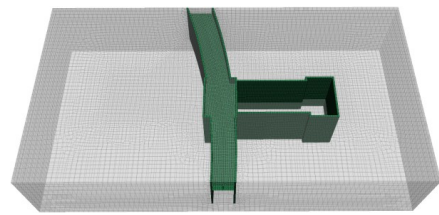


图13 公明广场站三维数值模型图

Figure 13 Three-dimensional numerical model of Gongming Square Station

从图14可以看出:该监测点水平位移变化规律的数值模拟结果与监测数据基本一致,说明本文构建的数值模型能够反映该基坑工程中阳角位置处的变形特征。由式(1)、(2)可知,在该项目中基坑的阳角与阴角位置系数 $\alpha_L=0.74, \alpha_B=0.1$ 。

图15为位移影响系数随开挖深度的变化图。

从图15可以看出:当数值模型中的位置系数相同时,阳角对基坑x方向的变形产生不利影响,而实际工程中阳角位置处x方向侧向位移很小。发生这一现象的主要原因是现场施工时采用了两道预应力钢支撑,约束了地连墙的侧向变形。

当 $\alpha_L=0.74, \alpha_B=0.1$ 时的数值模型中阳角所在长边地连墙墙后1 m位置处地表竖向位移随开挖步骤变化图如图16(a)所示。开挖步骤1~4分别对应基坑开挖深度为3 m、10 m、16 m和24 m。

由图16(a)可知:地表最大沉降点位置随着开挖深度的加深而逐渐向阳角方向移动,与实际工况下图16(b)所示的地表沉降数据规律一致。

### 4 结论

本研究依托深圳地铁13号线公明广场站基坑工

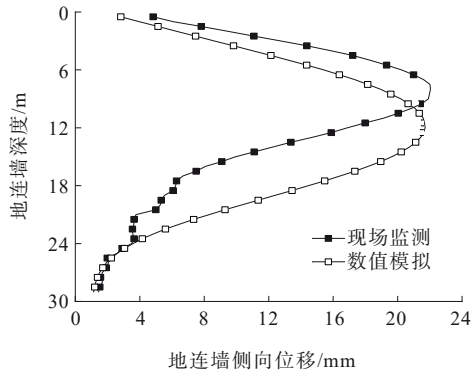


图14 地连墙侧向位移现场监测数据与数值模拟对比图  
Figure 14 Comparison of field-monitored and simulated lateral displacement of diaphragm wall

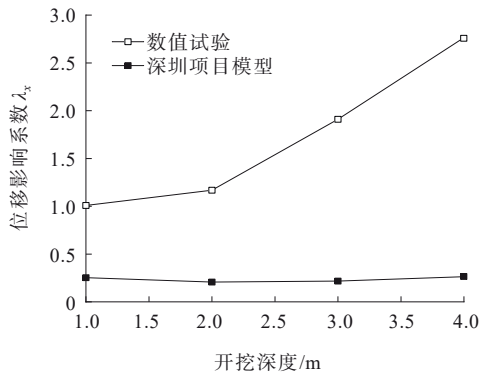


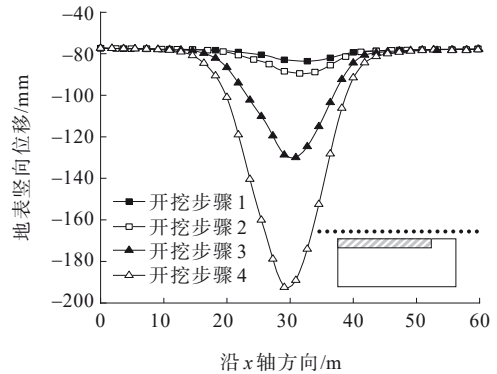
图15 位移影响系数  $\lambda_x$  随开挖深度的变化图  
Figure 15 Variation of displacement influence coefficient  $\lambda_x$  with excavation depth

程构建了三维数值模型。通过对比模拟结果与监测数据,分析了地连墙侧向位移随阳角壁壁长变化的变形特性和阳角对基坑变形以及地表沉降的影响规律,主要研究结论如下:

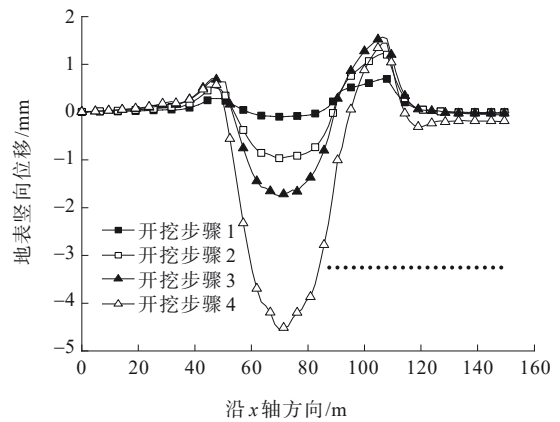
(1) 平行于基坑长边方向的阳角壁壁长的变化仅影响阳角所在基坑坑壁的地连墙侧向位移,随着阳角与阴角距离的减小,坑壁中部位置和阴角处位移逐渐增加。当距离小于8 m时,阴角处位移增长速率急剧增大。

(2) 增加阳角壁壁长对控制基坑长边的水平位移有利,但会削弱基坑短边方向阴角坑角效应的保护作用,对控制基坑短边水平位移不利。当与基坑长边方向平行的阳角壁接近基坑长边60%时,该不利影响最为显著,此时,最大位移为坑壁上阳角对应点位移的2.8倍。

(3) 地连墙墙后1 m处地表竖向位移随平行于基坑长边的阳角壁壁长的增加而逐渐增加,且最大位移发生点从基坑中部逐渐向阳角所在位置方向移



(a) 当参数  $\alpha_L=0.74, \alpha_B=0.1$  时模型的地表竖向位移



(b) 基于实际工程数值模型的地表竖向位移

图16 墙后1 m处地表沉降随开挖步骤变化规律  
Figure 16 Variation of surface settlement at 1 m behind diaphragm wall with excavation stages

动。地表沉降几乎不受与基坑短壁方向平行的阳角壁壁长增加的影响。

参考文献:

References:

[1] LIU L L, WU R G, CONGRESS S S C, et al. Design optimization of the soil nail wall-retaining pile-anchor cable supporting system in a large-scale deep foundation pit[J].Acta Geotechnica,2021,16(7):2251-2274.

[2] 李大鹏,唐德高,闫凤国,等.深基坑空间效应机理及考虑其影响的土应力研究[J].浙江大学学报(工学版),2014,48(9):1632-1639,1720.  
LI Dapeng, TANG Degao, YAN Fengguo, et al. Mechanics of deep excavation's spatial effect and soil pressure calculation method considering its influence[J].Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(9): 1632-1639,1720.

[3] 贾海莉,王成华,李江洪.关于土拱效应的几个问题[J].西南交通大学学报,2003,38(4):398-402.  
JIA Haili, WANG Chenghua, LI Jianghong. Discussion on some issues in theory of soil arch[J].Journal of Southwest

- Jiaotong University,2003,38(4):398-402.
- [4] TAN Y,LU Y.Responses of shallowly buried pipelines to adjacent deep excavations in Shanghai soft ground[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2018,9(2):05018002.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 雷明锋,彭立敏,施成华,等.长大深基坑施工空间效应研究[J].岩土力学,2010,31(5):1579-1584,1596.  
LEI Mingfeng,PENG Limin,SHI Chenghua,et al.Research on construction spatial effects in large-long-deep foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1579-1584,1596.
- [8] 赵朋.基坑开挖对零距离下卧盾构隧道的影响[J].中外公路,2023,43(6):253-260.  
ZHAO Peng. Influence of foundation pit excavation on zero distance underground shield tunnel[J]. Journal of China & Foreign Highway,2023,43(6):253-260.
- [9] 周中,鄢海涛,李守文,等.高层建筑紧邻深大基坑开挖变形分析[J].现代隧道技术,2022,59(增刊1):1102-1110.  
ZHOU Zhong,YAN Haitao,LI Shouwen,et al.Deformation analysis of high-rise building adjacent to deep and large foundation pit excavation[J]. Modern Tunnelling Technology,2022,59(sup 1):1102-1110.
- [10] 齐朋,张宇奇,王宁.深基坑围护结构横向位移监测和数值模拟分析[J].中外公路,2022,42(1):38-42.  
QI Peng,ZHANG Yuqi,WANG Ning.Lateral displacement monitoring and numerical simulation analysis for retaining system of deep foundation pit[J]. Journal of China & Foreign Highway,2022,42(1):38-42.
- [11] 陈国雄,贺佐跃,黄仕平.考虑开挖宽度效应的基坑受力变形分析[J].中外公路,2022,42(2):1-6.  
CHEN Guoxiong, HE Zuoyue, HUANG Shiping. Analysis of force and deformation of foundation pit considering effect of excavation width[J].Journal of China & Foreign Highway,2022,42(2):1-6.
- [12] 肖罗发,邱红胜,朱万鑫,等.邻近建筑物荷载对深基坑坑角效应分析[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2021,45(5):959-964,970.  
XIAO Luofa, QIU Hongsheng, ZHU Wanxin, et al. Analysis of the effect of adjacent building load on pit angle effect[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering),2021,45(5):959-964,970.
- [13] 范东岭.基于坑角效应的深基坑开挖对围护结构变形的影响研究[D].成都:西南石油大学,2016.  
FAN Dongling.Study on the influence of deep foundation pit excavation on the deformation of retaining structure based on pit angle effect[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University,2016.
- [14] 贾敏才,杨修晗,叶建忠.小尺度井结构基坑墙后土压力的坑角效应[J].哈尔滨工业大学学报,2016,48(12):95-102.  
JIA Mincai,YANG Xiuhuan, YE Jianzhong. Corner effect of active earth pressure for small-sized excavation[J].Journal of Harbin Institute of Technology,2016,48(12):95-102.
- [15] SZEPESHÁZI A, MAHLER A, MÓCZÁR B. Three dimensional finite element analysis of deep excavations' concave corners[J]. Periodica Polytechnica Civil Engineering,2016:371-378.
- [16] 韩鹏程.地铁站异形深基坑变形规律及坑角效应研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2020.  
HAN Pengcheng. Study on deformation law and pit angle effect of special-shaped deep foundation pit in subway station [D].Shijiazhuang:Shijiazhuang Tiedao University,2020.
- [17] 高幸,贾金青,朱彦鹏,等.基坑坑角角度对空间效应影响研究[J].水利与建筑工程学报,2019,17(6):36-40.  
GAO Xing, JIA Jinqing, ZHU Yanpeng, et al. Influences of foundation pit angle on spatial effects[J].Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2019, 17(6): 36-40.
- [18] HUANG K,SUN Y W,YANG J S,et al.Three-dimensional displacement characteristics of adjacent pile induced by shield tunneling under influence of multiple factors[J]. Journal of Central South University, 2022, 29(5): 1597-1615.
- [19] LI Y D,WANG C X,SUN Y,et al.Analysis of corner effect of diaphragm wall of special-shaped foundation pit in complex stratum[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 794756.
- [20] 赵乃志,陈桂凤,高文韬,等.不同开挖工况下软土基坑阳角壁变形及坑角效应[J].四川建材,2020,46(4):57-58.  
ZHAO Naizhi, CHEN Guifeng, GAO Wentao, et al. Research of the deformation of positive corner wall for soft soil excavation and corner effects under different excavation conditions[J].Sichuan Building Materials,2020, 46(4):57-58.
- [21] 王芳,郭红仙.带阳角基坑空间效应的三维数值分析[J].铁道建筑,2006,46(12):69-72.  
WANG Fang, GUO Hongxian. Three-dimensional numerical analysis of spatial effect of foundation pit with positive angle[J].Railway Engineering,2006,46(12):69-72.
- [22] OU C Y,HSIEH P G. A simplified method for predicting ground settlement profiles induced by excavation in soft clay[J].Computers and Geotechnics,2011,38(8):987-997.
- [23] 丁勇春,王建华,徐斌.基于FLAC<sup>3D</sup>的基坑开挖与支护三维数值分析[J].上海交通大学学报,2009,43(6):976-980.  
DING Yongchun, WANG Jianhua, XU Bin. Three-dimensional numerical analysis of braced excavation based on FLAC<sup>3D</sup>[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University,2009,43(6):976-980.