

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.06.021

# 邻近水平推力斜拱桩基对深基坑围护结构变形影响研究

缪昇昊<sup>1</sup>, 刘成禹<sup>1,2</sup>

(1. 福州大学 环境与资源学院, 福建 福州 350116;

2. 福州大学 地质工程福建省高校工程研究中心, 福建 福州 350116)

**摘要:** 为分析邻近水平推力斜拱桩基对深基坑围护结构变形的影响, 采用 MIDAS/GTS 岩土有限元软件, 重点分析了基坑与斜拱桩基承台边缘净距和斜拱加载时基坑开挖深度对深基坑围护桩变形的影响规律。数值分析结果表明, 随着基坑与斜拱桩基承台边缘净距的增大, 围护桩最大水平位移逐渐减小, 水平位移最大值位置的深度逐渐增大, 斜拱桩基对围护桩水平位移的影响深度逐渐减小; 随着斜拱加载时基坑开挖深度的增大, 围护桩最大水平位移逐渐减小, 斜拱加载引起的围护桩水平位移增量最大值位置的深度也逐渐减小。

**关键词:** 深基坑; 斜拱桩基; 水平推力; 水平位移

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)06-0111-06

## Influences of Adjacent Horizontal Thrust Inclined Arch Pile Foundation on Deformation of Deep Foundation Pit Retaining Structure

MIAO Shenghao<sup>1</sup>, LIU Chengyu<sup>1,2</sup>

(1. College of Environment and Recourses, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China;

2. Fujian Provincial University, Engineering Research Center of Geological Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China)

**Abstract:** In order to analyze the influences of adjacent horizontal thrust inclined arch pile foundation on deep foundation pit retaining structure deformation, the net distance between the foundation pit and the edge of the inclined arch pile foundation and the depth of excavation during inclined arch loading are considered to study the influence on the retaining pile deformation by using Midas GTS finite element software. The results of numerical analysis show that the increase of the net distance between the foundation pit and the edge of the inclined arch pile foundation, the maximum horizontal displacement of retaining pile is gradually decreased, the depth of the maximum horizontal displacement of the retaining pile is gradually reduced, the influence depth of inclined arch pile foundation on horizontal displacement of retaining pile reduces gradually. With the increase of the depth of foundation pit excavation, the maximum horizontal displacement of foundation pit is gradually decreased, the depth of the maximum of horizontal displacement increment caused by inclined arch loading also decreases gradually.

**Keywords:** deep foundation pit; inclined arch pile foundation; horizontal thrust; horizontal displacement

随着基础设施的大规模建设, 城市中出现了越来越多深基坑工程, 这样容易造成深基坑与城市中其他建(构)筑物桩基础同时施工的现象。在深基坑

开挖过程中, 不仅要有效控制基坑开挖引起的周围地层移动以保护周围建(构)筑桩基, 而且要保证基坑邻近建(构)筑物桩基施工不能影响基坑自身的安

收稿日期: 2018-08-03

修稿日期: 2018-08-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272300)

作者简介: 缪昇昊(1993—), 男, 福建宁德人, 硕士研究生, 研究方向为地质工程。E-mail: 895718980@qq.com

通讯作者: 刘成禹(1970—), 男, 云南富源人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事工程地质、隧道与地下工程方面的研究工作。

E-mail: Liuchengyuphd@163.com

全与稳定<sup>[1-2]</sup>。

邻近建(构)筑物桩基在施工过程中不仅要承受上部结构产生的竖向荷载,同时可能要承受较大的水平荷载,例如机场航站楼斜拱桩基就要承受上部斜拱产生的巨大水平推力。斜拱桩基产生较大的水平推力会使上层土体产生横向运动,使土体产生一定的附加应力场<sup>[3-5]</sup>。因此当深基坑施工时,如果附近存在机场航站楼斜拱桩基同时施工,斜拱桩基产生的大水平推力会对深基坑围护结构的变形产生一定的影响。

目前,国内外对于基坑开挖与邻近桩基施工的相互影响问题的研究主要集中在基坑开挖对邻近桩基的影响,如 Polous 等<sup>[6-7]</sup>运用有限元和边界元耦合方法研究不同支护形式基坑开挖引起的土体侧向移动对邻近桩基的影响。Finno 等<sup>[8]</sup>采用数值分析和监测资料相结合的方法研究基坑开挖对邻近群桩基础的影响。Leung 等<sup>[9]</sup>和 Ong 等<sup>[10]</sup>利用离心模型试验分别研究了不同土层中悬臂支护基坑开挖对邻近群桩的影响。郑刚等<sup>[11]</sup>用数值计算并结合现场基坑监测数据的方法分析了不同影响因素下基坑开挖对桩基的影响。周勇<sup>[12]</sup>采用 PLAXIS-3D 有限元软件分析了明挖地铁站深基坑对邻近建筑物桩基变形和轴力的影响。黄茂松<sup>[13]</sup>和张爱军<sup>[14]</sup>采用两阶段分析法分析基坑开挖对邻近桩基的影响。魏丽敏等<sup>[15]</sup>采用现场原型试验和数值模拟相结合的方法研究了基坑深度、宽度和间距对邻近桥梁桩基变形与内力的影响。也有学者研究邻近桩基对基坑开挖的影响,如杨敏等<sup>[16]</sup>运用三维弹塑性有限元法研究了邻近桩基对无支撑基坑开挖所引起的变形场的影响,但是并未研究由于桩基施工产生的较大的水平推力对深基坑开挖的影响。

从已有的研究成果看,对深基坑开挖与邻近建筑物桩基的研究主要集中在基坑开挖对邻近建筑物桩基的影响,很少涉及到深大基坑附近存在斜拱桩基产生较大的水平推力对深基坑开挖的影响。因此,有必要研究邻近斜拱桩基施工产生的水平推力对深基坑开挖的影响。

本文以成绵乐客运专线双流机场站基坑工程开挖过程中,邻近机场在建的 T2 航站楼斜拱桩基施工产生指向基坑的巨大水平推力为工程背景,采用 MIDAS/GTS 岩土有限元软件分析邻近大水平推力斜拱桩基加载对宽大深基坑围护桩变形的影响,重点分析了基坑与斜拱桩基承台边缘净距和斜拱加载时基

坑开挖深度对基坑围护桩桩身变形的影响规律。

## 1 工程概况

双流机场车站为某城际客运专线中间站,车站总长 943 m,有效站台长 450 m,标准段宽 55.2 m,有效站台中心里程处基坑深 20.2 m。有效站台与 T2 航站楼斜拱桩基承台边缘净距为 15 m 左右。双流机场站与 T2 航站楼平面位置如图 1 所示。

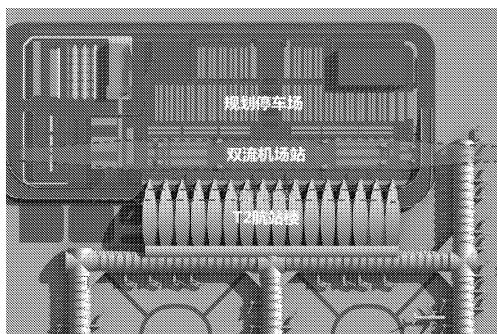


图 1 双流机场站与 T2 航站楼平面位置示意图

双流国际机场新建 T2 航站楼由 16 个跨度 120 m 的钢结构斜拱组成。斜拱基础承台的尺寸为 20 m × 20 m × 3.5 m,承台下设 15 根直径 2 m、长 8 m 的人工挖孔桩,承台承受斜拱结构传来的荷载标准值为:水平推力 12 160 kN(指向基坑),竖向力 11 200 kN,弯矩 23 980 kN·m。航站楼所对应基坑部分的围护桩采用 C40 钢筋混凝土灌注桩,桩径为 1.5 m,间距为 1.8 m,桩长为 25 m。基坑采用四道内支撑,第一和第二道内支撑为 C40 钢筋混凝土支撑,截面尺寸  $b \times h = 0.8 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ ,纵向间距为 9 m;第三和第四道内支撑采用直径为 609 mm 的钢管支撑,纵向间距为 3 m。基坑横向设置 4 排格构柱。斜拱桩基与基坑剖面如图 2 所示。

## 2 数值模型

采用 MIDAS/GTS 岩土有限元软件进行基坑岩土体与斜拱桩基数值模型的建立。考虑到基坑长度较大,为了兼顾计算效率,在长度方向上考虑为平面应变问题,由于斜拱承台中心正对的围护结构受斜拱加载的影响最大,故模型在长度方向上取中间承台群桩基础范围内的基坑长作为模型长度,约 32 m;基坑开挖的影响范围大致为基坑开挖深度的 2 ~ 3 倍<sup>[17]</sup>,故在基坑宽度方向取 200 m;在模型深度方向上,深度取 2 倍围护桩桩长,即为 50 m。三维模型具体如图 3 所示。

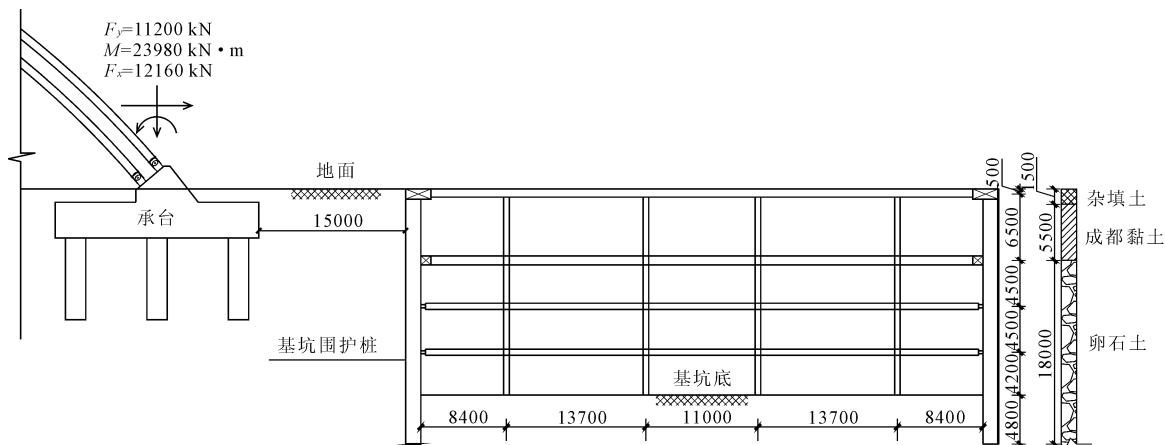


图 2 斜拱桩基与基坑剖面图(单位:mm)

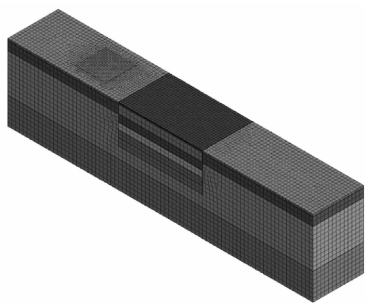


图 3 基坑与斜拱桩基平面应变三维模型

模型采用的边界条件为:竖向边界施加水平方向的约束,以此约束水平向位移,模型底部边界施加三个方向的位移约束,模型上表面边界不施加约束。由于基坑开挖前已把基坑的地下水位降低至开挖面下一定的深度,故模型不考虑地下水渗流的影响,按总应力法进行分析。

模型岩土体采用实体单元,采用修正摩尔-库仑本构模型,岩土体的物理力学参数依据本工程勘察报告提供的参数选取,如表 1 所示。

基坑围护结构采用的是钻孔灌注桩,由于本工程中围护桩间距较小,则考虑土拱效应,可将非连续的钻孔灌注桩根据抗弯刚度原则等效为连续性的地下连续墙结构,地下连续墙采用板单元模拟;支撑、立柱采用梁单元,斜拱桩基采用桩单元;围护桩、内支撑、立柱和斜拱桩基采用线弹性本构模型。基坑

开挖的主要工况如表 2 所示。

表 1 岩土材料参数表

材料名称	重度 /(kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力 /kPa	内摩擦 角/(°)	变形模 量/MPa	泊松比
杂填土	18.0	12	10	6.5	0.35
成都黏土	19.8	35	12	7.2	0.35
卵石土	22.0	0	40	35.0	0.29
泥岩	22.0	0	55	400.0	0.30

表 2 基坑主要工况

工况编号	工况说明
1	施作第 1 道支撑,开挖至基坑顶面以下 7 m
2	施作第 2 道支撑,开挖至基坑顶面以下 11.5 m
3	架设第 3 道支撑,开挖至基坑顶面以下 16 m
4	架设第 4 道支撑,开挖至基坑顶面以下 20.2 m

### 3 斜拱桩基对深基坑围护结构变形影响的因素分析

为了得出不同因素下邻近水平推力斜拱桩基对深基坑围护结构变形的影响规律,先计算基坑单独施工条件下基坑围护桩的水平位移,再计算深基坑在其他因素下斜拱桩基对深基坑围护桩产生的最大水平位移。图 4 和图 5 分别是基坑单独施工条件下基坑土体塑性应变云图和围护桩桩身的最大水平位移分布图。

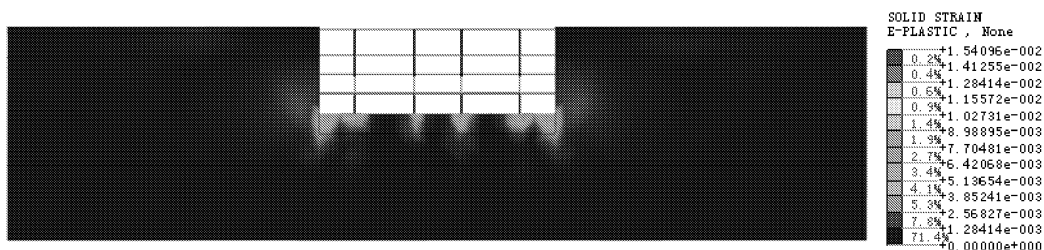


图 4 基坑单独施工土体塑性应变云图

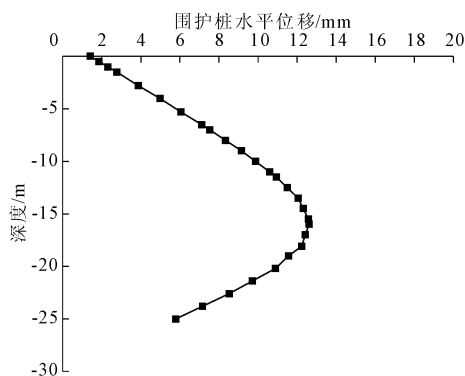


图 5 基坑单独施工围护桩桩身最大水平位移分布图

### 3.1 基坑与斜拱桩基承台边缘净距 $L$ 的影响

基坑与斜拱桩基承台边缘净距不同时,斜拱桩基产生的水平推力对深基坑的影响是不同的。分析边缘净距  $L$  对邻近深基坑围护桩的影响时,斜拱桩基先于深基坑施工,即基坑开挖前斜拱已经对承台施加荷载。边缘净距  $L$  分别取为 5 m、10 m、15 m、20 m、25 m、30 m。图 6 和图 7 分别为不同边缘净距下围护桩桩身最大水平位移分布图和围护桩最大水平位移变化曲线图。

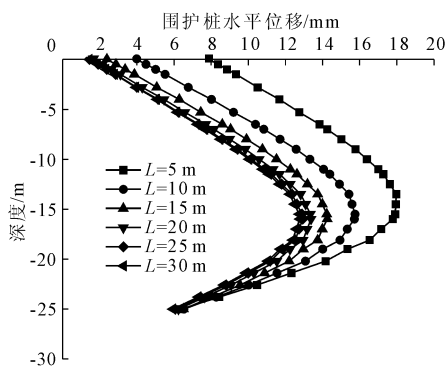


图 6 不同边缘净距下围护桩桩身最大水平位移分布图

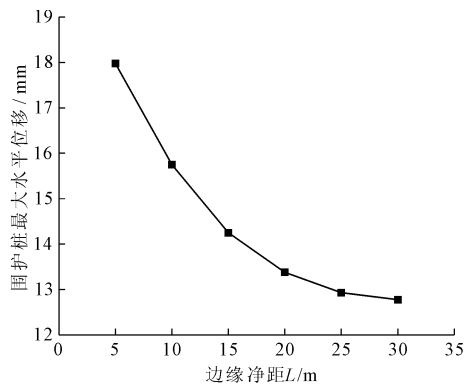


图 7 不同边缘净距下围护桩最大水平位移变化曲线

由图 6 和图 7 可知,随着基坑与斜拱桩基承台边缘净距  $L$  逐渐增大,围护桩的水平位移逐渐减小且趋于稳定,当边缘净距  $L$  从 25 m 变化到 30 m 时,

围护桩水平位移基本不发生变化,最大水平位移变化只有 0.15 mm。因此,当边缘净距  $L$  达到 25 m(此时  $L/H = 1.25$ ,  $H$  为基坑开挖深度)时,大水平推力斜拱桩基对基坑围护桩的变形影响比较小,即边缘净距超过一倍基坑开挖深度时,水平推力斜拱桩基对深基坑围护桩的变形影响较小。

从图 6 中提取不同边缘净距下围护桩水平位移最大值所在的深度。图 8 是不同边缘净距下围护桩水平位移最大值深度图,从中可以看出随着基坑与斜拱桩基承台边缘净距  $L$  的增加,围护桩水平位移最大值所在的深度  $h_L$  逐渐增大;当边缘净距  $L$  达到 25 m 时,围护桩水平位移最大值的深度  $h_L$  基本保持不变,大致为基坑开挖面以下 16.5 m 左右,此时  $h_L/H = 0.825$ 。对图 8 的数据进行曲线拟合发现,围护桩水平位移最大值深度  $h_L$  与边缘净距  $L$  之间的关系式如(1)所示:

$$h_L = 6.25634e^{-0.10993L} - 16.67062 \quad (1)$$

式中: $h_L$  为不同边缘净距下围护桩水平位移最大值的深度, m;  $L$  为基坑与斜拱桩基承台边缘净距, m。

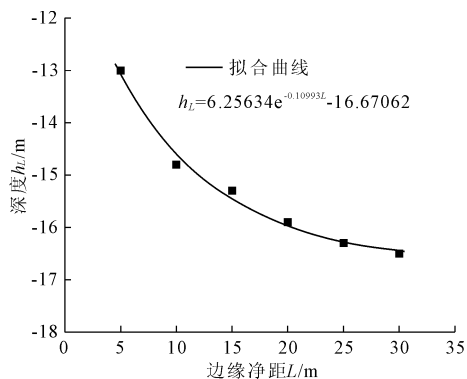


图 8 不同边缘净距下围护桩水平位移最大值深度图

为研究不同边缘净距下,斜拱桩基产生的水平推力对基坑围护桩变形的影响规律,本文把图 6 中边缘净距为 5 m、10 m、15 m、20 m 和 25 m 时,围护桩桩身不同深度处的水平位移减去对应深度处基坑单独开挖最终产生的围护桩桩身水平位移,得到围护桩桩身不同深度处的水平位移增量,并对该水平位移增量进行归一化,即把不同深度处的围护桩桩身水平位移增量除以相对应深度处基坑单独开挖最终产生的围护桩桩身的水平位移,归一化后的数值称为围护桩水平位移影响值。图 9 是不同边缘净距下斜拱桩基加载引起的围护桩水平位移影响值,从中可以看出随着基坑与斜拱桩基承台边缘净距  $L$  的增加,斜拱桩基产生的水平推力对基坑围护桩水平位移的影响深度逐渐减小,当边缘净距  $L$  从 5 m 变化到 20 m 时,围护桩水平位移影响较大的深度分别

为 10 m、5 m、2.5 m 和 1 m,当边缘净距  $L$  为 25 m 时,影响深度基本为 0。因此,随着边缘净距  $L$  逐渐增大,斜拱桩基对围护桩变形的影响深度逐渐变浅,影响较大的范围基本都是在围护桩中上部。

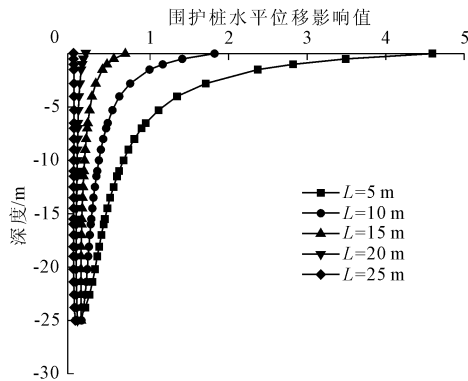


图 9 不同边缘净距下围护桩水平位移影响值

图 10 是基坑与斜拱桩基承台边缘净距从 5 m 变化到 20 m 时,水平推力斜拱桩基对基坑围护桩水平位移影响深度图,对图 10 的数据进行线性拟合,拟合曲线满足式(2)的线性关系:

$$h_{\Delta} = 0.59L - 12 \quad (2)$$

式中: $h_{\Delta}$  为围护桩水平位移影响深度,m; $L$  为基坑与斜拱桩基承台边缘净距,m。

从式(2)可知,直线的斜率为 0.59,此时直线与水平面的角度大约为  $31^{\circ}$ 。由于上部土层受到邻近斜拱桩基产生的巨大水平推力的被动挤压,土体处于被动土压力状态,根据朗肯被动土压力理论,此时土体的剪切破坏面与水平的夹角为  $45^{\circ} - \bar{\varphi}/2 = 35^{\circ}$  ( $\bar{\varphi}$  为影响深度范围内土层的平均内摩擦角,大约为  $20^{\circ}$ ),这与拟合直线与水平面所成的角度相差  $4^{\circ}$  左右。

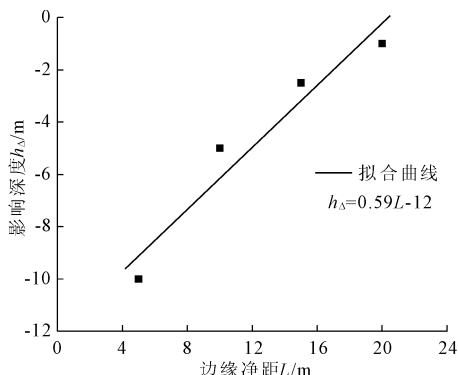


图 10 不同边缘净距下围护桩水平位移影响深度图

### 3.2 斜拱加载时基坑开挖深度 $Z$ 的影响

由于有效站台中心里程处的基坑位于正在修建的 T2 航站楼正对面,基坑开挖时斜拱桩基有的已经施工完成,有的还未施工,因此有必要研究斜拱不同加载时机对基坑开挖的影响。根据现场基坑施工的

主要工况,取斜拱加载时基坑开挖深度  $Z$  分别为 0 m(即基坑未开挖)、7 m、11.5 m、16 m 和 20.2 m,分析斜拱桩基在基坑不同开挖深度加载时对基坑围护桩的影响。图 11 和图 12 分别为基坑与斜拱桩基承台边缘净距为 5 m 时,不同开挖深度  $Z$  加载围护桩桩身最大水平位移分布图和围护桩最大水平位移变化曲线图。

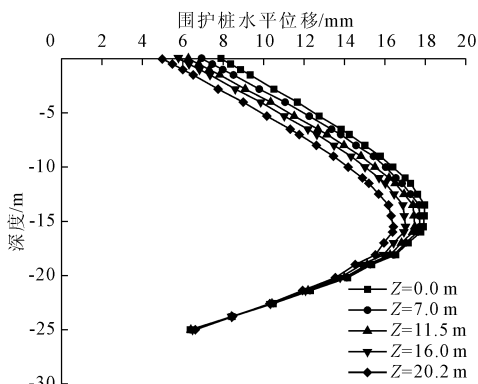


图 11 不同开挖深度加载围护桩桩身最大水平位移分布图( $L=5\text{ m}$ )

由图 11 和图 12 可以发现,不同开挖深度加载对围护桩的水平位移影响较大。随着基坑开挖深度增大而进行加载,围护桩最大位移逐渐减小,且加载时的开挖深度越大,围护桩最大水平位移减小量越大,基坑未开挖之前进行加载围护桩产生的水平位移最大。因此,在实际工程中,基坑应尽早施工并开挖至坑底,减少斜拱桩基施工产生的大水平推力对深基坑围护桩变形的影响。

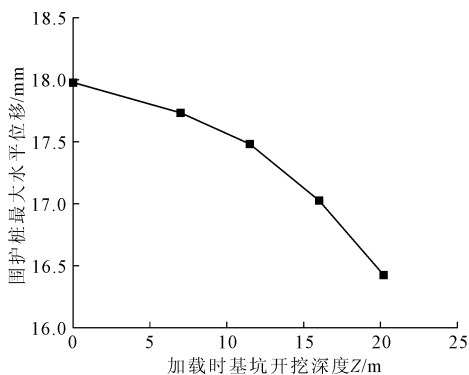


图 12 不同开挖深度加载围护桩最大水平位移变化曲线( $L=5\text{ m}$ )

将图 11 中斜拱在基坑不同开挖深度加载围护桩桩身不同深度处的水平位移减去对应深度处基坑单独开挖最终产生的围护桩桩身水平位移,得到不同开挖深度斜拱加载引起的围护桩桩身水平位移增量。图 13 是基坑开挖至不同深度斜拱加载引起的围护桩桩身水平位移增量分布图。

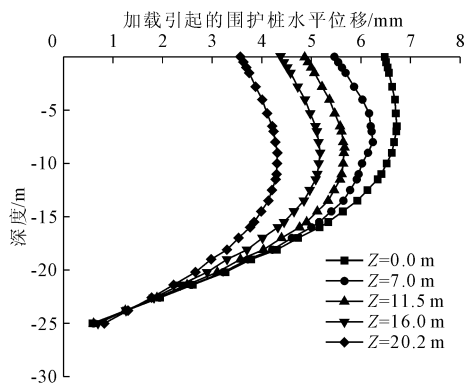


图 13 不同开挖深度加载引起的围护桩桩身水平位移增量分布图 ( $L = 5 \text{ m}$ )

从图 13 可以看出,由斜拱加载引起的围护桩桩身水平位移增量随斜拱加载时基坑开挖深度  $Z$  的增大而减小。斜拱加载引起的围护桩桩身水平位移增量最大值出现部位随斜拱加载时基坑开挖深度的增大逐渐下移,最大值出现部位集中在围护桩中上部,所以当基坑开挖较浅时要及时架设支撑,防止围护桩变形过大。

从图 13 提取不同开挖深度加载引起的围护桩水平位移增量最大值深度。图 14 是不同开挖深度加载引起的围护桩水平位移增量最大值深度图,从图 14 可以发现,随着斜拱加载时基坑开挖深度的增大,围护桩水平位移增量最大值所在的深度逐渐下移,当基坑开挖至 16 m 之后进行斜拱的加载,围护桩水平位移增量最大值的深度  $h_z$  基本保持不变,大约为 9 m 的深度(此时  $h_z/H = 0.45$ )。对图 14 的数据进行拟合发现,不同开挖深度加载引起的围护桩水平位移增量最大值的深度与斜拱加载时基坑开挖深度  $Z$  之间的关系式如式(3)所示:

$$h_z = 2.80137e^{-0.10884Z} - 9.3024 \quad (3)$$

式中:  $h_z$  为不同开挖深度斜拱加载引起的围护桩水平位移增量最大值深度, m;  $Z$  为斜拱加载时基坑开挖深度, m。

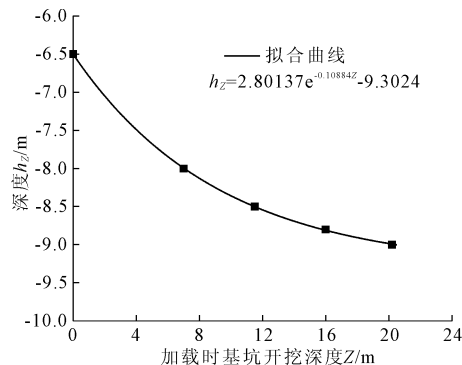


图 14 不同开挖深度加载引起的围护桩水平位移增量最大值深度图 ( $L = 5 \text{ m}$ )

## 4 结 论

(1) 斜拱桩基产生较大的水平推力会使上层土体产生横向运动,使土体产生一定的附加应力场,影响较大的范围基本上都是在中上部土层,对下部范围的土体影响较小。

(2) 基坑与斜拱桩基承台边缘净距  $L$  对基坑围护桩变形的影响规律为:随着边缘净距逐渐增大,基坑围护桩的水平位移逐渐减小且趋于稳定,当边缘净距达到 25 m(此时  $L/H = 1.25$ )时,即边缘净距超过一倍基坑开挖深度时,大水平推力斜拱桩基对基坑围护桩的变形影响比较小;随着边缘净距逐渐增大,围护桩水平位移最大值出现的位置深度  $h_L$  逐渐增大,斜拱桩基产生的水平推力对基坑围护桩水平位移的影响深度也逐渐减小,当边缘净距达到 25 m 时,影响深度基本为 0。

(3) 斜拱加载时基坑开挖深度  $Z$  对基坑围护桩变形的影响规律为:随着斜拱加载时基坑开挖深度的增大,围护桩最大位移逐渐减小,当开挖至基坑底部进行加载时围护桩产生的位移最小;斜拱加载引起的围护桩水平位移增量最大值和最大值出现的深度,随斜拱加载时基坑开挖深度的增大而减小。因此,在实际工程中基坑应尽早施工并开挖至坑底,以减少斜拱桩基施工产生的大水平推力对深基坑围护桩变形的影响。

### 参考文献:

- [1] 刘国彬,王卫东.基坑工程手册[M].2版.北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [2] 王 恒,吕艳平,陈福全,等.水闸深基坑开挖对紧邻桥梁桩基的影响分析[J].水利与建筑工程学报,2014,12(3):10-16,22.
- [3] 梁发云,于 峰,李镜培,等.土体水平位移对邻近既有桩基承载性状影响分析[J].岩土力学,2010,31(2):449-454.
- [4] 郑 刚,王 丽.竖向及水平荷载加载水平、顺序对单桩承载力的影响[J].岩土工程学报,2008,30(12):1796-1804.
- [5] Guo W D, Ghee E H. Behavior of axially loaded pile groups subjected to lateral soil movement[C]//Proceedings of Sessions of Geo-shanghai, Shanghai:GSP. 2006:174-181.
- [6] Poulos H G, Chen L T. Pile response due to unsupported excavation-induced lateral soil movement [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996,33(6):670-677.

(下转第 154 页)

- [7] Nie L, Zhou D P. Excavation deformation analysis of deep-cutting high rock slope[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 368-373:219-224.
- [8] 唐红梅,陈洪凯,曹卫文. 顺层岩体边坡开挖过程模型试验[J]. *岩土力学*, 2011, 32(2):435-440.
- [9] 王宇,李晓,王梦瑶,等. 反倾岩质边坡变形破坏的节理有限元模拟计算[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013 (S2):3945-3953.
- [10] 刘小丽,王婉,英姿,等. 阶梯型均质边坡的开挖效应[J]. *山地学报*, 2015(6):726-732.
- [11] 胡其志,周辉,肖本林. 水力作用下顺层岩质边坡稳定性分析[J]. *岩土力学*, 2010, 31(11):3594-3598.
- [12] 宋丹青,梁收运,王志强. 水库施工期间坝前滑坡稳定性研究[J]. *水利水电技术*, 2016, 47(10):109-114.
- [13] 张泽林,吴树仁,唐辉明. 反倾岩质边坡的时效变形破坏研究[J]. *地质科技情报*, 2014, 33(5):181-187.
- [14] 王泉伟,杜朋召,张涛,等. 地震作用下节理岩质边坡的动力稳定性分析[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2015, 36(6):63-67.
- [15] 黄润秋,黄达,宋肖冰. 卸荷条件下三峡地下厂房大型联合块体稳定性的三维数值模拟分析[J]. *地质学前沿*, 2007, 14(2):270-277.
- [16] 张传庆,冯夏庭,周辉,等. 应力释放法在隧洞开挖模拟中若干问题的研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(5):1174-1180.
- [17] 陈玮,简文彬,董岩松,等. 某含软弱夹层花岗岩残积土边坡稳定性研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2014, 12(6):107-111.
- [18] 李永亮,余成华,马佐成,等. 网格划分对边坡稳定有限元分析的影响[J]. *水利与建筑工程学报*, 2014, 12(6):133-136.
- [19] 严飞,邓琴. 华丽高速公路华坪岸边坡稳定性的DDA模拟研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2016, 12(4):118-123.

(上接第 116 页)

- [7] Poulos H G, Chen L T. Pile response due to excavation-induced lateral soil movement[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 1997, 23(2):94-99.
- [8] Finno R J, Lawence S A, Allawh N F, et al. Analysis of performance of pile groups adjacent to deep excavation[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1991, 117(6):934-955.
- [9] Leung C F, Lim J K, Shen R F, et al. Behaviour of pile groups subject to excavation-induced soil movement[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2003, 129(1):58-65.
- [10] Ong D E L, Leung C F, Chow Y K. Behavior of pile groups subject to excavation-induced soil movement in very soft clay [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 2000, 126(11):1462-1474.
- [11] 郑刚,颜志雄,雷华阳,等. 基坑开挖对临近桩基影响的实测及有限元数值模拟分析[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(5):638-643.
- [12] 周勇,严登平,任永忠. 明挖地铁车站对临近桩基的影响分析[J]. *水利与建筑工程学报*, 2018, 16(3):81-85.
- [13] 张陈蓉,黄茂松. 基坑开挖引起的邻近建筑物桩基变形受力响应[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(S1):565-570.
- [14] 张爱军,莫海鸿,李爱国,等. 基坑开挖对邻近桩基影响的两阶段分析方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(S1):2746-2750.
- [15] 魏丽敏,辛学忠,何群,等. 邻近开挖对桥梁桩基变形与内力影响分析[J]. *铁道工程学报*, 2017, 34(5):38-44.
- [16] 杨敏,周洪波,杨桦. 基坑开挖与临近桩基相互作用分析[J]. *土木工程学报*, 2005(4):91-96.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通工程监测技术规范:GB 50911—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2013.