

文章编号:1673-2049(2017)03-0009-07

# 软弱夹层对深基坑水平位移影响的数值模拟分析

周 勇<sup>1,2</sup>, 张康康<sup>1,2</sup>

(1. 兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050;

2. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:**以某深基坑支护工程为背景,研究了软弱夹层对基坑水平位移的影响。利用有限元分析软件 PLAXIS 2D 和 M-C 土体本构模型对该工程排桩预应力锚杆支护段进行数值模拟。对比分析了软弱夹层的黏聚力、内摩擦角、厚度、埋置深度对基坑水平位移的影响,得到了这些因素对基坑水平位移的影响规律。结果表明:软弱夹层的存在对基坑水平位移有较大影响;内摩擦角对基坑水平位移的影响比黏聚力更加明显;黏聚力和内摩擦角同时变化引起基坑水平位移的变化大于单一参数变化引起的基坑水平位移变化之和;基坑水平位移随软弱夹层厚度的增大而增大;随着埋置深度的增大,基坑水平位移呈现先增大后减小的趋势。

**关键词:**深基坑;软弱夹层;水平位移;黏聚力;内摩擦角;排桩预应力锚杆;数值模拟

**中图分类号:**TU473.5

**文献标志码:**A

## Numerical Simulation Analysis of Influence of Soft Interlayer on Horizontal Displacement of Deep Foundation Pit

ZHOU Yong<sup>1,2</sup>, ZHANG Kang-kang<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 2. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

**Abstract:** Based on a deep foundation pit supporting project, the influence of soft interlayer on the horizontal displacement of foundation pit was studied. The finite element analysis software PLAXIS 2D and Mohr-Coulomb soil constitute model were used to simulate the pile-prestressed anchor support section of the project. The influences of the cohesion, internal friction angle, thickness and embedded depth on the horizontal displacements of the foundation pit were compared and analyzed, and the effect laws of these factors on the horizontal displacement of foundation pit were obtained. The results show that the existence of soft interlayer has great influence on the horizontal displacement of foundation pit; influence of internal friction angle on the horizontal displacement of foundation pit is more obvious than that of cohesion; changes of horizontal displacement of foundation pit caused by cohesion and internal friction angle changing at same time are more than the sum of changes of the single parameter; horizontal displacement of foundation pit increases with thickness of the soft interlayer increasing; the horizontal displacement of foundation pit increases first and then decreases with the increase of embedded

收稿日期:2016-11-05

基金项目:国家自然科学基金项目(51568042)

作者简介:周 勇(1978-),男,湖北宣恩人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:gsutzhouy@163.com。

depth.

**Key words:** deep foundation pit; soft interlayer; horizontal displacement; cohesion; internal friction angle; pile-prestressed anchor; numerical simulation

## 0 引言

随着城市建设需求的日益扩大,大型地下空间已成为一种发展趋势,然而这些地下空间的开发都将面临复杂的深基坑工程<sup>[1]</sup>。目前,对深基坑的研究主要集中在支护结构、锚固体的受力及变形特性和基坑稳定性上<sup>[2]</sup>。由于深基坑工程地域特色明显,从文献报道情况来看,复杂地质条件下,软弱夹层对基坑支护结构的影响研究相对较少。软弱夹层为存在于均质土体当中的层状或带状的软弱薄层,该薄层的厚度比相邻土层的小,力学强度(黏聚力、内摩擦角等)和变形模量较低。实际工程当中,有时候软弱夹层只存在于一小部分范围内,从而容易被忽略。单仁亮等<sup>[3]</sup>利用 FLAC3D 有限差分软件,在考虑土层分布、基坑边坡坡度、土钉的排列方式、钢筋网喷射混凝土面层、含水层的孔隙水压力、分层开挖支护等因素的基础上,分析得出软弱土层是基坑失稳的重要因素;陈玮等<sup>[4]</sup>利用 PLAXIS 有限元软件,模拟分析了某含软弱夹层花岗岩残积边坡,结果表明软弱夹层的存在不仅造成了边坡总体变形的增大,还决定了边坡失稳破坏时滑动面的位置;陈昌富等<sup>[5]</sup>引入 4 种锚固界面荷载传递模型,并基于荷载传递法和传递矩阵法,选取适合各土层的锚固界面荷载传递模型,推导出了锚固体周边土体处于不同受力状态时的锚杆位移、轴力、剪应力计算式,研究结果表明,土层力学性质及其层序对锚杆受力特性影响较大。

本文依托卓尼县前枕商贸城基坑支护工程,该工程地质状况复杂,将利用 PLAXIS 有限元分析软件,模拟不同力学强度参数、不同厚度、不同埋置深度处软弱夹层对基坑水平位移的影响。通过对比分析,得到土层参数、夹层厚度、埋置深度发生改变时,基坑水平位移的变化规律,可为后续类似工程设计及更深入的理论研究提供参考。

## 1 工程概况

### 1.1 工程简介

该场地位于卓尼县城区中心地带,东邻卓尼县青少年校外活动中心,南邻柳林宾馆和民宅,西邻卓梁沟(有永久性护堤),北邻城区道路磨嘎街,场地上

拟建一栋 12 层(局部 4 层)框剪结构楼,长约 74.0 m,宽约 56.0 m,建筑面积约 19 000.00 m<sup>2</sup>。依据《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)<sup>[6]</sup>,该基坑排桩预应力锚杆支护段安全等级为一级。由于该基坑的重要性,考虑到基坑开挖过程中对周边道路和既有建筑物的保护,对基坑开挖采取支护措施,对既有建筑物采取加固措施。根据本工程的结构特点、场地周围的具体情况,同时考虑经济效益等因素,确定采用复合土钉墙以及排桩预应力锚杆的支护方案。

### 1.2 场地构造与地形地貌

卓尼县位于甘南藏族自治州东南部,县城设在洮河之滨的柳林镇,海拔 2 500 m,东经 102°40′~104°02′,北纬 34°10′~35°00′。南靠迭部,西临夏河、碌曲,北与临夏州的和政、康乐及定西地区的渭源毗邻,东与定西地区的岷县、漳县交界,中部与临潭县交错。该场地地处山前洪积扇与洮河的阶地交汇处,地面高程 2 535.10~2 539.50 m,场地内最大高差 4.4 m,北高南低,西高东低。

### 1.3 地层与岩性特征

场地勘探揭露岩土层最大深度为 22.3 m,勘探范围内场地地层为第四系冲洪积形成的,从上向下依次为:①杂填土层(Q4<sup>ml</sup>),层厚 1.0~3.7 m;②粉质黏土层(Q4<sup>al</sup>),层面深度 1.0~2.3 m,层面标高 2 533.00~2 537.40 m,层厚 0.8~5.5 m;③角砾层(Q4<sup>al</sup>),层面深度 1.3~3.5 m,层面标高 2 533.30~2 538.10 m,层厚 2.3~8.6 m,该层普遍见 0.4~1.0 m 厚粉质黏土夹层;④粉质黏土层(Q4<sup>al</sup>),层面深度 6.0~9.4 m,层面标高 2 529.83~2 531.00 m,层厚 0.6~1.5 m;⑤细砂(Q4<sup>al</sup>),层面深度 6.3~8.1 m,层面标高 2 529.11~2 532.12 m,层厚 0.6~1.5 m;⑥卵石层(Q4<sup>al</sup>),层面深度 7.3~10.1 m,层面标高 2 526.70~2 531.57 m,勘探揭露厚度 10.0~14.8 m,未穿透。基坑支护结构设计土层参数见表 1。

## 2 基坑支护结构设计

依照相关规范要求<sup>[7-10]</sup>,并结合现场实际情况确定支护结构类型。该基坑北侧靠近城区道路磨嘎街,场地比较宽阔,采用放坡+复合土钉墙结构进行支护;西北角有 2 层的砖混建筑一栋,基坑断面在开

表 1 土层的物理力学参数

Tab. 1 Physical and Mechanical Parameters of Soil Layers

土层名称	重度 $\gamma/$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	黏聚力 $c/$ kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	界面黏结强 度 $\tau/\text{kPa}$
杂填土	14.5	5.0	20	30
角砾	18.0	0.0	30	60
粉质黏土	17.0	15.0	24	40
细砂	20.0	5.0	25	80
卵石	23.0	0.0	40	180

挖支护过程中不允许有较大变形,具备放坡的空间很小,考虑到基坑深度大,排桩预应力锚杆对基坑变形控制作用明显,因此在这侧采用排桩预应力锚杆进行支护;西侧有 7 层的混凝土建筑一栋,场地较宽阔,因此采用放坡+复合土钉墙结构进行支护;该基坑南邻柳林宾馆和民宅,场地也较宽阔,因此也采用放坡+复合土钉墙结构进行支护。基坑东侧靠近电影院一侧,场地较宽阔,因此采用放坡+复合土钉墙结构进行支护;基坑东北角紧邻青少年校外活动中心,由于场地狭窄,具备放坡的空间很小,因此采用排桩预应力锚杆进行支护。基坑支护设计平面图如图 1 所示,排桩预应力锚杆支护剖面如图 2 所示,从图 2 可以看出,夹层埋置深度在 3.4~5.6 m 范围内,层厚为 0.3~0.9 m,呈水平状分布,基坑支护范围内有 2 层夹层。

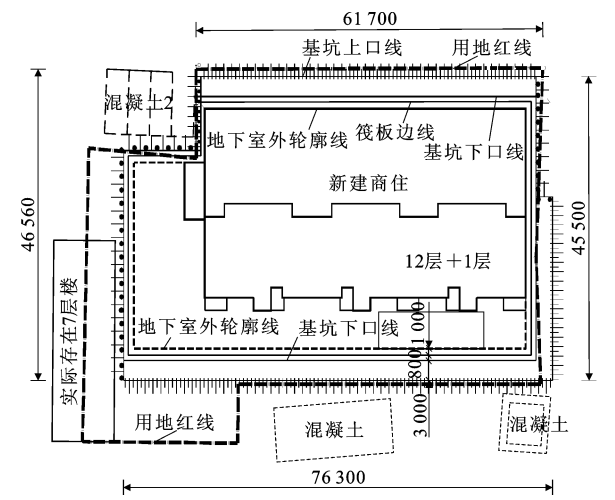


图 1 基坑支护设计平面(单位:mm)

Fig. 1 Plan of Foundation Pit Support Design (Unit:mm)

### 3 数值模拟方案的确定

#### 3.1 PLAXIS 软件在深基坑工程中的应用

PLAXIS 2D 软件是一个专门用于岩土工程问题中变形和稳定性分析的二维计算程序,在深基坑工程的数值模拟中也被广泛采用。刘小丽等<sup>[11]</sup>利

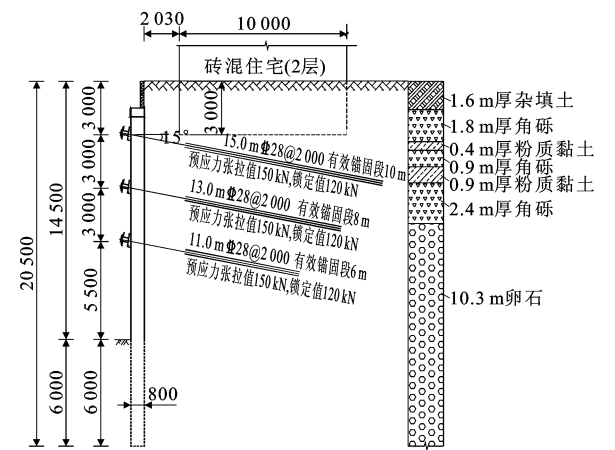


图 2 排桩预应力锚杆支护剖面(单位:mm)

Fig. 2 Cross-section of Pile-prestressed Anchor Support (Unit:mm)

用 PLAXIS 2D 对 3 个基坑开挖工程实例进行计算,将计算值与实测值进行了对比分析,结果表明 PLAXIS 在模拟计算基坑开挖工程方面具有较好的适用性;任永忠等<sup>[12]</sup>以兰州市庙滩子某一深基坑工程为背景,利用 PLAXIS 2D 软件对排桩预应力锚杆支护基坑的侧向位移进行数值验证,通过对比发现数值模拟结果与监测数据基本吻合。

#### 3.2 数值模拟方案

本文拟对软弱夹层基本力学参数  $c$ 、 $\varphi$ 、夹层厚度  $d$ 、埋置深度  $h$  发生改变时,开挖深度 14.5 m 深基坑围护桩体的水平位移进行数值模拟对比。

进行数值模拟时,建立一个宽度为 50 m,高度为 40 m 的轴对称几何模型,根据实际情况选用 15 节点单元,土体选用 M-C 本构模型。锚杆可以由一个点对点锚杆和土工格栅的组合来模拟,土工格栅模拟注浆体(锚固段),而点对点锚杆模拟锚杆的拉杆(自由段);土钉用土工格栅来模拟;排桩用板单元来模拟;桩-土之间的接触面采用界面单元模拟。表 2 为计算模型参数,图 3 为有限元计算模型,对其进行网格划分,并进行全局加密处理,结果如图 4 所示。结合实际情况,模拟时亦采用边开挖边支护的方式,表 3 为数值模拟时的计算工况。

应该注意的是,单一的排桩不能传递剪力和水平向弯矩,为了考虑冠梁、腰梁对支护结构整体性的贡献,PLAXIS 软件采用等效厚度的板单元模拟排桩。为保证模拟结果的可靠性,需根据式(1)对板单元弹性模量  $E$  进行准确计算,即

$$E = \frac{E_p D + E_s (u - D)}{u} \quad (1)$$

式中:  $E_p$  为桩的弹性模量;  $E_s$  为土的弹性模量(取



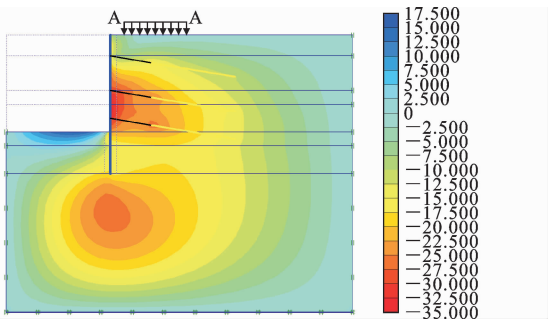


图 6 基坑水平位移云图(单位: $10^{-3}$  m)

Fig. 6 Nephogram of Horizontal Displacement of Pit (Unit: $10^{-3}$  m)

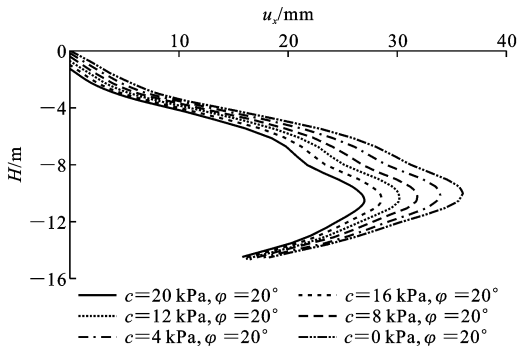


图 7 基坑水平位移随  $c$  值变化曲线

Fig. 7 Changing Curves of Horizontal Displacement of Pit with  $c$  Value

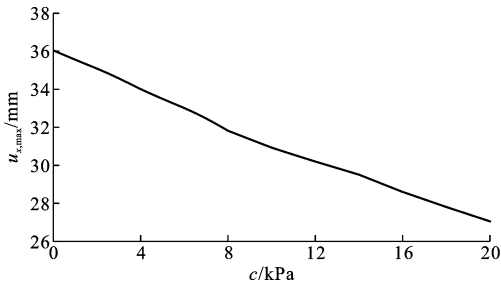


图 8  $u_{x,max}$ - $c$  曲线

Fig. 8  $u_{x,max}$ - $c$  Curve

mm,变动幅度为 10.62 mm。

以上分析结果显示,随着  $c, \varphi$  的减小,基坑的水平位移均呈增大趋势,但其变化规律有所不同:内摩擦角  $\varphi$  的变化对基坑水平位移的影响更加明显, $c, \varphi$  改变同样的幅值时, $c$  值变化引起的基坑水平位移最大值的改变量约为 8.90 mm,而  $\varphi$  值变化引起的基坑水平位移最大值的改变量约为 17.05 mm;同时, $c$  的变化引起基坑水平位移呈线性增长,然而随着  $\varphi$  的减小,基坑水平位移的增大速率加快。

#### 4.3 $\varphi, c$ 同时变化对基坑水平位移的影响

实际工程中,土层参数的变化并非单一,往往是诸多参数同时发生改变,为了更加切合实际,本文对

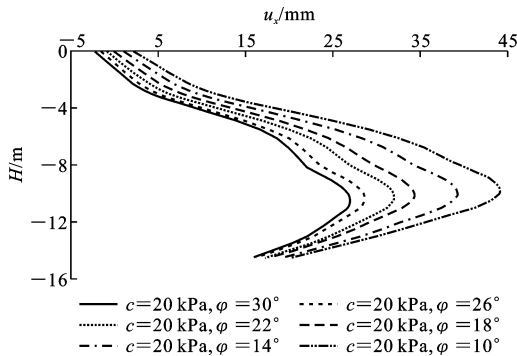


图 9 基坑水平位移随  $\varphi$  值变化曲线

Fig. 9 Changing Curves of Horizontal Displacement of Pit with  $\varphi$  Value

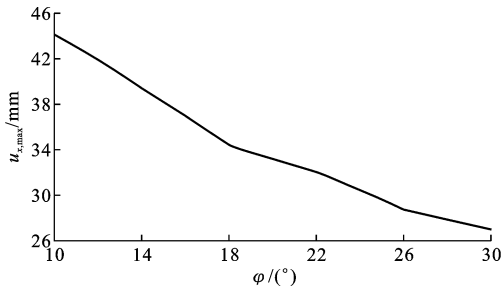


图 10  $u_{x,max}$ - $\varphi$  曲线

Fig. 10  $u_{x,max}$ - $\varphi$  Curve

黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  同时变化时基坑水平位移的变化进行了分析,结果如图 11 所示。由图 11 可以看出: $c, \varphi$  值同时变化引起基坑水平位移的变化规律与单一参数改变引起基坑水平位移的变化规律类似,如图 12 所示。由图 12 可以看出:当  $c$  从 20 kPa 递减至 8 kPa,且  $\varphi$  从  $30^\circ$  递减至  $18^\circ$  时,基坑水平位移最大值由 26.93 mm 增大至 42.80 mm,变动幅值为 15.87 mm。对比单一参数变化结果发现,当  $\varphi$  保持不变( $\varphi = 20^\circ$ ), $c$  从 20 kPa 递减至 8 kPa 时,基坑水平位移最大值由 29.63 mm 增大至 34.74 mm,变动幅值为 5.11 mm,而当  $c$  保持不变( $c = 20$  kPa), $\varphi$  从  $30^\circ$  递减至  $18^\circ$  时,基坑水平位移最大值由 26.93 mm 增大至 34.97 mm,变动幅值为 8.04 mm,单一参数改变引起基坑水平位移幅值的累积结果为 13.15 mm,然而实际模拟结果为 15.87 mm。由此可以看出,两参数同时变化引起基坑水平位移的改变并非单一参数变化引起基坑水平位移变化的累加,而是偏大于累加值。

#### 4.4 软弱夹层厚度对基坑水平位移的影响

图 13,14 分别为基坑水平位移随着软弱夹层厚度变化曲线,模拟分析了软弱夹层埋深为 8 m 处,软弱夹层厚度  $d$  分别为 0.5,1.0,1.5,2.0 m 时基坑水平位移的变化情况。模拟结果显示:当  $d$  为

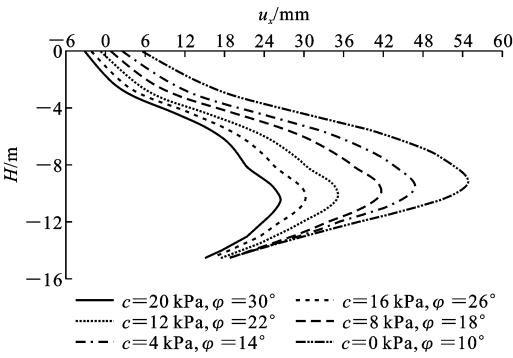


图 11 桩深水平位移随  $c, \varphi$  值变化曲线  
Fig. 11 Changing Curves of Horizontal Displacement of Pit Caused with  $c, \varphi$  Values

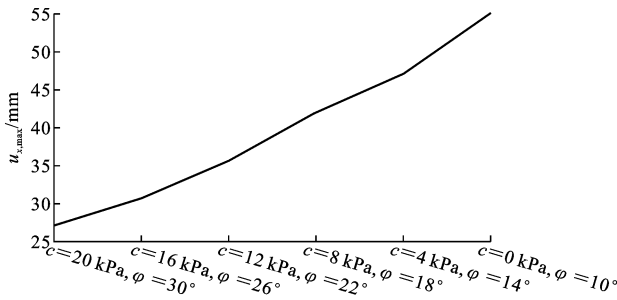


图 12  $u_{x,max}-(c, \varphi)$  曲线  
Fig. 12  $u_{x,max}-(c, \varphi)$  Curve

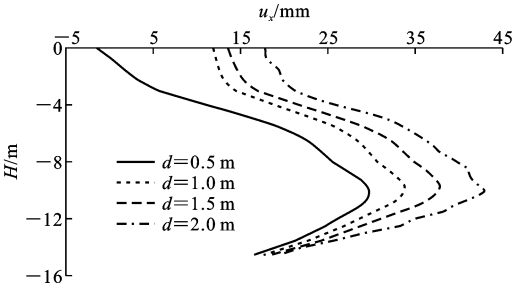


图 13 软弱夹层厚度对基坑水平位移影响曲线  
Fig. 13 Curves of Horizontal Displacement of Pit with Thickness of Soft Interlayer

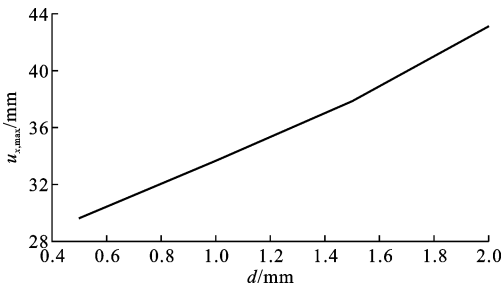


图 14  $u_{x,max}-d$  曲线  
Fig. 14  $u_{x,max}-d$  Curve

0.5 m 时,  $u_{x,max}$  为 29.63 mm; 当  $d$  为 1.0 m 时,  $u_{x,max}$  为 33.42 mm; 当  $d$  为 1.5 m 时,  $u_{x,max}$  为 37.80 mm; 当  $d$  为 2.0 m 时,  $u_{x,max}$  为 42.80 mm。可以看

出, 软弱夹层厚度的改变对基坑水平位移的影响明显, 且随着软弱夹层厚度  $d$  的增大, 基坑水平位移最大值基本呈线性增大趋势。

4.5 软弱夹层埋深对基坑水平位移的影响

图 15 为基坑水平位移最大值随着软弱夹层埋置深度  $h$  改变时的变化规律。模拟时取软弱夹层厚度恒为 0.4 m, 土层黏聚力  $c$  为 8 kPa, 内摩擦角  $\varphi$  为 18°, 夹层埋置深度分别取 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 m, 夹层位置示意如图 16 所示。模拟结果表明, 软弱夹层埋置深度对基坑水平位移也有着很大的影响。随着埋置深度的不断增加, 基坑水平位移呈先增大后减小的趋势。基坑最大水平位移为 47.51 mm, 发生在距基坑顶约 9 m 处。

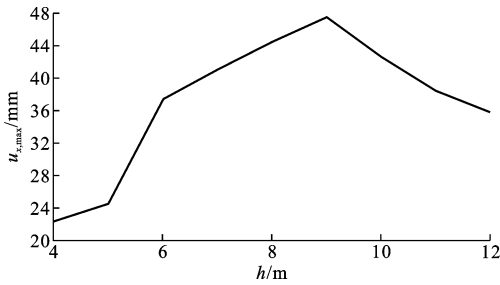


图 15  $u_{x,max}-h$  曲线  
Fig. 15  $u_{x,max}-h$  Curve

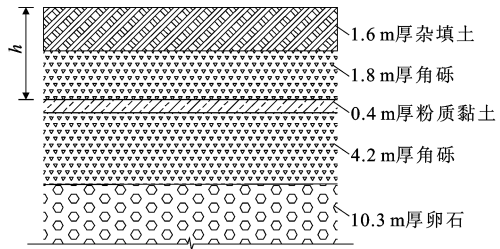


图 16 夹层位置示意  
Fig. 16 Schematic Diagram of Interlayer Position

4.6 模拟结果与监测结果对比分析

为了验证本文模拟结果的合理性与可靠性, 对实际工程工况下基坑水平位移进行模拟, 并同监测结果进行对比, 作出基坑水平位移随基坑深度变化曲线, 如图 17 所示。从图 17 可以看出, 通过数值模拟得到基坑最大水平位移为 34.8 mm, 而监测结果显示基坑最大水平位移为 30.3 mm, 相比之下有一定误差, 但从所得曲线变化趋势看, 2 种情况下变化规律较为相似, 因此, 数值模拟结果可以说明基坑水平位移的变化机理, 同时, 数值模拟在一定程度上也能预测工程中某些土层参数变化时基坑水平位移的变化规律。

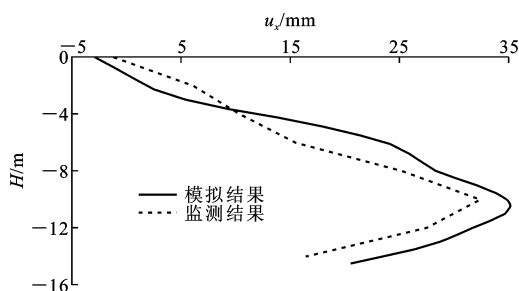


图17 模拟结果与监测结果对比

Fig. 17 Comparison of Numerical Simulation and Monitoring Results

## 5 结 语

(1)随着黏聚力的减小,基坑水平位移呈线性增大趋势;随着内摩擦角的减小,基坑水平位移总体呈增大趋势,但其增大速率随着内摩擦角的减小而逐渐增大,同时,通过分析对比发现,内摩擦角对基坑水平位移的影响比黏聚力更加明显。

(2)黏聚力、内摩擦角两参数同时变化引起基坑水平位移的变化大于单一参数变化引起基坑水平位移改变之和,可见黏聚力、内摩擦角两参数对基坑水平位移的影响并非独立的。

(3)软弱夹层厚度对基坑水平位移有较大影响,且基坑水平位移随着软弱夹层厚度的增大而增大。

(4)软弱夹层埋置深度的不同对基坑水平位移的影响也比较明显,且随着埋置深度的增大,基坑水平位移呈现出先增大后减小的趋势。

(5)进行支护结构设计时,应当严格依照地勘报告,对含有软弱夹层的断面进行专门设计,不可因软弱夹层的厚度较小而忽略。

## 参考文献:

## References:

- [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.  
LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation Engineering Manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [2] 程良奎,张培文,王 帆. 岩土锚固工程的若干力学概念问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 668-682.  
CHENG Liang-kui, ZHANG Pei-wen, WANG Fan. Several Mechanical Concepts for Anchored Structures in Rock and Soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(4): 668-682.
- [3] 单仁亮,董洪国,陈代昆. 中深部含软弱夹层的深基坑土钉支护失稳破坏数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增2): 30-35.

SHAN Ren-liang, DONG Hong-guo, CHEN Dai-kun. Numerical Analysis of Instability Soil-nailing Wall in Deep Foundation Pits Containing Soft Soil Layer at Middle and Deep Parts [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 30-35.

- [4] 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.  
CHEN Wei, JIAN Wen-bin, DONG Yan-song, et al. Stability Study of a Granite Residual Soil Slope with Weak Interlayers[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014, 12(6): 107-111.
- [5] 陈昌富,梁冠亭,汤 宇. 层状地基中锚杆拉拔受力变形特性分析[J]. 中国公路学报, 2015, 28(7): 1-9, 17.  
CHEN Chang-fu, LIANG Guan-ting, TANG Yu. Analysis of Pull-out Mechanical and Deformation Characteristics for Bolts in Layered Ground[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(7): 1-9, 17.
- [6] JGJ 120—2012, 建筑基坑支护技术规程[S].  
JGJ 120—2012, Technical Specification for Retaining and Protection of Building Foundation Excavations [S].
- [7] JGJ 167—2009, 湿陷性黄土地区建筑基坑工程安全技术规程[S].  
JGJ 167—2009, Technical Specifications for Safe Retaining and Protection of Building Foundation Excavation Engineering in Collapsible Loess Regions[S].
- [8] GB 50330—2013, 建筑边坡工程技术规范[S].  
GB 50330—2013, Technical Code for Building Slope Engineering[S].
- [9] GB 50497—2009, 建筑基坑工程监测技术规范[S].  
GB 50497—2009, Technical Code for Monitoring of Building Excavation Engineering[S].
- [10] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].  
GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures[S].
- [11] 刘小丽,马 悦,郭冠群,等. PLAXIS 2D 模拟计算基坑开挖工程的适用性分析[J]. 中国海洋大学学报, 2012, 42(4): 19-25.  
LIU Xiao-li, MA Yue, GUO Guan-qun, et al. Applicability of PLAXIS 2D Used for Numerical Simulation in Foundation Pit Excavations[J]. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42(4): 19-25.
- [12] 任永忠,朱彦鹏,周 勇. 兰州市某深基坑支护设计及监测研究分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增): 705-710.  
REN Yong-zhong, ZHU Yan-peng, ZHOU Yong. Design and Monitoring of Bracings for a Deep Foundation Pit in Lanzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S): 705-710.

