

DOI: 10.11779/CJGE2016S2053

# 基于真空帷幕止水与大气压力支护的深基坑开挖新工法

李景林<sup>1</sup>, 吴春勇<sup>1, 2</sup>, 王剑平<sup>1, 2</sup>, 杨杰<sup>\*1</sup>, 龙玉桥<sup>1, 2</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 南京瑞迪建设科技有限公司, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 基于真空预压理论和遮帘效应提出软弱土深基坑开挖新工法—真空帷幕止水与大气压力支护深基坑开挖工法。本工法将软弱土地基处理和基坑开挖及支护有效的结合在一起, 具有垂直开挖、无内支撑、干作业、节省工期、节约造价等突出优点。新工法的理论基础是利用真空预压中真空区域土体所受的负压球应力作用和刚性结构对侧向土压力的遮帘作用, 即由基坑侧壁所受的大气压力和基坑外侧刚性结构对土体的遮帘作用来代替传统的基坑内支护, 同时, 基坑外真空预压还起到降水和场区地基处理的作用。工程实例表明新工法的可行性和实用性, 为深基坑工程技术的发展提供了新的设计理念与方向。

**关键词:** 软弱土地基; 深基坑; 真空预压; 遮帘桩

**中图分类号:** TU473

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2016)S2-0324-06

**作者简介:** 李景林(1973-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程模型试验、计算分析、地基处理、监测检测等方面的研究。E-mail: puffer@163.com。

## New method for excavation of deep foundation pit based on vacuum waterproof curtain and atmospheric pressure support

LI Jing-lin<sup>1</sup>, WU Chun-yong<sup>1, 2</sup>, WANG Jian-ping<sup>1, 2</sup>, YANG Jie<sup>1</sup>, LONG Yu-qiao<sup>1, 2</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Nanjing R&D Tech Group Co., Ltd, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** A new method for excavation of soft soil deep foundation pit is introduced, that is the excavation method for deep foundation pit based on the vacuum water proof curtain and atmospheric pressure support. This method combines soft soil foundation treatment with excavation of foundation pit effectively, which has advantages such as vertical excavation, no inner support, dry operation, time-saving and cost-saving. The theoretical foundation of this technology is the negative pressure ball stress of vacuum preloading and the barrier function of rigid structure to the lateral earth pressure. In other words, the atmospheric pressure acting on the side wall of foundation pit and the barrier function of rigid structure to its lateral soils are used to replace the traditional support for foundation pit. At the same time, the vacuum preloading also has the effects of precipitation and ground foundation treatment. Engineering example shows the new construction method is feasible and practical, and it provides a new design concept and direction for the development of pit engineering technology of deep foundation.

**Key words:** soft soil foundation; deep foundation pit; vacuum preloading; barrier pile

## 0 引言

随着国民经济的飞速发展, 城市化进程不断加速, 特别是较发达的东部地区, 城市建设日新月异, 相应的土地资源越来越少。为了适应发展对土地资源的需求, 在向空中和海洋谋求新空间的同时, 传统地下空间开发和利用的技术, 也得到了进一步的发展。但对地质条件较差的软弱土地区, 地下空间的开发周期和成本仍然受到很大程度的制约。如, 在软弱土地基上建设高层建筑, 一般是先进行地基处理, 再进行深基坑开挖支护。在基坑开挖支护设计和实施中, 要解决的关键问题是基坑侧壁土压力问题, 其次是基坑降水

问题。传统的基坑设计是在基坑外侧打设一排或多排刚性桩或半刚性桩, 然后边开挖边在基坑内设置支护结构。这类传统深基坑开挖方法不仅工期较长, 而且投资成本较大<sup>[1-3]</sup>。

如何用最短的开发时间、最省的开发成本, 对软弱土区域的地下空间进行利用, 特别是深基坑工程问题, 已成为工程师急需解决的课题。

真空预压处理软弱土地基, 是将待处理区域的土

基金项目: 国家自然科学基金项目(51409161)

收稿日期: 2016-05-19

\*通讯作者(E-mail: 420150326@qq.com)

体密封、抽真空,使其内部形成负压,该负压具有球应力特性,使真空区域的土体在真空负压(即大气压力)的作用下,具有向土体内部收缩的作用<sup>[4-7]</sup>。同时,笔者在近年来进行深水板桩码头的研究中发现,在土体中间隔打设刚性桩,其对侧向土压力的遮挡效果作用明显<sup>[8-9]</sup>,即称之遮帘桩。受真空预压理论和遮帘桩原理的启示,结合传统深基坑面临的问题,本文提出了一种深基坑开挖新工法,即真空帷幕止水与大气压力支护深基坑开挖工法,该工法具有施工快、无内支撑、干作业、经济效益显著等突出优点。并通过完整的工程实例,证明了新工法的可行性和实用性。同时,为深基坑工程技术的发展提供了新的思路。

1 工程条件

临长江某工程,属长江漫滩地貌,原为农田、沟塘。场地南北向长 209.6 m,东西向宽 90.1 m,约 18885 m<sup>2</sup>。沿长边走向共分布有 6 个基坑,其中#2 基坑最大,长 51.6 m,宽 13.7 m,开挖深度 7.9 m,呈不规则矩形分布,见图 1。本文以#2 基坑为例进行阐述。

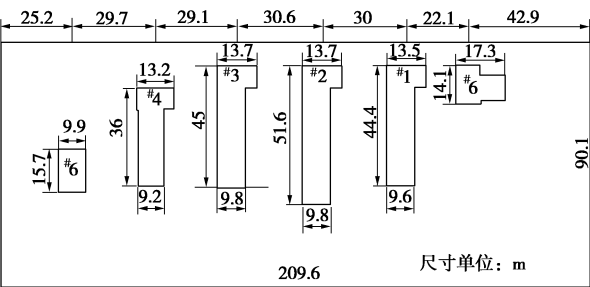


图 1 基坑平面图

Fig. 1 Plan of foundation pit

本工程场地土层自上而下依次为:①杂填土,平均厚度 1.5 m;②粉质黏土,可塑,局部缺失,平均厚度 2 m;③淤泥质粉质黏土,青灰色,软一流塑,饱水,含有机质及腐殖质,平均厚度 15 m;④粉质黏土,黄褐色,硬塑,局部缺失,韧性高,干剪强度高,平均厚度 4 m;⑤粉细砂,灰色,中密状,局部稍密,含粉土及砾石,平均厚度 16 m。其下为砾石层。各土层的性质列于表 1。

表 1 主要土层物理力学性质指标

Table 1 Physico-mechanical indexes for main soil layers					
岩土层名称	含水率 w/%	密度 ρ/(g·cm <sup>-3</sup> )	孔隙比 e	直剪	
				c/kPa	φ/(°)
杂填土		1.85			
粉黏	29.4	1.95	0.809		
淤泥质粉黏	36.5	1.85	1.019	6.9	6.7
粉黏	25.1	2.00	0.706	41.8	17.1
粉细砂	33.5	1.87	0.953	10.6	14.6

基坑所处位置的软土层厚度较深,约 15 m,基坑开挖平均深度 7.9 m,开挖深度范围内均为淤泥质粉质黏土。基坑长边方向两侧相邻基坑距离仅有约 16 m,相互之间施工影响较大;基坑长边最大 51.6 m,需考虑支护过程中的变形影响。根据工程特点,采用常规的基坑支护方式一方面工期较长,需先对软土层进行预处理,然后再边分层开挖边支护;另一方面,投资较大。

2 设计方案

2.1 设计思路

根据本工程特点,在制定深基坑工程方案时着重考虑以下 3 个因素:①在深基坑开挖与侧壁浇注过程中能否同时完成场区地基处理;②尽量采用处理费用相对较低和工期短的实施方案;③合理安排深基坑开挖与场区地基处理的工序,确保深基坑安全和地基加固效果。

结合真空预压加固软弱土地基的经验和遮帘桩原理,在基坑开挖过程中充分利用大气压力的球应力特性,来抵抗土体因基坑开挖产生的侧向土压力;同时,利用深基坑外侧刚性桩对侧向土压力的遮帘效果。最终利用真空护面和遮帘桩的共同作用实现基坑隐形支护。

2.2 支护方案

首先采用水泥石对基坑侧壁土体进行固化,提高其强度的同时起到密封作用;其次在基坑外侧一定范围内布置遮帘管桩;然后对基坑外土体进行真空预压;最后在基坑内布置备用降水井点,以防基坑开挖时坑内积水,见图 2。

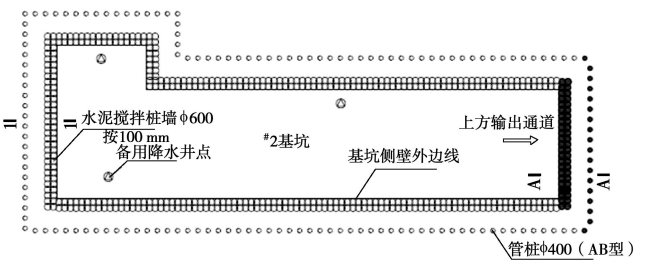


图 2 基坑支护平面布置图

Fig. 2 Arrangement of foundation pit

2.3 设计参数

基坑侧壁的水泥石搅拌桩双排布置,桩径 600 mm,搭接 100 mm,顶标高-3.0 m,长度 9.0 m。排水板正三角形布置,间距 1.0 m,长度 12 m,真空泵按 600 m<sup>2</sup>一台布置。遮帘管桩单排布置,桩间距 900 mm,桩径 400 mm,顶标高-3.0 m,长度 12.0 m。如图 3 所示。

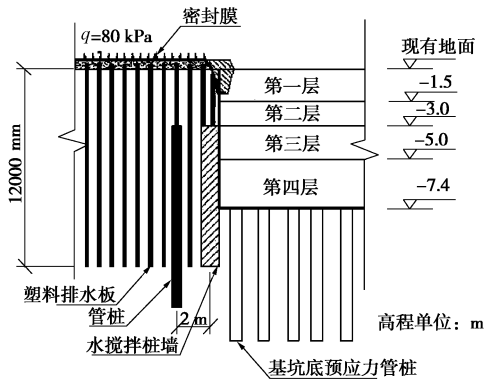


图3 基坑开挖断面布置图

Fig. 3 Excavating section of foundation pit

2.4 安全监测

根据支护方案特点，为严密监视施工过程及信息化管控施工，同时为该工法的后续应用提供可靠的实践依据，在新工法实施的过程中进行安全监测。主要监测内容是基坑外侧土体在真空预压过程中的真空度和基坑开挖过程中，侧壁土体的沉降和侧向位移。真空度采用真空压力表和孔隙水压力计监测，基坑侧壁土体沉降采用沉降盘监测，侧向位移采用测斜管监测。测点的平面布置如图4。

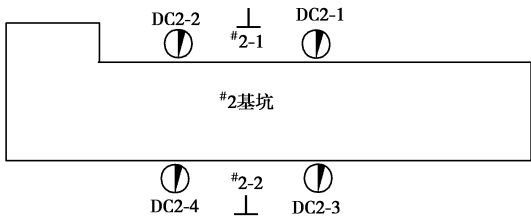


图4 测点平面布置图

Fig. 4 Plan of monitoring points

3 数值分析

为论证“真空帷幕止水与大气压力支护深基坑开挖工法”的可行性，本文通过数值模型对该工法施工过程中的应力应变状态进行模拟分析，全面了解和掌握在深基坑开挖过程中桩与土体的应力应变状态，以便更好的指导工程顺利实施。

3.1 计算理论

工程界用来建立数学模型进行数值分析的土体本构关系有很多，应用最为广泛的有邓肯张非线性模型、剑桥弹塑性模型、“南水”双屈服面模型<sup>[10-12]</sup>等，其中“南水”双屈服面模型由我国沈珠江院士提出，已应用了近40 a，能较好地反映土体的非线性、压硬性、剪胀性和应力引起的各向异性等变形特性，得到了行业内广泛的认可和信服。本次数值分析，以“南水”双屈服面模型为基础，在数值模拟方面，采用比奥固

结理论，非线性和弹塑性模型均采用增量法计算，该方法能方便加卸载的施工过程、土体的固结过程以及孔隙水压力的消散过程。

“南水”双屈服面弹塑性模型由下列双屈服面组成

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= p^2 + r^2 q^2 \\ F_2 &= q^s / p \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

式中， $p$  取  $(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ ， $q = [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2}/\sqrt{2}$ ， $r$  和  $s$  为屈服面参数，这里  $r$  和  $s$  可令其等于2或3。

模型的基本变量为切线杨氏模量  $E_t$  和切线体积比  $\mu_t$ ：

$$\left. \begin{aligned} E_t &= E_i (1 - R_f S_1)^2 \\ E_i &= K P_a (\sigma_3 / p_a)^n \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

其中， $p_a$  为标准大气压力值， $E_i$  为初始切线模量；

$$\mu_t = 2c_d (\sigma_3 / p_a)^{n_d} \frac{E_i R_s}{\sigma_1 - \sigma_3} \frac{1 - R_d}{R_d} \left( 1 - \frac{R_s}{1 - R_s} \frac{1 - R_d}{R_d} \right), \quad (3)$$

式中， $R_s = R_f S_1$ ，而  $S_1$  为应为水平，有

$$S_1 = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}. \quad (4)$$

卸荷情况下，回弹模量按下式计算

$$E_{ur} = K_{ur} P_a (\sigma_3 / P_a)^n. \quad (5)$$

3.2 边界条件

本工法涉及到的边界条件主要是真空排水问题中的水流边界条件，模拟时将真空膜下的水头降低，形成由内向外的水力坡降。采用等价砂墙法，将空间问题变为平面应变问题进行简化计算<sup>[13]</sup>。计算中，把砂墙间距放大，同时将土的水平向渗透系数按间距放大倍数的平方放大，以保持水平向固结系数不变。

本次计算按平面问题考虑，计算范围取半幅断面，计算网格剖分见图5。

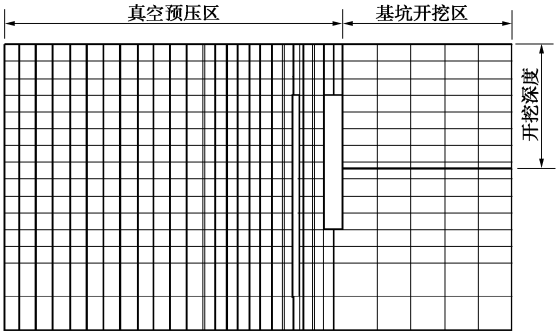


图5 有限元计算网格

Fig. 5 Finite element mesh

3.3 计算结果

膜下真空度维持80 kPa，地面标高0.5 m，分四级开挖，基坑开挖过程中的土体变形如下：

(1) 第一层, 开挖深度 1.5 m。基坑外侧最大累计沉降 352 mm; 基坑最大累计侧向水平位移 25 mm, 指向基坑外侧, 见图 6 与图 7。

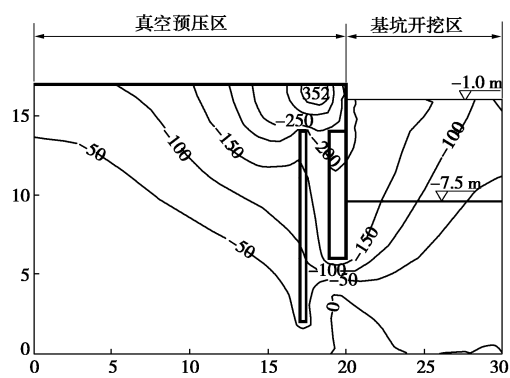


图 6 土体沉降 (第一层开挖)  
Fig. 6 Settlements (after excavating first soil layer)

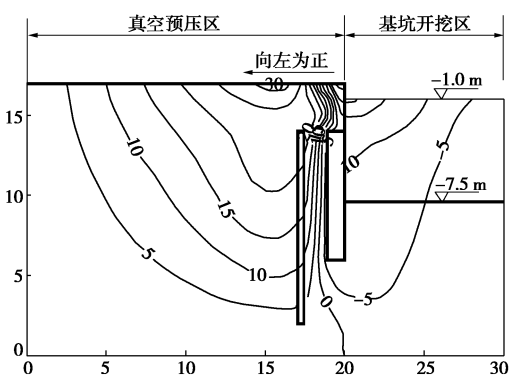


图 7 土体水平位移 (第一层开挖)  
Fig. 7 Horizontal displacements (after excavating first soil layer)

(2) 第二层, 开挖深度 3.5 m。基坑外侧最大累计沉降 400 mm; 基坑最大累计侧向水平位移 20 mm, 指向基坑外侧, 见图 8 与图 9。

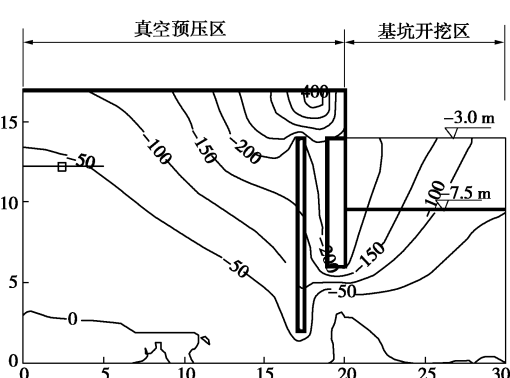


图 8 土体沉降 (第二层开挖)  
Fig. 8 Settlements (after excavating second soil layer)

(3) 第三层, 开挖深度 5.5 m。基坑外侧最大累计沉降 455 mm; 基坑最大累计侧向水平位移 15 mm,

指向基坑外侧, 见图 10 与图 11。

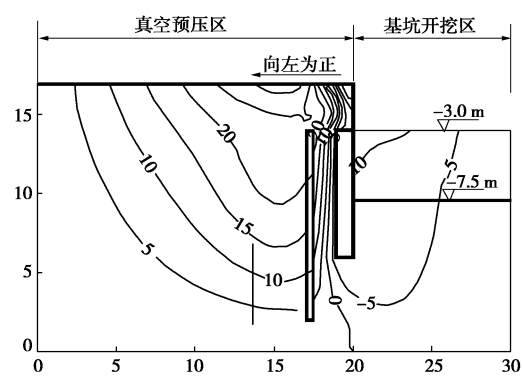


图 9 土体水平位移 (第二层开挖)  
Fig. 9 Horizontal displacements (after excavating second soil layer)

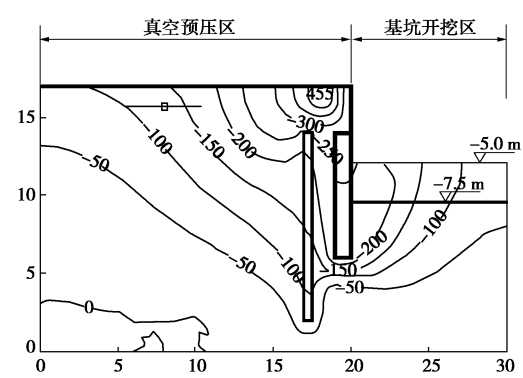


图 10 土体沉降 (第三层开挖)  
Fig. 10 Settlements (after excavating third soil layer)

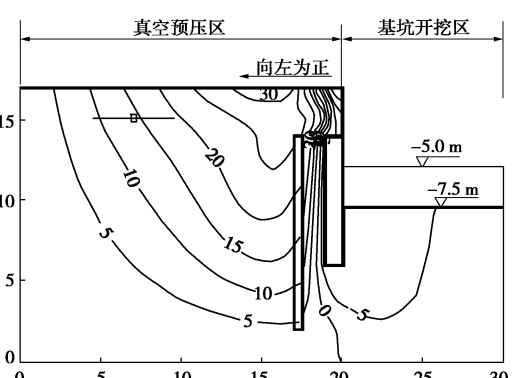


图 11 土体水平位移 (第三层开挖)  
Fig. 11 Horizontal displacements (after excavating third soil layer)

(4) 第四层, 开挖深度 8.0 m 至基坑底部。基坑外侧最大累计沉降 475 mm; 基坑最大累计侧向水平位移 5 mm, 指向基坑内侧, 见图 12 与图 13。

计算结果表明, 基坑开挖过程中基坑侧向变形不大, 采用本方案是完全可行的。

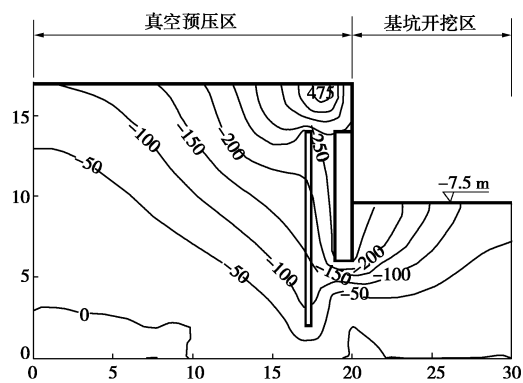


图 12 土体沉降（第四层开挖）  
Fig. 12 Settlements (after excavating fourth soil layer)

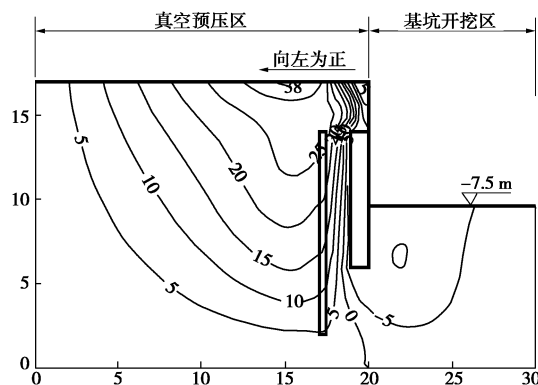


图 13 土体水平位移（第四层开挖）  
Fig. 13 Horizontal displacements (after excavating fourth soil layer)

4 实测结果分析

4.1 现场典型照片

图 14 是基坑开挖前后的现场照片，图中可见，坑内无积水，坑壁侧向变形较小，采用本文工法进行基坑开挖，基坑是安全的。

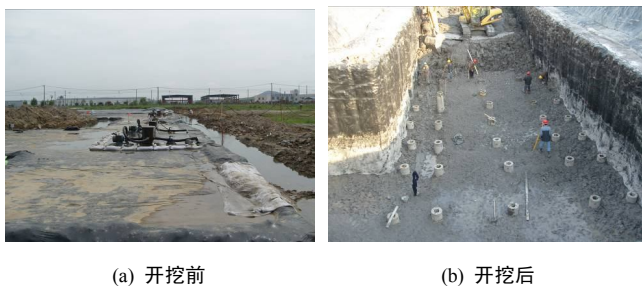


图 14 现场照片  
Fig. 14 Photos of vacuum preloading

4.2 实测数据与数值模拟对比

将现场实测数据，与数值模拟结果进行对比，见表 2。表中数据表明，在基坑开挖过程中，沉降变化现场实测与数值模拟有较好的吻合。

表 2 典型位置地表沉降实测与计算值

Table 2 Measured and calculated settlements at typical positions

位置	开挖阶段地表沉降/mm			
	第一层	第二层	第三层	第四层
#2-1	210	305	350	385
#2-2	260	358	448	452
计算值	352	400	455	475

典型水平位移测点 DC2-3、DC2-4 在不同开挖深度工况下其深层土体水平位移随深度变化的曲线见图 15 和图 16。图中结果表明，基坑开挖初期，坑侧水平位移是指向基坑外侧的；随着基坑开挖深度的增大，其水平位移逐渐向基坑内侧转变，说明作用于侧壁上的大气压力与基坑开挖形成的侧向土压力之间相互作用，在不同开挖深度范围内发挥作用不同，在某一深度水平位移达到平衡。充分表明了，大气压力和遮帘桩的作用。

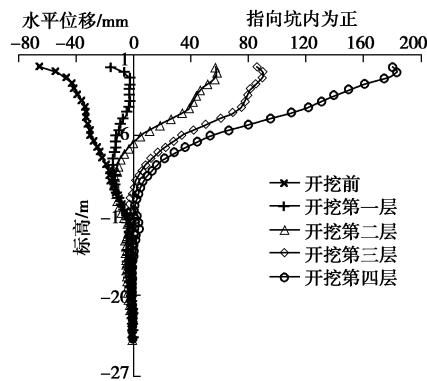


图 15 DC2-3 点深层土体水平位移 - 时间变化曲线  
Fig. 15 Horizontal displacement - time curves at DC2-3

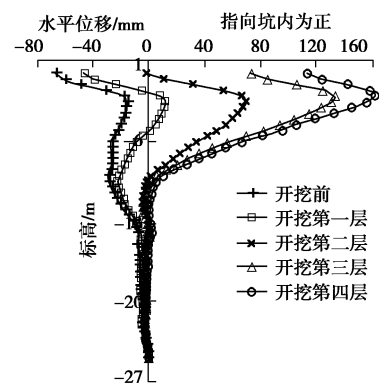


图 16 DC2-4 点深层土体水平位移 - 时间变化曲线  
Fig. 16 Horizontal displacement - time curves at DC2-4

水平位移的发展规律与数值模拟基本一致，水平位移沿深度发展逐渐变小，且均在基坑开挖深度范围内。基坑开挖至设计深度时，其侧壁后的土体水平位移最大值达到 180 mm，位于地表；开挖前后侧壁顶

部位移差 260 mm, 对深基坑而言, 数量值不大。

## 5 结 论

(1)真空帷幕止水与大气压力支护的深基坑开挖工法用于软土地基的基坑支护, 是切实可行的, 可为类似工程的实施提供借鉴, 为深基坑工程技术发展提供新思路。

(2)文中的支护工法将深基坑开挖和场区地基处理有效的结合在一起, 对节省工期、节约造价更有利。

(3)本工法是真空预压理论、遮帘原理和桩土大气共同作用的相互结合, 在理论研究上还有大量工作, 下一步工作将针对这些内容开展。

## 参考文献:

- [1] 周赞良, 付艳斌, 丘建金, 等. 复杂软土地区深基坑内支撑与锚索共同作用初探[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(增刊 2): 396 - 399. (ZHOU Zan-liang, FU Yan-bin, QIU Jian-jin, et al. Interaction between internal bracing and anchor cable of deep foundation pits in complex soft soil areas[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(S2): 396 - 399. (in Chinese))
- [2] 吴旭君, 郑 平, 赵伟滨, 等. 滨海地区软土地层超深基坑支护设计实例[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(增刊 1): 388 - 391. (WU Xu-jun, ZHENG Ping, ZHAO Wei, et al. Support of ultra-deep foundation pits in soft soils in coastal areas[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S1): 388 - 391. (in Chinese))
- [3] 吴西臣, 徐杨青. 深厚软土中超大深基坑支护设计与实践[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(增刊): 404 - 408. (WU Xi-chen, XU Yang-qing. Design and practice of large-scale deep excavations in deep soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(S0): 404 - 408. (in Chinese))
- [4] 娄 炎. 真空预压法加固技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002. (LOU Yan. Vacuum preloading reinforcement technology[M]. Beijing: China Communications Press, 2002. (in Chinese))
- [5] 吴春勇. 真空联合堆载预压软土路基稳定控制与沉降预测[D]. 长春: 吉林大学, 2007. (WU Chun-yong. Stability control and settlement forecast of soft roadbed treated with combined vacuum-surchage preloading[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese))
- [6] 李时亮. 真空预压加固软土地基作用机理分析[J]. 岩土力学, 2008, **29**(2): 479 - 482. (LI Shi-liang. Analysis of action mechanism of treating soft foundation with vacuum preloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(2): 479 - 482. (in Chinese))
- [7] 刘松玉, 韩文君, 章定文, 等. 劈裂真空法加固软土地基试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(4): 591 - 599. (LIU Song-yu, HAN Wen-jun, ZHANG Ding-wen, et al. Field pilot tests on combined method of vacuum preloading and pneumatic fracturing for soft ground improvement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(4): 591 - 599. (in Chinese))
- [8] 李景林, 王剑平, 蔡正银, 等. 遮帘桩方案改造板桩码头离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(8): 978 - 982. (LI Jing-lin, WANG Jian-ping, CAI Zhen-yin, et al. Centrifuge model tests on sheet-piled wharf renovated by barrier pile project[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(8): 978 - 982. (in Chinese))
- [9] 李景林, 蔡正银, 徐光明, 等. 遮帘式板桩码头结构离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(6): 1182 - 1187. (LI Jing-lin, CAI Zhen-yin, XU Guang-ming, et al. Centrifuge modeling tests on covered sheet-piled structure of wharf[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(6): 1182 - 1187. (in Chinese))
- [10] 沈珠江. 软土地基固结变形的弹塑性分析[J]. 中国科学 A 辑, 1985, **11**: 1049 - 1060. (SHEN Zhu-jiang. Elastic-plastic analysis of consolidation deformation in soft soil foundation [J]. Science China A, 1985, **11**: 1049 - 1060. (in Chinese))
- [11] 沈珠江. 结构性黏土的弹塑性损伤模型[J]. 岩土工程学报, 1993, **15**(3): 30 - 38. (SHEN Zhu-jiang. An elasto-plastic damage model for cemented clays[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, **15**(3): 30 - 38. (in Chinese))
- [12] 杨 杰, 李国英, 沈 婷. 复杂地形条件下高面板堆石坝应力变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(4): 775 - 781. (YANG Jie, LI Guo-ying, SHEN Ting. Stress-Strain properties of super-high CFRD under complex terrain conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(4): 775 - 781. (in Chinese))
- [13] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000. (SHEN Zhu-jiang. Theoretical soil mechanics[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2000. (in Chinese))

(责任编辑 黄贤沙)