

# Monitoring and Analysis of Deformation of a Deep Foundation Pit across the River in the Urban Road Engineering

Ti Zhao

Beijing Gonglian Road Tie-Line Co., LTD., Beijing  
Email: 55143279@qq.com

Received: Aug. 7<sup>th</sup>, 2020; accepted: Aug. 20<sup>th</sup>, 2020; published: Aug. 27<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

This paper takes a deep foundation pit project of Guangqu Road in Tongzhou District of Beijing as the background. The recent sediments and Quaternary sediments along the project section are mainly formed by the alluvium of the ancient Chaobaihe River. The strata along the line are mainly clay, silt and sand interbedded deposits. Through the monitoring of the whole precipitation excavation process of the deep foundation groove, the deformation and internal force change of the retaining structure under the working condition are calculated theoretically. Combined with the analysis of the actual monitoring data of the surrounding surface settlement, the deformation of the surrounding building (Yuntong Bridge), the deformation of the underground continuous wall and the settlement of the column inside the grooves, the influence of precipitation excavation on the supporting structure, the surrounding buildings and the surrounding land subsidence in the deep foundation trough across the river are systematically analyzed. Compared with the measured data, it is found that the actual deformation value is larger than the theoretical calculation value.

## Keywords

Deep Foundation Pit across the River, Excavation, Diaphragm Wall, Subsidence

---

## 城市道路穿河深基槽变形监测分析

赵 体

北京市公联公路联络线有限责任公司，北京  
Email: 55143279@qq.com

收稿日期：2020年8月7日；录用日期：2020年8月20日；发布日期：2020年8月27日

## 摘要

本文以北京市广渠路东延工程穿越北运河段为工程背景, 该段沿线地层主要为黏性土、粉土与砂土互层沉积为主, 地下分布多层承压水, 地下水位埋深约为4 m。该段道路以隧道形式通过北运河, 施工为围堰明挖方式进行, 最大开挖深度22 m; 深基槽采用地下连续墙加五道横支撑进行支护。论文首先按照设计工况, 通过理论技术分析了地下连续墙的结构变形和内力变化; 然后对基坑施工过程中基坑支护结构和周围土体变形进行了监测, 对比分析深基槽整个降水开挖过程的监测数据, 发现地连墙实际变形值大于理论计算值, 最大变形位置约在16米深度; 结合每个开挖阶段周围地表沉降、周围建筑(运通桥)变形监测数据, 系统剖析了越河深基槽降水开挖对支护结构、周围建筑物的影响, 结果表明基坑降水开挖对运通桥桥桩产生了影响, 但是变形值小于控制值, 运通桥基本稳定。

## 关键词

穿河深基槽, 降水开挖, 地下连续墙, 沉降

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着我国高速交通建设行业的大力发展, 隧道交通建设的步伐加快, 对隧道工程的建设产生了积极的影响, 越河隧道、湖底隧道以及海底隧道工程都已经十分常见, 未来穿越河底、湖底的隧道工程将会越来越多, 在施工过程中, 也将面临更多新的问题。隧道工程中明挖法是最常见的施工方法, 为了保证施工顺利高效的完成, 除了考虑施工上的安全和结构的稳定性外, 还应更加注意, 在富水地层, 降水开挖对于支护结构、周边建筑物、周围地面等产生的变形影响, 如果降水控制不合理, 土体加固措施不到位, 变形控制不及时, 就会导致支护结构变形, 周围建筑物和地表沉降严重, 因此对于富水地层降水开挖变形研究显得尤为重要。姚燕明(2003)等结合某平行换乘车站深基坑工程, 研究了支撑刚度和预应力对地下连续墙变形的影响, 发现增加内支撑预应力会减小地下连续墙的变形, 但是达到一定量级过后, 对地连墙的变形和弯矩影响很小[1]。王建华(2009)等通过三维有限元建模并结合上海地区大型基坑工程对上海地区支护结构与主体地下结构相结合的深基坑变形性状进行了系统的研究, 发现理论研究结果可以较好的预测维护结构的最大变形, 并分析了基坑开挖引起的周围建筑物三维沉降形态[2]。Zhou (2010)等以上海地铁十号线为工程背景, 基于现场抽水试验, 采用三维有限差分法对渗透率参数反演模拟基坑降水, 发现地下连续墙的深度和抽水管的位置直接影响基坑外的降水和地面沉降[3]。陈志国(2011)以无锡轨道交通一号线某基坑降水开挖工程为背景, 研究了在有无渗流作用的情况下基坑的地表隆起和连续墙变形趋势, 研究表明渗流对基坑工程影响不容忽视, 应当充分重视基坑降水开挖带来的不利影响[4]。廖少明等(2015)在苏州地区大尺度深基坑工程的基础上, 以至少 23 个采用地下连续墙围护的长条形地铁车站基坑的实测数据, 深入剖析了苏州地区不同支护结构、不同形状的大尺度深基坑的变形规律[5]。陈昆等(2016)结合天津富力某大型基坑工程, 对开挖过程中产生的影响和变形情况进行了全程监测和数据分析, 提出仅通过监测手段对施工过程进行控制还远远不够, 需要预先对基坑变形规律做出模拟, 对最大变形值进行预测[6]。薛彦琪(2016)等分析了深基坑开挖卸荷对下卧既有地铁隧道的影响[7]。薛秀丽(2019)

认为基坑开挖前的降水即可引起维护结构变形和周围地层厘米级别的沉降[8]。何绍衡(2019)等分析了地下水渗流对悬挂式止水帷幕基坑变形的影响规律[9]。以往专家学者侧重于城市中心大型基坑工程的开挖影响研究,而对于河底隧道基坑工程的降水开挖影响研究甚少,特别是对邻近桥梁的基坑工程研究,基坑降水开挖对邻近桥墩的影响不容忽视;本文的监测数据分析对类似工程案例提供参考,对同等条件下的工程支护措施提供一定的理论支撑。

## 2. 工程概况

广渠路东延工程(怡乐西路-东六环路)起点与广渠路二期终点,即怡乐西路相交,终点与东六环路相交,线位沿现况通朝大街、运河西大街、运河东大街布置。整个分为地面道路和地下道路两个交通系统,地面道路线路全长 7.6 公里,地下道路全长 6.47 公里。本工程隧道均采用明挖法施工(交叉路口段施工期间采用铺盖法),主体结构采用钢筋混凝土闭合框架及 U 型槽结构。隧道暗埋段主体结构采用四孔闭合框架结构;单孔结构最大内轮廓净宽 14.25 m,净高 6.8 m(车行断面);标准单幅横断面结构全宽 30.90 m,全高 13.10 m;隧道结构主体采用现浇钢筋混凝土结构, C35 防水混凝土。

广渠路东延工程 ZK18 + 400~ZK18 + 500 段道路下穿通州区北运河,该段工程施工分为两期进行,首先修筑围堰拦水,再进行明挖;基坑最大开挖深度为 22 m,基坑宽度为 30.8 m;基坑支护结构为地下连续墙加五道横支撑,其中第一道横支撑为混凝土支撑,其余四道为钢管横支撑,地连墙厚度 1 m。

### 2.1. 工程地质条件

本工程段沿线新近沉积物及第四纪沉积物主要由古潮白河冲积形成。沿线地层主要为黏性土、粉土与砂土互层沉积为主。地层沉积物的组构、空间相变规律具有较为明显的区域性特征和过渡、渐变性,并具有典型的多沉积旋回的特征。

根据勘察资料所揭示的地层规律表明,工程场区地面以下 70 m 深度范围内地层按其沉积年代及工程性质可分为人工堆积层、新近沉积层及第四纪沉积层三大类,具体各土层岩性及其物理力学参数如表 1 所示。

Table 1. Physical and mechanical parameters of rock and soil

表 1. 岩土体物理力学参数

地层编号	岩土名称	描述	平均厚度(m)	含水量 w(%)	天然密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	饱和度 $S_r$	孔隙比 $e$	塑限 $w_p$ (%)	塑性 $I_p$	液性指数 $I_L$	快剪内聚力	快剪内摩擦角
① <sub>1</sub>	人工堆积土	粉土	5.55	39.9	1.72	0.90	1.21	25.3	18.4	0.79	20	4.0
① <sub>2</sub>		杂填土	4.7	26.8	1.85	0.97	0.76	19.6	14.2	0.52	28	12.3
① <sub>3</sub>		细砂	4.5	22.2	1.95	0.81	0.74	21.6	9.7	0.06	24	29.1
②	新近沉积层	粉质黏土	4.95	30.1	1.92	0.98	0.82	25.4	6.5	0.72	16	28.5
③		细砂	2.95	25.3	1.96	0.93	0.64	23.1	7.1	0.30	15	32.45
④		粉土	1.8	27.2	1.92	0.92	0.76	22.9	15.1	0.29	40	18.8
⑤		中砂	4.43	23.05	1.95	0.89	0.70	19.80	9.05	0.36	15	30.0
⑥	第四纪沉积层	粉土	2.75	24.2	1.98	0.94	0.70	21.7	14.6	0.17	53	15.8
⑦		粉质黏土	6.75	20.0	2.03	0.90	0.61	19.7	7.8	0.02	15	30.0
⑧		粉质黏土	6.4	21.7	1.96	0.86	0.68	19.0	12.6	0.21	30	10.0
⑨		粉土	8.85	24.00	1.95	0.91	0.71	23.50	6.20	0.09	10	30.0

## 2.2. 水文地质条件

北京通州区地表水系较发育，属海河流域潮白河、北运河两大水系。现场北运河河面宽约 200 m，河底有衬砌，项目勘察期间实测水面标高 17.00 m，水深约 2.5~3.0 m (北运河水位受人工干预变化较大)。该河段 10 年一遇设计洪水位为 19.76 m，50 年一遇设计洪水位为 22.77 m。现状运通桥位于拟建线路北侧，现正常使用中。北运河对本工程段第一层地下水有一定的补给关系，对相应部位基坑的设计及施工均有较大影响。

## 3. 深基槽开挖支护方案设计

### 3.1. 地下连续墙 + 内支撑支护结构设计

深基槽采用地下连续墙+内支撑系统进行围护，地连墙兼做止水帷幕，墙底进入粉质黏土不小于 2 m 作为落底式止水帷幕。基坑底 5 m 深范围内，采用  $\Phi 850@600$  三轴水泥土搅拌桩封底。基坑内设疏干井，坑外设水位监测井及应急降压井。

北运河西岸河堤处基坑深度为 21 m~30 m，河道处深度为 20.3~21 m，东岸河堤处基坑深度为 20.3 m~25.5 m。北运河西岸，主体结构右侧设置配电室及排水泵房一处，具体桩号里程为 Z2K18 + 210~Z2K18 + 258 m，长 48 m。配电室段基坑与主线等深，长 30 m；泵房段基坑深度为 32.8 m，长 18 m。基坑标准段宽 30.7 m，配电室及排水泵房段宽 39.7 m。为减少基坑开挖对运通桥的不利影响，在桥桩与基坑侧壁间，设一排隔离桩；桩与基坑地连墙间土体，采用  $\Phi 850@600$  三轴水泥土搅拌桩加固。

### 3.2. 围护结构计算结果

围护结构内力分析考虑沿道路纵向取单位长度按弹性地基梁计算。按内部结构的施工过程和完成后的使用阶段等工况进行内力计算。围护和内部结构按平面应变问题考虑，沿结构纵向截取 1 m 单位宽度，分别计算其内力和变形。围护结构计算简图如图 1 所示。

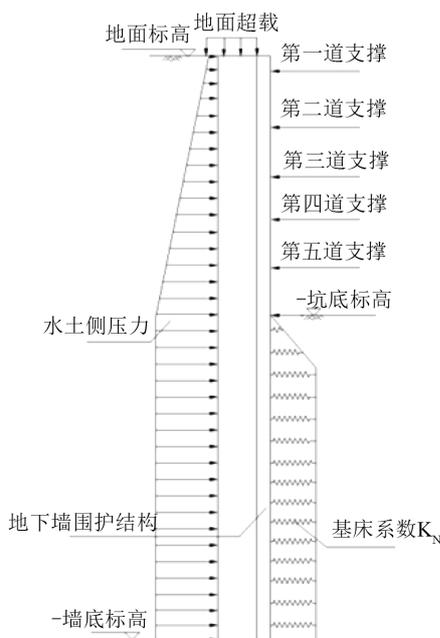
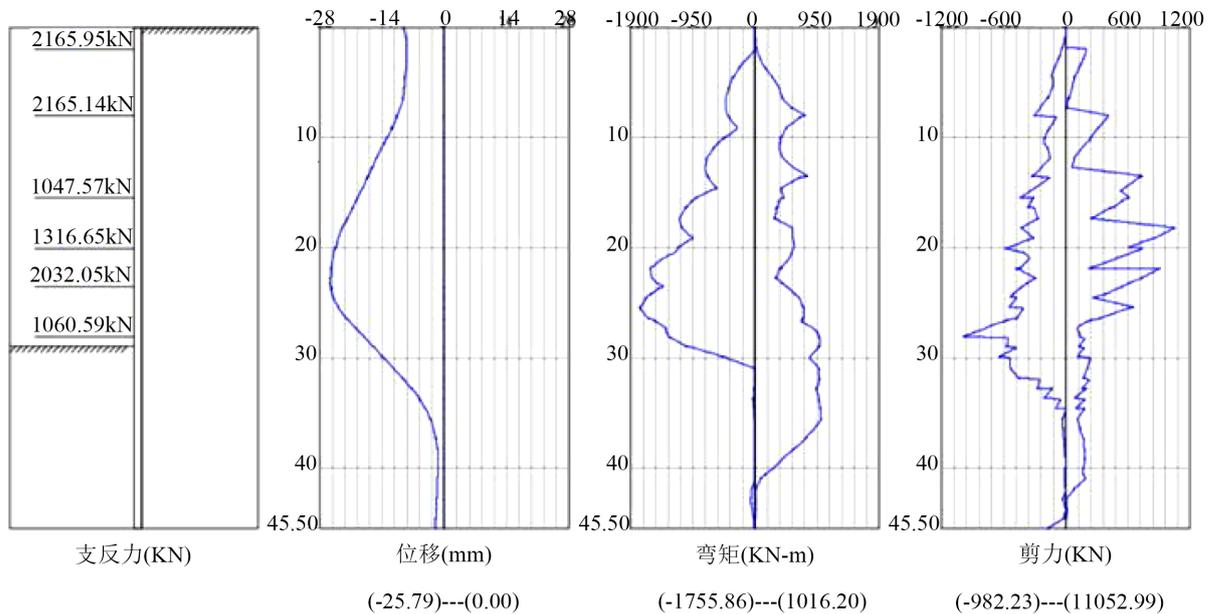


Figure 1. Calculation diagram of the retaining structure

图 1. 围护结构计算简图

围护结构的入土深度考虑所处环境条件、地质条件、围护结构的抗隆起、抗滑移、抗倾覆及稳定性等因素，结合止水帷幕需要确定。维护结构位移和内力包络线计算结果如图 2 所示。



**Figure 2.** Envelope diagram of displacement and internal force of the supporting structure  
**图 2.** 支护结构位移和内力包络图

根据不同工况下内力变形数据分析，地连墙侧向位移随深度加深而逐渐增大，最大位移发生在 24 米深度处，最大位移为 25.91 mm；24 米深度以下，位移则逐渐变小，形成一个“鼓包”形。由于第一层支护为混凝土支撑，反应混凝土支撑对地连墙的内支撑作用明显。混凝土支撑对地连墙的弯矩和剪力均有较大的影响。地连墙弯矩依然呈现中间大，上下小的“鼓包”形状，地连墙内侧最大弯矩发生在 26 米深度处，最大弯矩为 1755.86 kN/m；从 26 米到 31 米深度弯矩从最大值逐渐降为零。地连墙外侧弯矩变化也呈现“鼓包”形，但是弯矩值一直持续到地连墙底部，最大弯矩在 37.5 米深度处，为 1016.2 kN/m。地连墙所受剪力变化与弯矩变化规律基本一致，方向相同。

## 4. 现场监测数据分析

### 4.1. 监测点布置

为了系统研究基坑开挖变形规律及北侧运通桥的变形情况，对地连墙两侧土压力、地连墙变形、内支撑轴力、周围地层变形、运通桥沉降和水平位移等做了详细的监测布置。图 3 为监测点布置平面图，图中 C1~C10 为运通桥沉降和水平位移监测点；地连墙水平变形主要分为 d1~d6 号等六个监测点，d1、d2、d3 为北侧三个地连墙变形监测点，d4、d5、d6 为南侧三个地连墙变形监测点；由于施工和监测冲突的原因，土压力监测计只有三个采集到了数据，分别为 T1 对应 d1 号地连墙处土压力，T2 对应 d4 号地连墙处土压力，T3 对应 d5 号地连墙处土压力。

### 4.2. 地连墙变形监测结果分析

基坑本身的稳定性和变形情况都可以通过地连墙的变形情况来体现，基坑降水开挖深度不同，地连墙外侧所受的土压力则不同；施工工序安排不一样，内支撑的安装数量变化，地连墙的变形大小也会不

同。所以，根据施工阶段绘制相应的地连墙水平变形曲线图，可以很好的反应基坑变形情况。本节整理了北侧 d3 和南侧 d6 等两个监测点位的地连墙随五个开挖阶段的水平变形数据，绘制了如图 4 的地连墙水平变形曲线图。

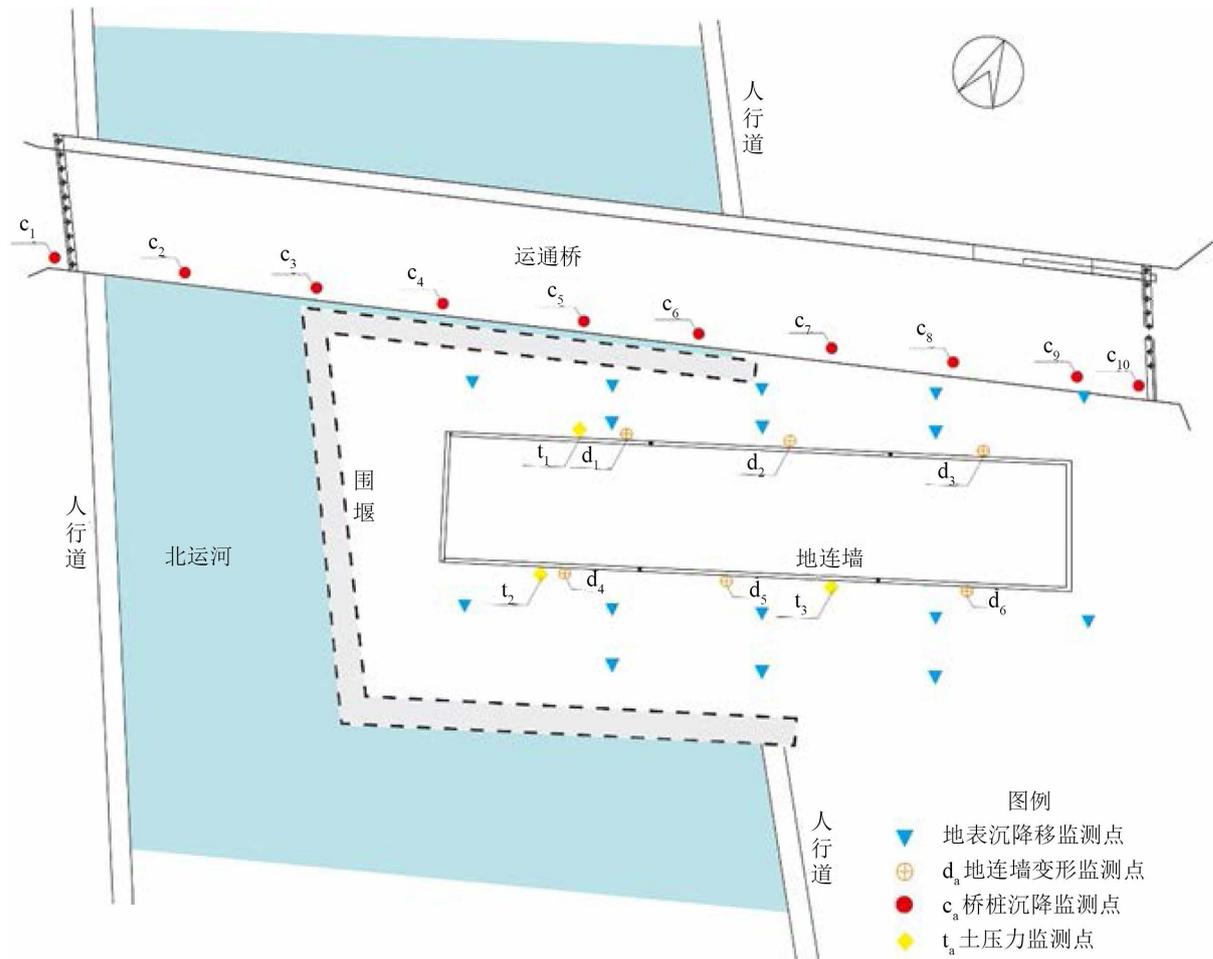


Figure 3. Layout plan of the monitoring points  
图 3. 监测布置平面图

由图 4 可知地连墙均发生了向基坑内侧的形变，从墙顶到墙底变形规律为先增大后减小的“鼓包”状变形。d3、d6 号地连墙最大水平变形值分别为 5.8 cm、6 cm，约在 14 米深度处；随着基坑开挖，地连墙水平位移逐渐增大，而且基坑开挖至最底下一层时，地连墙水平变形速度急剧增大；从图中还可以看出，随着基坑开挖深度的加深，地连墙向基坑内侧变形值越大，墙顶逐渐发生向基坑外侧的偏移形变，这可能跟基坑出土过后，由于第一道砼支撑的支撑作用，但是砼支撑往下的钢支撑未做到“随挖随撑”有关。

#### 4.3. 地连墙两侧土压力监测结果分析

随着基坑的开挖，基坑内部的土压力逐渐减小直至消失，而监测地连墙外侧的土压力变化是分析支护墙体受力的关键因素之一。根据监测数据绘制了地连墙两侧土压力变化和土压力随深度的分布曲线图，如图 5 和图 6 所示，图中  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  分别对应 d1、d2、d3 号地连墙外侧所受土压力。

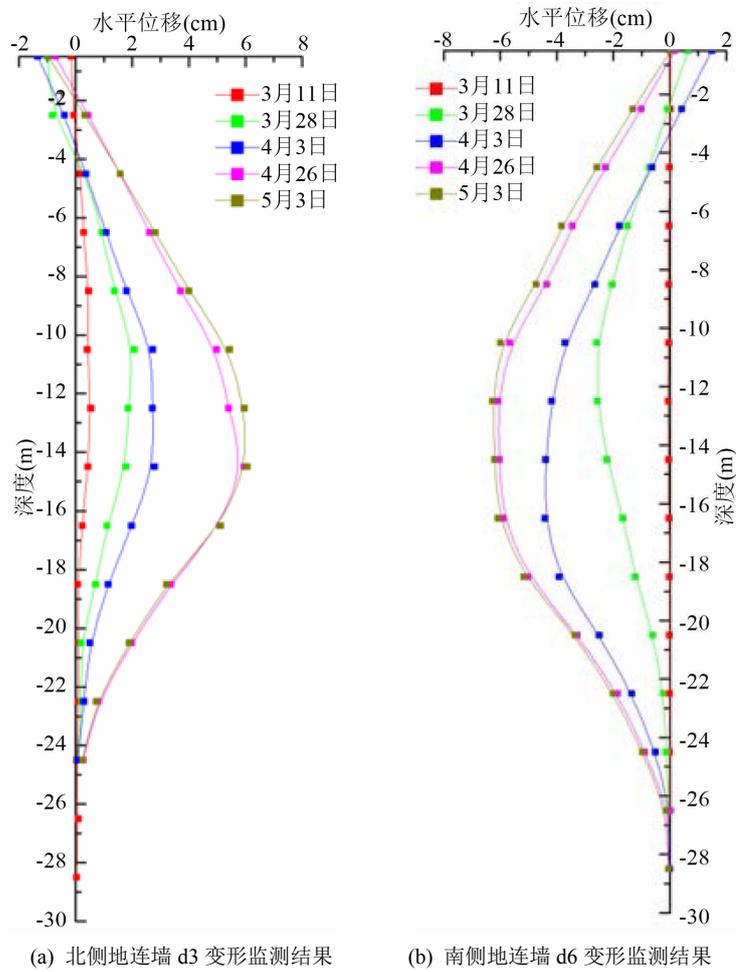


Figure 4. Deformation monitoring results of diaphragm wall during excavation

图 4. 开挖期间地连墙变形监测结果

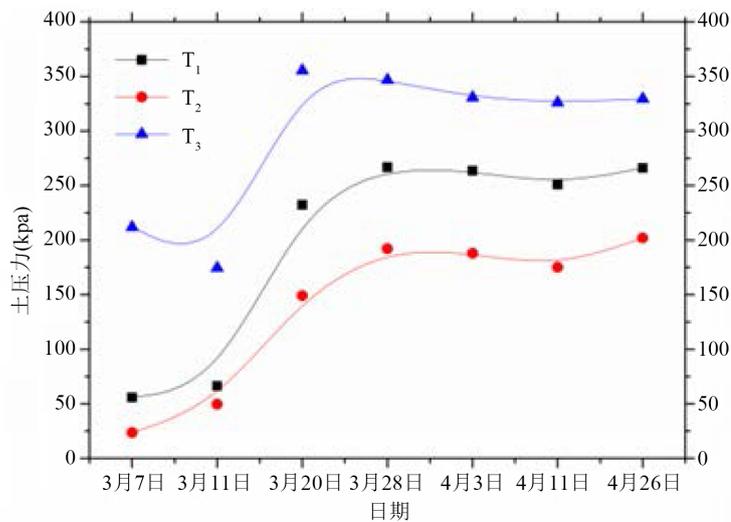


Figure 5. Curve of earth pressure during excavation

图 5. 开挖阶段土压力变化

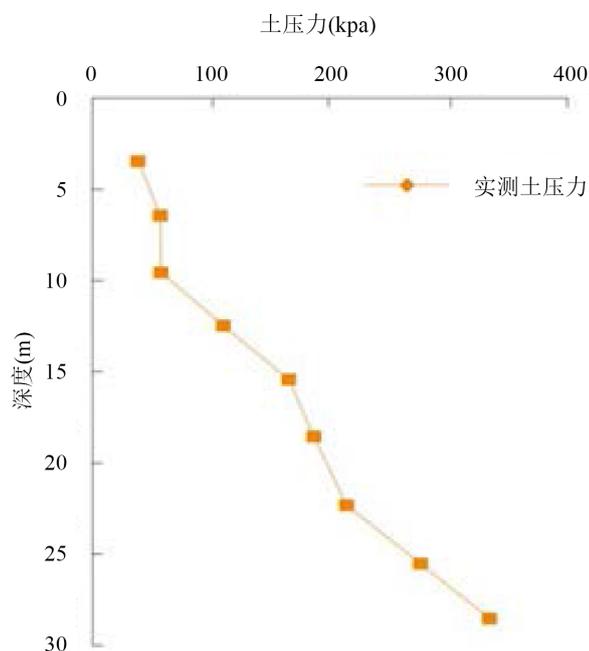


Figure 6. Distribution of earth pressure with depth  
图 6. 土压力随深度的变化分布

由上图可知开挖期间地连墙两侧土压力变化随开挖深度的加深而增大，最后土压力值趋于平稳。开挖完成后，最大土压力值约为 350 kPa，最小土压力约为 195 kPa；开挖完成后，地连墙受土压力分布随深度呈三角形线性递增，地连墙顶部受到的土压力值最小，靠近基坑底部的地连墙受到土压力值最大，最大土压力约为 320 kPa。

#### 4.4. 运通桥变形监测结果分析

根据运通桥的情况，自西向东分别在桥墩处设置监测点位，监测数据显示了每个监测点位桥墩随开挖阶段的竖向和水平位移，桥桩竖向和水平位移曲线如图 7 和图 8 所示。由上图 7 和图 8 可知，基坑开挖导致运通桥发生了不均匀沉降，中间部位桥桩(离开挖中心较近)沉降值最大，最大沉降值为 21 mm，相邻测点最大不均匀沉降值约为 6 mm。桥东西两端离开挖中心最远，沉降也最小，约为 3 mm。运通桥最大水平位移不超过 2.5 mm，受运河水位和天气等各方面因素影响，运通桥水平位置一直处于“波动”状态。但是水平位移值远小于控制标准值 30 mm，运通桥保护较好。

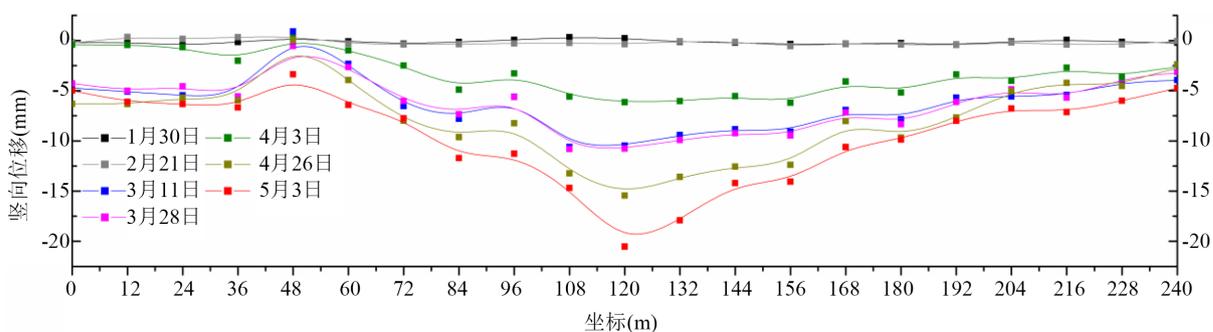


Figure 7. Vertical settlement curve of pile top of Yuntong Bridge  
图 7. 桥桩顶部竖向沉降曲线

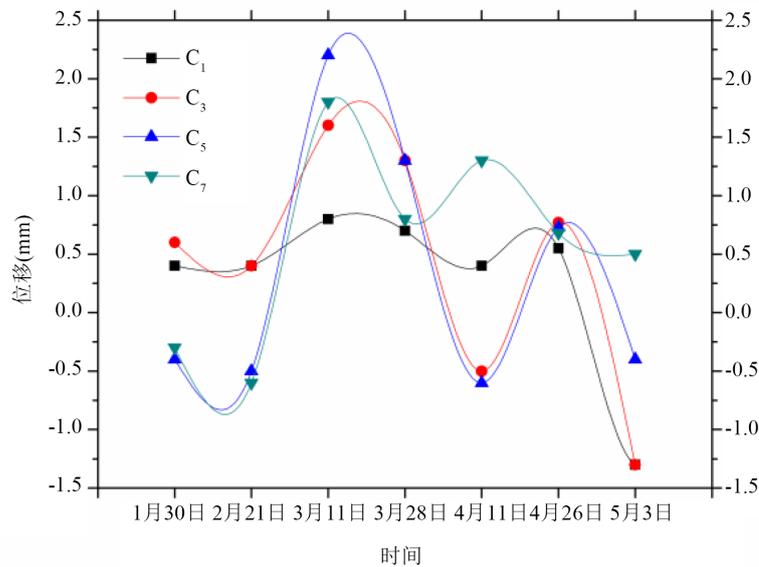


Figure 8. Horizontal displacement curve of Yuntong Bridge  
图 8. 运通桥水平位移曲线

## 5. 结论

本文介绍了北京市广渠路东延工程深基坑的工程概况、工程地质和水文地质条件、基坑的施工方案等。通过分析基坑降水开挖过程中的监测数据,对基坑开挖过程中地连墙外侧土压力、地连墙变形、基坑附件运通桥桥桩变形等规律进行了讨论,通过对监测数据的分析可以发现:

1) 基坑开挖过程中,地连墙两侧土压力随开挖深度增加线性增大,基坑开挖完成后趋于平稳,地连墙外侧土压力竖向分布随深度呈三角形线性递增,地连墙顶部受到的土压力值最小,靠近基坑底部的地连墙受到土压力值最大,最大土压力约为 320 kPa。

2) 地连墙均发生了向基坑内侧的形变,从墙顶到墙底变形规律为先增大后减小,最大形变位置约在 16 米深度;随着基坑开挖深度的加深,地连墙向基坑内侧变形值越大,墙顶逐渐发生向基坑外侧的偏移形变。

3) 桥桩沉降有均匀沉降和不均匀沉降两种,不均匀沉降对桥身危险性大,可能会引起桥身的结构破坏,在所有监测点中,运通桥最大沉降值约为 20 mm,小于控制值 30 mm;相邻测点最大不均匀沉降约为 6 mm,小于控制值 8 mm。水平位移值约为 2.5 mm,说明基坑降水开挖对运通桥桥桩产生了影响,但是变形值小于控制值,运通桥基本稳定。

## 参考文献

- [1] 姚燕明,周顺华,孙巍,等. 支撑刚度及预加轴力对基坑变形和内力的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2003, 23(4): 401-404.
- [2] 王建华,徐中华,王卫东. 支护结构与主体地下结构相结合的深基坑变形特性分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(12): 1899-1903.
- [3] Zhou, N., Vermeer, P.A., et al. (2010) Numerical Simulation of Deep Foundation Pit Dewatering and Optimization of Controlling Land Subsidence. *Engineering Geology*, **114**, 251-260.  
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.05.002>
- [4] 陈志国. 地下水渗流对地铁车站基坑稳定性影响[J]. 西部探矿工程, 2011, 23(4): 10-14.
- [5] 廖少明,魏仕锋,谭勇,等. 苏州地区大尺度深基坑变形性状实测分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 458-469.

- 
- [6] 陈昆, 闫澍旺, 孙立强, 等. 开挖卸荷状态下深基坑变形特性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 1075-1082.
- [7] 薛彦琪, 张可能, 胡晓军. 深基坑开挖卸荷对下卧既有地铁隧道的影响分析[J]. 工程地质学报, 2016, 24(6): 1230-1239.
- [8] 薛秀丽, 曾超峰, 郑刚. 开挖前降水引发基坑变形特性及控制方法[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(S1): 492-497.
- [9] 何绍衡, 夏唐代, 李连祥. 地下水渗流对悬挂式止水帷幕基坑变形影响[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2019, 53(4): 713-723.