

北京不同区域明挖基坑地表沉降变形特征研究

张建全, 张克利, 程贵方

Characteristics of surface settlement and deformation of open cut foundation pit in different areas of Beijing

ZHANG Jianquan, ZHANG Keli, and CHENG Guifang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202101018>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

盾构地铁隧道穿越既有铁路桥的沉降分析

An analysis of the settlement of a shield tunnel passing under the operating railway bridge

于德海, 舒娇娇, 秦凯凯 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 148–152

基于离心机和数值模拟的软硬互层反倾层状岩质边坡变形特征分析

An analysis of the deformation characteristics of soft–hard interbedded anti–tilting layered rock slope based on centrifuge and numerical simulation

李彦奇, 黄达, 孟秋杰 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 141–150

基于InSAR技术的缓倾煤层开采诱发顺层岩体地表变形模式研究

A study of deformation mode and formation mechanism of abedding landslide induced by mining of gently inclined coal seam based on InSAR technology

姚佳明, 姚鑫, 陈剑, 李凌婧, 任开, 刘星洪 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 135–146

北京地铁新宫站基坑复合支护过渡部位的冗余度设计

Research on redundancy design of the transition section of composite pit support in the foundation pit of the Xingong Station of the Beijing subway

闫建龙, 闫亚斌, 沈宇鹏, 王潇 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 162–162

深厚软土地区基坑墙底抗隆起稳定性Prandtl计算式的讨论

A discussion of the Prandtl calculation formula for anti–uplift stability of the bottom of a foundation pit wall in deep soft soil areas

阳吉宝 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 61–69

西安地裂缝地段浅埋暗挖地铁隧道施工沉降规律

徐明祥, 黄强兵, 王庆兵, 李明镔, 雷建

水文地质工程地质. 2020, 47(1): 161–170



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202101018

北京不同区域明挖基坑地表沉降变形特征研究

张建全^{1,2}, 张克利², 程贵方³

(1. 城市轨道交通深基坑岩土工程北京市重点实验室, 北京 100101; 2. 北京城建勘测设计研究院有限责任公司, 北京 100101; 3. 北京城建轨道交通建设工程有限公司, 北京 100101)

摘要: 基于近年北京地区不同区域大量明挖基坑工程地表沉降实测数据, 利用理论计算与回归分析方法, 对预测地表沉降的典型曲线“四点折线法”及其模型参数(斜率 K 及截距 b)进行了反演分析, 获得了不同区域地质条件下明挖基坑地表沉降预测经验参数; 通过对沉降数据及经验参数的统计分析, 总结了地表沉降区域变化规律, 明确了参数的取值范围, 并利用实测数据验证了经验参数的预测精度。结果显示: 北京西部区域最大沉降点距离围护结构的水平距离相对中、东部偏大, 约为基坑深度的 30%, 中、东部区域相对较小, 均约为基坑深度的 26%; 地表沉降曲线形态随着区域地质条件不同而不同, 四点折线图第一段直线 AB 的斜率 K 的绝对值由西向东依次增大, 表明东部粉细砂地层比西部砂卵石地层沉降坡度更加明显, 第二段直线 BC 的斜率 K 的绝对值东部区域比西部区域反而较小, 这表明东部区域的沉降影响范围较大; 参数 b_{AB} 绝对值均值由西向东依次增大, 表明东部粉质黏土、细沙层相对西部砂卵石地层的桩侧土体沉降值更大, 约为最大沉降值的 31%, 中部区域为 21%, 西部区域仅为 16%。该研究成果将为本地区明挖基坑工程地表变形预测和安全风险控制提供重要的参考依据。

关键词: 明挖基坑; 地表沉降; 预测参数; 风险控制; 变形特征

中图分类号: TU433

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)06-0131-09

Characteristics of surface settlement and deformation of open cut foundation pit in different areas of Beijing

ZHANG Jianquan^{1,2}, ZHANG Keli², CHENG Guifang³

(1. *Beijing Key Laboratory of Deep Foundation Pit Geotechnical Engineering of Rail Transit, Beijing 100101, China*; 2. *Beijing Urban Construction Exploration & Surveying Design Research Institute Co. Ltd., Beijing 100101, China*; 3. *Beijing Urban Rail Transit Construction Engineering Co. Ltd., Beijing 100101, China*)

Abstract: Based on a large number of measured data of surface settlement of open cut foundation pit engineering in different areas of Beijing in recent years, the typical curve "Four Point Broken Line Method" and its model parameters (slope K and intercept b) for predicting surface settlement are inversely analyzed by using theoretical calculation and regression analysis methods, and the empirical parameters for predicting surface settlement of open cut foundation pit under different regional geological conditions are obtained. Based on the statistical analyses of data and empirical parameters, the regional variation law of surface subsidence is summarized, and the range of parameters is defined. The prediction accuracy of empirical parameters is verified by using the measured data. The results show that the horizontal distance between the maximum settlement point and the retaining structure in the west of Beijing is larger than those in the middle and east of Beijing, which is about 30% of the

收稿日期: 2021-01-10; 修订日期: 2021-03-30

基金项目: 2017 年北京市地方标准制修订计划项目(建设工程第三方监测技术规程子课题, 20171020)

第一作者: 张建全(1963-), 男, 博士, 总工程师, 从事轨道交通工程、地下工程设计与研究工作。E-mail: 13701061228@163.com

通讯作者: 张克利(1992-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事岩土工程、地下工程研究工作。E-mail: 1010295820@qq.com

depth of the foundation pit, while those in the middle and east of Beijing is relatively small, which are about 26% of the depth of the foundation pit. The surface settlement curve shape varies with the regional geological conditions, and the absolute value of the slope K of the first line AB of the four point broken line graph increases from west to east, showing the settlement slope of the east silty fine sand is more obvious than that of the west sandy cobble, and the absolute value of the slope K of the second straight line BC in the east is smaller than that in the west, indicating that the settlement influence range of the east is larger, the absolute value of the parameter b_{AB} increases from west to east, indicating that the settlement value of the pile side soil of the silty clay and fine sand in the east is larger than that of the sandy pebble in the west. It is about 31% of the maximum settlement, 21% in the central region and only 16% in the western region. The research results will provide an important reference for surface deformation prediction and safety risk control of open cut foundation pit engineering in this region.

Keywords: open cut foundation pit; surface settlement; prediction parameters; risk control; deformation characteristics

随着我国社会经济的快速发展,城市建设工程不断涌现,深大基坑工程越来越多。基坑工程施工引发的路面沉降、周围建(构)筑物及地下管线等环境对象的过大变形或破坏越来越严重,从而引发了建设者及社会的高度关注。因此,研究基坑开挖引起的地表沉降预测方法及控制措施具有重要意义。目前对地下工程施工引起的地表沉降规律^[1-5]与预测研究成果显著,预测方法主要包括理论解析法、有限元法^[6-7]、反分析法^[8-9]及经验估算法。国内学者对经验估算法做了大量的研究工作,张尚根^[10]运用偏态分布密度函数的地表沉降估算方法对深基坑开挖引起的地表沉降进行了计算预测研究,并提出了周围建筑物变形的计算方法以及破坏程度的评价指标。王卫东等^[11]利用多个工程的监测数据分析了基坑开挖引起的周围地面沉降曲线的预估方法。张建新等^[12]研究了不同的基坑开挖方法对地连墙和墙后土体位移变化的影响规律。孙曦源^[13]对于板式支护体系,采用经验方法预估基坑开挖引起的围护墙后的地表沉降可采用三点折线法确定地表沉降的影响范围、最大沉降的位置及沉降曲线分布。刘建航等^[14]基于线弹性理论的解析式在预测黏性土基坑地表沉降最大值位置方面与实测数据较为吻合。胡之锋等^[15]在总结前人研究成果基础上设定墙后凹槽型地表沉降曲线为正态分布概率密度函数,并通过工程监测数据进行了验证。吴锋波^[16]等对北京市轨道交通 80 个明挖法基坑工程实测结果进行统计分析,结果表明基坑工程周边地表最大变形的实测结果分布形态为正态分布或半整体分布,地表沉降变形值较大,最大地表沉降的平均值约为砂卵石地区 $0.11H$ (H 为开挖深度),黏性土地区 $0.20H$ 。

本文基于近些年北京地区明挖基坑工程海量实测数据,利用线性回归分析方法,对四点折线法经验公式参数进行了反演分析。根据工程所处地层的岩土力学特性,将北京地区实测数据划分为西、中、东 3 个区域,再分别对反算得到的参数进行统计分析,使四点折线参数取值范围更加精确,最终给出了北京地区四点折线法经验公式参数体系,并说明了实际使用中参数选取的基本原则。除此之外,利用经验参数预测了不同区域不同基坑工程的地表沉降预测值,并与实测数据进行了对比,验证了运用所得预测参数进行本地区明挖工程地面沉降预测的适用性。

1 预测模型的回归分析方法

1.1 基坑工程周围地表沉降曲线类型

基坑开挖过程中,降水引起的土体排水固结沉降和支护结构水平位移是基坑周围地表沉降的两大主要因素^[17]。基坑周围地表沉降曲线形式可概括为三角形沉降和凹槽型沉降两大类型(图 1)。当基坑采用悬臂式支护或支护桩变形较大时,地表最大沉降点会发生在基坑边缘处,沉降曲线大致呈三角形分布(图 1a)。为提高整体稳定性,深基坑工程大多采用多道内支撑,由于受内支撑的约束,支护桩外侧的土体与支护桩接触面之间的摩擦力可在一定程度上制约土体下沉,沉降曲线大致呈凹槽型分布(图 1b)。目前深大基坑工程周围地表沉降曲线形式以凹槽型沉降类型为主。

1.2 四点折线法预测模型

对于桩围护结构加内支撑支护体系的基坑工程,其周围地表沉降曲线形式基本都是凹槽型,沉降曲线

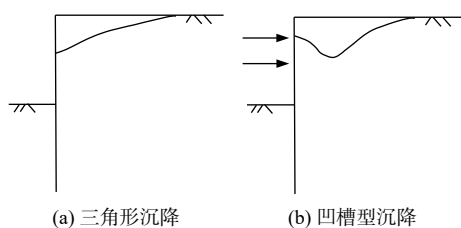


图 1 地表沉降曲线基本形态

Fig. 1 Basic form of surface subsidence curve

由桩顶地面开始到最大沉降点、经沉降曲线拐点至最小沉降点止,若将这四点用直线段进行连接即构成四点折线法沉降曲线(图2)。因此,根据明挖基坑周围地表沉降监测断面的实测沉降数据、相对位置关系及沉降曲线,可拟合计算出四点折线各线段直线方程的两个特征的数即斜率 K 与截距 b ,从而构建不同地质条件下的地表沉降预测模型及参数,如式(1)所示。

$$S(X) = \begin{cases} K_{AB}X + b_{AB}, & 0 \leq X < M \\ K_{BC}X + b_{BC}, & M \leq X < L \\ K_{CD}X + b_{CD}, & X \geq L \end{cases} \quad (1)$$

式中: $S(X)$ ——地表监测断面任意点沉降预测值与最大沉降值的比值;

X ——地表监测点距围护结构外侧距离 d 与基坑深度 H 的比值;

M ——最大沉降监测点距围护结构外侧的距离与基坑深度比值;

L ——沉降曲线拐点距围护结构外侧距离与基坑深度比值;

K 、 b ——四点折线图中直线方程的斜率、截距。

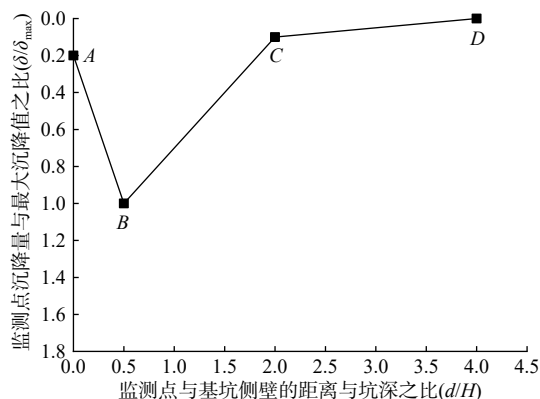


图 2 围护结构外侧地表沉降四点折线图

Fig. 2 Four point broken line of ground settlement on the outside of enclosure structure

1.3 四点折线法计算原理

图2以地表沉降监测点距围护墙外侧的距离与基坑开挖深度的比值(d/H)为横坐标,以监测点沉降量

与最大沉降量的比值($\delta/\delta_{\max}$)为纵坐标,建立二维坐标系,再通过确定 $A(0.00, \delta_1/\delta_{\max})$ 、 $B(d_b/H, 1.00)$ 、 $C(d_c/H, 0.10)$ 和 $D(d_d/H, 0.00)$ 四点对应坐标来计算各直线段的斜率、截距及方程。具体过程是根据监测断面沉降点位置及实测数据先确定出 A 点与 B 点的坐标,选取沉降值与最大沉降量比值最接近0.1的测点,通过该点与 B 点的坐标提取一元一次函数,再定义一元一次函数的因变量 y 为0.1来反算出 C 点的横坐标值,至此求得了 C 点二维坐标。由 C 点坐标以及监测断面的最远测点的坐标来建立新的一元一次函数,利用相同方法求得 D 点的二维坐标,至此便获得了预估曲线的四点坐标。通过分析计算3个直线段的一元一次函数的斜率 K 与截距 b ,构建四点折线法预测模型参数体系。

2 北京地区基坑工程地表沉降预测参数反演分析

2.1 区域划分

地表沉降变形与工程地质条件密切相关^[18],因此按照地质条件的不同将北京地区划分为3个典型地质区域,分别选取地质条件相近且支护形式相同的基坑实测数据进行统计分析。

北京地质地貌由西山到平原可以分为山麓坡积裙、台地、洪积扇裙、冲积扇、阶地、冲洪积缓倾斜平原、河床及漫滩、砂质决口扇及沙丘、洼地等^[19]。由于北京市区处于永定河冲洪积扇复杂地质区域,东西区域地质条件差异性较大。北京西部区域主要地层岩性是砂卵石、圆砾、中粗砂,地层密实、压缩性低,一般粒径2~15 mm,最大粒径200 mm,分布不连续。中部区域主要地层岩性为中粗砂、粉质黏土、粉细砂,褐黄色—灰黄色,密实,饱和,部分含云母、石英、长石颗粒,夹杂少量砾石,透镜体分布,粒径0.5~5.0 mm。东部区域地层主要岩性是黏质粉土、粉质黏土、粉细砂,褐黄色—灰色,密实,低压缩性,部分含云母、有机物,连续分布,粒径多为0.005~0.1 mm。因此,可将北京地区分为以砂卵石地层为主的西部区域、以中粗砂地层为主的中部区域和以黏性土地层为主的东部区域,西部与中部区域分界线大致为牛庄子地带,中部与东部区域的分界线大致为瀛海庄以东采育以西地带(图3、图4、表1)。

2.2 预测模型参数计算分析

2.2.1 实测数据统计分析

在西部区域分别从10个基坑各选取1个地表沉

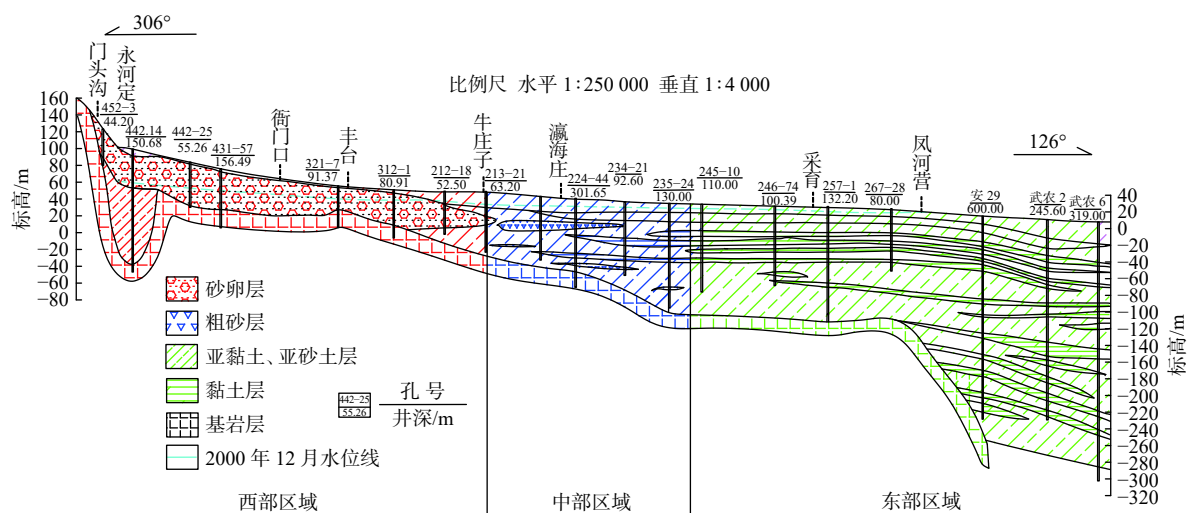


图 3 北京地区典型地质区域简要划分剖面

Fig. 3 Brief cross section of typical geological areas in Beijing

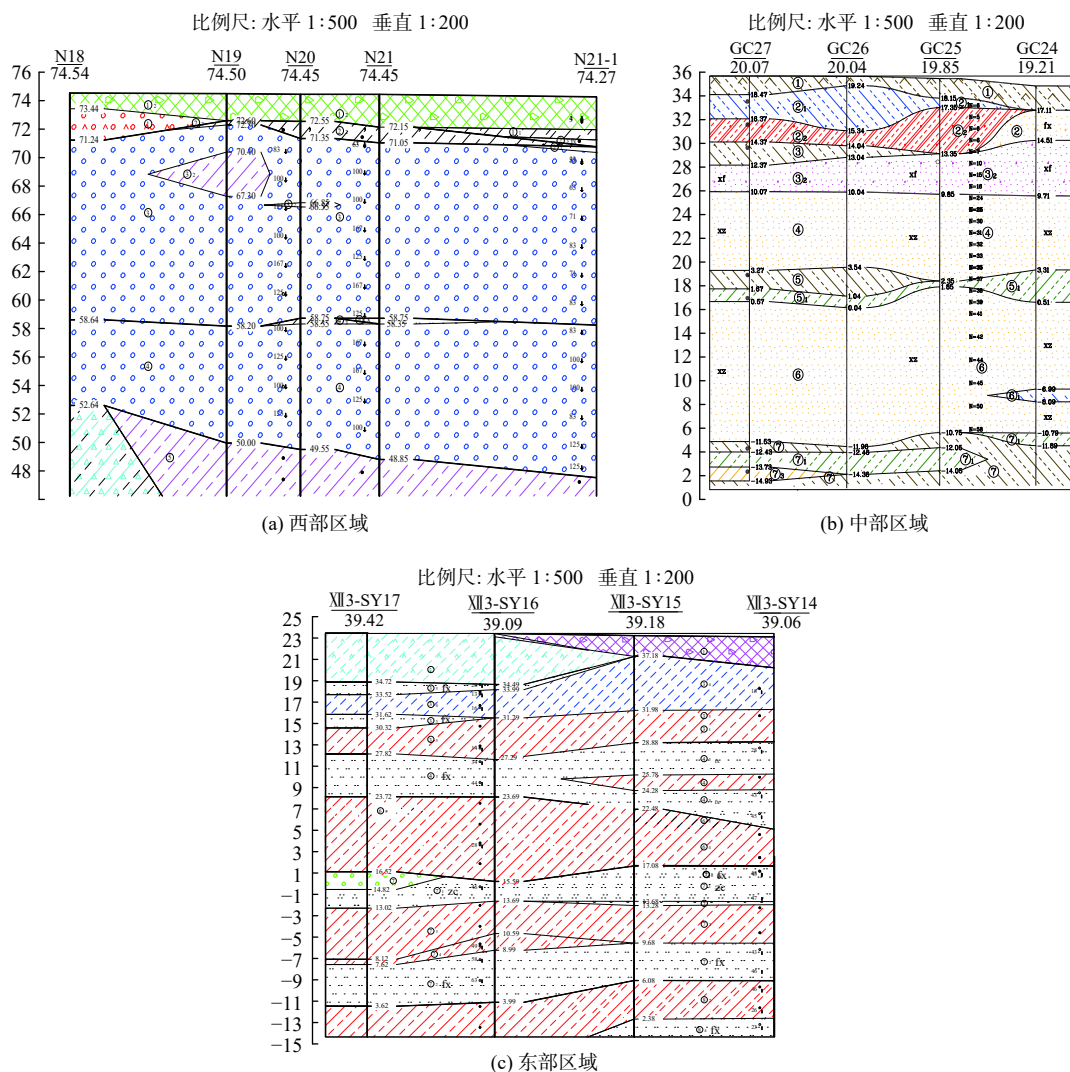


图 4 北京不同区域典型地质剖面图

Fig. 4 Typical geological cross sections in different regions of Beijing

降监测断面的实测数据, 基坑均为典型砂卵地层, 桩围护结构加内支撑支护体系, 所选基坑支护强度相近; 地表沉降监测断面位于基坑中部且垂直基坑边线布置, 每个监测断面有 5 个监测点, 测点间距 2 ~ 10 m 不等(表 2)。根据各基坑的实际开挖深度 H 、各测点距基坑侧壁的水平距离 d 以及各测点的沉降值 δ , 将 δ 与最大沉降值 $\delta_{\max}$ 的比值和 d 与深度 H 的比值, 作为每个监测点的二维坐标, 并利用 Origin 软件将各监测断面的转换数据绘制到同一坐标系中。

表 1 北京不同区域各基坑地层物理力学指标
Table 1 Physical and mechanical indexes of foundation pit in different regions of Beijing

区域	岩层	天然密度/kPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa	泊松比
西部区域	填土	1.54 ~ 1.92	19.53 ~ 19.81	13.44 ~ 15.03	5.81 ~ 7.13	0.28 ~ 0.33
	砂卵层	2.09 ~ 2.21	—	41.39 ~ 46.31	50.02 ~ 60.27	0.16 ~ 0.21
	中粗砂	2.04 ~ 2.12	—	33.09 ~ 40.91	28.84 ~ 34.37	0.22 ~ 0.23
	粉质黏土	1.89 ~ 2.01	25.60 ~ 46.72	16.23 ~ 23.54	6.84 ~ 10.46	0.29 ~ 0.35
中部区域	填土	1.59 ~ 1.89	19.66 ~ 19.74	13.89 ~ 15.34	5.67 ~ 7.45	0.24 ~ 0.31
	中粗砂	2.07 ~ 2.10	—	32.87 ~ 40.24	28.97 ~ 34.22	0.22 ~ 0.23
	粉质黏土	1.93 ~ 2.02	27.60 ~ 52.72	16.23 ~ 23.54	6.84 ~ 9.46	0.29 ~ 0.35
	细中砂	2.03 ~ 2.06	—	32.20 ~ 36.84	27.63 ~ 35.42	0.23 ~ 0.24
东部区域	填土	1.59 ~ 1.89	19.66 ~ 19.74	13.89 ~ 15.34	5.67 ~ 7.45	0.24 ~ 0.31
	粉细砂	1.92 ~ 2.18	—	25.32 ~ 31.08	18.36 ~ 28.91	0.23 ~ 0.25
	粉质黏土	1.57 ~ 1.94	29.64 ~ 56.37	17.37 ~ 28.59	7.41 ~ 10.24	0.28 ~ 0.33
	黏土	1.97 ~ 2.08	38.25 ~ 56.48	16.38 ~ 20.49	8.67 ~ 13.41	0.26 ~ 0.32

注: 各基坑力学指标存在一些差异, 表内统计数据为各基坑岩土体的力学指标数据范围。

表 2 西部基坑地表沉降实测数据计算表
Table 2 Calculations of the measured data of ground settlement of foundation pit in the west

测点编号	坐标类别	断面1	断面2	断面3	断面4	断面5	断面6	断面7	断面8	断面9	断面10
1#	d_1/H	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	$\delta_1/\delta_{\max}$	0.14	0.27	0.21	0.17	0.06	0.11	0.10	0.20	0.17	0.17
2#	d_2/H	0.40	0.50	0.33	0.33	0.33	0.25	0.33	0.36	0.28	0.31
	$\delta_2/\delta_{\max}$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
3#	d_3/H	1.00	1.00	0.56	0.94	1.00	0.50	1.00	0.71	0.56	1.00
	$\delta_3/\delta_{\max}$	0.42	0.45	0.44	0.34	0.28	0.26	0.29	0.23	0.26	0.43
4#	d_4/H	2.00	1.50	1.50	1.25	1.33	1.00	1.33	1.43	1.11	1.25
	$\delta_4/\delta_{\max}$	0.10	0.17	0.17	0.13	0.02	0.05	0.08	0.12	0.12	0.17
5#	d_5/H	3.00	3.00	1.67	1.88	—	—	2.00	—	1.67	—
	$\delta_5/\delta_{\max}$	0.01	0.00	0.03	0.02	—	—	0.01	—	0.01	—

注: 各基坑力学指标存在一些差异, 表内统计数据为各基坑岩土体的力学指标数据范围。

同样, 在中部、东部区域分别选取了 6 个、8 个典型地质条件下的桩撑支护基坑工程地表沉降监测断面的实测数据, 根据基坑开挖深度 H 、各测点距基坑侧壁的水平距离 d 以及各监测点的沉降值 δ , 按照上述方法分别绘制基坑地表沉降曲线。3 个区域典型基坑地表沉降曲线如图 5 所示。

从表 2、图 5(a)可以看出, 北京西部区域基坑地表最大沉降点位于围护结构外侧 $(0.25 \sim 0.37)H$ 范围内, 在距离基坑边线 $1.00H$ 处地表沉降值占最大沉降值范围 20% ~ 50%, 在距离基坑边线 $1.50H$ 处占最大

沉降值范围 10% ~ 30%, 在 $2.00H$ 处占最大沉降值范围 0% ~ 10%。

由图 5(b)可以看出, 中部区域基坑地表最大沉降点位于围护结构外侧 $(0.25 \sim 0.26)H$ 处, 在距离基坑边线 $1.00H$ 处地表沉降值占最大沉降值的 20% ~ 60%, 在距离基坑边线 $1.50H$ 处占最大沉降值的 15% ~ 40%, 在 $2.00H$ 处占最大沉降值的 10% ~ 25%。

由图 5(c)可知, 东部区域基坑地表最大沉降点位于围护结构外侧 $(0.25 \sim 0.26)H$ 处, 在距离基坑边线 $1.00H$ 处地表沉降值占最大沉降值的 30% ~ 65%, 在距

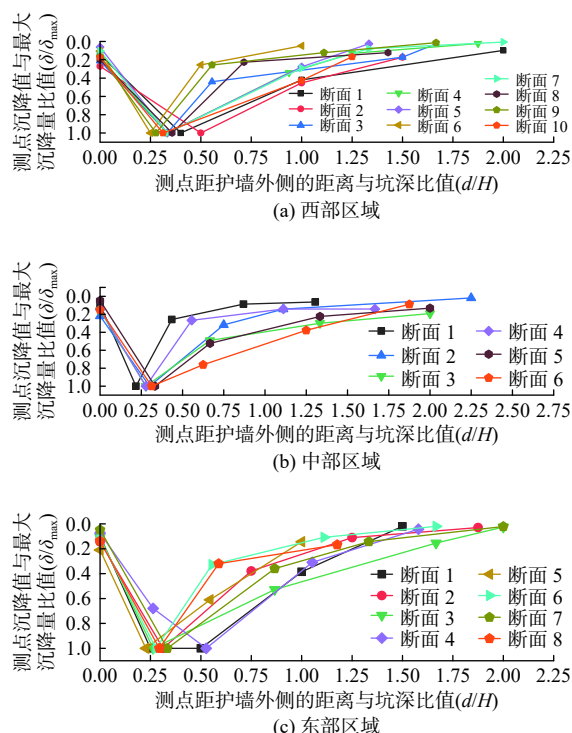


图 5 北京不同区域不同基坑工程地表沉降曲线

Fig. 5 Surface settlement curves of different foundation pits in different regions of Beijing

离基坑边线 $1.50H$ 处占最大沉降值的 15% ~ 40%, 在 $2.00H$ 处占最大沉降值的 15% ~ 25%。

综上所述,西部区域基坑工程的地表沉降变形规律相对中、东部区域有所不同,地表最大沉降点的位置离开围护结构的距离偏大,几乎增大了 $10\%H$,相同深度的基坑沉降槽的影响范围也比中、东部区域要小,沉降量也小,这主要是因为西部区域以砂卵石地层为主,砂石级配好,内摩擦角大,地下水影响较小,地层稳定性相对性较好。中部与东部区域的沉降规律和沉降趋势基本一致,没有明显的区别,主要是因为两区域均包含了砂层、黏土层,地层岩性相近,地表变形机理相似。

2.2.2 预测模型参数计算与分析

根据监测断面沉降实测数据及监测点位置,按照上述四点折线法计算得到 3 个不同区域实测曲线的 $A(0.00, \delta_1/\delta_{\max})$ 、 $B(d_b/H, 1.00)$ 、 $C(d_c/H, 0.10)$ 和 $D(d_d/H, 0.00)$ 四点的对应坐标,绘制对应的沉降曲线,计算出每条直线段 2 个表征四点折线变化特征的参数即斜率 K_{ij} 与截距 b_{ij} ,见图 6、表 3。

由表 3 可以看出,西部区域基坑地表沉降实测四点折线各沉降直线段具体参数的取值范围为:第一阶段各监测断面直线段斜率 K 值最大值为 -1.46 ,最小值为

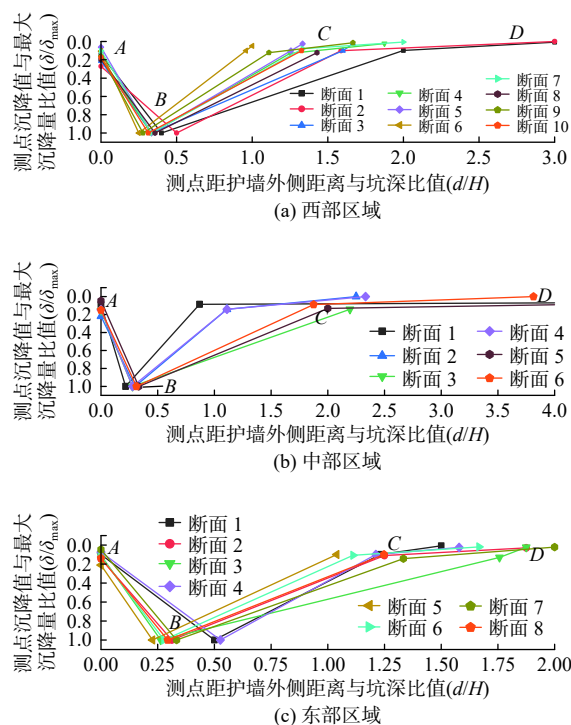


图 6 北京地区不同区域基坑地表沉降四点折线图

Fig. 6 Four point polygon map of ground settlement in different regions of Beijing

-3.58 ,平均值为 -2.54 ;截距 b 值最大值为 -0.06 ,最小值为 -0.27 ,平均值为 -0.16 ;第二阶段的所有直线斜率 K 值的最大值为 1.27 ,最小值为 0.56 ,平均值为 0.90 ;截距 b 值最大值为 -1.23 ,最小值为 -1.41 ,平均值为 -1.30 ;第三阶段的所有直线斜率 K 值的最大值为 1.27 ,最小值为 0.07 ,平均值为 0.50 ;截距 b 值的最大值为 -0.21 ,最小值为 -1.89 ,平均值为 -0.74 。

中部区域基坑地表沉降四点折线 3 个直线段具体参数的取值范围为:第一阶段所有直线斜率 K 值最大值为 -2.60 ,最小值为 -4.19 ,平均值为 -3.08 ;截距 b 值最大值为 -0.15 ,最小值为 -0.29 ,平均值为 -0.21 ;第二阶段所有直线斜率 K 值最大值为 1.40 ,最小值为 0.45 ,平均值是 0.82 ;截距 b 值最大值为 -0.93 ,最小值为 -1.75 ,平均值为 -1.25 ;第三阶段所有直线斜率 K 值最大值为 0.12 ,最小值为 0.01 ,平均值为 0.06 ;截距 b 值最大值为 -0.09 ,最小值为 -0.28 ,平均值为 -0.20 。

东部区域基坑地表沉降实测四点折线各直线段具体参数的取值范围为:第一阶段 8 个监测断面实测数据的所有直线斜率 K 值最大值为 -3.76 ,最小值为 -2.74 ,平均值为 -3.22 ;截距 b 值最大值为 -0.20 ,最小值为 -0.38 ,平均值为 -0.31 ;第二阶段所有直线斜率 K 值最大值为 1.27 ,最小值为 0.58 ,平均值是 0.96 ;截

表 3 北京不同区域基坑四点折线图斜率 K 与截距 b 统计表

Table 3 Statistics of slope K and intercept b of four point broken line diagram of foundation pit in different areas of Beijing

区域	斜率 K_{ij}	断面1	断面2	断面3	断面4	断面5	断面6	断面7	断面8	断面9	断面10
西部区域	K_{AB}	-2.14	-1.46	-2.36	-2.49	-2.81	-3.58	-2.69	-2.25	-3.00	-2.65
	K_{BC}	0.56	0.83	0.71	0.95	0.98	1.27	0.92	0.82	1.05	0.89
	K_{CD}	0.09	0.07	1.12	0.17	0.98	1.27	0.11	-	0.19	-
	b_{AB}	-0.14	-0.27	-0.21	-0.17	-0.06	-0.11	-0.10	-0.20	-0.17	-0.17
	b_{BC}	-1.23	-1.41	-1.24	-1.32	-1.33	-1.32	-1.31	-1.29	-1.29	-1.28
	b_{CD}	-0.28	-0.21	-1.89	-0.35	-1.33	-1.32	-0.23	-	-0.34	-
中部区域	K_{AB}	-4.19	-2.60	-3.04	-3.07	-2.86	-2.72				
	K_{BC}	1.40	0.71	0.45	0.98	0.52	0.89				
	K_{CD}	0.01	0.12	-	0.12	0.02	0.05				
	b_{AB}	-0.29	-0.22	-0.16	-0.15	-0.20	-0.25				
	b_{BC}	-1.30	-0.93	-1.12	-1.22	-1.17	-1.75				
	b_{CD}	-0.09	-0.28	-	-0.27	-0.17	-0.17				
东部区域	K_{AB}	-3.48	-2.74	-3.39	-3.76	-3.47	-3.16	-2.86	-2.93		
	K_{BC}	1.23	0.83	0.58	0.98	1.27	1.07	0.86	0.89		
	K_{CD}	0.34	0.13	0.91	0.20	-	0.16	0.18	-		
	b_{AB}	-0.20	-0.34	-0.37	-0.27	-0.32	-0.38	-0.28	-0.29		
	b_{BC}	-1.62	-1.15	-1.15	-1.28	-1.42	-1.30	-1.29	-1.21		
	b_{CD}	-0.51	-0.27	-1.73	-0.35	-	-0.28	-0.39	-		

距 b 值最大值为-1.15, 最小值为-1.62, 平均值为-1.30; 第三阶段所有直线斜率 K 值最大值为 0.91, 最小值为 0.13, 平均值为 0.32; 截距 b 值最大值为-0.27, 最小值为-1.73, 平均值为-0.59。

综上所述, 四点折线图第一段直线 AB 的斜率 K 绝对值均值由西向东依次增大, 坑深相同时西部基坑的最大沉降值偏小, 位置距离围护结构相对较远, 而东部基坑最大沉降值较大, 且距离围护结构距离较近, 表明东部粉细砂地层比西部砂卵石地层沉降坡度更加明显; 但是, 东部区域四点折线图第二阶段直线 BC 的斜率 K 值比西部区域相比反而较小, 这表明东部区域的沉降影响范围较大; 根据式(1)可知, 当 X 取 0 时, $S(X)$ 即为桩顶沉降值, 在数值上等于截距 b_{AB} , 结合西、中、东部各地区的参数统计表分析可知, 参数 b_{AB} 绝对值均值由西向东依次增大, 表明东部粉质黏土、细沙层相对西部砂卵石地层的桩顶沉降值更大, 约为最大沉降值的 31%, 中部区域为 21%, 西部区域仅为 16%; 相同深度的基坑东部区域的地表最大沉降值更大, 最大沉降值距离围护结构距离 d 更小, 约为基坑深度 H 的 26%, 西部区域约为 30%。

2.3 预测与实测结果对比分析

在西、中、东部区域分别选择了与上述典型地质条件相近支护形式相同的 3 个基坑工程, 提取了每个基坑中部监测断面的实测数据进行对比分析。西部 3 个基坑深度分别为 22.1, 20.2, 18.5 m, 中部 3 个基坑

深度分别为 20.0, 19.6, 21.5 m, 东部 3 个基坑深度分别为 22.7, 23.6, 20.5 m, 断面测点按照不等间距布设, 根据工程所在区域及岩土地质特性, 结合上述基坑地表沉降预测模型及参数研究成果, 对各监测断面监测点的沉降值进行了预测。具体做法是首先根据工程所在区域及岩土特性选择预测参数斜率 K_{AB} 、 K_{BC} 、 K_{CD} 和截距 b_{AB} 、 b_{BC} 、 b_{CD} , 再按照上述方法结合基坑深度确定 3 个阶段的界限 M 和 L , 然后根据 d/H 获得预测模型中的 X , 最后将 X 代入预测模型求得各测点的预测沉降值。利用各监测断面沉降点实测值与预测值分别绘制出曲线, 如图 7 所示。

由图 7 对比分析可知, 预测数据曲线与实测数据曲线均较为一致, 中部与东部区域的预测曲线与实测数据更为吻合。其中西部区域“预测 1”相比“实测 1”偏大, 主要由于该基坑开挖面较小、边长短, 架撑便捷且及时, 坑外地表沉降与围护结构的挠曲同步减弱, 由此造成监测点沿监测断面向外的沉降增量大大减小; 且该监测主断面 5#测点因被破坏而剔除, 距护墙 15 m 的 3#测点位于原工地道路上方, 沉降较小。该监测断面的实测数据受到了多种因素的综合影响, 各点数据差异较大造成实测拟合曲线的可决系数偏小, 因此与使用公式计算结果拟合的预测曲线偏差较大。西部区域 10 mm 以上沉降范围较小, 中部次之, 东部区域最大; 基坑深度相差不大的情况下, 最大沉降值由西向东依次增大, 各区域预测最大沉降值均位于

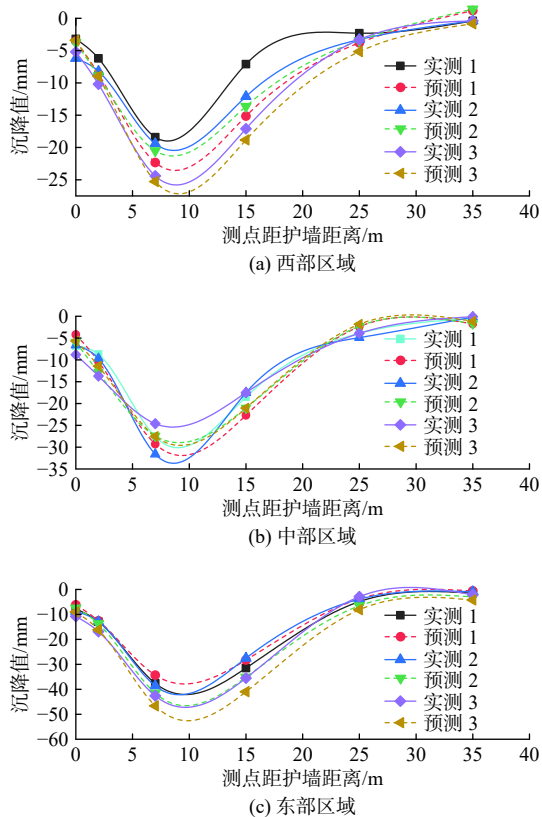


图 7 北京不同区域基坑地表沉降预测与实测曲线对比

Fig. 7 Comparison of ground settlement prediction and the measured curves in different regions of Beijing

(0.25 ~ 0.30) H 处; 预测曲线显示 1.25 H 范围内的沉降值相对较大, 与实际监测数据基本一致。由于基坑周围地表沉降受多种环境因素影响, 沉降变化较大, 沉降预测需要根据基坑工程的具体地质条件、支护型式及设计参数等实际情况合理选择预测模型及参数。

3 结论

(1) 北京地区西、中、东部区域明挖基坑地表最大沉降点距基坑侧壁的距离随地质条件的变化表现出一定差异性, 西部区域最大沉降点距离围护结构的水平距离相对中、东部偏大, 约为基坑深度的 30%, 中、东部区域均约为 26%; 基坑开挖地表影响范围也不同, 沉降值超过 10 mm 以上, 西部砂卵石地层较小, 约在 1.50 H 范围内, 东部粉砂层粉质黏土较大, 超过了 2.00 H 的范围, 中部砂层细砂层在 2.00 H 范围内。

(2) 地表沉降曲线形态随着区域地质条件不同而不同, 表征四点折线变化特征的斜率 K 与截距 b 具有一定规律性, 四点折线第一段直线 AB 的斜率 K 绝对值由西向东依次增大, 表明东部粉细砂地层比西部砂卵石地层沉降坡度更加明显; 东部区域四点折线第二

段直线 BC 的斜率 K 绝对值比西部区域小, 表明东部区域的沉降影响范围较大; 参数 b_{AB} 绝对值均值由西向东依次增大, 表明东部粉质黏土、细沙层相对西部砂卵石地层的桩侧土体沉降值更大, 约为最大沉降值的 31%, 中部区域为 21%, 西部区域仅为 16%。

(3) 北京地区不同地质条件下的明挖基坑地表沉降变形规律符合四点折线分布, 运用四点折线法进行基坑施工引起的地面沉降预测完全可行。本文总结的预测模型及参数体系, 在北京地区典型的工程地质条件下, 针对桩撑支护的基坑工程, 能够有效预测地表沉降变形情况, 可为明挖基坑工程施工安全风险管控提供数据支持。

参考文献 (References) :

- [1] 张连泽, 张彬, 冯军, 等. 地铁车站明挖基坑开挖引起土体变形数值模拟研究[J]. 工程地质学报, 2014, 22(增刊 1): 202 - 208. [ZHANG Lianze, ZHANG Bin, FENG Jun, et al. Numerical simulation of soil deformation caused by open excavation of subway station[J]. Journal of engineering geology, 2014, 22(Sup 1): 202 - 208. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 王广国, 杜明芳, 侯学渊. 深基坑的大变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 509 - 512. [WANG Guangguo, DU Mingfang, HOU Xueyuan. Large deformation analysis for braced excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(4): 509 - 512. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 李淑, 张顶立, 房倩, 等. 北京地区深基坑墙体变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(11): 2344 - 2353. [LI Shu, ZHANG Dingli, FANG Qian, et al. Research on characteristics of retaining wall deformation due to deep excavation in Beijing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(11): 2344 - 2353. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 肖潇, 李明广, 夏小和, 等. 基坑开挖对临近明挖暗埋隧道竖向变形的影响机理[J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(11): 1437 - 1443. [XIAO Xiao, LI Mingguang, XIA Xiaohu, et al. Mechanism analysis of influence of deep excavation on deformation of nearby cut-and-cover tunnel[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2018, 52(11): 1437 - 1443. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 陈仁朋, 刘书伦, 孟凡衍, 等. 软黏土地层基坑开挖对旁侧隧道影响离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 1132 - 1138. [CHEN Renpeng, LIU Shulun, MENG Fanyan, et al. Centrifuge modeling of excavation effects on a nearby tunnel in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020,

- 42(6): 1132 – 1138. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 王世君,姚燕明,汪健,等. 软土地区地铁基坑浅层承压水控制及降压影响预测研究[J]. *都市快轨交通*, 2020, 33(1): 98 – 103. [WANG Shijun, YAO Yanming, WANG Jian, et al. Control of confined water and the calculation of the effect of falling groundwater levels of a subway foundation pit in soft soil[J]. *Urban Rapid Rail Transit*, 2020, 33(1): 98 – 103. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 骆祖江,金鹏,田开洋,等. 深基坑降水与地面沉降模拟预测软件研制[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(3): 352 – 358. [LUO Zujiang, JIN Peng, TIAN Kaiyang, et al. Software development for simulating and predicting deep foundation pit dewatering and land subsidence[J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2016, 37(3): 352 – 358. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 成峰,张远芳,万永祥,等. 采用Gompertz模型预测深基坑周边地表沉降[J]. *地下空间与工程学报*, 2013, 9(3): 541 – 546. [CHENG Feng, ZHANG Yuanfang, WAN Yongxiang, et al. Subsidence prediction of deep foundation pit surrounding surface based on gompertz model[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2013, 9(3): 541 – 546. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 陈万鹏. 基坑开挖引起地表沉降的预测方法研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2006. [CHEN Wanpeng. Study on prediction method of ground settlement caused by foundation pit excavation. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2006. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 张尚根,袁正如. 软土深基坑开挖地表沉降分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2013, 9(增刊1): 1753 – 1757. [ZHANG Shanggen, YUAN Zhengru. Analysis of ground settlement induced by excavation of deep foundation pit in soft soil[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2013, 9(Sup1): 1753 – 1757. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 王卫东,徐中华. 预估深基坑开挖对周边建筑物影响的简化分析方法[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(增刊1): 32 – 38. [WANG Weidong, XU Zhonghua. Simplified analysis method for evaluating excavation-induced damage of adjacent buildings[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(Sup1): 32 – 38. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 张建新,周嘉宾,吴东明. 超深逆作基坑围护结构变形分析[J]. *建筑结构*, 2012, 42(4): 121 – 123. [ZHANG Jianxin, ZHOU Jiabin, WU Dongming. Analysis of retaining structure deformation in super-deep foundation pit by top-down construction method[J]. *Building Structure*, 2012, 42(4): 121 – 123. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 孙曦源,衡朝阳,周智,等. 厦门地铁车站基坑施工诱发地表沉降的经验预测方法研究[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(增刊2): 132 – 138. [SUN Xiyuan, HENG Chaoyang, ZHOU Zhi, et al. An empirical method for predicting ground surface settlement induced by metro station pit in Xiamen[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(Sup2): 132 – 138. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 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 Guobin, WANG Weidong. *Excavation engineering handbook*[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.(in Chinese)]
- [15] 胡之锋,陈健,邱岳峰,等. 一种黏土层中深基坑开挖地表沉降预测方法[J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(6): 60 – 67. [HU Zhifeng, CHEN Jian, QIU Yuefeng, et al. A simplified method for predicting ground surface settlement induced by deep excavation of clay stratum[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, 36(6): 60 – 67. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 吴锋波,金淮,朱少坤. 北京市轨道交通基坑工程地表变形特性[J]. *岩土力学*, 2016, 37(4): 1066 – 1074. [WU Fengbo, JIN Huai, ZHU Shaokun. Ground deformation characteristics of foundation pit related to the urban rail transit in Beijing[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(4): 1066 – 1074. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 陈立国,吴昊天,陈晓斌,等. 超载预压处理软土的次固结特征及沉降计算[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(1): 138 – 145. [CHEN Ligu, WU Haotian, CHEN Xiaobin, et al. Secondary consolidation characteristics and settlement calculation of soft soil treated by overload preloading[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(1): 138 – 145. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 邹大鹏,王珣. 北京地区山前冲洪积扇复杂地层盾构施工技术[J]. *城市轨道交通研究*, 2008, 11(7): 64 – 67. [ZOU Dapeng, WANG Xun. Shield construction technique on the complicated stratum of piedmont alluvial-pluvial fan in Beijing[J]. *Urban Mass Transit*, 2008, 11(7): 64 – 67. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 左建. 地质地貌学[M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. [ZUO Jian. *Geology and geomorphology*[M]. 2nd ed. Beijing: China Water Power Press, 2007.(in Chinese)]

编辑: 张明霞