

文章编号: 1674-599X(2022)01-0079-09

既有桥桩对盾构引起地表沉降槽的变形影响

孙逸玮^{1,2}, 黄戡¹, 李宇健¹

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 上海港湾基础建设(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 针对预测盾构开挖引起的地表沉降槽变形曲线, 通常采用 Peck 公式或其修正公式, 但该公式没有考虑邻近桥桩刚度对地表沉降槽变形的影响。采用 Midas GTS NX 建立三维有限元模型, 分析不同桩径和桩-隧道间距对地表沉降槽曲线的影响, 提出一种适用于预测盾构近距离侧穿桥桩时地表沉降槽的偏态分布曲线。以长沙地铁 5 号线圭塘站至高桥南站区间为工程背景, 将有限元计算结果和现场实测值与偏态分布曲线值进行对比分析。研究表明: 当 $L/D < 1.8$ 时, 地表沉降槽变形曲线会呈现明显偏态分布, 整体地表变形会在桩基附近出现“绕桩”现象。采用偏态分布曲线可以较好地预测邻近桥桩影响下盾构开挖引起的地表沉降槽变形, 可为此类工况修建盾构隧道提供参考。

关键词: 盾构隧道; 桥梁桩基; Peck 曲线; 地表沉降槽; 非对称偏态分布

中图分类号: U45

文献标志码: A

Influence of existing bridge pile foundation on the deformation of surface settlement trough induced by shield tunneling

SUN Yi-wei^{1,2}, HUANG Kan¹, LI Yu-jian¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Shanghai Harbour Foundations Construction Group Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: Peck formula and its modified formulas are usually used to predict the deformation curve of surface settlement trough induced by shield tunneling without considering the effects of stiffness of existing adjacent bridge pile. Three-dimensional finite element models were established by Midas GTS NX to analyze the effects of different pile diameters and different distances between pile and tunnel on the surface settlement trough curve, and a kind of skewed distribution curve of the surface settlement trough was proposed, which is suitable to predict the surface settlement trough curve when shield tunneling passes through the bridge pile at a short distance. Based on the engineering background of the shield tunneling line between Guitang station and Gaoqiao South station of Changsha No. 5 Metro Line, the results of finite element simulation and in-situ measurement were compared with the skewed distribution curve. The results show that when $L/D < 1.8$, the deformation curve of surface settlement trough presents an obvious skewed distribution, and the overall surface deformation appears ‘around pile’ phenomenon near the pile foundation. The skewed distribution curve can be used to predict the surface settlement trough induced by shield tunneling under the influence of adjacent bridge piles, which provides a reference for the construction of shield tunnel under similar conditions.

Key words: shield tunnel; bridge pile foundation; Peck curve; surface settlement trough; asymmetric skewed distribution

收稿日期: 2021-01-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078060); 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ4606); 长沙理工大学“双一流”科学研究国际合作拓展项目(2018IC19); 长沙理工大学土木工程优势特色重点学科创新性项目(18ZDXK05)

作者简介: 孙逸玮(1997—), 男, 长沙理工大学硕士生。

在城市修建地铁隧道时,采用盾构法常常需要穿越大量高架桥桩基础。目前,对于盾构近距离侧穿桥桩的研究,主要对桩基变形和应力进行了分析^[1-2],考虑既有桥桩影响下盾构开挖引起的地表沉降槽变形趋势的研究较少。然而,准确预测盾构隧道施工引起的地表沉降是盾构法施工的重点,以求能够在设计和施工中进行预判和优化,确保地面交通安全。因此,研究邻近桥桩影响下盾构开挖引起的地表沉降槽变形规律具有重要的工程意义。

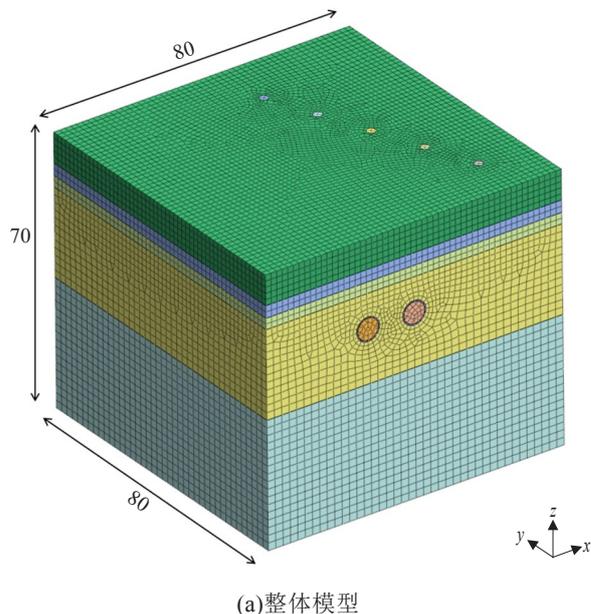
盾构法虽然有较好的施工优势,但仍会引起周围土体扰动,导致地表发生沉降。Peck^[3]提出隧道掘进引起的地表沉降曲线在横向呈正态分布,沉降槽宽度 i 与地层损失 V_s 是Peck公式中2个重要参数,但Peck公式没有考虑地层特性和施工因素。Clough等人^[4-7]对 i 的取值提出了不同的计算方法。韩焯等人^[8]分析了地质条件对沉降槽宽度的影响,并研究了隧道直径对沉降槽宽度的影响作用。陈春来等人^[9]对双线平行盾构隧道施工过程中土体损失引起的三维土体沉降计算方法进行了研究,提出了修正三维Peck公式。魏纲^[10]提出土体损失率主要与施工水平、土质条件和隧道轴线埋深有关,随着隧道轴线埋深的增大,土体损失率呈减小趋势,两者可近似用幂函数拟合。张健等人^[11]依托长沙地铁4号线盾构隧道工程,通过现场实测和数值计算得出,既有结构的刚度效应对周围岩土体的变形有抵抗作用,使地表变形出现不对称性。吴昌胜等人^[12]利用Peck公式反推得到不同直径盾构隧道地层损失率的取值。冯涵等人^[13]研究了存在建筑物情况下的地表变形规律,结果表明:建筑物的存在使地表沉降曲线呈现非对称形式,地面建筑物对地层变形具有直接约束作用。安建永等人^[14]提出了一种地层损失随时间变化的模型,并给出预测浅埋隧道地表沉降随时间和施工因素变化的新型表达式。马险峰等人^[15]通过离心模型试验,研究了盾构隧道的地层损失与施工期及工后地表沉降变形的关系。蒲韡等人^[16]采用有限元数值方法对桩径、桩间距和桩长进行拟合,得到既有桩基对

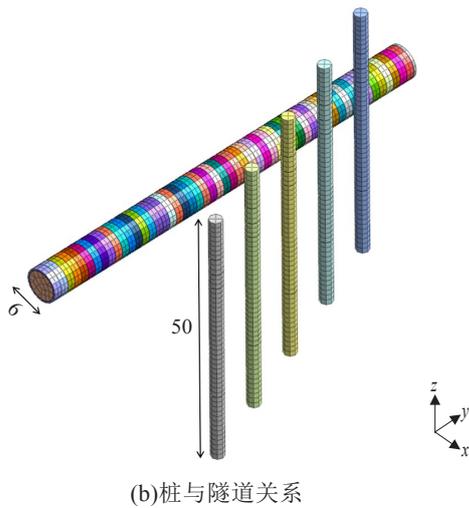
盾构开挖引起的地表沉降槽宽度系数的线性计算公式。目前,预测邻近桥桩处盾构开挖面的沉降计算公式仍然采用Peck公式或其修正公式,但该公式中没有考虑邻近桥梁桩基的存在。实际工程中,由于既有桥桩结构刚度的作用,使桩基变形与天然地基情况相差甚远。若忽略桥桩上部荷载和桩基自身刚度,会导致盾构开挖面的地表沉降结果和沉降槽形式发生明显改变。因此,作者拟建立不同隧道-桩间距的三维有限元模型,提出适用于邻近桥桩影响下盾构开挖面地表沉降槽预测公式,并以实际工程为例,将有限元计算结果、预测公式及现场实测地表沉降进行对比,验证了该公式的准确性。

1 有限元模型的建立

1.1 有限元模型

为减弱边界效应,模型尺寸设置为长80 m,宽80 m,高70 m。盾构隧道埋深按照普遍情况取20 m,盾构管片采用C50混凝土,外径为6 m。在水平方向距盾构隧道中线6、11、16、21、26 m位置处,分别布置桩径为1.2、2.4 m,长50 m的桥桩。土体分为5层,其中,土层5为桩基的持力层。地下水位于地表以下10 m处,有限元模型如图1所示。





(b) 桩与隧道关系

图 1 有限元模型 (单位: m)

Fig. 1 Finite element model (unit: m)

周围土体物理力学参数见表 1。假设:

1) 土体为连续均质的弹塑性体。通常城市高架桥桩深入多层土体中, 为简化计算, 按水平分层地基进行处理。

2) 为考虑盾构开挖引起土体卸荷的作用, 模型采用修正 Mohr Coulomb 本构关系。

3) 盾构管片通常按错缝拼装增强其整体性, 为简化模型, 管片按均质圆环处理, 取折减后的管片弹性模量为 24.15 GPa, 采用板单元模拟。

4) 桥梁桩基采用三维实体单元模拟, 采用 C35 混凝土, 桥桩弹性模量为 31.5 GPa。假定桩土之间保持紧密接触, 不发生脱离。

5) 盾构开挖通常会引起地下水渗流, 为排除渗流对不同桩-隧道间距时地表沉降槽的影响, 不考虑盾构掘进过程中引起地下水位的变化。

6) 不考虑开挖随时间因素的影响^[17]。

由于城市高架桥桩的桩底埋深远大于隧道埋深, 因此, 本研究中不考虑桩长对地表沉降槽的影响。10 种不同桩-隧道实验组合关系见表 2。

表 1 周围土体物理力学参数

Table 1 Physical mechanical parameters of surrounded soils

土层	厚度/m	弹模/MPa	重度/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
1	8.0	10	19.0	10	15
2	3.0	15	20.0	20	18
3	3.0	35	21.0	25	30
4	20.0	1 500	23.0	40	35
5	36.0	8 000	25.0	80	38

表 2 不同桩-隧道实验组

Table 2 Different pile-tunnel experimental groups m

工况	桩-隧道间距	桩径	桩长
1	6.0	1.2	50
2	11.0	1.2	50
3	16.0	1.2	50
4	21.0	1.2	50
5	26.0	1.2	50
6	6.0	2.4	50
7	11.0	2.4	50
8	16.0	2.4	50
9	21.0	2.4 </td <td>50</td>	50
10	26.0	2.4	50

1.2 施工阶段模拟

实际工程中, 盾构侧穿桥桩时为保持开挖面的平衡和稳定, 减缓盾构推进速度, 故在模拟施工阶段时, 设置盾构掘进压力为 8 000 kN, 注浆压力为 0.4 MPa, 盾构隧道每步开挖距离为 1.5 m。

2 数值计算结果分析

2.1 沉降槽曲线对比

桥梁桩基与盾构隧道几何关系如图 2 所示。其中, H 为隧道埋深; D 为盾构隧道外径; L 为桩基轴线至隧道轴线的水平距离; d 为桩基直径。

为避免双线隧道开挖对地表沉降槽变形曲线的干扰, 在数值计算中将距离桩基最近的盾构隧道进行开挖, 后续可在此基础上开展双线隧道的研究。当盾构开挖面与桩基位于同一平面时, 桩径为 1.2、2.4 m 在不同桩-隧道实验组合中的地表沉降槽变形曲线对比如图 3 所示。

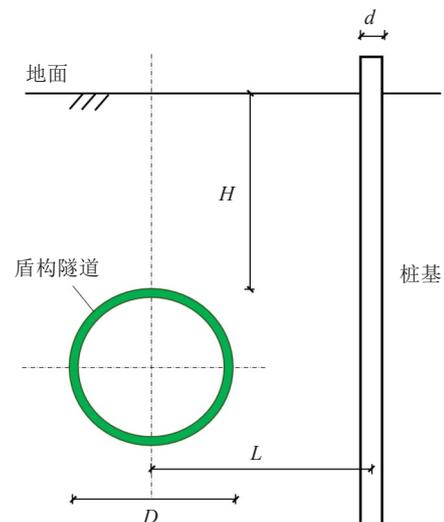


图 2 桩与隧道几何关系

Fig. 2 Geometric relationship between pile and tunnel

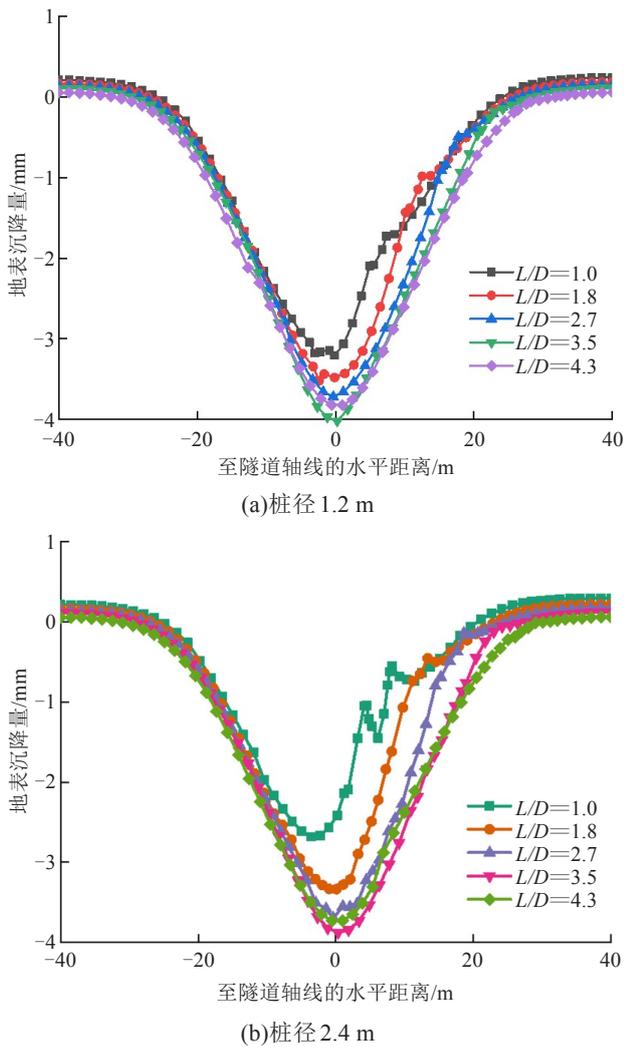


图3 地表沉降槽对比

Fig. 3 Comparison diagram of surface settlement trough

从图3中可以看出,受邻近既有桥桩结构刚度的影响,盾构开挖引起的地表沉降槽变形曲线会发生改变。随着桩与隧道之间距离的不断增大,地表沉降槽逐渐趋于正态分布。其中,当 $L/D > 3.5$ 时,可近似认为邻近桩基对地表沉降槽不受影响。当 $1.8 < L/D < 3.5$ 时,曲线偏移情况不显著,桩基与隧道间范围内的地表沉降量会小于无桩基的。当 $L/D < 1.8$ 时,地表沉降最大值的位置会明显向没有桩基的一侧偏移,且地表沉降量在数值上会比桩-隧道两者距离较大时的地表沉降量小。同时,桩径越大,地表沉降槽曲线受到的影响越大。当桩径为2.4 m, $L/D=1$ 时,地表沉降槽变形曲线呈偏态分布,且地表沉降在桩基附近出现极值。

2.2 地表竖向变形特点

盾构完全贯通后,桩径为1.2、2.4 m的地表沉降如图4所示。

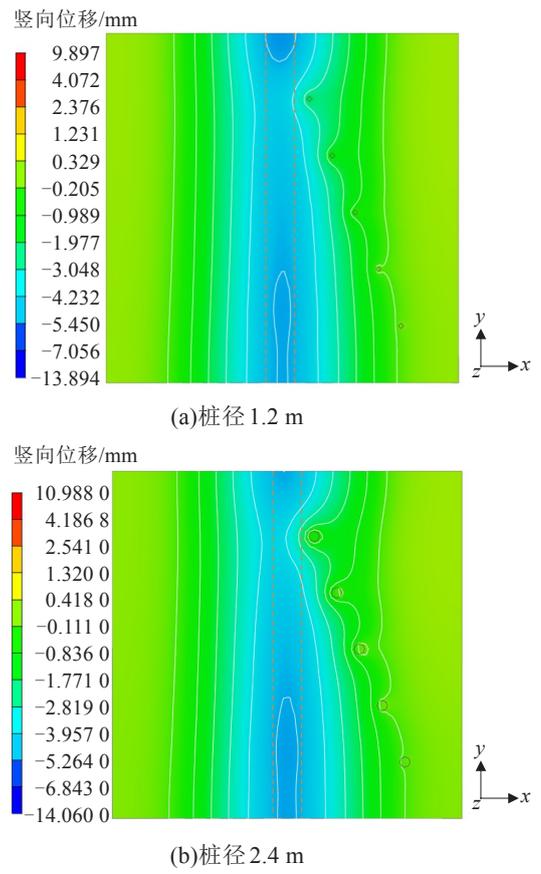


图4 桩与隧道几何关系

Fig. 4 Geometric relationship between pile and tunnel

从图4中可以看出,桩径越大,对整体地表竖向位移的干扰越大。根据等值线描述可以发现,地表沉降会呈现出一种“绕桩”现象,即在桩基附近处,地表沉降变化起伏较小。在地表沉降槽变形曲线中,该位置处曲线会有一定停留或出现极值。由于隧道左、右两侧土体与桩基所构成综合刚度的不同,地表沉降会向刚度小,即向没有桩基的一侧偏移。产生这种现象的主要原因是:桩基结构自身的刚度影响了隧道周围土体的变形,随着桩-隧道之间距离的减小,土体受到桩基的阻拦效应逐渐显著,使得开挖卸载后土体自然会向没有桩基的一侧变形。同时,由于桩基的存在,会控制桩周围一部分土体的变形。因此,邻近桥桩影响下盾构开挖引起的地表沉降槽呈现出非对称的偏态分布,地表沉降最值有所减小。

3 偏态函数曲线拟合

3.1 传统地表沉降槽预测公式

Peck^[3]通过对大量隧道开挖后的地表沉陷数据

和工程资料分析后认为, 沉降槽体积应等于地层损失体积, 地表沉降在横向上呈正态分布。横向分布地表沉降的计算公式如式(1)~(3)所示。该公式在预测地表变形中获得广泛应用。

$$S(x) = S_{\max} \cdot e^{-\frac{x^2}{2i^2}} \quad (1)$$

$$S_{\max} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi} \cdot i} \quad (2)$$

$$i = \frac{Z_0}{\sqrt{2\pi} \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)} \quad (3)$$

式中: $S(x)$ 为地层损失引起的地面沉降; V_s 为盾构开挖引起的单位长度地层损失; x 为距离隧道轴线的距离; S_{\max} 地层损失引起的最大沉降量; i 为沉降槽宽度; Z_0 为隧道埋深; φ 为土的内摩擦角。

3.2 非对称偏正态分布曲线

Peck 曲线未考虑到邻近桩基刚度对地表沉降槽的影响, 丁智等人^[18]提出了考虑地面建筑物影响下预测盾构开挖引起地表沉降的偏态分布曲线, 但该曲线的顺滑性较差, 无法适用于盾构侧穿桥桩的工况。因此, 在已有的研究成果基础上, 提出以下非对称偏正态分布的地表沉降计算公式:

1) 当桥桩位于盾构隧道右侧时, 无桥桩一侧的地表沉降计算方法为:

$$S_1(x) = \alpha \cdot S_{\max} \cdot e^{-\frac{\left[\ln\left(\frac{-x + \frac{D}{L}}{D + \frac{d}{2}}\right)\right]^2}{2\omega^2}} \quad (4)$$

式中: α 为地表沉降折减系数, 可根据桩-隧道间距取 0.8~1.0, ω 为经验系数, 软土地基可取 0.60~0.70^[19]。

2) 有桥桩一侧的地表沉降计算方法为:

$$S_2(x) = \alpha \cdot S_{\max} \cdot e^{-\frac{\left[\ln\left(\frac{x + D + \frac{D}{L}}{D + \frac{d}{2}}\right)\right]^2}{2\omega^2}} \quad (5)$$

3) 当桥桩位于盾构隧道左侧时, 无桥桩一侧的地表沉降计算方法为:

$$S_3(x) = \alpha \cdot S_{\max} \cdot e^{-\frac{\left[\ln\left(\frac{-x + D + \frac{D}{L}}{D + \frac{d}{2}}\right)\right]^2}{2\omega^2}} \quad (6)$$

4) 有桥桩一侧的地表沉降计算方法为:

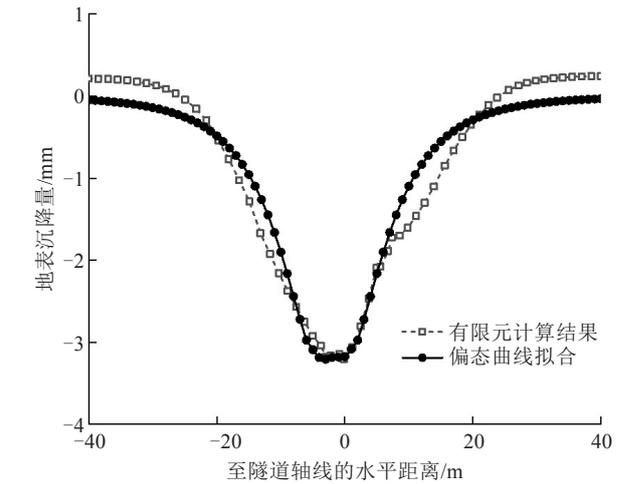
$$S_4(x) = \alpha \cdot S_{\max} \cdot e^{-\frac{\left[\ln\left(\frac{x + \frac{D}{L}}{D + \frac{d}{2}}\right)\right]^2}{2\omega^2}} \quad (7)$$

由于城市高架桥梁桩基通常采用 C30~C40 混

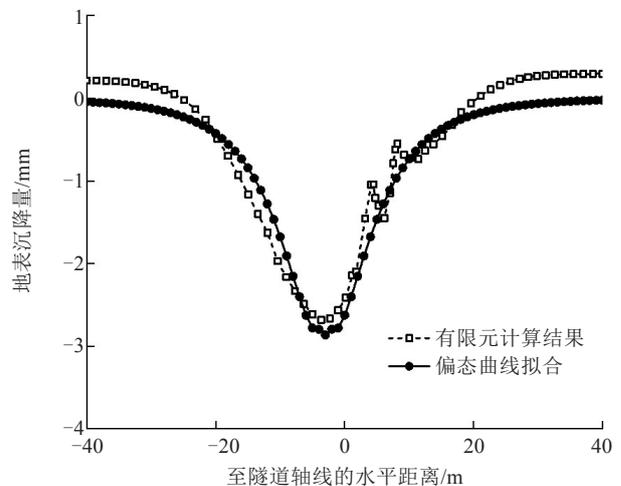
凝土, C30 混凝土的弹性模量为 30 GPa, C40 混凝土的弹性模量为 32.5 GPa。桥桩弹性模量与周围土体弹性模量在数值上相差较大。通过修改有限元模型内参数进行对比得出: 采用不同混凝土标号而产生桥桩刚度的差异, 对地表沉降槽的变形控制在 1% 以内的可以忽略不计。

为验证该预测公式, 分别应用至 $L/D=1$ 、1.8, 桩径为 1.2、2.4 m 的工况进行对比, 地表沉降槽曲线拟合对比如图 5~6 所示。

从图 5~6 中可以看出, 本研究提出的非对称偏态分布曲线与有限元计算结果匹配度高, 曲线顺滑性好, 可以较好地描述邻近桥桩影响下盾构开挖引起地表沉降槽变形规律, 但对桥桩附近地表沉降出现少量位移突变和极值的情况无法准确体现。后续可开展桥桩所在位置附近地表沉降特性的研究。



(a) 桩径 1.2 m



(b) 桩径 2.4 m

图 5 $L/D=1$ 时地表沉降槽拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of surface settlement trough ($L/D=1$)

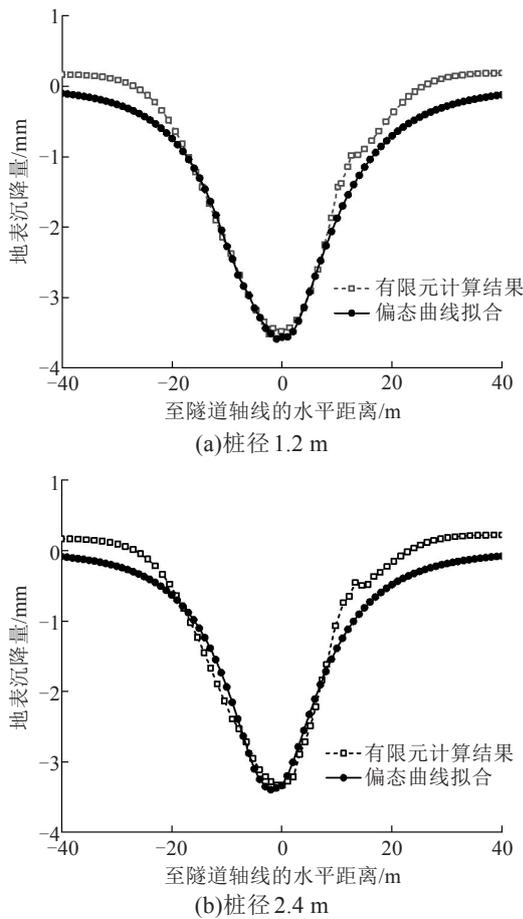


图6 $L/D=1.8$ 时地表沉降槽拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve of surface settlement trough ($L/D=1.8$)

4 工程算例验证

4.1 工程概况

长沙市轨道交通5号线圭塘站—高桥南站区间沿万家丽路东侧由北向南施工，与万家丽高架桥并行。万家丽高架主桥结构位于区间左线隧道西侧，为保证桥梁稳定性，主桥桥桩穿越圭塘河位置处，结构形式发生改变，此时左线隧道距离高架桥的两根长50 m，直径1 200 mm的灌注桩，最短直线距离仅为3.07 m，桥桩采用C35混凝土。周围地层物理力学参数见表3。

为验证盾构近距离侧穿桥梁桩基时地表沉降槽变形规律和非对称偏正态分布曲线的适用性，选取左线隧道距离桥桩最近处建立三维有限元模型。模型尺寸为长60 m，宽50 m，高70 m。仅考虑开挖距离桥桩最近的左线隧道，掘进压力为8 000 kN，注浆压力为0.4 MPa，开挖进尺为1.5 m。采用环宽1 500 mm，厚300 mm，外径6 000 mm的C50装配式预制混凝土管片。三维有限元模型如图7所示。同时，将现场实测数据与有限元计算结果、正态分布曲线和偏态分布曲线进行对比。

表3 周围地层物理力学参数

Table 3 Physical mechanical parameters of surrounding layers

土层编号	厚度/m	弹性模量/MPa	泊松比	重度/($kN \cdot m^{-3}$)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	渗透系数/($m \cdot d^{-1}$)
①杂填土	7.8	8.5	0.35	19.0	10	12	0.700
②粉质黏土	3.2	15.5	0.30	20.0	30	16	0.008
③圆砾	2.9	35.0	0.25	20.0	2	36	25.000
④强风化砾岩	23.0	2 000.0	0.27	23.5	40	30	0.500
⑤中风化砾岩	33.1	12 000.0	0.24	25.0	120	35	0.100

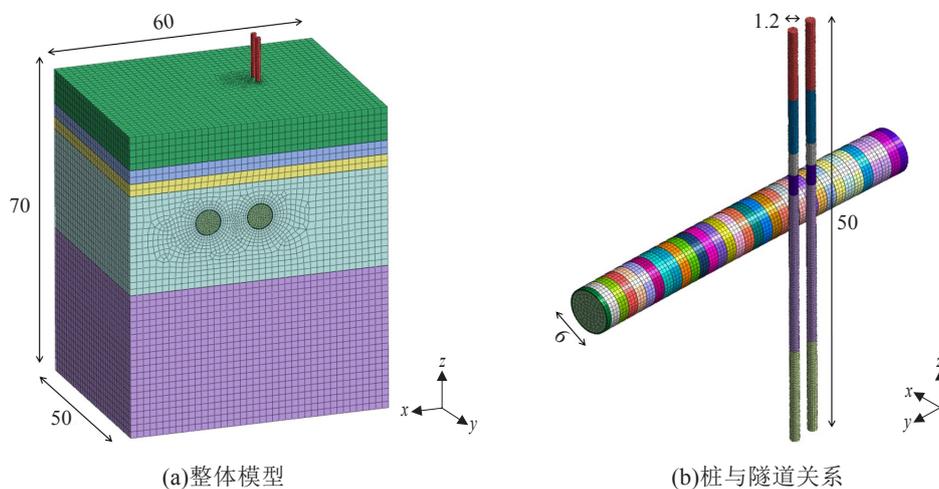


图7 有限元模型 (单位: m)

Fig. 7 Finite element model(unit:m)

4.2 现场实测

地表沉降量监测在侧穿重要构筑物时, 每 10~20 m 布置一排测点, 监测孔采用 140 mm 的水钻打孔, 埋设 1.5~2.0 m 的圆钢筋为监测点, 在路面上用护筒保护监测点, 现场采用精密水准仪进行监测, 地表变形限值为 -30 mm~+10 mm, 地表监测点断面如图 8 所示。左线隧道第 360 环处的地表监测点, 记作桥桩前方地表监测点; 左线隧道第 380 环处的地表监测点, 记作桥桩后方地表监测点。现场地表沉降监测点布置如图 9 所示。

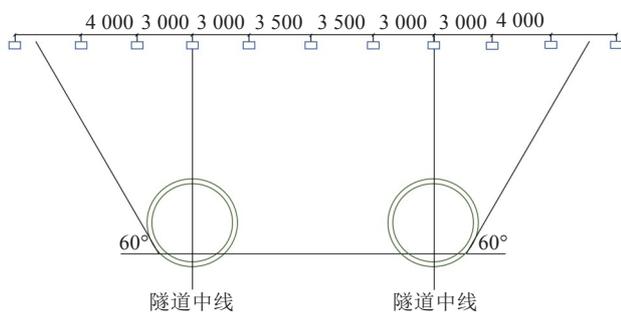


图 8 地表沉降监测点断面

Fig. 8 Profile of surface settlement monitoring points

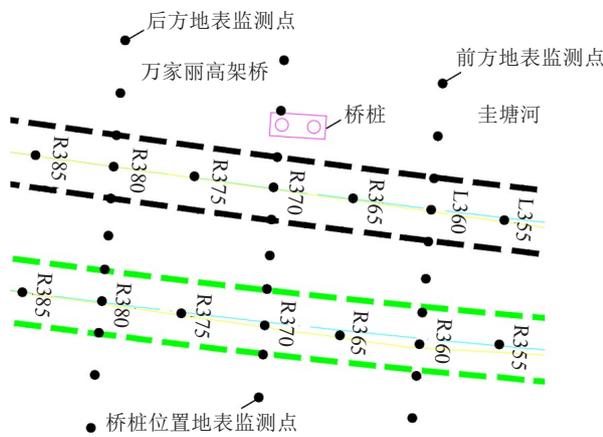


图 9 地表沉降监测点布置

Fig. 9 Surface settlement monitoring points layout

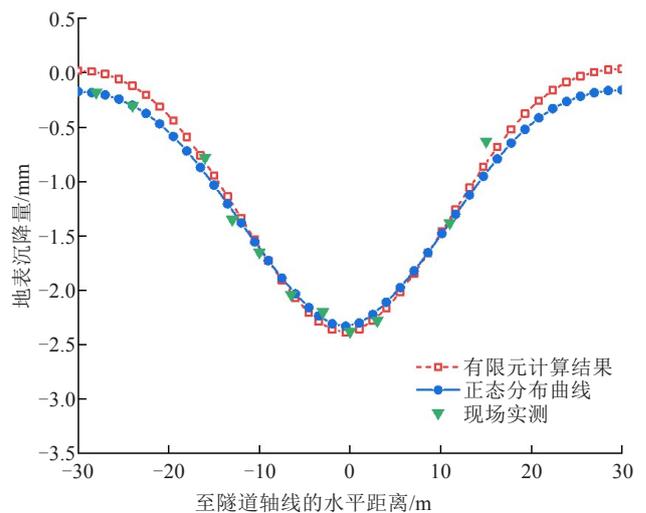
4.3 结果对比

有限元计算结果、正态分布曲线、偏态函数拟合曲线及现场实测数据对比如图 10 所示。

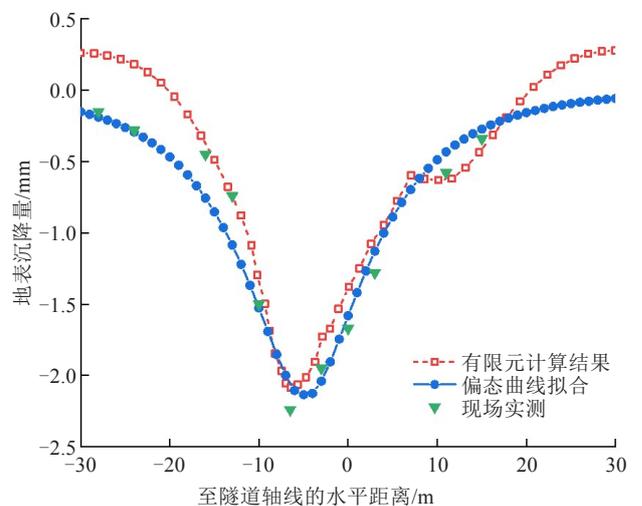
从图 10 中可以看出, 有限元的计算结果可以较好地反映桩基附近地表沉降变形趋势, 但在远离隧道轴线的两侧, 地表出现少量隆起, 与实际情况相比, 存在一定误差。通过对比可知, 当开

挖断面没有桥桩影响时, 采用正态分布曲线, 可以较好地预测并反映实际情况, 在远离隧道轴线的两侧不会出现隆起情况。当开挖断面附近有邻近桥桩影响时, 继续采用正态分布曲线将造成预测值明显偏离实测值。此时, 采用偏态函数曲线拟合效果较好, 具有良好的曲线顺滑性, 与有限元计算结果和实测数据都较为接近, 并且修正了有限元结果中远离隧道轴线两侧容易出现隆起的现象。

对比图 10(a)、10(c)可以看出, 盾构隧道通过桩基前地表沉降槽曲线可以吻合正态分布。通过桩基后, 虽然在该断面处已没有桩基影响, 但是地表沉降槽曲线仍会有较少的偏态效应。因此, 既有桩基对地表沉降槽在沿隧道纵向的影响机理和范围值得进一步研究。



(a)前方监测点



(b)桥桩监测点

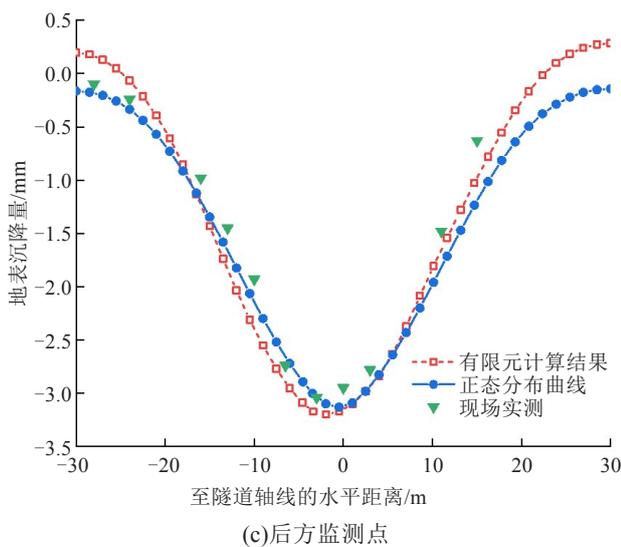


图10 地表沉降槽曲线对比

Fig. 10 Comparison of surface settlement trough curves

5 结论

当前预测盾构隧道开挖引起的地表沉降槽变形曲线较少考虑邻近桥梁桩基的影响。因此,提出一种考虑桩径和桩-隧道间距的非对称偏正态分布曲线。通过与有限元和现场实测数据的对比,得到结论为:

1) 整体地表沉降在桩基附近形成一种“绕桩”现象。当 $L/D < 1.8$ 时,地表沉降量的最值位置会向没有桥桩的一侧产生明显偏移,桩径越大,偏移现象越明显,此时应采用偏态函数对地表沉降槽进行预测。

2) 有限元的计算结果可以较好地反映桩基附近地表的沉降变形趋势,但有限元计算需要耗费大量的运行时间,且存在一定误差,会对该类工况的推广性有所欠缺。采用偏态分布函数曲线可以较快速、准确地预测邻近桥桩影响下盾构开挖引起的地表沉降槽变形。

参考文献(References):

[1] Nematollahi M, Dias D. Three-dimensional numerical simulation of pile-twin tunnels interaction - Case of the shiraz subway line[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019,86:75-88.

[2] Soomro M A, Ng C W W, Liu K, et al. Pile responses to side-by-side twin tunnelling in stiff clay: Effects of

different tunnel depths relative to pile[J]. Computers and Geotechnics, 2017,84:101-116.

- [3] Peck R B. Deep excavations and tunneling in soft ground [J]. 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1969,7(3):225-290.
- [4] Clough G W, Schmidt B. Design and performance of excavations and tunnels in soft clay[M]//Developments in geotechnical engineering. Amsterdam: Elsevier, 1981: 567-634.
- [5] Attewell P B, Woodman J P. Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunnelling in soil[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1983,20(5):148.
- [6] O'Reilly M P, New B M. Settlements above tunnels in the United Kingdom - their magnitude and prediction[C]// Proceedings of tunnelling'82 symposium. London: Institution of Mining and Metallurgy,1982:173-181.
- [7] Loganathan N, Poulos H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998,124(9):846-856.
- [8] 韩焯,罗文林,李宁. 地铁隧道施工引起沉降槽宽度的影响因素[J]. 地下空间与工程学报,2009,5(6):1188-1193, 1219. (HAN Xuan, LUO Wen-lin, LI Ning. The width of settlement trough influenced by tunneling in soft ground [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009,5(6):1188-1193,1219.(in Chinese))
- [9] 陈春来,赵城丽,魏纲,等. 基于Peck公式的双线盾构引起的土体沉降预测[J]. 岩土力学,2014,35(8):2212-2218. (CHEN Chun-lai, ZHAO Cheng-li, WEI Gang, et al. Prediction of soil settlement induced by double-line shield tunnel based on Peck formula[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014,35(8):2212-2218.(in Chinese))
- [10] 魏纲. 盾构隧道施工引起的土体损失率取值及分布研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(9):1354-1361. (WEI Gang. Selection and distribution of ground loss ratio induced by shield tunnel construction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1354-1361. (in Chinese))
- [11] 张健,周中,邢凯. 盾构隧道近接施工对地层变形的影响[J]. 交通科学与工程,2019,35(4):63-70. (ZHANG Jian, ZHOU Zhong, XING Kai. The influence of shield tunnel construction adjacent to the existing structure on deep

- soil displacement[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019,35(4):63-70.(in Chinese))
- [12] 吴昌胜,朱志铎.不同直径盾构隧道地层损失率的对比研究[J].岩土工程学报,2018,40(12):2257-2265. (WU Chang-sheng, ZHU Zhi-duo. Comparative study on ground loss ratio due to shield tunnel with different diameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018,40(12):2257-2265.(in Chinese))
- [13] 冯涵,张学民,乔世范,等.双线盾构隧道下穿既有建筑物诱发地表变形规律分析[J].铁道科学与工程学报,2015,12(4):866-871. (FENG Han, ZHANG Xue-min, QIAO Shi-fan, et al. Analysis of ground deformation caused by two track shield tunnelling under existing building[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015,12(4):866-871.(in Chinese))
- [14] 安建永,项彦勇,安付军,等.浅埋隧道施工对地表沉降影响的简化解析计算[J].地下空间与工程学报,2017,13(1):184-189. (AN Jian-yong, XIANG Yan-yong, AN Fu-jun, et al. Simplified analytic calculation of the influence of shallow tunnel construction on ground deformation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017,13(1):184-189.(in Chinese))
- [15] 马险峰,王俊淞,李削云,等.盾构隧道引起地层损失和地表沉降的离心模型试验研究[J].岩土工程学报,2012,34(5):942-947. (MA Xian-feng, WANG Jun-song, LI Xiao-yun, et al. Centrifuge modeling of ground loss and settlement caused by shield tunnelling in soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(5):942-947.(in Chinese))
- [16] 蒲韡,吕润东,陈启功,等.软土地区既有桩基对沉降槽宽度系数*i*的影响研究[J].科技通报,2020,36(7):63-69,93. (PU Wei, LYU Run-dong, CHEN Qi-gong, et al. Research on the influence of existing pile foundation on settlement trough width coefficient *i* in soft soil area[J]. Bulletin of Science and Technology, 2020,36(7):63-69,93. (in Chinese))
- [17] 黄戡,詹艳云,马启昂,等.基于正交试验的IV、V级围岩相似材料[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2018,15(1):92-97.(HUANG Kan,ZHAN Yan-yun,MA Qi-ang, et al. Similar materials of IV, V grade rock based on orthogonal design[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science),2018,15(1):92-97.(in Chinese))
- [18] 丁智,魏新江,吴勇.盾构掘进对邻近建筑物影响及控制技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2018:136-151. (DING Zhi, WEI Xin-jiang, WU Yong. Control technique and study on the influence of shield tunnel on adjacent buildings[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018:136-151.(in Chinese))
- [19] 罗忠行,牛建东,李泽玮,等.深基坑h型双排桩的变形计算及优化分析[J].铁道科学与工程学报,2020,17(7):1720-1727. (LUO Zhong-xing, NIU Jian-dong, LI Ze-wei, et al. Deformation calculation and optimization analysis of h-type double-row piles in deep foundation pit [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020,17(7):1720-1727.(in Chinese))