

盾构施工下穿建筑物时诱发沉降数值分析及预测^{*}

龙际权

(中铁十八局集团第三工程有限公司, 河北 涿州 072750)

[摘要] 基于数值模拟和多元回归,研究盾构隧道施工引起的地表筏板基础沉降。考虑开挖直径、隧道埋深、基础-隧道间距、基础顶板压力及土层弹性模量等因素,建立回归模型并以南昌地铁4号线为例进行验证。结果显示,筏板沉降随间距、埋深及土层模量增大而降低,随开挖直径和顶板压力增大而增大;当间距为23m时,沉降比直接下穿减少83.5%,开挖直径6.5m时沉降约5.75mm,埋深由15m增至21m时沉降降低38.4%,土层模量降低至0.5E时沉降激增73%,提升至1.5E时降低28%。

[关键词] 地铁;隧道;盾构;多元回归分析;数值模拟;沉降

[中图分类号] U453.5

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)07-0019-06

Numerical Analysis and Prediction of Settlement Induced During Shield Construction Underneath Buildings

LONG Jiquan

(China Railway 18th Bureau Group Third Engineering Co., Ltd., Zhuozhou, Hebei 072750, China)

Abstract: The settlement of ground raft foundations caused by shield tunnel construction is studied based on numerical simulation and multiple regression. A regression model was established and verified by taking Nanchang Metro Line 4 as an example, considering factors such as excavation diameter, tunnel depth, foundation-tunnel spacing, foundation roof pressure, soil elastic modulus, etc. The results indicate that the raft settlement decreases with the increase in spacing, buried depth, and soil modulus and increases with the increase in excavation diameter and roof pressure. When the spacing is 23m, the settlement is reduced by 83.5% compared with the direct undercrossing. The settlement is about 5.75mm when the excavation diameter is 6.5m. The settlement is reduced by 38.4% when the buried depth increases from 15m to 21m. When the soil modulus is reduced to 0.5E, the settlement surges by 73%. And when the soil modulus is increased to 1.5E, the settlement is reduced by 28%.

Keywords: subways; tunnels; shields; multiple regression analysis; simulation; settlement

0 引言

隧道施工期间产生的邻近建筑结构沉降是一个受多因素耦合影响的复杂过程。其主要影响因素可归纳为3类:结构参数(包括基础尺寸、隧道埋深、断面形状及开挖面积)、岩土特性(涉及土体物理力学性质及地层结构特征)以及施工参数(如盾构工作面压力、掘进速率和同步注浆量等)。这些影响因素与建筑基础沉降之间呈现出显著的非线

性相互作用关系。目前学术界主要采用3种研究方法:基于工程统计的经验公式法、考虑多场耦合的数值模拟法以及物理模型试验法,这些方法各有其适用范围和局限性。

经验公式法作为地表以及建筑沉降预测的传统方法,主要通过拟合现场监测数据并基于相关力学理论建立预测模型。对此,Zhang等^[1]提出了一种结合改进弹性分层半空间模型与土体非均质性修正因子的预测方法,能够用于预测隧道开挖引起的基础变形。周敏^[2]基于随机介质理论提出了一种地表沉降预测模型,并对其进行了优化研究从而用于建筑基础沉降分析。齐静静等^[3]则针对小净距双线隧道施工特点,提出了考虑土体应力叠加效

^{*} 中国铁建股份有限公司2022年度科技研究开发计划(2022-C1);
中铁十八局集团有限公司2022年度科研创新项目(C2022-051)

[作者简介] 龙际权,工程师,硕士,E-mail:dudule08@163.com

[收稿日期] 2025-01-23

应的基础沉降预测模型。然而,现有的理论模型以及经验公式由于考虑因素有限、基本假设过多,计算结果与实际结果存在一定偏差,限制了其在实际工程中的应用。

模型试验方法通过物理模拟能够考虑多种参数并再现盾构隧道施工中的相互作用机制。Ritter等^[4]开发了基于粉末三维打印的试验技术,成功构建并模拟了隧道开挖过程中的土体-基础结构相互作用。然而,部分学者^[5-7]指出,由于相似比以及材料特性的差异,模型试验在精确模拟地表沉降模式方面存在局限性且难以准确复现。此外,该方法还面临试验成本高、周期长等挑战,这些因素共同制约了其在工程实践中的广泛应用。

数值模拟方法通过将地层划分为离散化后的网格,同时能够考虑盾构-土体-结构相互作用及施工参数等复杂因素,已成为隧道施工引起的沉降分析最常用的重要工具。数值模拟方法主要包括有限元法、有限差分法和三维非线性分析。张明敏^[8]利用 FLAC3D 构建了地铁站前后的隧道三维模型,有效评估了结构力学性能对结构基础沉降的影响。徐成华等^[9]也建立了盾构隧道施工的三维流固耦合模型,并在成都地铁 4 号线工程中得到验证及应用。然而,数值模拟的准确性与土体参数确定、本构模型选择和边界条件设定以及网格划分密切相关。但数值模拟分析由于其操作性强,准确度相对更高,目前仍是大量工程分析及评估中使用最广泛的分析方法。

因此,为了明确盾构施工过程中邻近建筑基础的变形特性,本文采用数值模拟方法,基于南昌轨道交通 4 号线,系统分析了关键施工参数对一邻近建筑沉降的影响规律。模型考虑了隧道几何参数(深度与直径)、隧道基础相对位置及施工顺序。其中重点考察了覆土深度、隧道直径、基础几何参数以及基础压力、土体弹性模量、体积损失等变量的影响。最终通过参数化分析,建立了多元线性回归预测模型,并利用现场监测数据对模型进行了验证。

1 工程概况

1.1 项目总体情况

南昌地铁 4 号线土建三标区间线路从上沙沟站延伸至火炬站,含四站三区间,线路长度约 4.765km。本文以上沙沟站一起风路站区间地下隧道为研究对象,该段长度 813.064m,采用盾构法施工,埋深 9.9~17.5m,最大纵坡 14‰,最小平曲线半径为 400m。

1.2 工程地质情况

根据现场勘查结果,上沙沟站一起风路站区间的盾构施工范围内,地层自上而下分别为:①人工填土、③₁ 粉质黏土、③₃ 中砂、③₅ 砾砂、⑤_{1,2} 强风化泥质粉砂岩、⑤_{1,3} 中风化泥质粉砂岩。其中拟建区间隧道结构底板主要位于③₅ 砾砂、⑤_{1,3} 中风化泥质粉砂岩以及⑤_{1,2} 强风化泥质粉砂岩等几类地层。隧道所在断面地层纵剖面如图 1 所示。

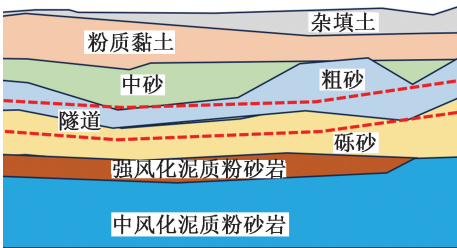


图 1 区间地层剖面

Fig. 1 Stratigraphic section of the interval

1.3 盾构施工参数

上沙沟站一起风路站区间仅投入 1 台盾构机,盾构于上沙沟站始发(右线),掘进至起风路站进行接收。此后进行盾构转场,重新从上沙沟站始发(左线),完成掘进后从起风路站接收、吊装、撤场。盾构区间总长度 813.064m,施工参数如表 1 所示。

表 1 盾构机主要参数

Table 1 Main parameters of shield machine

指标	性能参数
刀盘直径/mm	6 470
管片外径/mm	6 200
刀盘转速/(r·min ⁻¹)	0~2.5
推进速度/(mm·min ⁻¹)	80
最大推力/kN	42 553
刀盘形式	辐条式
刀具	中心鱼尾刀 1 把,焊接式撕裂刀 58 把,刮刀 66 把,边刮刀 12 把,保径刀 12 把,大圆环保护刀 12 把
额定扭矩/(kN·m)	8 128
脱困扭矩/(kN·m)	9 579

1.4 区间周边建筑物信息

施工前根据其他工区类似地层中的盾构施工现场监测数据,初步确定了地表沉降影响范围。据此对施工影响范围内的地面建筑物进行勘察,调研重点为盾构下穿构造物及 9m 范围内的盾构侧穿建筑物。根据调查结果选择 1 栋 4 层框架+砖混结构进行现场监测分析,该建筑采用混凝土筏板基础,基底标高 18.600m,基础埋深 1m,持力层为素填土层。施工时盾构从该建筑斜下方穿过,盾构穿越影响长度 10m。隧道边线距离该建筑筏板基础水平距

离 $B=5.25\text{m}$,垂直距离 $H=12.1\text{m}$,平面相对位置关系如图 2 所示。

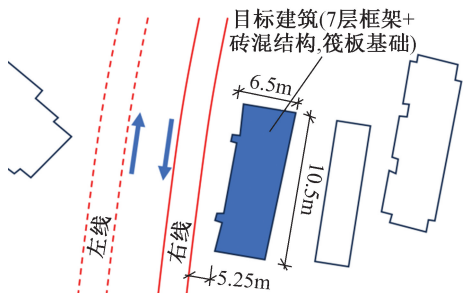


图 2 相对位置平面
Fig. 2 Plan view of relative position

2 数值模型仿真

2.1 模型信息

为了分析盾构通过建筑底部时建筑基础的沉降规律,本文采用 PLAXIS 3D 进行数值建模。模型宽 100m,长 70m,高 50m,如图 3 所示(为了便于体现隧道的相对位置,图 3 仅显示了模型的一半)。参考现场建筑,设置基础宽 6.5m,长 10.0m,筏板厚 1m。隧道管片直径为 6.2m,开挖直径为 6.4m,盾壳与围岩间隙内设置注浆层。对于模型的边界条件,模型 4 个侧面设置了法向位移约束,底部则限制了水平和垂直位移。为了在复杂土壤条件下减少计算时间并确保足够的精度,采用了粗网格尺寸。在模拟过程中,采用四面体单元来模拟土壤,六节点板单元来模拟盾构机,接触面来考虑土-结构相互作用。

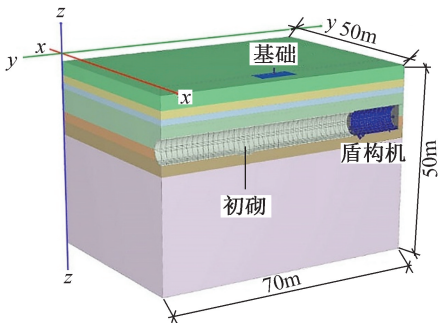


图 3 数值模型
Fig. 3 Numerical model

2.2 模型材料参数

模型中主要分组的材料参数取值如表 2 所示,其中基础、隧道衬砌以及盾构机等结构采用线弹性本构模型进行模拟。地层网格采用莫尔-库伦本构模型,参数取值如表 3 所示。

2.3 盾构开挖数值模拟

在模型中隧道施工顺序的模拟高度还原了实际施工流程。首先激活建筑物荷载及基础,随后分

表 2 基础、盾构机和衬砌的属性

Table 2 Properties of foundation, shield and lining

参数	厚度/ mm	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比
建筑基础	1 000	2 500	30	0.2
盾构机	45	7 700	210	0.3
衬砌	250	2 500	37.5	0.2

表 3 土壤参数

Table 3 Soil parameters

土层 类型	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	弹性模量/ MPa
杂填土	16.2	0.35	10.0	12.5	20.0
砾砂	19.4	0.30	5.1	26.5	46.3

阶段实施隧道开挖,每阶段开挖长度与衬砌段尺寸一致。为精确模拟盾构推进过程,新开挖段内激活代表盾构机的 shell 单元,同时施加盾尾收缩效应以匹配盾构机的圆锥形几何特征。根据现场施工参数,新开挖面施加了 70kPa 的掌子面压力,并激活 300kPa 的同步注浆压力以填充盾尾空隙,同时通过 17 500kN 顶推力驱动盾构机前进。完成当前段施工后立即安装衬砌环,随后进入下一段 1.4m 的开挖流程。上述步骤在总长 70m 的隧道模型中循环执行,整个模拟过程划分为 39 个施工阶段。

2.4 计算方案

为系统分析施工过程中各施工参数对基础沉降的影响,本研究开展了多维度参数化研究。具体参数设置如下:隧道-基础水平间距为 0,5,11,17,23m;基础埋深选择了 1,2,3m;基础宽度为 10,15,20m;基础压力为 50~300kPa;隧道直径被设定为 6.2,6.3,6.4,6.5m;覆土深度以 3m 为增量从 15m 增长到 30m;土壤的弹性模量为 0.5E,1.0E,1.5E,2.0E(E 为隧道所在地层弹性模量 46.3MPa)。研究共计完成 31 组数值模拟试验,通过参数组合分析揭示了各因素对地表沉降的作用机制。

2.5 计算结果多元线性回归分析

本文采用多元线性回归法,旨在建立基础沉降与多个自变量之间的定量关系模型。该方法通过构建自变量的线性组合方程,解析各参数对沉降的贡献权重,其数学表达式可表示为:

$$S = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_n X_n + \epsilon \tag{1}$$

式中: S 为沉降; $\beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_n$ 为回归系数; $X_1, X_2, \cdots, X_n$ 为自变量; ϵ 为误差项。

3 结果和讨论

3.1 隧道-基础间距的影响

本文分析了筏板基础与隧道处于 5 种不同水平距离时,筏板基础的沉降规律。其中隧道-基础间距

为 5m 时,与依托工程现场情况基本一致。基础尺寸为 10m×6.5m×1m,基础与隧道间竖向间距为 12m。计算结果如图 4 所示,图中的沉降数据为筏板最大沉降值。随着基础与隧道轴线间距的增大,基础沉降呈显著递减趋势,基本呈现线性相关。当隧道-基础间距达到 23m 时,平均沉降量较直接下穿的工况($L=0$)减少了 83.5%。其中现场测得的基础沉降为建筑靠近隧道一侧以及远离隧道一侧墙底处测得的沉降数据。

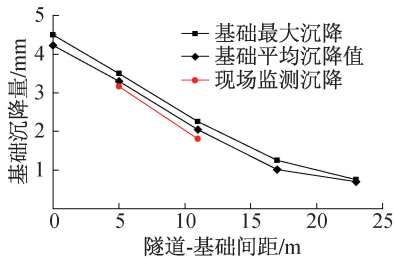


图 4 隧道-基础间距对建筑沉降的影响
Fig. 4 Effect of tunnel-foundation spacing on building settlement

3.2 基础埋深的影响

针对基础埋深,本文模拟分析了筏板基础埋深分别为 1~3m 时基础底板的沉降差异,此时的隧道-基础的水平间距为 5m。计算结果如图 5 所示,当基础埋深为 1m 和 2m 时,基础沉降值相近。当基础埋深为 3m 时,基础沉降量较浅埋工况增加了约 7%。这一沉降异常可归因于 3m 埋深基础所处的地质环境。基础位于隧道开挖扰动区内的松散土层带,该区域位于隧道拱顶上方 1.5 倍隧道直径的范围内。结合依托工程实际情况,松散土层带的延伸范围为地表以下 2.55~12.0m,即松散层厚度为 9.45m。由于盾构施工引起的卸荷效应,该区域的土体导致了深层基础的沉降增加。

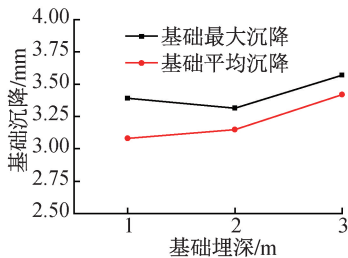


图 5 基础埋深的影响研究
Fig. 5 Impact study of the effect of foundation depth

3.3 基础底板宽度的影响

针对基础宽度不同时,建筑基础对于隧道开挖的响应差异,本文分析了筏板基础宽度分别为 10, 15, 20m 时,基础沉降的变化规律。基础宽度为 10m

时的工况与现场情况一致,对比工况为 15m 和 20m。计算结果如图 6 所示,当基础宽度由 10m 增至 15m 时,地表沉降量增幅达 12%。当宽度进一步增至 20m 时,沉降量较 15m 工况减少 9.5%。其中基础宽度为 15m 时产生的最大沉降最大,但 3 个工况的平均沉降值相差并不显著。整体而言,基础宽度自 10m 增大到 20m 的过程中,沉降峰值以及平均沉降值变化范围小于 1mm。

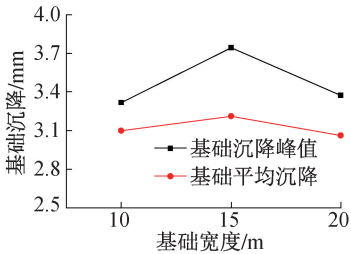


图 6 基础宽度的影响研究
Fig. 6 Impact study of the effect of foundation width

3.4 基础顶板压力的影响

本文依托的研究区内的建筑结构为 4 层建筑,参考规范及相关研究,将各楼栋对地层的荷载可简化为竖向均布荷载,荷载取值为 105kPa。因此为了分析不同层数建筑沉降情况,设置基础压力以 50kPa 的增量从 50kPa 增长到 300kPa。计算结果如图 7 所示,随着基础压力的均匀增大,建筑基础的沉降量也呈线性增加。其中当筏板基础上部的压力为 300kPa 时,基础沉降达到 6mm,对比而言建筑沉降对于基础顶板的压力以及隧道-基础间距更为敏感。

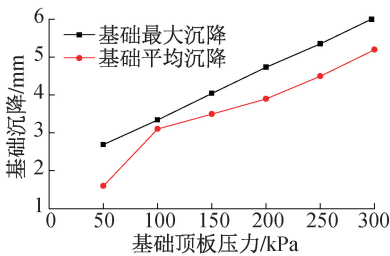


图 7 基础压力的影响研究
Fig. 7 Impact study of the effect of base pressure

3.5 隧道开挖直径影响

针对盾构超挖,本文分析了管片直径为 6.2m 时,开挖直径分别为 6.2~6.5m 时的 4 种工况,其中开挖直径为 6.2m 表示不存在盾尾间隙,开挖直径为 6.4m 时与现场实际情况一致。计算结果如图 8 所示,基础沉降量随隧道开挖直径增大呈现非线性增长。对于确定的管片直径而言,开挖直径差异主要表现为地层损失量,现有研究已经证明,地层损

失对于地表沉降影响非常显著。计算结果表明,当开挖直径为 6.5m 时,引起的基础沉降达到 5.75mm,但当开挖直径为 6.2m 以及 6.3m 时,基础沉降差异并不显著。这是由于盾构掘进过程中,小断面开挖引发的三维土拱效应已经能够基本维持地层稳定,因此断面收敛值较小。

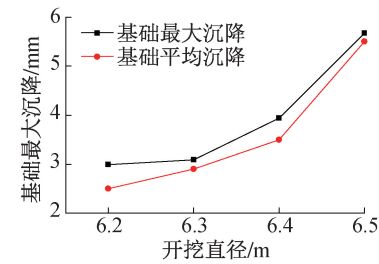


图 8 隧道直径影响研究

Fig. 8 Impact study of the effect of tunnel diameter

3.6 隧道埋深的影响研究

隧道开挖引起的地层损失会在盾尾同步注浆之后得到填充,而造成的地层失稳则会在土拱效应以及盾尾注浆共同作用下达到稳定。而这种恢复在开挖范围上部一定范围之外才能够得到体现,因此当隧道埋深较浅时,隧道上方所有覆土均处于失稳范围内,则建筑基础也会发生显著沉降。本文通过 6 个工况分析了埋深对基础沉降的影响,计算结果如图 9 所示,随着埋深增大,基础沉降逐渐减小并稳定。当埋深从 15m 增加到 21m 时,沉降减少幅度约为 38.4%,当埋深从 21m 增加到 27m 阶段,降幅趋缓,约为 12.5%。

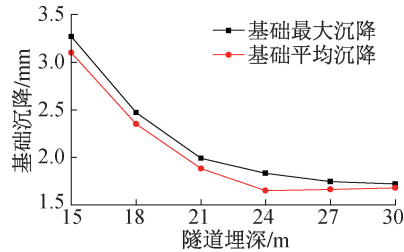


图 9 埋深的影响研究

Fig. 9 Impact study of the effect of depth of burial

3.7 土壤弹性模量影响研究

在不同地质层中进行隧道开挖引起的地层变形响应存在差异,硬质地层中自稳定性较强,软土地层稳定性较差。本文通过设置不同土壤弹性模量分析了不同地层中隧道开挖引起的地表基础结构沉降差异。计算结果如图 10 所示,当弹性模量仅为 0.5E 时,相比 1E 时地表沉降量激增 73%,表明土体刚度降低显著加剧塑性变形累积。弹性模量提升至 1.5E 时,基础最大沉降量较 1E 时降低了

28%;增至 2E 时,沉降量进一步减少 18%,随着地层变形模量逐渐增大,基础最大沉降最终逐渐稳定在 2mm。

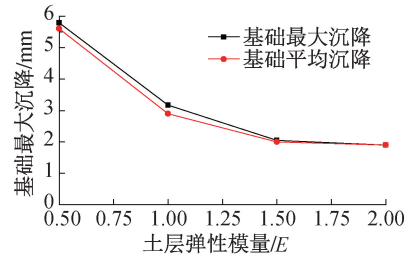


图 10 土壤弹性模量影响研究

Fig. 10 Impact study of the effect of soil elastic modulus

4 基础沉降多元线性回归分析

本文采用多元线性回归方法建立了地表沉降与 7 个关键自变量间的定量关系模型,自变量包括:基础距隧道轴线距离(L)、基础埋深(d_f)、基础宽度(B)、基础压力(P)、隧道直径(D)、隧道埋深(H)、弹性模量(E)。回归分析结果如表 4 所示,标准差 SE 表示数据点与拟合值之间的距离, t 用于检验原假设, p 值是一个统计数,用于判断相应的因变量和自变量之间是否存在关系。 $p>0.05$ 表明变量对沉降的影响不显著,无法建立可靠依赖关系。

初步分析表明,基础宽度(B)与基础深度(d_f)的 p 值 >0.05 ,表明其对沉降的影响不显著。因此,剔除这两个变量后重新进行回归分析,结果如表 5 所示。该优化模型显著提升了拟合优度,为沉降预测提供了更可靠的模型。

根据多元线性分析结果,用 S 表示隧道施工引起的基础沉降:

$$S = -27.63 - 4.877D + 1.004H + 1.147L - 0.1303P + 0.00035E$$

(2)

5 结语

针对隧道施工引起的地表筏板基础变形,本文基于数值模拟方法进行了参数分析计算。并基于计算结果进行了多因素回归分析,提出了考虑开挖直径、隧道埋深、基础-隧道水平间距以及基础压力与土层弹性模量的回归公式。但本文未考虑土壤参数的不均匀性,因此未来研究可进一步考虑这一因素。本文提出的模型可用于类似地质条件下因隧道施工引起的沉降的初步预测。此外,本文尚未涉及其他盾构性能参数,如盾构机的穿透率、开挖速度和注浆量。因此未来还需考虑一些动态参数,如因强降雨导致地下水位上升的影响,以及地铁运营期间和运营后施工引起的振动。

本文针对南昌地铁 4 号线的施工过程,基于数

表 4 回归分析结果

Table 4 Results of regression analysis

变量	拟合值	标准差 SE	<i>t</i>	<i>p</i>
截距	-21.965	15.626	-1.405 6	0.168 4
隧道直径 (<i>D</i>)	-4.936 1	0.781 78	-6.313 9	2.65×10^{-7}
隧道埋深 (<i>H</i>)	0.803 15	0.263 39	3.049 2	0.004 285 3
基础宽度 (<i>B</i>)	-0.187 56	0.635 96	-0.294 92	0.769 75
基础-隧道间距 (<i>L</i>)	1.083 7	0.235 79	4.596	5.13×10^{-5}
基础埋深 (<i>d_f</i>)	-0.895	4.837	-0.185 03	0.854 24
基础压力 (<i>P</i>)	-0.139 58	0.025 967	-5.375 6	4.75×10^{-6}
弹性模量 (<i>E</i>)	0.000 634 1	0.000 108 63	5.837 5	1.15×10^{-6}

表 5 优化后分析结果

Table 5 Optimized analysis results

变量	拟合值	标准差 SE	<i>t</i>	<i>p</i>
截距	-26.716	9.954 6	-2.683 8	0.0115 75
隧道直径 (<i>D</i>)	-4.934	0.775 66	-6.361 1	4.41×10^{-7}
隧道埋深 (<i>H</i>)	0.780 26	0.266 5	2.927 8	0.006 345 8
基础-隧道间距 (<i>L</i>)	1.075 1	0.237 5	4.526 9	8.29×10^{-5}
基础压力 (<i>P</i>)	-0.141 53	0.0260 86	-5.425 7	6.34×10^{-6}
弹性模量 (<i>E</i>)	0.000 620 77	0.000 108 19	5.738	2.59×10^{-6}

值模拟方法以及多元线性回归分析,针对地铁隧道盾构施工引起的筏板基础沉降进行分析,最终得出以下结论:筏板基础沉降随基础-隧道间距、隧道埋深以及土层模量的增大降低,但随着开挖直径以及基础顶板压力的增大而增大。其中当隧道-基础间距为 23m 时,平均沉降量较直接下穿的工况减少了 83.5%。当开挖直径为 6.5m 时,引起的基础沉降达到 5.75mm。当埋深从 15m 增加到 21m 时,沉降减少幅度约为 38.4%。相比于弹性模量为 E 时,当弹性模量仅为 $0.5E$ 时,地表沉降量激增 73%,弹性模量提升至 $1.5E$ 时,基础最大沉降量降低了 28%。

参考文献:

[1] ZHANG Z G, HUANG M S, ZHANG M X. Theoretical prediction of ground movements induced by tunnelling in multi-layered soils [J]. Tunnelling and underground space technology incorporating trenchless technology research, 2011, 26(2): 345-355.

[2] 周敏. 地下开采地表移动变形的规律研究及影响因素分析 [D]. 重庆: 重庆大学, 2011.

ZHOU M. Research on the law of surface movement and deformation in underground mining and analysis of influencing factors [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.

[3] 齐静静, 徐日庆, 魏纲, 等. 隧道盾构法施工引起周围土体附加应力分析 [J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 529-534, 544.

QI J J, XU R Q, WEI G, et al. Analysis of additional stress of surrounding soil caused by shield tunneling [J]. Rock and soil mechanics, 2008, 29(2): 529-534, 544.

[4] RITTER S, GIARDINA G, DEJONG M J, et al. Centrifuge modelling of building response to tunnel excavation [J]. International journal of physical modelling in geotechnics, 2018,

18(3): 146-161.

[5] 王智德, 周泉涌, 李根, 等. 富水地层双线隧道开挖的模型试验研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2024, 46(12): 89-96.

WANG Z D, ZHOU Q Y, LI G, et al. Study on model test of double line tunnel excavation in water rich strata [J]. Journal of Wuhan University of technology, 2024, 46(12): 89-96.

[6] 徐平, 席丹辉, 高强. 曲线隧道盾构掘进引起地表变形模型试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(S2): 713-721.

XU P, XI D H, GAO Q. Experimental study on surface deformation caused by shield tunneling in curved tunnels [J]. Journal of underground space and engineering, 2024, 20(S2): 713-721.

[7] 孙立军, 付金伟, 刘美, 等. 地表堆载对盾构隧道稳定性影响的三维试验研究 [J]. 工程勘察, 2024, 52(11): 1-6, 20.

SUN L J, FU J W, LIU M, et al. Three dimensional experimental study on the influence of surface surcharge on the stability of shield tunnel [J]. Geotechnical investigation & surveying, 2024, 52(11): 1-6, 20.

[8] 张明敏. 深基坑复合土钉墙支护 FLAC3D 模拟与现场测试研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.

ZHANG M M. FLAC3D simulation and field test of composite soil nailing wall support in deep foundation pit [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011.

[9] 徐成华, 谈金忠, 骆祖江, 等. 地铁盾构施工引发地面沉降三维流固全耦合数值模拟预测 [J]. 南京大学学报(自然科学), 2019, 55(3): 409-419.

XU C H, TAN J Z, LUO Z J, et al. Three dimensional fluid solid coupling numerical simulation prediction of ground settlement caused by subway shield construction [J]. Journal of Nanjing University (natural science edition), 2019, 55(3): 409-419.