

支护力对盾构隧道地表沉降影响的模型与验证

乔丽苹¹, 苏国峰¹, 王者超², 刘欣然³, 李 巍²

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819;

2. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110004;

3. 北京市市政四建设工程有限责任公司, 北京 110045)

摘 要: 影响盾构隧道施工过程中地表沉降的因素多种多样, 不仅有土体性质的影响, 还有施工参数的作用。对盾构施工引起的地表沉降规律和支护力对地表沉降的影响问题, 首先基于 Sagaseta 的地层损失模型, 在考虑盾构机径向支护力的条件下, 改进了土体损失的理论模型; 其次, 结合土仓压力、土体与盾构机之间的摩擦力的 Mindlin 位移解, 计算了沈阳地铁粉质黏土盾构隧道开挖引起的横向地表沉降槽曲线和纵向地表沉降曲线, 再利用沈阳地铁四号线现场监测数据、数值模拟结果和计算结果的对比, 验证了理论模型的正确性。最后, 利用数值模拟方法和理论计算, 得出了沈阳地铁四号线隧道施工时的地表沉降规律, 在沈阳地铁粉质黏土隧道施工支护力为 0.3 MPa 时, 量化了支护力为 0.3 MPa 时盾构机支护力对地表沉降的影响: 抑制地表沉降约为 0.7 mm, 研究成果为类似的工程建设提供有益的参考。

关键词: 盾构施工; 粉质黏土; Mindlin 解; 支护力; 地表沉降

中图分类号: U455.43

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2022)01—0125—09

Modeling and Verification of Influences of Support Force on Shield Construction

QIAO Liping¹, SU Guofeng¹, WANG Zhechao², LIU Xinran³, LI Wei²

(1. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines,
Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110004, China;

3. Beijing Municipal Fourth Construction Engineering Co., Ltd., Beijing 110045, China)

Abstract: There are many factors that affect the surface subsidence in the construction process of shield tunnel, which not only have the influence of soil properties, but also the function of construction parameters. Firstly, based on Sagaseta's stratum loss model and considering the radial support force of shield machine, the theoretical model of soil loss is improved. Secondly, using the Mindlin combined with the pressure of the earth tank and the friction between the soil body and the shield machine Displacement solution, we calculated the Shenyang metro powder clay shield tunnel excavation caused by the horizontal surface subsidence trough curve and vertical surface subsidence curve, and then used the Shenyang Metro Line 4 on-site monitoring data, numerical simulation results and calculation results of the comparison. The validity of the theoretical model is verified. Finally, using numerical simulation method and theoretical calculation, the law of surface settlement during tunnel construction of Shenyang Metro Line 4 is obtained, when the construction support force of the powder clay tunnel in Shenyang subway is 0.3 MPa, the effects of the support force of the shield machine support force of 0.3 MPa on surface subsidence is quantified which is about 0.7 mm, the research results of which could provide a useful reference for similar construction projects.

Keywords: shield construction; silty clay; Mindlin solution; support force; surface settlement

在地下空间开发过程中,盾构技术被广泛地应用于城市地铁、铁路隧道以及市政隧道等工程建设。而粉质黏土地层在我国分布较广,并且是城市轨道交通中经常遇到的地质条件,例如哈尔滨、南京、沈阳、上海等地。由于粉质黏土对含水率的敏感性强,在不同含水率下的内摩擦角、黏聚力、弹性模量等力学性质参数跨度大。盾构施工对地层扰动明显、地表沉降变形规律也更为复杂。

目前,已经有大量学者对盾构机施工引发的地表变形规律进行了研究,取得了许多有价值的成果。Peck^[1]根据大量施工监测数据,构建经验公式预测了盾构施工引起的地表沉降,一些学者以此为基础修正了 Peck 公式,提高了 Peck 公式的适用性:Attewell 等^[2]和 Rankin^[3]根据伦敦地铁经验,研究了不同黏性土地表沉降槽宽度取值;李炯等^[4]将中心点法应用于改进的 Peck 公式中,对地表沉降的平均值、标准差及其可靠度进行计算,得出了双孔隧道先行洞的施工对后行洞产生的扰动影响;赵胤翔等^[5]研究了在富水粉细砂地层施工引起的地表沉降,得出富水粉细砂地层沉降槽宽度的修正系数位于 0.6~0.9 之间。有些学者在理论解方面进行了研究:Sagaseta^[6-7]假设土体为各向同性,利用虚拟镜像法将土体损失看成是半无限体问题;随后 Verrijt 等^[8]和 Loganathan^[9]研究了不同隧道开挖方法和土体的弹塑性变形,重新定义了等效不排水地层损失,并对 Sagaseta 公式进行了修改,得出了不排水条件下盾构隧道不均匀地层损失引起的地表沉降公式;魏纲等^[10]根据 Mindlin 解,从施工参数角度推导了盾构隧道开挖面附加推力、盾壳摩阻力、附加注浆压力及地层损失所引起的地表沉降变形公式。随着监测数据的精准,王泽阳等^[11]以上海软土地铁盾构隧道和北京地铁机场线的纵向不均匀沉降案例为例,分析了盾构隧道产生纵向不均匀沉降的原因。林存刚^[12]对泥水盾构下穿阶段上覆既有砌体结构的沉降和裂缝开展原位监测,得出了盾构切口和建筑物距离对建筑物沉降的影响,并分析了墙体裂缝的扩展情况。

随着技术的发展,在模型试验的研究也逐步深入:黄德中等^[13]利用离心模型试验对盾构隧道的地层损失进行了模拟,研究了粉质黏土地层损失与地表沉降之间的关联;杨兵明等^[14]进一步利用宁波典型软土进行三轴不排水固结蠕变试验,得出其物理

力学性质和固结蠕变特征参数,揭示了动荷载对地层变形的影响规律。随着数值模拟的技术的进步,有些学者用数值技术展开了研究:Meng 等^[15]基于极限分析和滑移线理论,建立了二维分析模型,求解在纯黏性土中盾构法隧道的临界坍塌压力;李崴等^[16]通过室内试验得到不同液性指数粉质黏土的力学参数,并利用 FLAC^{3D}研究了不同情况下的超前支护方法。但目前在粉质黏土盾构施工引起地表变形研究中,没有考虑到支护力在地应力释放中的作用。不同土体性质的地表沉降有很大差异,因此明确沈阳粉质黏土的性质,对研究沈阳粉质黏土地表沉降规律是必不可少的。

本文以沈阳地铁四号线为背景,通过室内试验,得到了粉质黏土力学参数。修正了支护力作用的地表沉降计算公式,综合隧道开挖时土舱压力、土体与盾构机之间的摩擦力,得到了沈阳粉质黏土盾构施工地表沉降槽曲线和纵向沉降曲线,并通过现场监测和理论结果的对比,验证了理论公式的正确性,得到了沈阳粉质黏土盾构隧道施工引发的地表沉降规律。并通过模拟结果和理论结果,量化了支护力对地表沉降的影响。

1 支护力对盾构隧道地表沉降影响的理论模型

盾构掘进中引起土体变形与位移的因素有很多,其中土舱压力是施加在盾构机掌子面上,平衡掌子面前方水土压力;支护力是开挖后围压应力释放时支撑在围岩上的径向压力;土体与盾构机之间的摩擦力是盾构机向前推进时与围岩的相对滑动作用,因此影响地表沉降的主要因素可分为:支护力、地应力释放、土舱压力、土体与盾构机之间的摩擦力,如图 1 所示。

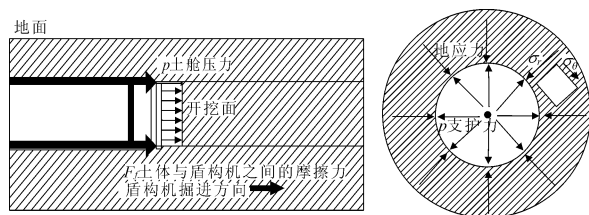


图 1 盾构掘进时土体受力示意图

盾构推进过程中假设条件如下:(1) 土体为均质的弹塑性半无限空间体;(2) 掌子面为荷载作用面,正面附加推力假设为圆形均布荷载;(3) 盾壳与

土体之间的摩擦力沿盾壳圆周均匀分布;(4) 盾构沿隧道轴线水平推进。

1.1 地应力释放对地表沉降的影响

根据隧道开挖平面应变模型,进行隧道开挖过程中地应力分析,提出如下基本假设:(1) 计算时只考虑由自重产生的自重应力场^[17-18];(2) 当隧道埋深超过地表一定深度时(2D),可将其简化为无限体中的孔洞问题计算。横断面的地表沉降的弹性位移和塑性位移分别为:

$$u_1 = \frac{r_0}{2G}\sigma_y = \frac{(1+\mu)r_0}{E}\sigma_y \quad (1)$$

$$u_2 = \frac{1}{2G}(\sigma_y - \sigma_{r0}) \frac{R_p^2}{r_0} \quad (2)$$

式中: $R_p = r_0 \left[\frac{2p_0(\beta-1) + 2\delta}{\delta(\beta+1)} \right]$, $\delta = \frac{2c\cos\varphi}{1-\sin\varphi}$,

$\beta = \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}$, $\sigma_{r0} = \frac{2\sigma_y - \delta}{\beta+1}$; u_1 、 u_2 分别为地应力释放引起的弹性位移和塑性位移; r_0 为盾构半径; c 为粉质黏土的黏聚力; φ 为内摩擦角; p_0 为初始应力; R_p 为塑性半径; σ_y 为竖向地应力。

二维的地应力释放问题^[19] 假定土体损失率 η 是一个定值,但盾构掘进的过程中因为地应力释放的时间不同,每个断面的土体损失率也不同,故而每个断面的地表沉曲线也不尽相同。假设盾构掘进过程中土体损失率 η 不是一个定值,而是随时间推进沿着掘进方向不断变化的;土体损失沿开挖方向为一圆柱体,见图2。采用镜像法,其中令 $y=0$,则沿隧道轴线方向的地表沉降公式^[20]:

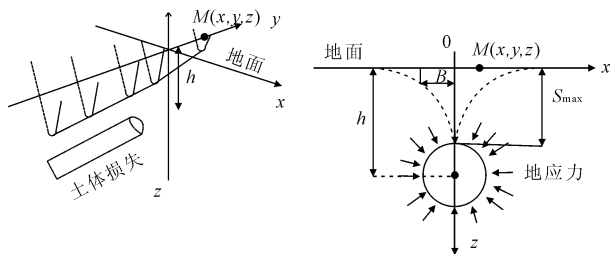


图2 地应力释放引起的地层损失示意图

$$u_3 = \frac{BR^2\eta}{4} \left\{ \frac{h-z}{y^2 + (h-z)^2} + \frac{h+z}{y^2 + (h+z)^2} - \frac{2z[y^2 - (h+z)^2]^2}{[y^2 + (h+z)^2]^2} \right\} \left[\frac{y^2 \ln \lambda}{(h+R)^2} + \frac{z^2 (\ln \lambda - \ln \delta)}{(h+d)^2} \right] \quad (3)$$

其中,

$$\begin{cases} B = \frac{4h[h+d - \sqrt{(h+d)^2 - \eta(x)(R+d)^2}]}{R\eta(x)(R+d)} \\ \delta = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \arcsin \left[\frac{2d}{R(1 + \sqrt{1 - \eta(x)})} \right] \\ \frac{\eta(x)}{S_{\max}(x)} = \frac{\eta(x=-\infty)}{S_{\max}(x=-\infty)} = \frac{\eta\pi h}{V_{\text{loss}}} \\ \lambda = \frac{1}{4} - \frac{2(1 - \sqrt{1 - \eta(x)})}{\pi\eta(x)} \left[\arcsin \left(\frac{d}{R\sqrt{1 - \eta(x)}} \right) + \sqrt{1 - \left(\frac{d}{R\sqrt{1 - \eta(x)}} \right)^2} - 1 \right] \end{cases} \quad (4)$$

式中: y 为距离隧道轴线的横向水平距离; z 为离地面的垂直向距离; d 为土体移动点到隧道中心点的距离,取值 $d=0.8R$,土体损失率 η 取 1.3% ^[10]。

1.2 考虑支护后地应力释放引起的地表沉降

隧道开挖后,地应力释放引起的应力重分布超过土体屈服强度时,在一定范围内出现塑性区域,隧道施加支护以后,周边围岩受到了阻止其变形的支护抗力,支护力可以阻止周围粉质黏土的不利变形,维持隧道稳定。假设支护力沿隧道开挖临空面径向均匀分布,支护力以 p_r 表示,且支护效应在施作后立即发挥,施加支护后的隧道应力状态见图3。

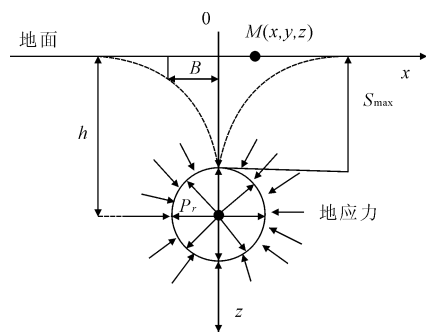


图3 施加支护后的隧道力学模型

此时,支护力阻止了地应力释放,则围岩弹性位移和塑性位移为:

$$u_4 = \frac{r_0}{2G}(\sigma_y - p_r) = \frac{(1+\mu)r_0}{E}(\sigma_y - p_r) \quad (5)$$

$$u_5 = \frac{1}{2G} \left[\sigma_y - \frac{2(\sigma_y - p_r)}{\beta+1} - \delta \right] \left[\frac{2(\sigma_y - p_r) + 2\delta}{\delta(\beta+1)} \right]^2 \quad (6)$$

式中: u_4 、 u_5 分别为支护后的弹性位移和塑性位移; p_r 为支护力。

1.3 土舱压力对地表沉降的影响

土舱压力有平衡前方水土压力的作用,是控制盾构施工掌子面稳定至关重要的因素。利用 Mindlin

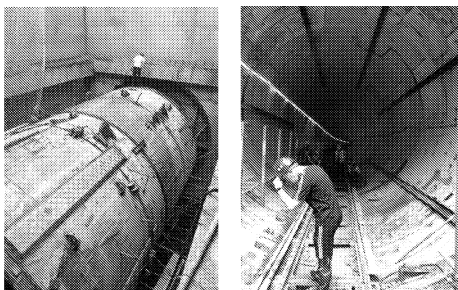


图 7 现场施工情况

2.2 粉质黏土三轴试验

取沈阳地铁现场粉质黏土进行液塑限试验,得到沈阳地区劳动路粉质黏土液限含水率为 38.8%,塑限含水率为 22.5%,塑性指数为 16.3,液性指数为 0.25。

沈阳地铁四号线望花街站—劳动路站区间隧道施工主要穿越地层为粉质黏土地层,埋深约为 16 m~18 m,土体原始水平应力在 100 kPa~400 kPa 之间。为了获取粉质黏土的物理力学性质,开展常规三轴试验且设计围压分别为 100 kPa、200 kPa、400 kPa。将土样按照要求^[25]制成 $d=39.1\text{ mm}$, $h=80\text{ mm}$ 的标准圆柱试样,采用南京 TKA 生产的 TKA 应力路径流变三轴仪进行三轴试验。三轴试验结束的条件依据文献[26]进行判定,当出现峰值后,继续剪切 3%~5% 轴向应变;若测力计读数无明显减少,则剪切至轴向应变达 15%~20% (本次试验取 16%)^[16]。试验分组情况见表 1。

表 1 粉质黏土三轴试验分组

土样编号	含水率/%	液性指数	土体状态	围压/kPa
1-1	23.75	0.25	天然	100
1-2				200
1-3				400

进行粉质黏土进行常规三轴固结不排水试验,研究沈阳地区粉质黏土弹性模量、内摩擦角和黏聚力等力学参数。

(1) 粉质黏土应力-应变、体应变-应变曲线分别见图 8、图 9。

根据图 8,沈阳地铁粉质黏土在加载的过程中,首先随着偏应力的增加,轴向应变逐渐增大,在轴向应变达到 7% 时,此时偏应力不再增加,但是轴向应变逐渐变大,最终破坏。可见沈阳粉质黏土在轴向应变达到 7% 时,达到剪切破坏。在含水率相同时,随着围压的增加,剪切破坏时的偏应力越大,剪切强度越大。

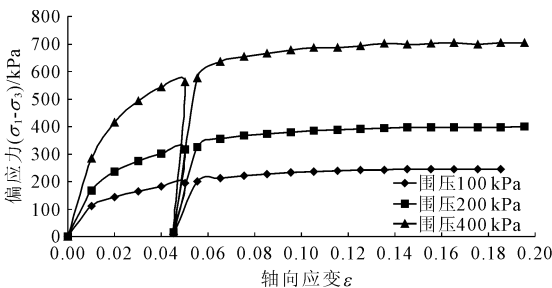


图 8 土样 1 ($\omega=23.75\%$) 应力-应变曲线

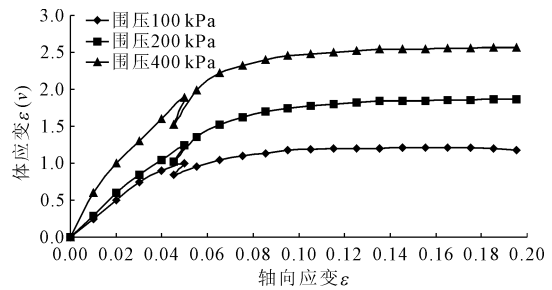


图 9 土样 1 ($\omega=23.75\%$) 体应变-应变曲线

(2) 内摩擦角 φ 、黏聚力 c 和弹性模量 E 。采用莫尔圆的画法^[24],根据试样试验得出偏应力和轴向应变值,得到内摩擦角 φ 、黏聚力 c 和弹性模量 E ,见表 2。

表 2 粉质黏土内摩擦角 φ 、黏聚力 c 和弹性模量 E

含水率 $\omega/\%$	液性指数	弹性模量 E/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	黏聚力 c/kPa
23.75	0.25	25.20	20.0	55.20

2.3 现场监测方法

为了验证上述理论公式的正确性,在沈阳地铁四号线望花路站—劳动路站 DBC3483—DBC3533 段开展位移监测和对比试验。监测仪器采用徕卡水准仪 (DNA03),测量精度:0.3 mm/km,最小显示 0.01 mm;可进行夜间测量、轨道监测。

如图 9 所示,比较盾构施工引起的纵向地表沉降和地表沉降槽曲线。现场位移监测主要是监测拱顶下沉和地表沉降,在试验段内,每隔 10 m 布置一个监测断面,每个监测断面布置 7 个地表监测点(从左到右依此编号为 1~7)一直布置了 42 个位移监测点,监测点布置如图 10、图 11 所示。

2.4 数值模拟方法

为了探究支护力对地表沉降的影响大小和粉质黏土地层盾构施工的地表沉降规律,采用 FLAC^{3D} 有限差分软件进行研究,所建模型的大小为 (80 m × 40 m × 56 m) (其中,隧道轴线方向 80 m,沿 x 轴取半对称结构分析),如图 11 所示。隧道顶部距地表

18 m,隧道底部距下边界 32 m;其中隧道为半径为 3 m 的半圆形洞室,地表至隧道底部 2 m 为粉质黏土,底部 2 m 至模型下边界为砂土。一次性开挖 40 m,掌子面处施加均布力,并在开挖后及时加上支护力和衬砌结构。

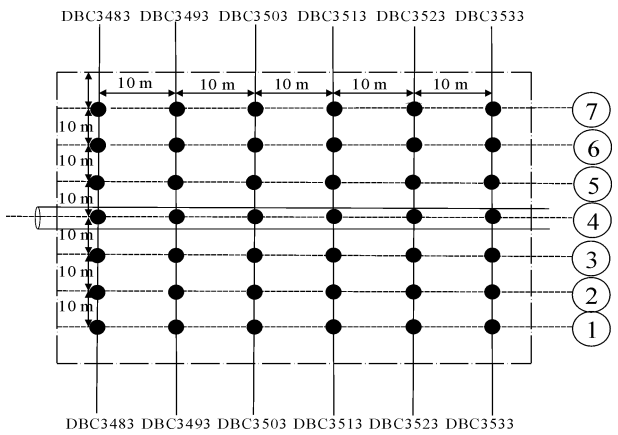


图 10 区间监测点布置示意图

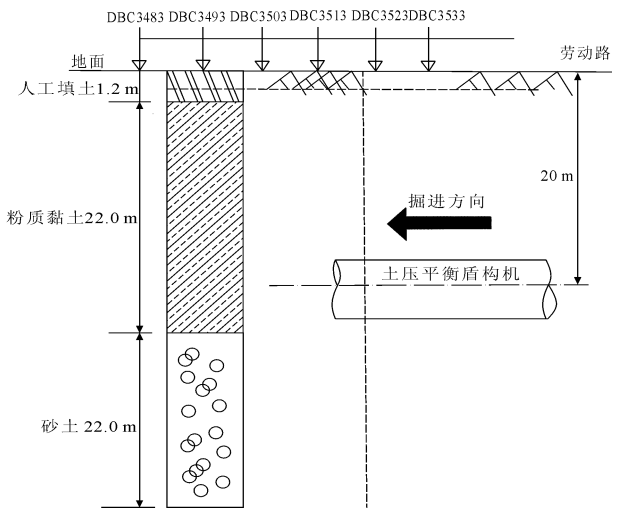


图 11 位移监测点布置示意图

模型采用应力和位移混合边界条件,掌子面土舱压力按均布力施加在掌子面;土体与盾构机之间的摩擦力和支护力施加在已开挖的土体与盾构机之间见图 12。

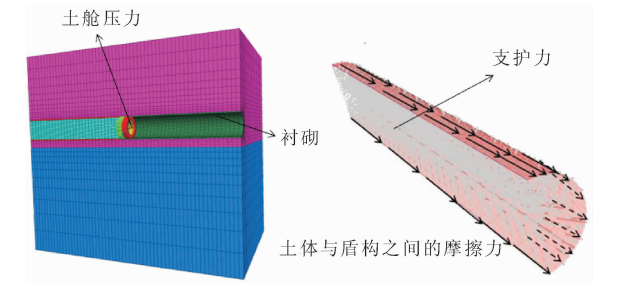


图 12 数值模型

根据沈阳地铁隧道设计,在数值模拟中,用衬砌单元模拟支护。盾构施工的上层粉质黏土参数根据现场 DBC3483—DBC3533 监测区间获得,下层砂土根据现场试验获得,见表 3。施工参数见表 4。

表 3 望一劳区间盾构施工参数

土舱压力/kN	10000
支护力/MPa	0.3
摩擦系数	0.5
衬砌弹性模量/GPa	20
衬砌泊松比	0.15
衬砌厚度/mm	300
衬砌密度/(g·cm ⁻³)	2.50

表 4 数值模拟参数

土类型	粉质黏土	砂土
内摩擦角/(°)	20	30
黏聚力/kPa	55.2	0.0
弹性模量/kPa	25.2	40.0
泊松比	0.30	0.25
密度/(g·cm ⁻³)	1.80	1.98
剪胀角/(°)	7	0
抗拉强度/kPa	30	0

3 模型验证结果与讨论

3.1 现场监测结果

根据上述监测方案,采用全站仪在地铁隧道盾构施工区间中环号 DBC3483—DBC35333 之间隧道轴线上,即每个横断面上④号监测点,监测盾构施工引起的地表沉降数值,位移监测数据结果见图 13。

从图 13(a)可以看出,隧道施工后由于盾构机的开挖的影响,地层受到扰动,地表下沉,随着扰动稳定和土体空隙被填充,逐渐稳定,地表沉降的范围稳定在 1.5 mm~4.0 mm 之间。

从图 13(b)、图 13(c)中可以看出:每个地表沉降槽的分布曲线都大致呈现高斯分布,即在同一个横断面上监测点的最大沉降值在隧道轴线上,最大沉降值在 0.5 mm~2.5 mm;距离隧道中心线越远,地表沉降越小,趋近于 0,且呈对称趋势。在开挖面前方距离开挖面越近,盾构施工对地表沉降的影响越明显,地表沉降也越大;距开挖面越远,土体所受的扰动越小,土体越稳定,对地表沉降的影响越小。在开挖面后方由于土体固结地表沉降逐渐稳定,需要进行及时注浆与后期注浆,保持地层稳定,最终地表沉降稳定在 2 mm~4 mm。

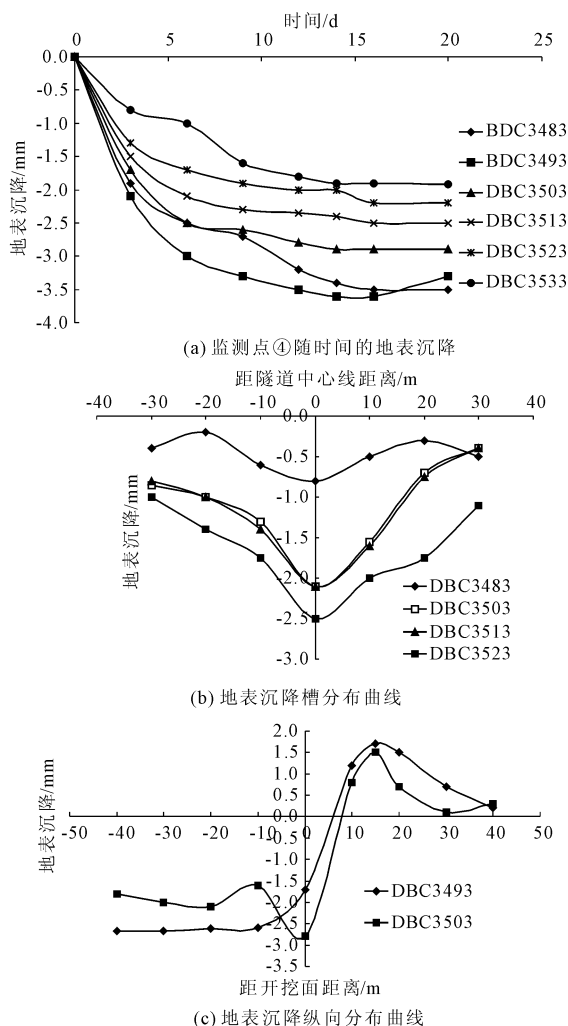


图 13 现场位移监测的数据

3.2 数值模拟结果

根据数值模拟结果,分别在隧道开挖面($y = 40$ m)横断面和沿着隧道正上方的轴线方向的地表,每隔 10 m 选取一个监测点,监测数据和数值模拟选取的时间为盾构施工开挖面达到监测点正下方时的地表沉降,绘制了数值模拟与现场监测的地表沉降曲线见图 14。

根据图 14 的数值模拟和现场监测数据对比可知:地表沉降槽结果与现场监测数据的趋势相同,呈左右对称高斯曲线,最大沉降出现在隧道中心线处,数值模拟结果为 1.8 mm,与现场监测数据接近,且在距隧道中心线 20 m 处地表沉降逐渐稳定。

土体被开挖后,土体向隧道内移动,地表沉降,随着盾构机向前挖掘,地应力的逐渐释放与土层空隙的填充,地表继续沉降,如图 14(b)中距开挖面(-10 m ~ 0 m)段;此时设置支护力和衬砌,阻止了土体继续下沉,且土层空隙被填充后,地表沉降逐渐

稳定,如图 14(b)中距开挖面(-40 m ~ -10 m)段。

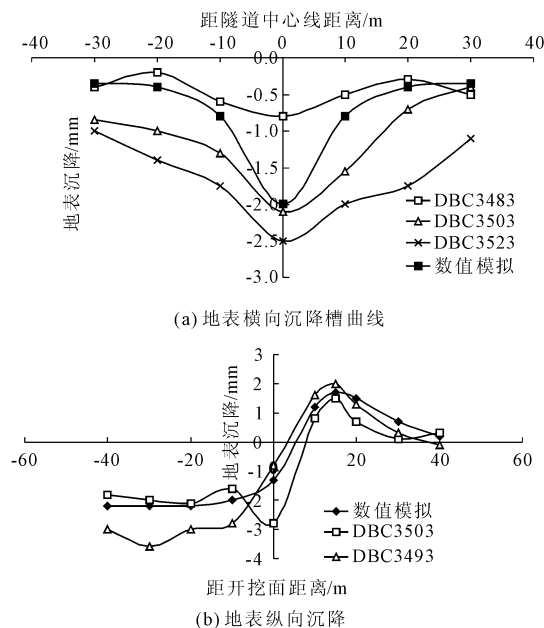
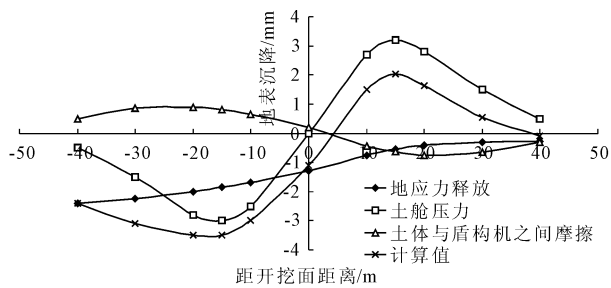


图 14 现场监测结果与模拟结果对比

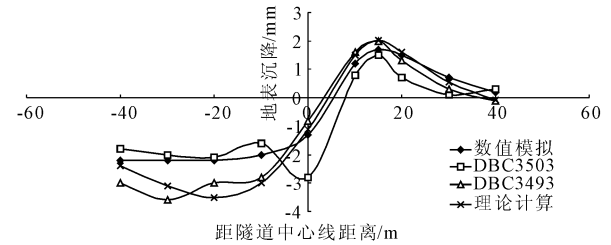
3.3 理论计算结果的对比较证

为了验证理论模型的正确性,根据数值模拟结果,分别在隧道开挖面($y = 40$ m)横断面和沿着隧道正上方的轴线方向的地表,每隔 10 m 选取一个监测点和现场监测结果对比,监测数据和数值模拟选取的时间为盾构施工开挖面达到监测点正下方时的地表沉降,根据现场监测区间的土舱压力、支护力、埋深等数据,见表 3。将室内试验得到的粉质黏土参数与盾构施工参数代入式(11)、式(12),对比理论计算结果与现场监测结果和数值模拟结果,见图 15。

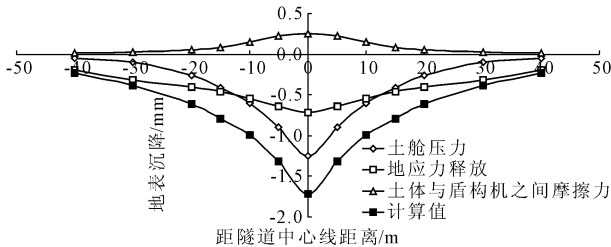
由图 15(b)纵向地表沉降的理论计算结果与现场监测结果、数值模拟结果的对比可知:掌子面前方 $2.5D(x = 15$ m)处地表隆起最大为 1.8 mm;距掌子面 $3.0D$ 处的地表沉降达到稳定为 2 mm ~ 3 mm,考虑理论计算时没考虑注浆等后期工作,因此轴线方向后方的在理论计算值比较大;因为地表建筑的抑制作用,盾构机前方的隆起值地表沉降略高于现场值。土体被开挖后,由于地应力释放和盾构机对土层的扰动,土体向隧道内移动,因此地表沉降,随着盾构机向前挖掘,地应力逐渐释放与土层空隙的填充,地表继续沉降,如图 15(b)中距开挖面(-10 m ~ 0 m)段;此时设置支护力和衬砌,阻止了土体继续下沉,且土层空隙被填充后,地表沉降逐渐稳定,如图 15(b)中距开挖面(-40 m ~ -10 m)段。



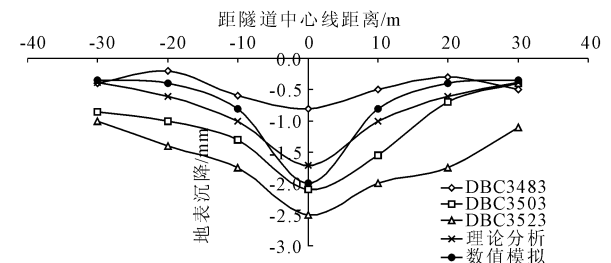
(a) 各因素对地表纵向沉降的影响



(b) 纵向地表沉降



(c) 各因素对地表横向沉降的影响



(d) 地表沉降槽分布曲线

图 15 理论计算结果、现场监测结果和数值模拟结果对比

由图 15(d) 横向地表沉降的理论计算结果与现场监测结果、数值模拟结果的对比可知:地表沉降槽结果与现场监测数据和数值模拟都呈左右两边对称高斯曲线。最大沉降出现在隧道中心线上,理论计算结果为 1.7 mm,与数值模拟接近,且都在现场监测结果的范围之间。距离隧道中心到达 20 m 时,开挖对地表沉降影响逐渐减小,趋于 0。

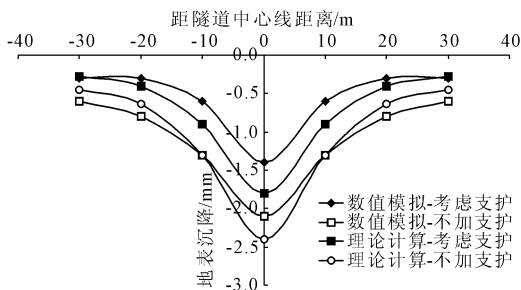
由此反映本文理论模型的计算结果符合现场实际盾构隧道实际情况和数值模拟的结果,说明了本文理论模型的正确性。

此外,据图 15(a) 和图 15(c) 可知,地应力释放、支护力、土舱压力和土体与盾构机之间的摩擦这四种影响地表沉降的因素中,土舱压力的影响程度

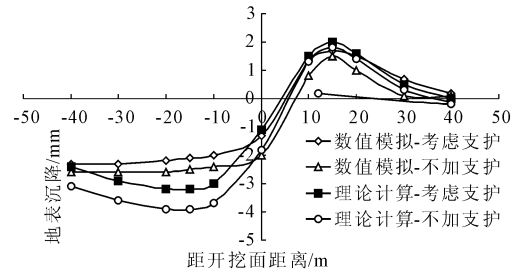
最为显著;考虑支护力后的地应力释放对地表沉降的影响次之;土体与盾构机之间摩擦力对地表沉降的影响最小。

3.4 支护力对地表沉降的影响

为量化支护力对地表沉降的影响,在 $FLAC^{3D}$ 数值模型与式(10)、式(11)中同时不考虑支护力 P_r 的作用,即令支护力 $P_r = 0$,理论计算与数值结果对比如图 16 所示。



(a) 地表沉降槽曲线



(b) 地表纵向沉降

图 16 考虑支护力对地表沉降的影响

根据图 16 可知,加上支护力后,地表沉降槽最大沉降值增大 0.7 mm,两侧地表沉降随距离的增加影响逐渐减小,表明支护力对盾构机正上方的地表沉降影响最大,有阻止地表沉降的作用,但影响范围约为距隧道中心线 10 m 以内;纵向地表沉降在盾构机后方,即已经开挖的位置变化较大,后方沉降约比加上支护时下沉 0.8 mm,掌子面前方地表沉降变化很小。这是因为支护力是作用在已经开挖的土体上,防止地应力过度释放,导致土体变形过大,而对掌子面前方的土体的作用很小。综合横向和纵向地表沉降,可知在沈阳地铁盾构隧道施工时,支护力为 0.3 MPa 对地表最大沉降的影响为 30% 左右,不可忽略。

4 结 论

本文在前人的研究基础上,通过考虑盾构机支护力修正了地应力释放的理论公式,得出:

(1) 通过考虑支护力的作用修正了地层损失的

理论模型,并结合土舱压力和土体与盾构机之间的摩擦力,给出了盾构机施工的总地表沉降。

(2) 结合理论计算结果与沈阳地铁四号线望-芳区间现场监测数据和数值模拟计算的结果的对比,验证了理论模型的正确性。

(3) 通过数值模拟和理论计算,量化了支护力对地表沉降的影响,得出在沈阳地铁粉质黏土盾构施工时,支护力为 0.3 MPa 对地表最大沉降的影响约为 30%,不可忽略。

参考文献:

- [1] Peck R B. Deep excavations and tunnelling in soft ground [C]//Proceedings of the 7th ICSMFE Mexico, 1969: 311-375.
- [2] Attewell P B, Yeates J, Selby A R. Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures[J]. Methuen Inc New York Ny, 1986.
- [3] Rankin W J. Ground movements resulting from urban tunnelling: Predictions and effects[J]. Geological Society London Engineering Special Publication, 1988,5(1): 79-92.
- [4] 李 娴,王思瑶,张 标,等. 双孔隧道的地表沉降预测及其可靠度分析[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(S1):428-435.
- [5] 赵胤翔,赵金昌,郭治铁,等. 富水粉细砂地层盾构施工引起地表沉降研究[J]. 地下空间与工程学报,2020,16(S2):918-924.
- [6] Sagaseta C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss[J]. Geotechnique, 1987,37(3):301-320.
- [7] Sagaseta C. Author's reply to shield tunnel [J]. Geotechnique, 1988,38(4):647-649.
- [8] Verruijt A, Booker J R. Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane [J]. Geotechnique, 1996,46(4):753-756.
- [9] Loganathan N. Analytical prediction for tunneling-induced ground movement in clays [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998,124(9):846-856.
- [10] 魏 纲,张世民,齐静静,等. 盾构隧道施工引起的地面变形计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(S1):3317-3323.
- [11] 王泽洋,赵玉成,杨 茜,等. 盾构隧道不均匀沉降原因分析及应对措施研究[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(4):53-58,87.
- [12] 林存刚. 泥水盾构下穿引起上覆砌体结构响应的实测分析[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(2):121-125.
- [13] 黄德中,马险峰,王俊淞,等. 软土地区盾构上穿越既有隧道的离心模拟研究[J]. 岩土工程学报,2012,34(3):520-527.
- [14] 杨兵明,刘保国. 地铁列车循环荷载下软土地区盾构隧道长期沉降分析[J]. 中国铁道科学,2016,37(3):61-67.
- [15] Meng F Y, Chen R P, Kang X. Effects of tunneling-induced soil disturbance on the post-construction settlement in structured soft soils[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2018,80(OCT.):53-63.
- [16] 李 崑,王者超,李术才,等. 哈尔滨地铁粉质黏土力学性质与超前支护方式研究[J]. 山东大学学报(工学版),2018,48(2):61-71.
- [17] Rajinder, Bhasin, Eystein, et al. The use of stress-strength relationships in the assessment of tunnel stability[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1996,11(1):93-98.
- [18] 钟桂彤. 铁路隧道[M]. 北京:中国铁道出版社,1981.
- [19] 魏 纲. 盾构法隧道施工引起的土体变形预测[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(2):418-424.
- [20] 魏 纲. 盾构法隧道施工引起的土体变形三维解[C]//中国岩石力学与工程学会工程安全与防护分会:中国岩石力学与工程学会,2010:6.
- [21] Zhang D M, Huang H W. Analysis for additional stress of surrounding soil due to the driving of shield tunnel [J]. Underground Space, 1999,19(5):379-382.
- [22] Liao S M, Yu Y, Peng F L. Numerical analysis of shield tunneling construction through adjacent objects [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004,25(S2):223-226.
- [23] Wei G, Zhang S M, Qi J J, et. al. Study on calculation method of ground deformation induced by shield tunnel construction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006,25(S1):3317-3323.
- [24] 姜安龙. 盾构隧道施工地层变形三维解及影响因素分析[J]. 现代隧道技术,2015,52(1):127-135,142.
- [25] 土工的试验方法标准:GB/T 50123—2019[S]. 北京:中国计划出版社,2019.
- [26] 卢廷浩. 土力学[M]. 北京:高等教育出版社,2010:38-54.