

隧道盾构法施工参数对地表沉降的影响分析

黄克双

中铁七局集团第四工程有限公司, 湖北 武汉
Email: 25426030@qq.com

收稿日期: 2020年12月27日; 录用日期: 2021年1月19日; 发布日期: 2021年1月28日

摘要

隧道盾构法施工地表沉降规律是反映施工安全性的最主要体现, 以京滨铁路滨海机场隧道为工程背景, 通过理论分析和数值模拟手段重点分析盾构法施工参数中不同密封舱压力和地层损失率对地表沉降的影响规律。研究表明: 1) 随着密封舱内压力增大, 掌子面后方累计地表沉降值逐渐减小, 而掌子面前方地表会由沉降变为隆起, 对于天津地区黏土地层, 建议密封舱内压力取平衡土压或略高于平衡土压 (0.15 MPa~0.20 MPa); 2) 地表沉降最大值随地层损失率增加呈线性增加, 地层损失率由0.5%升到3%时, 地表沉降值由5.04 mm增大到31.50 mm, 建议施工过程中地层损失率控制在0.5%以下。

关键词

盾构隧道, 地表沉降, 理论分析, 数值模拟, 密封舱内压力, 地层损失率

Analysis of Shield Tunneling Parameters Influence on Ground Settlement

Keshuang Huang

The Fourth Engineering Co., Ltd. of China Railway Seventh Group, Wuhan Hubei
Email: 25426030@qq.com

Received: Dec. 27th, 2020; accepted: Jan. 19th, 2021; published: Jan. 28th, 2021

Abstract

The surface settlement law of shield tunneling is the most important reflection of construction safety. Taking Binhai Airport Tunnel of Beijing-Binhai Railway as the engineering background, and this paper focuses on the influence of different seal chamber pressure and formation loss rate

in shield construction parameters on surface settlement through theoretical analysis and numerical simulation. The results show that: 1) With the increase of the pressure in the sealed chamber, the accumulated surface settlement behind the heading face gradually decreases, while the surface in front of the tunnel face will change from settlement to uplift. For the clay stratum in Tianjin area, it is suggested that the pressure in the chamber should be balanced earth pressure or slightly higher than the equilibrium earth pressure (0.15 MPa~0.20 MPa); 2) The maximum value of ground settlement increases linearly with the increase of formation loss rate. When the formation loss rate increases from 0.5% to 3%, the surface settlement value increases from 5.04 mm to 31.50 mm. And it is suggested that the formation loss rate should be controlled below 0.5%.

Keywords

Shield Tunnel, Surface Subsidence, Theoretical Analysis, Numerical Simulation, Pressure in Sealed Chamber, Formation Loss Rate

Copyright © 2021 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

盾构法是建造区间隧道最常见的施工技术, Peck [1]通过数理统计方法和现场试验手段, 基于地表沉降槽及地层损失理论, 构建出了用来对地层沉降量化模型, 此外对沉降槽宽度系数大小 i 进行了求解; Clough [2]、O'Reilly [3]、朱合华[4]、胡新朋[5]、赵胤翔等[6]亦根据大量实测数据对地层变形进行了分析。韩凯航[7]、魏纲[8]在现场进行了相应的试验并对结论做出了验证。

通过盾构法建造的隧道上方如果分布有建筑物或者铁路, 那么须严格控制地表沉降, 并依据沉降规律对其进行估算, 同时, 采取相应工程措施减小地表沉降。李林[9]等分析了上海市地铁 9 号线区间隧道下穿南新环铁路干线盾构隧道下穿铁路时对周围环境的影响。龙刚[10]结合呼和浩特市轨道交通 2 号线盾构下穿呼和浩特火车站的施工实践, 提出了洞内管片背后二次深孔注浆、轨道结构扣轨加固和预埋注浆管等。

京滨铁路滨海机场隧道以盾构方式下穿既有地铁 2 号线李明庄车辆段存车线以及地铁编组线, 并从右侧穿越车辆段大库, 风险等级较高。隧道所在区域产生地面沉降的可能性和危险性大, 有必要对隧道盾构法在此特定地质环境下施工地表沉降规律进行分析, 为下穿施工提供技术支撑。

2. 工程地质

隧道所处场地在勘探区域的地下土壤类型包括砂土、黏土、粉土与填土。隧道下穿段以粉质粘土层为主。稳定地下水位埋深 3.91~4.85 m。

3. 理论分析

盾构施工会造成地表下沉, 并在盾构经过的上部地表一定区域内形成一个凹槽。附近建筑物受到的具体影响、影响大小和沉降槽的尺寸和宽度大小息息相关, 具体见下图 1。

构施工引起的地层变形既有纵向变形, 又有横向变形, 纵向变形是盾构机向前推进, 地面沉降槽也向前发展, 横向变形影响范围也不断扩大, 如图 2 所示。

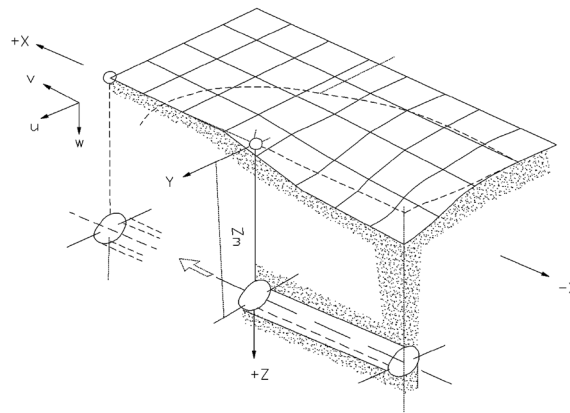


Figure 1. Three dimensional diagram of soil deformation caused by shield tunneling
图 1. 隧道盾构施工引起的土体三维变形图

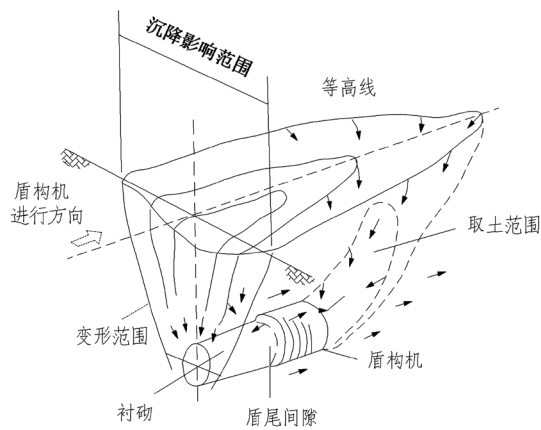
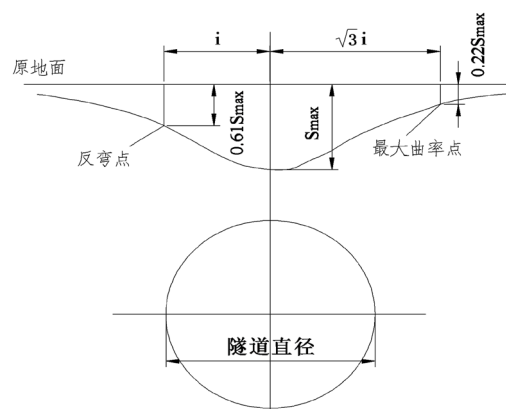


Figure 2. Spatial form of formation deformation
图 2. 地层变形空间形态

3.1. 横向地表沉降规律

盾构法施工导致隧道所处的横向地表发生沉降现象的具体情况见图 3 所示与公式(1)中的表述[1]。



注: 沉降断面面积 $\approx 2.5iS_{max}$ 。

Figure 3. Section shape of settlement trough in the upper part of tunnel
图 3. 隧道上方横向地表沉降图

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

式中： $S(x)$ 代表与隧道中线距离 x 远的位置发生地面沉降的具体大小， S_{\max} 代表竖直方向上地面发生沉降的最大值， x 代表与隧道中线之间的水平距离大小， i 代表沉降槽对应的宽度系数大小，也就是在沉降变化曲线中反弯点的横坐标值， i 的大小可以通过公式(2)计算出来。

$$i = \frac{Z}{\sqrt{2\pi}tg\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right)} \quad (2)$$

式中： φ 为围岩内摩擦角， Z 表示隧道在地下的埋置深度大小。

3.2. 纵向地表沉降规律

盾构法建造隧道过程中导致的纵向上的地表沉降变化曲线如下图 4 所示，其具体包括五个变化阶段，如图 5 所示。

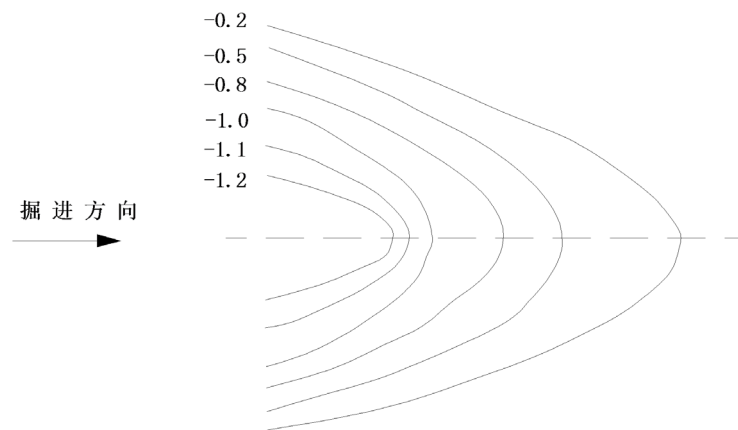
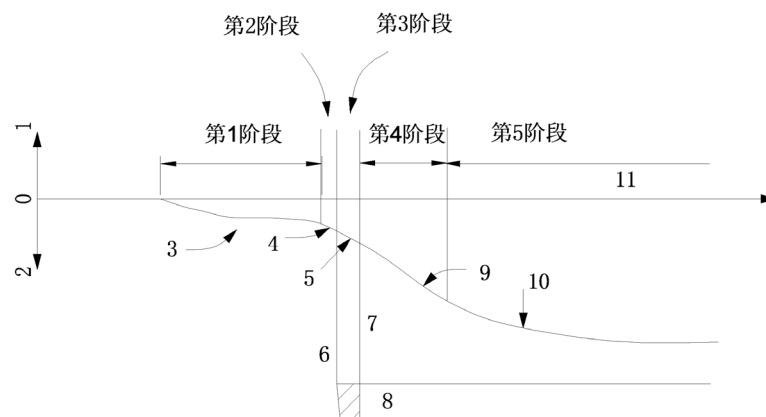


Figure 4. Contour map of the ground along the direction of tunnel excavation (cm)

图 4. 沿隧道掘进方向的地表沉降变化等值线关系(cm)



1-隆起；2-沉降；3-先行沉降；4-开挖面前沉降；5-盾尾沉降；6-开挖面；
7-盾尾；8-盾构机；9-盾尾空隙沉降；10-后续沉降；11-时间轴

Figure 5. Longitudinal settlement caused by shield construction

图 5. 盾构法地表沉降规律

3.3. 影响地表沉降的因素

地面发生沉降的具体程度主要由工程地质和水文地质、隧道跨度、覆土厚度等决定。盾构法掘进引起地表变形的具体因素涵盖了出碴量、注浆量变化、压力大小，主要分析盾构密封舱不同压力和不同地层损失率对地表沉降的影响。

4. 数值分析

4.1. 数值分析模型

采用了有限差分软件 FLAC^{3D}，建模范围为 160 m × 50 m × 70 m，模型上边界建至地表，下边界建至隧道底以下 50 m (约 4D)。顶面为自由面，其它边界约束该面法向位移。仅考虑围岩自重应力场。模型如图 6 所示，各土层的物理力学参数见表 1，管片的物理力学参数见表 2。

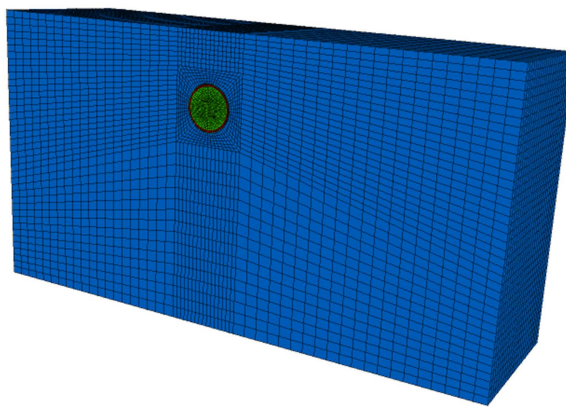


Figure 6. Analysis model
图 6. 差分元网格划分与模型

Table 1. Mechanical data corresponding to soil layers
表 1. 各土层的物理力学参数

| 土层类型 | 弹性模量(MPa) | 内摩擦角 $\phi/(\circ)$ | 重度($\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$) | 泊松比 | 内聚力(kPa) |
|-------------------|-----------|---------------------|------------------------------------|------|--------------------|
| 粉细砂 | 8~9 | 1.92×10^3 | 9×10^6 | 0.35 | 3×10^3 |
| 新黄土 | 27 | 1.93×10^3 | 1.1×10^7 | 0.3 | 1.83×10^4 |
| 砂岩夹泥岩 | 13 | 1.95×10^3 | 1.29×10^9 | 0.35 | 1.6×10^5 |
| 砂岩 | 20 | 1.985×10^3 | 1.5×10^9 | 0.4 | 2.0×10^5 |
| 衬砌(C40) | 0.55 | 2.5×10^3 | 3.35×10^{10} | 0.18 | — |
| 灌注桩、冠梁及护拱混凝土(C35) | — | 2.5×10^3 | 3.15×10^{10} | 0.18 | — |
| 桩间喷混凝土(C20) | 0.2 | 2.3×10^3 | 2.8×10^{10} | 0.2 | — |

Table 2. Physical and mechanical parameters of tube slice
表 2. 管片物理力学参数

| 管片 | 重度($\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$) | 弹性模量(MPa) | 泊松比 |
|-------------------|------------------------------------|-----------|------|
| 30 cm 厚 C50 钢筋混凝土 | 2550 | 60 | 0.18 |

4.2. 密封舱内压力对地层沉降的影响预测分析

隧道埋设在地下的深度为 18.62 到 21.25 米之间, 在构建分析模型时将深度等效为 20 米, 侧压力系数数值是 0.35, 在理论上, 密封舱里面平衡土(中心埋置深度部位)具有 0.17 MPa 的压力。分别对密封舱内部的压力大小进行计算, 其值在 0.00 到 0.25 MPa 范围内, 沉降变形随密封舱内压力变化的曲线如图 7 所示, 图中掌子面位置为横坐标零点。

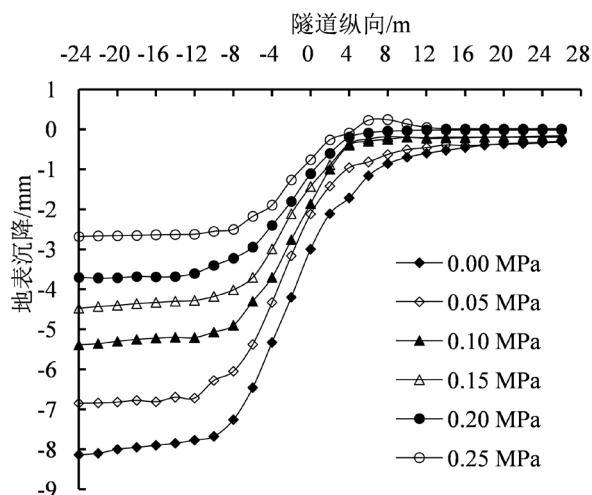


Figure 7. He relationship between longitudinal surface settlement and pressure in sealed cabin
图 7. 降变形随密封舱内压力变化曲线

图 7 表明: 如果密封舱里面的压力达到 0.15 MPa, 那么距离掌子 20 米远位置就会发生地表沉降现象, 其掌子面的对应地表出现的沉降量最大, 能够达到 1.43 毫米; 掌子面后方距离 15 米远的位置, 地表沉降现象呈稳定趋势, 总计能够达到 4.47 毫米沉降值。如果密封舱里面能够达到 0.35 MPa 压力, 那么距离掌子 5 米的前方地表就会发生隆起, 距离掌子 8 米的前方地表能够隆起最大幅度, 大小是 0.24 毫米; 与掌子后方距离 15 米处, 地表沉降现象较为稳定, 总计能够达到 2.68 毫米沉降值。如果密封舱内无压力, 那么距离掌子面 25 米的区域会出现地表沉降, 其掌子面的对应地表能够出现 5.01 毫米的沉降量; 与掌子后方距离 15 米处, 地表沉降现象逐渐稳定, 总计能够达到 8.14 毫米沉降值。

由此得到以下认识: 在密封舱里面的压力逐渐增大的情况下, 隧道掌子面后方出现的地表沉降总计数慢慢减小, 但前方的沉降却会慢慢向隆起转变, 掌子面后方 15 m 至前方 10 m 为纵向上地表受到影响的具体范围。如果密封舱与平衡土压相同或者更大, 那么沉降值与地表隆起幅度均较小。如果比平衡土压大超过 45%, 那么地表隆起幅度就会变大; 相反, 如果远远小于平衡土压, 那么沉降幅度就会更大。

该粉质粘土层盾构推进时, 密封舱内压力推荐采用 0.15~0.20 MPa。

4.3. 地层损失率对地层沉降的影响预测分析

我们将超挖和充填之间的差值叫做施工过程导致的地层损失。管片和地层之间的空隙会导致地层发生改变将空隙再度填充, 地表沉降量和位置的变化会直接影响地层损失幅度, 损失量和注浆情况关系紧密。

计算中以施工中的地层受到的损失率不同来模拟不同的注浆效果。隧道周边围岩向洞内的位移在掌子面后方 20 m 以内假定按线性变化, 20 m 以后为一常数, 见图 8。

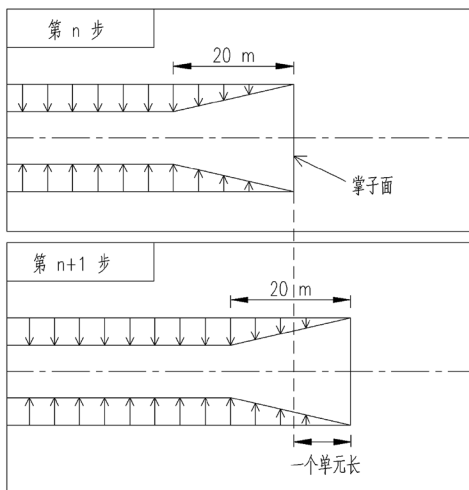


Figure 8. Simulation diagram of stratum loss during excavation
图 8. 掘进过程的地层损失模拟图

施加于隧道周边的位移场与地层损失相对应。地层损失率与隧道周边位移的关系见式(3)。

$$V_i = 1 - \frac{(D - 2\delta)^2}{D^2} \tag{3}$$

V_i 为地层损失率； δ 为隧道周边向洞内位移值； D 为隧道开挖直径。

地层损失率 V_i 分别取为 0.5%，1%，2%，3%，研究地层损失对地表沉降的影响，此时对应 δ 的分别为 15.0 mm、30.1 mm、60.3 mm、90.6 mm。根据计算结果，不同损失率下掌子面前后地表沉降规律如图 9 所示。

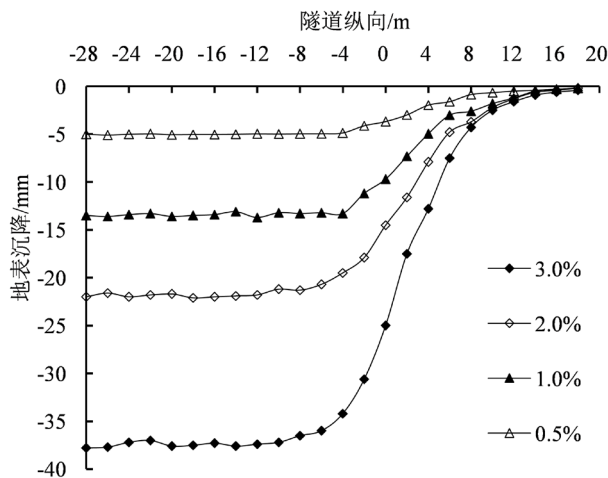


Figure 9. Changes of longitudinal surface subsidence affected by loss rate of each stratum
图 9. 各地层损失率影响的纵向地表沉降情况变化

图 9 表明：在地层损失率增大的情况下，地表沉降纵向的波及范围变大，沉降幅度也会增大。

图 10 为水平方向上地表的沉降槽。

图 10 中表明：横向沉降槽符合正态分布。地层损失率越大，沉降槽宽度越大，地表沉降的最大值越大，具体数值如表 3 所列。如果达到 1% 的地层损失率，地表沉降幅度到达了 13.4 mm，当隧道下穿既有

股道时，此地表沉降已经远远超出股道变形控制标准，如果达到 0.5% 的地层损失幅度，那么地表沉降幅度大小为 5.04 毫米，对于施工风险是在可控范围内的，所以，建议地层损失率应控制在 0.5% 以下。

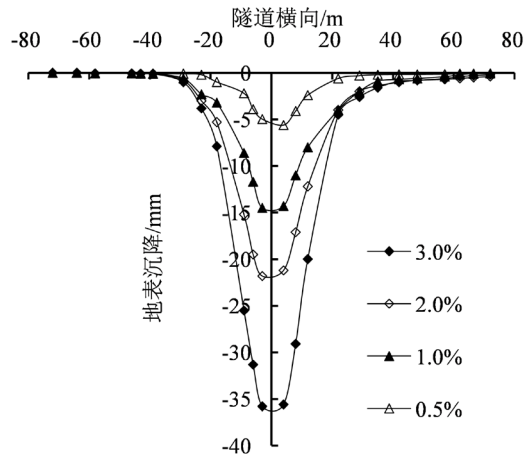


Figure 10. Horizontal surface settlement trough
图 10. 水平方向地表沉降槽

通过横向沉降槽还可以看出，既有厂房已经在隧道开挖的影响范围之内，隧道施工过程中需采取措施保证既有厂房的安全使用。

Table 3. The maximum value of surface settlement under the influence of local layer loss rate

表 3. 各地层损失率影响下地表沉降的最大值

| 地层损失率 $V_i/\%$ | 地表沉降最大值 S_{\max}/mm |
|----------------|------------------------------|
| 0.5 | -5.04 |
| 1.0 | -13.05 |
| 2.0 | -21.77 |
| 3.0 | -31.50 |

地表沉降最大值和地层损失率之间的线性关系如图 11 所示。

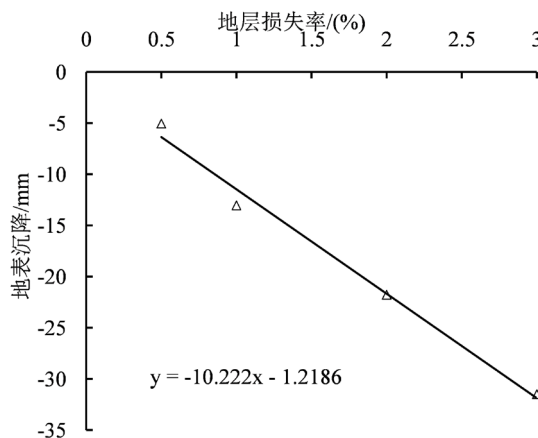


Figure 11. Horizontal surface settlement trough
图 11. 水平方向地表沉降槽

图 11 表明, 地表沉降最大幅度在地层损失不断增加的情况下, 呈正比, 具有线性变化趋势, 当损失率从 0.5% 上升至 3%, 沉降幅度会从 5.04 毫米增加至 31.50 毫米, 建议施工过程中地层损失率保持在低于 0.5% 情况下。所以, 地层损失率的控制对于地表沉降情况的控制尤为重要。

5. 结论

1) 分析给出了盾构隧道地表沉降纵向和横向分布规律和表达式。

2) 在密封舱压力不断增加的情况下, 掌子面后方发生的地表沉降幅度慢慢变小, 而掌子面前方地表会由沉降变为隆起, 对于天津地区黏土地层, 建议密封舱内压力取平衡土压或者比平衡土压稍高数值, 具体取值范围在 0.15 到 0.20 MPa 之间。

3) 地表沉降最大值随地层损失率增加呈线性增加, 损失率从 0.5% 上升至 3%, 沉降幅度会从 5.04 毫米增加至 31.50 毫米, 建议施工过程中地层损失率控制在 0.5% 以下。

基金项目

中铁七局集团委托项目(中铁七四芭蕉川硐(技术)字(2020)001 号)资助。

参考文献

- [1] 张彬. 基于上海地层多线叠交盾构施工的 Peck 公式之改进[J]. 土工基础, 2020, 34(6): 695-698.
- [2] Clough, G.W. and Schmidt, B. (1981) Design and Performance of Excavations and Tunnels in Soft Clay. *Developments in Geotechnical Engineering*, **20**, 567-634. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-41784-8.50011-3>
- [3] O'Reilly, M.P. and New, B.M. (1982) Settlements above Tunnels in the United Kingdom—Their Magnitude and Prediction. *Proceeding of Tunnelling'82 Symposium*, London, 1st January 1982, 173-181.
- [4] 朱合华. 盾构隧道施工过程模拟分析[C]. 第一届海峡两岸隧道与地下工程学术与技术研讨会论文集(上册). 太原: 中国岩石力学与工程学会, 1999: 131-135.
- [5] 胡新朋, 孙谋, 王俊兰. 盾构隧道穿越既有建筑物施工应对技术[J]. 现代隧道技术, 2006(6): 60-65.
- [6] 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(2): 918-924.
- [7] 韩凯航, 张成平, 王梦恕. 浅埋隧道围岩应力及位移的显式解析解[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(12): 2253-2259.
- [8] 魏纲, 徐日庆. 软土隧道盾构法施工引起的纵向地面变形预测[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(9): 1077-1081.
- [9] 李林, 郑余朝, 张俊儒, 等. 盾构隧道下穿既有铁路现场测试研究[J]. 现代隧道技术, 2006(6): 51-55.
- [10] 龙刚. 盾构隧道曲线下穿铁路客站风险源的施工安全控制技术[J]. 国防交通工程与技术, 2020, 18(1): 65-69.