

# 盾构隧道下穿上软下硬地层对地表沉降的影响

康 斌, 李慧鹏, 朱燕毕, 滕春俑, 林德文, 沈俊荣

中国水利水电第十四工程局有限公司设备运营中心, 云南 昆明

收稿日期: 2022年3月19日; 录用日期: 2022年4月7日; 发布日期: 2022年4月18日

## 摘 要

地下交通建设在城市建设中的地位越来越重要, 盾构法作为一种新型的地铁隧道施工工法, 以其较高的施工效率、较小扰动、较强的地层适应性、较高的安全性等优势, 得到了越来越多的应用。上软下硬复合地层是盾构施工过程中经常遇到的不良地层, 在此地层中盾构施工时更容易引发地表沉降, 对周围环境产生较大影响。以此地层为工程背景, 通过Midas软件对盾构掘进参数对地表的沉降影响进行了分析, 发现在不同开挖参数下, 地表沉降和变形是不同的, 最终确定了盾构掘进参数的安全取值范围。

## 关键词

盾构法, 上软下硬, 盾构掘进参数, 地表沉降

# Study on the Effect of Shield Tunneling through Upper Soft and Lower Hard Strata on Surface Settlement

Bin Kang, Huipeng Li, Yanbi Zhu, Chunyong Teng, Dewen Lin, Junrong Shen

Equipment Operation Center, Sinohydro Bureau 14 Co., Ltd., Kunming Yunnan

Received: Mar. 19<sup>th</sup>, 2022; accepted: Apr. 7<sup>th</sup>, 2022; published: Apr. 18<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Underground transportation construction plays an increasingly important role in urban construction. As a new type of subway tunnel construction method, shield tunneling method is characterized by its higher construction efficiency, less disturbance, stronger stratum adaptability, and higher safety and other advantages, and has been more and more applications. The upper-soft lower-hard composite stratum is an unfavorable stratum often encountered in the shield construction process. In this stratum, the shield construction is more likely to cause surface subsidence,

which has a greater impact on the surrounding environment. Taking this stratum as the engineering background, the Midas software was used to analyze the influence of the shield tunneling parameters on the surface settlement. It is found that the surface settlement and deformation are different under different excavation parameters, and the safe value range of shield tunneling parameters is finally determined.

## Keywords

Shield Method, Upper Soft and Lower Hard, Shield Tunneling Parameters, Surface Settlement

Copyright © 2022 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

随着我国社会经济的提高,城市空间的需求急剧增加,但是空间资源十分有限,空间需求与空间资源的矛盾日渐突出[1]。目前,地铁隧道施工工法主要有明挖法和暗挖法,其中暗挖法包括矿山法、盾构法等工法,盾构法因为其在施工过程中干扰小、较为安全等优点,得到了越来越广泛的应用。在实际施工过程中地质条件并非单一,复合地层便是复杂地层的一种。在盾构开挖面上存在两种及两种以上差异较大的岩土体,这种就是复合地层,在施工过程中,上软下硬复合地层是我们最为常见的复合地层的一种[2]。盾构机在上软下硬复合地层掘进过程更容易产生扰动,从而引起周围土体的位移,若扰动过大对土体上方建筑等造成极大影响[3]。近年来,很多研究人员都对在上软下硬复合地层盾构施工对地表沉降影响开展了深入的研究,祁建军[4]等人对在上软下硬地层中隧道施工对建筑物的沉降影响进行了研究,通过对注浆加固前的施工工序进行数值模拟,得出在加固前建筑基础沉降量和差异沉降量最大值超过了规范控制范围,通过 WSS 超前注浆后对加固效果进行数值模拟验证,模拟结果可知注浆后两值满足规范控制值要求。刘重庆[5]等人通过对厦门地铁 1 号线莲坂站-莲花路口站盾构区间隧道工程进行地表沉降变形数值模拟,研究发现上软下硬复合地层地表横向沉降受硬层比的影响比较明显,随着硬层比增大,地表沉降量整体减小;上软下硬复合地层硬层比对地表纵向沉降影响主要表现在开始位置与结束位置上;研究硬层比与隧道轴线正上方监测点地表最终沉降值的关系得出上软下硬复合地层地表变形的研究阈值在硬层比 15%~85%。虽然很多研究人员对上软下硬复合地层研究了很多,但是对盾构施工在上软下硬地层不同盾构掘进参数对地表沉降的研究还不是特别多。基于此,本文以上软下硬地层为工程背景,通过有限元仿真模拟研究土压力、推进力、刀盘扭矩、刀盘转速对地表沉降规律进行分析。

## 2. 数值模拟基本假定及参数选取

### 2.1. 基本假定

- 1) 为了体现上软下硬地层特点,将模型分为三层,第一层为杂粉质黏土、第二层为软地层(全风化基岩)、第二层为硬岩地层(中风化基岩)。
- 2) 将土体简化成均质水平层状分布的土层,把土体看作理想的弹塑性材料。
- 3) 通过施加顶进压力来模拟开挖面的土体移动,把掘进压看作为均布荷载,沿开挖面均匀布置。
- 4) 地下水的作用不进行考虑,不属于本论文的研究重点。
- 5) 盾壳摩擦力、刀盘开挖面对岩土体的扰动不进行考虑,开挖隧道与盾壳之间存在着间隙,忽略

摩擦力对周围岩土体的扰动。

## 2.2. 材料物理力学参数确定

根据施工项目部在盾构掘进处的土层信息主要成分, 本文以粉质黏土、全风化基岩和中风化基岩作为研究对象, 盾构隧道下穿上软下硬复合地层地质情况[6]见表 1。

**Table 1.** Shield tunneling through a composite geology of soft upper and hard lower strata

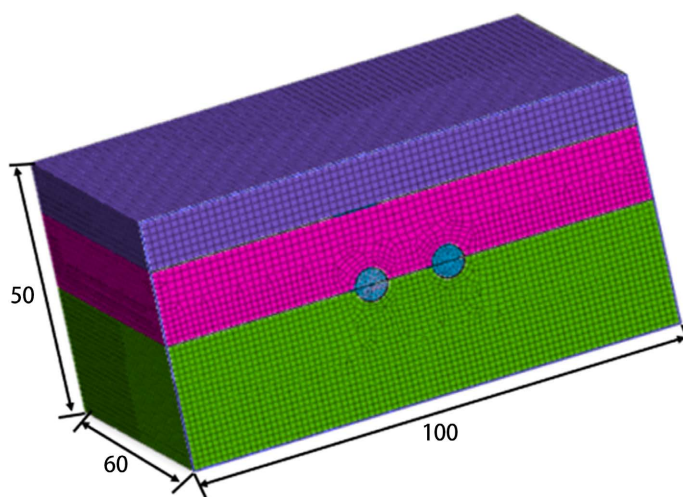
**表 1.** 盾构隧道下穿上软下硬复合地层地质情况

材料	弹性模量(Mpa)	泊松比	容重(kN/m <sup>3</sup> )	凝聚力(KPa)	摩擦角( $\phi$ /°)
粉质黏土	29	0.3	20	15	20
全风化基岩	40	0.3	23	29	14
中风化基岩	200	0.2	25	49	24
注浆层	9	0.3	22	/	/

## 3. 模拟分析

### 3.1. 模型的建立

模型的研究对象为盾构隧道与隧道周围岩土体, 推进隧道对周围地层的影响范围在 3~5 倍隧道直径 [7], 模型长度为 100 m, 掘进方向的长度是 60 m, 每隔 1.5 m 为一环, 因此隧道被分割为 40 环, 高度 50 m, 为了便于计算, 盾构掌子面软岩与硬岩各占一半。模型的边界条件为: 在模型四周边界施加法向约束, 模型底部施加全约束, 模型上表面为自由面, 三维计算模型如图 1 所示。



**Figure 1.** 3D computational mode

**图 1.** 三维计算模型

### 3.2. 计算结果分析

#### 3.2.1. 土压力对上软下硬地层地表沉降的影响

土压平衡盾构来说, 土压力大小影响刀盘前方待开挖地层以及盾构上覆地层的稳定性。若土压力过大可能会导致隆起变形过大, 若土压力的设定过小可能会导致沉降变形过大, 模拟土压力的数值分别为 1.0 bar、1.25 bar、和 1.5 bar, 模拟结果如图 2 所示。

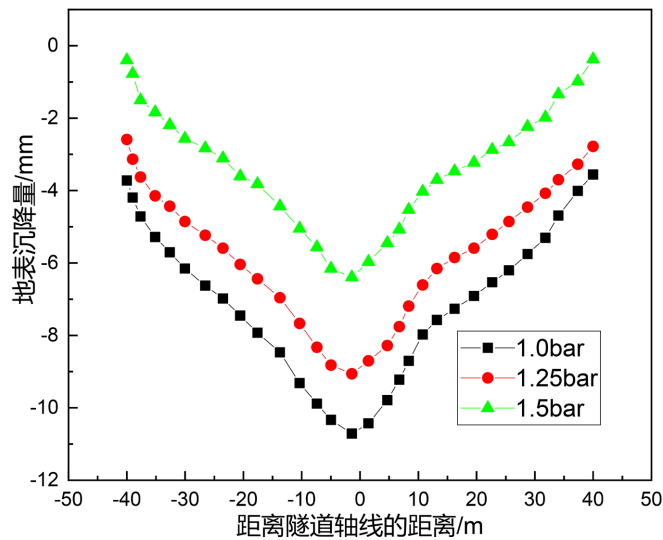


Figure 2. Influence of earth pressure on surface subsidence  
图 2. 土压力大小对地表沉降的影响

从表中可以看出，土压力大小在 1.0 bar 时地表沉降变形最大，高达 11 mm；在 1.25 bar 时地表沉降变形次之，约为 9 mm；在 1.5 bar 时地表沉降量最小。这主要是因为盾构机在向前推进的过程中，土压力增大，盾构推进速度会随之减小，推进速度减小则对开挖隧道周围地层的扰动会随之减弱。为了施工过程的安全，土压力尽可能大些，但是若土压力过小将会导致地面隆起，因此选取 1.3~1.4 bar 作为上软下硬复合地层土压力的参考范围。盾构掘进的过程中，随着土压力增大，盾构推进速度会随之减小，推进速度减小则对开挖隧道周围地层的扰动会随之减弱，则地表沉降的变形会小一些。

### 3.2.2. 盾构推进力对上软下硬地层地表沉降的影响

盾构推进力是影响盾构掘进稳定性的一个关键的、直接的因素，只有足够的推进力，盾构才能向前推进。各设定不同盾构推进力使盾构机向前掘进，模拟土压力的数值分别为 11,000 KN、12,000 KN、和 13,000 KN，模拟结果如图 3 所示。

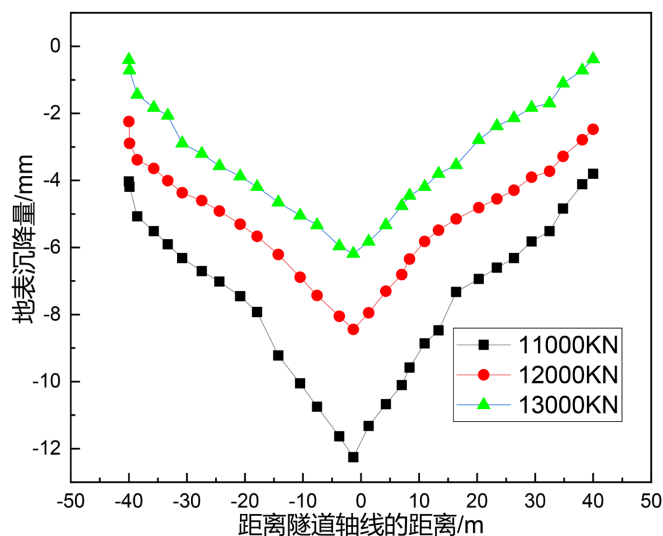


Figure 3. Influence of propulsion force on surface subsidence  
图 3. 推进力大小对地表沉降的影响

从表中可以看出,土压力大小在 11,000 KN 时地表沉降变形最大,高达 13 mm;在 12,000 KN 时地表沉降变形次之,约为 8 mm;在 13,000 KN 时地表沉降量最小。盾构机在盾构掘进的过程中,盾构推进力增大,盾构掘进速度会因为刀盘前方岩层厚度以及强度等条件的变化阻力增加而随之减小,推进速度减小则对开挖隧道周围地层的扰动会随之减弱。盾构推进力尽可能大些,但是若推进力过大将会导致地面隆起,因此选取 12,500~13,000 KN 作为上软下硬复合地层推进力的参考范围。当盾构推进力增时,盾构推进速度会因为刀盘前方岩层厚度以及强度等条件的变化阻力增加而随之减小,推进速度减小则对开挖隧道周围地层的扰动会随之减弱,则地表沉降的变形会小一些。

### 3.2.3. 刀盘扭矩对上软下硬地层地表沉降的影响

盾构机的刀盘只有提供足够的扭矩来克服各种压力以及各种摩擦阻力的扭矩才能实现在掘削中的旋转,设定不同刀盘扭矩使盾构机掘进,模拟刀盘扭矩的数值分别为 1500 KN·m、1800 KN·m、和 2100 KN·m,模拟结果如图 4 所示。

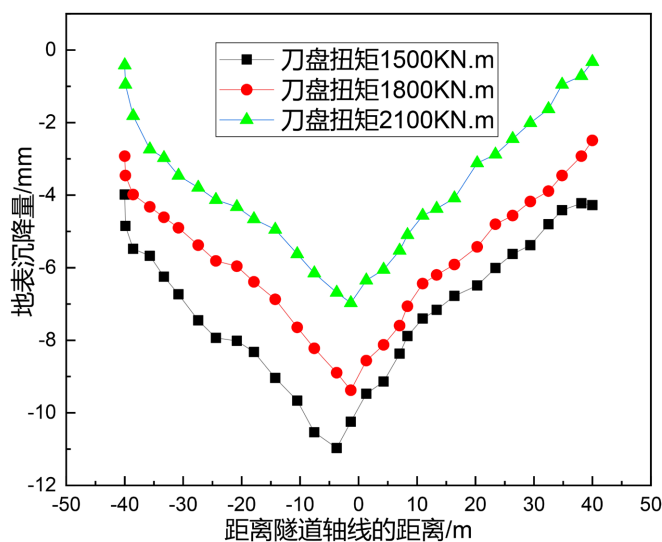


Figure 4. Influence of cutter head torque on ground subsidence

图 4. 刀盘扭矩大小对地表沉降的影响

从表中可以看出,刀盘扭矩大小在 1500 KN·m 时地表沉降变形最大,高达 11 mm;在 1800 KN·m 时地表沉降变形次之,约为 9 mm;在 2100 KN·m 时地表沉降量最小。随着刀盘扭矩的提高而提高的原因是盾构掘进的过程中,随着刀盘扭矩的增大,软地层中细砂的地层摩擦角较大,刀盘转动切削土体与其正前方以及侧面周围的土体摩擦阻力增大,盾构推进时需要克服的各类阻力扭矩也更大,最终导致盾构推进速度减小,推进速度减小则对开挖隧道周围地层的扰动会随之减弱。刀盘扭矩尽可能大些,但是若太大将会导致地面隆起,因此选取 1900~2000 KN·m 作为上软下硬复合地层刀盘扭矩的参考范围。随着刀盘扭矩的增大,刀盘转动切削土体与其正前方以及侧面周围的土体摩擦阻力增大,就会使盾构推进速度减小,进而对开挖隧道周围地层的扰动会随之减弱,则地表沉降的变形会小一些。

### 3.2.4. 刀盘转速对上软下硬地层地表沉降的影响

盾构掘进过程中主要利用上各类刀具来切削、碾碎土体,因此刀盘转速的选择将会对盾构推进速度、推进力等产生直接影响,进而影响地表沉降。各设定不同刀盘转速使盾构机向前掘进,模拟刀盘转速的数值分别为 1 rpm、1.3 rpm 和 1.6 rpm,模拟结果如图 5 所示。

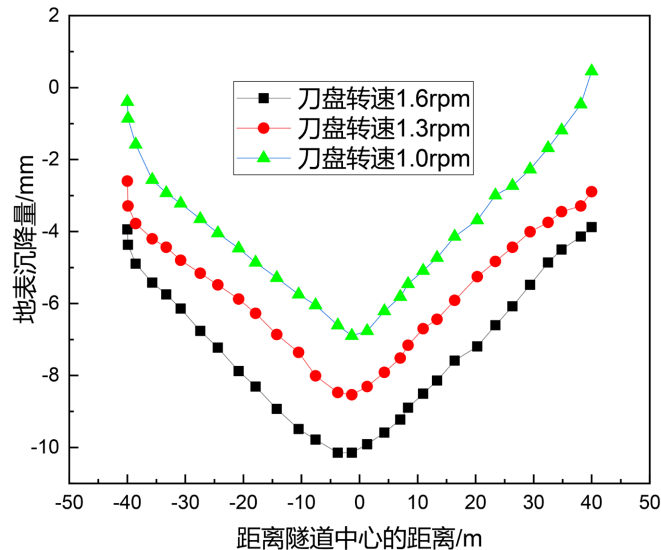


Figure 5. Influence of cutter head rotation speed on ground subsidence  
图 5. 刀盘转速大小对地表沉降的影响

从表中可以看出, 刀盘转速大小在 1.6 rpm 时地表沉降变形最大, 高达 10 mm; 在 1.3 rpm 时地表沉降变形次之, 约为 8 mm; 在 1.0 rpm 时地表沉降量最小。当贯入度是定值时, 随着刀盘转速增大盾构推进速度也会增大, 进而对开挖隧道周围地层产生的扰动增强, 导致地表的沉降变形会大一些。为了施工过程的安全, 刀盘转速尽可能小些, 但是若刀盘转速过小将会降低施工效率, 因此选取 1.1~1.2 rpm 作为上软下硬复合地层刀盘转速的参考范围。当贯入度保持不变时, 盾构推进速度会随着刀盘转速的增大而增大, 盾构推进速度的增大对开挖隧道周围地层的扰动会随之增强, 导致地表沉降变形增大。

#### 4. 结论

本文根据上软下硬复合地层盾构区间, 通过有限元仿真, 分析了不同土压力、盾构推进力、刀盘扭矩和刀盘转速对地表沉降量的影响, 主要结论如下:

- 1) 地表的沉降量位于隧道中心线附近, 并且沉降量会随着距离隧道中心水平距离的增加而减小。
- 2) 地表沉降曲线的变化趋势基本一致, 都呈凹槽型, 且服从正态分布。
- 3) 盾构掘进参数的安全取值范围为土压力 1.3~1.4 bar 左右、推进力 12,500~13,000 KN 左右、刀盘扭矩 1900~2000 KN·m 左右、刀盘转速 1.1~1.2 rpm 左右。

#### 参考文献

- [1] 周轲, 谭红霞, 梁新权, 屈畅姿, 杨胜蛟. 长沙地铁 1 号线盾构掘进参数对地表沉降影响分析[J]. 湖南工程学院学报: 自然科学版, 2016(4): 74-79.
- [2] 聂耐. 上软下硬复合地层盾构施工地表沉降控制研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [3] 李玉盟. 上软下硬复合土层中土压平衡盾构法施工技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
- [4] 祁建军. 上软下硬地层中隧道施工对建筑物的沉降影响及预防措施研究[J]. 铁道建筑技术, 2017(9): 84-88.
- [5] 刘重庆, 曾亚武, 朱泽奇, 等. 厦门地铁上软下硬地层盾构施工引起的地表沉降研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(2): 444-449.
- [6] 赵先鹏. 穿越上软下硬地层盾构隧道施工控制技术研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [7] 陈世超. 地铁盾构施工对地表沉降的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2018.