

盾构开挖引起土体沉降灾害研究浅述

王中凯

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2024年9月9日; 录用日期: 2024年9月30日; 发布日期: 2024年10月12日

摘要

盾构法以其高集成技术和先进性被广泛应用于隧道施工, 尤其在地铁隧道施工。盾构法因独特构造、复杂地质、工况等因素, 会引起隧道一定范围土体下沉, 且目前尚难完全防止这种沉降现象的发生。对此基础性问题, 结合大量相关研究文献, 分析盾构隧道土体沉降机理, 对隧道的土体沉降影响因素进行全方面综述, 提出预防和治理盾构开挖引起隧道土体沉降灾害的对策和建议, 并对今后的研究做出展望。

关键词

盾构, 隧道开挖, 沉降灾害

Review of Research on Soil Settlement Disasters Caused by Shield Tunneling Excavation

Zhongkai Wang

College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: Sep. 9th, 2024; accepted: Sep. 30th, 2024; published: Oct. 12th, 2024

Abstract

The shield method is widely used in tunnel construction, especially in subway tunnel construction, because of its highly integrated technology and progressive nature. The shield tunneling method, due to its unique structure, complex geology, and working conditions, can cause soil subsidence within a certain range of the tunnel, and it is still difficult to completely prevent this subsidence phenomenon from occurring. This fundamental issue, combined with a large number of related research, analyzes the mechanism of soil settlement in shield tunnels, and the factors affecting soil settlement in tunnels

are comprehensively reviewed. It puts forward countermeasures and suggestions for the prevention and management of tunnel soil settlement disasters caused by shield excavation and makes a prospective study for future research.

Keywords

Shield Construction, Tunnel Excavation, Settlement Hazards

Copyright © 2024 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

隧道建设是现代化交通建设的重要组成部分，随着城市化进程的加速和人口的不断增长，地铁交通的需求也越来越大。然而，隧道建设中，开挖过程复杂且充满挑战，尤其在当今穿插叠交的地铁网建设中，土体沉降等问题更加凸显。

隧道盾构开挖涉及对既有地层结构的深刻改变[1]，还直接关联到周边环境的稳定性与安全性。不同类型的地质条件开挖的响应也不同，例如在粉质粘土地层中，盾构小净距穿越对既有隧道影响较大，属危险工况。据一些工程事故显示：上海外滩通道大直径泥水盾构上穿，引起既有地铁2号线隧道累计隆起10.5 mm [2]。北京地铁某区间受盾构下穿影响，隧道累计沉降23 mm，径向错台量为14 mm，新增裂缝18条，出现27处渗水[3]；姚德峰[4]研究了盾构法在富水砂层条件下的隧道变形。当前不同地区在盾构开挖工程中沉降灾害造成的事故仍时有发生。表1为新进发生的隧道沉降、坍塌等事故。

因此，对盾构隧道土体沉降的灾害机理和因素进行深入研究和总结，对保障施工安全、减少环境影响、确保地铁线路的正常运营具有重要意义。同时有助于提升隧道开挖工程的理论认知水平，符合国家交通强国建设、国家安全等方面的重大需求。

Table 1. Subway tunnel settlement accident

表 1. 地铁隧道沉降事故

年份	事故名称	事故影响
2024	西安地铁8号线涌水涌砂	监测道路路面沉降，继而路面坍塌，自来水、天然气关停
2024	成都地铁13号线施工路面塌陷	附近长约12米的路面塌陷。自来水管已关停，影响道路封闭。
2023	武汉地铁工地沉降	基坑发生渗漏水险情，局部沉降，一栋30层楼房的居民全部撤离
2021	成都17号线二期工程垮塌	事故造成4人死亡、14人受伤

2. 隧道的沉降机理时序性分析

盾构法因其施工速度快、洞体质量稳定、对现有结构影响小等优点成为现代隧道开挖的重要方法。由于盾构机的外径通常大于其后安装的管片外径，因此在盾尾通过测点后，会在管片外壁与周围土体之间形成一定的空隙[5]。这个空隙是土体沉降的潜在空间。

盾构沉降大体上分为五个阶段，第一阶段是盾构机到达前即先期沉降，在砂土透水地层中，先期沉降是地下水位变化引起，而软土是开挖面过量取土造成沉降。第二阶段沉降是通过前，通常是由于盾构泥水压力不足引起[6]。第三阶段是通过监测断面时，由于超挖形成空隙，或曲线掘进，多挖掘少填引起。

第四阶段当盾构通过该断面后，由于盾尾空隙浆液未注满，出现收缩，引起应力释放[7]。第五阶段盾构通过该断面后较长时间内仍然会发生沉降变形，特别是软土中会继续发生固结变形。在软土中用地层损失率来控制盾构施工效果，地层损失是盾构施工中挖土体积与建成隧道体积之差。

盾构开挖是基于盾构法自身特点与独有的施工方法，此全过程阶段造成的沉降灾害属于盾构本体性内在原因，综上是其固有的沉降机理，对于此沉降灾害，主要研究是明确其机理，而后通过采用支护、注浆、喷护等机械手段来控制沉降预警或坍塌事故的发生。

3. 盾构隧道土体沉降灾害因素分析

隧道盾构开挖建设中，管片和地面之间的土体受到了破坏，隧道周围的土体发生了变形和沉降。土体沉降的研究综合度较高[8][9]，涉及地下水、周围地层结构等，其原因也包括多种因素。

3.1. 孔隙水压力变化

孔隙水压力变化是导致隧道土体沉降的一个重要原因。在盾构过程中，地下水会被挖掘出来，从而导致隧道周围土体的孔隙水压力发生变化。如果孔隙水压力变化过大，就会引起隧道周围土体的沉降。孔隙水压力变化原因有很多，包括地下水位变化、地质构造复杂、岩土层结构不均匀等，这些因素都可能导致孔隙水压力的变化，从而引起土体沉降。

国内外诸多学者对隧道遇水问题做了大量研究。尹泉等[10]基于对比分析、地下水动力学方法实现了对地下水位变化有效的估算方法。金玮泽等[11]基于 Terzaghi 有效应力原理，建立了地下水三维渗流与一维垂向固结的地下水渗流与地面沉降耦合数值模拟模型，研究了地面沉降的趋势。Zhang 等[12]基于复变量理论和共形映射方法，研究了注浆压力对孔隙水压力和地面固结沉降的影响。Luo 等[13]基于 Biot 整合理论，建立三维流固耦合全模型，研究了地下水对地表沉降的影响，结果表明，孔隙水压力变化趋势与地表沉降相似。穆永江等[14]考虑盾构隧道渗水情况及孔隙水压力的消散问题，研究了盾构隧道渗水对地表长期沉降的影响，研究认为，在重黏土地层，隧道渗水对地表沉降的长期影响不容忽视。

从已有研究来看，总结认为孔隙水压力变化引起土体沉降灾害从土力学角度归结为两类：原先在水位下的土体水位下降后，有效应力增加，土体被压缩，造成沉降；另外非饱和土在遇水后，土体饱和度增加，加上水的渗流相关力的作用下，土体的强度减小，造成沉降。需要注意的是，孔隙水压力变化不仅会引起隧道周围土体的沉降，还可能导致隧道周围的地面沉降，从而对周围建筑物和道路等造成影响。因此，在盾构开挖过程中，需要采取相应的措施来控制孔隙水压力的变化，以保证隧道的稳定性和安全性。

3.2. 分层土体的压缩变形

分层土体的压缩变形是导致隧道盾构土体沉降的一个重要因素。在盾构工程中，土体的压缩变形是不可避免的，因此需要对分层土体的压缩变形进行分析和评估，以确保隧道的稳定性和使用寿命。土体在不同深度和不同地层的压缩变形也会不同。土体的密度、孔隙比、压缩模量等，这些力学参数会影响土体的压缩变形和沉降特性。

Tang 等[15]采用连续和不连续数值模拟方法验证了组合支护对软岩隧道大压缩变形的控制作用。Li 等[16]通过分析发现(AFM)法在富水弱层中对隧道盾构施工引起的地表土体压缩变形控制效果很好。孟祥连等[17]通研究了泥炭质土层盾构施工中等待层的压缩模量，探索了注浆材料与泥炭质土比例及养护时间同压缩模量的关系。孙萌萌等[18]基于软土地层克泥效盾构施工，开展克泥效材料压缩试验，得到压缩变形规律，并采用数值模拟方法探究了填充率对沉降变形的影响，研究认为填充率为 150%时，沉降变形效果最好。另外，不同地层土体的物理力学性质存在差异，荷载的大小和分布等都会影响土体的压缩变

形和沉降特性。尤其在砂土地层,存在成拱作用,其盾构土体压缩变形向上传递逐渐减小。

目前隧道土体压缩变形预测主要采用解析法、数值模拟法等方法。解析法通过建立数学模型,对隧道施工引起的土体变形进行理论预测;数值模拟法则通过构建三维地质模型,利用计算机模拟盾构开挖施工过程中的土体变形行为。变形监测技术也日益成熟。通过安装各种传感器(如位移计、应力计等),可以实时监测隧道施工过程中的土体变形情况,为施工决策提供重要依据。

3.3. 初始地应力变化

初始地应力主要由地层自重和地面荷载组成,其中地层自重应力是主要的考虑因素。隧道盾构掘进过程中,管片和地面之间的土体初始地应力发生了变化,会导致土体的沉降变形[19][20]。

学者们结合地应力变化对盾构隧道沉降变形做了分析。Yu等[21]采用回归方法进行初始地应力反演分析,研究了隧道不同埋深处初始地应力的分布规律和特征。Zhang等[22]采用数值分析方法采用数值方法分析了地形对原位应力分布的影响,提出了一种原位应力取向和大小的迭代方法,为岩体的稳定性分析提供基本条件。景锋等[23]总结了在钻孔应力解除法、水压致裂法和其他常用原位地应力测量等方法,其在工程区初始地应力场分析研究方面所取得的进展。王薇等[24]进行了三维地应力场的反演模拟,由测点处的地应力测量结果推知工程所在地点,为隧道的设计提供了地应力依据。陈子全等[25]分析了隧道拱顶沉降、水平收敛、最大变形量与地应力之间的关系,提出了高地应力层状软岩隧道的大变形预测分级指标。回归分析、反演、位移反分析法等被用来地应力的研究,有限元分析是应用最广泛的地应力分析方法。基于此方法,研究应重视监测和勘察工作,提高数据的准确性、可靠性,进而提高模拟的精度和效率。

3.4. 围岩松动

围岩松动和沉降监测分析是盾构工程中非常重要的一项工作,是导致土体沉降的两个主要因素[26][27]。盾构面周围的围岩松动和沉降引起隧道周围的岩石松动或破碎,导致隧道周围土体的松动和沉降[28]。

黄永亮[29]采用FLAC3D软件模拟围岩在浅地层不同埋深下的地表沉降情况,对不同围岩的稳定性差异进行分级,认为影响围岩分级的主要因素为岩石强度和岩体完整性。梁连等[30]对盾构隧道松动区边界进行假设,对围岩松动区范围进行了理论推导。藺云宏[31]通过数值软件并结合现场监测数据,探究了大断面浅埋黄土隧道开挖后围岩的沉降变形规律,认为浅埋黄土隧道可以取消拱部锚杆,边墙锚杆可以根据实际需要进行打设。白明洲等[32]通过室内实验建立了非饱和粘性土盾构围岩土体变形和强度参数与含水量的相关性,并用数值分析方法探究了施工过程中的围岩土体稳定性与地表沉降量,明确了考虑土体含水量变化条件下的盾构开挖施工过程中的围岩土体稳定性状况。

由上可知,围岩松动是一个关键且复杂的研究领域,它直接关系到盾构施工的安全性和稳定性。对围岩从等级、支撑条件、地质条件等方面的研究,研究因素较为分散性、单一性,针对不同工况下的施工还很难建立起统一性标准和规范。但大量现场试验和工程实践,使得相关理论和技术更加丰富与成熟,理论分析和数值模拟结果正确性也被逐渐验证。

4. 总结与展望

对盾构施工隧道土体沉降灾害现有研究主要归因于地质条件不良、勘察设计不合理和施工组织不当等方面[33][34]。本文从盾构隧道特点,介绍了其沉降本体性原因和机理;从孔隙水压力、初始地应力等几个沉降灾害影响因素分析,可知隧道产生沉降、塌方等风险的原因是多方面的。针对隧道土体沉降的研究集中于各单一因素的分析,而对其背后的力学机理分析偏少;大量学者的实验、研究多为室内、以

及有限元软件模拟,在实际工程中,还应引入更多现代化科技元素[35],引进和研发新的监测技术和预测方法,形成工程的信息接入、数字化、可视化的分析、应用,使隧道工程的沉降、塌方等事故灾害防患于未然。

基金项目

河南省重点研发专项(No. 241111322900)。

参考文献

- [1] 魏新江,张默爆,丁智,张霄. 盾构穿越对既有地铁隧道影响研究现状与展望[J]. 岩土力学, 2020(S2): 1-20.
- [2] Jin, D., Yuan, D., Liu, S., Li, X. and Luo, W. (2019) Performance of Existing Subway Tunnels Undercrossed by Four Closely Spaced Shield Tunnels. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **33**, Article ID: 04018099. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0001230](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0001230)
- [3] 王岩. 某盾构隧道下穿既有盾构隧道变形超限原因解析及控制研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [4] 姚德峰. 盾构法施工在富水砂层条件下穿越既有地铁隧道变形研究[J]. 建筑技术开发, 2024, 51(6): 75-77.
- [5] 王中南. 克泥效工法加固隧道开挖的土体应力应变特征及沉降控制[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 华北水利水电大学, 2022.
- [6] 罗志刚. 砂卵石地层盾构隧道同步注浆机理模型试验研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广州大学, 2023.
- [7] 钟小春, 刘昶, 朱诚, 等. 盾构壁后注浆窜浆模型试验及发生条件研究[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(1): 122-132.
- [8] 刘金慧, 丁万涛, 戴尊勇, 王焕, 贾开民. 土压平衡盾构隧道施工引起的地层损失及影响因素[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(5): 1-8.
- [9] 丁兆民, 杨晓华. 某黄土隧道病害原因分析及处治措施[J]. 工程地质学报, 2009, 17(1): 138-144.
- [10] 尹泉. 运营期隧道地下水位变化情况估算[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(2): 303-307.
- [11] 金玮泽, 骆祖江, 陈兴贤, 等. 地下水渗流与地面沉降耦合模拟[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2014, 39(5): 611-619.
- [12] Zhang, Q., Zhou, Q., Ye, F., Yan, J., Liu, N. and Lou, Y. (2022) Excess Pore Water Pressure and Ground Consolidation Settlement Caused by Grouting of Shield Tunnelling. *Mathematical Problems in Engineering*, **2022**, Article ID: 1854234. <https://doi.org/10.1155/2022/1854234>
- [13] Luo, Z., Li, Z., Tan, J., Ma, Q. and Hu, Y. (2018) Three-Dimensional Fluid-Soil Full Coupling Numerical Simulation of Ground Settlement Caused by Shield Tunnelling. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, **24**, 1261-1275. <https://doi.org/10.1080/19648189.2018.1464961>
- [14] 穆永江, 袁大军, 王将, 等. 考虑盾构隧道渗水的富水软弱地层地表长期沉降计算研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(S1): 7-12.
- [15] Tang, H., Ji, X., Zhang, H. and Li, T. (2022) Numerical Simulation of Large Compression Deformation Disaster and Supporting Behavior of Deep Buried Soft Rock Tunnel with High in Situ Stress Based on CDEM. *Advances in Civil Engineering*, **2022**, Article ID: 5985165. <https://doi.org/10.1155/2022/5985165>
- [16] Li, J., Li, J., Cai, Y., Wu, D., Guo, C., Zhao, W., et al. (2022) Application of Artificial Freezing Method in Deformation Control of Subway Tunnel. *Advances in Materials Science and Engineering*, **2022**, Article ID: 3251318. <https://doi.org/10.1155/2022/3251318>
- [17] 孟祥连, 赵晓彦, 范智浩, 等. 昆明泥炭质土地铁盾构等代层压缩模量试验研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(6): 1617-1623.
- [18] 孙萌萌, 师文豪, 徐阳, 等. 克泥效工法对盾构隧道地表变形的作用规律研究[J]. 人民长江, 2024, 55(2): 156-163.
- [19] 刘阳, 任青, 喻孟初, 等. 盾构隧道施工期间土体沉降计算分析[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(1): 214-219.
- [20] 刘丽花. 地铁隧道施工期非饱和土体沉降变形的注浆加固控制技术研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- [21] Yu, R., Tan, Z., Gao, J., Wang, X. and Zhao, J. (2022) Inversion and Analysis of the Initial Ground Stress Field of the Deep-Buried Tunnel Area. *Applied Sciences*, **12**, Article 8986. <https://doi.org/10.3390/app12188986>

- [22] Zhang, C., Feng, X. and Zhou, H. (2012) Estimation of in Situ Stress along Deep Tunnels Buried in Complex Geological Conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **52**, 139-162.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.03.016>
- [23] 景锋, 盛谦, 张勇慧, 等. 我国原位地应力测量与地应力场分析研究进展[J]. 岩土力学, 2011(S2): 51-58.
- [24] 王薇, 王连捷, 乔子江, 等. 三维地应力场的有限元模拟及其在隧道设计中的应用[J]. 地球学报, 2004, 25(5): 587-591.
- [25] 陈子全, 何川, 吴迪, 等. 高地应力层状软岩隧道大变形预测分级研究[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(6): 1237-1244.
- [26] 陈全胜, 李小昌. 裂隙破碎围岩大断面隧道现场监测方法与结果分析[J]. 土木工程, 2021, 10(10): 1051-1061.
- [27] 张建军, 黄诒宝, 沈增辉. 松散破碎围岩浅埋隧道施工及监测分析[J]. 山西建筑, 2012, 38(9): 169-170.
- [28] 路德春, 曹胜涛, 张波, 等. 隧道开挖围岩土压力拱效应分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(6): 1421-1430, 1436.
- [29] 黄永亮, 石志一, 王术明, 等. 基于变形理论的花岗岩地区地铁隧道围岩等级细分研究[C]//中国地质学会工程地质专业委员会. 2015年全国工程地质学术年会论文集. 北京: 科学出版社, 2015: 8.
- [30] 梁连, 方焘, 方立建. 基于倾斜滑裂面假设的浅埋盾构隧道松动土压力研究[J]. 中国铁道科学, 2024, 45(3): 97-106.
- [31] 蔺云宏. 西安地铁洒北区间大跨隧道围岩变形及支护研究[J]. 铁道工程学报, 2013(9): 99-104.
- [32] 白明洲, 段钢, 张爱军. 考虑非饱和粘性土含水量变化的地铁隧道围岩土体稳定性分析[J]. 工程地质学报, 2006, 14(5): 603-608.
- [33] 王法雨. 玉庙隧道塌方原因分析及处理方案研究[J]. 隧道建设, 2011, 31(3): 385-390.
- [34] 刘周礼, 李磊, 宁德好. 岩溶隧道溶洞处理施工技术[J]. 中国港湾建设, 2014(5): 67-70.
- [35] 华一新, 赵鑫科, 张江水. 地理信息系统研究新范式[J]. 地球信息科学学报, 2023, 25(1): 15-24.