DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.241238

城市跨江盾构隧道运营期沉降规律研究

宋　粲
(南京交通运营管理集团有限公司,江苏 南京 210044)

摘　要: 根据某城市跨江盾构隧道近10年运营数据,结合隧道结构沉降情况及隧道河床冲淤数据,分析城市跨江盾构隧道在运营期的沉降规律。结果表明:自隧道开始运营之后,隧道整体累计沉降变化曲线随时间整体趋势呈现“U”形。在运营第6年,其累计沉降量达到最大值,而后累计沉降量逐年下降。覆土厚度对开始运营阶段的沉降量有显著影响,但是随着隧道以及隧道周边环境趋于稳定,隧道运营期覆土厚度的变化对隧道整体沉降趋势影响并不显著。

关键词: 跨江盾构隧道;河床冲淤;沉降规律;覆土厚度
中图分类号: U456　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1009-7716(2026)01-0253-05

Research on Settlement Law of Urban Cross-River Shield Tunnels during Operation Period

SONG Can
(Nanjing Transportation Operation Management Group Co., Ltd., Nanjing 210044, China)

Abstract: Based on the operation data of an urban cross-river shield tunnel in the past 10 years, combined with the tunnel structure settlement conditions and tunnel river bed erosion and siltation data, the settlement law of urban cross-river shield tunnels during the operation period is analyzed. The results show that since the tunnel began operation, the overall cumulative settlement change curve of the tunnel has shown a “U” shape over time. In the sixth year of operation, its cumulative settlement reached a peak, and then the cumulative settlement declined year by year. The thickness of the covering soil has a significant impact on the settlement amount at the beginning of the operation period. However, as the tunnel and the surrounding areas of the tunnel tend to stabilize, changes in the thickness of the covering soil during the operation period of the tunnel do not have a significant impact on the overall settlement trend of the tunnel.

Keywords: cross-river shield tunnel; river bed erosion and siltation; settlement law; thickness of covering soil

0　引　言

为探究城市跨江盾构隧道在运营期间的沉降规律,依据某城市跨江盾构隧道近10年运营数据,结合其结构监测情况以及河床冲淤情况,对城市跨江盾构隧道在运营期的沉降行为进行深入分析,探寻跨江盾构隧道在运营期结构的沉降趋势。

某城市跨江盾构隧道是双管双层8车道X形隧道,设计时速80 km,设计日通行车辆10万辆。隧道经南北两条线路穿越长江,南线(S线)全长7 363 m;北线(N线)全长7 014 m[1]。自2016年正式开通运营以来,已平稳通行近10年。隧道具体参数如下。

(1)道路等级:城市快速路;
(2)车道数:双向8车道;
(3)车道净高:4.5m;
(4)侧向净宽:2×8.5 m(0.25+0.5+2×3.5+0.5+0.25)m;
(5)道路最小平曲线半径:1 000 m;
(6)竖曲线最小半径:凸形4 500 m,凹形2 700 m;
(7)设计车速:80 km/h;
(8)道路限界:车道宽度3.5 m×2+3.5×2 m;
(9)路缘带宽度:0.5 m;
(10)设计使用年限:100年;
(11)最大纵坡:4%,困难条件下不超过4.5%;
(11)荷载标准:公路—Ⅰ级。

1　断面及测点布设

根据《江苏省城市隧道建设、运行与维护指南

收稿日期:2024-12-18
作者简介:宋粲(1994—),男,硕士,工程师,从事交通基础设施运营管理研究工作。

(试行)》[苏建城(2019)32 号]第 4.1.4 条“隧道宜定期开展沉降观测并记录,建成通车 2 年内每月进行 1 次沉降测量,2 年后每季度一次”的要求。该隧道目前已运营近 10 年,根据上述要求,每季度进行 1 次沉降监测。

1.1　断面布设

隧道结构沉降监测断面的布置为每 40 m 设置一个,贯穿整个隧道。对于隧道的关键区域,结构沉降监测点进行加密布置,每 10 m 设置一个监测断面。具体的布置方案请参见表 1。

表 1　隧道结构沉降监测点位布设统计表

隧道线位	长度/m	断面	布设点位数	单线布设点位总数	控制点位	点位总数
北线下层	4960	177	2	354	3	
南线下层	5330	190	2	380	3	
北线匝道	294.241	10	2	20	3	822
南线匝道	273.475	10	2	20	3	
特殊断面	—	24	2	48	3	

1.2　测点布设

监测点布设于隧道行车层。

为了降低对交通流的干扰,并便于进行测量工作,测点被设置在隧道内侧的防撞石上,如图 1 所示。在靠近隧道出口的合适位置设置转点,确保隧道内两侧的测点能够形成一条测线,并与基准点构成完整的测量回路,隧道内测点布置,如图 2 所示。

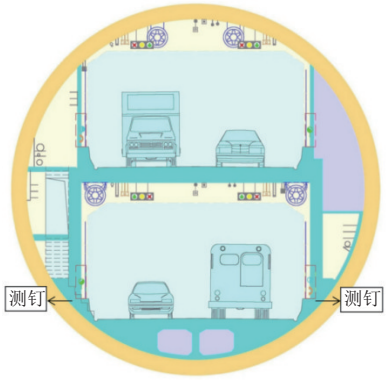

图 1　横断面沉降测点布置示意图

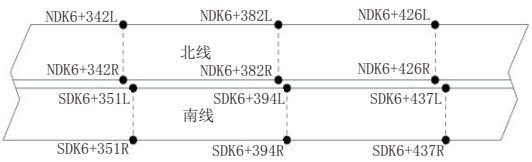

图 2　沉降监测测点布置平面示意图

1.3　监测精度控制

通过测线闭合差计算(本工程闭合差≤±0.3 mm)和相邻周期数据差分分析(差值≤±0.5 mm)验证监测系统精度。

2　沉降稳定性分析

2.1　监测预警值的确定

鉴于跨江盾构隧道的独特性,工程技术界普遍认同在运营阶段对盾构隧道进行监测的重要性。然而,目前国家、行业和地方标准尚未设定具体的允许变形值定量指标。因此,本项目采用工程类比法来确定监测预警指标。

2.1.1　武汉长江隧道

从盾构穿越地层、高水压力等工程地质状况以及盾构规模、施工方法等技术条件来看,武汉长江隧道运营阶段监测所采用的预警值对沉降及变形监测有较大的借鉴意义。武汉长江隧道建议预警值见表 2。

表 2　武汉长江隧道建议预警值

累计变化值/cm	速率/(mm·d^{-1})
≥3	≥0.1

2.1.2　上海黄浦江打浦路隧道

作为我国第一条盾构法施工的公路隧道,上海黄浦江打浦路隧道早在 1998 年就开始了沉降监测工作。根据文献[2-5],该隧道在长期的运营中,沉降增量仅为 40 ~ 50 mm。

2.1.3　境外隧道监测经验

根据文献[6],结合其他国家盾构隧道在运营期的沉降情况,对于周边土体较好的隧道来说,其沉降一般能控制在 20 mm 以内,沉降较小;对于周边存在像淤泥质黏土、松砂等土体较差的隧道,其沉降量常常超过 35 mm,沉降较大。

根据上述经验可以大致推断,周边土体土质对隧道沉降有较大影响。根据以上数据,确定了预警值,即隧道沉降累计变化值 U_0=3 cm;沉降变形速率 S_0=0.1 mm/d,具体见表 3。

表 3　分级预警标准

预警等级	累计沉降量 U_0/mm	沉降速率 S_0/(mm·d^{-1})
黄色预警	15≤U<25	0.05≤S<0.1
橙色预警	25≤U<30	0.1≤S<0.15
红色预警	U≥30 或 S≥0.15	实时监测超标

2.2　沉降变化情况分析

根据文献[7-9],通过对城市盾构隧道的结构沉降进行长期、连续的监测,可以及时分析隧道结构沉降的规律,评估城市盾构隧道在运营期间的结构状态。同时也为隧道的科学决策提供了充分的数据支持,确保城市盾构隧道可以得到科学及时的养护。

隧道穿越土层以淤泥质黏土(压缩模量 E_s=2.5 MPa)和粉细砂(孔隙比 e=0.85)为主。通过多元线性回归分析,建立沉降量 S 与土层压缩模量 E_s、覆土厚度 H 的关系式:S=−15.2H+0.82E_s+23.5(R^2=0.89)。结果表明,覆土厚度每增加 1 m,初期沉降量减少 15.2 mm;压缩模量每增加 1 MPa,沉降量减少 0.82 mm,验证了软土层对沉降的显著影响。

截至 2024 年 7 月,南线(S 线)累计最大上抬 10.63 mm;累计最大下沉 −11.00 mm;北线(N 线)累计最大上抬 9.25 mm,累计最大下沉 −6.23 mm。隧道累计沉降量见图 3、图 4。隧道的平均沉降速率 0.01 mm/d,累计沉降速率均小于控制标准 0.1 mm/d。根据过往测量数据与变形监测安全标准进行对比分析可知,隧道南线、北线各点位沉降总量小于 0.5U_0(±15 mm),处于安全状态。

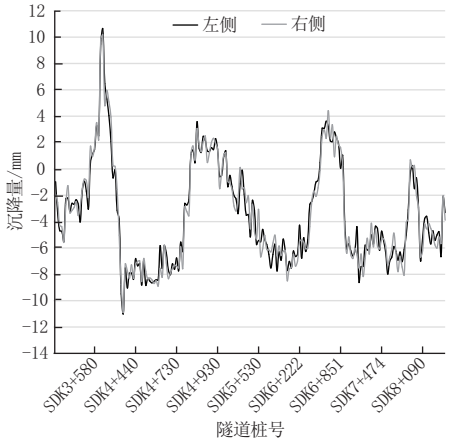

图 3　隧道 S 线累计沉降量

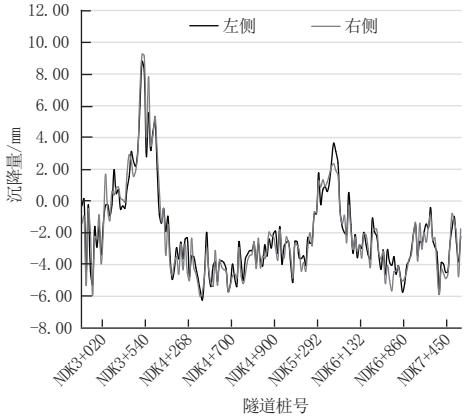

图 4　隧道 N 线累计沉降量

隧道南线北线整体沉降特点为:有沉降有上抬,总体以沉降为主。其中 NDK3+623~NDK3+881 以及 SDK3+623~SDK3+881 上抬趋势显著,且数值较大,见表 4。由图 5 隧道上抬区域典型断面近 5 年累计上抬分布情况可知,该区域隧道于 2021 年开始出现明显上抬情况,其主要原因在于施工对该区域土体造成一定的扰动,致使该区域的受力平衡受到一定破坏。

表 4　隧道断面上抬情况　　单位:mm

桩号	左侧上抬	右侧上抬
NDK3+623	2.19	1.90
NDK3+666	3.22	3.01
NDK3+709	6.01	6.98
NDK3+752	8.79	9.25
NDK3+795	8.19	9.14
NDK3+838	2.80	4.00
NDK3+881	5.55	7.83
SDK3+623	3.28	3.52
SDK3+666	2.52	2.21
SDK3+709	9.48	9.81
SDK3+752	10.63	10.17
SDK3+795	6.47	4.81
SDK3+838	5.30	5.96
SDK3+881	4.04	5.08

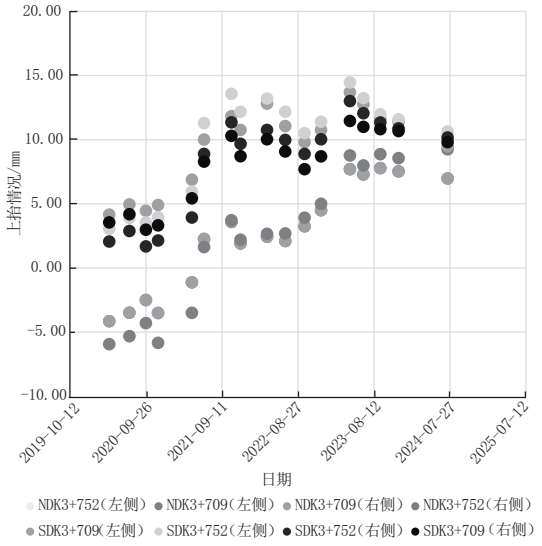

图 5　隧道上抬区域典型断面近 5 年累计上抬分布情况

为了更好地了解该区沉降的规律,选取了该区域典型断面历年累计上抬数据进行分析。施工时间为 2021 年 2 月—2023 年 1 月,期间间断性施工。该区域皆有较大幅度上抬,在其结束后,上抬趋势趋于平缓。因此,周边环境的扰动特别是荷载的增减对隧道的沉降有着较大影响。但是从目前隧道总体的沉降趋势来看,隧道目前累计沉降量逐年减少趋于上抬,历年总体变化趋势呈“U”形。在施工期间,虽然上抬数据较往期数据较大,但各点位沉降总量小于 0.5U_0(±15 mm),隧道处于安全状态。

为更好地了解隧道沉降的规律,选取了隧道历年典型断面的累计沉降变化的数据进行分析。由图 7 可知,隧道结构沉降的速率和幅度随时间的变化而逐渐减小。在运营初期,隧道沉降速率较快,但是随

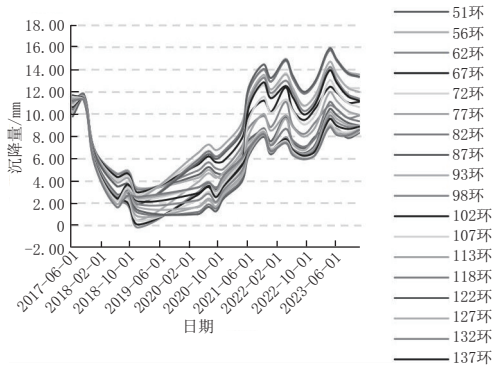

图6　隧道上抬区域典型断面历年累计上抬情况

着时间的推移,沉降速率逐渐减缓并趋于稳定。

采用三次样条插值法对离散监测数据进行平滑处理,基于最小二乘法拟合累计沉降量随时间变化的多项式曲线:$S(t)=a_3t^3+a_2t^2+a_1t+a_0$。通过计算二阶导数识别曲线拐点,确定"U"形曲线的极值点t=6年。拟合优度检验显示R^2>0.95,表明模型拟合效果良好。

对典型位置沉降变化曲线(见图7)进行分析可知,其累计沉降变化曲线随时间整体趋势呈现"U"形,隧道累计沉降量呈现先增大后减小的趋势,累计沉降量到2022年,即第六年左右达到极值,从2022年至今累计沉降量逐年减少。隧道整体沉降速率趋于平缓,累计沉降量呈缓慢下降趋势。隧道上抬区域沉降变化情况与隧道总体沉降变化情况具有一致性。通过该地区地下水位情况来看,2015—2021年,该地区地下水井由120眼下降为56眼,地下水水位逐年缓慢回升。因此隧道近些年累计沉降量缓慢减小,呈缓慢上抬趋势或与其地下水位上升有关。

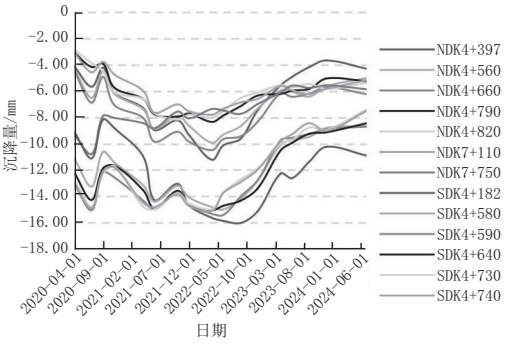

图7　隧道S/N线历年典型断面监测位置累计沉降变化

2.3　河床冲淤与沉降变化关系分析

为了保证跨江盾构隧道结构的安全稳定,该隧道自建成后便对其中心线上下游各100 m进行河床监测分析,主要内容包括河床冲淤变化、隧道最小覆土厚度变化情况等[10-12]。

通过河床的定期监测,可以准确掌握河床的冲淤动态,从而发现河床冲淤的规律以及趋势,根据监测的结果来对重点的部位进行维护管理,以确保隧道的安全运营。除此之外,结合隧道沉降监测数据,打破不同监测数据之间的隔阂,可以更科学全面地评估隧道结构的健康状况,为隧道的维护和管理提供科学依据。

2024年,通过对隧道工程段河道平面、横断面图及岸坡比等变化的分析表明,大江段(泛指隧道入江部分)总体呈冲刷,冲刷总量为4.5万m^3,平均冲深厚度0.28 m。大江段两条线路最小覆土厚度基本经历了先减小再增大的过程。根据隧道河床冲刷情况确认隧道S线最小覆土厚度在10.14~15.02 m之间;N线最小覆土厚度在8.58~13.85 m之间,隧道情况总体稳定。河床冲刷情况见图8、图9。

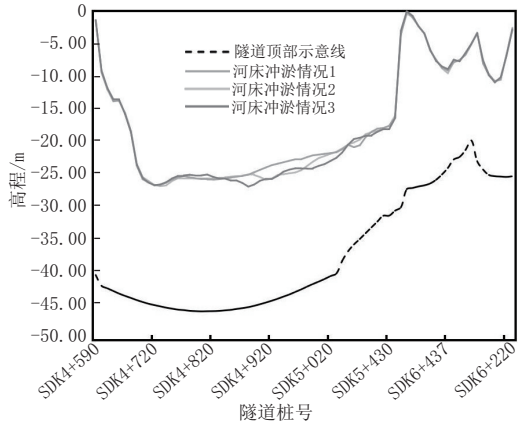

图8　S线河床冲刷情况

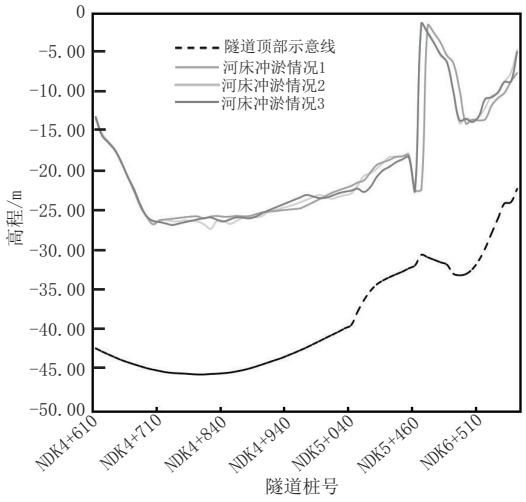

图9　N线河床冲刷情况

为了更好地了解最小覆土厚度对隧道沉降趋势的影响,选取了隧道最大及最小覆土厚度位置累计沉降变化进行分析,隧道最小及最大覆土厚度位置累计沉降变化见图10。由图可知,到2022年,即通行第6年左右,累计沉降量达到极值,而后累计沉降量逐年变小,累计沉降量缓慢减小,呈缓慢上抬趋

势，与隧道整体沉降趋势一致。覆土厚度对开始运营阶段的沉降量有显著影响，但随着隧道以及周边环境的稳定，在运营后期对隧道整体沉降趋势的影响并不显著。

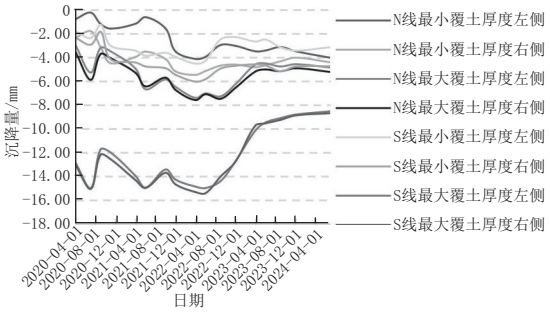

图 10　最小和最大覆土处沉降变化情况

3　结　论

（1）隧道全线有上抬有沉降，但总体以沉降为主。隧道整体累计沉降变化曲线随时间整体趋势呈现“U”形。隧道累计沉降量呈现先增大后减小的趋势，累计沉降量运营期第 6 年左右达到极值，而后累计沉降量逐年下降。隧道整体沉降速率趋于平缓，累计沉降量呈缓慢下降趋势。

（2）最小及最大覆土厚度处沉降变化与隧道整体沉降趋势一致，累计沉降量到第 6 年左右达到极值，累计沉降量呈现先增大后减小的趋势，而后累计沉降量逐年下降。随着隧道以及隧道周边环境趋于稳定，隧道运营期覆土厚度的变化对隧道整体沉降趋势影响并不显著。

（3）对运营期沉降极值区域建立专项档案，每季度进行结构裂缝检测；隧道沉降同时考虑上方土体状态以及地下情况掌握相关变化与沉降的耦合效应。

参考文献：

[1] 唐健，周金忠，范太兴，等. 盾构法过江交通隧道废水排水系统调研与总结[J]. 隧道建设（中英文），2018，38（2）：260-269.
[2] 杨海涛. 地铁隧道施工沉降原因分析[J]. 黑龙江科技信息，2011（15）：254.
[3] 臧小龙. 软土盾构隧道纵向结构变形研究[D]. 上海：同济大学，2003.
[4] 臧小龙，黄宏伟，徐凌. 地铁隧道纵向沉降和结构性能研究[C]// 2003 上海国际隧道工程研讨会. 北京：中国土木工程学会，2003.
[5] 王岩. 软土地铁隧道结构性态评估方法研究[D]. 上海：同济大学，2005.
[6] 戴旻. 双层盾构隧道受力及变形特性的建模与分析[D]. 上海：上海交通大学，2004.
[7] 林志勇. 近接施工影响下既有城市轨道交通结构的变形监测与分析[J]. 广东建材，2019，35（12）：45-47.
[8] 徐平，杨益新，朱志豪. 运营地铁盾构隧道基底沉降的影响因素分析[J]. 水文地质工程地质，2024，51（4）：157-166.
[9] 丁浩，景强，闫禹，等. 沉管隧道运维技术发展现状综述[J]. 中国公路学报，2022，35（10）：1-12.
[10] 王乐明，罗基伟，张宇亭，等. 河床冲刷对大断面水下隧道变形影响[J]. 岩土工程学报，2024，46（增刊 1）：107-111.
[11] 张军，张翅翔. 河床冲淤引起过江盾构隧道纵向变形的研究[J]. 隧道建设，2009，29（2）：152-156.
[12] 胡朝阳，王乐乐，黄梅琼，等. 穿江地铁隧道施工及运营期河道监测分析[J]. 现代隧道技术，2021，58（3）：190-195；222.

（上接第 237 页）

[2] 钱国东. 市政雨污水管道施工质量控制分析[J]. 人民黄河，2022，44（增刊 2）：221-222.
[3] 应俊. 关于排水管道工程基坑支护技术探讨[J]. 中国市政工程，2014（3）：38-39；45.
[4] 陈华雷，张海吉，张博. 某水厂基坑开挖对周边环境的影响分析[J]. 建筑结构，2020（增刊 1）：1028-1031.
[5] 王建，李众，赵恺，等. 桥梁承台基坑开挖对临近桥梁结构影响研究[J]. 城市道桥与防洪，2024（9）：124-127；140.
[6] 邓三军，阳小峻，杨浩. 综合管廊基坑开挖对临近跨线桥墩柱的影响分析[J]. 建筑机械，2025（4）：129-132；137.
[7] 季凡凡，李亚明. 近距离管道基坑对运营地铁高架结构的影响 [J]. 城市道桥与防洪，2022（4）：228-231.
[8] 王超. 基于 Midas GTS 模拟管线施工对桥梁桩基稳定性的影响[J]. 华北科技学院学报，2021，18（6）：55-59.
[9] 李向群，张兆辉，孙超. 基坑开挖对周边地下管线影响研究现状及展望[J]. 吉林建筑大学学报，2015，32（4）：13-18.
[10] 黄宏伟，顾雷雨. 基坑工程风险管理研究进展[J]. 岩土工程学报，2008，30（增刊 1）：651-656.