

特大越江沉管隧道沉降变形机理研究

王 舜

(上海市市政公路工程检测有限公司, 上海市 201108)

摘 要: 由于具备地质水文适应能力强等诸多优点,我国已经建成多条预制管段沉放法隧道。沉管隧道建成投入使用后,沉降变形是不可避免且必须面对的问题。对某沉管隧道运营至今20余年的沉降数据进行分析,包括累计沉降特征,历年沉降趋势,管节间差异沉降等。研究结果表明:隧道覆土厚度发生了较大变化,部分管节产生了较大的不均匀沉降,且在管节间存在较大的沉降差。隧道的这些沉降变形引起了隧道主体的结构多种病害,当在隧道沉降变形渐趋放缓后,隧道结构整体处于稳定状态。

关键词: 沉管隧道;沉降;变形;病害

中图分类号: U451

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)05-0316-04

Study on Settlement Deformation Mechanism of Super-large Cross-river Sinking Pipe Tunnel

WANG Shun

(Shanghai Municipal Highway Engineering Inspection Co., Ltd., Shanghai 201108, China)

Abstract: Due to many advantages such as strong adaptability of geology and hydrology, the multiple tunnels have been built by the sinking method of prefabricated pipe segments in China. After the sinking pipe tunnel is built and put into use, the settlement deformation is inevitable and must be faced. The settlement data of a sinking pipe tunnel over more than 20 years since its operation is studied and analyzed, including the cumulative settlement characteristics, settlement trend over the years, and differential settlement between pipe segments. The research results show that the thickness of the tunnel cover soil has changed significantly. The considerable uneven settlement occurs in some pipe segments. And there is a large settlement difference between the pipe segments. These settlement deformations of the tunnel have caused a variety of diseases in the main structure of the tunnel. When the settlement deformation of the tunnel gradually slows down, the overall structure of the tunnel is in a stable state.

Keywords: sinking pipe tunnel; settlement; deformation; diseases

0 引 言

沉管法隧道是预制管段沉放法的简称,是利用沉埋法在水底建筑隧道的施工方法。由于具备对地质水文适应能力强、埋深浅便于与两岸衔接、施工工期短及断面形式可控等诸多优点。在沉管隧道诞生的100多年里,世界上共建成100多条沉管隧道,其中在我国有10余条。

实际监测数据表明,沉管隧道建成投入使用后,沉降、变形是不可避免的问题。需要科学地对沉管隧道的变形数据进行分析,探究隧道结构病害与沉降变形的关系,为隧道养护维修提供依据,保证隧道

的长期安全运营。选取某沿海城市已运营20余年的沉管隧道作为研究对象,对沉降数据进行分析,科学研究沉降的原因及规律,为同类的工程项目的设计和养护维修提供技术参考。

1 工程概况

某沉管隧道采用双向8车道,设计时速80 km/h。隧道全长1 860.0 m,其中西引道段282.7 m,西暗埋段457.0 m,沉管段736.0 m,东暗埋段177.0 m,东引道段207.3 m。沉管段全长736 m,共分为7节管段^[1]。隧道纵剖面图及横断面图如图1、图2所示。

沉管段采用框架式钢筋混凝土结构,管段间采用柔性连接,接头防水采用GINA和OMEGA双层止水带。隧道设计荷载等级为汽—超20级;验算荷载挂—120,特—300;管段抗浮安全系数 ≥ 1.2 ,混凝土

收稿日期: 2024-12-05

作者简介: 王舜(1984—),男,硕士,高级工程师,从事路桥检测工作。

强度等级为 C35,抗渗等级 S10。

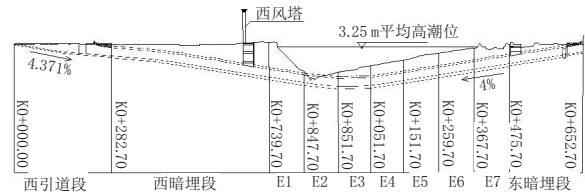


图 1 隧道纵剖面图

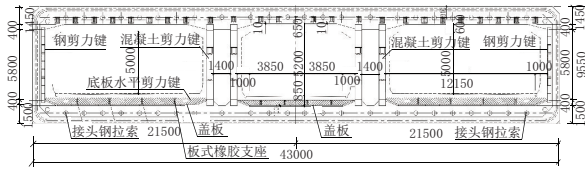


图 2 隧道横断面图(单位:mm)

隧道于 2003 年开通,至今已运营超过 20 a。隧道所处地质结构为软土地基,含水量大、承载力低,受结构自重、外部荷载及河道冲刷等因素影响,隧道结构不可避免的会发生沉降变形。

2 沉降变形测点

隧道建成后共设置了 139 个长期沉降监测点,其中南孔 68 个,北孔 71 个(见图 3)。



图 3 沉降监测测点

3 累计沉降特征

自 2003 建成至 2023 年 10 月,累计沉降数据如图 4 所示。

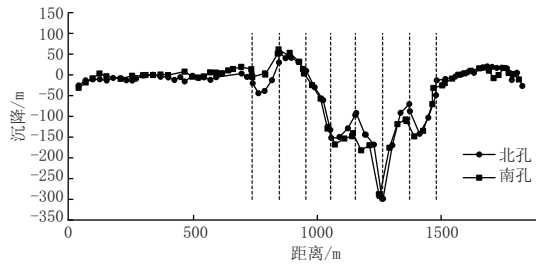


图 4 隧道累计沉降(单位:mm)

从累计沉降图可以得出以下结论。

(1)隧道整体呈沉降趋势,各管节间沉降不均匀^[2],隧道各管节基础刚度不均。南北孔各对应管节累计沉降规律及数值基本吻合,说明沉管隧道横向刚度较大,且两侧沉降较为均匀。

(2)两侧暗埋段累计沉降变形为-31.1 ~ 20.5 mm,为整体沉降,说明暗埋段基础较为稳定。

(3)E1 管节东端和 E2 管节出现了不同程度的上

抬,最大处上抬量为 61.5 mm。以 E2 段为例,结合沉降结果及覆土情况分析上抬原因^[3]。隧道位于河道弯角处(见图 5),沉管 E1、E2 和 E3 长期处于河道冲刷位置,管段上部的覆土量较少,且潮汐和水流速度的变化也会对覆土层厚度有一定影响。覆土层厚度历年来测试结果如图 6 所示。

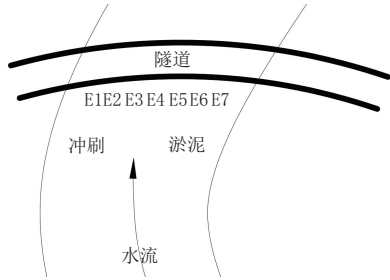


图 5 隧道位置图

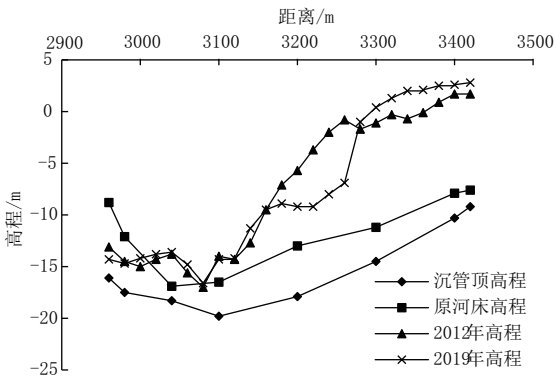


图 6 覆土厚度图

计算 E2 管节的抗浮系数: E2 段重力 $G=4.61 \times 10^6$ N/m; 浮力 $F=4.08 \times 10^6$ N/m; 按照 2019 年测试结果, E2 管节的覆土厚度为 3.8 m, 覆土 $G_1=1.32 \times 10^6$ N/m; E2 段抗浮系数为 $(G+G_1)/F=1.45 > 1.2$ 。可以看出单独浮力作用尚不足以使管节上浮。综合分析, E2 管节上抬原因在周边管节沉降引起的协调变形及浮力的共同作用下发生。

(4)沉管段 E4 至 E6 管节均产生了 100 mm 以上的沉降变形,最大位移发生在 E5-E6 接头附近,达 298.6 mm。此 3 段管节长期处于河道覆土的淤积位置,大于建设期覆土厚度。其中 E5 ~ E6 沉管段,超出原设计覆土厚度约 5 m,顶部回淤荷载增加在 60% 以上。

E5、E6 接头处为沉管隧道施工的最终接头处,附近区域回淤严重、基础较差。沉管段底部的基础受水流冲刷影响可能产生薄弱环节,叠加隧道顶部覆土的不均匀分布,导致沉管段不均匀沉降的发生。

(5)E3、E5、E6 管节总体呈上拱形态,管节内部存在弯曲变形。通过建立管节有限元分析模型^[4],并根据管节变形数据分析管节应力分布,有限元分

析显示管节顶板部分区域拉应力超标,这与现场检测的顶板横向裂缝数据吻合。E3管节有限元分析及裂缝分布如图7和图8所示。

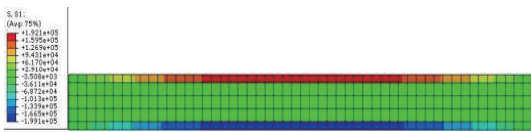


图7 E3管节(南孔)有限元分析结果

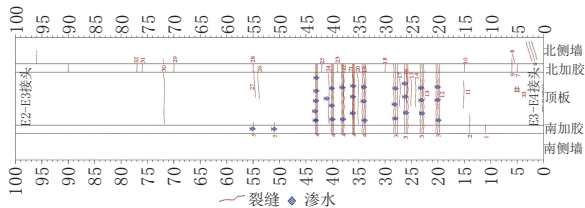


图8 E3管节(南孔)裂缝分布图

4 历年沉降趋势

为客观、真实反映各沉管管节的沉降变化情况,分析沉降随时间的变化规律和发展趋势,需研究自2003年以来各管节历年沉降量数据。由于南孔北孔沉降数据接近,选取北孔作为分析对象,各沉管管节中间测点沉降随时间变化如图9所示,沉降较大的北孔E5管节沉降如图10所示。由于隧道测点高程受潮汐、温度影响较大,在分析历年高程数据时,选取测量时潮位及温度接近的测量月份数据进行对比,尽可能排除外在因素干扰。

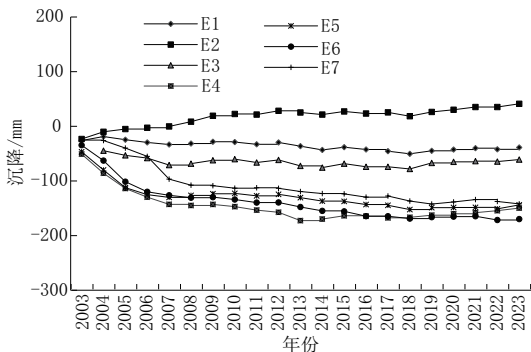


图9 北孔各管节中间测点沉降-时间曲线(单位:mm)

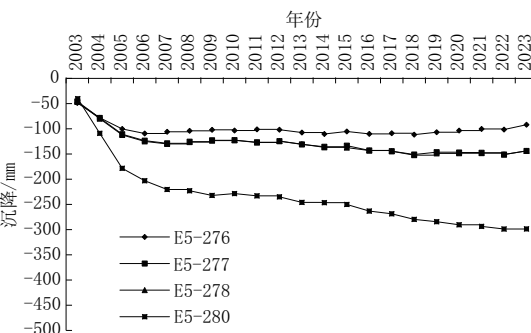


图10 北孔E5管节各测点沉降-时间曲线(单位:mm)

分析沉降-时间数据可以得出以下结论。

(1)E1、E2、E3管节中间测点在隧道运营期沉降不大,在2008年后沉降速率已基本稳定。在2021—2023年,3个管节的所有沉降测点沉降速率范围为0~0.012 mm/d,大多数点沉降速率小于稳定判值0.01 mm/d。

(2)E4至E7管节沉降较为明显,主要分两个阶段:2003—2006年快速沉降期,期间E5/E6管节接头处最大沉降速率可达0.09 mm/d,在2006年后逐年稳定,这与2005年E5/E6管节接头处体外注浆增强了地基稳定性,2006年E4/E5和E5/E6接头处增设刚性限位装置加强了各管节的整体性有关。

2021—2023年,除E4管节上抬速率为0.012~0.014 mm/d,略大于沉降稳定限制外,其他管节沉降已趋于稳定,沉降速率为-0.011~0.012 mm/d。

5 管节间差异沉降

沉管管段间采用柔性连接,管节之间主体结构间通过剪力键传递剪力,并使用钢拉索纵向连接。南孔南侧墙和北孔北侧墙为钢剪力键,其余均为混凝土剪力键。

2022—2023年及2003年以来各管节间差异沉降数据见表1。表中数据“+”表示西侧高,“-”表示东侧高。

表1 沉管管节间差异沉降统计表		单位:mm			
部位	2022—2023年 差异沉降		2003—2023年累计 差异沉降		
	南孔	北孔	南孔	北孔	
西暗埋段/E1	+11.3	-6.0	+18.7	+22.6	
E1/E2	-3.5	+0.3	-10.1	-22.8	
E2/E3	+4.1	-6.5	+10.9	+1.5	
E3/E4	+2.8	-3.6	-4.2	+19.2	
E4/E5	+0.4	-1.5	-7.3	-4.7	
E5/E6	-1.6	+2.5	+3.7	-0.1	
E6/E7	-2.0	-0.5	+3.7	+17.2	
E7/东暗埋段	-0.6	-2.9	-39.1	-35.7	

结合隧道技术状况,对表1中的数据进行分析^[5]。

(1)南北孔管节间最大累计差异沉降均发生在E7/东暗埋段接头,南孔E7管节相对下沉39.1 mm,北孔E7管节相对下沉35.7 mm。

(2)管节间的差异沉降引起连接管节的钢剪力键连接螺栓拉开/拉断,混凝土剪力键开裂,剪力键支座脱空等病害^[6-9]。典型的E7/东暗埋段接头北孔南侧墙混凝土剪力键,由于E7管节相对东暗埋段下

沉 35.7 mm,上剪力键挤压东暗埋段剪力键,剪力键衔接处具有非常明显的拉压应力组合效应,引起上剪力键倒角处多条 45° 方向的斜向裂缝,属于拉压组合型的剪切破坏。此外差异沉降还造成上支座外鼓、下支座脱空(见图 11)。

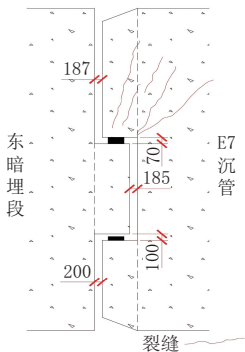


图 11 E7/东暗埋段接头剪力键病害

对于此种病害,已采取裂缝注浆处理后,在剪力键两侧粘贴钢板的局部加强方式予以处理,确保剪力键的安全。

6 结 语

(1)经过多年运营,沉管隧道整体呈下沉趋势,管节沉降不均匀。沉降-时间曲线显示沉降近年已渐趋放缓,隧道基本处于稳定状态。

(2)两侧暗埋段基础稳定,沉降较小;位于冲刷

区的部分管节在浮力,及周边沉降管节沉降引起的协调变形影响下发生上抬;而 E4-E6 管节由于基础较弱,叠加上部覆土,产生了较大的沉降变形。

(3)部分管节内部存在弯曲上拱变形,导致管节顶部混凝土在负弯矩作用下产生横向裂缝。

(4)沉管管段间差异沉降引起剪力键混凝土开裂、螺栓拉开、支座脱空等多种病害。

参考文献:

[1] 史志想,吴华勇,文水兵.运营期沉管隧道沉降变形分析[J].城市道桥与防洪,2022(6):233-237.

[2] 李斌,张嘉莹,高潮.港珠澳大桥沉管隧道沉降变形规律研究[C]//第十一届全国工程排水与加固技术研讨会暨港口工程技术交流大会论文集:343-353.

[3] 谢雄耀,王培,李永盛,等.甬江沉管隧道长期沉降监测数据及有限元分析[J].岩土力学,2014,35(8):2314-2324.

[4] 岳夏冰,吴定意,王奕丁,等.外海大回淤沉管隧道沉降影响因素敏感性分析[J].水资源与水工程学报,2023,34(6):164-172.

[5] 刘文彬,曹晓航,刘迪,等.水下沉管隧道管节差异沉降影响因素研究[J].公路,2024,69(4):401-406.

[6] 王明俊,安贺东,张延猛,等.差异沉降下沉管隧道接头剪力键力学特征[J].中国港湾建设,2023,43(1):1-6;29.

[7] 成晨.沉管隧道节段接头剪力键力学性能与结构形式研究[D].西安:长安大学,2020.

[8] 张战平.近海沉管隧道节段接头剪力键受力特性及影响因素分析[D].西安:长安大学,2020.

[9] 胡指南,冯怀平,马超超,等.沉管隧道节段接头剪力键受力阶段与沉降控制标准研究[J].现代隧道技术,2018,55(4):132-138.

(上接第 310 页)

[11] 尹頔.基于模糊综合评价法的城市公共交通发展水平评价研究[D].西安:西安电子科技大学,2018.

[12] 赵乐冰,王蕾,万灿,等.基于数据包络分析法的城市综合能源系

统分环节能效评价[J].电力系统自动化,2022,46(17):132-141.

[13] 尹頔.基于模糊综合评价法的城市公共交通发展水平评价研究[D].西安:西安电子科技大学,2018.