

超大直径海底盾构隧道管片受力分析

——以湛江湾海底隧道为例

贾文达

(中交中南工程局有限公司, 湖南 长沙 410000)

摘要: 为了更好地针对大直径盾构隧道结构工程进行安全性和可靠性研究,选取实际工程典型断面衬砌管片的受力进行计算分析。以广湛高速铁路湛江湾海底盾构隧道为背景,针对衬砌管片利用大型有限元软件 ANSYS,对该盾构隧道结构和周围岩体进行建模,得出施工一段时间后衬砌管片的受力情况,并与现场监测数据进行对比分析。结果表明:衬砌管片所受土压力与水压力在施工完成后一段时间内保持稳定;同一监测断面不同测试点的土压力存在一定差异,拱顶和拱腰位置受力较大,拱顶位置压力值尤为显著,建议在隧道施工期后一段时间,关注拱顶和拱腰部位的应力值变化;6个监测断面各相应位置的实测压力值与数值模拟压力值变化规律一致,且较为接近。因此,在一定的数值模拟假定条件下,数值模型能够较为真实地反映衬砌管片的实际受力情况。

关键词: 超大直径盾构隧道;衬砌管片;海底隧道;数值模拟;管片受力

中图分类号: U459

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)04-0250-05

Stress Analysis of Ultra Large Diameter Underwater Shield Tunnel Segments: Case Study of Zhanjiang Bay Underwater Tunnel

JIA Wenda

(CCCC Central-South Engineering Co., Ltd., Changsha 410000, China)

Abstract: In order to better study the safety and reliability of large-diameter shield tunnel structural engineering, the stress of typical cross-section lining segments in actual engineering is selected for calculation and analysis. Taking the Zhanjiang Bay underwater shield tunnel of the Guangzhou Zhanjiang high-speed railway as the background, the structure and surrounding rock mass of the shield tunnel were modeled using the large-scale finite element software ANSYS for the lining segments. The stress situation of the lining segments after a period of construction was obtained, and compared and analyzed with the on-site monitoring data. The soil pressure and water pressure experienced by the lining pipe segments remain stable for a period of time after the construction is completed; There are certain differences in soil pressure at different testing points on the same monitoring section, with greater stress at the arch crown and arch waist positions, and particularly significant pressure values at the arch crown position. It is recommended to pay attention to the changes in pressure values at the arch crown and arch waist during the tunnel construction period; By comparing the on-site monitoring data and numerical simulation data of six section pipe segments, the internal force results at the corresponding positions of each section are relatively close. Therefore, under certain numerical simulation assumptions, the numerical model can accurately reflect the actual stress situation of the lining pipe segments.

Keywords: ultra large diameter shield tunnel; lining segment; underwater tunnel; numerical simulation; pipe segment stress

0 引言

随着我国对于基础设施建设的深化改革,海域

隧道的建设已处于高速发展阶段。据统计,截至2023年底,全国已建设有海底隧道33条,其中盾构法施工的海底隧道占到78%^[1]。近些年,随着新工艺、新工法、新技术的不断涌现,大直径海底盾构隧道已经成为海底隧道建设的趋势。

针对盾构隧道管片受力的研究较为广泛,但多数是基于现已建成的直径为6 m盾构隧道展开

收稿日期: 2024-11-20

基金项目: 中交中南工程局有限公司科技研发项目(KJHT2018-22)

作者简介: 贾文达(1988—),男,硕士,工程师,从事地下工程与盾构施工技术研究。

的^[2-4],而直径 10 m 以上的大断面海底盾构隧道由于受到地质条件等因素的影响,其管片受力不尽相同,可通用、参考之处较少。麻凤海等^[5]以大连地铁 5 号线大连海底盾构隧道衬砌管片为研究对象,利用 MIDAS GTS 建模,得出了隧道施工一段时间后衬砌管片的受力情况;陈一凡等^[6]依托甬舟铁路金塘海底盾构隧道工程,建立了考虑渗流的盾构隧道对接有限元模型,同时建立了考虑渗流的盾构近距离对接开挖面极限支护压力理论模型,并将模型得出的结果与数值模拟结果进行对比,验证了理论模型的可行性;尹义豪^[7]依托广湛高铁湛江湾海底隧道项目,运用 BIM 一体化平台的自动盾构管片排布功能,生成不同参数的管环,并采用有限元分析软件进行相应的受力分析,提高了建设效率,为进一步的盾构智能化建设奠定了基础。

为更好地研究海底大直径盾构隧道结构工程的安全性和可靠性,本文以广湛高速铁路湛江湾海底盾构隧道(以下简称“湛江湾海底隧道”)为工程背景,采用英国 Soil Instruments 公司生产的土压力计和渗压计,对盾构隧道衬砌管片进行现场监测;同时应用大型有限元软件 ANSYS 进行三维建模计算,并将监测值与数值模拟计算值进行对比,以验证模型的有效性和可行性。研究成果可用来为大直径海底盾构隧道管片、结构是否安全可靠提供判据,亦可为类似工程设计和施工提供参考。

1 工程概况

湛江湾海底隧道位于湛江市区,进口端位于海东新区李西村,依次下穿东旺大道、东城西路、柏西路湛江奥体中心停车场、龙王湾路,于龙王湾路附近下穿进入湛江湾,再于海西中澳友谊花园穿出湛江湾,沿湛江市主干道乐山路下穿至湖光快线,于椹川大道交叉口附近出洞。湛江湾海底隧道平面图见图 1。

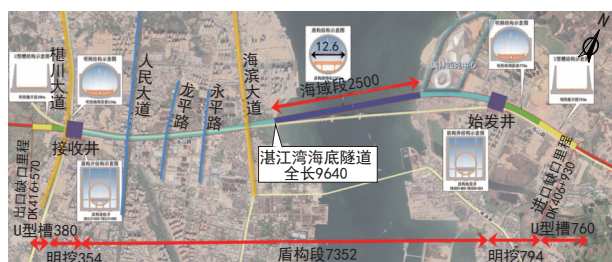


图 1 湛江湾海底隧道平面位置示意图(单位:m)

湛江湾海底隧道是广湛高铁全线控制性工程,盾构区间全长 7 352 m,是目前独头掘进最长的大直

径跨海高铁隧道,水域段长达 2.5 km。

盾构段隧道管片外径 13.8 m,内径 12.6 m,采用通用楔形环管片,环宽 2 m,厚 0.6 m,管片的混凝土等级为 C60,抗渗等级 P12。每环管片分为 10 块,由 7 块标准块、2 块邻接块和 1 块封顶块组成,每环由 86 根 8.8 级 M36 高性能螺栓连接。

根据现场地质勘察资料,湛江湾海底隧道围岩的基本物理力学参数如表 1 所示。

表 1 围岩的物理力学指标

类别	重度 $\gamma /$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	变形模量 E / MPa	泊松比 ν	内摩擦角 $\varphi / (^{\circ})$	黏聚力 c / kPa
素填土	13.0	23	0.22	13.0	11.0
淤泥质土	19.0	41	0.24	23.0	27.0
黏质粉土	14.0	38	0.23	29.0	100.0
砂质粉土	15.0	28	0.35	15.0	35.0
粉细砂	18.5	39	0.35	27.0	30.0
中砂	23.5	41	0.23	38.9	1.7
粗砂	25.0	43	0.21	42.7	1.1

隧道周边地质有以下特点:

- (1)隧道范围内无明显活动断裂痕迹,岩层基本稳定。
- (2)隧区主要不良地质为饱和砂土液化、有害气体和地面塌陷。
- (3)隧区主要特殊性岩土为人工填土、软土、有机质土、膨胀土。

2 盾构管片现场监测结果和分析

2.1 监测断面和测点布置

为了提高监测结果的有效性和可用性,在进行盾构隧道断面选择和测点布置时应遵循以下原则^[8-13]:

- (1)选择土压力和水压力较大的位置。
- (2)选择埋深小且隧道有上浮风险的位置。
- (3)选择隧道结构断面出现变化的位置。
- (4)重点位置布置 2 套传感设备等。

根据上述原则,在湛江湾海底盾构隧道跨海段设置 6 个监测断面(D1~D6),如图 2 所示。

本文选取 1 个代表性监测断面 D4(第 1 256 环管片),该断面里程为 DK410+413.26,其拱顶覆土主要为粉细砂和中粗砂,高度为 14.5 m,设计水深为 15.26 m。

海底盾构隧道监测断面 D4 上第 1 256 环管片的测点位置横断面图、传感器布置图见图 3。由于本文

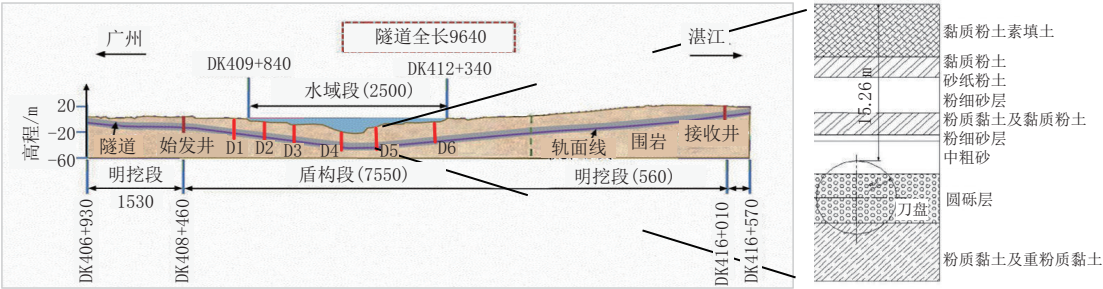


图2 湛江湾海底盾构隧道监测断面D1~D6布置图(单位:m)

研究重点为施工期以及进入运营期后盾构衬砌管片与围岩之间的压力变化、衬砌渗透水压力变化,因此在管片相应位置布置了土压计和水压计。土压计和水压计编号见表2。

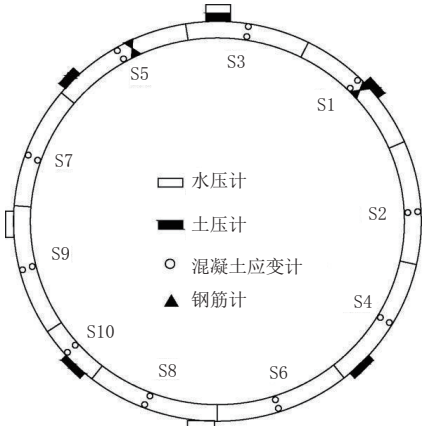


图3 测点位置横断面和传感器布置图(S1~S10均为管片环号)

表2 土压计和水压计编号及其埋设位置

管片环号	土压计	水压计
S1	IP56224	
S2		
S3	IP56203	120D56211
S4	IP56222	
S5	IP56212	
S6		
S7		
S8		120D56201
S9		120D56225
S10	IP56205	

2.2 监测结果分析

文中所选取的隧道断面D4上第1256环管片完成拼装固定时间为2022年4月20日,而后进行监测取值,监测频率为2次/d。

由于数据量偏大,文章篇幅有限,无法一一列出,因此选取距离开通时间前15d、累计30组数据进行分析。土压计、水压计监测结果见图4、图5。

由图4、图5可知,第1256环管片在拼装完成后,无论是土压力还是水压力均呈稳中有降的变化趋势。原因是管片完成拼装后,衬砌与围岩土体之

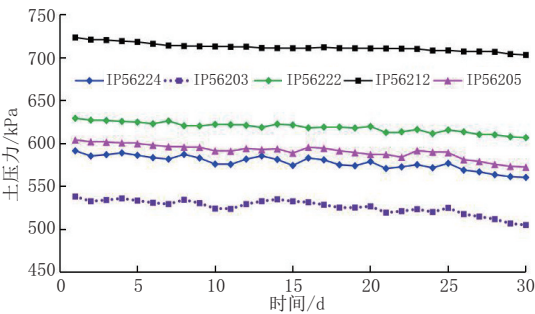


图4 土压计监测结果

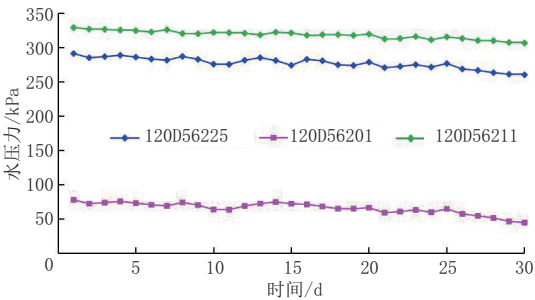


图5 水压计监测结果

间会出现应力重分布现象,加之土体完成固结也较为缓慢。具体地,土压力最大值出现在拱顶位置S5,其值为723 kPa,经历15 d后稳定在702 kPa,期间的变化幅度为2.7%。水压力最大值出现在拱顶位置S3管片处(压力计编号120D56211),其值为330 kPa,拱腰位置S9管片处(压力计编号120D56225)的水压较拱顶小,但差距不明显;仰拱位置S8管片处(压力计编号120D56201)承受的水压最小,为78.3 kPa。出现这样的结果,原因是衬砌背后设置了环向、径向的排水系统,增加了衬砌背后水的流动性。

3 盾构管片数值模拟

3.1 模型建立

采用大型有限元软件ANSYS建立盾构隧道管片环间、考虑纵向的三维计算模型(见图6、图7),其中盾构管片和螺栓采用SOLID45实体单元,不设置螺栓孔壁和螺栓的接触问题;周围土体用COMBIN39单元;管片之间设置接触单元,采用CONTA173单元进行接触设置。土体的本构关系为Drucker-Prager

模型。



图6 盾构管片有限元模型

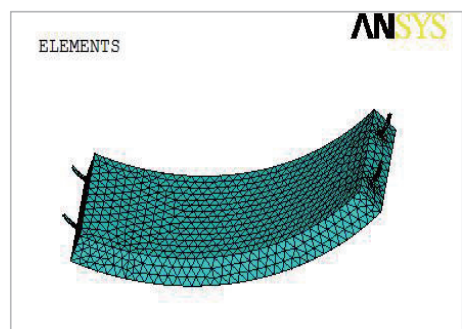


图7 盾构管片网格划分(考虑接头)

由于盾构管片拼装块接头的刚度与整体的钢筋混凝土结构有所不同,在进行数值模拟分析时,应把管片结构视为非连续介质变形体^[14-16]。

3.2 计算结果及分析

监测断面D4上(见图2)第1256环管片的土压力、水压力云图见图8、图9。

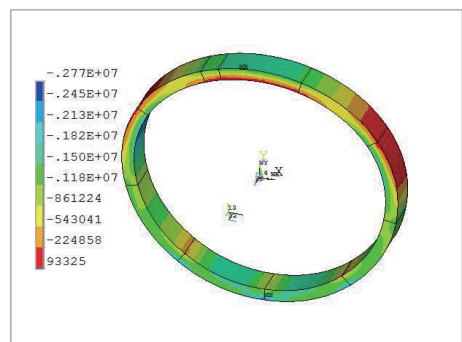


图8 管片土压力云图(单位:Pa)

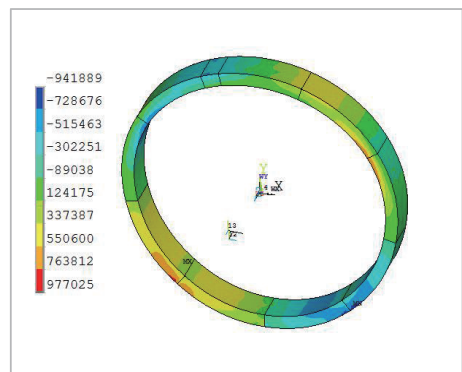


图9 管片水压力云图(单位:Pa)

将图4与图8、图5与图9进行对比后可以看出,数值模拟计算结果与现场监测结果有所差异。这是由于现场监测时部分传感器受到后续管片安装、注浆等施工扰动的影响,尤其是水压力值,受上方海水压力变化影响较大;且有限元模型的建立过程有假定条件的存在,譬如管片间接触假定为弹性接触、钢筋混凝土不会出现塑性变形等。虽然两者存在一定差别,但是总体上的分布规律与压力极值位置相对应。

3.3 多断面对比结果

按以上方法分别收集监测断面D1~D3、D5、D6上相应管片安装完成后,传感器S5位置(即拱顶位置)的监测数据,并将这些数据与模型计算数据进行对比,结果见图10。

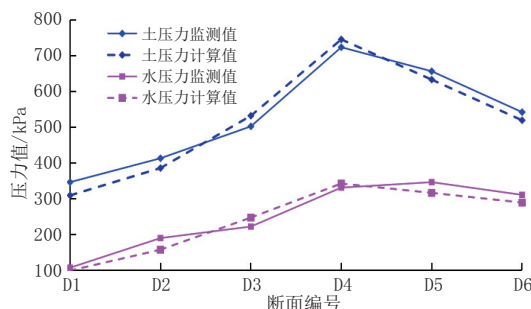


图10 多断面监测结果

由图10可见,6个监测断面的实测压力值与数值模拟压力值变化规律一致,相差也较小,相差最大的是断面D2。这是由于D2为第一个过水断面,水压力值激增,致使其实测数据较大;而后的断面D3、D4所受影响逐渐变小,此情况在实际工程中尤需注意。

由此可见,在进行数值模拟分析时,采用非线性接触模型以及围岩参数的选取是可行、有效的,模型在一定意义上可以反映盾构隧道管片的真实受力情况。

4 结 语

(1)对于大断面盾构衬砌管片而言,压力的分布规律与普通断面相似,但压力值均较大;拱顶土压力与水压力均为最大,同一位置处的压力值波动幅度较小,最大变化幅度为2.7%。因此,施工期间应着重关注隧道拱顶和拱底的受力。

(2)对多个典型断面对比分析时发现,过水断面的水压力激增尤需引起注意。

(3)通过对比有限元模型计算结果与现场实测结果发现,数值模拟分析中采用非线性接触模型以

及围岩参数的选取是可行、有效的。

(4)考虑到大直径海底盾构隧道在施工期间施工和措施的特殊性,其结构设计无固定模板可以参考。本文仅为直径大于10 m的盾构隧道提供参考。

参考文献:

- [1] 陈建芹,冯晓燕,魏怀.中国水下隧道数据统计与分析(截至2023年底)[J].隧道建设(中英文),2024,44(4):826-881.
- [2] 赵斌.汕头湾海底隧道盾构刀具磨损与减磨优化研究[J].铁道建筑技术,2024(6):1-5.
- [3] 董宏振.海底隧道泥水平衡盾构泥膜性能及掘进参数调控方法研究[D].济南:山东交通学院,2024.
- [4] 包小华,袁槐岑,陈湘生,等.水下盾构隧道建造与运维技术研究现状与展望[J].现代隧道技术,2024,61(1):16-35.
- [5] 麻凤海,郑叶琳,王洪亮.大直径海底盾构隧道施工过程中衬砌管片受力分析[J].城市轨道交通研究,2024,27(8):161-165;173.
- [6] 陈一凡,沈翔,陈湘生.海底软弱地层浅埋大直径盾构对接开挖面失稳灾变机制研究[J].隧道建设(中英文),2024,44(4):712-723.
- [7] 尹义豪.基于BIM技术的长距离超大直径湛江湾海底盾构隧道建设一体化管理应用[J].铁道技术标准(中英文),2023,5(12):17-26.
- [8] 郭建磊,吉冰冰,陈雪峰,等.宁波地区复合地层盾构管片上浮影响参数研究[J].安徽建筑,2024,31(11):150-152.
- [9] 杨云强,周惠聪,黄阜.基坑开挖诱发既有隧道管片损伤演变规律研究[J/OL].交通科学与工程,2024:1-8(2024-11-12)[2024-11-20].https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=u3gpgSR0TKdcodaAp9DMMym1XvYZD9pkMNFz6SeDwVmd5AZKXuUr-yxwH7nW90RVIVy_Nf88lanfQTmHmS4TC90lGlrzJKZbxxwBWAFAbgdL6RmU-TElgBxaxFpWqQtqlxJhlFE2pf3IJqabIVujMu6wcJKHMNC_34cCxPQ11FwxYXt6l8c8guUwKvDKkg&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [10] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014(69):46-61.
- [11] FENG X D, JIMENEZ R, ZENG P, et al. Prediction of time dependent tunnel convergences using a Bayesian updating approach[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019(94):103-118.
- [12] 张亚辉,郭唯伟.北京地铁8号线换乘通道下穿盖板河动力特性影响研究[J].建筑安全,2023,38(8):60-64.
- [13] 徐平,黄振磊.富水砂卵石层盾构施工影响因素及敏感性分析[J].工程地质学报,2024,32(5):1787-1797.
- [14] MAY R. Simple mathematical models with very complicated dynamics [J]. Nature, 261(5560):459-467.
- [15] 张亚辉,彭立飞,刘凯,等.基于人工蜂群优化小波神经网络的深基坑开挖对既有盾构隧道变形的预测分析[J].高速铁路技术,2024,15(4):1-7;99.
- [16] 唐雄俊,封坤,肖明清,等.偏心爆炸荷载下盾构隧道结构的动力响应研究[J].土工基础,2024,38(3):449-452.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadfloodbridge@163.com

