

温州深厚软土地层盾构隧道建设的地质风险及控制研究

苏培森

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉//工程师)

摘要 目的:温州地处东海之滨,根据温州市轨道交通既有勘察资料显示,约 60% 区间隧道洞身处于深厚淤泥及淤泥质软土地层中。而当前对深厚软土地层盾构隧道建设经验不足,需开展软土地层盾构隧道建设的地质风险分析并提出控制措施。方法:通过查阅和分析既有研究成果,探讨了软土地层盾构隧道建设的研究现状,在此基础上结合温州软土既有工程勘察实践,总结了其工程力学特性,借助有限元软件分析了隧道衬砌结构的受力特点,并基于软土盾构隧道病害的不利因素分析,进而提出风险控制措施。结果及结论:从温州深厚软土的工程力学特性和隧道衬砌结构受力特点出发,分析总结了深厚软土地层盾构隧道建设的地质风险,提出了以扰动控制为核心的相关控制措施,以供温州轨道交通及其他深厚软土地层盾构隧道建设。

关键词 软土地层;盾构隧道;地质风险;风险控制

中图分类号 U456

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.12.035

Geological Risk Analysis and Control Study for Shield Tunnel Construction in Deep-thick Soft Soil Stratum in Wenzhou

SU Peisen

Abstract Objective: Located on the coast of the East China Sea, Wenzhou, based on existing survey data for Wenzhou rail transit, it is revealed that approximately 60% of the tunnel sections are situated in deep, thick muddy and silty soft soil layers. Given the limited experience in constructing shield tunnels in deep-thick soft soil stratum, there is a need to conduct a geological risk analysis for tunnel construction in soft soil stratum and propose effective control measures. Method: By reviewing and analyzing existing research findings, the current research status of shield tunnel construction in soft soil stratum is explored. Building upon this foundation and combining it with practical engineering survey practices in the soft soil in Wenzhou, the engineering mechanical characteristics are summarized and the stress characteristics of tunnel lining structure is analyzed utilizing finite element software. Risk control

measures are proposed based on the analysis of adverse factors leading to soft soil shield tunnel diseases. Result & Conclusion: Taking into account the engineering mechanical characteristics of deep-thick soft soil in Wenzhou and the stress characteristics of tunnel lining structures, the geological risks associated with shield tunnel construction in deep-thick soft soil layers are analyzed and summarized. Relevant control measures centered on disturbance control are proposed for the construction of Wenzhou rail transit and other shield tunnels in deep-thick soft soil stratum.

Key words soft soil stratum; shield tunnel; geological risk; risk control

Author's address China Railway Siyuan Survey and Design group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China

根据温州市城市轨道交通建设规划,温州市将采用“市域铁路+地铁”的双层线网结构,远期线网将由市域线和地铁线路构成。鉴于温州软土分布较广,温州市域线 S1 线区间结构主要采用高架形式,部分采用明挖法隧道;温州市域线 S2 线除穿越瓯江段采用盾构法隧道外,区间结构主要采用高架形式。对于从城市主城区穿越的地铁线路,若采用明挖法或是高架结构会对周边环境和景观造成较大影响。因此,需在深厚软土地层中建设盾构隧道,鉴于当前深厚软土地层盾构隧道建设经验不足,有必要对深厚软土地层盾构隧道建设的地质风险及控制措施开展相关研究。

1 对既有软土盾构隧道的研究现状

在城市地铁隧道建设中,由于盾构法隧道施工的地层变形易于控制,对周边建筑物的扰动影响小,施工工效高,已被得到广泛的运用;尤其是在第四纪地层、无侧限抗压强度中等偏低的地层及软岩隧道中,盾构法具有很强的适应性^[1]。然而,在软土地区,越来越多已建成的盾构隧道在运营过程中

出现结构渗漏水、局部破损、收敛变形超限、沉降及差异沉降大等问题^[2]。因此,软土盾构隧道已得到越来越多的关注和研究。

通过查阅文献,不难发现软土盾构隧道的主要研究手段有理论手段、数值分析、模型试验和现场实测等,涵盖的领域有软土盾构隧道衬砌结构变形力学特性、软土盾构隧道运营列车对地层的动力作用、软土盾构隧道的纵向沉降规律研究及软土盾构隧道结构病害整治等。

在软土盾构隧道衬砌结构变形及力学特性方面,学者们研究主要集中在特殊工况或特殊施工工艺下的盾构隧道衬砌结构的变形力学行为。特殊工况,如考虑渗漏条件下盾构隧道结构及围岩的变形破坏规律、地表超载、卸载作用下盾构隧道变形破坏规律和水土压力综合作用下的盾构隧道变形破坏规律;特殊工艺,如机械法联络通道施工对隧道衬砌结构的力学影响分析、地震作用下的软土盾构隧道衬砌结构变形破坏规律等^[3-4]。

在软土盾构隧道运营阶段列车对地层的动力效应方面,学者的研究主要集中在2处:一是通过现场实测,掌握运营列车的动荷载规律及动荷载的影响范围;二是通过埋设传感器,掌握围岩及周边构筑物对列车荷载的响应规律,研究振动传播特性,力求对振动干扰进行控制^[5-6]。

学者对软土盾构隧道沉降规律的研究,主要是针对软土盾构隧道的纵向沉降规律开展研究,主要集中在软土盾构隧道的沉降机理研究、施工阶段及运营阶段盾构隧道沉降规律研究,在此基础上通过相关模型对软土盾构隧道的沉降进行预测^[7-8]。

目前,软土盾构隧道变形控制及病害整治方面,洞外有微扰动注浆技术,洞内常常采用内张钢圈、拱顶粘贴芳纶布等纤维材料、复合腔体加固隧道等^[9-10]。

尽管学者们对软土盾构隧道已开展多方面的研究并取得了丰硕的成果,然而温州既有勘察资料显示,温州地铁穿越的地层主要为淤泥及淤泥质软土,软土厚度一般为20~35 m,最厚可达52 m,已超出过去的经验。温州地铁建设的软土地质环境凸显“深厚”的特点,深厚软土地区盾构隧道建设经验匮乏,使得盾构隧道建设面临更大风险,为此,对深厚软土盾构隧道地质风险分析和控制进行研究较为紧迫。

2 深厚软土地层盾构隧道建设的地质风险分析

2.1 温州软土物理力学性质

根据温州既有工程和轨道交通建设规划阶段的勘察钻孔资料显示,温州软土的土粒比重分布在2.5~2.8之间;埋深在24 m以上软土含水率高达70%,塑限为29%~45%,液限为50%~70%;埋深在12 m以上的软土处于流塑或是接近流塑状态、地铁穿越的主要区域10~30 m范围地层处于软塑或可塑状态;土体无侧限抗压强度为40~60 kPa,压缩模量 E_s 在0.8~3.0 MPa之间;固结快剪强度参数 c 值约为8~10 kPa,内摩擦角 ϕ 值为10°~12°;温州软土呈现出高含水率、高压缩性、强度低等性质,此外还具有较高灵敏度特征。

2.2 温州深厚软土地层盾构隧道建设的地质风险分析

2.2.1 盾构隧道施工期风险分析

深厚软土地层盾构隧道底部的地层承载力小,加上盾构隧道在修建时不可避免地对地层产生扰动,较其强度和刚度又进一步大大降低;同时盾构机土仓重量大,在荷载大、承载力低双重不利因素作用下,盾构机会出现“栽头”的潜在风险,进而影响盾构姿态控制,使得盾构在掘进过程中出现“蛇形”状态,这一过程进又将反过来加剧地层的扰动。

此外,盾构隧道上覆的软土地层在扰动后会表现出沉降大和沉降收敛难以控制等特征。根据一般盾构隧道施工期的沉降规律,当盾构盾尾离开开挖面3~5倍洞径时,上覆地层的沉降会趋于稳定;在温州高含水率和高压缩特性的地层中,盾构上覆地层会具有较长收敛时间、沉降值大等特点,从而不利于控制对周边环境的影响。

2.2.2 盾构隧道衬砌结构受力特点分析

在软土盾构隧道结构设计中,结构配筋通常受裂缝宽度控制。针对深厚淤泥地层,按设计初步选定的盾构隧道外径6.7 m、内径5.9 m衬砌环结构,对埋深为10.0 m、15.0 m、20.0 m盾构隧道分析准永久组合工况,借助荷载-结构模型开展有限元分析。计算结果如表1所示,衬砌结构内力分布规律如图1—图3所示。

由表1可知:在淤泥地层中,随着埋深的增加,结构内力不断增大,偏心距也不断增大,对于承压性能较好的钢筋混凝土衬砌结构,深埋隧道结构本

表 1 不同埋深隧道衬砌结构计算结果

Tab. 1 Calculation results of tunnel lining structure of with different buried depths

覆土深度/m	最大正弯矩/(kNm)	最大负弯矩/(kNm)	最大剪力/kN	最大轴力/kN	收敛值/mm	偏心距/m
10	173	-149	96	908	5.4	0.19
15	266	-234	144	1 256	6.6	0.21
20	414	-375	227	1 605	9.2	0.26

注：“-”表示管片外部受拉；“+”表示管片内侧受拉。

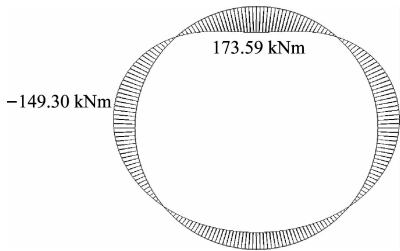


图 1 衬砌结构弯矩分布规律

Fig. 1 Distribution law of bending moment of lining structure

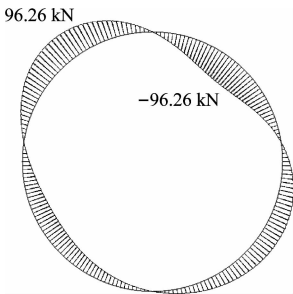


图 2 衬砌结构剪力分布规律

Fig. 2 Distribution law of shear force of lining structure

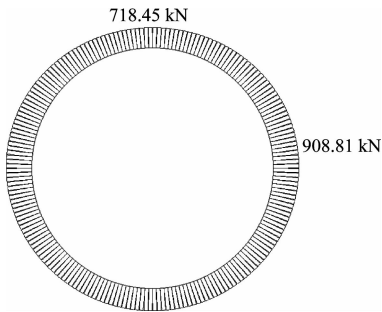


图 3 衬砌结构轴力分布规律

Fig. 3 Distribution law of axial force of lining structure

体受力较为不利,风险较高。

由图 1—图 3 中的衬砌结构内力分布规律可知:拱顶处正弯矩最大,管片内侧受拉,外侧受压,这对于拱顶衬砌接缝防水有利;而拱腰处负弯矩最大,管片外侧受拉张开,对于接缝防水不利,收敛变形过大,拱腰位置易出现渗漏水风险;管片剪力最大发生在与竖向中轴线成 45° 夹角位置处,对控制

裂缝扩展和脆性破坏不利。

2.3 盾构隧道运营期风险分析

由于温州软土含水率高、渗透系数小,呈现出压缩性高和较强的蠕变特性。盾构隧道运营过程中,在列车不断的动荷载作用下,隧底软土完成固结时间周期长,由于软土受结构性扰动范围更大,受附加应力影响的地层深度大,依据“分层总和法”原理,最终使得沉降达到稳定的时间长、沉降值大。

根据既有盾构隧道沉降机理可知,周边环境施工扰动如基坑开挖、降水和堆卸载等是影响盾构隧道沉降或差异沉降的重要因素。温州软土强度低,结构性扰动强,对周边环境施工扰动更敏感,盾构隧道保护红线范围较其他盾构隧道的保护红线应更大;但城市的可供开发的空间资源有限,大范围的保护红线与城市的建设发展是矛盾的,且地铁沿线土地资源往往具有更高的开发价值。在此情况下,临近施工问题不可避免,从而导致沉降控制难度大。

2.4 深厚软土地层盾构隧道的建设风险控制

盾构隧道施工期扰动、运营期列车荷载扰动以及远期城市建设过程中地铁沿线临近工程施工扰动是软土盾构隧道风险产生的重要因素,为此提出以扰动控制为核心的策略,具体措施如下:

1) 通过深层地层加固改善温州深厚软土地层盾构隧道的岩土环境。通过地基加固,改善围岩的物理力学特性,提高地层的强度和刚度,增强地层的抗扰动能力。

2) 线路选线时应优化线路线性条件,线路线性差将增强运营过程中列车轮轨相互作用,增大列车振动荷载幅值,在较大的动偏应力作用下,深厚软土地层的压缩量更大,最终导致隧道结构的沉降值大。

3) 优化盾构隧道衬砌结构和接头形式,提高衬砌管片和接头的抗变形能力与抗渗能力,保持相对稳定的岩土边界条件。隧道衬砌结构是盾构隧道的主要受力构件,也是岩土环境的重要边界条件,结构在受力过程中若收敛变形大,将直接带动上覆地层的整体竖向位移;管片接头抗变形能力弱,接头张开量大,在高水头作用下,将发生渗漏,从而加剧地层的固结沉降。

4) 优化盾构选型,选择与深厚软土地层相匹配的盾构机,施工时通过盾构试掘进,优化盾构施工参数,以减小施工阶段的扰动。

5) 加强地铁红线保护管控,临近施工工程应提前报备给地铁管理部门,应充分分析临近工程施工对地铁隧道的影响,提出相关工程措施,将临近工程施工对既有地铁盾构隧道的影响降到最小。

6) 做好运营期盾构隧道的长期监测,建立完备的运营维保方案。除了对隧道结构的收敛变形、沉降等进行常规性监测外,还需通过埋设传感器对深部土体位移、孔隙水压力及作用在结构上的土压力等进行监测,一方面可以通过监测数据判断结构的健康状态,以便及时采取控制措施,另一方面通过监测数据反馈,可完善和验证既有相关理论,进一步指导优化设计和施工。

3 结语

本研究基于温州深厚软土地层的工程力学特性,在总结分析既有研究成果的基础上,对温州深厚软土地层盾构隧道施工期和运营过程中的地质风险及结构的受力特点进行了分析,提出了以扰动控制为核心的相关措施,主要结论如下:

1) 温州软土具有含水率高、压缩性强、结构性扰动强、无侧向抗压强度低和抗剪强度低等特点,易被扰动,其力学特性是盾构隧道建设风险来源的重要因素,提前对盾构扰动范围内的地层进行加固、改善地层的抗扰动能力,有利于风险控制。

2) 优化地铁线路线性和砌管片结构及接头设计,提高结构及接头刚度,减小变形和接头的张开量,以保持岩土环境边界条件的相对稳定性。

3) 优化盾构选型和盾构掘进施工参数,降低施工期隧道开挖对周边环境的扰动;由于温州软土地层的结构性扰动强,使其更易于受到临近工程的施工扰动,运营期应严格管控地铁保护红线范围内的临近工程建设,以减少对既有地铁的影响。

4) 做好监控量测,不仅要隧道衬砌结构沉降、收敛等进行长期监测,还需对与岩土环境稳定性密切相关的参数进行监控,用以反馈验证和指导实践。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of metro: GB 50157—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [2] 李家平. 软土地区轨道交通盾构隧道运营期纵向沉降规律研

究[J]. 地下工程与隧道, 2016(1): 18.

LI Jiaping. Study on regulation of longitudinal settlement of rail transit shield tunnel in soft soil [J]. Underground Engineering and Tunnels, 2016(1): 18.

- [3] 朱瑶宏, 夏杨于雨, 董子博, 等. 通用环错缝拼装盾构隧道结构设计计算参数研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(4): 114.
ZHU Yaohong, XIA Yangyuyu, DONG Zibo, et al. Calculation parameters of a shield tunnel structure with a staggered segmental tunnel lining [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(4): 114.
- [4] 朱瑶宏, 高一民, 董子博, 等. 盾构法 T 接隧道结构受力足尺试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(1): 9.
ZHU Yaohong, GAO Yimin, DONG Zibo, et al. Full-scale experimental study on structural mechanism of T-connected tunnel constructed by shield method [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(1): 9.
- [5] 韦凯, 翟婉明, 肖军华. 软土地基不均匀沉降对地铁盾构隧道随机振动的影响分析[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(2): 38.
WEI Kai, ZHAI Wanming, XIAO Junhua. Influence of uneven settlement of soft soil foundation on random vibration of subway shield tunnel [J]. China Railway Science, 2014, 35(2): 38.
- [6] 黄强, 刘干斌, 万灵, 等. 地铁列车运行时引起的隧道内振动荷载研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(5): 1209.
HUANG Qiang, LIU Ganbin, WAN Ling, et al. Analysis of metro vibration load excited on the tunnel induced by moving trains [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(5): 1209.
- [7] 郑军, 余才高, 阎长虹, 等. 南京地铁运营隧道变形的工程地质机理研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(1): 199.
ZHENG Jun, SHE Caigao, YAN Changhong, et al. Engineering geological mechanism on deformation of Nanjing metro tunnel in operating [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(1): 199.
- [8] 杨兵明. 软土地层盾构隧道长期沉降规律及预测研究[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(11): 87.
YANG Bingming. Research on the law and prediction of long-term settlement of shield tunnel in soft soil stratum [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(11): 87.
- [9] 王婉娇. 软土地区已建地铁盾构隧道变形影响及控制措施研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
WANG Wanjiao. Study on the deformation of existing metro shield tunnel in soft soil and the controlling techniques [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [10] 柳献, 张乐乐, 李刚, 等. 复合腔体加固盾构隧道衬砌力学行为的宏观分析模型[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(5): 78.
LIU Xian, ZHANG Lele, LI Gang, et al. A macroscopic analysis model for the mechanical behaviors of a shield tunnel segment lining reinforced with a composite cavity [J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(5): 78.

(收稿日期: 2021-08-31)