

隔离桩在大直径盾构浅覆土穿越高铁桥墩的效果分析

于朋臣

中铁十四局集团大盾构工程有限公司

摘要：桐泾路北延工程盾构施工是使用大直径泥水平衡盾构机在短距离内连续下穿万顺楼、敕建报恩禅寺、山塘河、沪宁城际高铁、京沪铁路、北环快速路等风险源，穿越的地层复杂多变，具有多种地质形态，且分布不均，盾构区间全程覆土厚度较浅，盾构掘进过程中极易造成涌水、击穿、坍塌等事故。穿越沪宁城际高铁、京沪铁路，要求对穿越高铁期间累计沉降不能超过2mm，对施工标准要求极高。桐泾路北延工程盾构施工的双线顺利完工，其对大直径盾构下穿高铁时隔离桩施工对高铁桥墩的影响进行分析研究，积累施工经验对类似工程有极大借鉴意义。

关键词：大直径泥水盾构；超浅覆土；穿越高铁；隔离桩；沉降控制

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2021.24.075

引言

近年来，随着建设科技日新月异的发展，地下隧道施工越发普遍，盾构法是逐渐成了隧道施工的主要方法，其施工效率高，施工效果好，安全性能强。泥水盾构施工是盾构法中较为常见的模式之一，泥水盾构是指在盾构开挖面的密封仓内注入预制好的泥浆，通过气垫仓气体对泥水加压使其与外部压力保持平衡，以保证开挖面土体的稳定。盾构推进时开挖下来的渣土进入盾体前方开挖仓，使用搅拌装置进行搅拌，搅拌后通过泥浆携渣用泥水泵送到地面泥水厂，泥水在地面泥水厂使用泥水分离设备进行分离，然后部分可继续使用的泥浆再次进入盾构机开挖仓内，循环使用。

大直径泥水盾构在覆土埋深浅的情况下，地层自稳能力差，盾构推进时对土体轻微扰动或压力控制不当极易造成地面隆起或沉降，区间隧道下穿万顺楼、敕建报恩禅寺、山塘河、沪宁城际高铁、京沪铁路、北环快速路等风险源，对沉降要求标准高，沪宁城际高铁超过2mm的沉降会造成整个铁路运行线的紧急停车，影响极大。所以施工过程中的精准控制施工参数，稳定的切口压力，及时的克泥效跟进、饱满的同步注浆量以及二次注浆等措施控制地面沉降，才能保证盾构施工平稳推进，顺利接收。

一、工程概述

桐泾路北延项目起于西塘河南岸，先以明挖隧道形式穿越清塘路，之后采用盾构隧道下穿山塘河、沪宁高铁、京沪铁路和北环快速路，随后再以明挖隧道形式与

现状桐泾路顺接。道路实施长度1753.27m。包括北侧盾构工作井（始发井）及明挖段（长476m）、盾构段（长490m）、南侧盾构工作井（接收井）及明挖段（长787.27m）。

其中盾构隧道在490米范围内连续穿越复杂构筑物，盾构始发后15米下穿万顺楼及老旧房屋建筑群，70米侧穿报恩禅寺，118m下穿山塘河，307m下穿沪宁城际高铁，355m下穿京沪铁路，393m下穿北环快速路，之后到达南侧工作井接收段。盾构区间全程覆土厚度最浅处6.47m（0.49倍洞径），最深处13.15米（0.99倍洞径），山塘河处覆土7.1m（0.55倍洞径）隧道采用泥水平衡式盾构机开挖直径13.67m，管片外径13.25m，内径12.05m，采用C50P12钢筋混凝土预制管片，环宽2m。区间隧道地层主要为粉砂、粉质黏土、黏土地层，地层自稳性差。

二、盾构穿越涉铁施工控制措施

盾构施工过程中，掘进参数的设定是重中之重，是盾构掘进施工进度和地面沉降控制得以保证的前提，在穿越高铁、普铁施工过程中参数指令尤为重要，本文着重分析穿越高铁时参数计算。

（一）切口水压设定

本工程盾构隧道下穿京沪铁路覆土厚度9.23-10.84m。隧道上部为杂填土、素填土、黏土、粉质黏土、粉土，隧道断面以③层粉砂、④层粉质黏土、⑤层黏土、⑤1层粉质黏土地层为主，地质较为软弱。

切口水压上限值：

$$P_{上} = P_1 + P_2 + P_3$$

$$= \gamma_w \times h + K_0 \times [(\gamma - \gamma_w) \times h + \gamma \times (H - h)]$$

$P_{上}$ ：气泡仓水压上限值（kPa）；

P_1 ：地下水压力（kPa）；

P_2 ：静止土压力（kPa）；

P_3 ：变动土压力，一般取20kPa；

K_0 ：静止土压力系数，本次施工取0.45

γ_w ：水的溶重（kN/m³）；

H ：隧道埋深（m）（至隧道中心）；

γ ：土的溶重（kN/m³）；

h ：地下水位以下覆土厚度（m）（至隧道中心）；

切口水压下限值：

$$P_{下} = P_1 + P'_2 + P_3$$

$$= \gamma_w \times h + K_a \times [(\gamma - \gamma_w) \times h + \gamma \times (H - h)] - 2 \times C_u \times \text{sqr}(K_a)$$

- P下: 气泡仓水压下限值 (kPa) ;
- P2: 主动土压力 (kPa) ;
- Ka: 主动土压力系数, 本次施工取0.65;
- Cu: 土的凝聚力 (kPa) 。

综合考虑京沪铁路上方行车产生的动荷载, 在下穿铁路期间将掘进切口压力设定为0.9-1.2bar。

(二) 掘进速度设定

盾构掘进理论切削量为:

$V = \pi r^2 h$ ($=3.14 \times 6.835^2 \times 2$) 即理论切削量为293m³

$$\int (Q_{slurry} - K2) \times \frac{(\rho_{slurry} - K2 - \rho_{water})}{(\rho_{solid} - \rho_{water})} \times \left(\frac{\rho_{solid}}{2.13} \right) \times \delta - \int Q_{feed} \frac{(\rho_{feed} - \rho_{water})}{(\rho_{solid} - \rho_{water})} \times \delta$$

Vactual: 推进状态下的开挖体积实际值, m³

Qslurry: 排浆流量, m³/h;

Qfeed: 进浆流量, m³/h;

ρ_{slurry} : 排浆密度, t/m³;

ρ_{feed} : 进浆密度, t/m³;

ρ_{solid} : 地层物性颗粒密度, t/m³; ρ_{water} : 水的密度, 此处取 1, t/m³; δt : 从推进开始到推进结束之间的时间, h;

K2: 流量传感器校准值;

K5: 密度传感器校准值;

根据目前地质情况, 开挖区间地质主要由粉砂、黏土组成, 排浆流量设置在2100m³/h, 进浆流量设置在1950m³/h可以更好的将开挖仓内渣土排出, 若排浆流量设置偏小, 会导致开挖仓内渣土滞排, 造成切口压力波动, 不利于地表沉降控制; 排浆流量设置偏大, 会导致开挖仓渣土超挖, 也不利于地表沉降控制。

由开挖体积公式可得, 理论推进时间为2.2h, 即推进速度为15mm/min。

(三) 掘削量的控制

盾构掘进理论切削量为: $V = \pi r^2 h$

即理论切削量为293m³

盾构掘进实际掘削量VR可由下式计算得到:

$$VR = (Q1 - Q0) \times t$$

VR: 实际掘削量 (kN/Ring); Q1: 排泥流量 (m³/min);

Q0: 送泥流量 (m³/min); t: 掘削时间 (min) 。

当发现掘削量过大时, 应立即检查泥水密度、黏度和切口水压。此外, 也可以利用探查装置, 调查土体坍塌情况, 在查明原因后应及时调整有关参数, 确保开挖面稳定。

(四) 同步注浆与克泥效的注入

盾构机推进过程中呈现先隆起后沉降的变化规律,

采取沉降数据加密观测措施, 严格控制同步注浆, 保证同步注浆数量每环约22方, 填充率到达130%, 盾体上方监测数据发生变化后在刀盘切口与盾尾之间盾体上方间隙在推进过程中增加注入1-1.5方克泥效填充其间隙保证盾壳上方土体稳定。

(五) 抗浮验算

盾构隧道埋深较浅时, 在地下水浮力的作用下结构可能失稳。因此对上部覆土厚度最小段进行抗浮验算。

本计算采用假设管片上部覆土高度验算管片的抗浮是否满足要求, 假设管片的抗浮需要上部的覆土高度为h, 取1m宽度验算管片的抗浮。

$$\text{管片承受的浮力 } F_{\text{浮}} = \rho_{\text{水}} g V_{\text{排}}$$

$$= 1.0 \cdot 10 \cdot \pi \cdot 6.625^2 = 1378.86 \text{KN}$$

$$\text{管片自重 } G_{\text{管}} = \gamma_{\text{管}} V = 25 \cdot \pi \cdot (6.625^2 - 6.025^2) = 596.12 \text{KN}$$

管片上部覆土重量为

$$G_{\text{土}} = \rho_{\text{覆土}} g h b = 9 \cdot 13.25 h = 119.25 h \text{ (KN)} \quad (\rho_{\text{覆土}} \text{取 } 0.9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3)$$

考虑到抗浮安全系数大于1.1, 则 $G_{\text{管}} + G_{\text{土}} \geq 1.1 F_{\text{浮}}$, 计算得h=6.56m, 则隧道结构覆土6.56m即可满足抗浮要求。

本区间范围内隧道结构的覆土厚度均大于6.56m, 抗浮满足。

(六) 低净空全套管隔离桩施工

在盾构隧道下穿沪宁城际铁路施工期间, 为确保安全, 使盾构隧道对既有京沪铁路桥梁的影响降低到最低, 在盾构隧道下穿既有沪宁城际铁路影响区段(既有铁路中心线两侧各20m)内, 采用洞外隔离桩(低净空全套管回旋灌注桩和普通隔离桩)+MJS法加固+地表纵横梁的防护措施, 设计全套管灌注桩4*18=72根。

低净空全套管灌注桩主要用于盾构隧道穿越沪宁城际铁路时, 位于高铁桥梁梁底以下部分低净空隔离桩。桩基采用C30微膨胀混凝土灌注, 桩径1.0m, 桩长30m, 采用钢套管护壁, 壁厚20mm, 每节长2.2m, 各节间采用焊接连接, 钢套管一直到桩底标高处, 永久埋设。桩净间距20cm。

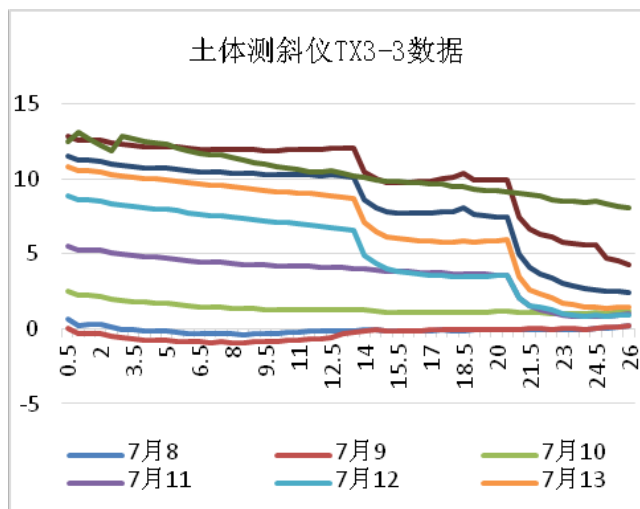
桩顶浇筑120cm*80cm的钢筋混凝土纵横梁, 提高各桩的整体性。纵横梁与防护桩钢筋连接, 横梁每间隔每两个桩设置一道, 纵梁贯通设置, 采用C30混凝土浇筑。纵横梁与桩顶预留钢筋浇筑一体。

三、盾构穿越对桥桩的影响分析

(一) 沪宁城际高铁沉降监测点布置及分析

沪宁城际高铁位置沉降监测点布置图如下: 根据穿越高铁桥墩监测报告显示大累计沉降为0.6mm。

表1 土体测斜数据监测表

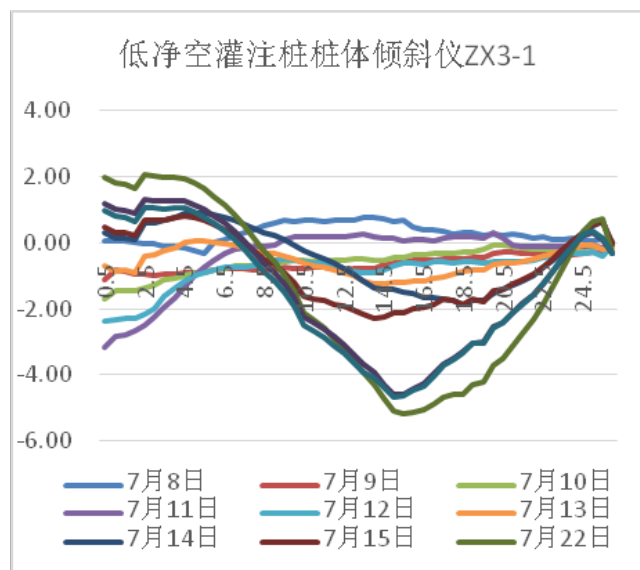


数据分析：该点距离东侧灌注桩距离6米处在154环管片位置，盾构机7月10日掘进第147环，刀盘切口位置位于151环，随后7月10日完成148、149、150、151环，7月11日完成152至155环。

刀盘切口位置对土体扰动较为明显，7月12日完成156环至159环，此时154环盾尾已脱出，从数据中看出同步注浆与二次注浆对土体仍有部分影响。7月13日到7月22日变化较小趋于平稳。

高铁范围内桩体测斜（ZX3-1）监测报表倾斜仪数据：

表2 低净空灌注桩桩体倾斜表



数据分析：桩体倾斜ZX3-1位于163环管片位置，覆土埋深10.91米，盾构机于7月11日完成152至155环，7月12日完成156环至159环，刀盘

切口位置到达该点，7月13日完成160环至163环，7月16日完成168环。

由图表中倾斜仪数据可得出在盾构推进切口位置，因对切口压力调整降低0.1，所以桩体有稍微向坑内移动，在推进过程经过该点时刀盘中心偏上位置（中心约17米）桩体倾斜较为明显，且向坑外移动，最大倾斜量为-2.29mm。后续盾构穿越后，同步注浆与二次注浆的注入对桩体产生一定影响，7月22至8月5号数据显示最大位移量到达-5mm。

四、总结

桐泾路北延工程以大直径泥水盾构浅覆土顺利穿越两次高铁、普铁风险源，沉降均在控制范围内，其中沪宁城际高铁沉降要求在2mm以内，最终以累计沉降0.6mm成功穿越。其盾构施工前的低净空全套管灌注隔离桩以及MJS加固效果明显；隔离桩起到良好的作业。盾构施工过程中的测量点尤其对高铁位置的地表、灌注桩内倾斜、土体倾斜、智能桥墩监测以全方位布设，建立信息共享制度，更快速便捷的实时沟通地面与井下调整参数，减少对运营高铁的影响，确保施工安全、稳定、可靠；对掘进参数的控制使得盾构机在盾构掘进过程中减少对土体的影响，控制地表沉降；二次注浆与克泥效的注入能快速稳固管片及盾体上方土体，保证整个盾构施工工程顺利平稳完成。

参考文献

- [1]张健.地铁盾构区间下穿城际铁路桥梁结构及轨道变形分析和控制措施研究.北京:北京交通大学, 2008.
- [2]王德中.傅德明.大直径盾构隧道与城市轨道交通工程技术.上海:同济大学出版社, 2005
- [3]方华昌,赵东平,李栋,王卢伟,王德勇.砂卵石地层盾构始发下穿管线群加固方案比选研究[J].现代隧道技术, 2021, 58(S1):277-284.
- [4]宋建学,郝凌霄,师刚,张澄玄.盾构隧道施工对柔性地下管线的影响预测及分析[J].施工技术(中英文), 2021, 50(19):1-5.
- [5]周绍宾,郭佳奇,徐冲.盾构隧道下穿交叉市政管线地表沉降分析与控制[J].城市轨道交通研究, 2021, 24(08):41-46.
- [6]傅德明,周文波.土压盾构技术在我国地铁隧道工程中的应用和发展[J].岩石力学与工程学报, 2015, 23(S2):4888-4892.
- [7]庄唯,傅德明.土压平衡盾构技术在地铁隧道工程中的应用和发展[J].中国市政工程, 2016(4):51-52.