

地下综合管廊顶管施工对下伏地铁隧道变形影响分析

张冬冬

江苏省纺织工业设计研究院有限公司苏州勘察分公司

摘要：某城市地下综合管廊以矩形双线平行顶管形式顶进，双线顶管相距1.5米；顶管顶距地面4.1米，顶管底距下伏隧道顶2.7米。顶管位置相邻、顶管与隧道相近使双线顶管附加应力重叠；双线顶管的同向顶进又使下方隧道重复受到相同应力挤压；但双线顶管不符合修正Peck公式所界定的近距离，在应力重叠区，使地铁隧道各项位移呈现复杂性。本文结合双线顶管施工过程中地铁隧道各项变形监测结果，从隧道管片结构、工程地质、水文地质原理及工程卸荷加载方面深入分析双线顶管对下伏地铁隧道变形影响；并对顶管设计施工中须注意的问题做相关建议。

关键词：双线顶管顶进施工；下伏地铁隧道变形影响；卸载

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.22.048

一、工程概况

某城市地下综合管廊上跨运营地铁隧道施工，设计采用钢筋混凝土顶管施工，双线平行布置方案，管廊单线断面为6.9×4.2m的矩形，两管廊净间距1.5m。管廊顶管段总长73.6m，自东向西顶进施工，先实施北侧顶管，后实施南侧顶管，两平行管廊中心线与下伏运营地铁隧道中心线平面夹角为102°30'；管廊顶面至地表

约4.1m，底面距地铁隧道顶净距2.7m；顶管以0.27%的坡比从东端工作井始发，先后跨越地铁隧道上下行线，进入西接收井；每段管节规格为6.9×4.2×1.5m，壁厚0.5m；双线顶管施工共用同一始发井和接收井。顶管施工期间地铁正常运营，地面城市主干路正常通行。

二、地铁隧道监测点布置与监测系统

顶管施工对地铁隧道变形影响监测方法采用自动化监测，监测布点按《城市地铁隧道交通工程监测技术规范》和《江苏省城市地铁隧道交通工程监测规程》^[1]要求布设在地铁隧道内；监测断面布置：对地铁隧道上、下行线按顶管影响大小设置强弱影响区。强、弱影响区交界处增设差异沉降断面一组，总监测断面共有17组，每组断面设10个监测点；（顶管断面与地铁隧道断面之间有约13°小夹角）；

自动化监测系统主要包括测量设备，传输设备和远程控制设备。监测技术要求执行《城市地铁隧道交通工程测量规范》^[2]；

三、场地工程地质与水文地质条件

（一）场地工程地质

本工程所处场地顶管及隧道深度影响范围有9个工程地质层，各土层物理力学参数见表1，顶管位于3层粉质黏土至5层粉质黏土夹粉土层中。

表1 各原状土层物理力学参数一览表

层号	土层名称	固结快剪		三轴UU		三轴CU		压缩模量	
		C _q (Kpa)	φ _q (Kpa)	C _{uu} (Kpa)	φ _{uu} (°)	C _{cu}	φ _{cu}	E _s	
3	粉质黏土	34.7	15.1					7.4	
4	黏土	47.9	15.3	58.1	0.8	55.2	14.2	7.7	
5	粉质黏土夹粉土	26.7	19.0	31.4	0.6	29.0	16.4	6.7	
6-1	粉砂夹粉土	5.6	28.4			11.2	24.6	7.7	
6-2	粉砂	3.9	32.9			11.6	25.0	9.8	
7	粉质黏土	30.0	17.4	31.3	0.6	35.7	17.4	6.3	
8	黏土	50.4	12.3					7.9	

（二）场地水文地质

场地内对顶管施工有影响的地下水有二层：

（1）潜水，相应水位标高1.32-1.98m；（2）微承压水，相应水位标高0.3-0.8m。

四、双线矩形顶管影响范围

（一）双线矩形顶管近距离界定的探讨

根据浙江大学魏纲研究^[4]，采用相对水平距离系数公式 $C=L/(h+R) \leq 0.66$ ，（其中，L为两顶管中心距，h为顶管中心至地面距离，R为圆形顶管半径）来界定圆形顶管是否为近距离，考虑到本工程为矩形顶管，R采

用等效圆半径 $R=\sqrt{S/\pi}$ ，（S为顶管截面积），则 $C=0.91$ ，大于0.66，说明本项目矩形顶管并不符合上述隧道近距离界定，这主要因为上述公式中，影响C值大小的除了L以外，h也是一个关键因素。当顶管离地面较近，h值偏小，使C值增大，同时矩形顶管断面不同于圆形断面，存在角沿应力放大和尖稍的效应，不能简单采用修正的Peck公式计算双线顶管中轴线深部土体沉降，而顶管机通过后由于管内排土卸载、浮力及隧道内运营列车的循环动力的综合作用，其隧道变形也就不符合似正态曲线分布形态。

(二) 顶管对下伏地铁隧道影响范围分析

本场地粉质黏土夹粉土压缩模量 $E_1=6.7\text{Mpa}$ ，粉砂土压缩模量 $E_2=9.8\text{Mpa}$ ；忽略机头顶进时段对周围土层有加载效应外，随后顶管段因排土卸载，相当于地铁隧道对顶管段土层反向加载，由此可以确定顶管施工对地铁隧道地铁影响范围：

①沿顶管的影响范围：以地铁隧道中心线至顶管底面作为压力扩散竖向距离， $Z/b=5.8/17.9=0.32 < 0.5$ ，下部土层与上部土层压缩模量比，即刚度比 $E_{下}/E_{上}=9.8/6.7=1.46 < 3$ ；查《建筑地基基础设计规范》^[3]5.2.7款，得压力扩散角 $\theta \approx 7.3^\circ$ ，按此扩散角计算沿顶管纵向影响范围为： $L1 \approx 19.4\text{m}$ ；若按74版地基基础规范建议值取 $\theta \approx 22^\circ$ ，则 $L1 \approx 22.6\text{m}$ ；

②沿地铁隧道的影响范围：以地铁隧道底部至顶管底面作为压力扩散竖向距离，则 $Z/b=8.8/15.3=0.58 > 0.50$ ，土层刚度比不变，得压力扩散角 $\theta \approx 15^\circ$ ，按此扩散角计算沿地铁隧道纵向影响范围为： $L2=20.0\text{m}$ ，按74版地基基础规范建议值取 $\theta \approx 22^\circ$ ，则 $L2 \approx 22.4\text{m}$ ；

综合考虑顶管涉及土层简化、机头附加推力、管片摩阻力、后部管段卸载等因素影响，本文认为取压力扩散角 $\theta = 30^\circ$ 较为合适，顶管施工对下伏地铁隧道影响范围见下图4所示。

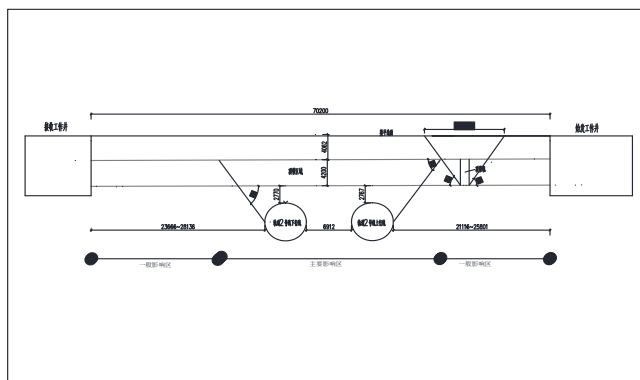


图4 顶管施工与地铁隧道相互影响范围

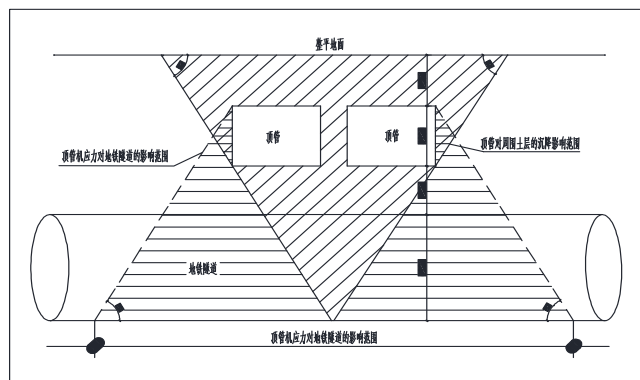


图5 双线顶管施工应力与沉降影响范围

五、顶管施工过程地铁隧道监测数据变形特点

(一) 双线顶管对地铁隧道水平位移影响及特点

本工程顶管纵轴线与地铁隧道中心线大致相互垂直，南北顶管均由东向西施顶。地铁隧道监测点水平位

移数据基本为负（均以向轨道内侧位移为正），这是顶进时附加应力对地铁隧道水平挤压方向一致，导致地铁隧道向西位移的主因。北顶管施工隧道水平位移大致过程与南顶管相近。但北顶管顶进过程中北顶管下方的隧道水平位移继续增大。

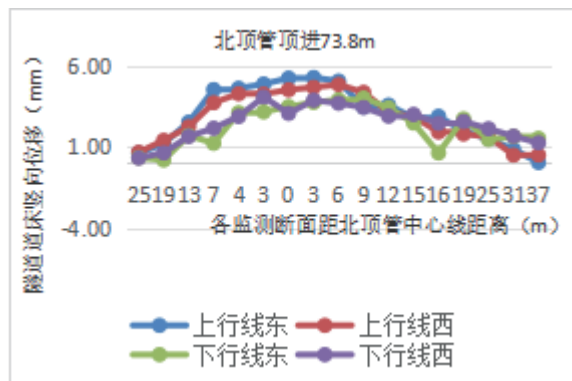
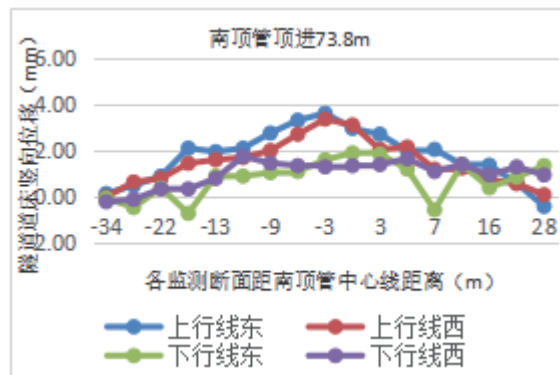
(二) 双线顶管对地铁隧道竖向位移影响及特点

双线顶管施工对隧道拱顶竖向位移影响特点类似于拱顶水平位移，地铁隧道拱顶监测点竖向位移数据有所起伏（均以隆起位移为正）。

监测数据反映：沿地铁隧道变形形态以北顶管中心线附近为最大向地铁南北两侧递减，最大隆起处偏于北顶管中心线附近。因为双线顶管并不符合修正Peck公式所界定的近距离，曲线并非呈近似正态曲线分布。

(三) 双线顶管施工对地铁隧道道床竖向位移影响及特点

沿地铁隧道道床变形形态是，南顶管顶进结束时，道床最大位移以南顶管中心线偏北为最大向地铁南北两侧递减，北顶管顶进结束时，道床最大位移又偏向北顶管中心线，而超预警的隆起使该点前后钢轨轨行面形成了一段曲率半径为 $R=107821.8\text{m}$ 竖向凸弧。双线顶管施工结束，地铁隧道上行线道床局部竖向位移点已达到预警值，为安全起见，对进入该区间隧道内的列车采取了降速行驶，将时速100Km降为时速40Km以下。



六、双线顶管施工对地铁隧道变形影响原因分析

(一) 顶管机附加应力对地铁隧道的重叠影响

地铁隧道水平位移来自双线顶管同向顶进。本工程双线顶管相距1.5米，顶管机附加应力对地铁隧道的影响重叠，使下方地铁隧道产生应力叠加效应；由于顶管

中心线与地铁隧道中心线接近正交，顶管使下方隧道产生水平横向变形，方向相同。当隧道受横向应力作用时，管片连接部位和混凝土管片的弯曲刚度和轴向刚度有差异，在土压力作用下，使管片产生变形和位移，管片之间产生错位，而土压力由近及远的扩散作用，使隧道拱圈迎土面与背土面所受应力大小不同，变形大小与结构所受附加应力大小成正比，从而使截面形状改变，产生所谓“竖鸭蛋形”的收敛变形，这种变形有一部分是塑性变形，外力解除后难以恢复到原状。由于先行顶管（南顶管）施工的影响，使得土体应力场变得不均匀，导致后行顶管（北顶管）施工时隧道变形曲线不对称，且北顶管顶进时施工参数也经过调整，使得沿地铁隧道变形形态偏向北顶管中心线附近。

（二）双线顶管在地铁隧道上方卸荷影响

本工程顶管位置处地铁隧道上方覆土厚度约11.0米，隧道上方2.7米以上双线顶管设计总卸土断面为：2*6.9*4.2米，双线顶管卸土后隧道剩余覆土厚度小于7.0米。根据地铁隧道覆土安全卸荷比要求： $S_1/S > 0.2$ （安全模型估算^[4]）；本工程双线顶管卸荷断面达 $S_1 \approx 58.0 \text{ m}^2$ ；原覆土断面 $S = (15.3 + 8.3 * \tan 30^\circ * 2 + 15.3) * 8.3 / 2 \approx 166.8 \text{ m}^2$ ，卸荷比为： $V = S_1 / S \approx 0.35$ ；式中： V —卸荷比； S_1 —双线顶管卸荷断面积； S —原覆土断面积。由此看出双线顶管对地铁隧道上方覆土进行了超量卸载后造成了隧道覆土压力减小，对隧道围岩的应力场平衡产生了破坏。从安全卸荷角度出发，本场地隧道地铁上方覆土卸荷断面应控制在 35 m^2 以内，只可安排一条相对应断面箱顶管。

（三）顶管内置压载未到位的影响

取双线顶管对地铁隧道主要影响范围（沿顶管纵向） $L = 19.4 \text{ m}$ 计算双线顶管卸土荷重与顶管节荷重：19.4m双线顶管排土荷重： $G_{\pm} = 2024.0 \text{ T}$ ；19.4m双线顶管管节质量： $G_{\text{管}} = 623.4 \text{ T}$ ；等长双线顶管结构质量与卸土容重差： $\Delta G = [2024 - 623] = 1401 \text{ T}$ ，顶管管结构质量 < 双线顶管排土容重。

顶管施工方案中对双线顶管在隧道上方卸土会引起隧道上浮已作预判，要求顶管在跨越地铁隧道上方时在隧道宽度范围以2.1T/m配重在顶管内加压，即每条顶管跨越地铁上、下行线时需添加配重 $6.2 \text{ m} * 2.1 = 13 \text{ T}$ 。但顶管施工过程中，每条顶管仅配重8块预制混凝土块（ $0.5 * 1 * 1 \text{ m} * 2.4 \text{ T}$ ）约10T左右，小于施工方案中配重要求。

（四）场地地下水浮力影响

顶管与地铁隧道均位于场地潜水和微承压水标高以下。场地地下水对地铁隧道也会有影响，现分析如下：取双线顶管宽范围 $S = 15.3 \text{ m}$ ，计算地铁隧道水浮力： $F = 923.4 \text{ T}$ ，同样长度隧道结构质量： $G \approx 491.8 \text{ T}$ 。浮力与结构质量差： $\Delta G = F - G = 923.4 - 491.8 = 431.6 \text{ T}$ ，显然，地铁隧道浮力 > 隧道拱圈自重。

七、启示和建议

（一）顶管对地铁隧道影响综述与启示

1. 本工程虽双线顶管间距小，顶管与下伏地铁隧道竖向净距较小，顶进方向同向，造成顶管机扩散应力对

顶管下方隧道的应力叠加范围大，同时，隧道上方顶管卸土、压载不足，隧道结构又受到列车循环往复动力和地下水浮力共同作用，是造成地铁隧道结构变形的主要方面，但由于相对水平距离系数 C 值较大，双线矩形顶管并不符合近距离界定，综合上述因素，造成隧道产生较为复杂的变形过程和变形形态。

2. 双线顶管带来施工诸多关联性问题：

（1）先行顶管会对后行顶管的周围原状土产生扰动，使得周边土体应力场也变得不均匀，导致后行顶管施工时隧道变形曲线不对称，沿地铁隧道变形形态偏向后行顶管中心线附近。

（2）先行顶管周围土质变得疏松，后行顶管施工机头易向土质疏松侧偏移，施工需要不断作纠偏处理；

（3）纠偏会对已成型的顶管产生挤压，造成南顶管管节变形（管节未做预应力加固处理），致施工润滑浆液流串到南顶管内。

（4）纠偏顶管位轴线偏差大，后行顶管结束时偏差远大于先行顶管。

（二）建议

1. 设计方面，小间距双线顶管、小间距顶管隧道净距时，顶管对下伏地铁隧道影响是显著的；产生的问题和施工风险远大单线顶管，而矩形顶管角沿应力效应也放大了对隧道变形的影响。建议矩形顶管设计非特殊情况下不宜采用过小间距的顶管形式，尤其是在已投入运营的地铁隧道线路附近，双线顶管方案应谨慎考虑，避免因不合理顶管位设计给施工带来风险和隐患。

2. 施工方面，顶管前顶管经过位置障碍物务必清除干净，项目施工前必须把各项准备工作做深做细，同时，顶进过程中要密切跟踪监测数据，控制顶管机刀盘切削方向及切削速度、及时调整顶进压力、严格管节状态控制、微调慢调顶进速度、偏转角度，管片安装后要及时跟踪注浆，及时调整注浆压力和速度、根据隧道上浮监测数据和运营控制要求，及时加载相应配重，顶进结束后要及时对管节进行预应力筋张拉锁定，避免施工对下伏地铁隧道的变形产生较大影响。

参考文献

[1] 城市地铁隧道交通监测技术规范：GB50911-2013[S]. 中国建筑工业出版社
 [2] 城市地铁隧道交通工程测量规范[S]. GB/T50308-2017
 [3] 建筑地基基础设计规范[s]GB50007-2011
 [4] 魏纲《双线盾构隧道施工环境效应评价与控制》[M]. 中国建筑工业出版社，2018
 [5] 江苏省城市地铁隧道交通工程监测规程[S]. DGJ32/J195-2015
 [6] 地铁工务维修规则[s]
 [7] 刘国彬，王卫东《基坑工程手册》[M]. 2版. 北京中国建筑工业出版社，2009：831-834
 [8] 金准，张建全《城市地铁隧道交通工程监测理论与技术实践》[M]. 中国建筑工业出版社，2014
 作者简介：张冬冬，本科，高级工程师，研究方向为岩土工程勘察设计、基坑与地铁隧道监测。