

大口径钢顶管穿越高速公路地表沉降数据分析

Analysis of Surface Settlement Data of Large Diameter Steel Pipe Jacking Crossing Expressway

张立懿

Liyi Zhang

上海城建市政工程（集团）有限公司 中国·上海 200000

Shanghai Urban Construction Municipal Engineering (Group) Co., Ltd., Shanghai, 200000, China

摘要：顶管施工技术是一种比较好的保护环境的敷设地下管线的非开挖技术，该技术对地上构建筑物无干扰破坏，具有较大的优越性。本研究依托黄浦江上游水源地连通管工程顶管穿越 G60 高速公路时地面沉降数据监测，对引起地面沉降的原因进行了分析，对以后穿越高速等案例提供了第一手数据。

Abstract: Pipe jacking construction technology is a good non-excavation technology for laying underground pipelines, which has no interference and damage to the ground structure and has great advantages. Based on the ground settlement data monitoring when the pipe jacking of the upstream water source of Huangpu River crosses the G60 expressway, the causes of the ground settlement were analyzed and the first-hand data were provided for the cases such as highway crossing.

关键词：顶管；泥浆套；置换注浆；地表沉降；变形规律

Keywords: pipe jacking; mud jacket; displacement grouting; surface subsidence; deformation law

DOI: 10.12346/etr.v3i10.4407

1 引言

随着三段铰工具管的研制成功与顶管技术的日益成熟，中国已成功完成了一大批长距离或超长距离的顶管工程。超大口径（DN4000 以上）混凝土顶管在中国上海已经取得了成功（白龙港污水系统污水输送完善工程），而超大口径（DN4000 以上）钢顶管在全国尚属首例，黄浦江上游水源地连通管工程作为目前全国最大口径钢顶管，需要穿越 G60 高速公路，充满了不确定性。论文以黄浦江上游水源地连通管工程为研究对象，基于钢顶管穿越 G60 高速公路时地面沉降为研究对象，通过大量的监测数据进行研究顶管穿越时的地面沉降规律，并得出了大口径钢顶管顶进引起的高速公路地面沉降规律。

2 施工概况

黄浦江上游水源地连通管工程包括连通管线、松江泵站及青浦、金山、闵奉三个分水点。本标段工程为青浦分水点至松江泵站线路的一部分。其中，涉及穿越 G60 高速公路的为 JB18# ~ JB16# 区间顶管，工作井和接收井分别布置高速公路东侧和西侧。

根据顶管施工段工程地质剖面图和勘察报告分析，本段顶管顶进主要位于③₃ 粘土层、⑥₁₋₁ 粉质粘土层、⑥₂ 砂质粉土层及⑥₃ 粉质粘土夹粉性土层。其中③₃ 粘土层和⑥₁₋₁ 粉质粘土层顶进阻力较小，但其强度低，渗透性差，含水量高、压缩性高、灵敏度高，具流变性和触变性，施工易受扰动，容易导致开挖面失稳。而⑥₂ 砂质粉土层及⑥₃ 粉质粘土夹

【作者简介】张立懿（1988-），中国上海人，工程师，从事市政工程研究。

粉性土层含水量大，渗透性高，顶管顶进施工时，需要注意开挖面稳定和进出洞口承压水层涌水涌砂（见图1）。

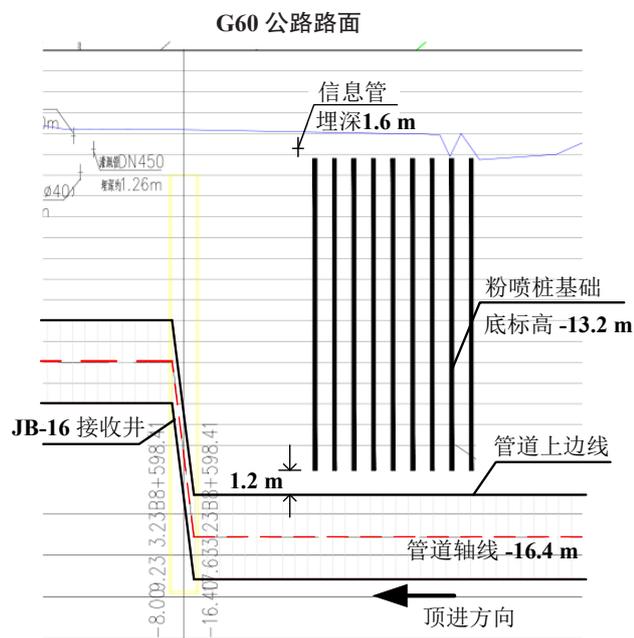


图1 顶管穿越高速公路剖面图

2.1 沉降分析

顶管施工过程中，对其自身的周围土体将产生扰动，使土体本身的强度发生变化和土体产生位移，从而导致地面沉降，同时波及顶管管道上方的G60高速公路地基及周边管线。

顶管引起地层移动的因素主要有：

- ①顶管掘进机开挖面引起的土体变化；
- ②掘进机纠偏引起的土体变化；
- ③掘进机后面管道外周因注浆填充引起的土体变化；
- ④管道在顶进中与地层摩擦而引起的地层变化。

上述的各种因素所引起的地层变化导致土体向开挖面及管道外周移动，从而引起地面沉降。

2.2 顶管施工措施

2.2.1 机头选型——三段两铰型

针对本工程顶管的复杂性和特殊性；一是顶管顶进过程中穿越G60高速公路；二是顶管穿越⑥层重黏土，经专家组充分研究和讨论决定，机头选型原则如下：

①本工程采用经改进的大刀盘、大扭矩、可变刀盘转速的泥水平衡顶管掘进机施工。

②在原来前、后壳体二段一铰的基础上在后壳体后增加一道活络节，并安装一定数量的起曲油缸，变为三段二铰。

③减少掘进机外径与管外径之间的建筑空隙，本工程顶管管节外径为4280mm，顶管机外径设计为4300mm，外周建筑间隙为10mm（见图2）。



图2 三段两铰型顶管工具管

2.2.2 通过试验段调整参数

JB18#~JB16# 顶管区间的前100m作为顶进试验段，为后续顶进的穿越高速公路优化调整相关参数，争取通过试验段形成和完善整个顶管工程的施工操作规程。

通过试验段顶进熟练掌握顶管机在工程地层中的操作方法和顶管机推进各项参数的调节控制方法，熟练掌握触变泥浆注浆工艺、测试地表隆陷、地中位移等。并据此及时详细分析在不同地层中各种推进参数条件下的地层位移规律和结构受力状况以及施工对地面环境的影响，并及时反馈调整施工参数^[1]。

经试验段确定穿越掘进的主要技术参数如下：

①推进速度：50~60mm/min，均匀、慢速；

②顶管在穿越时，每隔20~30cm后，复核顶管纠偏量，并根据监测数据及时调整施工参数，并提高施工参数调整精度，始终控制土体损失量在0.5%以内；

③水土压力设定值取静止土压力的1.00~1.05左右。水土压力波动值尽量要小，减小对地层的扰动；本工程采用的大刀盘泥水平衡顶管掘进机具有自动化泥水平衡控制装置，泥水压力控制精度为0.01MPa；

④纠偏角的设定与控制，水平与垂直纠偏幅度差尽量要小，控制纠偏角小于0.3°，本工程纠偏角确定为0.1°。

2.2.3 严控管外壁泥浆套的建立

在管外壁与土层之间形成良好性能的触变泥浆套，不仅会使顶进阻力成倍的下降，而且会使地表变形控制得最小。顶管施工过程中的建筑空隙、纠偏和管外壁背土现象都会引起建筑空隙增加，进而影响沉降。

①出洞口的止水装置安装到位，确保不渗漏，管接口密封性能保持良好，且与管道要保持良好的同心度。

②压浆从出洞口开始压浆，出洞口的压浆可以避免管子进入土体后被握裹，进而引起背土的恶劣情况。

③加强机尾的同步压浆管理，使浆套随机头不断延伸，填充空隙的同时预防背土现象发生。

④要对管道沿线定时进行补浆不断弥补浆液向土层的渗透量。

2.2.4 加密设置地表监测点，加强施工监测

采用信息化施工，利用监测结果指导施工，不断优化施工参数，提高掘进水平，加强对掘进水土压力、泥浆比重、推进姿态、推进速度、同步注浆等管理，有效控制地层损失，将地面变形控制在最小的范围内。

2.2.5 穿越工程中减少纠偏

在顶管机穿越 G60 高速公路前，对导线控制网及井下、隧道内的测量控制点进行复测。在确认无误的情况下，顶管机根据测得的姿态，将轴线误差调整到小于 10mm，以准确的姿态进行穿越的推进。

顶管姿态的变化包括水平姿态变化以及竖直姿态变化，其变化将在顶管四周产生空洞区和扰动挤压区，对周围环境产生影响，由此本工程的态度控制将尽可能地减少顶管的姿态变化值，使之始终控制在 1cm 以内 [2]。

在穿越 G60 高速公路的推进过程中，根据激光经纬仪引导轴线控制，顶管司机根据偏差及时调整顶管机的推进方向，尽可能减少纠偏，特别是要杜绝大量值纠偏，同时在顶管穿越期间，适当降低推进速度，从而保证顶管机平稳地穿越。

2.2.6 做好置换浆及后期补浆

顶管施工结束以后，用水泥浆液直接固化原有的触变浆液；并采取注浆加固纠正变形，进而保护高速公路的稳定。

施工结束后，高速公路路面仍存在一个后期沉降的问题。进行持续的施工监测同时根据监测情况做好后期补充注浆，直到沉降基本稳定为止。

2.3 高速公路地表沉降点位布置及监测频率

本工程穿越高速公路经过业主与路政养护管理单位协调，为了监测时的安全考虑，监测点位取路肩和路脚，图 3 为黄浦江上游水源连通管工程 C4 标穿越 G60 高速公路监测点布置图。

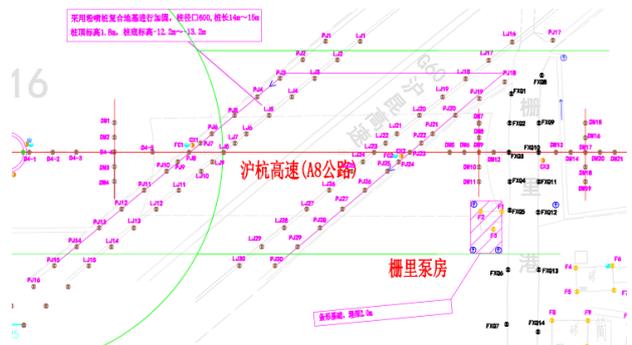


图 3 穿越 G60 高速地表监测点位图

在穿越 G60 沪昆高速段的路肩和路脚布设一监测断面，共布 64 个沉降测点。其中，坡脚沉降测点 32 个，测点编号为 PJ1~PJ32，其中 PJ1~PJ16 位于高速公路南侧，PJ17~PJ32 位于高速公路北侧；路肩沉降测点 32 个，测点编号为 LJ1 ~ LJ32，其中 LJ1~LJ16 位于高速公路南侧，LJ17~LJ32 位于高速公路北侧。布点由密到疏布设，布点间

距 5~10m [3]。

图 4 为穿越高速公路地面沉降观测点结构示意图。

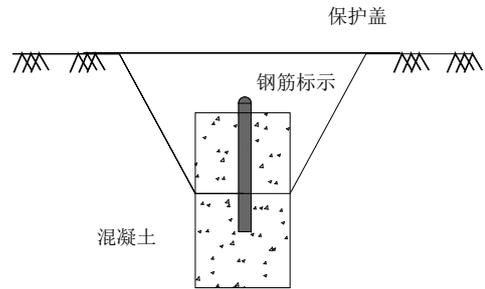


图 4 穿越高速地面沉降观测点示意图

监测周期：从施工开始，到顶管完成后 15 天内（穿越重要构筑物及管线时，后期稳定时间适当放宽并满足各监护主管部门的要求），监测数据基本趋于稳定后，结束本施工段的监测工作（见表 1）。

表 1 监测频率

施工工况	监测频率
施工前	初始值测试不少于 2 次
机头前 20m 及机头后 40m 范围内	1 次 /1d
机头前 20m 及机头后 40m 范围外	1 次 /3d
穿越 G60 高速公路时	2 次 /1d
顶管穿越 G60 高速公路结束后 7 天内	1 次 / (3~7d)

3 顶管施工引起的高速公路周边地表沉降数据分析

3.1 南侧地面沉降分析

图 5 与图 6 为 G60 高速公路南侧坡脚（路肩）地面沉降监测点随顶管穿越 G60 施工前后的地表沉降变化图。由图中可以看出，在机头到达 G60 高速公路时，地表出现一定隆起现象，主要因为顶管顶进施工中，施加的顶压力以及超孔隙水压力引起的“挤土”作用；随着机头的顶进背离建筑物，超孔隙水压力的逐步消散，地表测点呈现下降趋势。从测值过程线可以看出，顶管周边土体应力持续调整，地表持续沉降近 1 个月后趋于收敛，至监测末期 G60 沪昆高速沉降已收敛。

从图 5 与图 6 还可以看出，监测末期 G60 沪昆高速（南侧）累计沉降最大发生在坡脚测点 PJ9 处，累计沉降量 -6.21mm；路肩沉降最大发生在测点 LJ8 处，累计沉降量为 -2.61mm。

3.2 北侧地面沉降分析

图 7 与图 8 为 G60 高速公路北侧坡脚（路肩）地面沉降监测点随顶管穿越 G60 施工前后的地表沉降变化图。由图中可以看出，在机头到达 G60 高速公路时，地表出现一定隆起现象，主要因为顶管顶进施工中，施加的顶压力以及超孔隙水压力引起的“挤土”作用；随着机头的顶进背离建筑物，超孔隙水压力的逐步消散，地表测点呈现下降趋势。

从测值过程线可以看出，顶管周边土体应力持续调整，地表持续沉降近 1 个月后才趋于收敛，至监测末期 G60 沪昆高速沉降已收敛^[4]。

从图 7 与图 8 还可以看出，监测末期 G60 沪昆高速（北侧）累计沉降最大发生在坡脚测点 PJ30 处，累计沉降量 -5.20mm；路肩沉降最大发生在测点 LJ31 处，累计沉降量为 -4.64mm。

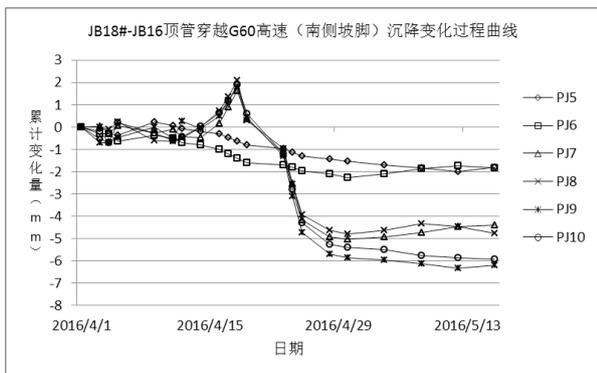


图 5 G60 高速南侧坡脚地表沉降随变化曲线图 (PJ5-PJ10)

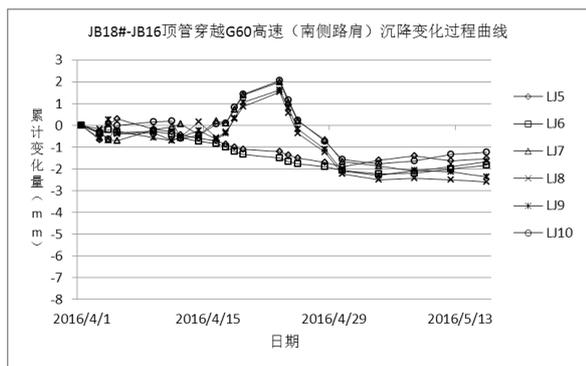


图 6 G60 高速南侧路肩地表沉降随变化曲线图 (LJ5-LJ10)

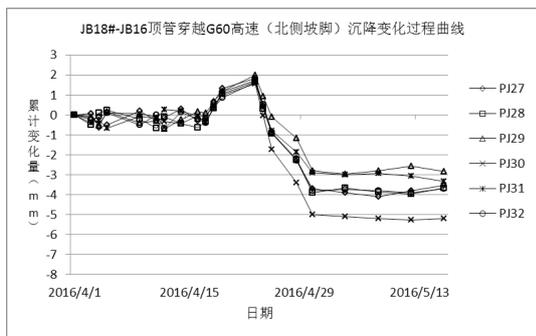


图 7 G60 高速北侧坡脚地表沉降随变化曲线图 (PJ27-PJ32)

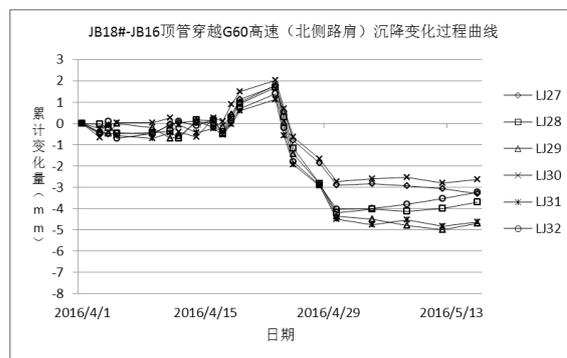


图 8 G60 高速北侧路肩地表沉降随变化曲线图 (LJ27-LJ32)

4 结语

论文基于对黄浦江上游水源地连通管工程 C4 标顶管穿越 G60 高速公路周边沉降监测数据的分析整理，对周边沉降变形规律进行了总结，主要结论如下：

①同顶管穿越一般建筑物一样，在顶管机头到达高速公路时，地面出现一定的隆起现象，隆起最大值控制在 2mm。随着机头背离高速公路，地面测点呈现下沉趋势，大约 1 个月之后趋于收敛，累计值最大为 -6.21mm。

②在顶管施工影响区域内，距离顶管轴线处，变化量最大，随着与轴线距离的增加，变化量越小。这表明顶管穿越引起周边土体应力调整变化。

③顶进过程中的同步注浆及后期补浆对稳定高速公路的沉降作用明显。

④此次研究受高速公路监测条件限制，施工结束后未进行高速沉降的长期监测，后续研究者可在有条件的情况下进行相应研究。

参考文献

- [1] 韩选江.大型地下顶管施工技术原理及应用[M].南京:中国建筑工业出版社,2008.
- [2] 崔京浩,陈肇元,宋二祥,等.一个顶管法穿越高速公路的施工方方案[J].特种结构,2001,18(3):44-47.
- [3] 方从启,王承德.顶管施工中的地面沉降及其估算[J].江苏大学学报(自然科学版),1998(4):106-110.
- [4] 房营光,莫海鸿,唐康杰,等.顶管施工引起的土体扰动区的实测理论与分析[J].岩土力学与工程学报,2003,22(3):601.