

浅谈大直径盾构法隧道施工对地表沉降的影响

毛晓康

铁四院（湖北）工程监理咨询有限公司

摘要：随着城镇化不断发展，地下空间资源不断得到开发应用，其中大直径盾构法隧道施工开始不断发展壮大，然而大直径盾构法隧道施工由于开挖面积较大，对土体的扰动较大，如施工参数设置不合理，会导致地表沉降过大，对地面的人身财产安全造成威胁，因而了解大直径盾构法隧道施工对地表沉降影响很有意义。本文通过查阅文献，结合工程实践，从盾构的覆土条件、掘进压力和注浆填充率这三个方面的参数，分析大直径盾构法隧道施工对地表沉降的影响，提出了相关建议，为大直径盾构法隧道施工有效的控制地表沉降量提供一定的参考。

关键词：大直径盾构；盾构法隧道；施工参数；地表沉降

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.01.052

一、前言

随着二十一世纪城镇化的高速发展，地面交通网已经发展到较为饱和，地面可利用的空间有限，于是城镇公路、高速公路、铁路和地铁等开始利用地下空间资源，解决城镇交通堵塞的问题，为人民提供更便捷的出行线路。在利用地下空间资源施工中，盾构法隧道施工因其安全、高效和机械化程度高而得到了广泛的应用，盾构的直径也随着盾构法施工技术和盾构机制造技术的不断发展，大直径盾构隧道近十年在我国不同的地方开始发展壮大起来，开挖直径也屡创新高，目前发展到超大直径。

大直径盾构隧道施工，由于其直径大，开挖土体面积较大，对土体的扰动也成倍的增加，对地表沉降的影响相对小直径盾构有所不同，因此研究大直径盾构法隧道施工对地表沉降的影响，对大直径盾构隧道施工参数控制提供相关建议和指导。

通过大量查阅相关文献，国内许多研究学者得出了很多很有意义的结论。通过量化分析，偏心超挖对地表沉降影响最大，注浆填充率是地表沉降的关键因素，掘进压力对地表的沉降影响较小^[1]。通过实测分析，在富水饱和粉细砂层，地表沉降速率大，地层稳定快，掘进压力的设置，偏大会导致地面破坏隆起，导致最终沉降量较大^[2]。研究了覆土条件、注浆、掘进压力和双线隧道开挖方式对地表的沉降影响，得出覆土越大地表沉降

越小，掘进压力对地表纵向沉降影响较大，双线隧道施工方式对地表沉降影响相差不大^[3]。提出了地面沉降、地层损失和施工参数联系通道的地面预测和控制流程，实现地面沉降的施工控制^[4]。通过具体工程土压平衡掘进参数分析，导致地表沉降风险值从大到小依次是推力、同步注浆压力、土仓压力、刀盘扭矩^[5]。通过具体工程泥水盾构施工地面沉降及盾构掘进参数的分析，适当提高掘进压力，地表上浮减少地面沉降，快速的同步注浆是减少地层损失的关键^[6]。通过雷达探测壁后注浆的分布对隧道、地表沉降影响，提出动态循环方法，有助于地表沉降控制^[7]。采用三维数值分析和现场测试等手段，土体移动量与盾构掘进压力密切相关^[8]。通过经验公式、实际监测数据相对比，掘进压力设定值过高或过低都会对土体发生破坏，引起地表过大沉降和上浮^[9]。

从以上文献中的相关结论，本文将以实际工程监测数据，分析讨论盾构掘进的覆土条件、掘进压力和注浆填充率三个方面的地表沉降影响。

二、覆土条件影响

某地在建的大直径盾构隧道工程，采用的是开挖直径16米的泥水平衡盾构机，管片外径15.5米，始发端头采用MJS工法桩加固，纵向加固长度25m，深度33米，出端头加固体区后覆土厚度为9.6m，小于一倍的洞径，地层主要是富水饱和的粉细砂层夹杂着少量的粉质黏土。统计随着盾构隧道覆土厚度增加，隧道正上方的地表监测点累计沉降量值，绘制曲线图如下图图1。

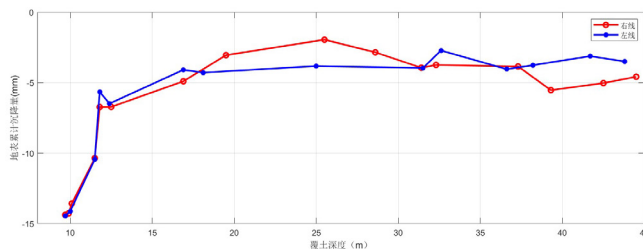


图1 覆土深度与地表累计沉降量曲线图

图1中左右线的累计沉降量是单独观测的结果，左右线是同方向掘进，左线比右线晚2个多月始发，不考虑左右线掘进的相互之间的影响，左右线掘进的参数基本一致，掘进压力和注浆填充率对地表沉降的影响可以忽略不计。分析图1中的曲线图，左右线盾构掘进都随

着盾构埋深越来越深，覆土厚度越来越大，地表累计沉降变量随着减小，但是不是一直减小，当达盾构埋深到一定的深度后，随着覆土厚度的变化与地表累计沉降量并不随着变化。从图1可也看出，当覆土的厚度大于一倍洞径16米后，地表的累计沉降量基本没有变化，维持在-2~-5mm之间，即覆土的厚度对地表沉降几乎无影响，应该是其他的掘进参数影响导致了地表沉降的差异。因而从图1中可以得出如下结论：

(1) 当覆土厚度小于一倍开挖直径时，地表累计沉降量与覆土厚度成反比，覆土厚度越小，地表沉降累计变化越大，随着覆土厚度的增大，地表累计沉降量会减小，在一定的范围内减小。

(2) 当覆土的厚度大于一倍的开挖直径时，地表的累计沉降量与覆土厚度的关系不相关，覆土厚度越大，地表的累计沉降量不会减小，可能由于其他掘进参数会导致地表累计沉降量变大或变小，即覆土厚度大于一倍的开挖直径后，覆土厚度不再是影响地表累计沉降量的因素之一。

三、掘进压力的影响

统计左右线掘进1km位置的地表沉降随时间变化曲线图如下图图2。该位置的盾构隧道埋深有37米，是盾构开挖直径的2倍，排除覆土条件对地表沉降的影响。右线盾构在掘进该位置的刀盘切口水压设定为0.552~0.564MPa，左线盾构在掘进该位置的刀盘切口水压设置为0.503~0.511MPa，刀盘切口水压即掘进压力。图2横坐标代表地表监测的天数，左右线都是在盾构到达该位置前9天开始采集初始值，即监测到第9天，刀盘正好掘进到该位置，左右线的注浆填充率平均值都为128%，注浆填充率对地表沉降的影响可以忽略不计。

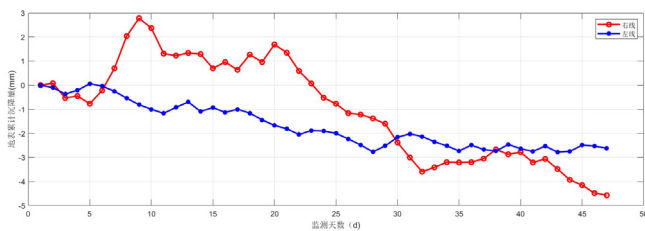


图2 左右线地表累计沉降量曲线图

分析图2地表累计沉降曲线图，由于左线的掘进压力比右线的少0.05MPa，相当于半个大气压，左线在掘进到该位置的时候，地表没有表现出隆起现象，而是表现为下沉现象。但是右线的掘进压力较大，当刀盘在靠近该位置时地表呈现明显的隆起现象，并且到刀盘达这个该位置的隆起达到最大，当刀盘离开该位置时，地表开始出现下沉的趋势，要一个多月后沉降才趋于稳定，最终沉降达到-4.57mm，然而左线只需20天就能趋于稳

定，最终的地表沉降为-2.56mm，很明显右线的最终地表沉降变化比左线的大。因而从分析图2中可以得出如下结论：

(1) 当掘进压力设定较大时，对土体的扰动较大，地表会出现先隆起后沉降的现象，并且最终的沉降量会比不隆起的要大；

(2) 当掘进压力设定较大时，地表出现隆起现象后，地表沉降需要更长时间才趋于稳定。

(3) 当掘进压力设定适中时，可以减小对土体的扰动，地表的沉降量也相对比较小，也能较快的趋于稳定状态。

四、注浆填充率的影响

对左右线盾构先后穿越大堤的地表监测数据进行统计分析，选取地表变形最大的一个横向断面监测点的累计变化量，绘制如下图图3，图3中的每个点代表一个地表监测点的地表累计变形量，横坐标代表监测点距离盾构左右线中线的距离，负数代表掘进方向的右侧，正数代表掘进方向的左侧，左右线是先后两个月多月穿越该位置，先穿越的地表沉降已稳定，左右线监测数据都是单独采集的，不考虑先穿越对后穿越的地表沉降影响。左右线穿大堤的覆土厚度都为52.3m，排除覆土厚度对地表沉降的影响。该大堤下方地层主要为粉砂和粉细砂，右线穿越时，掘进压力为0.695~0.734MPa；左线穿越时，掘进压力为0.698~0.740MPa；左右线的掘进压力基本一样，相差不到0.01MPa，可以忽略掘进压力对地表沉降的影响。统计左右线穿越大堤期间的注浆填充率，右线穿越大堤期间，注浆填充率在122.5%~132.2%之间，平均注浆填充率为128.5%；左线穿越大堤期间，注浆填充率在133.9%~141.1%，平均注浆填充率为138.4%；

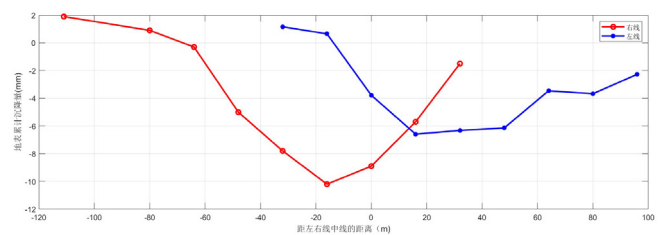


图3 左右线横断面地表监测点的累计变化量

分析图3，右线穿越大堤后，地表监测点变形最大的一个点正好是隧道的正上方，累计变化量为-10.21mm；左线穿越打大堤后，地表变形最大的监测点也是在左线盾构的正上方，累计变化量为-6.59mm；左右线穿越后，右侧距离最远的两个点，都呈现隆起的现象，隆起1-2mm；左右线先后穿越过后，在横断面上

出现明显的沉降槽现象，对左右线穿越后中线地表总的沉降量最大，有-12.4mm（右线贡献-8.9mm，左线贡献-3.5mm）；从图3，可以很直观的看出，右线的沉降明显的比左线大，在覆土深度一样，掘进压力一样的情况下，左右线在穿越大堤期间的注浆填充率有明显的差异，右线注浆填充率平均值只有128.5%，而左线的注浆填充率有138.4%，左线比右线的注浆填充率多了10%，很多学者^{[1][3][6]}也总结了增加注浆填充率能减少地表沉降量，左线的注浆填充率比右线的高10%，最终的地表沉降量左线的比右线的少。但是左线注浆填充率虽然达到了141.1%，但是最终地表还是有-6mm的沉降量，不是单纯的提高注浆填充率就能减少到地表累计沉降量为零。因而从分析图3中可以得出如下结论：

（1）当注浆填充率偏小时，小于130%时候，会增大地表的累计沉降量，当穿越敏感的地表区域的时候，注浆填充率应不小于130%。

（2）在一定范围内提高同步注浆的注浆填充率，能减少地表的累计沉降量。当注浆填充率超过140%，再继续增大注浆填充率，对地表沉降的影响较小。

（3）左右线穿越同一区域的时候，对左右线的中心线的地表点叠加造成的累计沉降量最大。

五、结论

本文通过查阅大量的文献，结合具体的工程实践和监测数据，针对大直径盾构隧道施工的覆土条件、掘进压力和注浆填充率三个参数对地表沉降的影响进行了分析，得出以下结论和建议：

（1）盾构掘进的覆土厚度在一倍开挖直径范围内，端头加固区的地表沉降不包含在内，覆土厚度与地表累计沉降量成反比，即覆土厚度越小，地表沉降累计变化越大。因而大直径盾构刚出端头加固区域时，对地表的沉降影响较大，需要注意盾构掘进压力和注浆填充率等参数的控制，防止造成地表沉降过大，出现塌陷风险。

（2）盾构掘进到覆土厚度大于一倍的开挖直径时，覆土条件对地表沉降的影响很小，可以忽略不计。

（3）掘进压力过大时，对土体的扰动过大，地表会先出现隆起后沉降的现象，导致最终的地表沉降量大，并且最终的地表沉降需要更长时间趋于稳定。因而建议大直径盾构施工时，掘进压力应设定适中，可以减少对土体的扰动，地表的沉降量也相对比较小，也能较快的趋于稳定状态。

（4）大直径盾构掘进压力如何设定适中，应先按计算掘进到该位置的水土压力设定，然后再根据地表的监测数据做适当的调整。若地表出现明显的隆起现象，

隆起量大于2mm表示设定的压力过大，应该调低点；若地表出现明显的沉降，沉降量大于2mm时表示掘进压力设定的过低，应适当的调高；当地表的沉降变化不明显时，说明掘进压力设置的比较适中。

（5）在大直径盾构隧道穿越大堤等重要风险源地表区域时，应适当的提高注浆填充率，以减少地表的累计沉降量。建议注浆填充率控制在135%以上。

（6）大直径盾构隧道的左线和右线盾构先后穿越同一区域的时候，对左右线的中心线的地表点叠加造成的累计沉降量最大。

（7）大直径盾构的覆土条件、掘进压力和注浆填充率这三个参数都是在一定的范围内对地表产生相应的影响，综合三个参数的影响，在实际工程实践中，针对不同的位置和地层，选取适中的掘进参数，对地表的沉降影响最小。

参考文献

- [1]朱才辉, 李宁, 柳厚祥, 张志强. 盾构施工工艺诱发地表沉降规律浅析[J]. 岩土力学, 2011, 32(01): 158-164.
- [2]李曙光, 方理刚, 赵丹. 盾构法地铁隧道施工引起的地表变形分析[J]. 中国铁道科学, 2006(05): 87-92.
- [3]郑淑芬. 盾构隧道施工地表沉降规律及控制措施研究[D]. 中南大学, 2010.
- [4]王建秀, 付慧仙, 朱雁飞, 唐益群, 杨坪. 基于地层损失的盾构沉降计算方法研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(01): 112-119+150.
- [5]郑刚, 路平, 曹剑然. 基于盾构机掘进参数对地表沉降影响敏感度的风险分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1): 3604-3612.
- [6]林存刚, 张忠苗, 吴世明, 房凯. 泥水盾构掘进参数对地面沉降影响实例研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(04): 116-126.
- [7]杜军. 盾构隧道壁后注浆探测图像识别及沉降控制研究[D]. 同济大学, 2006.
- [8]韩日美, 宋战平, 谢永利, 吴焕通. 土压平衡盾构土仓压力对地表沉降的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2010, 30(01): 59-62+99.
- [9]纪梅, 谢雄耀. 大直径土压平衡盾构掘进引起的地表沉降分析[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(01): 161-166+197.

作者简介：毛晓康，1990.04，男，汉族，湖北随县，硕士研究生，工程师，研究方向：工程测量和盾构隧道。