

大直径顶管穿越地层过程中对周围土体的影响

赵鑫

陕西建工集团股份有限公司，陕西省西安市，710000；

摘要：随着城市更新不断发展，大直径顶管技术应用越来越广泛。复杂环境及地质条件对控制顶管穿越地层扰动要求不断提高。通过研究大直径顶管施工平衡理论，分析土体变形规律及成因并探讨切实可行的大直径顶管造成土体变形控制手段，有助于工程实践中降低大直径顶管施工中对周围土体的影响。

关键词：顶管施工；泥水平衡；土压力

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.041

我国目前已从初始化发展的加速期转变为初始化存量发展阶段，随着城市更新取代以前的大拆大建，在城市建成区进行地下管网施工已越来越普遍。非开挖施工技术正在加速崛起，其中具有代表性的顶管技术，依靠其成本相对较低、对现状环境影响小等优点正在被大量采用。

非开挖顶管技术是借助于主顶油缸的顶推力，将掘进机从工作井始发，直至穿越土层到接收井的管道施工技术，同时为解决顶推力不足问题可以相应增加中继间提升单体顶进长度。我国在长期的实际应用阶段中，不断提升顶管管径，增加顶进距离，使顶管技术的应用场景更为广泛。

当前，应用最为广泛的是圆形顶管技术，但相关理论还不够完善，施工中大多依赖于工程经验。但顶进过程中顶管机械及顶进管道对土层影响大，水文地质情况的不同，顶管对周边建构筑物的影响也呈现出较大差异性。需要进一步研究大直径顶管顶进过程中减小对土体扰动的相关工程技术措施，该研究对顶管技术的进一步发展具有较大的实践意义。

1 顶管技术发展情况

1.1 国外技术的发展

世界上首次提出顶管技术是在 1892 年，在麻省理工学院的第十届新英格兰铁路建设者（Roadmaster）学术会议上由 Clarkz 工程师推出相关方法^[1]。

顶管技术的实际应用是在 1896 年，当时修建了一条穿铁路的管涵，美国北太平洋铁路公司（Northern Pacific Railroad Company）成为首次应用该工程的企业。有了一定经验之后，工程师 Grinffin 推动了美国多个穿铁路的顶管项目顺利实施。

因顶管技术的优越性，欧洲国家自 1930 年代开始尝试应用该技术，到 1960 年代顶管技术已经相当成熟^[2]。1960 年代，日本首先在亚洲应用液压油缸顶管技术，顶管的直径也来到了 600mm。为了适应日本地理环境的限制，顶管技术在日本得到了较大发展，小口径顶管技术不断成熟。

1.2 我国顶管施工技术的发展

北京地区是我国率先采用顶管技术的城市，953 年为顺利实施穿越京包铁路的相关项目引入了顶管技术。

随后，顶管技术开始在我国不断推广应用，1981 年就实施了甬江顶管隧道，该隧道长度 581m，直径来到 2600mm，项目取得了成功。1984 年我国开始尝试机械顶管技术，土压平衡、泥水平衡这些技术正是在该时期得到了一定的发展。

随着我国大型基础设施建设项目的不断增多，顶管技术开始实现跨越式发展，西气东输工程上，在 2002 年就曾成功实施了 3600m 长，23~25m 深的复杂地层顶管工程^[3]。

在我国基建的引领下，目前，我国的顶管技术已经达到了国际领先水平。管材适用范围、掘进形状、地层适应性、掘进方式以及以泥浆润滑为代表的辅助施工技术都在快速发展与迭代。

2 大直径顶管施工平衡理论

2.1 泥水平衡原理

顶管机在始发之后，泥水平衡顶管机借助于刀盘上的水力切削力实现对泥土的切削，再由泥浆泵抽排弃土，掘进过程中不断在掌子面注入泥浆，实现土压与水压的平衡。

采用泥水平衡顶管工艺，主要是适应地层水文地质条件，适用范围广，对软土、高水压地层都能实现较好的掘进。泥浆则是为了保持掘进面土体稳定，能够实现较小的周围土体扰动。同时，泥水平衡所需推力相对较低，同等条件下可以延长顶推距离，长距离顶管能减少工作井数量，降低对环境的影响。施工中产生的渣土采用泥浆泵抽排，不用采用吊车等机械，安全性更高。同时，较大的井口直径能够保证足够的空气流通，降低了有限空间作业风险。

但泥水平衡顶管技术抽排的泥浆处理技术还不够完善，泥浆处置难度较大，大口径顶管中该问题则更为突出。泥浆的制备还需消耗大量水资源，节水措施还有待进一步完善^[2]。

大直径顶管对工作井作业场地要求也较高，复杂的设备结构也增加了工作井的尺寸及吊装难度，施工中各环节的牵制因素较多，需做到较好的施工规划和管理才能起到较高的工程效益。

2.2 土压平衡原理

在水文地质条件满足的条件下，采用土压平衡原理，土仓内采用压力及螺旋输送机进行排土作业，和泥水平衡原理相比，其在渣土处理方面更为简单。因此，采用该原理的顶管机结构更为简单，对施工场地的适应性也更高，场地布置更为灵活。所以，土压平衡技术成为了顶管施工的首选技术。

土压平衡顶管机的机头土仓压力可以实现自主调节，排土体积和掘进体积能够实现平衡，施工中需要掌握土压在合理范围内。实践上，对于粘性土，最终沉降及隆起现象需要时间恢复，操作上对土压力的控制尤为重要。

土压平衡技术能够在浅埋地层中实现有效掘进，其最小覆土厚度可以达到管径的0.8倍，适应性较强。

2.3 气压平衡原理

顶管过程中对机头土仓压力采用气压加以平衡，实现掘进面稳定的方式即为气压平衡。气压多采用压缩空气，管道将压缩空气输送进工作面，实现与掌子面土层及水压的平衡。气压还起到疏干地下水的作用，降低地下水对掘进的影响。

根据气压的不同，主要有全气压顶管、局部气压顶管之分。全气压需要作业人员处于气压环境下实现作业，

局部气压则仅在掌子面施加气压，人员操作面为常压状态，相比之下安全性更高。

气压平衡顶管的适用范围需保证土体具有较小的渗透系数，而且顶管机较为复杂，占地较大，施工场地的灵活性受到限制。气压平衡技术专业性更强，对地层影响较大，压缩空气会造成掘进面土体压缩，对周围土体影响较大。

3 土体变形成因分析

顶管施工产生的土体变形成因包括应力干扰及地层损失。摩阻力的增加对应力有利，地层损失则有正常和异常两种类型。掘进过程中，并不能完全避免地层损失，但借助于技术措施能降低损失值。技术措施得当，能够避免异常损失。

地层损失一方面是因开挖面造成地层损失。受顶管技术原理影响，顶进过程中，土体排出的同时需泥浆实现临时支护，泥浆固化具有时间效应，使得开挖面存在松散现象，无法实现理论上的绝对平衡。推力的增加会增加土体应力，产生挤压作用，进一步地出现地表隆起现象。与此相反，推力减小，土体表现为向管道方向移动，地面产生沉降现象。所以，施工阶段控制压力相对平衡是关键因素。

已顶进管道环向空隙也会造成地层损失。由于主顶机械、泥浆以及中继间等多种因素影响，环向空隙难以避免。受技术原理限制，机头直径比管道外径大，顶进过程中势必产生环向空隙，当空隙不能及时得到有效填充时就会导致地层损失。同时，补浆在施工中也较为重要，不讲不及时会造成土体中水向周边扩散，出现地层损失。

顶管机在顶进过程中需和作业面土体进行接触，顶管机上会造成土体黏结，开挖断面均匀性受到影响，不均匀的开挖面空隙未得到及时有效填充就会加大地层损失。管节与周围接触土体之间注入泥浆能够降低阻力，对周围土体的影响也随之降低。

方向修正也会造成土体损失。较多或大幅度的纠偏，需要借助于千斤顶施加不均衡的顶力，势必造成环向各位置土体受到的挤压力不均衡，空隙大的一次就更容易产生地层损失。所以，纠偏需遵循“勤纠偏、小纠偏”的原则，并控制好顶进方向。

进出洞时也会使得周围土体或者水体出现流失，容易产生地层损失。因此要严格规范进出洞操作，降低水

土流失。

顶进过程中，每节管节顶进完成后均需回撤千斤顶，以便于安装下一节待顶进管节，回撤千斤顶会使顶推力短暂降低，土压力会使得管道后移，从而出现掌子面土体松动，容易出现地层损失。

4 土体变形一般规律

顶管施工和盾构施工所引起的土体变形具有相似性。概括起来，可以将顶管施工过程中所产生的土体变形分为：顶进前方土体变形阶段；施工中土体沉降阶段；施工结束后土体固结沉降阶段^[4]。

在顶进前方土体变形阶段，往往是推力比土压力要大，以实现顶管前进，前进方向的力容易造成地面隆起。这种隆起现象随着埋深增加而降低。所以，顶管施工过程中，对于前方土体松软或无支护措施土体，超挖或退管现象明显。当前方土体应力释放之后，则会出现掌子面土体下沉，造成地面沉降。

顶进过程中，土体的应力不断产生变化，地面下沉效应也相应增加。机头掘进产生的端面与管道周之间的空隙，在土体自重的作用下，会被土体充填，产生支撑作用，逐步实现管道周围土体稳定。施工阶段，需要加强该空隙的填充，采用注入泥浆的措施加以缓解。

顶管过程中，土层持续性的受到扰动，扰动过程中产生的较大孔隙水压力，使得土体产生临时沉降，即一次固结。顶管结束之后，孔隙水压力不断得到释放，土体在自重作用下不断沉降，即次固结沉降。在一定时间之后，沉降即趋于稳定。

5 大直径顶管造成土体变形控制手段

5.1 合理的设备选型

管径越大所产生的地面沉降越明显，主要是因为管道占用体积增加，挖掘土壤增加，对土层扰动也随之增加，这种扰动和管径是成正比的。在顶管设计阶段，需要在管径需求与工程实际中寻求平衡，合理降低管道直径，以期减小顶管机机头尺寸。

同时，顶管机在选用时要控制机头外径与管道直径的差异，降低掘进时空隙大小，掘进过程中也要加强泥浆注入。

5.2 合理的围护结构拆除措施

洞口围护结构拆除将造成土层损失，该阶段需要合理操作。有效的措施包括在东门周边一定范围内进行渗漏水调查。若有渗漏水情况，可以采用泥浆封堵，再在拆除范围进行压密注浆，实现堵漏。

5.3 控制泥水压力及出泥量

泥水平衡顶管技术在控制掌子面稳定性方面具有一定优势，在监测到顶进前方出现地表隆起时需要采取降低顶推压力的措施加以控制。当监测到顶进前方出现地面沉降时，需要增加顶推压力加以控制。

就工程实践来看，穿越顶层往往具有不均匀性，所以在顶进过程中顶推力等顶进参数需做实时调整，所以相应的顶推力监测就非常必要。

5.4 顶进方向控制

纠偏会造成土体过大的扰动，过程实践中需要采取措施保证顶进轴线的正确，降低纠偏频次、减少每次纠偏量。当导向及操作系统融合性较差时，需要采取人工手段加以干预。

6 总结

论文针对大直径输水管道顶管的相关技术及工程实践进行探讨，介绍了国内外顶管技术的发展情况，对大直径顶管施工平衡理论展开分析，揭示土体变形一般规律，提出了大直径顶管穿越顶层过程中有效控制土体变形的工程措施。对大直径顶管施工实践具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 郑翥鹏, 周耿坚, 黄铖, 等. 基于HSS模型预测曲线顶管施工对建筑物沉降的影响[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2025, 64(06): 1041-1047.
- [2] 张永杰, 张新宇, 陈剑华, 等. 顶管管节在复杂偏转模式下的应力响应与变形机制研究[J]. 现代隧道技术, 2025, 62(05): 172-182.
- [3] 贾尚华, 陈辉. 顶管下穿影响下老旧大型污水箱涵保护技术研究[J]. 现代隧道技术, 2025, 62(S1): 981-988.
- [4] 毛宇飞, 郭增辉, 李金明, 等. 近海富水软弱地层顶管施工触变泥浆配比优化及减阻性能研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(S2): 342-350.