

# 超大直径盾构下穿变形敏感区地层变形机理及安全控制技术分析

文 / 李加念 中铁十一局集团城市轨道交通工程有限公司

**摘要：**本文结合某隧道工程的实际情况，简要分析了超大直径盾构掘进原理后，重点阐述了超大直径盾构下穿变形敏感区地层变形机理，以克泥效填充为导向，提出了具体的安全控制措施，旨在提高超大直径盾构隧道的施工质量和安全，相关理论成果以期为从业人员提供参考和借鉴。

**关键词：**超大直径盾构；变形敏感区；地层变形机理；安全控制技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.24.030

引言超大直径盾构隧道指的是利用直径在 12m 以上的盾构机进行施工的隧道，具有功能多元、高承载力等诸多优势特征，但因施工区域较为特殊，通常位于复杂地域以及建筑密集区，因此存在施工难度大的问题，需要充分掌握隧道下穿时地层的变形机理后，对敏感区域的地层位移变形进行精准预测，再结合预测结果，优化施工模式、加强安全控制，否则会引发严重的安全事故与质量风险，导致项目工程难以顺利交付验收。由此可知，深层次分析并研究超大直径盾构下穿变形敏感区地层变形机理与安全控制技术，对于我国城市建设领域的可持续发展，具有深远的意义。

## 一、工程概况

某单孔城际铁路隧道工程位于建筑密集区，需要穿越复杂的地质，其中包括软土地层、上软下硬复合地层以及硬岩地层，一旦操作不当，就可能埋下质量风险、造成人员伤亡，因此对施工质量和安全提出了严格的要求，具体情况，详见表 1。

表 1 某隧道工程基本概况

序号	隧道工程	设计参数
1	设计形式	单孔
2	设计外径	13.6m
3	设计速度	160km/h
4	施工模式	直径 14.02m 的泥水平衡盾构机

根据表 1 相关内容可知，本工程主要是采用超大直径盾构施工法，需要穿越地质条件复杂、建筑密集敏感区，因此在最大程度上保证施工安全，从根本上杜绝质量风险，需要分析泥水平衡盾构机下穿敏感区域时地层的变形机理，以便于质量管理与安全防护工作的有序开展<sup>[1]</sup>。

## 二、超大直径盾构掘进原理

本工程应用的超大直径盾构机主要由刀盘、推进系统、泥水循环系统等组成，如图 1 所示。

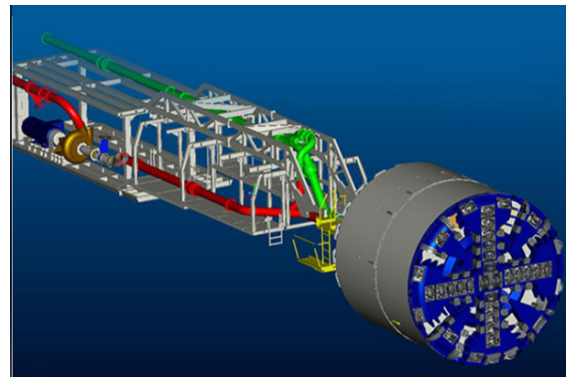


图 1 超大直径盾构机结构组成示意图

通过对图 1 的观察和分析可知，这种设备主要是在动态平衡泥浆压力的同时，实现对地层压力的有效控制，最终完成隧道施工。在实际应用该设备的过程中，应将重点放在两个维度：

一个是为确保开挖面具有高度的稳定性，需要对掘进速度与泥浆压力进行同步调节，做到真正意义上的压力平衡；另一个是不透水泥膜的形成效果，直接关系到地层水土压力的平衡质量，因此要科学开展泥浆配比工作，确保泥膜的渗透性、强度等符合规范要求<sup>[2]</sup>。

## 三、超大直径盾构下穿变形敏感区地层变形机理分析

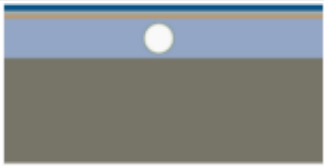
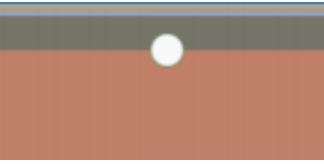

在分析超大直径盾构下穿变形敏感区地层变形机理时，为将分析结果的误差控制在最小范围内，确保其具有较强的参考和应用价值，本工程决定引进有限元分析软件——ABAQUS，进行数值模拟，主要的模拟方法与结果，如下所述：

### (一) 参数选取

参数选取是数值模拟的首要环节，其指的是采用实地勘察与资料调研两种方式，获取到大量有价值的信息数据后，通过对相关信息数据的挖掘分析，掌握施工现场的实际情况，以便于模型的精准构建。在实际操作中，可结合以下内容：

从实地勘察的角度出发，本工程安排综合素质较强的人员，对施工现场进行认真细致的实地勘察，最终的勘察结果表明，盾构穿越区段具有地质复杂的特点，如表 2 所示。

表 2 隧道工程中盾构机穿越区段

序号	盾构穿越区段	穿越长度	隧道埋深
1	 软土地层	170m	9-12m
2	 复合地层	110m	15-18m
3	 硬岩地层	470m	20-40m

从资料调研的角度出发，主要是获取历史资料后，分析里程段的岩石强度以及岩体基本质量，本工程由五大里程段组成，其中不同里程段的岩石强度与基本质量存在较大的差异性，如表 3 所示。

表 3 隧道工程里程段地质状况

里程段	地质状况	岩石强度	岩体基本质量
①	硬岩地层	80.7MPa	III-IV 级
②	复合地层	8.9-56.3MPa	II-IV 级
③	硬岩地层	87.9MPa	IV-V 级
④	软土地层	9.5MPa	V 级
⑤	软土地层	1.7-4.1MPa	V 级

## (二) 模型构建

通过资料调研与实地勘察，获取到大量真实可靠的信息数据后，可正式开展模型的构建工作，本工程主要是利用 ABAQUS 软件，创建静态与动态两个模型，二者的工作原理与功能作用存在较大的差异性，因此构建方法也会有所不同：

### 1. 静态模型

静态模型指的是施工现场的地层模型，其由 511600 个网格单元组成，是对施工区域地质条件的直观反映，如图 2 所示。

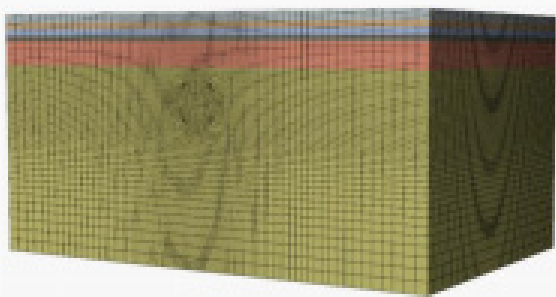


图 2 隧道工程地层模型示意图

通过对图 2 的观察可知，其由软土、软硬复合与硬岩地层三部分组成，三者在模型中的横向宽度、纵向长度与竖向高度一致，分别是 160m、100m、80m，但隧道埋深有所不同，其中软土地层的隧道埋深是 9m，而复合地层与硬岩地层的隧道埋深分别是 17m、20m。

### 2. 动态模型

动态模型的主要功能是模拟盾构隧道的开挖过程，在实际构建该模型的过程中，要分析研究盾构施工产生的扰动因素，如刀盘摩擦、开挖顶面推力以及盾尾同步注浆等，再将各类扰动因素有机结合，形成一个完整的动态模型后，能够保证模型的精度与准确度<sup>[3]</sup>。

首先，刀盘摩擦指的是在盾构机投入运行的过程中，刀盘会产生旋转力，此力与前方岩土体产生摩擦后，二者将形成一定的摩擦力，如表达式 (1) 所示：

$$dF_c = 2\pi r \sigma \mu_c dr \quad (1)$$

在表达式 (1) 中， $dF_c$  代表的是刀盘摩擦力； $\sigma$  代表的是前方水平土压力； $\mu_c$  代表的是刀盘与岩土体之间产生的摩擦系数。

其次，开挖面顶推力对敏感区地层的干扰较大，究其原因，在盾构机运行期间，会利用顶推系统，对前方土体进行挖掘，在整个挖掘过程中，地层会受到严重的扰动，如表达式 (2) 所示：

$$\sigma = K\gamma z \quad (2)$$

在表达式 (2) 中， $K$  与  $z$  分别代表的是静止土压力系数、目标区域埋深； $\gamma$  代表的是岩土体重量。

最后，在盾构机向前方不断掘进时，其盾壳也会随之移动，此时施工区域四周的岩土体与盾构机下方管片外层之间不可避免地会产生一定的空隙，而同步注浆技术能够及时填充空隙，但在填充过程中，产生的注浆压力，会给地层造成较大的扰动，如表达式 (3) 所示：

$$\delta = \eta \Delta \quad (3)$$

在表达式 (3) 中， $\delta$  代表的是注浆层模拟参数； $\Delta$  代表的是间隙理论值； $\eta$  代表的是土体性质参数。

联系盾构设备与施工现场的具体情况，对三大扰动参数进行合理计算，获得准确的数值后，将其输入到有限元分析软件中，就能够形成相应的模型，以开挖面顶推力为例，其模型如图 3 所示。

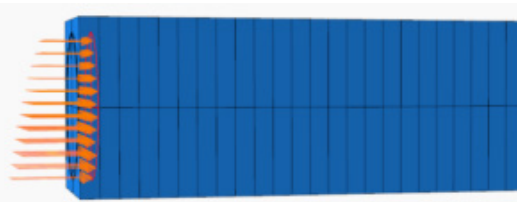


图 3 隧道工程盾构机开挖面顶推力模型示意图

在 ABAQUS 软件中，该模型将进行动态变化，因此技术人员观察该模型，就能够了解到在盾构机顶推开挖前方土体时，地层受到扰动情况，以此为基础，分析敏感区地层变形机理，能够有效提高分析结果的准确性与客观性。

(三) 变形模拟

科学构建静态模型与动态模型，将二者有机结合到一起后，可对盾构机掘进施工的整个过程进行模拟，为确保模拟结果具有高度的准确性与客观性，能够反映施工现场的实际情况，本研究从专业的角度出发，制定精细化的模拟流程，主要的作业流程为：

检验模型准确性——设计盾构机开挖步长参数——设计盾构机材料参数（外壳、管片等）——将盾构机与目标穿越的岩土体结构精准匹配——设置边界条件（位移约束、顶推力等）——进行施工过程模拟——获得模拟结果。

(四) 规律分析

通过对模拟数据的分析和研究，能够得到以下结论，即超大直径盾构下穿变形敏感区地层变形机理为：

1. 竖向位移变形

在超大直径盾构机的穿越施工中，不同地层受到扰动情况存在较大的差异性，以复杂的软土地层为例，最终的模拟数据，如表 4 所示。

表 4 软土地层竖向位移变形模拟数据

序号	竖向位移变形	模拟数据
1	地表最大沉降量	22.25mm
2	两侧最大隆起量	8.17mm
3	沉降槽位置	两侧边缘距轴线 5.3m

通过对表 4 的观察和分析可知，当盾构机在软土层中的掘进距离接近 50m 时，受顶推力的影响，地表出现隆起的情况，在这种技术条件下继续掘进，盾构机外壳盾尾会迅速脱出，但由于注浆体处于未凝固的状态，导致地表形成沉降槽，其中最大沉降量在 22.25mm 左右。此外，复合地层与硬岩地层的中心最大沉降量分别为 21.54mm、1.97mm。

2. 水平位移变形

软土地层、复合地层与硬岩地层，三者水平位移变形量的极值分别为 42.5mm、20.48mm、8.07mm。

以软土地层为例，在盾构机施工过程中，地层的水平位移变形趋势为“向隧道两侧延伸”在施工初期水平位移的变化量较大，但随着施工进程的不断加快，会逐渐进入到稳定状态。硬岩地层与软土地层的水平位移变形规律较为类似，而复合地层却大不相同，其水平位移变形趋势为“斜向上延伸到地表”，其中下部硬岩地层的水平位移变形量要明显<上部软土地层<sup>[4]</sup>。

3. 盾构机开挖直径对敏感区地层变形的影响

为充分掌握盾构机不同开挖直径对敏感区地层变形的影响，本研究在模拟软件中，设计三大试验参数，分别是 6m、11m、14.02m，最终的模拟验证结果表明，不同地层受到扰动也存在较大的不同，以软土层为例，其受到的影响，如表 5 所示。

表 5 盾构机不同开挖直径对敏感区地层变形的影响

序号	开挖直径	地表中心最大沉降量	隧道两侧地表最大隆起量
1	6m	9.40mm	1.59mm
2	11m	20.10mm	6.90mm
3	14.02m	22.25mm	8.17mm

根据表 5 相关内容可知，盾构机开挖直径与地层变形量之间呈正相关，即开挖直径越大，变形量也就越大<sup>[5]</sup>。

四、超大直径盾构下穿变形敏感区地层安全控制措施

克泥效填充技术指的是制备克泥效浆液后，利用软管泵将其注入到开挖间隙内，实现对间隙的有效填充后，形成一个粘度较高的胶化体，最终实现对土体变形问题的有效遏制。在制备该浆液的过程中，要根据隧道工程的安全管控需求，对浆液的配比进行合理设计，若地层施工掘进推力较大，克泥效工法应起到减少摩擦力的作用，因此浆液中克泥效粉与水的比例应分别控制为 350kg、865L；但若地层的含水量较少，需要克泥效工法起到沉降控制的作用时，就要将克泥效粉与水的用量分别控制为 400kg、846L。通过对浆液的科学制备，确定其粘结强度符合规范要求后，可正式进行填充施工。

在实际应用克泥效浆液进行填充施工时，要对凝固时间、注浆压力等关键的技术参数进行准确控制，如表 6 所示。

表 6 克泥效填充施工核心技术参数

序号	克泥效填充施工	技术参数
1	注浆压力	0.3-0.5MPa
2	初凝时间	< 30s
3	终凝时间	< 120s
4	28d 收缩率	< 0.5%
5	承载力	> 0.3MPa

结语在超大直径盾构隧道的施工中，敏感区下穿作业的风险系数较高，特别是土质条件较差的软土地区，当开挖直径接近 14m 时，软土区的地表中心最大沉降量与隧道两侧地表最大隆起量，将达到 22.25mm、8.17mm，需要采取隔离桩设置、克泥效填充等一系列切实科学的措施进行安全管理，确保设备能够顺利穿越敏感区，最终实现高水平的建设目标，为区域的长久稳健发展，提供坚实的保障。

参考文献

[1] 王磊, 杨哲, 董世卓, 等. 超大直径盾构隧道联络通道冻结法施工关键技术——以北京东六环改造工程为例 [J]. 隧道建设 (中英文), 2025, (09): 1791-1801.  
 [2] 杨开全, 徐胜, 谭二惠. 超大直径盾构刀盘伸缩摆动技术研究——以南京和燕路过江通道工程为例 [J]. 工程机械, 2025, (06): 72-79+10.  
 [3] 曾仕琪, 陈湘生, 谭毅俊, 等. 基于 TL-GA-BP 算法的超大直径盾构隧道地层荷载反演模型研究 [J]. 现代隧道技术, 2025, (02): 110-120+140.  
 [4] 曾庆成, 黄书华, 沈翔, 等. 基于机器学习算法的密集城区超大直径盾构切桩诱发建筑物振动响应预测模型研究 [J]. 广东土木与建筑, 2025, (01): 35-39+60.  
 [5] 马元. 隧道超大直径盾构小半径曲线始发风险控制技术分析——以珠海十字门隧道为例 [J]. 建筑科技, 2024, 8(11): 146-151.