

# 超大直径泥水盾构软弱地层到达掘进变形规律研究

## ——以苏埃通道工程为例

李志

中铁隧道局集团有限公司 广东 广州 511400

**摘要：**以苏埃通道工程盾构到达段为背景，针对超大直径泥水盾构在临海深厚淤泥软土地层的掘进变形规律开展研究。通过在接收端埋设地表沉降、土体深层水平位移及孔隙水压计进行现场监测，分析不同掘进阶段对地层变形的影响机制、规律、程度与范围，得出以下结论：1) 盾构通过及盾尾脱离注浆阶段对地层扰动最大，是沉降主要影响阶段；2) 刀盘抵达监测断面时，土体深层水平位移与孔隙水压力受盾构挤压影响最显著，变形速率达峰值；3) 孔隙水压力与地表沉降对施工扰动的时空效应存在差异，前者先增后降，后者持续下降；4) 盾构掘进对周边土体的扰动范围为外侧18m；5) 控制泥水仓压力、同步注浆及掘进速度等参数，是减少土体扰动的关键措施。

**关键词：**淤泥软土地层；超大直径泥水盾构；掘进参数；地层变形规律；应力扰动范围

### 引言

盾构法因安全、高效、环保优势广泛应用于隧道工程，且向长距离、大直径、高水压方向发展。盾构掘进会扰动周边地层，引发地层变化。目前，学者结合理论、数值模拟及工程案例总结了盾构隧道地层变形过程、大小及规律，为施工提供指导，如袁大军<sup>[1]</sup>等修正泥水盾构地表沉降并明确地层点位距离与应力扰动度关系，王志良等<sup>[2]</sup>建立开挖面前方超孔隙水压力计算方法，陈相宇、吴柯、江华<sup>[3-5]</sup>等分别研究了不同地层下盾构施工的孔隙水压力响应及变形特征。现有研究多聚焦软土、砂卵石等地层的地表沉降规律，对地层变形与孔隙水压力的耦合分析不足，尤其缺乏超大直径泥水盾构在深厚淤泥软土地层的变形规律研究。本文结合苏埃通道工程，总结分析盾构掘进引起的地层变形规律，积累施工经验为后续施工提供指导。

### 1 工程概况

苏埃通道工程盾构接收井位于汕头华侨公园内，苏埃海湾位于基坑南侧31~44m，城市排洪通道龙湖沟位于基坑东侧约50m，接收端隧道埋深为14.3~14.9m，隧道底板结构最大埋深约为31m。接收端地层主要为第四系(Q)海积沉积层、海陆交互相沉积、残积土层及燕山期侵入岩(γ52(3))。地质情况见图1。

### 2 盾构掘进过程对地层的扰动机制

盾构掘进时，外部机械作用(如推力、贯入度)导致土体应力、体积、含水量等变化，尤其破坏土体结构和密度。泥水盾构引起的变化分为四个阶段<sup>[6~10]</sup>：

a) 盾构到达前：土体受应力松弛、挤压和泥水渗透扰

动相对微弱，且随距离减小增强。

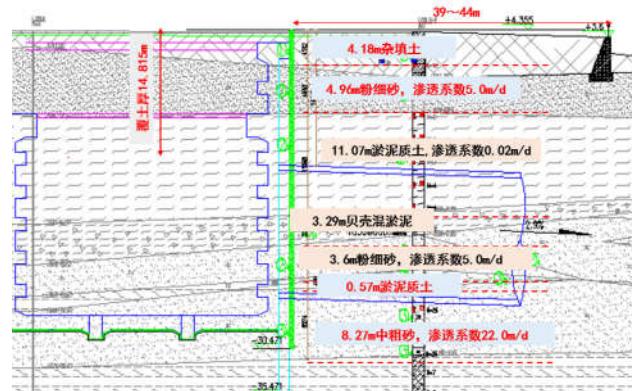


图1 西线接收端头地质纵断面示意图

b) 刀盘到达后：泥水仓压力波动造成开挖面的应力释放造成土体松弛，同时泥浆渗入土体，出现土体的分层下沉；刀盘直径大于盾体，盾体与土层形成空隙，扰动程度最大。

c) 盾尾脱出注浆阶段：管片外径小，遗留空隙需注浆；但因参数等问题，浆液不能及时填充，土体下沉，浆液进入地层，应力释放，扰动加剧。

d) 盾构远离后：浆液凝固，影响土体变形的是固结沉降和徐变效应。

### 3 盾构掘进地层变化规律分析

本文通过现场监测，从地表沉降规律、深层土体水平位移和地层孔隙水压力的变化进行分析总结。

#### 3.1 监测布置说明

盾构接收段布置监测断面如图2。

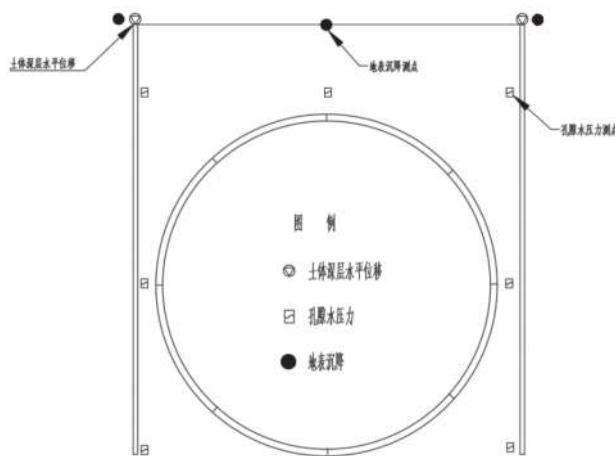


图2 地层变形测点布置剖面图

### 3.2 地层随隧盾构掘进的变化规律

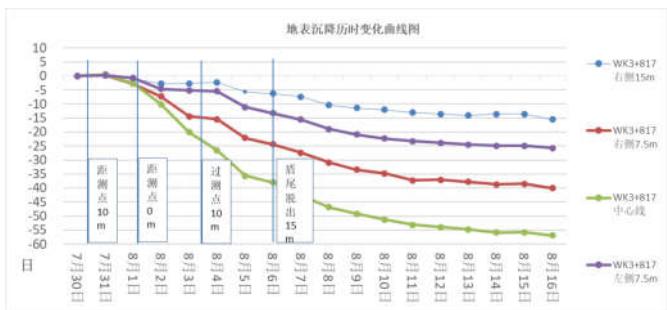


图3 地表沉降变化曲线图

### 3.2.1 地表沉降

由图3知, 地表沉降规律表现为: a微沉降或微隆起阶段(刀盘到达前5m); b沉降加速阶段(刀盘到达监测断面至盾尾到达测点); c快速沉降阶段(盾尾脱出测点至通过15m); d后续固结沉降(盾尾远离监测断面)。

### 3.2.2 孔隙水压力

由图4知, 孔隙水压力变化规律表现为: a缓慢增长阶段, 孔隙水压力因刀盘挤压作用开始缓慢上升; b快速增长阶段, 土体扰动程度达到最大, 孔隙水压力增幅最大, 压力值达到最大; c下降阶段, 盾构掘进、同步注浆作用于土体的挤压作用减小, 孔隙水压力出现下降; d恢复阶段, 地层逐步固结恢复稳定, 孔隙水压力逐步消散至稳定状态。



图4 孔隙水压力变化曲线图

### 3.2.3 土体深层水平位移

由图5知, 深层土体水平位移变化规律表现为: a缓慢增加阶段, 在刀盘距测点15m~5m时, 测点出现向隧道两侧产生5mm以内的较小位移量。b快速增加阶段, 在刀盘靠近测点至通过监测点8m时, 隧道范围内土体深

层水平位移明显向隧道轴线外侧偏移, 变形速率达到最大。c缓慢下降(向隧道内侧), 主要为盾构推进至盾尾通过监测点。d恢复阶段, 土体位移继续向隧道轴线两侧位移, 但位移变化量较之前明显减小。

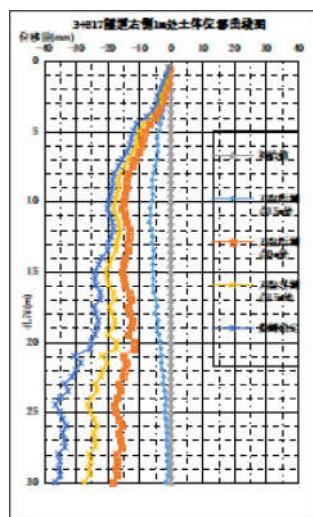


图5 深层土体水平位移变化曲线图

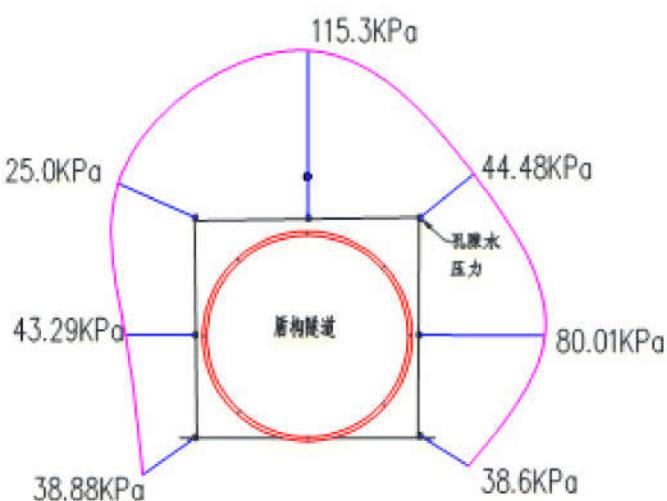


图6 隧道周边孔隙水压力分布

### 3.3 盾构掘进各阶段影响程度分析

以刀盘掘进距监测断面距离S为依据,将盾构掘进过程对地层变形发展规律分成4个阶段: a变形初步发展阶段, 盾构达到前, 即刀盘距测点S≤5m时; b变形加速阶段, 盾构通过时, 即刀盘距测点5m至通过测点10m; c快速变形阶段, 盾尾通过时, 即刀盘通过测点10m至盾尾脱出测点15m; d持续缓慢变形阶段, 盾构盾尾距测点15m以上。综上分析得出盾构掘进对临海软土地层在4个阶段的扰动比例表现出独有的特点, 即盾构到达前期占4%, 通过期占36.65%, 盾尾脱离期占37.31%, 远离期占22.14%。

### 3.4 盾构掘进扰动影响范围分析

盾构掘进过程中, 地层受施工参数、地质情况、地下水位等因素影响, 对盾构隧道周围地层产生了扰动。从孔隙水压力断面图可知(如图6, 在隧道断面图上, 距离隧道边缘越近, 应力变化越明显。同时, 隧道顶部的压力变化大于隧道侧向。

扰动影响范围按照文献1根据泥水盾构工程测试数据分析, 提出若测点距隧道距离S越近, 则其土体的应力扰动度越大。使用指数拟合式对数据进行拟合, 得到拟合式:  $R = 0.7323e^{-0.1672S}$ , 取R≥0.05为显著扰动区, 得出S≤18m, 即隧道横断面上, 盾构推进对土体的扰动范围为盾构外侧18m。

## 4 盾构掘进参数与地层变形的影响

### 4.1 掘进参数

盾构机保持连续掘进, 泥水压力变化较小, 基本维持在2.05bar左右; 掘进速度基本维持在20mm/min; 掘进过程中总挤压力(约2400KN)和同步注浆压力(约3.9bar)总体保持平衡。

### 4.2 变形影响关系

掘进中泥水仓压力、掘进速度、总挤压力对地表沉降的过程影响保持恒定, 地表沉降因掘进完成后因盾构刀盘略大于盾壳形成的空隙为主要影响; 同步注浆过程中, 因其压力大于泥水仓掘进压力, 对地表沉降有回弹, 后续固结沉降。

而对于土层深层水平位移的变化, 受泥水仓压力、掘进速度、总挤压力稳定影响稳定, 主要在盾构掘进过程中挤压土体, 使得盾构隧道范围内土体远离隧道方向发展, 土体深层位移达到最大变化, 盾构通过后同步注浆快速填充盾壳外部空隙, 土体变形虽有小幅回落, 但总体向远离盾构隧道变形变稳定。

同样, 孔隙水压力与土体深层位移变化规律相似, 受盾构隧道掘进挤压地层, 及泥浆中水量渗透作用, 使

孔隙水压力快速上升; 盾构隧道通过后, 同步注浆回填盾壳外部空隙, 但对地层挤压作用较小, 孔隙水压力随着浆液凝固和地层的固件沉降, 逐步消散恢复原稳定。

## 5 结论与讨论

通过对超大直径泥水盾构在临海淤泥软土地层掘进的变形规律, 总结出以下几点结论:

a盾构掘进到达前期、通过期间、盾尾脱离期间和盾构远离期间的4个阶段的深层土体水平位移和孔隙水压力的变化规律, 其中在盾构掘进通过与盾尾脱离注浆期间变形分别占36.7%和37.3%, 为扰动程度最大的, 是淤泥软土地层沉降重点阶段。

b超大直径泥水盾构掘进中, 在刀盘掘进至监测断面时, 土体深层水平位移与地层孔隙水压力受盾构对地层的挤压, 表现出变形速率到达最大。

c孔隙水压力最大变化为隧道顶部位置, 隧道两侧的孔隙水压在盾构隧道的中部压力较大, 且顶部测试水压力大于隧道两侧。

d根据地层扰动影响公式, 明确了盾构推进对盾构周边土体的扰动影响范围为盾构外侧18m。

e盾构的泥水仓压力、推进速度、同步注浆压力等施工参数是影响地层扰动变形的主要因素, 在淤泥软土地层如何更高效地做好快速掘进和及时同步注浆回填有效控制地层变形还需进一步优化。同时, 在后续淤泥软弱地层盾构掘进的前方中心轴线位置增加位移的变化测试, 使盾构在掘进软弱地层变化规律分析更加完整。

## 参考文献

[1]袁大军,尹凡,王华伟等.超大直径泥水盾构掘进对土体的扰动研究[J].岩石力学与工程学报, 2009, 28(10):2074.

[2]王志良, 申林方, 谢建斌等.盾构掘进开挖面前方产生超孔隙水压力的分析[J].铁道学报, 2013, 35(5):90.

[3]陈相宇, 阳军生, 梁禹等.富水砂层泥水盾构施工孔隙水压反应研究[J].地下空间与工程学报, 2018, 8(4):1064.

[4]吴柯, 张晓平, 刘浩等.粉质黏土地层超大直径泥水盾构隧道地表变形与施工参数相关关系研究[J].工程地质学报, 2021, 29(5), 1555.

[5]江华, 江玉生, 张晋勋, 武福美.大直径土压平衡盾构施工诱发地层变形规律研究[J].都市快轨交通, 2015, 28(02):94-97.

[6]王国安, 张文新.超大直径泥水盾构下穿围堰沉降规律分析[J].低温建筑技术, 2022, 33(1):162.