

滨海城市复杂地层地铁盾构机下穿旧城区施工技术

刘志杰

中铁二十五局集团有限公司盾构工程分公司

摘要：本文以深圳地铁16号线二期工程安良站~福坑站区间施工为例，针对复杂地层下穿旧城区盾构施工的综合难题，优化管片选型、掘进参数及同步注浆浆液，利用施工中积累的各种参数数据，制定出盾构掘进最优方案，为滨海城市复杂地层地铁盾构机下穿旧城区施工积累经验。

关键词：管片选型；掘进参数；厚浆；二次注浆

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.20.001

线路全长847.061m，线间距8.2m~19.24m。设置一座联络通道兼泵房，区间穿越覆土厚度约15.66~15.88m。左线先以26.542%的坡度下坡，后以8.424%的坡度上坡；右线先以27.000%的坡度下坡，后以8.796%的坡度上坡。



图1 区间线路与周边建筑物位置关系

一、工程概况

深圳市城市轨道交通16号线二期工程安良站~福坑站区间。区间出安良站沿惠盐路下穿品优荟超市，然后下穿安良加油站（侧穿安良加油站油库），区间隧道距安良加油站油库最小水平净距15.57m，随后左、右线均以R=400的曲线半径下穿多栋厂房及房屋接入福坑站。

表1 区间线路与周边建筑物情况分析表

穿越建筑物	特殊地段情况描述	影响范围(环)	该段主要地质情况
品优荟地下室(76.4X54.29m)	区间正穿，隧道顶至地下室底约7.95m。	左线35-55 右线20-65	全、强风化片岩
安良股份办公楼	区间正穿，与隧道垂直净距为13.31m	右线75-100	强风化片岩
安良加油站	区间侧穿油库，正穿油棚	右线140-170	强风化片岩
安兴路2号	区间侧穿，与隧道水平净距10.35m，隧道顶板覆土约15.32m	右线270~280	全强风化片岩
安兴路1号5栋、6栋	区间侧穿与隧道水平净距17.73m，隧道顶板覆土14.7m	右线350~355	上软下硬（粉质黏土、微风化大理岩）
沙河路107号	区间侧穿与左线隧道水平净距15.19m，隧道顶板覆土14.38m	左线325~330	上软下硬（含碎石粉质黏土、微风化大理岩）
沙河路105号A栋	区间侧穿，隧道顶覆土约14.802m，	左线335-350	上软下硬（上部为粉质黏土下部为微风化大理岩）
沙河路103号	区间下穿，隧道顶板覆土约13.84m。	左线360-375 右线345-360	复合地层（粉质黏土、强风化片岩） 上软下硬（粉质黏土、微风化大理岩）
沙河路99号	区间下穿，隧道顶板覆土约13.902m	左线400-410 右线385-395	上软下硬（粉质黏土、微风化大理岩） 复合地层（砾质黏性土、粉质黏土、含碎石粉质黏土）
沙河路95号	区间侧穿，隧道顶板覆土约13.86m	右线420~425	黏土地层（粉质黏土、砂质黏性土）
沙河路93号	区间侧穿与隧道水平净距7.13m，隧道顶板覆土约13.53m	右线435~440	砂质黏性土
沙河路91号	区间侧穿与隧道水平距离13.81m，隧道顶板覆土约13.04m	右线450~455	砂质黏性土
沙河路89号	区间侧穿与隧道水平距离18.70m，隧道顶板覆土约12.94m	右线466~470	黏土地层（粉质黏土、砂质黏性土）
沙河路87号	区间侧穿与隧道水平距离18.36m，隧道顶板覆土约13.902m	右线476~480	上软下硬（粉质黏土、微风化大理岩）

（一）工程水文地质

安良站~福坑站区间以冲洪积平原地貌为主，局部为丘陵地貌，第四系地层以冲洪积、残积成因为主，区间穿越主要地层为全强风化片岩、砂质黏性土、全风化花岗岩、粉质黏土、含碎石粉质黏土、微风化大理岩、溶洞发育区。

根据初勘沿线揭露的水文地质特征，主要分为3个基本类型分别为第四系松散岩类孔隙水、基岩裂隙水、和裂隙岩溶水，稳定水位2.0~8.7m。

二、盾构下穿旧城区施工技术

（一）优化管片选型

区间隧道设计采用圆形预制钢筋混凝土管片结

构。管片类型为通用型，管片外径6200mm，管片内径5500mm，环宽1500mm，厚度350mm，每环管片分为6块，分别为3块标准管片、两块邻接管片、1块封顶管片，拼装方式为错缝拼装。盾构机下穿城区地段位于触变地层（地层遇水极易崩解）和上软下硬地层，为保证盾构机穿越城区安全性将常规1环管片6个注浆孔形式调整为1环16个注浆孔，增大二次注浆敷设范围，确保盾构机穿越后第一时间稳定地层，避免对地面构筑物造成损伤。

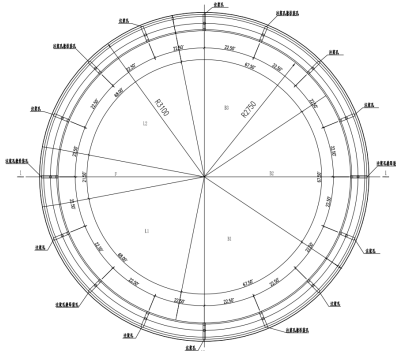


图2 增设注浆孔管片示意图

(二) 掘进参数优化

根据盾构施工的特点，盾构掘进后引起地表及结构沉降主要原因有地层损失、超挖、受扰动土超孔隙水的流失和水压力的消散，因此要针对以上不良因素优化施工参数。

1. 土压力设定

(1) 水平侧压力

在深埋隧道中，按照太沙基土压力理论计算公式以及日本村山理论，可以较为准确的计算出盾构前方的松动土压力。但在实际施工工程之中，可以根据隧道围岩分类和隧道结构参数，按照我国现行的《铁路隧道设计规范》中推荐的计算围岩垂直分布松动压力 σ_z 的计算公式：

$$\sigma_z = 0.45 \times 2^{6-S} \gamma \omega$$

γ —围岩容重

地层在产生竖向压力的同时，也产生侧向压力，侧向水平松动压力 σ_a 。由经验公式可得：

$$\sigma_a = q \times \sigma_z$$

水平侧压力系数q的计算公式见下表：

围岩分类	VI	V	IV	III	II~I
q	1/2~1	1/3~1/2	1/6~1/3	1/6	0

Hq—施工坍方平均高度， $Hq = 0.45 \times 2^{6-S} \omega$

S—围岩类别，如III类围岩，则S=3

ω —宽度影响系数，且 $\omega = 1+i(B-5)$

B—隧道净宽度，单位以m计。

i—以B=5m为基准，B每增减1m时的围岩压力增减率。当B<5m时，取i=0.2，B>5m，取i=0.1。

查资料可知：围岩等级为v类围岩，水平侧压力系数q为1/3~1/2，隧道净宽度B为6.2m。围岩容重r为1.86g/cm³，i为0.1。

$$\sigma_z = 0.45 \times 2^{6-3} \gamma \omega = 0.45 \times 2^{6-3} \times (1+0.1 \times (6.2-5)) \times 1.86 = 1.842 \text{ kg/cm}^2 = 0.1842 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_a = q \times \sigma_z = (1/3 \sim 1/2) \times 0.1842 = 0.0614 \sim 0.0921 \text{ Mpa}$$

(2) 地下水压力计算

由于盾构推进中会打破地下水压力平衡，使得地下水进入土仓。此时的水压力为：

$$\sigma_w = q \times \gamma h$$

q—根据土层渗透系数确定的一个经验数值。砂土中q=0.8~1.0，黏性土中q=0.3~0.5。

γ —水的容重

h—地下水位距离刀盘顶部的高度。

查资料可知：渗透系数q=0.5。水的容重r=1000kg/m³。h=13.41m

$$\text{地下水压力 } \sigma_w = q \times \gamma h = 0.5 \times 1000 \text{ kg/m}^3 \times 13.41 = 0.067 \text{ Mpa}$$

(3) 预备应力

根据不同的施工环境、施工条件及施工经验，考虑0.010~0.020Mpa的压力值作为调整值来修正施工。

(4) 土压力初步设定值

$$\sigma_{\text{初步设定最小}} = \sigma_{\text{水平侧向力最小}} + \sigma_{\text{水压力最小}} + \sigma_{\text{调整最小}} = 0.0614 + 0.067 + 0.020 = 0.1484 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{\text{初步设定最大}} = \sigma_{\text{水平侧向力最大}} + \sigma_{\text{水压力}} + \sigma_{\text{调整最大}} = 0.0921 + 0.067 + 0.02 = 0.1791 \text{ Mpa}$$

2. 其他参数设定

(1) 盾构机推进速度

根据土仓压力和刀盘扭矩，适当调整盾构机推力大小，使盾构机的掘进速度软土地层控制在75mm~80mm/min范围内，在硬岩地段掘进速度控制在10mm~20mm/min，匀速掘进施工。

(2) 刀盘转速

刀盘转速当掘进速度确定后，本工程施工，刀具贯入度不超过30mm/r，刀盘转速为1.2rpm~1.5rpm，现场施工选用1.4±0.1rpm，并根据掘进过程中刀盘扭矩值进行相应调整。

(3) 刀盘扭矩

本工程为防止因刀盘扭矩过大，加大土体扰动性。软土地层扭矩一般控制在1500~2000kN·m以内，减少对土体扰动，硬岩地层控制在3000~3500kN·m。

(4) 渣土改良

本工程根据地层富水情况，必要时采用填仓反压方式，将地下水阻隔在土仓外，控制地下水流失及防止或减轻螺旋输送机排土时的喷涌情况。

为提高填仓效率，选用填仓材料为厚型浆液即本工程采用的同步注浆浆液配比如表3。

泡沫：90~95%压缩空气和5~10%泡沫溶液；泡沫溶液的组成为泡沫添加剂3%、水97%。本工程所用泡沫剂黏度不低于0.1Pa·s。

出土量控制：

盾构掘进过程中，严格控制出渣量，并做好每环出渣量的记录。

出土量计算

$$Q = k \times \frac{\pi}{4} \times D^2 \times L$$

其中：Q—出土量；K—松方系数（本区间软土层取值1.3，岩层取值为1.4）；D—刀盘外径（6.4m）；L—管片环宽。计算得，出土量一般控制在63~67m³。盾构掘进过程中要时刻对渣样进行取样分析，并根据实际情况对松方系数进行调整。

(三) 同步注浆和二次注浆

1. 优化同步注浆

本工程对同步注浆浆液采用厚型浆液每环注浆量控制在7m³以上。由于盾构掘进过程中不确定因素较多，因此同步注浆采取注浆压力与注浆量双控原则作为指导，即注浆量达到理论值但注浆压力未能达到预设压力值，在此情况下初步判断地层受盾构掘进影响较为松散或可能存在未探明空洞需继续补浆禁止推进同时做好地面监

测，直至注浆压力到达预定值。

在工程施工选用同步注浆浆液为厚型浆液，盾构掘进过程中存在5个阶段沉降，分别对应4个阶段的沉降控制。厚浆因其稠度大、流动性差、不易流失、止水效果好、凝结时间长等特点。在盾构机掘进的过程中，通过从盾体径向孔同步注入到盾体外，填充盾体与土体之间的间隙，快速达到支撑盾体外部土体和止水的效果，且不会包裹盾体，有效控制盾构推进时所引起的第3阶段沉降。在本施工环节调整原同步注浆设备下部两路注浆管路至盾体径向孔位置，保留上部两路继续经盾尾进行管片与土体之间同步注浆，保证第3阶段与第4阶段沉降控制。同步注浆厚浆浆液配合比为：石灰107kg/m³、砂859kg/m³、粉煤灰430kg/m³、膨润土54kg/m³、水430kg/m³，扩展度控制在15cm以内。

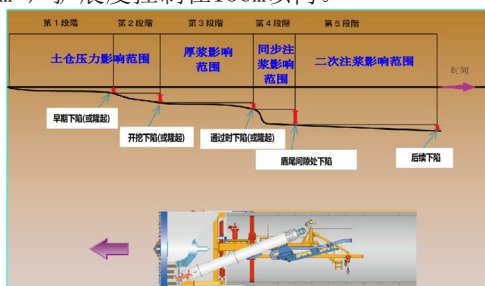


图3 盾构掘进沉降影响示意图

2. 二次注浆

注浆目的：由于厚浆凝结时间较长且强度较差，管片脱出盾尾后在盾构机推力影响下易产生变形，因此在管片脱出盾尾后4环要及时进行二次注浆稳定管片，保证隧道成型质量。

二次注浆采用水泥浆+水玻璃组成的双液浆，注浆压力控制在比该位置水土压力增加0.1~0.2Mpa，使浆液具有一定的扩散能力，又不至于对周边土体和注浆体产生较大影响。

二次补压注浆用水泥水玻璃双液浆，水泥采用42.5#普通硅酸盐水泥，水玻璃采用35Be的浓度。

浆液水灰比为：1：1.2，水玻璃溶液与水按1：1.5进行稀释。

水泥浆与水玻璃稀释液的配比（体积比）为：2：1。

注浆压力控制在0.4Mpa~0.5Mpa，不宜过大。

如二次注浆饱和后建筑物仍有沉降趋势，区间穿越段均选用增设注浆孔管片，必要时可采用洞内注浆加固，注浆管采用φ42、t=3.5mm，孔眼间距为150mm交错布置长度为3米的钢管管进行加固处理注浆参数参考地面注浆参数。施工过程中对建筑物进行严密监测，以防止注浆压力过大造成地面隆起过大，影响建筑物安全。

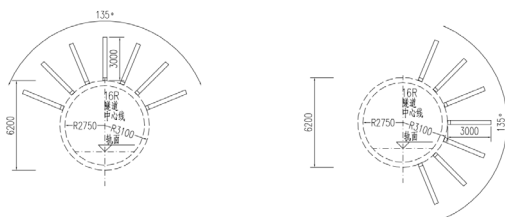


图4 钢管注浆加固示意图

（四）建筑物保护措施

为保护建筑物安全采取地面袖阀管跟踪注浆加固方式对建筑物进行保护，需要保护的建筑物采取向基础下方斜向打设袖阀管，双排袖阀管注浆加固间距

1.2×1.2m，梅花形布置。

注浆材料采用P.042.5级普通硅酸盐水泥，水泥浆的水灰比宜为0.6~2.0，常用水灰比为1.0。注浆孔间距应根据现场试验确定，宜为1.0m~2.0m；注浆孔可布置在基础内、外侧。浆液的初凝时间，砂土地基中宜为5min~20min，黏性土地基中宜为1h~2h。施工前，应通过现场注浆试验确定注浆量和注浆有效范围。在黏性土地基中，浆液注入率宜为15%~20%。注浆点上的覆盖土厚度不应小于2.0m。劈裂注浆的注浆压力，在砂土中宜为0.2MPa~0.5MPa，在黏性土中宜为0.2MPa~0.3MPa。袖阀管扩散半径为0.6m。跟踪注浆加固至区间隧道拱顶3m~4m。

三、数据分析

以盾构机下穿品优荟及安良股份办公楼区段掘进数据进行分析，对初步制定的掘进参数进行相应的调整，土仓压力稳定在1.5bar实土压稳定在1/2仓位置，推力控制在1100t~1300t保证管片环间止水条有效挤压，刀盘扭矩控制在1500~2000KN/m以减小因扭矩过大增加对地层扰动，推进速度控制在75~80mm同时保证同步注浆量，刀盘转速稳定在1.3rpm根据刀盘扭矩变化可做相应调整，出土量控制在63m³。出土量超过控制值或土仓压力出现骤减情况第一时间进行填仓反压措施，以保证掌子面稳定，反压压力值为1.9bar。按照以上推进参数及施工措施进行掘进，安全有效的完成了建筑物穿越，施工过程中建筑物最大沉降量为-3.5mm，隆起值为0.14mm，沉降控制值要求为30mm。

四、盾构机下穿旧城区注意事项

（1）盾构机在下穿建筑前要设立试验段，提前做好掘进参数，避免在建筑物下长时间停机风险；

（2）盾构机在下穿建筑前对盾构机及其辅助设施进行维修保养，确保机械设备运转正常，避免异常停机；

（3）盾构机穿越期间，严格把控同步注浆与二次注浆量，做好厚浆与二次注浆浆液用量统计，避免造成管片上浮与错台问题，引发成型隧道质量事故；

（4）盾构机穿越上软下硬地段时，关注土压及出渣量变化，避免异常泄压和超方引起地面沉降及房屋沉降；

（5）加强地面监控量测与盾构施工相结合，及时对盾构掘进参数及注浆参数进行调整，避免因建筑物沉降或隆起，造成建筑体系损害。

五、结语

盾构穿越施工中，试验段掘进参数起到有效的指导作用，保证盾构机掘进过程“匀速、稳定、高效、高质”。同步注浆厚浆与二次注浆浆液混合使用，对稳定地层、稳固管片、区间止水起到了显著效果，提高了盾构施工的安全性与可靠性，同时降低了后期隧道缺陷处理成本。增设注浆孔管片的使用大幅度增加了二次注浆敷设范围，使得注浆量更加饱满，避免了因集中注浆压力过大造成管片出现质量问题的情况发生。

参考文献

[1]张煜,王大永,张壮壮,等.天津滨海软土地地铁盾构隧道施工对地面结构的影响研究[J].施工技术(中英文),2022,51(21):11-16
 [2]李隆海.地铁盾构施工对上部建筑物影响的参数敏感性分析[J].市政技术,2022,40(9):132-139
 [3]郝景益.盾构隧道厚型浆液试验及经济分析[J].流体测量与控制,2022,05.
 [4]王强.复合地层盾构施工泡沫剂与同步注浆参数研究[J].现代交通技术,2022,06.