

# 盾构穿越复杂地质区既有桥梁安全保障措施

徐 宵

(广东粤海珠三角供水有限公司, 广东 深圳 518100)

**摘 要** 盾构下穿既有建构筑物是施工安全的高风险区段, 直接关系到上方结构的安全稳定。本文对珠江三角洲水资源配置工程杨屋跨线桥下盾构穿越实例进行分析, 通过盾构现场施工过程中对掘进模式、土压力、出渣量、渣土改良措施、刀盘扭矩、掘进速率、姿态校正、地层加固及安全监测等方面的控制, 辅以有限元模拟加以证明, 旨在实现盾构隧洞安全下穿复杂地质既有桥梁, 为同类盾构穿越施工提供参考。

**关键词** 盾构穿越; 复杂地质; 掘进参数; 安全保障

**中图分类号**: U447

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.26.040

## 0 引言

随着我国社会经济的不断发展, 城市居民用水需求激增, 地下新建水利工程使用盾构法也越来越广泛<sup>[1]</sup>, 随之带来的是盾构隧洞不可避免的下穿高层建筑物、地铁及桥梁等既有设施<sup>[2]</sup>, 如盾构下穿过程中安全技术措施管控不到位, 加之地质条件复杂, 极有可能出现建筑物开裂倾斜、地铁隧洞塌陷乃至桥梁受损坍塌等事故, 造成严重的社会舆论问题<sup>[3]</sup>。盾构隧洞近距离下穿既有桥梁作为一类经典案例, 为保证既有桥梁安全平稳运行, 有必要对盾构穿越期间的相关要点展开研究<sup>[4]</sup>。本文以珠江三角洲水资源配置工程27-28#井盾构输水隧洞下穿东莞市大岭山镇杨屋跨线桥为例, 系统研究盾构穿越作业过程的安全管控措施, 为类似工程提供实践参考。

## 1 工程概况

### 1.1 盾构隧洞概况

珠江三角洲水资源配置工程(下称珠三角配水工程)横贯珠三角核心区域, 西起佛山市顺德区鲤鱼洲岛(取水西江), 东至深圳市公明水库, 全长113.2公里, 通过1条主干线、2条分干线和1条支线组成的输水网络, 将西江水资源调配至珠三角东部地区<sup>[5]</sup>。位于东莞市大岭山镇的珠三角配水工程主干线27-28#盾构区间, 连接工程27、28#工作井, 路径地处高度城市化区域, 建筑密集, 采用单台 $\phi 8\ 630$  mm复合式土压平衡盾构机进行掘进。27-28#井盾构区间穿越中远古代混合片麻岩, 面临复杂风化地层挑战: 全、强、弱风化带交错非均质, 形成“上软下硬”(软土覆硬岩)的二元结构, 局部含强弱风化球状孤石。围岩类别III~V级, 稳定性差, 盾构掘进风险高、难度大。

### 1.2 盾构下穿概况

盾构下穿的杨屋跨线桥位于东莞市莞长路范围, 是大岭山镇与长安镇的重要交通枢纽, 发挥着承担过境交通以及市区交通的重要功能<sup>[6]</sup>, 该桥梁设计为正交预应力混凝土连续梁体系, 总长370 m, 标准跨径30 m(共13跨), 两端设置25 m边跨, 上部主梁为预应力混凝土箱梁, 下部配置薄壁式桥墩, 设计桥面高程为45.0 m, 桥下净空约8.0 m(地面高程37.0 m)。

珠三角配水工程27-28#井盾构输水隧洞与杨屋跨线桥交叉穿越, 隧洞洞身段由桥梁8#和9#桥墩之间穿过, 其中8#桥墩与输水隧洞水平距离最短为5.82 m, 9#桥墩最小水平距离为8.85 m。从纵断面上看, 盾构输水隧洞与莞长路杨屋跨线桥交叉处的隧洞中心线高程约2.93 m, 隧洞顶部高程为7.08 m; 跨线桥8#桥墩的8-1#灌注桩底高程最低, 位于输水隧洞洞顶上方5.53 m处, 9#桥墩的9-1#灌注桩底高程最低, 位于输水隧洞洞顶下方1.05 m处, 整体上盾构输水隧洞与跨线桥穿越水平和垂直距离较近, 如过程中不加以控制, 可能对桥梁产生不可逆的结构损伤。

## 2 盾构穿越安全管控措施

### 2.1 盾构掘进模式选定

盾构机从杨屋跨线桥8#和9#桥墩穿过, 根据地质资料, 前半段掘进在全断面硬岩中由于岩层自稳性较好可正常掘进, 随着地层的变化, 在进入上软下硬段通过逐步调整压力, 采用保压推进模式, 调整压力阶段在土舱内保留2/3渣土, 采用压缩空气与膨润土浆复合注入技术, 对开挖面顶部土压力进行调控, 以实现掌子面稳定。

## 2.2 盾构土仓压力值选定

盾构穿越段地表覆土厚度为 29.7 m，水位线高程约为 28.3 m，水位线距隧洞顶约 21.22 m。在全断面硬岩地层掘进，地层稳定，为防止较大的地下水流失，采取气压辅助模式掘进，气压宜控制在 2.1bar。在上软下硬复合地层中掘进时，采用土仓满载作业模式，通过维持仓内压实土体的压力来实现掌子面稳定，具体土压  $P$  计算方法如下：

$$P = P_w + P_r$$

式中： $P_w$  为隧道中心土压， $P_r$  为不同地质条件下压力调整值，考虑为 0.1bar。

$$P = 1.0 \text{ kg/m}^3 * 9.8 \text{ N/kg} * (21.22 \text{ m} + 4.3 \text{ m}) + 0.1 \text{ bar} = 2.6 \text{ bar}$$

综上，盾构穿越上软下硬复合地层时的压力值为 2.6bar。

## 2.3 盾构排渣效率及渣土性状改良

27-28# 井盾构输水隧洞所采用的盾构机开挖直径为 8.63 m，预制混凝土管片环宽为 1.6 m，每环理论出渣量为 93.6 m<sup>3</sup>/环，实际出渣量考虑 1.5 倍的松散系数为 140.4 m<sup>3</sup>/环，盾构机掘进过程中严格控制出渣量，对每环的出渣量进行统计，通过垂直 + 水平连续皮带出渣，如发现超挖或者出渣量明显增大的情况，立即分析原因并跟进二次注浆。

在盾构穿越过程中，极易出现刀盘界面因粘性土流变特性失衡产生泥饼效应，此固体引发掘进参数失控，并可能升级为主轴承热黏着失效的灾难性故障。为避免穿越期间出现长时间中断，进一步扩大对桥梁的影响，在盾构施工期间采用泡沫剂作为渣土改良材料，泡沫剂浓度范围 2% ~ 3%，目标发泡倍率 8 ~ 10，压缩空气注入速率 80 L/min，每开挖 1 m<sup>3</sup> 注入量 300 ~ 600 L。通过上述优化土体改良参数与剪切作用，显著增强压力舱内渣土的塑性流变性能，达到渣土改良的效果。

## 2.4 盾构刀盘扭矩和掘进速率控制

盾构穿越桥梁前半段地质为全断面硬岩，考虑围岩情况，控制盾构以 20 ~ 25 mm/min 的速度推进，刀盘转速维持在 1.8 ~ 2.4 r/min，同时将刀盘扭矩严格控制在 10 000 kN·m 以下，在上软下硬地层过渡段前，开始逐步改变土仓压力设定值，同时执行刀盘转速下调。

针对上覆软岩、下部硬岩的不均质地层，刀盘面临不均匀的土体应力，软岩段只需切削掌子面便能破碎。为此，盾构掘进控制参数设定为：掘进速度 15 ~ 20 mm/min、刀盘转速 1.0 ~ 1.5 r/min、扭矩限值 10 000 kN·m 以内，核心目的是确保土仓压力稳定。实际施工需动态调整掘进速度，适时减小推力和刀盘

转速，力求推进均匀，最大限度地降低地层扰动。

## 2.5 盾构掘进姿态校正

受隧道曲线和坡度变化影响，盾构推进易产生姿态偏差，加剧对邻近桥梁桩基的扰动，一旦姿态偏差超标，将可能导致衬砌侵入限界、盾尾间隙过小恶化管片受力状态、地层损失增加进而放大桩基及地表沉降的问题。因此，在穿越敏感区域期间，必须基于实时监测的盾构姿态、盾尾间隙和推进油缸行程数据进行管片选型，若监测到盾尾间隙不足 50 mm 或油缸行程差超过 50 mm，必须立即实施姿态调整。整个掘进过程需严格控制姿态，力求平稳推进，最大程度地避免纠偏操作，若确需纠偏，必须严格限制单环的纠偏量不超过 3 mm。

## 2.6 盾构掘进地层加固

为最大限度地保护穿越区桥梁，防止其因土体 / 地下水变动产生位移变形，地层加固采用管片衬砌背后的同步注浆，起到支护围岩、管控地表沉降、辅助密封三重作用。基于隧道实际穿越地层特性，注浆与掘进严格同步进行，系统采用双三泵六管路设计（六注入点对称布置），在盾构尾部产生建筑空隙的同时立即实施注浆填充，避免掌子面出现变形等问题，具体布置见图 1。

盾构穿越后为针对性降低桥梁扰动风险，采取即时二次补浆的地层加固措施，管片出盾尾后即刻启动，补浆量取同步注浆量的 10% ~ 15%，补浆采用低压力、小剂量、分多次注入的方式，动态弥合浆液收缩导致的空隙；同时鉴于穿越段隧洞下坡特性，同步施作止水环，拦截管片衬砌后方的渗水向刀盘方向流动，防止掌子面失稳。

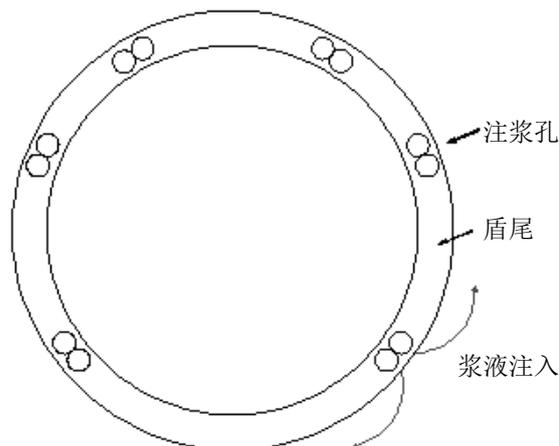


图 1 盾构穿越同步注浆示意图

## 2.7 衬砌管片施工控制

确保衬砌管片的高质量拼装,对于盾构隧洞实现设计寿命和保持永久性防水能力至关重要。若管片安装不到位,可能造成地下水大量涌入隧洞,引起穿越桥梁的失稳。在施工过程中应严格控制管片不得出现裂缝、破损、掉角等现象,盾构姿态前点与隧道设计轴线的允许偏差不得超过4 cm,相邻管片错台不得超过0.8 cm;管片防水采用三元乙丙(EPDM)弹性橡胶密封垫(止水条),粘贴前应清除管片表面附着物,保证基面洁净,密封垫必须安装牢固、表面平整、接缝严密、位置准确,杜绝密封垫鼓起情况。

## 2.8 盾构穿越安全监测

27-28# 盾构输水隧洞从杨屋跨线桥 8# 和 9# 桥墩之间穿过,8# 和 9# 桥墩受盾构隧洞施工较大,7# 和 10# 桥墩距离盾构隧洞水平距离大于 30 m,影响相对较小。盾构施工期间主要考虑杨屋跨线桥 8# 和 9# 桥进行水平位移和竖向位移观测,在每座桥墩四周布置 4 个沉降测点,垂直盾构方向分别布置 1 支倾角计。盾构穿越变形控制以最大水平/竖向位移 $\leq 6$  mm 为限,警戒值设置为 4 mm,同时辅以人工巡视措施,当监测位移超过警戒值或人工巡视发现明显变形或塌陷时,立即查明原因并及时做加固处理。

## 2.9 桥梁沉降应急处置

若桥墩监测沉降数据达警戒值 4 mm 时,即进入应急处置状态,据现场掌子面稳定情况,做好保压停机工作。为有效控制沉降并保护盾体,一方面通过地面注浆与洞内超前注浆,对桥墩基础周区岩土体进行加固;另一方面在盾构机体周围注入膨润土泥浆,形成阻隔屏障,防止注浆浆液渗流迁移并包裹盾体。地面注浆加固采用即时注浆工艺加固,注浆深度控制为洞轴线范围,布孔间距设置为 $3 \times 3$  m,注浆液水灰比为 1:1,具体注浆范围见图 2。

## 3 盾构穿越有限元分析

为进一步加强盾构安全穿越杨屋跨线桥可靠性,通过有限元数值模拟分析的方法,计算了盾构穿越期间,杨屋跨线桥 7#、8#、9#、10# 桥墩的水平位移、垂直位移和总位移等参数。计算结果显示,27-28# 井盾构隧洞施工期间,杨屋跨线桥桩基的最大水平位移为 2.0 mm,最大竖向位移(沉降)-1.5 mm,最大总位移 2.5 mm,表明盾构穿越期间桥梁桩基位移处于微小范围,盾构施工安全可靠,未对跨线桥梁基础及

结构产生明显影响,下穿相关安全管控措施可行有效。

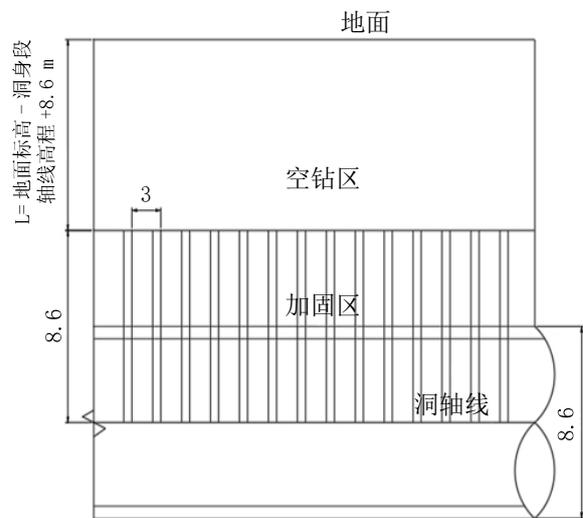


图 2 应急注浆范围布置图

## 4 结束语

以珠江三角洲水资源配置工程杨屋跨线桥下盾构穿越为例,通过控制盾构施工过程中的各项安全管控措施,克服上软下硬的复杂地质和桥梁桩基距离过近的双重影响。盾构安全穿越既有桥梁的实践成果,为同类水利工程提供了技术方案参考。

## 参考文献:

- [1] 李强,李子阳,王长生,等.长距离输水隧洞盾构法施工风险事件路径预测[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(05):999-1009.
- [2] 穆坤,吴佐政,张建新,等.基于模糊C均值聚类的地铁盾构穿越既有桥梁风险评价及控制措施[J].天津城建大学学报,2025,31(02):95-100.
- [3] 王伟楨.输水管线穿越重要建(构)筑物的特殊施工技术研究[J].珠江水运,2024(15):116-118.
- [4] 罗旭,阮艳妹,林珊,等.盾构切削穿越既有桥梁桩基安全性分析研究[J].广东土木与建筑,2023,30(12):70-72,76.
- [5] 杜灿阳,邓鹏,张兆波,等.BIM+GIS技术在珠江三角洲水资源配置工程中的应用[J].人民珠江,2022,43(02):30-39.
- [6] 刘子豪,王彪,成冰.高度城镇化地区公路市政化改造策略研究:以国道107莞长路为例[J].交通与运输,2024,37(S1):199-203.