

盾构长距离下穿地下通道掘进参数优化

李志文¹ 袁霄雷²

1 中国电建集团铁路建设有限公司, 北京 100044

2 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070

[摘要] 地铁盾构掘进施工参数是控制地表沉降和城市道路安全的关键环节。文章研究了盾构长距离平行下穿地下通道复合地基时, 掘进参数对路面变形的影响, 并提出了掘进参数优化值。研究表明, 复合地层以下隧道埋深越深, 由于淤泥质土扰动引起的地表沉降越大, 隧道顶部二次加固范围越大, 地表沉降越小。优化后的土仓压力为 2MPa, 二次注浆加固厚度 2m, 壁厚注浆压力为 0.36MPa。

[关键词] 盾构; 复合地基; 等效模量; 掘进参数

DOI: 10.33142/aem.v2i3.1804

中图分类号: U455.43

文献标识码: A

Parameters Optimization of Tunneling for Long Distance Underpass of Shield Tunnel

LI Zhiwen¹, YUAN Xiaolei²

1 PowerChina Railway Construction Co., Ltd, Beijing, 100044, China

2 School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei, 430070, China

Abstract: The construction parameters of subway shield tunneling are the key links to control surface settlement and urban road safety. The article studies the influence of tunneling parameters on pavement deformation when the shield tunnel passes through the composite foundation of the underground tunnel under long distances, and proposes optimized values of tunneling parameters. The research results show that the deeper the buried depth of the tunnel below the composite stratum, the greater the surface settlement caused by the muddy soil disturbance, the larger the secondary reinforcement range at the top of the tunnel, and the smaller the surface settlement. The optimized soil bunker pressure is 2MPa, the thickness of the second grouting reinforcement is 2m, and the wall thickness grouting pressure is 0.36MPa.

Keywords: shield; composite foundation; equivalent modulus; tunneling parameters

引言

城市地铁施工常常处在繁华街市这些区间建筑稠密, 交通繁忙, 地下管线密集。因此施工中对沉降必须严格控制。对于沉降控制指标, 国内一些城市通常以 30mm 作为地面沉降允许值^[1], 并一直将这一标准作为地铁工程施工对地面环境造成影响的最小值但随着地铁施工工程的不断增加, 高难度施工项目不断出现, 这一标准已不能满足施工需要, 施工中必须根据现场实际条件通过分析和计算来确定合理的沉降控制值。

曾庆军、廖建春^[2]对高速公路新旧差异沉降控制标准中指出: 沥青混凝土路面中, 当工后路基横向沉降比, 即路基路拱横向坡度变化大于 0.35% 时, 路面结构破坏; 计算条件下的水泥混凝土路面中, 当工后路基路拱横向沉降比, 即路基路拱横向坡度变化大于 0.5% 时, 路面结构破坏。Kobayashi 等从施工方法、隧道线位、隧道断面形状、隧道支护和防水、控制承压水、洞口保护和开挖面稳定、监控量测全面描述了城市隧道下穿既有运营铁路的规划、设计和施工, 在监测中对于轨道的沉降给予了高度的重视, 按照铁路的维修规则建立了 3 项控制标准, 当轨道的沉降超过控制标准时, 启动三级应急管理程序。深井降水允许的轨道沉降为 2mm~4mm 隧道开挖允许的轨道沉降为 3mm~6mm, 轨道最终的允许沉降为 10mm。根据《公路技术状况评定标准》(JTC H20-2007), 公路技术状况包含路面、路基、桥隧构造物和沿线设施四部分评价内容, 其中路面包括沥青路面、水泥混凝土路面和砂石路面^[3]。当地表沉陷大于 25mm, 路面缝宽大于 3mm, 路面损坏登记为重; 当沉陷深度大于 25m, 路面将出现重度损坏。水泥混凝土路面接缝错台大于 10mm 时, 路面损坏等级为重。

根据我国《城镇道路工程施工与质量验收规范》(CJJ1-2008) 中的规定, 市政路面沥青路面的纵断面高程允许偏差为 ±15mm, 主干道平整度的标准差 σ 应小于 1.5mm, 而在高架桥下路面不均匀沉降病害处的纵断面高程及平整度明显远

远达不到规范的要求。路面的“波浪型”不平整，使得在道路左侧行车的车辆一直处于颠簸状态，严重影响了路面行车的舒适性。

综合上述城市道路沉降控制标准，盘屿地道结构控制标准按沉降 $\leq 20\text{mm}$ 控制。

1 工程概况

福州地铁 5 号线沿线大部分地表分布道路、村庄、民房和菜地，地势较平坦，相对高差较小，沿线的地貌单元以冲海积-海陆交互相地貌单元为主。区段主要地层工程地质特性如下：

2-4-5（泥质）粉砂：呈深灰色，局部松散或中密，饱和，主要成分为石英，以粉砂为主，另含淤泥质及少量有机质，级配不良。本层大部分以中薄层状或透镜体状零星分布为主。

2-6 粉质黏土：呈灰白、灰黄色，可塑-硬塑状态，很湿，含少量砂粒和粉粒，摇振反应慢，捻面较粗糙，无光泽，干强度及韧性中等，粘性一般，部分粉粒含量较高，土质不均。

3-1-1 粉质黏土：呈灰绿、灰黄色等色，可塑-硬塑，很湿，捻面较光滑，有光泽，无摇振反应，干强度与韧性中等，粘性较好，部分粉粒含量较高，土质不均，局部含少量砂。

3-1-2（含砂）粉质黏土：呈灰绿、灰黄等色，可塑-硬塑，很湿，含有一定的砂粒，局部夹少量砾石，捻面不够光滑，少有光泽，无摇振反应，干强度与韧性相对较差，粘性一般，土质不均。

3-4-2 淤泥质土：呈深灰色，流塑，饱和，以粘粒为主，偶混有少量粉细砂或夹薄层粉细砂，局部含腐烂植物碎屑，有腥臭味，摇振反应慢，有光泽，捻面光滑，干强度及韧性中等。

区间左线从盘屿地道立柱桩间下穿，立柱桩， $\Phi 800$ 钻孔灌注桩，桩底标高-13m。隧道最小净距为 4.4m，区间右侧穿盘屿地道围护结构，围护结构为 $\Phi 1000$ 钻孔灌注桩，桩长 18m，桩底标高-12m。区间距其 2.4m。下穿盘屿地道范围内盾构隧道上方 120° 范围进行二次注浆加固，二次注浆采用双液浆，水泥掺量为 20%。穿越软弱地层盾构隧道下方 120° 范围进行二次注浆加固，二次注浆采用双液浆，水泥掺量为 20%。

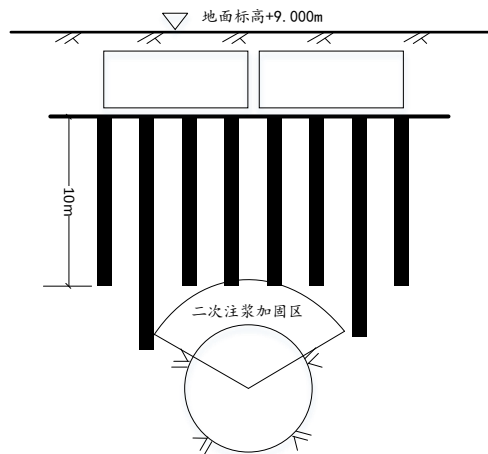
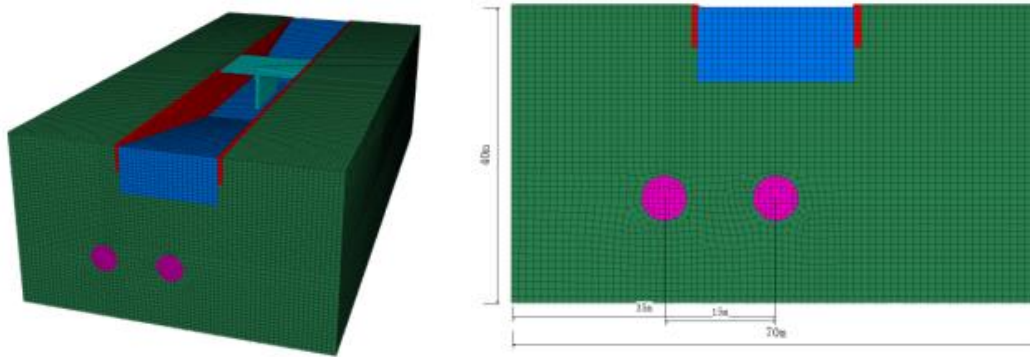


图 1 旋喷桩加固路基与盾构隧道空间关系

根据已有的工程地质资料和盾构设计参数，建立盾构施工三维数值分析模型。三维模型如下图所示：



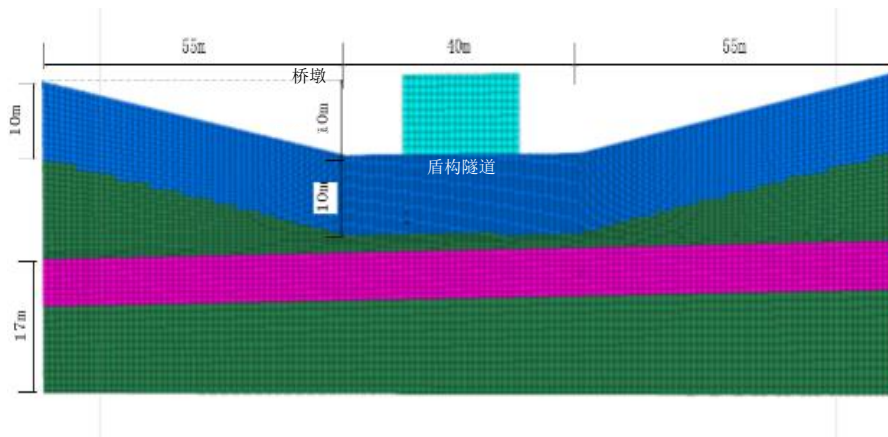


图2 工程区域三维模型图

从图1、图2布置图中分析可知,盾构掘进引起地下通道路面变形最敏感区域应在桥墩范围。因此将路段作为重点研究对象。

2 盾构下穿对地表沉陷影响分析

研究盾构掘进过程对道路扰动变形的影响,首先需要研究复合地基等效变形模量的选取。部分学者通过解析方法给出单桩复合地基等效模量计算方法^[3-8],这里采用数值方法计算群桩加固复合地基等效变形模量。

2.1 旋喷桩加固复合地基等效模量

福州地铁5号线区间盘屿地下通道加固复合地基中桩体和土体参数如表1所示。

表1 复合地基材料物理力学参数

	重度 (kN/m ³)	横截面积 (m ²)	变形模量 (Pa)	泊松比	摩擦角 (°)	内聚力 (kPa)
土	14.094	3.215	3.0×10^6	0.35	8	7.7
桩	17.037	0.785	1.5×10^8	0.32	27	200

采用数值模拟不同尺寸的平板载荷试验的方法研究复合地基等效变形参数的取值。三维模型如图2所示,正方形承压板尺寸边长从小到大分别为2m, 4m, 6m, 8m, 10m, 12m。桩身与土体单元采用摩尔库伦模型,参数取值见表1。

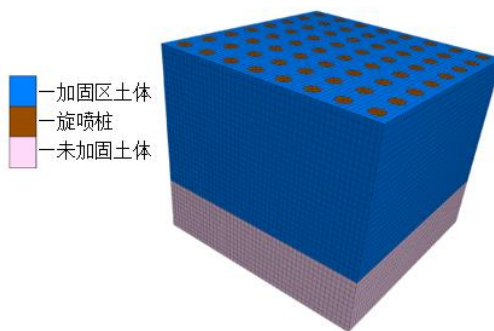


图3 复合地基三维模型

采用位移固定边界条件,模拟刚度无穷大的虚拟承压板加载在模型顶面加载,由中心开始加载,承压板尺寸逐渐扩大。承压板厚度为0.2m;固定加载速率,同时监测桩顶位移及应力,当观察到应力应变曲线出现明显拐点时,视为计算完成。同时,采用同样方法进行均匀介质的承压板加载试验,当均匀介质加载的P-S曲线与复合地基加载曲线规律一致时,均匀介质的变形模量可视为复合地层等效的变形模量。分别进行不同尺寸承压板的加载试验,承压板边长覆盖的桩土加固单元(每个单元2m*2m)对应的等效变形模量,计算结构如图3所示,显然,随着加载尺寸的增加,复合单元等效模量受群桩效应影响而逐渐降低,当受力范围大于一定尺寸后,等效变形模量将趋于稳定,此稳定值即为

大范围加固区域复合地基等效变形模量。本文研究对象的盘屿地下通道复合地基等效变形模量取值为 12MPa。

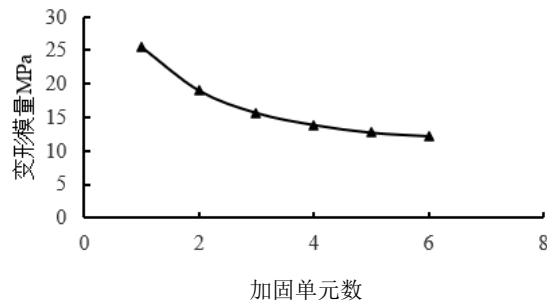


图4 复合地基平板载荷变形模量曲线

2.2 不同土仓压力条件地下通道沉降变形对比

通过估算盾构刀盘前方水土压力, 选取土仓压力分别为 1.5MPa, 1.7MPa, 2.0MPa 和 2.5MPa 时, 计算掌子面前后方 30m 范围路面沉降变形规律, 分析结果如图 5。

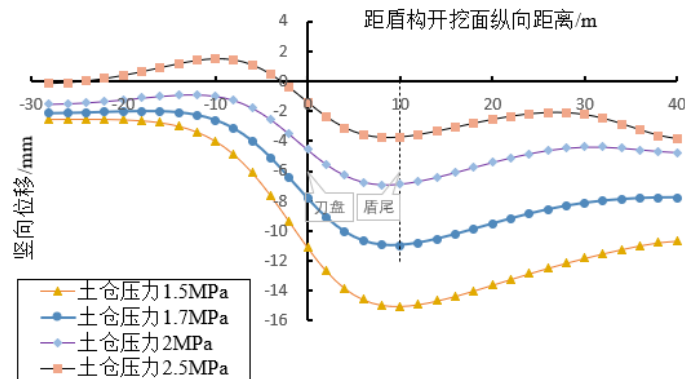


图5 不同土仓压力时沿隧道轴向地表沉降

当土仓压力为 1.5MPa 时, 地表最大沉降点位于盾尾所在断面, 地表最大沉降为 15.02mm; 当土仓压力为 1.7MPa 时, 地表最大沉降点位于盾尾所在断面, 地表最大沉降值为 10.97mm; 当土仓压力为 2.0MPa 时, 地表沉降最大点位于盾尾前方 2m 断面, 地表最大沉降值为 6.93mm; 当土仓压力为 2.5MPa 时, 地表最大沉降点位于盾尾前方 2m 断面, 地表最大沉降值为 3.78mm。从不同土仓压力参数计算结果可以看出, 随着土仓压力的增大, 地表最大沉降值逐渐减小, 最大沉降点均在盾尾断面附近。

2.3 不同桩端间距条件地下通道沉降规律

由图 1、2 可知, 地下通道上坡段与下坡段盾构隧道轴线与复合地基地层垂直距离会发生变化, 在隧道距桩端距离不同条件下的路面沉降变化规律如下:

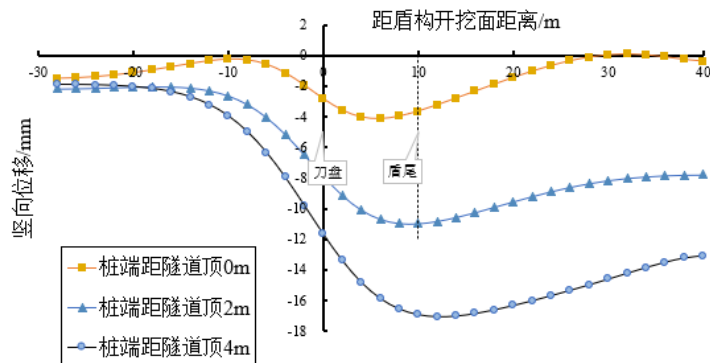


图6 不同桩端间距时地表纵向沉降

路面沉降随隧道-复合地层距离的增加而增加,说明隧道开挖引起地表变形大部分由隧道周边淤泥质土的扰动变形引起,复合地层相当于地表覆盖的硬壳层,起到将地面荷载均匀扩散的作用。计算结果显示,当桩端直接与隧道管片接触时,路面沉降变形最大为4mm,而当桩端与管片距离为2m时,最大沉降为11mm,当桩端与管片距离为4m时,最大沉降为17mm。

2.4 不同注浆压力条件地下通道沉降变形对比

不同壁后注浆压力条件下地下通道沉降计算结果如图7。盾构施工中不同注浆压力条件下,盾构刀盘前方1D以外地表变形基本一致,在靠近刀盘区域,注浆压力越大,地表沉降值呈减小趋势。同时注浆压力也会影响地表最终沉降,注浆压力过大时,盾构后方地表会有上抬趋势。

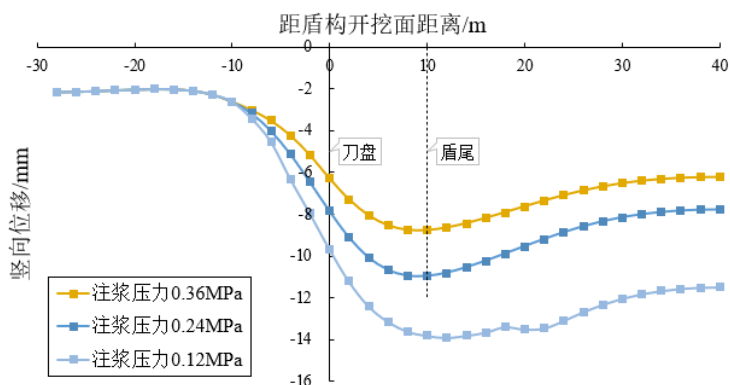


图7 不同注浆压力时地表纵向沉降

3 盾构掘进参数优化

我们通过前文的计算数据与盾构施工的实际受力变形原理,结合盾构施工土仓压力,下穿距离,注浆压力以及线路纠偏等方法对比研究,对盾构施工参数的影响与优化方法进行分析。

3.1 土仓压力优化

土仓压力对维持掘进面的稳定至关重要,在实际施工中,应该根据隧道上覆土层的厚度变化而变化。如果盾构刀盘提供的支护压力与原始地层静止土压力接近,则对周边土体的扰动较小,地层不会产生大的变形位移,地表沉降在安全限值之内。仅仅依靠理论土压力的计算来设置土仓压力是不合理的,由于上覆地层土体性质的变化,上部结构超载等因素的影响,实际土压力不会保持不变。根据实际盾构施工的数据研究分析,盾构刀盘前方 $1.5D+H$ (D 表示盾构外径, H 表示盾构隧道的埋深)范围内地表的沉降变化与土仓压力的设置关联性较大。因此地表沉降变化可以直接反映盾构掘进土仓压力与实际土压力的对比关系。在实际盾构施工中,一般控制掘进面前方地表隆起 $0\sim 2\text{mm}$ 的状态,如果隆起值变大则降低土仓压力,如果地表向下沉降则适当增加土仓压力。

3.2 地层二次加固厚度优化

如图1所示盾构隧道上方软弱地层可采用二次注浆加固,加固的范围大小会直接影响开挖过程中地层的扰动及地表沉降大小,需要结合实际施工过程中的经济因素及施工便利性。

3.3 盾尾同步注浆优化

在盾构掘进中及时在脱出盾尾的管片背面和地层土体间的环形空隙中注入适当数量配比合理的注浆材料,是防止地表发生沉降的重要技术措施。同步注浆速度与盾构掘进速度一致,同时土层性质、盾构姿态、管片拼装偏差等也是同步注浆参数的控制因素。在盾尾管片脱出时,由于盾构机外径与管片外径的大小不一,导致土体与管片外侧存在一定的空隙。此时采用盾尾注浆方式是减小周围土体位移的有效手段,也是控制地表沉降的关键环节。实际施工中为了使浆液填充管片外部空隙,同时维持四周地层的相对稳定性,一般选取的注浆压力比原始地层土压力大 $0.1\sim 0.2\text{MPa}$,此时地表沉降能够控制在相对理想的范围内。

盾构施工中盾构机身和管片会受到地层压力、千斤顶顶推力的作用、衬砌的相对位置,盾构机身轴线偏离隧道设计路线。

盾构线路偏移的主要原因有以下几个方面:

- ① 盾构超挖或欠挖导致盾构的姿态偏差,从而使盾构轴线产生过量偏移。
- ② 盾构姿态的测量错误或较大误差。

- ③ 盾构纠偏不及时或纠偏不到位。
- ④ 盾构处于不均匀土层中，即处于多种土层交汇地带时，不同土体的压缩性、抗压强度、抗剪指标的不同。
- ⑤ 盾构处于非常软弱的土层中时，如果停止掘进的间歇过长，当正面平衡压力损失时会导致盾构下沉。
- ⑥ 管片拼装时，相邻两环管片间存在杂质，从而使得盾构掘进偏差。
- ⑦ 同步注浆量不够或浆液质量不好，泌水后引起隧道沉降，从而影响掘进轴线的控制。
- ⑧ 浆液固结缓慢，使隧道管片在大推力作用下引起变形，从而影响掘进轴线控制。

盾构进洞时（接收）时，导致盾构姿态变化的因素，主要来自接收基座中心夹角轴线与掘进轴线的不一致，使盾构姿态发生变化，从而使盾尾内的管片位置发生相应变化。由于盾构施工模拟中线路纠偏方式模拟难度较大，仅对相关施工的力学参数进行优化；结合盾构掘进三维数值模拟研究成果，对原有施工参数进行合理的优化。掘进参数优化后的计算结果表 2 所示：

表 2 掘进参数优化前后对比

参数 类型	土仓 压力	加固 厚度	注浆 压力	地表沉降控制	
				最大沉降值	不均匀沉降
优化前	1.7MPa	1m	0.24MPa	10.97mm,	6.58mm
优化后	2.0MPa	2m	0.36MPa	6.75mm,	2.81mm

4 结论

针对福州地铁 5 号线盾构施工长距离平行下穿盘屿地道工程的路面保护问题，建立数值模型研究了旋喷桩加固地基的等效变形模量，不同土仓压力、复合地层以下隧道埋深、壁后注浆压力等因素对路面沉降的影响，提出了优化的盾构掘进参数。

研究表明，复合地层以下隧道埋深越深，由于淤泥质土扰动引起的地表沉降越大，隧道顶部二次加固范围越大，地表沉降越小。优化后的土仓压力为 2MPa，二次注浆加固厚度 2m，壁厚注浆压力为 0.36MPa。

[参考文献]

- [1] 王芳, 贺少辉, 刘军, 曹瑞琅. 盾构隧道结合洞桩法修建地铁车站地表沉降控制标准分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 289-296.
 - [2] 曾庆军, 廖建春. 基于路面应力分析高速公路拓宽工程差异沉降控制标准[J]. 广东交通职业技术学院学报, 2006(01): 1-5.
 - [3] 贾力. 《公路技术状况评定标准》在高速公路养护管理中若干问题的探讨[J]. 建筑工程技术与设计, 2017(11): 2951-2951.
 - [4] 龚晓南. 复合地基[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1992.
 - [5] 徐洋, 卢廷浩, 董海洲, 等. 考虑沉桩及群桩间相互影响的复合模量计算方法[J]. 岩土力学, 2001(04): 486-489.
 - [6] 闫明礼, 曲秀莉, 刘伟, 等. 复合地基的复合模量分析[J]. 建筑科学, 2004(04): 27-32.
 - [7] 梁晓东. 复合地基等效实体法研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2005.
 - [8] 印长俊, 卢艺伟, 马石城, 等. 渐进均匀化方法在复合地基复合模量计算中的应用[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2013, 35(03): 45-48.
 - [9] 刘洪洲, 孙钧. 软土隧道盾构推进中地面沉降影响因素的数值法研究[J]. 现代隧道技术, 2001(06): 24-28.
 - [10] 张云, 殷宗泽, 徐永福. 盾构法隧道引起的地表变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 388-392.
- 作者简介: 李志文(1974-), 男, 高级工程师, 本科, 主要从事市政工程施工与管理工作。