

# 海积平原区盾构隧道基底加固数值模拟分析

陆 跃

中铁上海工程局集团有限公司, 上海 201906

[摘要] 盾构隧道施工破坏土体中原有的应力场, 导致地层发生变形, 在海积平原地区表现尤为明显。本文选取盾构隧道典型断面, 运用有限元数值模拟分析, 从动应力峰值、振速、动位移等角度, 比较分析不同隧底加固深度的影响范围及量值大小。结合基底加固常用方式的优缺点, 针对不同施工条件给出推荐加固方法, 可为今后同类工程提供参考。

[关键词] 盾构隧道; 软土地层; 基底加固; 动应力; 数值模拟

DOI: 10.33142/ec.v8i4.16299

中图分类号: U45

文献标识码: A

## Numerical Simulation Analysis of Foundation Reinforcement for Shield Tunnel in Haiji Plain Area

LU Yue

Shanghai Civil Engineering Group Co., Ltd. of CREC, Shanghai, 201906, China

**Abstract:** The construction of shield tunnels damages the original stress field in the soil, causing deformation of the strata, which is particularly evident in marine plain areas. This article selects typical cross-sections of shield tunnels and uses finite element numerical simulation analysis to compare and analyze the influence range and magnitude of different tunnel bottom reinforcement depths from the perspectives of peak stress, vibration velocity, and dynamic displacement. Based on the advantages and disadvantages of commonly used methods for base reinforcement, recommended reinforcement methods are provided for different construction conditions, which can provide reference for similar projects in the future.

**Keywords:** shield tunnel; soft soil strata; base reinforcement; dynamic stress; numerical simulation

我国东部沿海地区广泛分布海积平原软土地层, 受地质构造、沉积环境及人类活动影响, 软土地层主要由沉积物堆积而成。该类沉积物在物体特性方面体现为含水率较高、孔隙比大、黏粒含量高等特征; 其力学特性则呈现出土体强度低、易压缩变形、渗透系数偏低以及对环境扰动敏感等显著属性。其工程性质表现为低地基承载力、荷载变化后易变性且不均匀、变化率大且稳定时间、触变性及流变性大等特点。软土地区盾构隧道建设期基底加固不足或未采取加固措施, 后期运营中会出现较大沉降和差异沉降, 造成盾构隧道衬砌结构的损伤, 进而引发隧道渗漏水, 甚至造成灾害性事故, 对其使用寿命有较大影响。

隧道出现沉降的原因是多种多样的, 其中主导因素有地质条件、地下水或地表水位变化、地面超载、近距离施工活动、盾构隧道施工扰动、结构本身纵向刚度弱和运营期渗漏水、车振等。国内外有关研究表明隧道的长期沉降是工程中不可忽视的问题, 其对隧道总沉降的影响能达到30%~90%。1980年建成的东京临海副都心线, 局部地处填海区, 受松软地基及地下水持续作用, 至1996年沉降最大值达750mm。1993年建成的上海地铁1号线, 分析其通车后1994年至2007年的长期沉降观测结果, 8个月累计沉降量为30~60mm, 4年部分观测点沉降140mm, 12年最大沉降观测已达288mm。已建成隧道长期沉降的发展, 会导致隧道结构安全隐患及运营安全风险, 设计及施工需提前考虑采取有效的地基加固措施, 并建立长期监测系统

及沉降预测模型, 为后期隧道运营维护管理提供保障。

### 1 工程案例

#### 1.1 典型断面选取

台州市域铁路设计时速140公里, 依据现行“市域铁路设计规范”(CRS001—2017)及“市域(郊区)铁路设计规范”(TB10624—2020), 市域铁路列车竖向静荷载应采用ZS荷载, 考虑列车冲击作用, 列车荷载竖向动力作用引入冲击系数 $(1+\mu)$ 来反映列车活载的动力影响,  $\mu$ 按现行规定计算取值。盾构隧道管片内径7.7m、外径8.5m, 采用环宽1.6m、楔形量46mm的通用楔形环C55、P12高精度单层装配式平板钢筋混凝土管片。

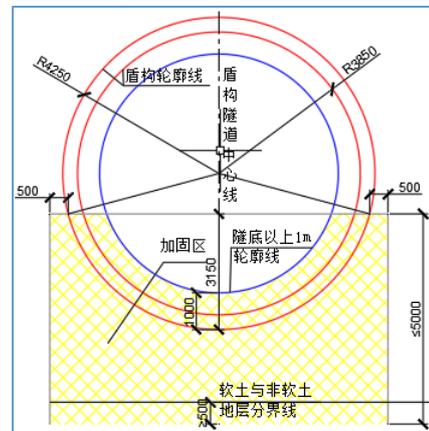


图1 隧道基底加固典型断面图

为防止盾构隧道施工期尤其是运营期产生过大沉降,针对盾构隧道底部软弱地层进行加固处理,常见的基底加固方式有地表注浆加固、地面搅拌桩加固、地面旋喷桩加固和洞内注浆加固。本项目盾构隧道加固范围为以正北方向轴为基准轴,以盾构隧道圆心为基点,基准轴顺/逆时针各旋转 105° 与盾构外壳相交,相交点左右延伸 0.5m,以该连线往下加固既定深度,(即隧道底部以上 3.15m 范围内)软土进行加固,加固深度视隧道底软土厚度而定,如图 1。

### 1.2 工程地质水文

台州市域铁路典型隧道段场地位于海积平原区,洞顶埋深 8~17m,隧道洞身主要位于海陆相沉积(2)1 淤泥质黏土层、(2)2 淤泥层和(2)3 淤泥质黏土层。上覆土层主要有(1)0 填土、(1)黏土、(2)1 淤泥质黏土、(2)2 淤泥。隧底主要位于(2)2 淤泥、(3)1 黏土、(3)2 流塑、软塑黏土层,岩土参数值见表 1。

表 1 岩土物理力学参数表

地层编号	岩土名称	天然密度 g/cm <sup>3</sup>	天然孔隙比	液性指数	压缩模量 E	承载力特征值 (kPa)
(1)	黏土	1.82	1.08	0.63	3.92	100
(2)1	淤泥质黏土	1.7	1.46	1.25	2.44	50
(2)2	淤泥	1.64	1.68	1.36	1.92	45
(2)3	淤泥质黏土	1.7	1.46	1.24	2.32	50
(3)1	黏土	1.91	0.81	0.59	5.65	120
(3)2	黏土	1.77	1.23	0.77	3.51	80

## 2 三维数值模拟分析

### 2.1 模型建立

为进行列车荷载作用下的动力学时程分析,取隧底不同深度处各点、全时域内的动应力峰值,进行统计处理后,比较影响范围及量值大小。取隧道底部正下方 0.5~11m 范围内各点的动应力时程曲线,列车以每小时 140 公里的速度通过,模型中按桩土面积等效折合,采用修正 Mohr-Coulomb (MCM) 本构模型进行建模分析,土体材料取理想弹塑性材料,主要参数指标按实际土层性能参数取值,以实体单元进行土体的仿真模拟。

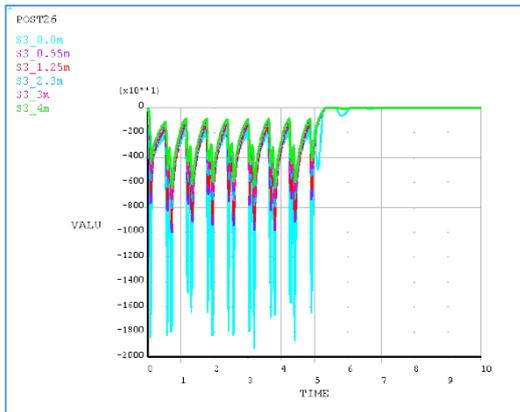


图 2 隧底动应力时程曲线

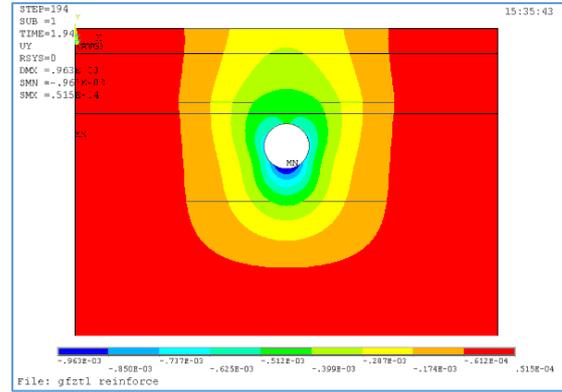


图 3 隧道三维数值模拟(典型时步)

### 2.2 各工况振速对比

隧道的振速反映了结构、及隧道与地层接触面的振动强度,与结构的疲劳密切相关;隧底土的振速反映了承受长期动力荷载作用的地基土的振动强度,是地基稳定性的重要指标。根据三维数值模拟结果,统计不同工况下隧道结构及地基土竖向振速对比如表 2,绘制各工况关键位置振速对比图 4。

表 2 各工况关键位置振速对比表

隧底加固	位置	振速 mm/s	隧底结构降幅	隧底土降幅
未加固	隧底 0m	22.539	-	-
	隧底 0.5m	20.599		
加固 3m	隧底 0m	14.492	35.7%	40.8%
	隧底 0.5m	12.194		
加固 5m	隧底 0m	12.802	43.2%	51.5%
	隧底 0.56m	9.990		

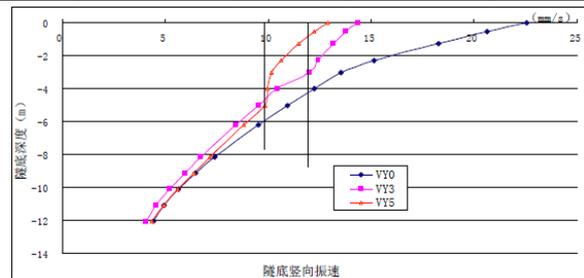


图 4 各工况关键位置振速对比图

隧道加固体相对于地层、隧道结构相对于地层均是刚度较大的结构物,列车作用于隧道,相当于激励一个弹性支承的大型质量块,随着加固区域的增大,较大的质量使其更不易被激励起来。根据表 2 中加固及未加固数据可知,隧道结构底部的振速在隧底加固后降幅明显,加固 3m/5m 隧底结构振速降幅分别为 35.7%、43.2%,隧底土振速降幅分别为 40.8%、51.5%;且隧底 5m 加固效果更好,相较于 3m 加固范围进一步提升振速降幅为 21%、26%,效果显著。

### 2.3 各工况动位移对比

动位移反映了结构的振动强度,尤其对于轨道板结构,

是行车稳定性的一项重要指标,其作用机制与振速分析类似。根据三维数值模拟结果,统计不同工况下隧道轨道板动位移幅值对比如表 3。

**表 3 各工况关键位置动位移对比表**

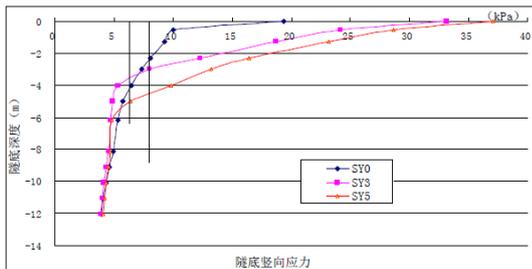
隧底加固	位置	动位移 mm	轨道板降幅	隧底结构降幅
未加固	轨道板	1.121	-	-
	隧底内部	1.118		
加固 3m	轨道板	0.790	29.5%	29.5%
	隧底内部	0.788		
加固 5m	轨道板	0.709	36.7%	36.6%
	隧底内部	0.708		

据表 3 中加固及未加固数据可知,隧道轨道板的竖向动位移在隧底加固后降幅明显,隧底加固 3m/5m 可分别降低轨道板位移峰值 29.5%、36.6%,且隧底加固 5m 效果更优。

### 2.4 各工况竖向应力对比

在保证列车动荷载振次相同的基础上,隧道结构长期沉降与隧道结构下部土层所受持续动荷载有关。当隧道结构周围尤其是底部土层存在缺陷或软弱土层时,通过隧底土体加固可以置换并加固绝大部分软弱下卧黏土层,削减软弱层厚度,极大提高隧底地基承载力,保证隧底结构稳定性。

根据三维数值模拟结果,统计不同工况下隧底土竖向应力幅值对比,如图 5。



**图 5 隧底土竖向应力对比图**

根据图 5 可知,隧底在三种不同工况下加固后地基土的竖向动应力降低幅度均较为显著。隧底加固 3m 时,竖向应力峰值由未加固的 24.0kPa 下降至 5.02kPa,下降幅度为 79.1%;隧底加固 5m 时,竖向应力峰值由未加固的 28.0kPa 下降至 4.88kPa,下降幅度为 82.6%。

## 3 基底加固方案比较

### 3.1 地表注浆法

地表注浆法加固是指根据待加固土层埋深,将注浆管从地表钻至预定深度,将水泥浆、化学浆液或其他混合浆液以一定压力注入地层中,填充土体或岩体的裂隙、孔隙或者空洞,从而改善其物理力学性质。常用的注浆法施工工艺有袖阀管注浆法、直接注浆法和 CCG 注浆工法等。注浆浆液可以采用水泥浆、水泥砂浆及其他化学浆液等。待浆液凝固形成具有一定强度的结构体,可以增加土体强度

和模量,达到加固、防渗、堵漏、纠偏等工程目的。

地表注浆加固适用于可注性好的地层,优点是设备小,加固方案、方式灵活;缺点是对地质、水文比较敏感,加固效果不易控制,加固后土体的强度和加固后的土体承载能力不易保证。

### 3.2 地面搅拌桩法

地面搅拌桩加固指在地表或浅层软土地基中,利用专用搅拌机械将固化剂(如水泥浆)与原土体强制搅拌,形成连续、稳定的桩体结构,从而提高地基承载力、减少沉降或增强土体稳定性的工程技术。

该法适用于软土、淤泥、粉土、松散砂土等各种软弱地层,能够保证加固土均质性和承载能力,还能减少隧道的沉降和不均匀沉降,防止土体震动液化的发生。地面搅拌桩加固的优点是价格便宜、成桩速度快、效率高。缺点是搅拌桩需要钻机械体积较大、高度较高,搅拌桩施工加固区域管线需要迁改,施工期间对既有交通影响较大,不利于交通疏解。

### 3.3 地面旋喷桩法

高压旋喷桩注浆法是一种通过高压喷射流切割、混合土体并注入固化材料,从而形成复合地基或加固结构的地基处理技术。其核心原理是利用高压设备(通常压力在 20~50 MPa 以上)将浆液(如水泥浆)或水、空气通过钻孔中的特殊喷嘴射出,通过高速旋转的喷射流冲击破坏原地层结构,同时将浆液与土体颗粒强制混合,最终形成具有一定强度和抗渗性的固体(圆柱状桩体或连续墙),以达到加固地基或止水防渗的目的。

地面旋喷桩加固的优点是施工设备小、施工占地少;振动小、噪音较低;成桩深度较大;施工期间可根据既有管线位置避让管线,减小管线迁改量;结合交通疏解灵活调整施工场地,对既有交通影响可控。缺点是旋喷桩价格相对较高,产生废泥浆污染环境。

### 3.4 洞内注浆法

洞内注浆加固是指在盾构隧道内利用管片注浆孔,将浆液注入周围岩土体或结构空隙中,以达到加固地层、堵水防渗或提高承载力的目的,增加土体稳定性,降低压缩性。

该法可以进行精准加固,针对隧道薄弱区域如穿越断层破碎带、穿越富水砂层时,通过合理调配浆液配比、实时控制注浆压力及流量等,实现有效控制管片变形。洞内注浆加固的优点是不占用地面交通;缺点是沉降控制难,对施工设备的要求较高。在隧道内施工要考虑孔位布置、注浆后的封堵、注浆孔对管片结构的影响、注浆压力对隧道的影响等问题。

## 4 结论

通过对海积平原区盾构隧道基底加固数值模拟分析,结合基底加固常用方法对比,可以得到如下主要结论:

(1) 从动应力峰值、振速、动位移、影响区域综合

考虑,进行隧底地基加固是必要的。5m加固方案比3m加固方案效果得到了进一步提升,具体加固长度需结合周围地层情况、费效比进行确定。

(2)从加固效果来看,地面搅拌桩加固>地面旋喷桩加固>地表注浆加固>洞内注浆加固,地面加固方式中搅拌桩加固和旋喷桩加固要明显优于洞内加固方式。

(3)软土分布长度较长(超过30m),隧道底部软土厚度大(超过1m)时,优先采用地面加固;分布范围较小且隧道软土厚度较小,不具备地面加固条件时可采用洞内处理的方式。

(4)从沿线既有房屋保护、管线迁改、既有运营线交叉施工影响以及经济角度综合分析,施工沿线地面加固可优先采用高压旋喷桩加固。

#### [参考文献]

[1]李炜明,任虹,石旭东,等.地铁盾构施工土体变形与临

近结构失效机理研究[J].防灾减灾工程学报,2018,38(3):472-479.

[2]柳雨叶,丁敬文.地铁施工地表沉降的空间规律与统计特征研究[J].铁道工程学报,2017,34(3):74-79.

[3]魏纲.盾构法隧道施工引起的土体变形预测[J].岩石力学与工程学报,2009,28(2):418-424.

[4]林峰.软土地区深基坑近接地铁隧道施工水平位移影响因素[J].铁道建筑,2023,63(1):100-104.

[5]吴发展,赵鸿鹏.城市地铁盾构隧道穿越软弱底层加固技术[J].内蒙科技与经济,2023(1):116-118.

[6]张晓丽,罗章波.软弱滨水地层盾构隧道近穿路桥变形控制与机理分析[J].铁道建筑,2023,63(6):113-117.

作者简介:陆跃(1984.7—),男,2006年6月毕业于东南大学-交通工程专业,任职中铁上海工程局集团有限公司,高级工程师。