

# 软土地区盾构隧道管片纵向加固效果分析

林志军<sup>1</sup>, 刘世明<sup>1</sup>, 王金昌<sup>2</sup>

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310012; 2. 浙江大学 交通工程研究所, 浙江 杭州 310058)

**摘 要:** 对处于软土地层中的城市地铁盾构隧道, 受邻近施工扰动、下卧土层不均匀等诸多因素的影响易产生纵向不均匀变形, 给隧道结构和正常运营带来隐患。基于软土的基本结构特性以及隧道纵向受力变形情况, 提出采用横向钢圈与纵向钢带相结合的空间网状加固隧道结构, 并用数值模拟分析了加固效果, 对建立隧道纵向结构加固与设计提供理论支撑和技术指导。

**关键词:** 软土地区; 盾构隧道; 纵向变形; 结构加固; 数值分析

**中图分类号:** TU472      **文献标识码:** A      **文章编号:** 2096-7195(2020)06-0478-05

## Longitudinal reinforcement effect of shield tunnel segments in soft soil

LIN Zhi-jun<sup>1</sup>, LIU Shi-ming<sup>1</sup>, WANG Jin-chang<sup>2</sup>

(1. Power China East China Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310012, China;

2. Institute of Traffic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** The shield tunnel of urban subway in soft soil area is easy to cause longitudinal uneven deformation due to the effect of many factors, such as disturbance of adjacent construction and unevenness of underlying soil layer, which brings hidden trouble to the tunnel structure and normal operation. Based on the basic structural characteristics of soft soil and the longitudinal stress deformation of tunnel, a space mesh reinforcement tunnel structure with transverse steel ring and longitudinal steel strip is proposed. And the reinforcement effect is analyzed by numerical simulation, which provides theoretical support and technical guidance for the reinforcement and design of tunnel longitudinal structure.

**Key words:** soft soil; shield tunnel; longitudinal deformation; structural reinforcement; numerical analysis

## 0 引 言

地下空间作为“新型国土资源”, 在改善基础设施、提升空间容量、缓解交通压力等方面, 发挥着不可替代的作用。在地铁建设热潮的背景下, 浙江省城市轨道交通也正面临高速建设和高质量运维阶段, 同时伴随着基坑工程、综合管廊等地下基础设施的密集建设, 开发深度及广度的增加均带来了一系列前所未有的技术难题。尤其是浙江省广泛分布软黏土, 作为地下空间开发的承载体, 软黏土具有高含水、强压缩、低强度等特性。在复杂多变的荷载作用下, 软黏土易发生变形、失稳、渗蚀等灾变行为, 无论在建设及运营阶段都会引起轨道交通结构变形、开裂和渗漏水等问题, 影响轨道交通结构安全使用、耐久性能和服役寿命<sup>[1]</sup>。

## 1 软土工程特性及对隧道影响

软土是近代在滨海、湖泊、沼泽及河湾等地区海相、湖相沉积形成的一种特殊土体, 普遍具有含水量高、压缩性大、强度低、渗透性差、灵敏度高以及流变性显著等特点。根据《浙江省城市轨道交通岩土工程勘察规范》<sup>[2]</sup>, 浙江省地貌单元可划分为以下六个区: 浙西中山丘陵区、浙中盆地区、浙北平原区、浙东低山丘陵区、浙南中山区以及浙东南沿海丘陵平原及岛屿区。在城市轨道交通发展较为迅速的杭州、宁波和温州, 地铁工程埋深范围内的土层大多属海积、冲海积淤泥质土和黏土, 为典型的软土, 且具有显著的结构性。从长期来看, 软土的工程特性对地铁产生的影响主要有以下三方面:

(1) 软土的高压缩性导致地铁建成后总沉降

量较大;

(2) 软土具有低渗透性和流变性, 孔隙水压力消散慢, 还伴随着缓慢而长期的剪切变形, 因为地铁的工后沉降需要发展很长时间, 对保障运营安全提出了更高的要求;

(3) 软土较强的结构性在受到施工扰动后, 强度急剧降低, 属于高灵敏度土。在地铁运营列车振动荷载作用下, 土体易产生侧向滑动、沉降或挤出现象, 加剧隧道结构总沉降量。

随着软土地区大量盾构隧道的建设和运营使用, 隧道纵向不均匀沉降问题逐渐凸现<sup>[3]</sup>, 导致盾构隧道管片接头、不同结构连接处渗漏水或破坏, 对隧道的安全运营和周围环境的安全产生相当大的隐患。

## 2 隧道纵向受力与变形情况

盾构隧道的多缝特点使其沿环向和纵向刚度呈不均匀变化, 接缝位置的刚度较其他部位有一定程度的折减, 总体上表现为“环刚纵柔”。隧道某一环因外部荷载改变或周围土层扰动发生竖向沉降或隆起变形时, 会带动相邻环隧道发生纵向变形, 由此影响到更大范围。对于隧道纵向变形模式主要有转动式和错动式两种, 同时当变形沿着纵向进行传递时, 使隧道纵向和横向变形在一定范围内相互影响。由于不均匀纵向沉降, 隧道管环与管环之间相互作用加强, 导致隧道横断面的水平直径变化量沿纵向产生差异。隧道横向水平直径变形最大发生往往在纵向位移最大处, 即沉降槽中心位置<sup>[4]</sup>。

隧道纵向变形还将影响环缝接头的变形与破坏, 可大致分为三个阶段, 如图1所示。对于拼装良好的盾构隧道, 管片环面中部的凹凸榫槽上下表面

有一定的装配余量。从相对滑动产生错台到开始接触受力, 发生剪切作用, 进一步发展为混凝土挤压明显, 应力集中, 出现裂缝等破损现象。

正确认识隧道纵向受力变形对建立隧道纵向结构模型、变形分析以及结构设计、加固等具有显著意义。目前浙江省地铁结构安全控制指标基本以结构变形控制, 反映隧道纵向变形的指标主要有竖向位移、变形曲率半径、变形相对曲率等, 根据其变形和结构损伤情况判断结构安全状况。李翔宇等<sup>[5]</sup>通过建立新型盾构隧道修正纵向等效连续化模型, 分析了横向刚度和环缝作用范围对隧道等效抗弯刚度的影响规律, 并建立了五类隧道结构临界状态下隧道纵向曲率半径、接缝张开值、管片应力、螺栓拉力的求解公式, 为隧道健康状态诊断提供了依据。

当隧道受力和变形不能满足控制标准时, 需要对盾构隧道进行加固。李银桑等<sup>[6]</sup>指出根据加固措施进行的位置不同, 可将盾构隧道加固措施分为内部加固和外部加固。内部加固可分为内张钢圈加固法、黏贴复合腔体加固法、芳纶布加固法、碳纤维布加固法等; 外部加固为侧向注浆加固法等。石太伟<sup>[7]</sup>在隧道机理分析的基础上提出了对盾构隧道管片结构修复执行刚度和耐久性修复两种标准。对于变形较大, 结构刚度出现损失的盾构隧道, 需采取加固钢圈的措施来增加结构的刚度, 并提出区分标准: 不在标准之内的管片裂缝及碎裂, 只需按耐久性修复标准简单修补即可。毕湘利等<sup>[8]</sup>设计了两种加固类型的盾构隧道足尺试验, 研究得出内张钢圈加固方法能显著提高既有盾构隧道的整体刚度和承载能力; 采用整环或半环加固后盾构隧道结构的受力性能相近。

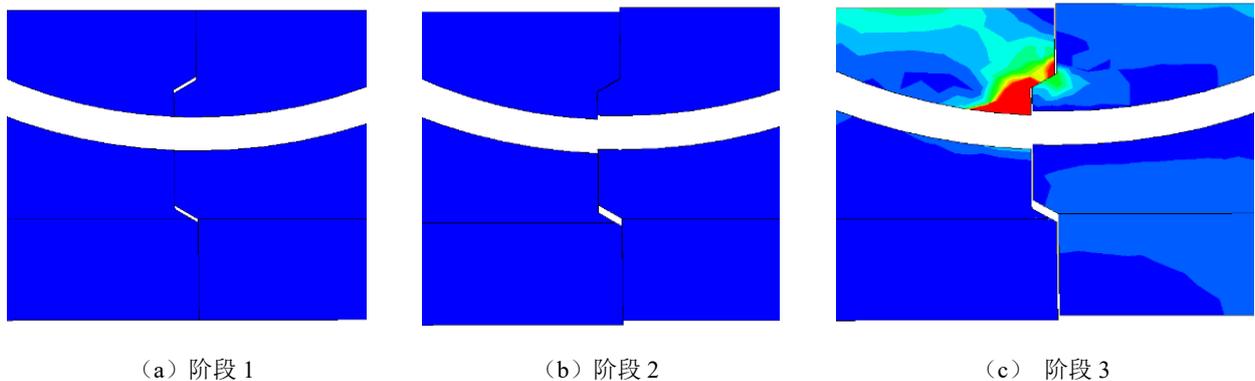


图1 环缝接头变形阶段示意图  
Fig. 1 Deformation stage of girth joint

### 3 纵向加固效果分析

基于上述对隧道纵向变形及加固等研究,提出横向钢圈与纵向钢带相结合的空间网状结构加固盾构隧道结构,通过纵向钢带增强隧道纵向刚度,从而提高结构整体抗变形能力,并采用数值模拟分析其加固效果。

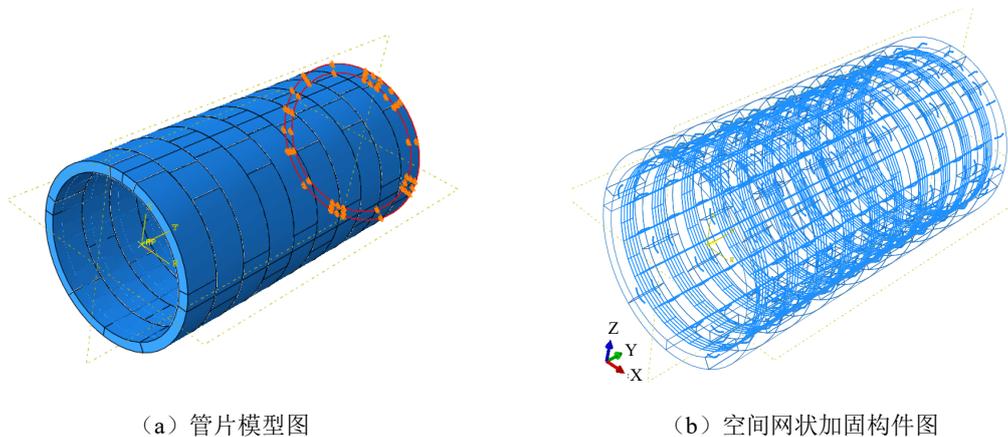
#### 3.1 有限元模型

根据杭州地铁盾构隧道采用的标准环管片错缝拼装建立有限元模型,管片外径 6.2 m,内径 5.5 m,环宽 1.2 m,厚度 0.35 m,C50 混凝土弹性模量 34.5 GPa。管片与管片,管环与管环间均以 M30 弯螺栓连接,纵向 16 个,环向 12 个。

为分析隧道管片加固对纵向变形的影响,选取

10 环建立三维精细化盾构隧道计算模型,见图 2(a)。管片内采用横向钢圈和纵向钢带进行加固,如图 2(b)所示。同时假定加固结构与隧道管片协同变形,模型材料参数见表 1。

模型中管片采用实体单元,螺栓采用梁单元,螺母采用壳单元,本构模型为理想弹塑性。其中,螺母嵌入管片,两者变形一致;螺栓与螺母为钢连接,螺栓变形自由。计算时对模型一端进行  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向约束,另一端施加弯矩。假定隧道纵向变形由环缝之间的错台和张开而形成。当隧道纵向产生一定变形后再对其进行横向内张钢圈与纵向钢带加固。为探究加固构件对控制运营地铁隧道的变形效果,有必要设置未加固的盾构隧道工况作为对照组,具体加固计算工况见表 2 所示。



(a) 管片模型图

(b) 空间网状加固构件图

图 2 隧道及加固构件有限元模型

Fig. 2 Finite element model of tunnel and reinforced member

表 1 模型材料参数

Tab. 1 Material parameters

螺栓		加固构件	
长度/m	0.4	横向钢圈宽度/mm	100
材料	钢材	横向钢圈厚度/mm	20
弹性模量/MPa	$2.06 \times 10^5$	纵向钢带宽度/mm	100
屈服应力/MPa	400	纵向钢带厚度/mm	20
泊松比	0.3	材料	Q345B 钢材

表 2 计算工况定义

Tab. 2 Definition of calculation condition

纵向	横向		
	每环加固	隔环加固	不加固
16 根钢带	工况一	工况三	-
8 根钢带	工况二	工况四	-
不加固	-	-	工况五

### 3.2 计算结果分析

计算提取不同工况下隧道的纵向曲率半径、环缝张开量以及纵向螺栓应力, 结合计算结果对加固后的隧道安全状况进行分析研究。为了分析不同加固工况对隧道纵向受力的影响, 将纵向螺栓、加固构件以及管片三个不同抗弯刚度等效成一个抗弯刚度, 其中的等效模量通过下式进行计算:

$$E=(E_1I_1+E_2I_2+E_2I_3+E_2I_4)/I_1 \quad (1)$$

式中:  $E, E_1, E_2$  分别为等效模量、管片模量和钢材模量;  $I_1, I_2, I_3, I_4$  分别为管片、纵向螺栓、横向钢圈及纵向钢带的惯性矩。

#### (1) 螺栓应力

隧道纵向受拉侧螺栓应力与曲率半径关系如图 3 所示, 可分为三个阶段: (a) 当隧道曲率半径大于 1 100 m 时, 螺栓应力非常小, 基本处于不受力状态; (b) 当曲率半径小于 1 100 m 后, 应力随曲率半径的减小而呈幂指数递增直至达到其强度极限; 由于工况一、二与工况三、四的横向钢圈数量不同, 导致螺栓受力先后顺序不同。因此, 隧道的纵向受力变形与其横向结构性能密不可分; (c) 当曲率半径小于 780 m 后, 各工况下的螺栓均进入屈服状态, 此时若隧道继续产生纵向弯曲变形, 螺栓受力将会超过临界强度甚至产生拉断破坏, 结构将无法承载, 局部或整体将遭受严重破坏。

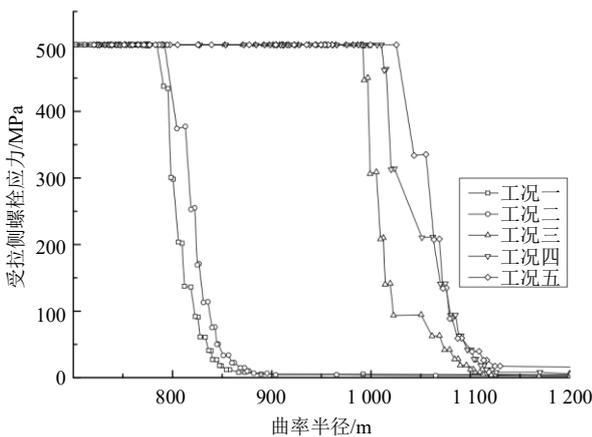


图 3 纵向螺栓应力与曲率半径关系

Fig. 3 The relation between longitudinal bolt stress and radius of curvature

#### (2) 环缝张开量

图 4 为隧道环缝张开量随增量步变化曲线, 相同增量步条件下, 即荷载相同, 加固后的隧道环缝张开量小于未加固的。相同横向钢圈下, 增量步为 0.5 时, 工况一的张开量较工况二减少了 6.7%, 工况三的张开量较工况四减少了 60%。同一增量步下,

工况三环缝张开量最小, 说明隧道纵向抗变形能力还与横向刚度有关<sup>[5]</sup>, 在加固隧道结构时依然要能适应一定的纵向变形能力。

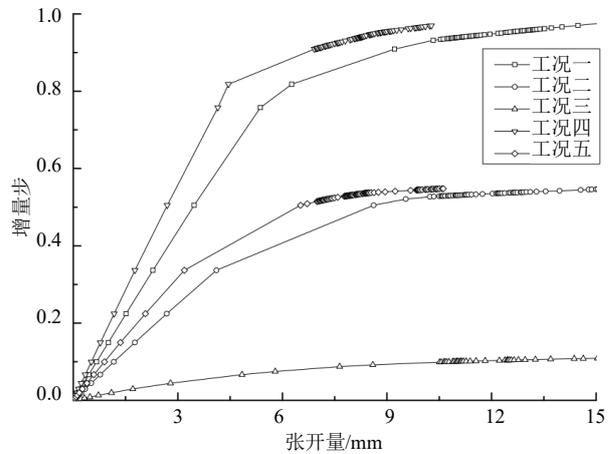


图 4 环缝张开量与增量步关系

Fig. 4 The relation between the opening of ring seam and incremental step

不同工况下隧道环缝张开量与隧道纵向曲率半径关系如图 5 所示, 各工况下的张开量与曲率半径曲线几乎都重合, 与是否加固无关; 即表明作为隧道变形的物理指标曲率半径和张开量呈现一一对应的关系。

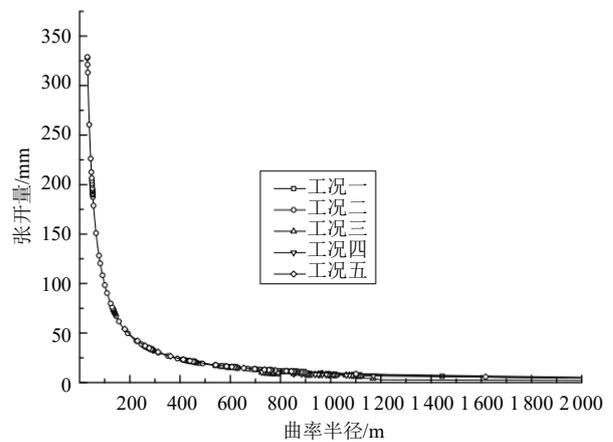


图 5 环缝张开量与曲率半径关系

Fig. 5 The relation between the opening of ring seam and radius of curvature

#### (3) 加固尺寸

为使加固后的隧道依然能适应纵向复杂多变的地质环境及施工影响带来的变形, 对工况二中的纵向加固尺寸进行进一步分析, 使隧道变形在一定程度内进行变形协调而不破坏管片结构的完整性。

通过改变工况二中纵向钢带的截面尺寸, 分析不同纵向钢带的加固尺寸对纵向变形的效果, 如图 6 所示。相同纵向钢带数量加固下, 钢带平面尺寸

越大,环缝张开量越小,且张开量在0~3 mm阶段的变化速率明显大于3 mm之后阶段。

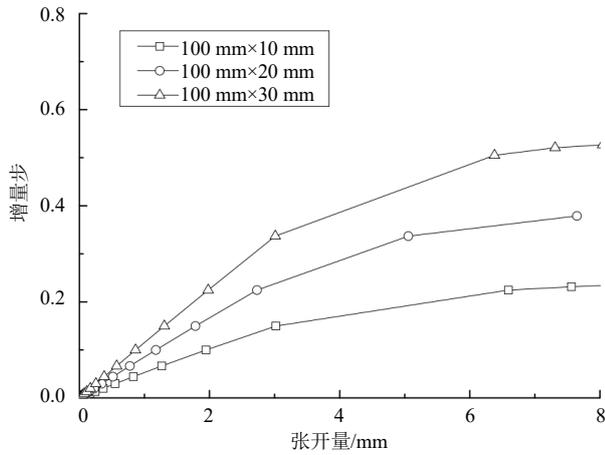


图6 不同钢带尺寸下环缝张开量与增量步关系

Fig. 6 The relation between the opening of ring joint and increment step under different steel strip sizes

## 4 结论与建议

针对软土地层中盾构隧道纵向不均匀变形,采用数值模拟对横向钢圈与纵向钢带相结合的空间网状加固效果进行了计算分析,主要结论如下:

(1) 软土高含水量、高压缩性、高灵敏度、低强度低以及流变性等工程特性对隧道纵向变形影响较大且长期,应引起重视;

(2) 隧道纵向变形模式主要有转动式和错动式两种,纵向和横向变形在一定范围内相互影响;

(3) 隧道纵向螺栓受力主要发生在曲率半径为780~1100 m时,随着加固措施的增强,螺栓达到极限强度时的曲率半径变小;

(4) 隧道环缝张开量随荷载的增加而增大,相同横向钢圈数量下,纵向钢带数量越多,环缝张开量越小;纵向钢带面积越大,张开量越小;张开量随纵向曲率半径的减小而增大,且两者之间的数值关系与加固条件无关,可统一表达。

## 参考文献

[1] 浙江省住房和城乡建设厅. 城市轨道交通结构安全保护技术规程: DB33/T1139-2017[S]. 2017.  
[2] 浙江省住房和城乡建设厅. 浙江省城市轨道交通岩土

工程勘察规范: DB33/T1126-2016[S]. 2016.

- [3] 黄大维,周顺华,宫全美,等. 软土地区地铁不同结构间差异沉降特点分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2013, 41(1): 95-100.  
HUANG Da-wei, ZHOU Shun-hua, GONG Quan-mei, et al. Characteristic analysis of non-uniform settlement for different structures of metro in soft soil districts[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41(1): 95-100.
- [4] 王婉娇. 软土地区已建地铁盾构隧道变形影响及控制措施研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.  
WANG Wan-jiao. Study on the deformation of existing metro shield tunnel in soft soil and the controlling techniques[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [5] 李翔宇,刘国彬,杨潇,等. 基于修正纵向等效连续化模型的隧道变形受力研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 662-670.  
LI Xiang-yu, LIU Guo-bin, YANG Xiao, et al. Deformation and stress of tunnel structures based on modified longitudinal equivalent continuous model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(4): 662-670.
- [6] 李银桑,魏纲. 既有盾构隧道修复加固技术研究综述[J]. 低温建筑技术, 2018, 40(2): 103-107.  
LI Yin-sang, WEI Gang. Review of reinforcement technology of shield tunnel[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2018, 40(2): 103-107.
- [7] 石太伟. 某地铁盾构隧道破损机理分析及加固设计[J]. 铁道标准设计, 2014, 58(6): 116-120.  
SHI Tai-wei. Damage mechanism analysis and strengthening design for a metro shield tunnel[J]. Railway Standard Design, 2014, 58(6): 116-120.
- [8] 毕湘利,柳献,王秀志,等. 内张钢圈加固盾构隧道结构极限承载力的足尺试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(11): 128-137.  
BI Xiang-li, LIU Xian, WANG Xiu-zhi, et al. Experimental study on the ultimate load-bearing capacity of deformed segmental tunnel linings strengthened by steel plates[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(11): 128-137.