

# 软土地区无工作井盾构法施工引起的土体垂直变形分析

刘喜东<sup>1</sup>, 饶倩<sup>2</sup>, 陈方<sup>2</sup>, 袁一川<sup>3</sup>

<sup>1</sup>上海隧道工程有限公司, 上海

<sup>2</sup>上海黄浦江越江设施投资建设发展有限公司, 上海

<sup>3</sup>同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海

Email: liuxidong0220@163.com

收稿日期: 2021年8月19日; 录用日期: 2021年9月19日; 发布日期: 2021年9月26日

## 摘要

本文针对软土地区地面出入式盾构法(Ground Penetrating Shield Technology, 简称GPST), 在对国内外超浅覆土盾构相关文献资料进行综合分析基础上, 指出了已有GPST盾构法理论研究成果的适应性和优缺点, 并针对上海软粘土地区GPST工法掘进特点, 利用基于Mindlin解的土体竖向位移计算方法与数值模拟进行对比分析, 推导了GPST盾构新工法掘进竖向位移的合理预测方式, 进行了实例验证。

## 关键词

软土地区, GPST盾构法, 垂直变形, 解析解

# Analysis on Vertical Displacement Due to GPST Tunneling in Soft Area

Xidong Liu<sup>1</sup>, Qian Rao<sup>2</sup>, Fang Chen<sup>2</sup>, Yichuan Yuan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai

<sup>2</sup>Shanghai Huangpu River Crossing Facility Investment Construction Development Co., Ltd., Shanghai

<sup>3</sup>Department of Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

Email: liuxidong0220@163.com

Received: Aug. 19<sup>th</sup>, 2021; accepted: Sep. 19<sup>th</sup>, 2021; published: Sep. 26<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

This paper aimed at GPST tunneling method and based on the comprehensive analysis of domestic and foreign super-shallow shield tunneling related literatures. The advantages and disadvantages of the existing research theories on GPST were summarized. Furthermore, taking GPST characteristic of

soft ground in Shanghai into account, the calculation method of vertical displacement of soil mass based on Mindlin solution is deduced. The calculation results are compared with numerical simulation results and demonstrated to verify the suggested prediction method of vertical displacement.

## Keywords

Soft Area, GPST Tunneling Method, Vertical Displacement, Analytical Solution

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

传统盾构工法的始发和接收一般都需要始发井和接收井工作井，即需要修建工作井的基坑、推进施工引道等，既受到周边环境的限制，又不可避免地会影响地面交通，对地下管线造成潜在威胁，甚至还会产生噪声等环境污染。随着城市化进程的飞速发展和核心区开发的客观需求，传统盾构隧道工法上述弊端日益突出，同时鉴于国内大中城市正逐步向集约型、密集型的模式拓展，城市土地资源的高效利用是保证城市可持续发展的必然要求[1] [2] [3] [4] [5]，因此，盾构隧道新工法的出现也是现代隧道发展必然的选择。GPST 盾构法(Ground Penetrating Shield Technology, 即地面出入式盾构法)具有不需要工作井、周近环境影响小等一系列优点，但同时也要面对超浅覆土、大坡度等复杂工况。其中，最为关键的是由于注浆压力以及地下水浮力等造成的隧道上浮以及超浅覆土下结构受力特征复杂等诸多问题，现已成为 GPST 盾构法必须要克服的难点[6] [7] [8]。

本文依托上海市龙水南路越江隧道工程，采用理论分析、数值仿真等手段开展研究。针对软土地区大尺度 GPST 盾构法亟需解决的土层垂直变形问题，在对国内外超浅覆土盾构相关文献资料进行全面调研和吸收消化基础上，对已有的 GPST 盾构法理论研究成果的适应性和优缺点进行了分析，并针对上海软粘土地区 GPST 工法掘进特点，利用基于 Mindlin 解的土体竖向位移计算方法与数值模拟进行对比，获得了 GPST 盾构新工法竖向位移的合理预测方法。

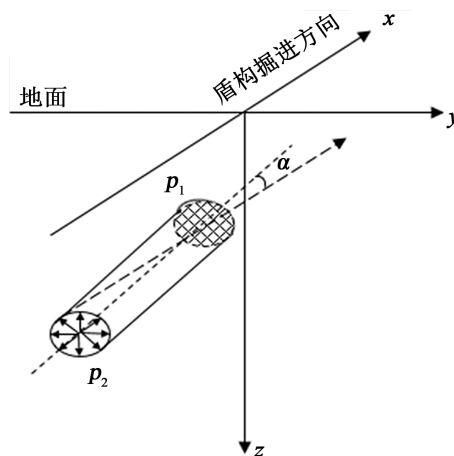


Figure 1. Diagram of GPST shield tunnelling model

图 1. GPST 盾构法掘进模型示意图

## 2. 理论模型和基本假定

GPST 盾构法相较于普通盾构隧道，最明显的特征便是盾构轴线与水平面存在一定的夹角  $\alpha$  [9] [10] [11]，在考虑正面推力及盾尾注浆压力的情况下，所建立的力学模型应充分体现 GPST 盾构法隧道的特点，可实现无工作井地面进出式盾构掘进时垂直变形的分析。因此，基于 GPST 盾构法隧道的特殊性，本文建立了能够计算与地面不同夹角情况下的土体垂直变形理论模型。其掘进力学模型可简化如图 1 所示。

对图 1 理论模型做如下假定：

- 1) 软土为近似均质体，理论计算中将土体当作线弹性半无限空间体；
- 2) 盾构掘进轴线与水平面角度为  $\alpha$ ；
- 3) 正面附加推力作用在开挖面上，作用方向同盾构掘进轴线方向；
- 4) 同步注浆附加压力沿盾尾圆周径向均匀分布，作用在盾尾后方两环管片宽度土体上；
- 5) 盾构壳体为刚性体，不考虑盾壳摩擦力对施工的影响。

## 3. GPST 盾构法施工引起的土体垂直变形理论分析

GPST 盾构法施工引起的土体垂直变形是开挖面附加推力土体竖向位移 ( $w_{p1}$ )、盾尾注浆压力引起的土体竖向位移 ( $w_{p2}$ ) 及地层损失引起的竖向位移值 ( $w_3$ ) 的叠加，即可得到无工作井大尺度盾构掘进时的竖向位移值：

$$w = w_{p1} + w_{p2} + w_3 \quad (1)$$

### 3.1. 正面附加推力引起的土体竖向位移

Mindlin 解假定土体为半无限弹性的各向同性体，推导出在土体内一点  $(0,0,c)$  作用水平及竖向集中荷载时，土体内任意点  $(x',y',z')$  处的竖向位移及水平位移值，Mindlin 计算模型如图 2。

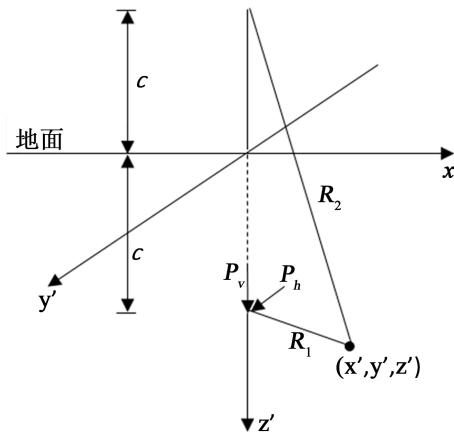


Figure 2. Diagram of Mindlin solution  
图 2. Mindlin 解示意图

本文主要研究荷载作用下土体的竖向位移，在水平集中力及竖向集中力作用下，土体内任意一点的竖向位移值为：

$$w_1 = \frac{P_v}{16\pi G(1-\nu)} \left[ \frac{3-4\nu}{R_1} + \frac{8(1-\nu)^2 - (3-4\nu)}{R_2} + \frac{(z'-c)^2}{R_1^3} + \frac{(3-4\nu)(z'+c)^2 - 2cz'}{R_2^3} + \frac{6cz'(z'+c)^2}{R_2^5} \right] \quad (2)$$

$$w_2 = \frac{P_h y'}{16\pi G(1-\nu)} \left[ \frac{z'-c}{R_1^3} + \frac{(3-4\nu)(z'-c)}{R_2^3} - \frac{6cz'(z'+c)^2}{R_2^5} + \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{R_2(R_2+z'+c)} \right] \quad (3)$$

式中,  $w_1$ ,  $w_2$  分别是竖向集中力及水平集中力作用下的竖向位移, m;

$P_v$ ,  $P_h$  分别为作用在该点的竖向集中力与水平集中力, kN;

$\nu$  为周围土体的泊松比;

$G$  是土体剪切刚度,  $G = \frac{(1-2\nu K_0) E_s}{2(1+\nu)}$ ,  $E_s$  为土体的压缩模量;

$$R_1 = \sqrt{x'^2 + y'^2 + (z'-c)^2}, \quad R_2 = \sqrt{x'^2 + y'^2 + (z'+c)^2}, \quad \text{m}.$$

由图 2 可以看出, Mindlin 解假设荷载作用在了竖直坐标轴上, 实际工程中土体受荷位置是不定的, 所以需对以上公式中的坐标值进行相应的坐标变化, 假定全局坐标系与示意图中局部坐标系坐标轴互相平行, 且局部坐标系距离全局坐标系原点  $x$  方向距离为  $m$ ,  $y$  方向距离为  $n$ , 则  $x' = x - m$ ,  $y' = y - n$ ,  $z' = z$ 。

假设作用在开挖面的正面附加推力值为  $p_1$ , 作用面积即为圆形开挖面, 则对于开挖面上任意微元  $dA = r dr d\theta$ , 所受集中力  $dp_1 = p_1 r dr d\theta$ , 作用方向沿盾构轴线方向, 将其分别沿水平方向及竖直方向进行分解, 可得水平集中力  $dp_{1h} = p_1 \cos \alpha r dr d\theta$  和竖向集中力  $dp_{1v} = p_1 \sin \alpha r dr d\theta$ , 在考虑盾构坡度的情况下, 该微元对应  $m$  值为  $r \sin \theta \sin \alpha + r \cos \theta$ ,  $n$  值为  $r \cos \theta$ ,  $c$  值为  $H - r \sin \theta \cos \alpha$ , 开挖面附加推力分解示意图如图 3 所示, 将上述转换坐标值及集中力竖向及水平分量分别带入到 Mindlin 基本解中, 将微元进行积分计算, 可得正面附加推力在竖向分力和水平分力作用下土体任意一点  $(x, y, z)$  处产生的竖向位移量。

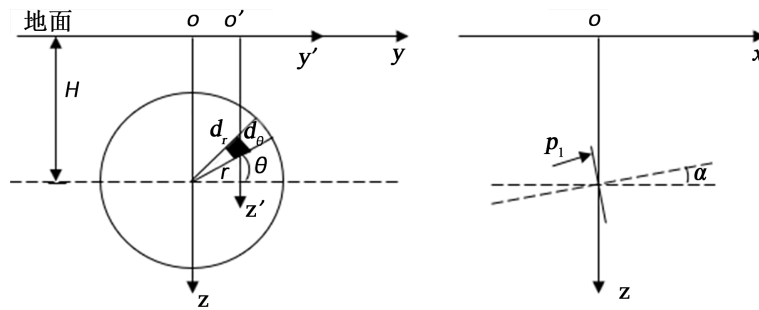


Figure 3. Diagram of excavation face trust force  
图 3. 正面附加推力示意图

$$w_{p1v} = \frac{p_1 \sin \alpha}{16\pi G(1-\nu)} \int_0^{2\pi} \int_0^R \left[ \frac{3-4\nu}{R_1} + \frac{8(1-\nu)^2 - (3-4\nu)}{R_2} + \frac{(z'-c)^2}{R_1^3} + \frac{(3-4\nu)(z'+c)^2 - 2cz'}{R_2^3} + \frac{6cz'(z'+c)^2}{R_2^5} \right] dr d\theta \quad (4)$$

$$w_{p1h} = \frac{p_1 \cos \alpha x'}{16\pi G(1-\nu)} \int_0^{2\pi} \int_0^R \left[ \frac{z'-c}{R_1^3} + \frac{(3-4\nu)(z'-c)}{R_2^3} - \frac{6cz'(z'+c)^2}{R_2^5} + \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{R_2(R_2+z'+c)} \right] dr d\theta \quad (5)$$

将上述两种集中力作用叠加即可得到  $p_1$  引起的  $xyz$  坐标系中任意一点的竖向位移  $w_{p1}$ :

$$w_{p1} = w_{p1v} + w_{p1h} \quad (6)$$

式(6)中,  $R$  为盾构开挖半径,  $R_1 R_2$  为经过坐标变换后的值。

### 3.2. 盾尾注浆压力引起的土体竖向位移

盾尾注浆压力可认为作用在盾尾周围土体上的环向作用力，考虑盾构坡度情况下注浆压力分解示意图如图4所示。

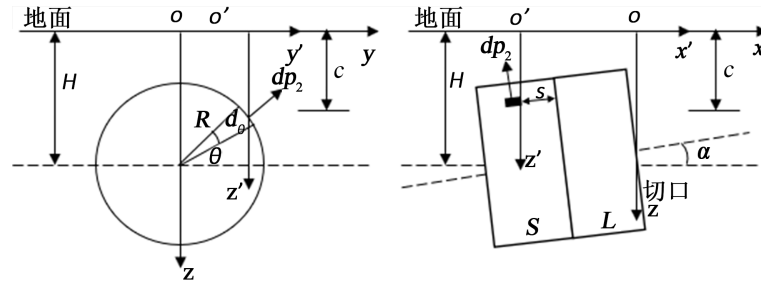


Figure 4. Diagram of shield void grouting pressure  
图4. 盾尾注浆压力分解示意图

图中  $L$  为盾构机长度， $S$  为注浆宽度。取盾尾注浆作用土体微元  $dA = Rdsd\theta$ ，其受到作用力为  $dp_2 = p_2 Rdsd\theta$ ，同上将该作用力沿水平及竖直方向进行分解，由于环向分布，相较于正面附加推力，其沿隧道横截面方向也有水平分力，则  $dp_2$  在各个方向上的分力分别为  $dp_{2x'} = p_2 \cos\theta Rdsd\theta$ ， $dp_{2y'} = p_2 \sin\theta \sin\alpha Rdsd\theta$ ， $dp_{2z'} = p_2 \sin\theta \cos\alpha Rdsd\theta$ ，此时该微元再全局坐标系下对应坐标转换值  $m = (L+S)\cos\alpha + R\sin\theta\sin\alpha$ ， $n = R\cos\theta$ ， $z' = H + (L+s)\sin\alpha - R\sin\theta\cos\alpha$ ，将以上水平及竖向分力和坐标分别代入 Mindlin 竖向和水平位移解中进行积分运算，可得土体任意一点的垂直变形量。

盾尾注浆压力在  $x'$ 、 $y'$  方向水平分力作用下，土体内任意一点  $(x', y', z')$  处竖向位移分别为：

$$w_{p2x} = \frac{p_2 R \cos\alpha x'}{16\pi G(1-\nu)} \int_0^{2\pi} \int_0^S \left[ \frac{z'-c}{R_1^3} + \frac{(3-4\nu)(z'-c)}{R_2^3} - \frac{6cz'(z'+c)^2}{R_2^5} + \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{R_2(R_2+z'+c)} \right] dsd\theta \quad (7)$$

$$w_{p2y} = \frac{p_2 R \sin\theta \sin\alpha x'}{16\pi G(1-\nu)} \int_0^{2\pi} \int_0^S \left[ \frac{z'-c}{R_1^3} + \frac{(3-4\nu)(z'-c)}{R_2^3} - \frac{6cz'(z'+c)^2}{R_2^5} + \frac{4(1-\nu)(1-2\nu)}{R_2(R_2+z'+c)} \right] dsd\theta \quad (8)$$

在注浆压力  $z'$  方向竖向分力作用下，土体内任意一点处产生的竖向位移为：

$$w_{p2z} = \frac{p_2 R \sin\theta \cos\alpha}{16\pi G(1-\nu)} \int_0^{2\pi} \int_0^R \left[ \frac{3-4\nu}{R_1} + \frac{8(1-\nu)^2 - (3-4\nu)}{R_2} + \frac{(z'-c)^2}{R_1^3} + \frac{(3-4\nu)(z'+c)^2 - 2cz'}{R_2^3} + \frac{6cz'(z'+c)^2}{R_2^5} \right] drd\theta \quad (9)$$

将三个方向分力产生的竖向位移叠加，可得在注浆压力作用下土体内任意一点处产生的竖向位移，即：

$$w_{p2} = w_{p2x} + w_{p2y} + w_{p2z} \quad (10)$$

### 3.3. 地层损失引起的土体竖向位移

目前有关地层损失引起的土体位移研究主要有经验公式法、解析法、数值法及理论分析法等。其中较为常用的经验公式法是 Peck 公式法，其认为沉降槽体积等于土体损失的体积，国内外学者结合具体工程提供了充足的经验系数，具体计算方法参考相关文献[12] [13] [14]。而常用的解析法大都基于线弹性土体推导而来，例如 Sagaseta 假定周围土层为径向均匀收敛，并推导了该收敛模式下地层损失引起的地层变形

公式, 随后各国学者基于 Sagaseta 法, 开展了大量的解析法研究, Loganathan 等人推导出产生非等量径向位移时的土体位移, 我国学者魏刚基于非等量收敛模型, 综合考虑泊松比等因素, 提出了土体竖向位移修正值[15]。

理论分析有 Litwinizyn 提出的随机介质理论, 以及国内王铁生等将灰色模型引入到隧道开挖引起的土体变形预测中, 取得了较好的效果。此外, 还有近几年兴起的人工神经网络法等。

本文采用魏刚基于 Sagaseta 法修正所得的地表竖向位移计算公式[3]:

$$w_3 = 2(1-\nu) \frac{V_s}{\pi} \frac{H_1}{x^2 + H_1^2} \left( 1 - \frac{y+L}{\sqrt{(y+L)^2 + x^2 + H_1^2}} \right) \exp \left[ -\frac{1.38x^2}{(H_1 + R)^2} \right] \quad (11)$$

式中,  $V_s$  是单位长度地层损失, 考虑盾构坡度的变化,  $H_1 = H - x \cos(\alpha)$  其余符号意义同上。

$V_s$  是与地层损失率有关的, 关于地层损失得确定, 一般有两种方式, 一种是根据工程经验和施工方式类别所得, 另一种根据 Lee [4]等人提出的等效土体损失的概念进行计算, 上述单位长度地层损失可表示为:

$$V_s = \pi R_1^2 \eta \quad (12)$$

$$V_s = \pi R_1^2 - \pi R^2 = \pi (R_1 g - g^2 / 4) \quad (13)$$

$$g = \alpha G_p + U_{3D} + \omega \quad (14)$$

上式中,  $R_1$  为考虑地层损失的开挖半径,  $R$  为隧道外径,  $\eta$  为地层损失率,  $G_p$  为盾构与隧道的几何间隙, 对于粘土,  $\alpha = 0.116(h/2R) - 0.042$ ,  $U_{3D}$  为盾构前方土层的三维弹塑性变形, 对于全断面土压支护的盾构, 可取 0,  $\omega$  是与施工有关的参数。

#### 4. GPST 盾构法土体垂直变形案例分析

本文以上海市龙水南路越江通道新建工程北线盾构段为背景, 在超浅覆土阶段盾构主要穿越③灰色淤泥质粉质粘土、④灰色淤泥质粘土, 依据工程勘察报告对土层性质进行均一化处理, 选取 0.5 倍洞径埋深工况进行计算。

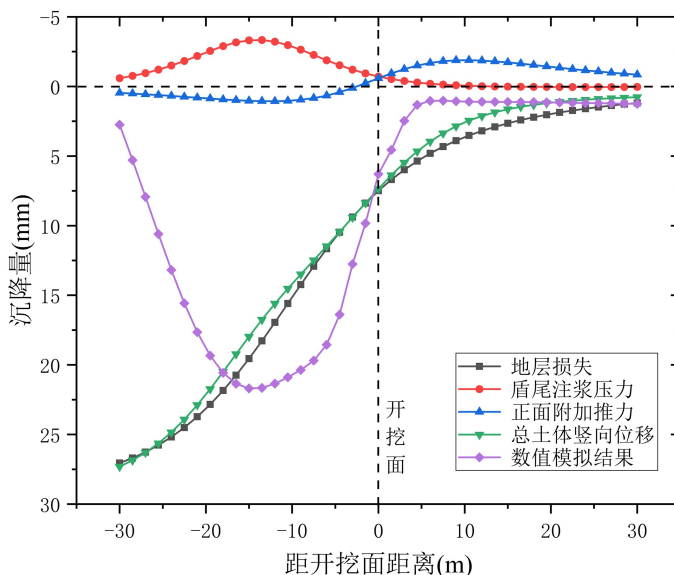


Figure 5. Longitudinal surface settlement curve  
图 5. 纵向地表变形曲线

计算参数取值:  $D = 11.66 \text{ m}$ ,  $L = 12 \text{ m}$ ,  $S = 3 \text{ m}$ ,  $H = 17.5 \text{ m}$ ,  $K_0 = 0.6$ ,  $\nu = 0.37$ ,  $E_s = 3.5 \text{ MPa}$ ,  $\alpha = 3.38^\circ$ , 其余参数根据经验取值。

上述理论计算公式利用 Matlab 软件无法直接积分求解, 故采用六点高斯 - 勒让德公式进行数值计算, 参照图 1 坐标系, 正值代表沉降, 负值代表隆起。

### 1) 理论计算与数值模拟结果对比

图 5 为考虑正面附加推力、注浆压力及地层损失等因素与数值计算对比结果, 可以发现, 盾尾注浆压力会导致土面隆起, 在本算例中, 附加注浆压力引起的隆起量最大值出现在开挖面后方 13.5 m 处(出盾尾后的注浆区), 最大值为 3.4 mm; 正面附加推力产生的竖向位移以开挖面为轴呈现反对称分布规律, 开挖面前方产生轻微隆起, 隆起最大值为 1.9 mm, 开挖面后方轻微沉降, 沉降最大值为 1.1 mm; 地层损失在开挖面前方引起的地表竖向位移较小, 而在开挖面后方会引起较大的竖向位移, 同时也可以看出相较于前两者, 地层损失是造成地面乘降的主要因素, 所以总竖向位移曲线与地层损失引起的沉降曲线较为接近, 当经过注浆压力作用区时, 沉降量会有轻微的减小。

将理论计算结果与数值模拟结果对比可发现, 数值模拟结果中竖向位移最大值发生在注浆压力作用区, 同注浆压力引起的地表隆起最大值处于相同位置。此外, 数值模拟中开挖面后方 15 m 处开始出现沉降量逐步减小的现象, 原因是由于得到了管片的支护效果, 而理论计算未考虑衬砌管片的支护作用, 故沉降量未出现明显减小的现象; 在开挖面后方 13.5 m 作用数值模拟计算的地表最大沉降值为 21 mm, 略微大于理论计算所得的 18 mm, 其原因是由于数值模拟计算中采用了适用于软土地区的剑桥模型, 而 Mindlin 解是基于弹性体得到的理论解, 另外 Mindlin 解无法考虑时间效应, 数值模拟中通过设置分析步时长模拟了盾构开挖的时间效应。

选取纵向位移取得极值处(盾尾经过)开挖面后方 13.5 m, 绘制横向位移曲线如图 6 所示, 可以看出, 在分布模式上, 理论分析和数值模拟结果呈现出相似的变化, 正面附加推力、盾尾注浆压力、地层损失对沉降量的影响同上, 土体总竖向位移同数值模拟结果相比, 沉降槽较宽, 最大值偏小。

### 2) 盾构坡度对不同施工因素产生竖向位移的影响规律

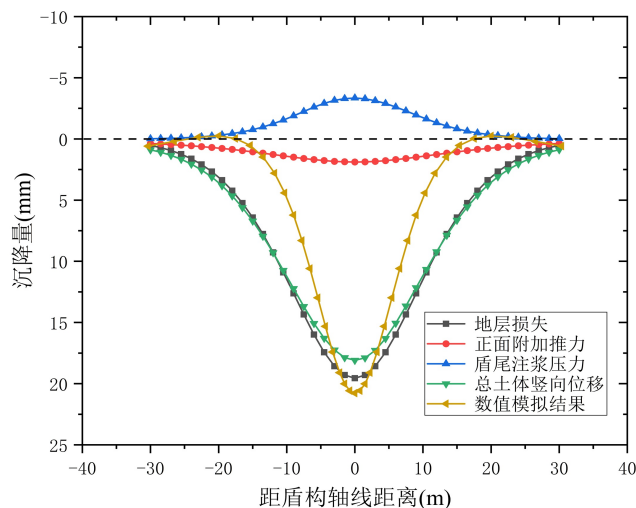
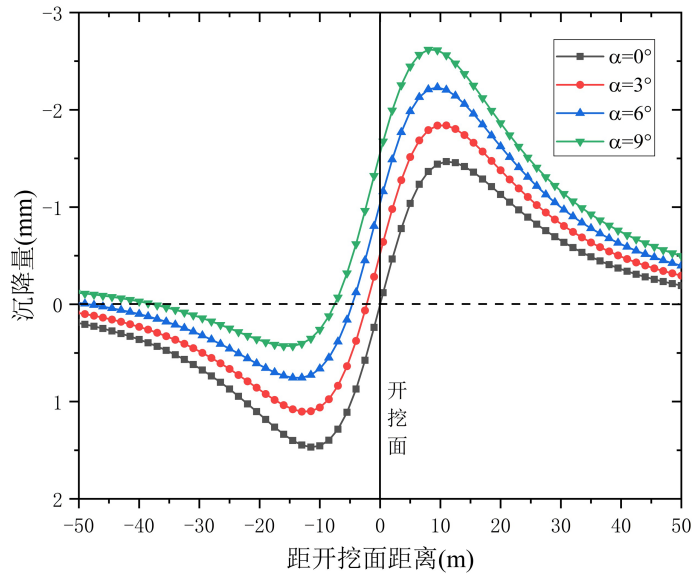


Figure 6. Transverse surface settlement curve during shield void passing  
图 6. 盾尾经过时地表横向位移曲线

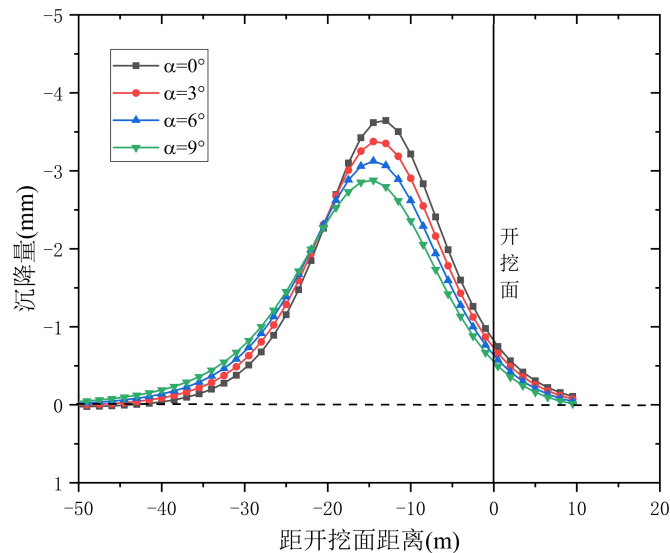
在越江隧道中, 难免会经历不同的坡度工况, 本文采用理论计算的方式对不同坡度工况下, 地面沉降的影响规律展开分析。



**Figure 7.** The effect of face additional force due to gradient variation  
**图 7.** 坡度变化对正面附加推力的影响

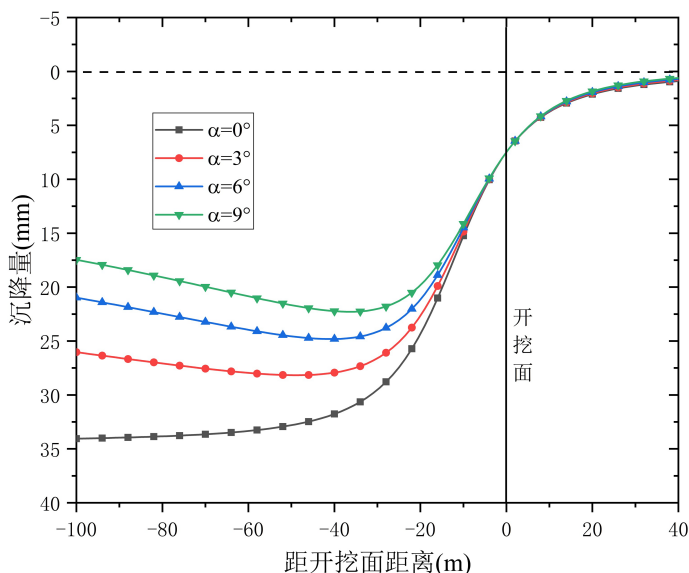
在正面附加推力对地表沉降影响方面如图 7 所示，当  $\alpha = 0^\circ$  时，沉降量关于开挖面与地面的交点成反对称趋势，地表最大隆起值在开挖面前方 11 m 处达到最大值 1.4 mm，随着坡度增大，地面沉降不再表现出明显的反对称分布模式，相较于  $\alpha = 0^\circ$  工况，整体沉降曲线向上移动，即开挖面前方隆起量逐渐增大，开挖面后方沉降量逐步减小；最大隆起值位置随坡度增大逐渐向开挖面靠近，最大沉降值呈现相反的变化规律；四种工况下对应的最大隆起量分别为 1.4 mm、1.8 mm、2.2 mm、2.6 mm，随坡度呈现出线性增大的变化规律。可以看出，随着坡度增大，正面附加推力的竖向分量会增大，当坡度为正(上仰掘进时)，正面附加推力的竖向分量将前方土体向地面推进的效果会更加强烈。

图 8 为不同坡度工况下，注浆压力对地面沉降量的影响规律，注浆压力作用范围选取的两环管片宽度(3 m)，可知不同坡度下，注浆压力影响范围无太大差别，大致为开挖面前方 10 m，开挖面后方 40 m；



**Figure 8.** The effect of void grouting pressure due to gradient variation  
**图 8.** 坡度变化对盾尾注浆压力的影响





**Figure 9.** The effect of ground loss ratio due to gradient variation  
**图 9.** 坡度变化对地层损失率的影响

随着坡度增大,地面沉降量最大值逐步减小,原因是由于坡度增大,注浆压力竖向分量减小所致;不同坡度下,地表沉降量最大值发生的位置大致在开挖面后方 13.5 m 左右(注浆压力作用区),且随着坡度增大,沉降量最大值发生位置有逐渐远离开挖面的趋势。

坡度变化对地层损失引起的竖向位移影响规律如图 9 所示,在开挖面后方 10 m 处至开挖面前方不同坡度工况下地表沉降量没有明显差异,在开挖面后方 10 m 处达到最大值 15 mm,开挖面后方 10 m 之后地面沉降量随坡度增大,表现出明显减小的趋势,也表明地层损失主要影响开挖面后方的土体。

## 5. 结论

本文以 GPST 盾构法土体竖向位移为研究对象,基于 Mindlin 弹性解,推导出考虑盾构坡度时正面附加推力、盾尾注浆压力的 GPST 盾构法竖向位移计算公式,并结合基于 Sagaseta 法修正所得的地层损失引起的地表竖向位移计算方法,对上海市龙水南路越江通道新建工程地面沉降量进行了理论计算,探究了不同施工因素对地面沉降量的影响规律,并将计算结果与数值模拟结果进行对比分析,得到如下结论:

1) 本文建立的理论模型与数值模拟计算结果吻合很好,并得到实例验证,主要体现在地面沉降量以及竖向位移分布模式方面,可作为软土地区 GPST 大尺度盾构竖向位移预测的有效方法。

2) 计算结果表明,GPST 盾构法正面附加推力在保证开挖面稳定的同时会使开挖面前方土体略有隆起,盾尾附加注浆压力会导致开挖面后方土体的隆起,综合作用下的土体竖向位移曲线与地层损失引起的竖向位移变化曲线较为相似。

3) 随着 GPST 盾构上仰坡度增大,正面附加推力和地层损失引起的地面纵向沉降曲线均呈向上移动模式。

4) 随着盾构上仰坡度增大,注浆压力竖向分量减小导致注浆压力引起的地面纵向沉降曲线向下移动,且最大隆起量产生的位置逐渐远离开挖面。

## 基金项目

本项目得到了上海市科委重大科技攻关项目(18DZ1205105)的资助,在此一并致谢。

## 参考文献

- [1] 朱忠隆, 张庆贺, 易宏传. 软土隧道纵向地表沉降的随机预测方法[J]. 岩土力学, 2001, 22(1): 56-59.
- [2] 魏纲, 张世民, 齐静静, 姚宁. 盾构隧道施工引起的地面变形计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(z1): 3317-3323.
- [3] Loganathan, N. and Poulos, H.G. (1998) Analytical Prediction for Tunneling-Induced Ground Movements in Clays. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, **124**, 846-856. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1998\)124:9\(846\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:9(846))
- [4] Lee, K.M., Rowe, R.K. and Lo, K.Y. (1992) Subsidence Owing to Tunneling, I: Estimating the Gap Parameter. *Canadian Geotechnical Journal*, **29**, 929-940. <https://doi.org/10.1139/t92-104>
- [5] 王铁生, 张利平, 华锡生, 张冰. 隧道地表沉降预测的时变参数灰序模型 TGM-AR [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(6): 655-658.
- [6] Zhang, Z.X., Liu, C., Huang, X., Kwok, C.Y. and Teng, L. (2016) Three-Dimensional Finite-Element Analysis on Ground Responses during Twin-Tunnel Construction Using the URUP Method. *Tunneling and Underground Space Technology*, **58**, 133-146. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.05.001>
- [7] Liu, C., Zhang, Z.X., Kwok, C.Y., Jiang, H.Q. and Teng, L. (2017) Ground Responses to Tunneling in Soft Soil Using the URUP Method. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **143**, Article ID: 04017023.
- [8] 张子新, 胡文, 刘超, 滕丽. 地面出入式盾构法隧道新技术大型模型试验与工程应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2161-2169.
- [9] 高守栋, 刘超, 张子新, 刘海. 地面出入式盾构隧道施工对周边地层扰动研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(3): 903-914.
- [10] 高昂, 张孟喜, 蒋华钦, 梁勇. 地面出入式盾构法隧道施工同步注浆工程应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(9): 1871-1883.
- [11] 滕丽. 地面出入式盾构法隧道技术(GPST)施工变形监测与分析研究[J]. 中国市政工程, 2016(3): 100-103.
- [12] 吴惠明, 黄俊, 张冠军, 滕丽. 地面出入式盾构法隧道同步注浆工艺模拟试验[J]. 中国市政工程, 2013(6): 80-82.
- [13] 姜弘, 张银屏, 丁文其. 地面出入式盾构隧道(GPST)设计综合技术研究[C]. 第七届中国公路科技创新高层论坛论文集. 北京: 人民交通出版社, 2015: 580-585.
- [14] 侯伟, 韩焯, 王法, 尹宏磊. 采用不同本构模型对盾构施工引起地层位移的数值模拟研究[J]. 隧道建设, 2013, 33(12): 989-994.
- [15] Verruijt, A. and Booker, J.R. (1996) Surface Settlements Due to Deformation of a Tunnel in an Elastic Half Plane. *Géotechnique*, **46**, 753-756. <https://doi.org/10.1680/geot.1996.46.4.753>