

DOI: 10.11779/CJGE2020S2031

考虑小应变特性的软土盾构隧道地层变形分析

易 顺^{1, 2, 3, 4}, 陈 健^{*1, 2, 3, 4}, 柯文汇⁵, 陈 斌^{6, 7}, 刘府生⁸, 黄珏皓^{1, 2, 3, 4}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 湖北省环境岩土工程重点实验室, 湖北 武汉 430071; 4. 岩土力学与工程国家重点实验室宁波工程学院工程软土实验中心,
浙江 宁波 315211; 5. 武汉市市政建设集团有限公司, 湖北 武汉 430023; 6. 宁波工程学院建筑与交通工程学院, 浙江 宁波
315211; 7. 宁波轨道交通集团有限责任公司, 浙江 宁波 315040; 8. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063)

摘 要: 盾构隧道施工不可避免会造成地层扰动, 危及周围建(构)筑物的安全, 因而准确预测盾构隧道开挖引起的地层变形显得尤为关键。以 FLAC^{3D} 中的小应变模型为出发点, 借助三轴模拟试验验证了小应变塑性硬化模型(PH-SS模型)在考虑土体小应变特性方面的有效性和先进性; 以上海某软土盾构隧道施工段为工程背景, 分别利用莫尔-库仑模型(MC模型)和 PH-SS 模型研究盾构隧道施工引起的周围地层变形分布规律。研究表明: PH-SS 模型不仅可以区分软土加载和卸载模量的差异性, 而且可以较好地反映土体剪切模量随剪应变增大而衰减的特性, 在表现软土行为时更为合理; 当应力释放系数小于 0.3 时, 预测地表沉降时考虑小应变特性与不考虑时的情况区别不大, 但当应力释放系数大于 0.3 时, 考虑土体小应变特性是十分必要的; 应力释放系数越大, 土体应力相关模量的力学响应越明显, 地层变形越大; 数值计算结果与实测数据进行对比表明, PH-SS 模型计算得到的地表沉降更大, 与实测数据更为贴近, 也说明了 PH-SS 模型在预测盾构隧道地表变形规律的适宜性。

关键词: 盾构隧道; 软土小应变特性; PH-SS 模型; MC 模型; 地层变形

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)S2-0172-07

作者简介: 易 顺(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事随机场理论及其在城市地下空间开发应用的研究。E-mail: sunyee_123@163.com。

Deformation of shield tunnels considering small strain in soft soil areas

YI Shun^{1, 2, 3, 4}, CHEN Jian^{1, 2, 3, 4}, KE Wen-hui⁵, CHEN Bin^{6, 7}, LIU Fu-sheng⁸, HUANG Jue-hao^{1, 2, 3, 4}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Hubei Key Laboratory of Geo-Environmental Engineering, Wuhan 430071, China; 4. The Soft Soil Research Center in Ningbo University of Technology, State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Ningbo 315211, China; 5. Wuhan Municipal Construction Group Co., Ltd., Wuhan 430023, China; 6. School of Civil and Transportation Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo 315211, China; 7. Ningbo Rail Transit Group Co. Ltd., Ningbo 315040, China; 8. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: The shield tunnel will inevitably cause soil disturbances and endanger the safety of nearby structures. Therefore, it is particularly important to accurately predict the deformation caused by the shield tunnel. The small strain model in FLAC^{3D} is used as a starting point, and the effectiveness and superiority of the small-strain plastic hardening model (PH-SS model) considering the small strain characteristics of soils are verified by the triaxial simulation tests. Based on the shield tunnel in Shanghai soft soil areas, the MC model and the PH-SS model are used to study the displacement fields of surrounding soils caused by the shield tunnel. The study indicates that the PH-SS model can distinguish the difference between the loading and unloading moduli reflect the attenuation of the shear modulus of soils with the increasing shear strain, and it is more reasonable for showing the behavior of soft soils. When the stress release coefficient is less than 0.3, it doesn't show much difference whether the small strain is considered or not in predicting the surface settlement. However, when the stress release coefficient is greater than 0.3, it is necessary to consider the small strain in soft soils. Large release coefficient of the shield tunnel will lead to greater mechanical response of soil stress-related modulus and larger deformation. By comparing the

基金项目: 国家自然科学基金项目(51909259, 52079135, 52008122);
宁波市公益类科技计划项目(2019C50012); 湖北省建设科技计划项目(2018); 中国科学院国际合作局国际伙伴计划(131551KYSB20180042)
收稿日期: 2020-09-01

*通信作者(E-mail: jchen@whrsm.ac.cn)

numerical results with the measured data, it can be obtained that the settlement predicated by the PH-SS model is closer to the measured data than that obtained by MC model, and it is more reasonable in predicating the surface deformation of actual shield tunnel by the PH-SS model.

Key words: shield tunnel; small strain in soft soil area; PH-SS model; MC model; soil layer deformation

0 引言

近年来, 盾构施工技术已经在地铁隧道中得到了广泛的应用, 如何正确预测城市地下工程施工对周围地层变形尤其是地表位移显得异常重要^[1-2]。纵观目前的地下施工技术, 理论研究明显不足, 实际施工大多数依赖于工程经验, 因此, 许多学者对盾构隧道施工引起的地层变形进行了研究。Peck^[3]于 1969 年提出了一种经验公式来预测地表沉降变形, 许多工程实例已经证明了它的使用效果, 但该公式中参数的选取往往取决于实际工程经验, 未考虑土层条件, 也不能预测深部土层位移情况; 吴昌胜等^[4]研究了不同盾构直径对隧道地层损失率和地表沉降的影响; 张冬梅等^[5]在研究隧道地表沉降时考虑了衬砌局部渗流作用的影响。以上研究均没有考虑土体的小应变特性, 而大量工程实测数据表明, 实际工程诸如地铁、基坑变形等中岩土体应变都很小, 主要集中在 0.01%~0.3%^[6-7], 在此情况下, 土体的剪切刚度是随着应变的增加而减小的, 土体在小应变阶段的刚度要远大于较大应变阶段的刚度。众多的岩土试验^[8-9]也表明, 土体的剪切模量与剪应变之间存在一种非线性关系, 图 1 是相应的归一化刚度退化曲线。

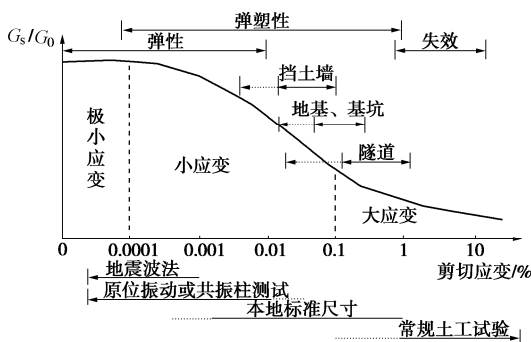


图 1 刚度衰减曲线和应变范围

Fig. 1 Curves of stiffness decreasing with strain and ranges of strain

Lee 等^[10-11]的研究表明, 利用理想弹塑性本构模型 (莫尔-库仑模型) 来预测实际盾构施工变形, 其结果偏于保守。因此, 土体小应变特性会对预测盾构施工地层尤其是地表变形产生重要的影响。

鉴于此, 本文从小应变塑性硬化本构 (PH-SS 模型)^[12]和莫尔-库仑本构 (MC 模型) 出发, 对盾构施工地层变形规律展开了研究。首先基于三轴模拟试验

证实了 PH-SS 模型反映土体小应变特征的有效性; 依托上海某一软土隧道工程, 比较 PH-SS 模型和 MC 模型在模拟盾构施工中地表及深部土体变形规律的异同; 最后结合现场监测数据, 说明 PH-SS 模型在盾构施工地表变形预测中的先进性和合理性。

1 PH-SS 模型的介绍

1.1 有限差分程序中的小应变本构模型

针对有限差分程序中的小应变特性研究, 尹骥^[13]在室内试验的基础上, 利用 FLAC^{3D} 中内嵌的 fish 语言将试验结果应用到有限差分程序的二次开发中, 但这往往难度较大, 同时自定义的本构模型往往受到试验结果较大的影响。本文利用 FLAC^{3D} 内置的 Plastic Hardening-Small Strain model (简称 PH-SS 模型)^[12]来反映土体的小应变特性。

PH-SS 模型以硬化土模型 (PH 模型) 为基础, 充分考虑了 BENZ^[8]提出的卸载—再加载应变相关刚度关系, 将土体的小应变特性考虑到有限差分程序中, 最终用小应变参数 G_0 (初始剪切模量) 和 γ_{70} (剪应变阈值) 来反应土体的小应变特性。除此之外, PH-SS 还包含了 11 个硬化土模型参数: 有效黏聚力 c' 、膨胀角 ψ 、有效内摩擦角 φ' 、三轴固结排水剪切试验的参考割线模量 E_{50}^{ref} 、固结试验的参考切线模量 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 、三轴固结排水卸载再加载试验的参考加卸载模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 、与模量应力水平相关的幂指数 m 、参考应力 p^{ref} 、破坏比 R_f 、泊松比 ν 、正常固结时的静止侧压力系数 K_0 。

PH 模型以增量弹性定律来描述弹性行为; 采用的是剪切屈服流动准则, 确定剪切硬化开始和发展的剪切屈服函数可以表示为

$$f^s = \frac{E_{\text{ur}}}{E_i} \cdot \frac{q_a q}{(q_a - q)} - q - \frac{E_{\text{ur}} \gamma^p}{2} = 0 \quad (1)$$

式中 $E_i = 2E_{50}/(2-R_f)$ 是初始变形模量; $q_a = q_f/R_f$, 破坏比 R_f 是一个比 1 还小的值 (通常取 0.9); 而最终偏应力 q_f 的定义和莫尔-库仑准则是一致的, q 是偏应力, PH 模型还引入一种截止因子 f_{cut} (Cut-off) 以防止偏应力过大; γ^p 是剪切硬化参数 (内部变量之一), $\Delta \gamma^p = -(\Delta \epsilon_1^p + \Delta \epsilon_2^p + \Delta \epsilon_3^p)$, 由此可见, γ^p 与 3 个塑性应变有关。

PH 模型中的体积塑性应变和剪切塑性应变之间的流动规律如下:

$$\Delta \varepsilon_v^p = \sin \psi_m \Delta \gamma^p \quad (2)$$

式中, $\sin \psi_m$ 为动力膨胀角, 应该小于或等于定义的最终膨胀角 ψ 。

PH 模型的剪切势函数为

$$g^s = (-1 + \sin \psi_m) + (1 + \sin \psi_m) \sigma_3 / 2 \quad (3)$$

式中, σ_1 为最大主应力, σ_3 为最小主应力。

为了避免土体达到临界孔隙状态 e_{\max} 时发生过度膨胀, 对膨胀角进行了稍微修改。主要是采用 Schanz 等^[14]提出的一种设定分割线方法:

$$\sin \psi_m^{\text{cut}} = 0 \quad (e \geq e_{\max}) \quad (4)$$

这时为避免膨胀角的突然变化, 对膨胀角进行平滑处理:

$$\sin \psi_m^{\text{smooth}} = 100(1 - e/e_{\max}) \sin \psi_m \quad (e \geq 0.99 e_{\max}) \quad (5)$$

对有截止因子 f_{cut} (Cut-off), 光滑处理 (Smoothing) 和没有截止因子 f_{cut} (No Cut-off) 3 种情况下的土体膨胀规律进行了如图 2 所示的对比, 可以看出, 光滑处理 (Smoothing) 情况下的数值计算最为稳定 (渐变过程), 与实际情况也最为贴近。

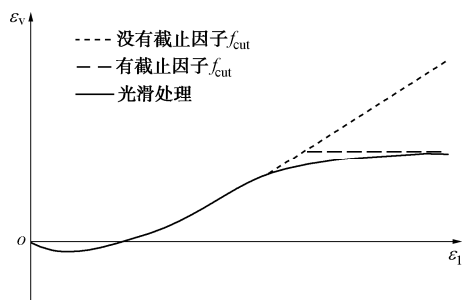


图 2 标准三轴压缩试验的体积应变曲线

Fig. 2 Curves volumetric strain of standard triaxial compression tests

PH 模型的体积屈服函数定义为

$$f^v = g^v = \tilde{q}^2 / a^2 + p^2 - p_c^2 = 0 \quad (6)$$

式中 a 为一个常量, 是基于数值固结仪测试推导得到的; \tilde{q} 为一个剪应力量度; p 为硬化参数, 而硬化参数初值 p_c (代表是先前固结压力) 可以由初始应力状态和超固结比 OCR 来确定。此处的体积硬化采用相关联流动法则。

PH-SS 模型中的小应变特性是由小应变参数 G_0 和 γ_{70} 来反映的, 其相应的关系式为

$$G / G_0 = (1 + 0.385 \gamma / \gamma_{70})^{-2} \quad (7)$$

式中 γ_{70} 为剪切模量衰减到初始剪切模量的 70% 所对应的剪应变; 初始剪切模量 G_0 可以由参考压力 p^{ref} 下的模量 G_0^{ref} 在极小的应变水平下得

$$G_0 = G_0^{\text{ref}} \left(\frac{c' \cos \phi' + \sigma_3' \sin \phi'}{c' \cos \phi' + p^{\text{ref}} \sin \phi'} \right)^m \quad (8)$$

考虑到土体的实际情况, 有限差分程序在 PH-SS 模型中充分考虑了卸载剪切模量 G_{ur} 和卸载弹性模量 E_{ur} 之间的关系, 并设置了一个下限值:

$$G_{\text{ur}} = E_{\text{ur}} / [3(1 - 2\nu)] \quad (9)$$

1.2 基于三轴模拟试验的 PH-SS 模型分析

利用 FLAC^{3D} 构建三轴压缩数值计算模型, 模型尺寸为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, 围压为 100 Pa 。为说明 PH-SS 模型在反映软土加载和卸载过程的优越性, 该三轴模拟试验利用不同的本构模型 (MC 模型, PH 模型和 PH-SS 模型) 进行计算, 且每种情况下都采用相同的循环荷载过程。

图 3 为三轴试样偏应力随轴向应变的变化曲线。可以看出, MC 模型的卸载模量和加载模量是相同的; PH 模型能够反映加载和卸载模量的差异性, 但是不区分加载路径和卸载路径; PH-SS 模型不仅能够区分加载和卸载模量的差异, 而且能较好地地区分加载路径和卸载路径, 这种情况最符合相关试验^[15]的结果, 同时也和谢东武等^[16]的模拟结果保持一致。PH-SS 模型中出现回滞环进一步说明, 随着剪应变的增大, 土体的剪切模量迅速衰减, 在加载—卸载的过程中产生塑性积累。

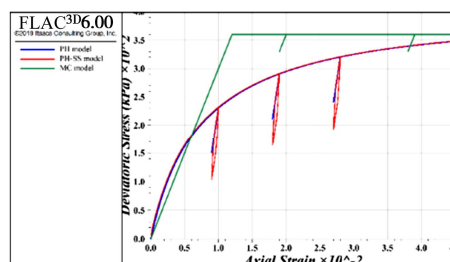


图 3 三轴试验中加卸载的应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of loading and unloading in triaxial tests

图 4 为三轴试样的剪切模量随剪应变的变化曲线。由此可知: MC 模型和 PH 模型中的模量始终保持恒定; 而 PH-SS 模型能够较好地反应土体模量随剪应变增大逐渐衰减的特性, 并达到一个下限值, 这与式 (9) 是一致的, 说明了 PH-SS 模型能够很好地表现土体的小应变特性。

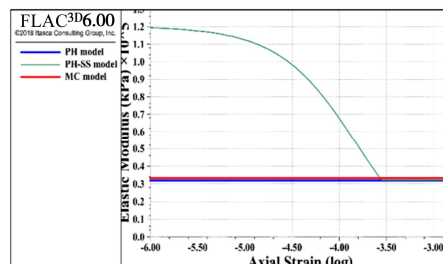


图 4 剪切模量随剪应变的关系曲线

Fig. 4 Curve of shear modulus with shear strain

表 1 PH-SS 模型的土体参数^[17-20]

Table 1 Parameters of soil of PH-SS model

介质	$\gamma /(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	ν	$\varphi/(^{\circ})$	c/kPa	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$G_0^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$p^{\text{ref}}/\text{kPa}$	m	$\gamma_{70}/10^{-4}$
1 素填土	18.0	0.35	18.0	10.0	4.0	23.2	92.8	100	0.9	2
2 粉质黏土	18.7	0.35	15.0	18.0	6.0	34.8	139.2	100	0.9	2
3 淤泥质粉质黏土	18.0	0.35	24.0	10.0	5.0	29.0	116.0	100	0.9	2
4 淤泥质黏土	17.0	0.35	19.5	10.0	4.0	23.2	92.8	100	0.9	2
5-1 粉质黏土	18.3	0.35	18.5	12.0	5.0	29.0	116.0	100	0.9	2
5-2 粉质黏土	18.3	0.35	21.0	15.0	6.5	37.7	150.8	100	0.9	2
6 粉质黏土	19.9	0.35	17.0	30.0	6.4	37.1	148.4	100	0.9	2
7-粉质黏土夹粉砂	20.1	0.30	26.3	6.0	10.2	59.2	236.6	100	0.9	2

2 基于不同模型的盾构隧道地层变形分析

2.1 计算模型的建立

根据上海某隧道^[17]的实际工程情况,建立二维数值模型。其中,隧道埋深为 11.9 m,隧道直径为 D 为 6.2 m。为避免边界的影响, X 两侧方向取 6 倍的直径尺寸,下底边界取 3 倍的直径尺寸,即模型尺寸为 76 m×40 m (宽×高)。隧道周围取 1 倍的隧道半径进行加密处理,单元尺寸为 0.5 m,其他单元尺寸为 1 m,数值模型共计有 11942 个节点、5880 个单元。

本文分别利用 PH-SS 模型与 MC 模型对土体的力学行为进行模拟。参照文献[17~20],确定上海地区典型土层的小应变模型参数见表 1。为保证数值计算结果更具有对比性,MC 模型参数选取与 PH-SS 模型中相同的数值(其中,弹性模量取对应土层的加卸载模量)。衬砌材料利用 shell 单元来模拟,衬砌结构为线弹性材料, $\gamma=24.5\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$, $\nu=0.2$; $E=24.44\times10^3\text{ MPa}$,衬砌厚度 $d=0.35\text{ m}$ 。

2.2 计算方案

采用应力释放法模拟盾构隧道的开挖和支护过程^[21]。利用不同的应力释放系数(λ 为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4)反映隧道周围的地应力因开挖所引起的扰动程度。本文分别采用 PH-SS 和 MC 两种本构模型,总计八组计算工况,如表 2。

表 2 计算工况设计

Table 2 Design of numerical cases

工况名称	是否考虑小应变特性	本构模型	应力释放系数 λ
MC-0.1	否	MC	0.1
MC-0.2			0.2
MC-0.3			0.3
MC-0.4			0.4
PH-SS-0.1	是	PH-SS	0.1
PH-SS-0.2			0.2
PH-SS-0.3			0.3
PH-SS-0.4			0.4

为研究深部土体的水平位移情况,取 5 个剖面(编号为#1, #2, #3, #4 和#5, 相对位置分别如图 5 所示)为研究对象。对于地层竖向位移情况,本文重点关注地表、地表以下 5 m 处、地表以下 10 m 处、以及隧道以下 5 m 处的地层隆沉规律。

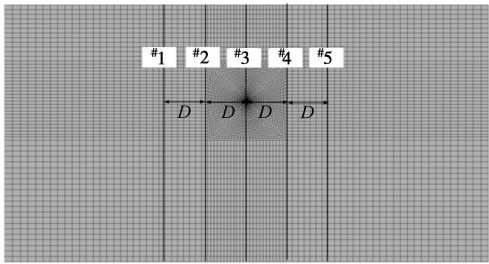


图 5 深层位移分析剖面位置示意图

Fig. 5 Profile locations for displacement analysis of deep soils layers

2.3 地表位移分析

图 6 给出了利用 PH-SS 模型计算得到的地表位移曲线,图 7 是利用 MC 模型计算得到的地表位移曲线。

由图 6, 7 可知,两种地表沉降规律大致相似,但是在较大应力释放系数情况下(如 $\lambda=0.4$),PH-SS 模型下的最大地表位移明显比 MC 模型下的地表位移大很多;在同一种本构模型计算工况下,应力释放系数越大,地表变形(竖向沉降、水平位移)越大,这是因为应力释放系数较大时,地层的应力扰动较大,造成地表变形较大。由图 8 可以得到,当应力释放系数小于 0.3 时,采用 MC 模型和 PH-SS 模型计算得到的地层损失率和最大地表沉降差别相对较小;但是当应力释放系数大于 0.3 时,采用 PH-SS 模型比 MC 模型计算的结果大得多,此时考虑模型之间的差异是必要的,这是因为盾构开挖应力释放系数较小(地层扰动较小)时,地层变形的小应变行为表现得不明显,当应力释放系数较大(地层扰动较大)时,小应变特征则十分明显,此时因剪应变而引起的刚度变化则十分显著。

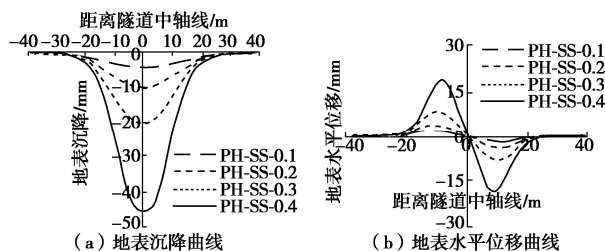


图6 利用 PH-SS 模型计算得到的地表位移曲线

Fig. 6 Curves of surface displacement based on PH-SS model

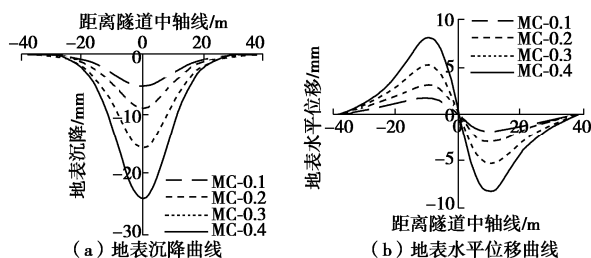


图7 利用 MC 模型计算得到的地表位移曲线

Fig. 7 Curves of surface displacement based on MC model

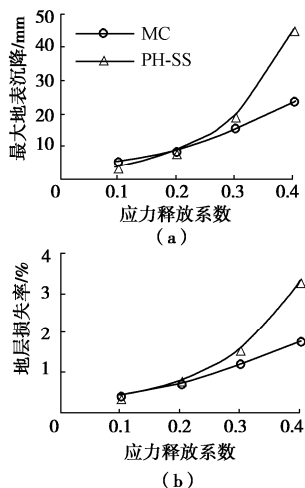


图8 地表最大沉降值、地层损失率与应力释放系数之间的关系

Fig. 8 Relationship among maximum surface settlement, volume loss rate and stress release coefficient

2.4 深部土层位移分析

以应力释放系数为 0.3 为例进行两种本构模型下的深部土层位移分析。图 9 分别为地表以下 5 m、地表以下 10 m 的土层沉降的对比曲线,可以得到,深部土层位移场中的考虑小应变特性的沉降槽宽度比不考虑小应变特性的情况要小一些。图 10 是剖面#1, #2, #4, #5 剖面的水平位移曲线,鉴于#3 剖面处于中央的位置,水平位移的差异性不明显,所以不单独列出#3 剖面的曲线。对图 10 的结果进行分析,沿着隧道对称的剖面(#1 和#4, #2 和#5)的水平位移变化规律沿隧道轴线对称,当埋深较浅时,由于地层沉降槽的形成产生了趋向隧道轴线方向的水平位移,而当埋深达到

开挖面附近时,由于盾构管片的挤压作用,水平位移变成正值(土体沿着坐标轴正向移动),随着分析剖面与隧道轴向距离的增加,岩土体受开挖扰动的影响逐渐减小。由此可见,盾构推进引起隧道周围土体向开挖面临空移动,最终水平位移大致关于中轴线对称。同时,考虑到隧道开挖造成周围地层在不同方向都产生了卸载作用,因而考虑土体加载模量和卸载模量的差异性时,土体模量变化较大,PH-SS 模型相较 MC 模型在隧道轴线埋深处的地层水平位移更大。

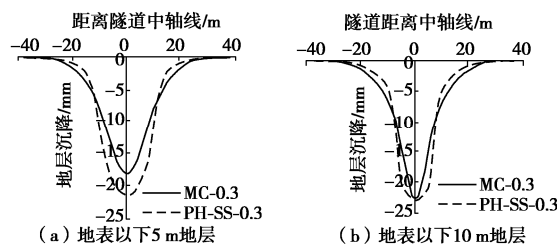


图9 地表以下地层剖面的沉降曲线

Fig. 9 Settlement curves of soil layers below surface

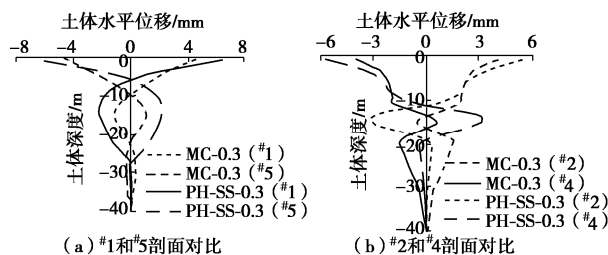
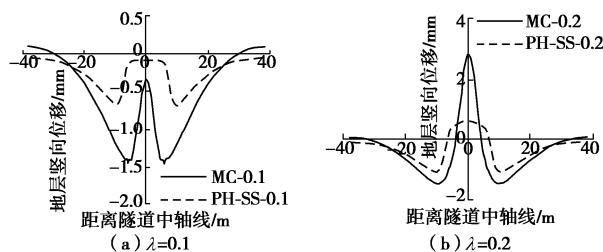


图10 深部土层剖面的水平位移曲线

Fig. 10 Curves of horizontal displacement of deep soil profile

2.5 隧道以下地层隆起分析

盾构开挖会引起隧道以下地层发生卸载, PH-SS 模型能区分土体加载和卸载模量的差异性。图 11 给出了不同应力释放系数情况下的隧道以下地层的位移规律。可以看出,两种本构模型下的地层位移规律差异较大。图 12 给出了对应地层处的最大隆起量(隆起为正、沉降为负)变化规律。可以看出, PH-SS 模型计算隆起量比 MC 模型计算值较小,并且当应力释放系数增大时,其差异性逐步增大,说明应力释放系数越大(地层扰动越大),应力相关模量的力学响应越明显,这也与前述保持一致,说明了 PH-SS 模型在地层隆起研究中的适宜性。



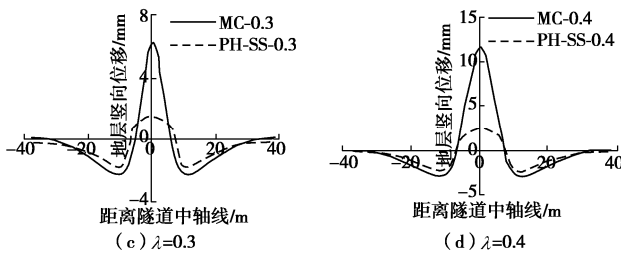


图 11 不同应力释放系数下的隧道以下 5 m 地层处的隆沉规律

Fig. 11 Heave or settlement curves of layer 5 m below tunnel

under different stress release coefficients

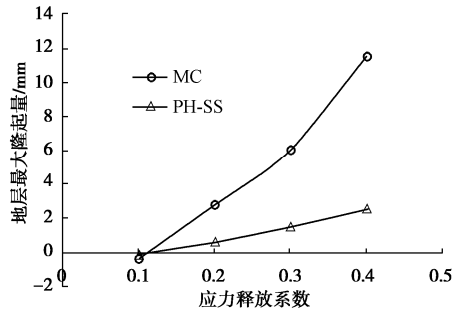


图 12 地层隆起量随应力释放系数的变化曲线

Fig. 12 Curves of soil layer uplift with stress release coefficient

3 与实测数据对比

根据上述研究, 地层变形受到应力释放系数的影响较大。而实际工程情况受很多因素的影响, 本文从简单问题出发, 以地层损失为衡量标准^[22], 通过三维数值计算结果反演二维模型的应力释放系数。三维模拟按照现场工况进行, 每步推进 1 个管片环宽即 1.0 m, 利用强度不同的等代层来模拟注浆层及超挖层部分, 最终确定二维数值计算的应力释放系数为 0.38。因此, 将 $\lambda=0.38$ 情况下基于 PH-SS 模型和 MC 模型的数值计算结果与文献[17]中的监测数据进行对比, 如图 13 所示。

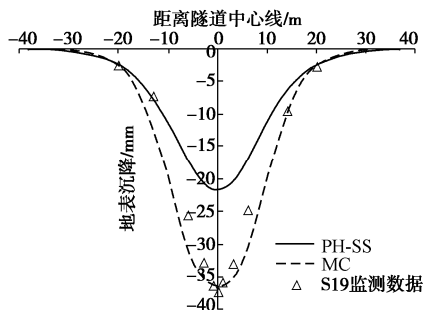


图 13 数值计算结果与实测数据对比

Fig. 13 Comparison between numerical results and measured data

由此可知, 利用 PH-SS 模型计算的地表沉降值更大, 其地表沉降曲线相较 MC 模型更加符合实际监测结果, 因此验证了预测盾构隧道地层变形中考虑小应变特性的必要性, 同时也说明了 PH-SS 模型在预测地

表沉降变形中的适用性。

4 结 论

软土地区盾构施工中的大部分区域处于小应变的状态, 本文基于 FLAC^{3D} 内置的 MC 模型和 PH-SS 模型对盾构施工地层变形规律展开研究。首先基于三轴模拟试验证明了 PH-SS 在表现土体小应变特性方面的合理性和优越性; 依托上海某软土隧道工程, 分别利用 MC 模型和 PH-SS 模型进行二维盾构施工数值计算研究, 着重研究了地层变形尤其是地表沉降随应力释放系数的演化规律, 以及利用两种本构模型计算所得结果之间的差异性; 最后将数值结果与现场数据进行了对比。

(1) 相较 MC 模型, PH-SS 模型不仅可以区分软土加载和卸载模量的差异性, 而且可以较好地反映土体剪切模量随剪应变增大而逐渐衰减的特性, 在表现软土行为时更为合理。

(2) 当应力释放系数小于 0.3 时, 预测地表沉降时考虑小应变特性与不考虑时的情况区别不大; 但是当应力释放系数大于 0.3 时, 考虑土体小应变特性是十分必要的。

(3) 应力释放系数越大, 土体应力相关模量的力学响应越明显, 地层变形越大。

(4) 数值计算结果与实测数据进行对比的结果表明, 考虑小应变特性的 PH-SS 模型地表沉降更大, 与实测数据更为贴近, 说明了 PH-SS 模型在预测盾构隧道地表变形规律更为合理。

参考文献:

- [1] LEU Sou-Sen, LO Hsien-Chuang. Neural-network-based regression model of ground surface settlement induced by deep excavation[J]. Automation in Construction, 2004, 13(3): 279 - 289.
- [2] 廖少明, 余 炎, 白廷辉, 等. 盾构隧道叠交施工引起的土层位移场分布规律[J]. 岩土工程学报, 2006(4): 485 - 490. (LIAO Shao-ming, YU Yan, BAI Yan-hui, et al. Distribution law of soil displacement field caused by overlapping shield tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006(4): 485 - 490. (in Chinese))
- [3] PECK R B. Deep excavations and tunnelling in soft ground[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1969, Mexico.
- [4] 吴昌胜, 朱志铎. 不同直径盾构隧道地层损失率的对比研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(12): 2257 - 2265. (WU

- Chang-sheng, ZHU Zhi-duo. Comparative study on volume loss rate of shield tunnels with different diameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(12): 2257 - 2265. (in Chinese))
- [5] 张冬梅, 黄宏伟, 杨 峻. 衬砌局部渗流对软土隧道地表长期沉降的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(12): 1430 - 1436. (ZHANG Dong-mei, HUANG Hong-wei, YANG Jun. Study on long-term settlement of soft soil tunnel surface caused by lining local seepage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(12): 1430 - 1436. (in Chinese))
- [6] PUZGIN A M, BURLAND J B. Non-linear model of small-strain behaviour of soils[J]. Géotechnique, 1998, **48**(2): 217 - 233.
- [7] BURLAND J B. Small is beautiful-the stiffness of soils at small strains[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1989, **26**: 499 - 516.
- [8] BENZ T. Small strain stiffness of soils and its numerical consequences[D]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2006.
- [9] ISHIIHARA K J. Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics[M]. Oxford: Oxford University Press, 1996.
- [10] LEE K M, ROWE R K. Effects of undrained strength anisotropy on surface subsidence induced by the construction of shallow tunnels[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, **26**(2): 279 - 291.
- [11] LEE K M, ROWE R K. Deformations caused by surface loading and tunnelling: the role of elastic anisotropy[J]. Géotechnique, 1989, **39**(1): 125 - 140.
- [12] FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions), Version 6.0, User manual[R]. USA: Itasca Consulting Group, Inc. 2017.
- [13] 尹 骥. 上海地区非饱和粉质黏土本构模型的研究[D]. 上海: 同济大学, 2008. (YIN Ji. Study on Constitutive Model of Unsaturated Silty Clay in Shanghai[D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese))
- [14] SCHANZ T, VERMEER P A, BONNIER P G. The hardening soil model: Formulation and verification[C]// Beyond 2000 in Computational Geotechnics-10 Years of Plaxis. Amsterdam: [s. n.], 1999: 281 - 296.
- [15] 曹 勇, 孔令伟, 杨爱武. 海积结构性软土动力性状的循环荷载波形效应与刚度软化特征[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(3): 583 - 589. (CAO Yong, KONG Ling-wei, YANG Ai-wu. Cyclic load waveform effect and stiffness softening characteristics of dynamic behavior in marine soft soil area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(3): 583 - 589. (in Chinese))
- [16] 谢东武, 管 飞, 丁文其. 小应变硬化土模型参数的确定与敏感性分析[J]. 地震工程学报, 2017, **39**(5): 898 - 906. (XIE Dong-wu, GUAN Fei, DING Wen-qi. Determination and sensitivity analysis of parameters of small strain hardening soil model[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2017, **39**(5): 898 - 906. (in Chinese))
- [17] LEE K M, JI H W, SHEN C K, et al. Ground response to the construction of Shanghai Metro Tunnel-Line2[J]. Soils and Foundations, 1999, **39**(3): 113 - 134.
- [18] 梁发云, 贾亚杰, 丁钰津等. 上海地区软土 HSS 模型参数的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(2): 269 - 278. (LIANG Fa-yun, JIA Ya-jie, DING Yu-jin, et al. Experimental study on parameters of HSS model for soft soil in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(2): 269 - 278. (in Chinese))
- [19] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 上海地区基坑开挖数值分析中土体 HS-Small 模型参数的研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(6): 1766 - 1774. (WANG Wei-dong, WANG Hao-ran, XU Zhong-hua. Study of parameters of HS-Small model used in numerical analysis of excavations in Shanghai area[J]. Rock and soil Mechanics, 2013, **34**(6): 1766 - 1774. (in Chinese))
- [20] 侯景军, 何 俊, 汤正俊, 等. 软土基坑中内插 H 型钢重力式挡土墙支护的变形及稳定性的有限元研究[J]. 岩土力学, 2014, **35**(增刊 1): 431 - 436. (HOU Jing-jun, HE Jun, TANG Zheng-jun, et al. Application of gravity retaining wall with H-shaped steel in soft soil foundation pit[J]. Rock and soil Mechanics, 2014, **35**(S1): 431 - 436. (in Chinese))
- [21] 张传庆, 冯夏庭, 周 辉, 等. 应力释放法在隧洞开挖模拟中若干问题的研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(5): 1174 - 1180. (ZHANG Chuan-qing, FENG Xia-ting, ZHOU Hui, et al. Study on several issues in tunnel excavation simulation by stress release method[J]. Rock and soil Mechanics, 2008, **29**(5): 1174 - 1180. (in Chinese))
- [22] Möller, Sven Christian. Tunnel induced settlements and structural forces in linings[R]. Stuttgart: Univ. Stuttgart, Inst. f. Geotechnik, 2006.

(编校: 胡海霞)