

DOI: 10.11779/CJGE2021S2017

基于 IGS 小应变模型的基坑开挖对隧道影响数值模拟

张 浩^{1,2}, 张陈蓉^{*1,2}, 时振昊^{1,2}, 黄茂松^{1,2}, 王浩然³, 张中杰³

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

3. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200125)

摘 要: 基坑开挖施工对临近隧道产生附加荷载, 导致隧道变形。对该问题采用数值模拟进行分析时, 土体本构模型十分重要。目前, HSS 小应变弹塑性模型经常用于软土地区基坑工程的数值模拟, 但其参数较多, 工程应用复杂。鉴于此, 提出了参数较少且能够与 HSS 模型进行参数转换的小应变非线性弹性模型—IGS(Intergranular-strain)模型。首先介绍了 IGS 模型的特点及两种模型的参数转换, IGS 模型仅用较少的参数就有能力描述不同应力路径下的小应变刚度衰减、大应变阶段应力-应变关系以及剪胀性。其次对上海东方路立交进行了工程案例。计算结果表明, IGS 模型可得到与 HSS 模型接近的结果, 验证了该模型用于基坑问题三维数值模拟的可行性。但是, 该模型对小应变刚度存在高估, 导致计算结果略小, 建议结合 Overlay 模型计算获得有效区间。

关键词: IGS 小应变模型; 基坑开挖; 隧道; 数值模拟

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)S2-0072-04

作者简介: 张 浩(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事基坑工程研究。E-mail: 1932549@tongji.edu.cn。

Numerical simulation of excavation effects on tunneling with IGS small strain model

ZHANG Hao^{1,2}, ZHANG Chen-rong^{1,2}, SHI Zhen-hao^{1,2}, HUANG Mao-song^{1,2}, WANG Hao-ran³,
ZHANG Zhong-jie³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2 Key Laboratory of Geotechnical and

Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Urban Construction Design

& Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200125, China)

Abstract: The excavation will produce additional loads on the adjacent tunnel, causing tunnel deformation. For the numerical simulation of this problem, the constitutive model for soils is very important. The hardening soil small (HSS) model has been widely used for the simulation of excavation in soft soils. For too many parameters of HSS model resulting in complexity for engineering application, a nonlinear elastic model—IGS (intergranular-strain) model is introduced, which has fewer parameters and easy parameter conversions with the HSS model. First, the characteristics of the IGS nonlinear elastic model are presented, and the parameters for the two models are given, by which the IGS model is able to describe the stiffness attenuation at small-strain stage, the stress-strain relationship at large-strain stage and dilatancy with limited parameters. Then, a case study on Dongfang Road Interchange Project in Shanghai is carried out. The calculated results show that the similar results by the two soil models verify the feasibility of IGS model for numerical simulation of excavation. However, the IGS model overestimates the small strain stiffness, which leads to slightly smaller results. The calculation with both the Overlay model and the IGS model can give estimations in rational range.

Key words: IGS small strain model; excavation; tunnel; numerical simulation

0 引 言

随着城市地下空间的持续开发, 新建基坑的环境影响问题非常重要。基坑开挖会引起临近隧道发生开裂, 错台, 漏水等事故。针对该工程问题, 理论分析和数值模拟是常用的分析手段^[1-2]。采用有限元数值模拟分析基坑开挖对临近隧道影响时, 土体本构模型的

选取对预测结果是否合理非常重要。HSS 模型因适用极小应变、小应变、大应变全部范围, 广泛用于软土地区的基坑开挖^[3]。其在工程应用中的复杂参数使得

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51738010); 国家重点研发计划项目(2016YFC0800200)

收稿日期: 2020-08-15

*通信作者(E-mail: zcrong33@tongji.edu.cn)

不少学者尝试进行简化处理, 目前主要有 Overlay 模型和 IGS(Intergranular-strain)模型两种。Benz 等^[4]提出的 Overlay 模型简化了 HSS 模型小应变部分, 且考虑了最近应力历史对小应变刚度的影响, 模型参数易于确定, 但其低估了土体小应变刚度^[5], 导致变形预测结果偏大。IGS 概念最早由 Niemunis 等^[6]提出, Shi 等^[7-8]根据该概念构造了非线性弹性模型, 简化了 HSS 模型小应变部分, 其优点为合理考虑应力路径和土体剪胀性, 模型主要参数均可通过测量获取, 计算简便。本文分别采用 HSS 模型与 IGS 非线性弹性模型对上海东方路立交基坑工程开挖进行数值模拟, 通过比较两种模型计算得到的结果, 证明了 IGS 模型在基坑开挖对临近隧道影响分析数值模拟方面的优越性, 并给出了较为合理的计算方法。

1 IGS 小应变非线性弹性模型介绍

IGS 非线性弹性模型为有效应力模型, 在各向同性弹性框架下, 应力-应变增量关系中包含不相互耦合的体变和剪切两部分^[8]:

$$\left. \begin{aligned} dp &= K_t(d\varepsilon_p - d\varepsilon_p^0), \\ dq &= 3G_t d\varepsilon_q. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 p, q 为有效平均正应力和广义剪应力; $\varepsilon_p, \varepsilon_q$ 为体应变和广义剪应变; ε_p^0 为剪切引起的初应变; K_t, G_t 为切线体变模量和切线剪切模量, 换算关系为

$$K_t = \frac{2(1+\nu)}{3(1-2\nu)} G_t, \quad (2)$$

其中, ν 为土体的泊松比。

1.1 小应变阶段剪切模量

IGS 模型基于颗粒间应变考虑小应变阶段剪切模量的衰减, 衰减规律如下^[8]:

$$G_t = G_0 \frac{m}{m_R}, \quad (3)$$

式中, G_0 为极小应变剪切模量, $G_0 = G_0^{\text{ref}}(p/p_{\text{ref}})^{n_g}$, n_g 为与应力水平相关的幂指数, 衰减系数 m 为当前剪切模量与 G_0 的比例, 取值范围 $1 \sim m_R$, m_R 计算方法见 1.4 节。 $m = m_R$ 时 $G_t = G_0$, 刚度尚未衰减; $m=1$ 时 $G_t = G_0/m_R$, 弹性剪切模量衰减至最小值。 m 的计算方法由 IGS 概念^[7]得到,

$$m = \rho^z m_T + (1 - \rho^z) m_R + \begin{cases} \rho^z |l|^n (1 - m_T) & (l > 0) \\ \rho^z |l|^n (m_R - m_T) & (l \leq 0) \end{cases}. \quad (4)$$

其中, 参数 ρ, l 分别与颗粒间应变大小及应力路径旋转相关。 ρ 为颗粒间应变大小的归一化表示, 具体为当前颗粒间应变 δ_{ij} 与颗粒间最大应变的比值。变量 l 为当前应变路径方向与最近应变历史方向夹角, 即当前应变增量 $d\varepsilon_{ij}$ 在颗粒间应变 δ_{ij} 方向上的投影 $l = \cos(\theta)$ 。 n 为材料参数。常数 m_T 与应变路径旋转角

90° 时的剪切模量有关, 为简化模型令 $m_T = m_R$ 。

δ_{ij} 的硬化规律如下^[6]:

$$\dot{\delta}_{ij} = \begin{cases} \dot{\varepsilon}_{ij} - \rho^{\beta} l \frac{\delta_{ij}}{\|\delta_{ij}\|} \|\dot{\varepsilon}_{ij}\| & (l > 0) \\ \dot{\varepsilon}_{ij} & (l \leq 0) \end{cases}. \quad (5)$$

式(4)中参数 χ , 式(5)中参数 β 和经典 Hardin-Drnevich 模型衰减曲线 $\gamma_{0.7}$ 参数建立相关性^[7]:

$$\left. \begin{aligned} \chi &= 0.172 \ln(\gamma_{0.7}) + 2.74, \\ \beta &= 3.53 \times 10^{-5} / \gamma_{0.7}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

1.2 大应变阶段剪切模量

大应变阶段, 剪切模量 G_u 由修正剑桥模型硬化规律得到,

$$G_u = \frac{G_e}{1 + \alpha G_e}, \quad (7)$$

式中, G_e 为大应变阶段的初始剪切模量, 由压缩系数 κ^* ($\ln p - \ln v$ 空间内回弹曲线和再压缩曲线斜率) 确定^[8],

$$\left. \begin{aligned} G_e &= K_u \frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)}, \\ K_u &= \frac{p}{\kappa^*}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

系数 α 表征了剪切变形非线性,

$$\alpha = \left(\frac{\bar{\eta}}{M} \right)^2 \frac{h}{M^2 - \eta^2}, \quad (9)$$

其中, 临界状态应力比 M 与临界状态摩擦角 φ_c 关系为 $M = 6 \sin \varphi_c / (3 - \sin \varphi_c)$, h 为表征硬化的参数, $h = 12(\lambda^* - k^*) / p_0$, λ^* 为 $\ln p - \ln v$ 空间正常压缩曲线的斜率, p_0 为修正剑桥模型屈服面尺寸。

1.3 剪切-体变耦合

考虑黏土剪胀性, 初应变增量为^[7]

$$d\varepsilon_p^0 = D d\varepsilon_q, \quad (10)$$

其中, 剪胀比 D 采用类似修正剑桥模型确定方式:

$$\left. \begin{aligned} D &= \beta \frac{M^2 - \eta^2}{2\bar{\eta}}, \\ \beta &= \frac{m_R - m}{m_R - 1}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

系数 β 描述了土体剪胀性从极小应变阶段的无剪胀至大应变阶段完全剪胀的线性过渡。极小应变阶段, $m = m_R$, $\beta = 0$, 土体无剪胀; 大应变阶段, $m = 1$, $\beta = 1$, 土体剪胀完全发挥。

1.4 小应变行为与大应变行为的衔接

式(3)中的参数 m_R 由下式确定:

$$m_R = \frac{G_0}{G_u}. \quad (12)$$

该定义保证了土体从小应变阶段过渡到大应变阶段应力应变曲线的光滑性。 $m=1$ 时, 进入大应变阶段, 根据式(3), (12), $G_t = G_0/m_R = G_u$, 此时土体的应

表 1 模型参数对比
Table 1 Comparison of model parameters

参数	c /kPa	φ' /($^{\circ}$)	ψ /($^{\circ}$)	n_g	E_{50}^{ref} /MPa	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ /MPa	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ /MPa	R_f	ν	G_0^{ref} /MPa	$\gamma_{0.7}$	κ^*	h /kPa $^{-1}$
HSS 模型	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
IGS 模型		√		√					√	√	√	√	√

力应变关系由大应变阶段剪切模量控制。

1.5 HSS 模型与 IGS 模型参数换算

实现 HSS 模型和 IGS 模型需要的参数见表 1。大部分 IGS 模型参数可以直接利用 HSS 模型参数得到，不能直接获得的参数 κ^* 和 λ^* 换算方法在表 1 后介绍。

κ^* 与 HSS 模型的弹性模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 关系为

$$E = \frac{3(1-2\nu)p}{\kappa^*} = E_{\text{ur}}^{\text{ref}} \left(\frac{p}{p_{\text{ref}}} \right)^{n_g} \quad (13)$$

λ^* 与 HSS 模型参数 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 关系为

$$E_{\text{oed}} = \frac{3p}{(2k_0+1)\lambda^*} = E_{\text{oed}}^{\text{ref}} \left(\frac{p}{p_{\text{ref}}} \right)^{n_g} \quad (14)$$

可以看出，当 $n_g \neq 1$ 时， κ^* 和 λ^* 的计算均与 p 相关， p 的大小应根据实际情况取值，考虑数值计算，建议 p 取值为土层中间位置的平均有效应力。式 (9) 中 h 是 λ^* ， κ^* ，和 p_0 的函数，对于正常固结黏土 p_0 可以取各土层中心位置处的平均有效应力。

2 上海东方路立交工程 N01 段基坑及下卧隧道三维数值模拟

东方路立交 N01 段基坑为长 26 m、宽 18 m 的平行四边形，开挖深度 6.5 m，平面图如图 1 (a) 所示。采用 $\phi 650$ mm 围护桩，插入深度 11.5 m。基坑采用分块开挖的方式，开挖顺序如图 1 (b) 所示。该基坑位于上海地铁 2 号线上方，基坑与隧道的详细信息参考 Liang 等^[9]，具体位置关系如图 1 所示。

数值分析采用 Plaxis 3D 软件，建模范围 100 m×100 m×40 m (长×宽×高)。支撑采用梁单元模拟，弹性模量取 200 GPa。将挡墙等效成厚度 1 m 的板，弹性模量取 22 GPa。隧道采用板单元模拟，考虑隧道管片接缝导致的整体抗弯刚度的降低，弹性模量取 5.0 GPa。模型示意图如图 2 所示。参考梁发云等^[10]确定数值模拟中有关的土体参数，如表 2 所示。

表 2 本构模型参数
Table 2 Parameters of constitutive model

参数\土层	γ /(kN·m $^{-3}$)	c /kPa	φ_c /($^{\circ}$)	ψ /($^{\circ}$)	n_g	p^{ref} /kPa	E_{50}^{ref} /MPa	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ /MPa	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ /MPa	R_f	ν	G_0^{ref} /MPa	$\gamma_{0.7}$ /(10 $^{-4}$)	κ^* /(10 $^{-3}$)	h /(10 $^{-3}$ kPa $^{-1}$)
填土	18.5	10.37	29	0	0.6	100	6.1	4.90	30.40	0.6	0.40	41.1	3.5	2.30	27.0
黏土	18.5	10.37	29	0	0.6	100	6.1	4.87	30.43	0.6	0.40	41.1	3.5	2.30	10.3
淤泥质粉质黏土	18.3	8.13	34	0	0.6	100	4.2	3.40	21.30	0.7	0.30	37.4	3.9	3.30	9.1
淤泥质黏土	16.6	4.96	27	0	0.6	100	2.2	1.70	10.90	0.8	0.35	29.2	3.4	6.40	5.4
粉质黏土	18.1	16.90	34	0	0.6	100	4.4	3.50	21.80	0.8	0.40	74.6	3.4	3.20	1.9
粉质黏土	19.4	5.00	33	0	0.6	100	5.9	4.70	29.20	0.8	0.35	74.6	3.4	2.39	1.1

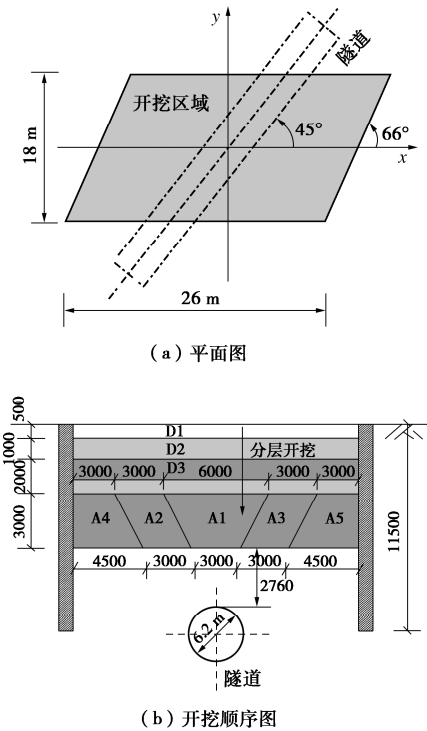


图 1 工程平面图与开挖顺序图
Fig. 1 Plan and process of project

实测提供了隧道顶部位移沿纵向的发展，本文数值模拟的结果与其对比见图 3 (c)，两种模型对隧道顶部位移的计算结果都与实测值接近，IGS 模型因高估了小应变刚度，导致隧道位移计算结果略小于 HSS 模型。图 3 (a)，图 3 (b)，图 3 (d) 分别给出了挡墙位移和基坑正下方处隧道横截面的弯矩，可以发现两种模型的计算结果无论是形式还是数值都比较接近，但是 IGS 模型的计算结果略小于 HSS 模型的结果，验证了 IGS 模型高估小应变刚度的结论。考虑到 Overlay 模型对小应变刚度的低估，针对实际工程问题，可以同时采用两种模型进行分析，以给出结果的合理区间评估。

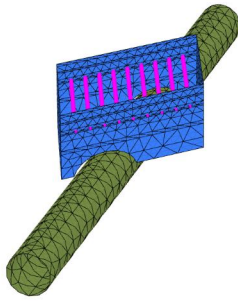


图 2 隧道和基坑模型示意图

Fig. 2 Diagram of tunnel and excavation

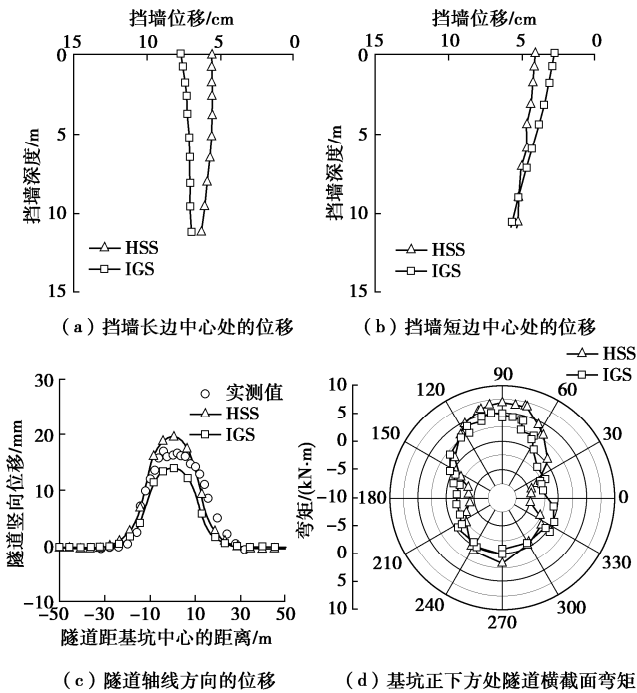


图 3 基坑开挖变形数值模拟

Fig. 3 Numerical simulation of excavation-related deformation

3 结 论

(1) 作为非线性弹性模型, IGS 模型通过较少的参数模拟出不同应力路径下的小应变刚度衰减、大应变阶段应力-应变关系以及孔隙水压发展, 能充分体现土体在不同工况下的变形特性。

(2) 通过算例分析, 对比了 HSS 模型与 IGS 模型的计算结果, 验证了 IGS 非线性模型在分析基坑开挖对临近隧道影响中的可行性。

(3) 基于计算结果对比, 得出 IGS 模型对小应变刚度的存在高估, 导致计算结果略小, 建议结合 Overlay 模型计算获得有效区间。

参考文献:

[1] YU J, ZHANG C R, HUANG M S. Soil-pipe interaction due to

tunnelling: Assessment of Winkler modulus for underground pipelines[J]. Computers and Geotechnics, 2013, **50**: 17 - 28.

[2] 王卫东, 吴江斌, 翁其平. 基坑开挖卸载对地铁区间隧道影响的数值模拟[J]. 岩土力学, 2004, **25**(增刊 2): 251 - 255. (WANG Wei-dong, WU Jiang-bin, WENG Qi-ping. Numerical modeling of affection of foundation pit excavation on metro tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(S2): 251 - 255. (in Chinese))

[3] 尹 骥. 小应变硬化土模型在上海地区深基坑工程中的应用[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(增刊 1): 166 - 172. (YIN Ji. Application of hardening soil model with small strain stiffness in deep foundation pits in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S1): 166 - 172. (in Chinese))

[4] BENZ T, VERMEER P A, SCHWAB R. A small-strain overlay model[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2009, **33**(1): 25 - 44.

[5] MU L, FINNO R J, HUANG M, et al. Defining the soil parameters for computing deformations caused by braced excavation[J]. Maejo International Journal of Science & Technology, 2015, **9**(2): 165 - 180.

[6] NIEMUNIS A, HERLE I. Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range[J]. Mechanics of Cohesive-Frictional Materials, 1997, **2**(4): 279 - 299.

[7] SHI Z H, HUANG M S. Intergranular-strain elastic model for recent stress history effects on clay[J]. Computers and Geotechnics, 2020, **118**: 103316.

[8] 时振昊, 黄茂松, 倪雨萍. 基于颗粒间应变的饱和黏土小应变各向异性非线性本构模型[J]. 岩土力学, 2021, **42**(4): 1036 - 1044. (SHI Zhen-hao, HUANG Mao-song, NI Yu-ping. Intergranular-strain based constitutive model for saturated clay with anisotropic small-strain stiffness[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(4): 1036 - 1044. (in Chinese))

[9] LIANG R Z, WU W B, YU F, et al. Simplified method for evaluating shield tunnel deformation due to adjacent excavation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, **71**: 94 - 105.

[10] 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 soils in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(2): 269 - 278. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)