

长江一级阶地软土地层 HSS 模型参数的 敏感性分析及反演*

孟超^{1,2}, 高志华¹, 黄珏皓², 柴少波¹, 刘帅^{1,2}, 孙雪兵³

1. 长安大学建筑工程学院, 陕西 西安 710064
2. 岩土力学与工程国家重点实验室/中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071
3. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430063

摘要: 依托武汉市某深基坑工程, 采用 PLAXIS 2D 软件建立数值模型, 分析黏性土和砂性土 HSS 模型参数的敏感性; 对长江一级阶地软土地层的敏感性进行评估, 并对显著敏感的参数进行反演。首先, 对黏性土和砂性土 HSS 模型部分参数进行敏感性分析, 研究了对隧道拱顶沉降影响最为显著的参数; 然后, 对长江一级阶地软土地层进行敏感性分析, 确定待反演的力学参数; 最后, 结合既有隧道拱顶沉降的监测数据, 通过确定性正反演法对待反演的力学参数进行反演。结果表明: 无论是黏性土还是砂性土, 对隧道拱顶沉降影响最为显著参数均为小应变参考初始剪切模量(G_0^{ref}); 长江一级阶地软土地层中, 对既有隧道变形影响显著的地层为粉细砂层和细砂层; 反演获得的粉细砂层 G_0^{ref} 为 90 MPa, 细砂层 G_0^{ref} 为 120 MPa。

关键词: HSS 模型; 深基坑工程; 数值模拟; 参数; 敏感性分析; 反演

中图分类号: TU43 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2025)03-0139-09

Sensitivity analysis and inversion of HSS model parameters for soft soil layers on the first terrace of the Yangtze River

MENG Chao^{1,2}, GAO Zhihua¹, HUANG Juehao², CHAI Shaobo¹, LIU Shuai^{1,2}, SUN Xuebing³

1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China
2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering / Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China
3. China Railway Siyuan Survey and Design Group Company Limited, Wuhan 430063, China

Abstract: Based on a deep foundation pit project in Wuhan, we establish a numerical model using the PLAXIS 2D, analyze the sensitivity of HSS model parameters for cohesive and sandy soils, evaluate the sensitivity of soft soil layers in the first terrace of the Yangtze River, and invert the significantly sensitive parameters. Firstly, the sensitivity analysis of certain parameters of the HSS model for cohesive and sandy soils is conducted, focusing on the parameters that most significantly affect the settlement of the tunnel crown. Then, the sensitivity analysis of the soft soil layers in the first terrace of the Yangtze River is carried out to determine the soil mechanical parameters to be inverted. Finally, combining the existing tunnel crown settlement monitoring data, the inversion of the soil mechanical parameters to be inverted is conducted using a deterministic forward-inverse method. The results show

* 收稿日期: 2024-08-26 录用日期: 2024-10-22 网络首发日期: 2025-01-24

基金项目: 国家自然科学基金(51909259)

作者简介: 孟超(2001年生), 男; 研究方向: 土体动力特性; E-mail: 2023228070@chd.edu.cn

通信作者: 黄珏皓(1991年生), 男; 研究方向: 软土动力特性; E-mail: jhhuang@whrsm.ac.cn

全文阅读



ZR20240264

that for both cohesive and sandy soils, the parameter that most significantly affects the tunnel crown settlement is the small-strain reference initial shear modulus (G_0^{ref}). In the soft soil layers of the first terrace of the Yangtze River, the layers that significantly affect the deformation of the existing tunnel are the silty fine sand layer and the fine sand layer. The inverted G_0^{ref} values for the silty fine sand layer and the fine sand layer are 90 MPa and 120 MPa, respectively.

Key words: HSS model; deep excavation engineering; numerical simulation; parameter; sensitivity analysis; inversion

目前, 数值分析已成为解决岩土工程问题的关键方法(李国英, 2024; 李肇桀等, 2024; 左其亭等, 2024), 其结果的正确与否在于岩土力学参数的准确性。所以, 选择正确的岩土本构模型和参数对数值分析结果有着重要的影响。HSS 模型是一种可以反映土体小应变与卸荷特征的本构模型。现有研究表明, 采用 HSS 模型得到的结果往往和实测结果更加吻合(徐中华等, 2010; 尹骥, 2010)。在模拟地基沉降、开挖变形等方面, HSS 模型比传统的 Mohr-Coulomb 模型和简单的弹塑性模型都更为准确。

Kavanagh et al. (1971) 首次应用有限元算法, 并基于土体应变的实验数据, 反演得到了土体弹性模量。朱合华等(1998)提出了动态施工参数反演分析的思想, 并以某地铁站基坑开挖为背景, 基于每一步开挖和每一道支撑下地下连续墙水平位移和内支撑梁轴力的实测数据增量, 反推出了各土层的弹性模量。谢凌志等(2011)依托上海轨道交通杨浦线复兴路站深基坑工程, 以各土层弹性模量为最终反演参数, 以地下连续墙的最大水平位移监测数据为反演目标, 首先反演出各施工步下的土层参数, 然后按照各施工步下反演所得的土层参数对地下连续墙最大水平位移的贡献, 对各施工步下反演所得参数进行多施工步下的归并, 最终获得了适合整个施工过程的最优反演参数。陈益峰等(2002)引入正交试验方法, 以隔河岩水电站大坝为背景, 以坝体顺河向位移为依据, 通过设计正交试验表, 计算并评价了各反演参数(坝基岩体的弹性模量、黏聚力和摩擦角)不同水平组合下的指标结果, 选取最优参数组合, 即为反演结果; 并将反演结果输入有限元模型进行计算, 模拟结果与坝体实测位移接近, 证明了反演结果的可靠性。吕庆等(2005)以浙江省上虞——三门高速公路 K80+500 ~ K80+650 路段高填方路堤工程路面沉降监测数据为依据, 反演得到了填筑体的 4 个参数: 反映弹性变形的弹性模量、反映粘弹性

变形的弹性模量、粘滞系数以及重度。李云鹏等(2008)以西康高速公路 18 标长哨段右线隧道围岩的收敛位移监测数据为依据, 反演获得了围岩的弹性模量、泊松比和内摩擦角等。王迎超等(2011)以马鞍山隧道拱顶沉降和水平收敛监测数据为依据, 反演获得了隧道围岩松散覆盖层和基岩层的弹性模量和泊松比。王开禾等(2016)依托乌东德水电站右岸地下厂房洞室开挖工程, 以围岩变形为依据, 反演获得了岩体的弹性模量、内摩擦角和黏聚力。Li et al. (2023)建立了考虑位移损失的 OPSO-SVM-ABAQUS 模型, 以 Suki Kinari 水电项目为工程依托, 反演获得了围岩体的弹性模量和黏聚力。Su et al. (2016)将人工神经网络应用于岩土力学参数反演分析中。Zhao et al. (2021)将极限学习机应用于岩土力学参数的反演分析中。Zheng et al. (2022)将高斯过程应用于岩土力学参数的反演分析中。

以往研究对黏性土和砂性土在 HSS 模型中的参数敏感性分析较为有限, 且尚未对长江一级阶地软土地层的敏感性进行深入研究。由于土体工程性质复杂且具有显著的区域性和个体差异, 对具体工程进行针对性分析是十分必要的。因此, 本文以武汉市某深基坑工程为依托, 采用 PLAXIS 2D 软件建立数值模型, 通过对各个参数以及不同土层的敏感性分析, 以现场原位试验和室内试验所获得的岩土力学参数为基础, 结合监测数据, 反推了岩土体的力学参数, 以获得能合理反映岩土性能的物理参数取值。

1 工程概况

武汉市某深基坑位于两主干道交汇处, 邻近既有地铁盾构隧道将整个场地分为南北两块, 分别为南区基坑和北区基坑, 北区基坑面积约 19 697 m²; 南区基坑面积约 9 657 m², 基坑外围采用地下连续墙围护, 北区基坑先后施工分区之间采用钻孔灌注桩进行分隔, 分别为北区 1-1 基坑和

北区1-2基坑, 如图1所示。基坑采用明挖顺作法施工。

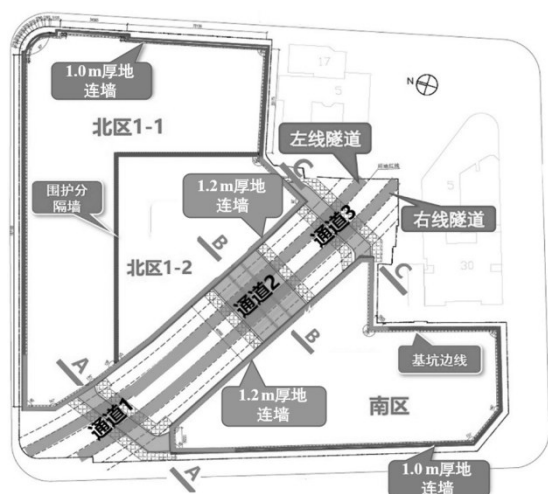


图1 基坑平面布置

Fig. 1 Excavation pit layout

北区基坑和南区基坑均拟建四层地下室, 开挖深度18.70 m, 地铁隧道侧围护墙体采用1.2 m厚地下连续墙, 其余区域采用1.0 m厚地下连续墙, 墙深为53.80~56.20 m, 墙底进入中风化泥岩不少于1.0 m。基坑沿深度方向设四道支撑。

北区基坑和南区基坑之间结构外墙相距40 m, 通过设置三处联络通道联通。其中, 北侧通道(通道1)长56.9 m, 通道标准段基坑宽度9.6 m; 中间

部位交通走廊(通道2)长40 m, 宽度32.8 m, 南侧通道(通道3)长43.9 m, 通道标准段基坑宽度9.6 m。其中, 通道1、3基坑开挖深度6.05 m, 通道2基坑开挖深度6.25 m。

另一方面, 结合地质勘察报告, 该基坑范围内主要岩土层有: ①杂填土, ②粉质黏土, ③₁粉质黏土夹粉土、粉砂层, ③₂粉质黏土、粉细砂互层, ④₁粉细砂, ④₂细砂, ④₃粉质黏土, ⑤圆砾, ⑥₁强风化泥岩, ⑥₂中风化泥岩。

2 参数取值与模型的建立

2.1 HSS模型及参数取值

Benz(2006)以HS模型为基础, 结合修正后的小应变Hardin-Drnevich模型, 建立了HSS模型。相对于HS模型, HSS模型引入了初始剪切模量和阈值剪应变两个小应变刚度参数, 以反映土体小应变特性。基坑工程中土体的应变一般为0.01%~0.1%, 属于小应变范围。因此, 本文选用小应变土体硬化(HSS)模型进行参数敏感性分析。

HSS模型共有13个力学参数, 各参数的物理意义及其室内试验取值方法见表1。本基坑采用HSS模型分析时, 根据岩土工程勘察报告, 参考以往工程经验(冯晓腊等, 2014; Zhang, 2019), 初步确定杂填土、粉质黏土、粉质黏土夹粉细砂、粉细砂以及细砂的力学参数见表2, 圆砾和中分化泥岩采用摩尔-库伦本构模型。

表1 HSS模型参数与室内试验取值方法

Table 1 HSS model parameters and methods for obtaining values through laboratory testing

类别	参量	物理意义	室内试验取值方法
刚度参数	E_{50}^{ref}	三轴排水剪切试验的参考割线模量	三轴CD试验
	E_{oed}^{ref}	固结试验中的参考切线模量	标准固结试验
	E_{ur}^{ref}	三轴排水剪切试验的参考加卸载模量	三轴CD加卸载试验
	m	刚度应力水平相关幂指数	三轴CD试验或标准固结试验
	ν_{ur}	卸载再加载泊松比	三轴CD加卸载试验
	p^{ref}	参考应力	100 kN/m ²
	K_0	正常固结条件下静止侧压力系数	应力路径三轴试验
强度参数	c'	有效黏聚力	三轴CU或CD试验
	ϕ'	有效内摩擦角	三轴CU或CD试验
	ψ	剪胀角	三轴CD试验
	R_f	破坏比	三轴CD试验
小应变刚度参数	G_0^{ref}	小应变参考初始剪切模量	弯曲元试验或小应变三轴试验或共振柱试验
	$\gamma_{0.7}$	割线剪切模量衰减到初始剪切模量70%时所对应的剪应变	小应变三轴试验或共振柱试验

表2 地层HSS模型的初始计算参数
Table 2 Initial calculation parameters of subsoil HSS model

地层名称	厚度 /m	γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	c' /kPa	ϕ' /($^\circ$)	Ψ /($^\circ$)	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ /MPa	E_{50}^{ref} /MPa	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ /MPa	G_0^{ref} /MPa	$\gamma_{0.7}$ / 10^{-4}	m	ν_{ur}	R_f	K_0
杂填土	3.47	18.5	8	18	0	3.5	3.5	10.5	31.5	1	0.8	0.2	0.7	0.69
粉质黏土	5.90	19.1	20	13	0	4.5	4.5	13.5	40.5	1	0.8	0.2	0.7	0.78
粉质黏土夹粉细砂	4.70	19.1	17	16	0	5.5	5.5	16.5	49.5	1	0.8	0.2	0.7	0.72
粉细砂	14.60	18.0	0	33	3	15	15	45	135	1	0.5	0.2	0.7	0.25
细砂	15.00	18.5	0	36	6	20	20	60	180	1	0.5	0.2	0.7	0.25

2.2 模型建立

选取隧道受基坑开挖影响最大的中间截面 (B-B剖面), 采用PLAXIS 2D软件建立模型。北区基坑和南区基坑开挖深度均取 19.0 m, 模型尺寸 440 m × 100 m, 其他详细尺寸见图2, 二维有限元数值模型见图3。利用等效刚度转换公式将钻孔灌注桩等效为一定厚度的地下连续墙, 计算公式为

$$h = 0.838D \sqrt[3]{\frac{1}{1 + t/D}}$$

式中 h 为地下连续墙等效厚度; D 为钻孔灌注桩直

径; t 为钻孔灌注桩净距。

模型中, 土体采用平面应变单元模拟; 结构单元地下连续墙、钻孔灌注桩、既有隧道、基坑底板以及联络通道底板均采用板单元模拟, 并且与土体之间建立界面单元, 以模拟与土体之间的相互作用; 结构单元支撑采用点对点锚杆进行模拟; 结构单元钢格构柱与工程桩采用 Embedded 桩单元进行模拟。模型两侧设置法向约束, 模型底部设置完全固定约束, 模型顶面设置为自由面。结构单元的计算参数见表3。其中, E 为弹性模量, w 为单位体积重量, ν 为泊松比。

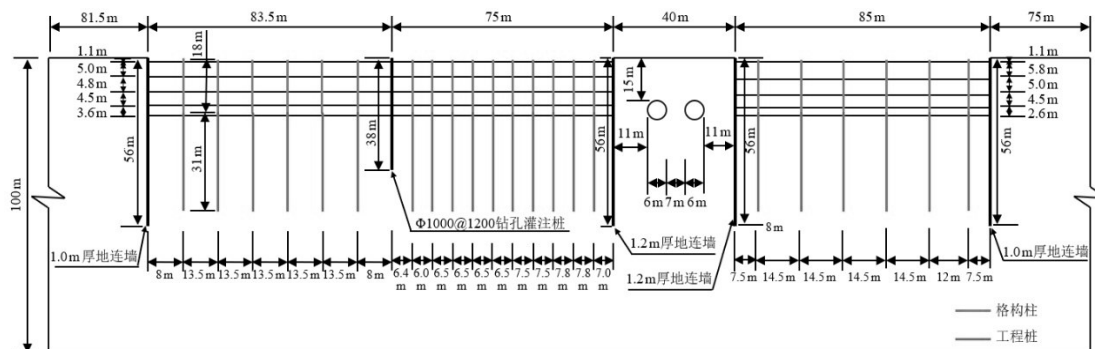


图2 B-B剖面尺寸

Fig. 2 Dimensions of B-B profile

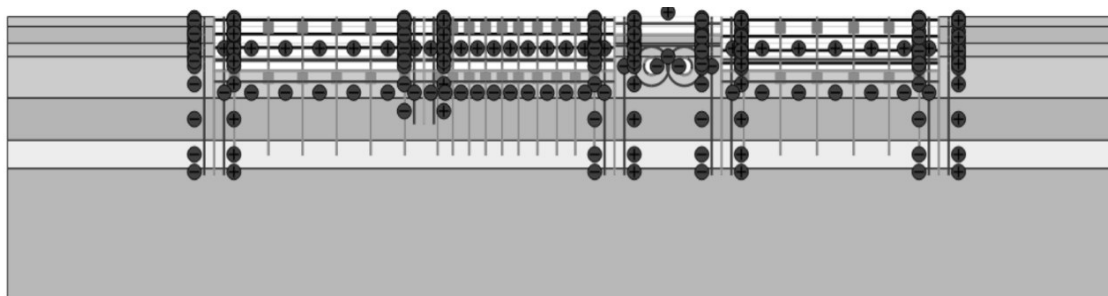


图3 B-B剖面数值模型

Fig. 3 B-B cross-sectional numerical model

表3 结构单元的计算参数

Table 3 Structural element calculation parameter

单元名称	$E / (\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	$w / (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	ν
隧道管片	3.45×10^7	25	0.2
地下连续墙	3.15×10^7	25	0.2
钻孔灌注桩分隔墙	3.15×10^7	25	0.2
通道底板/基坑底板	3.00×10^7	25	0.2
工程桩	3.00×10^7	25	0.2
钢格构立柱	2.06×10^8	78.5	-
钢筋混凝土支撑	3.15×10^7	-	-

表4 敏感性分析中三因素在四个水平的取值

Table 4 Four levels values of three parameter in sensitivity analysis

研究对象	$E_{50}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}} / \text{MPa}$	$G_0^{\text{ref}} / \text{MPa}$
水平1	6	40	80
水平2	9	48	100
水平3	12	56	120
水平4	15	64	140

表5 三因素四水平正交试验设计表

Table 5 Orthogonal experimental design table for three factors at four levels

试验	E_{50}^{ref}	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	G_0^{ref}
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	1	4	4
5	2	1	2
6	2	2	1
7	2	3	4
8	2	4	3
9	3	1	3
10	3	2	4
11	3	3	1
12	3	4	2
13	4	1	4
14	4	2	3
15	4	3	2
16	4	4	1

3 土体HSS模型参数敏感性分析

3.1 黏性土HSS模型参数的敏感性

取南区基坑区域建立模型并进行计算,如图4所示,模型尺寸为260 m×100 m,上部为粉质黏土,下部为中分化泥岩,基坑尺寸、结构单元尺寸、模拟方法和参数等均与上节中的一致。

罗敏敏等(2021)总结了HSS模型参数取值的方法。其中,由于参数 c 、 φ 、 R_f 、 P^{ref} 、 ν_{ur} 、 K_0 、 m 和 $\gamma_{0.7}$ 的取值范围较为固定,则 E_{50}^{ref} 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 和 G_0^{ref} 共4个参数为敏感性研究对象;由于参数 $E_{50}^{\text{ref}} : E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 1 : 1$,故最终敏感性研究参数取 E_{50}^{ref} 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 和 G_0^{ref} 共3个。结合各参数的取值范围及相互制约关系,上述3个敏感性研究参数分别取四个水平。敏感性分析中, E_{50}^{ref} 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 和 G_0^{ref} 三因素在四个水平的取值,如表4所示。

采用正交试验对HSS模型参数进行敏感性研究。对因素 E_{50}^{ref} 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 和 G_0^{ref} 分别取四个水平进行16组正交实验,实验设计如表5所示。

以受基坑开挖影响较大的右线隧道拱顶沉降作为本次试验的分析指标,判断土层参数变化对

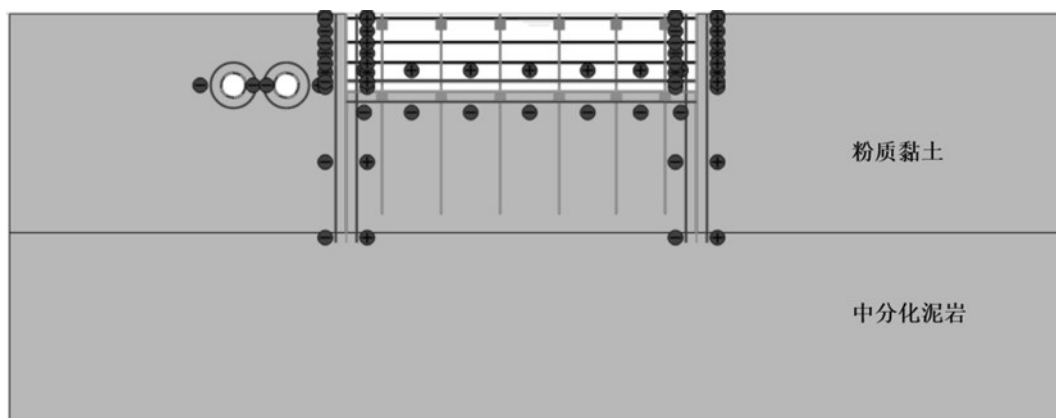


图4 粉质黏土HSS模型参数敏感性分析的计算模型

Fig. 4 Computational model for parameter sensitivity analysis of the HSS model in silty clay

于隧道变形的影响。黏性土三因素四水平正交试验的计算结果如表6所示,“-”表示沉降。

进一步地,可以得到本试验各因素不同水平下隧道拱顶沉降的均值和极差。不同 E_{50}^{ref} 因素水平条件下引起的既有隧道沉降的均值分别为 -12.06、-10.06、-8.52、-7.29 mm, 极差为 4.77 mm; 不同 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 引起的既有隧道沉降的均值分别为 -9.06、-9.51、-9.51、-9.86 mm, 极

差为 0.80 mm; 不同 G_0^{ref} 引起的既有隧道沉降的均值分别为 -11.15、-10.02、-8.91、-7.84 mm, 极差为 3.31 mm。图5为黏性土层在不同因素水平下引起的既有隧道拱顶沉降的变化曲线。可以看出,隧道拱顶沉降随参数 E_{50}^{ref} 和 G_0^{ref} 的增大而减小,随 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 的减小而增大,其中 E_{50}^{ref} 的极差最大,而 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 的极差最小,说明参数 E_{50}^{ref} 的变化对隧道拱顶沉降的影响最大, G_0^{ref} 次之, $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 最小。

表6 黏性土三因素四水平正交试验的计算结果

Table 6 Calculation results of three-factor four-level orthogonal experimental for clay soil

正交试验	试验1	试验2	试验3	试验4	试验5	试验6	试验7	试验8
隧道拱顶沉降/mm	-13.91	-12.77	-11.48	-10.08	-9.56	-11.63	-8.57	-10.49
正交试验	试验9	试验10	试验11	试验12	试验13	试验14	试验15	试验16
隧道拱顶沉降/mm	-7.06	-7.00	-10.10	-9.90	-5.71	-6.62	-7.87	-8.95

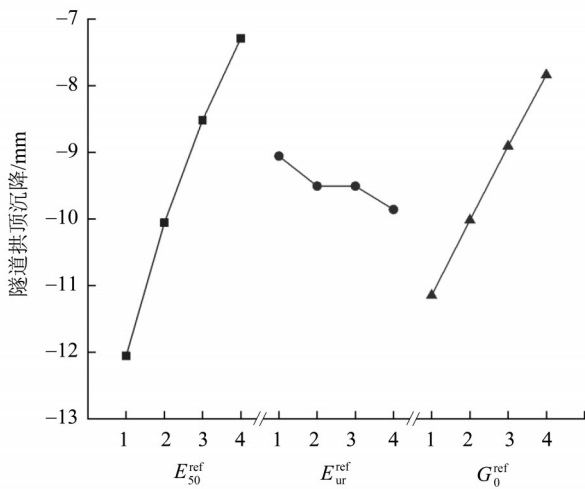


图5 沉降因素分析

Fig. 5 Analysis of factors affecting tunnel crown settlement

引入敏感性系数 μ (施有志等, 2017) 进行参数敏感性分析, 计算公式如下:

$$\mu = \left| \frac{x}{\Delta x} \times \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{f(x)} \right|,$$

式中 x 是参数初始输入值, Δx 为参数输入变量值, $f(x)$ 是初始输入值对应的计算输出结果, $f(x + \Delta x)$ 是变量值对应的计算输出结果。 μ 越大, 该因素对于分析指标的影响越大, 反之亦然。

通过计算得出不同水平下 E_{50}^{ref} 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 、 G_0^{ref} 的敏感性系数的均值分别为 0.29、0.17 和 0.40 mm。因此, 黏性土 HSS 模型中 G_0^{ref} 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 和 E_{50}^{ref} 对邻近既有隧道拱顶沉降的敏感程度由大到小依次为 E_{50}^{ref} 、 G_0^{ref} 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 。

3.2 砂性土 HSS 模型参数的敏感性

将粉质黏土层改变为细砂层, 其余条件不变。采用极差分析法对正交实验结果进行分析, 最终得出在各参数所取水平变化范围内 E_{50}^{ref} 的变化对隧道拱顶沉降影响最大, G_0^{ref} 次之, $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 最小。不同水平下 E_{50}^{ref} 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 和 G_0^{ref} 的敏感性系数均值分别为 0.42、0.28 和 0.42 mm。因此, 此地质条件下砂性土 HSS 模型参数 E_{50}^{ref} 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 和 G_0^{ref} 对邻近既有隧道拱顶沉降的敏感程度由大到小依次为 E_{50}^{ref} 、 G_0^{ref} 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 。

综上, 以武汉市某深基坑地区经典土层粉质黏土和细砂为研究对象, 对 HSS 模型部分参数进行了敏感性分析。其中, 黏性土 HSS 模型中对隧道拱顶沉降影响最大的是 G_0^{ref} , 砂性土 HSS 模型中对隧道拱顶沉降影响最大的是 E_{50}^{ref} 和 G_0^{ref} , 而通常 E_{50}^{ref} 是根据岩土勘察报告提供的压缩模型中的 E_{s1-2} 确定, 根据刘志祥 (2015) 所推荐的比例关系, 取 $E_{s1-2} : E_{50}^{\text{ref}} = 1 : 1$ 。因此, 武汉市某深基坑地区黏性土和砂性土 HSS 模型中对隧道拱顶沉降影响最大的是 G_0^{ref} 。

3.3 长江一级阶地软土地层敏感性分析

场地内的土层与上述 HSS 模型参数敏感性分析的土层相同, 即土层二为粉质黏土层、土层三为粉质黏土夹粉细砂层、土层四为粉细砂层、土层五为细砂层。以地勘报告为依据, 采用施工步骤 STEP 6 的右线隧道拱顶沉降作为分析指标, 结合已有研究成果 (冯晓腊等, 2014; Zhang, 2019; 刘志祥等, 2015), 确定参数 $E_{s1-2} : E_{50}^{\text{ref}} : E_{\text{oed}}^{\text{ref}} : E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = 1 : 1 : 1 : 3$ 。将第 i 层 ($i = 2, 3, 4, 5$) 土体的 G_0^{ref} 与 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 的比值 ξ_i 作为反演参数, 确定场地典型

地层 G_0^{ref} 的合理取值。根据 Benz(2006) 和王卫东等(2013) 的研究, 取各层土的剪载比上、下限 $\xi_{i, \text{max}}$ 、 $\xi_{i, \text{min}}$ 分别为 5 和 1。

场地土剪载比以及对应的隧道拱顶沉降如表 7 所示, 共计 17 组试验。通过计算各土层不同剪载比下隧道拱顶沉降的极差和方差, 得出土层二至土层五的方差分别为 1.36、1.19、2.01 和 3.21 mm^2 , 极差分别为 0.26、0.17、0.58 和

1.60 mm。图 6 为不同剪载比下隧道拱顶沉降的极差和方差分析结果。可以看出, 极差和方差分析折线图变化趋势基本一致, 随土层 i 的增加先略微减小, 而后明显增大。以土层二为基准, 则土层三、四、五的极差分别为土层二极差的 0.88、1.48、2.36 倍, 土层三、四、五的方差分别为土层二方差的 0.65、2.23、6.15 倍。

表7 场地土剪载比及其隧道拱顶沉降

Table 7 Soil shear-to-bearing ratio parameters and the settlement of the tunnel crown

试验	G_0^{ref} 与 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 的比值(剪载比 ξ_i)				分析指标
	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$	隧道拱顶沉降/mm
1	1	3	2	2	-3.84
2	2	3	2	2	-5.07
3	3	3	2	2	-5.04
4	4	3	2	2	-5.19
5	5	3	2	2	-5.15
6	3	1	2	2	-4.75
7	3	2	2	2	-4.69
8	3	4	2	2	-4.89
9	3	5	2	2	-3.85
10	3	3	1	2	-5.78
11	3	3	3	2	-4.05
12	3	3	4	2	-3.77
13	3	3	5	2	-4.01
14	3	3	2	1	-5.93
15	3	3	2	3	-3.56
16	3	3	2	4	-2.83
17	3	3	2	5	-2.72

因此, 土层五的剪载比对隧道拱顶沉降的影响程度最大, 土层四的剪载比对隧道拱顶沉降的影响也较为显著, 土层二和土层三的剪载比对隧道拱顶沉降的影响较小。

4 结果分析

4.1 初始参数下的模拟结果与监测结果

本基坑目前仅完成北 1 区第一层(1.1 m)和南区第一层(1.1 m)的开挖和支撑、北 1 区第二层(5.0 m)和南区第二层(5.8 m)的开挖和支撑以及北 1 区第三层(4.8 m)的开挖和支撑。因此, 以该三个施工步的位移监测数据为依据, 结合 HSS 模型部

分参数的敏感性和场地土层的敏感性分析结果, 利用确定性正反演分析法对粉细砂和细砂层力学参数 G_0^{ref} 进行反演。

初始参数下第一层基坑开挖支撑完成时隧道拱顶沉降中, 左线隧道监测值为 -0.3 mm , 模拟值为 -0.4 mm ; 右线隧道监测值为 -0.5 mm , 模拟值为 -0.4 mm 。误差很小, 都在可接受的范围之内, 因此, 可利用此力学参数进行北 1 区第二层和南区第二层的开挖和支撑施工步的模拟。

初始参数下第二层基坑开挖支撑完成时隧道拱顶沉降中, 左线隧道监测值为 -4.1 mm , 模拟值为 -3.7 mm ; 右线隧道监测值为 -3.8 mm , 模拟值

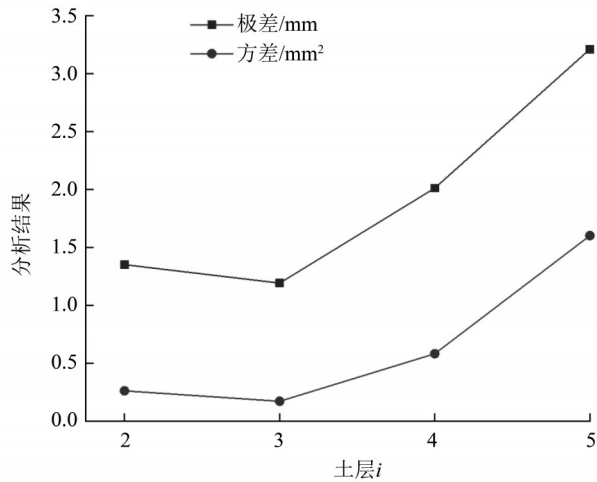


图6 土层不同剪裁比下的极差和方差

Fig. 6 Extreme range and variance under different soil shear-to-bearing ratios

为-4.4 mm。可以较为准确地反映出北1区第二层和南区第二层基坑开挖和支撑对周围结构的影响。

表8 粉细砂层和细砂层的HSS模型参数

Table 8 Inverted calculation parameters for HSS model of silt and fine sand layers

地层	厚度/m	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c'/kPa	$\phi'/(^{\circ})$	$\Psi/(^{\circ})$	$E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$G_0^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$\gamma_{0.7}/10^{-4}$	m	ν_{ur}	R_f	K_0
粉细砂	14.60	18.0	0	33	3	15	15	45	90	1	0.5	0.2	0.7	0.25
细砂	15.00	18.5	0	36	6	20	20	60	120	1	0.5	0.2	0.7	0.25

反演参数下第三层基坑开挖支撑下隧道拱顶沉降中,左线隧道监测值为-6.3 mm,模拟值为-4.8 mm;右线隧道监测值为-5.6 mm,模拟值为-5.6 mm。其中,左线隧道拱顶沉降增加了0.9 mm,增至4.8 mm;右线隧道拱顶沉降增加了1.1 mm,增至5.6 mm。

5 结论

在黏性土和砂性土HSS模型参数的敏感性分析基础上,本文对长江一级阶地软土地层的敏感性进行评估,并对显著敏感的参数进行了反演。主要结论如下:

(1) 对于黏性土(粉质黏土为例),隧道拱顶沉降随 E_{50}^{ref} 和 G_0^{ref} 的增大而减小,随 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 的减小而增大,隧道拱顶沉降敏感程度由大到小依次为 G_0^{ref} 、 E_{50}^{ref} 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$;对于砂性土(细砂为例),隧道拱顶沉降随 E_{50}^{ref} 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 和 G_0^{ref} 的增大而减小,隧道拱顶沉降敏感程度由大到小依次为 E_{50}^{ref} 、 G_0^{ref} 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 。因此,无论

因此,可利用初始力学参数继续进行北1区第三层和南区第三层的开挖和支撑施工步的模拟。

初始参数下第三层基坑开挖支撑完成时隧道拱顶沉降中,左线隧道监测值为-6.3 mm,模拟值为-3.9 mm;右线隧道监测值为-5.6 mm,模拟值为-4.5 mm。因此,需通过确定性正反演分析,即对岩土力学参数进行修正,以保证数值模拟的合理性和有效性。

4.2 修正参数下的模拟结果与监测结果

通过上述分析可知,采用初始岩土力学参数模拟所得的左线和右线隧道拱顶沉降值均小于监测值。因此,接下来在进行参数正反演分析时,需减小粉细砂层和细砂层的剪裁比,即减小粉细砂层和细砂层的小应变参考初始剪切模量 G_0^{ref} 。经反演得粉细砂层和细砂层的HSS模型参数如表8所示。

是黏性土和砂性土,隧道拱顶沉降敏感程度较大的参数为 G_0^{ref} 。

(2) 粉质黏土层、粉质黏土夹粉细砂层、粉细砂层以及细砂层在不同剪裁比(1~5)下隧道拱顶沉降的极差分析结果分别为1.36、1.19、2.01、3.21 mm,方差分析结果分别为0.26、0.17、0.58、1.60 mm²。粉细砂层和细砂层对既有隧道拱顶沉降敏感程度较大,粉质黏土层和粉质黏土夹粉细砂层对既有隧道拱顶沉降敏感程度较小。因此,场地内对既有隧道沉降影响较为显著的底层为粉细砂层和细砂层。

(3) 结合隧道拱顶沉降的监测数据,反演获得粉细砂层的 G_0^{ref} 为90 MPa,细砂层的 G_0^{ref} 为120 MPa。采用反演得到的粉细砂层和细砂层的 G_0^{ref} ,建立数值模型、开展数值分析,发现北1区第三层和南区第二层开挖和支撑完成时的模拟结果与监测值较为接近。

参考文献:

- 陈益峰,周创兵,2002.基于正交设计的复杂坝基弹塑性力学参数反演[J].岩土力学,4:450-454.
- 冯晓腊,熊宗海,莫云,等,2014.复杂条件下基坑开挖对周边环境变形影响的数值模拟分析[J].岩土工程学报,36(S2):330-336.
- 李国英,2024.为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障——在2024年全国水利工作会议上的讲话[J].水利发展研究,24(1):1-10.
- 李云鹏,韩常领,唐明明,等,2008.小间距隧道围岩力学参数正交设计反演[J].公路交通科技,9:107-111.
- 李肇桀,张旺,刘璐,2024.大力发展新质生产力 助推水利高质量发展——关于水利行业发展新质生产力的认识和思考[J].水利发展研究,24(6):1-6.
- 刘志祥,张海清,2015. PLAXIS 高级应用教程[M].北京:机械工业出版社.
- 罗敏敏,陈赞,周江,2021.小应变土体硬化模型参数取值研究现状与展望[J].工业建筑,51(4):172-180.
- 吕庆,尚岳全,陈允法,等,2005.高填方路堤粘弹性参数反演与工后沉降预测分析[J].岩石力学与工程学报,7:1231-1235.
- 施有志,阮建湊,吴昌兴,2017.厦门地区典型地层HS-Small模型小应变参数敏感性分析[J].科学技术与工程,17(2):100-105.
- 王开禾,罗先启,沈辉,等,2016.围岩力学参数反演的GSA-BP神经网络模型及应用[J].岩土力学,37(S1):631-638.
- 王卫东,王浩然,徐中华,2013.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,34(6):1766-1774.
- 王迎超,尚岳全,徐兴华,2011.浅埋隧道岩土体参数正交反演及衬砌工作状态评价[J].中南大学学报(自然科学版),42(6):1764-1771.
- 谢凌志,李胤铎,林旭明,等,2011.基于地铁站基坑工程施工过程的场地土参数动态反演[J].四川大学学报(工程科学版),43(5):19-26.
- 徐中华,王卫东,2010.敏感环境下基坑数值分析中土体本构模型的选择[J].岩土力学,31(1):258-264+326.
- 尹骥,2010.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,32(S1):166-172.
- 朱合华,杨林德,桥本正,1998.深基坑工程动态施工反演分析与变形预报[J].岩土工程学报,4:33-38.
- 左其亭,王子尧,马军霞,2024.我国现代治水研究热点与发展展望[J].水利发展研究,24(6):13-19.
- BENZ T, 2006. Small strain stiffness of soils and its numerical consequences[D]. Stuttgart, USA: University of Stuttgart.
- KAVANAGH K T, CLOUGH R W, 1971. Finite element applications in the characterization of elastic solids [J]. Int J Solids Struct, 7(1):11-23.
- LI H, CHEN W, TAN X, 2023. Displacement-based back analysis of mitigating the effects of displacement loss in underground engineering [J]. J Rock Mech Geotech, 15(10): 2626-2638.
- SU H Z, WEN Z P, ZHANG S, et al. 2016. Method for choosing the optimal resource in back-analysis for multiple material parameters of a dam and its foundation [J]. J Comput Civil Eng, 30(4):4015060.
- ZHANG J, 2019. Finite element analysis of ultra-deep foundation pit covered top-down excavation based on PLAXIS [C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 300(2):022158.
- ZHAO Y, FENG S J, 2021. Back analysis of surrounding rock parameters of tunnel considering displacement loss and space effect [J]. Bull Eng Geol Environ, 80(7): 5675-5692.
- ZHENG F, JIANG A, GUO X, et al, 2022. Back analysis of surrounding rock parameters of large-span arch cover station based on GP-DE algorithm [J]. Appl Sci, 12(24): 12590.

(责任编辑 王海蓉)