

地铁深基坑硬化土模型参数敏感性研究*

赫德亮^{1**} 李红普² 何本国²

(1. 中铁十四局集团第四工程有限公司, 250002, 济南;

2. 东北大学深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 110819, 沈阳//第一作者, 高级工程师)

摘要 目的: 基坑工程数值计算中参数取不准一直是困扰工程界和学术界的关键技术问题。基坑工程土体参数敏感性研究可为数值模拟分析参数取值提供重要依据。方法: 依托济南地铁黄河隧道南岸工作井基坑工程, 利用有限差分值的 FLAC^{3D} 软件, 建立工作井基坑三维数值计算网格, 结合现场工程设计和施工方案逐层开挖计算, 分析了基坑开挖地下连续墙深层水平位移、地面沉降和支撑轴力的 H-S (硬化土) 模型参数效应。将水平位移、地面沉降和支撑轴力计算结果与实测值进行了对比。结果及结论: 基坑开挖后对地下连续墙深层水平位移和地面沉降敏感程度大的主要影响参数从大到小依次为: 内摩擦角 φ , 固结系数 K_{nc} , 弹性模量指数 E_m , 卸载刚度 $E_{ur,50}$ 。支撑轴力敏感程度大的主要影响参数从大到小依次为: 固结系数 K_{nc} , 割线刚度 $E_{ref,50}$, 弹性模量指数 E_m , 卸载刚度 $E_{ur,50}$, 内摩擦角 φ 。并以此为基础, 反演济南地铁黄河隧道南岸工作井基坑工程关键参数, 最终反演预测结果与实际监测结果基本一致。研究成果以期为 H-S 模型在基坑数值模拟分析中的应用提供借鉴和参考。

关键词 地铁深基坑; 硬化土模型; 敏感性; 地下连续墙变形; 地面沉降

中图分类号 TU44

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2023.12.016

Sensitivity Study of Hardened Soil Constitutive Model Parameters for Metro Deep Foundation Pit

HE Deliang, LI Hongpu, HE Benguo

Abstract Objective: In numerical calculations for foundation pit engineering, inaccurate parameter selection is a critical technical issue troubling both the engineering and academic communities. Investigating the sensitivity of soil parameters in foundation pit engineering provides essential reference for determining numerical simulation analysis parameter values.

Method: Leveraging the foundation pit engineering of Yellow River tunnel south bank working shaft of Ji'nan Metro, a

three-dimensional numerical calculation grid for working shaft foundation pit is established using finite difference numerical analysis software FLAC^{3D}. Considering the on-site engineering design and construction scheme, layer-by-layer excavation calculation is simulated to analyze the effects of H-S (hardened soil) model parameters including deep-seated horizontal displacement of the underground diaphragm wall, land subsidence, and supporting axial forces. The calculated results of the above are compared with measured values. **Result & Conclusion**: The major influential parameters on the sensitivity of deep-seated horizontal displacement and land subsidence after foundation pit excavation are: internal friction angle φ , consolidation coefficient K_{nc} , elastic modulus index E_m , unloading stiffness $E_{ur,50}$. For the sensitivity of supporting axial forces, the key influencing parameters are: consolidation coefficient K_{nc} , secant stiffness $E_{ref,50}$, elastic modulus index E_m , unloading stiffness $E_{ur,50}$, and internal friction angle φ . Based on this, critical parameters for Ji'nan Metro Yellow River tunnel south bank working shaft foundation pit engineering are inversely obtained, and the predicted results align closely with the field-monitored results. The research findings aim to provide guidance and reference for the application of H-S model in numerical analysis of foundation pit engineering.

Key words hardened soil model; sensitivity; deformation of diaphragm wall; land subsidence; metro deep foundation pit

First-author's address China Railway 14th Bureau Group 4th Engineering Co., Ltd., 250002, Ji'nan, China

为了合理地开发和利用城市地下空间, 基坑工程的建设数量不断增加, 基坑开挖深度也越来越深。为保证基坑施工过程的结构安全和稳定, 数值计算分析方法在基坑中的应用也越来越广泛。

已有大量的学者在基坑工程领域开展了数值分析研究^[1]。文献[2]利用 ABAQUS 有限元软件

* 国家重点研发计划项目(2018YFC0407006)

** 通信作者

分析了典型软土层的修正剑桥模型参数,得到了上海地区长寿路车站基坑的土体参数。文献[3]利用DP(德鲁克-普拉格)模型分析了基坑开挖卸载坑底隆起对下卧隧道的影响。文献[4]通过模拟基坑开挖对H-S(硬化土)模型、MC模型、DP模型、MCC(修正剑桥)模型等本构对比,发现H-S模型和MCC模型在基坑模拟分析中具有更好的适用性。

文献[5]提出一种深基坑开挖变形实测数据三维图表分析方法,能呈现基坑围护结构变形、立柱隆起和周边地面沉降。文献[6]通过三轴试验研究了HS-Small(硬化土小应变)模型的试验参数特征。文献[7]结合试验对HS-Small模型的参数确定方法进行了讨论,并对其关键参数进行了敏感性分析。文献[8]结合现场实测数据分析了硬化土本构模型在海堤沉降计算中的参数灵敏度。文献[9]采用反分析法,确定了上海地区的HS-Small模型参数,在上海地区具有较好的适用性。文献[10]利用RBF(径向基函数)神经网络分析了土层参数对基坑深层水平位移的敏感性。上述关于土层参数的研究中主要是针对H-S模型或HS-Small模型室内试验参数敏感性,或是针对某一个地区的土体参数反演分析。目前,对于一般基坑工程的关键监测项目(如:地下连续墙深层水平位移、支撑轴力和地面沉降等)与H-S模型参数之间关系研究的文献较少。

依托济南黄河隧道南岸工作井基坑工程,建立了三维数值计算模型,考虑现场施工工序利用有限差分数值模拟软件对工作井基坑进行逐层开挖模拟;分析了基坑开挖地下连续墙深层水平位移、地面沉降和支撑轴力与H-S模型参数之间的关系,以为H-S模型在基坑数值模拟分析中的应用提供借鉴和参考。

1 H-S模型

H-S模型^[11]是在双曲线形式的非线性弹性DC本构模型基础之上扩展得来的,该模型在描述土体剪切硬化、压缩硬化等方面具有优势。

1) 当 $P < q_f$ (P 为偏应力; q_f 为土体强度, $q_f = \sigma_1 - \sigma_3$)时,土体处于弹性阶段。由摩尔-库伦理论 $q_f = (2c \cos P + 2\sigma_3 \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$,可知竖向应变 ε_1 与 P 之间满足双曲线关系:

$$\varepsilon_1 = \frac{P_a}{2E_{s0}} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{P_a - (\sigma_1 - \sigma_3)} = \frac{1}{2E_{s0}(1 - P/P_a)} \quad (1)$$

$$\text{其中, } E_{s0} = E_{\text{ref},50} \left(\frac{\sigma_3 + c \cot \varphi}{\sigma_{\text{ref}} + c \cot \varphi} \right)^n$$

式中:

- E_{s0} ——加载模量;
- σ_{ref} ——相关应力;
- $E_{\text{ref},50}$ —— σ_{ref} 的加载模量;
- σ_1, σ_3 ——最大、最小主应力;
- c ——黏聚力;
- φ ——内摩擦角;
- n ——幂指数;
- P_a ——极限偏应力。

2) 当 $P > q_f$ 时,土体进入塑性阶段。随着塑性应变的变化,H-S模型的屈服面在主应力空间也不断扩大,从而可描述土体的剪切硬化特征。剪切屈服函数表达式为:

$$F_s = \frac{P_a}{E_{s0}} \frac{P}{P_a - P} - \frac{2P}{E_{ur}} - \gamma_p \quad (2)$$

式中:

- E_{ur} ——回弹模量, $E_{ur} = E_{\text{ref},ur} \left(\frac{\sigma_3 + c \cot \varphi}{\sigma_{\text{ref}} + c \cot \varphi} \right)^n$;
 - $E_{\text{ref},ur}$ ——相关应力 σ_{ref} 时的回弹模量;
 - γ_p ——塑性剪切应变。
- 帽盖屈服函数表达式:

$$F_c = \frac{\tilde{P}^2}{M^2} + p^2 - p_c^2 \quad (3)$$

$$\text{其中: } p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3, \tilde{P} = \sigma_1 + (\delta - 1) \sigma_2 - \delta \sigma_3, \delta = \frac{3 + \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}.$$

式中:

- σ_2 ——中间主应力;
- M ——摩擦因数, $M = \frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}$;
- p_c ——前期固结应力;
- p ——平均主应力。

2 敏感性分析方法

敏感性分析是系统分析中整体稳定性评价的一种方法。对于含有 n 个因素的系统在某个基准状态 $\alpha = \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ 下,系统特性值 p_α 。当各因素在其可能范围内变化,分析由于这些因素变化时,系统特性值 p_α 偏离基准状态 p 的趋势和程度,这种分析方法称为敏感性分析^[12]。在研究土体力学参数对基坑工程稳定性影响程度时,为分辨某一参数对

地下连续墙深层水平位移、基坑周边地面沉降和支撑轴力的敏感性程度,可以令该参数 α_k 在可能合理的范围内变化,其他参数参考类似工程案例参数和地质勘察报告推荐值固定不变,通过观察 α_k 的细小变化引起系统特性值 p_α 的变化来确定该参数的对系统特性的影响程度。为此,定义无量纲形式的敏感度函数:

$$S_k(\alpha_k) \cong \left(\frac{\Delta p}{p_\alpha} \right) / \left(\frac{|\Delta \alpha_k|}{\alpha_{k,p}} \right) = \left| \frac{\Delta p}{\Delta \alpha_k} \right| \frac{\alpha_{k,p}}{p_\alpha} \quad (4)$$

式中:

- $\alpha_{k,p}$ ——第 k 个因素的基准状态, $k = 1, 2, \dots, n$;
- $\Delta \alpha_k$ ——第 k 个因素偏离基准状态的差值;
- Δp ——系统偏离基准特性的差值;
- $S_k(\alpha_k)$ —— α_k 的敏感度。

3 工程背景

济南地铁黄河隧道工作井基坑工程为大盾构吊出井,其基坑宽度为 49.0 m,长度为 29.8 m,最大开挖深度约为 35.4 m,基坑采用顺作法施工。基坑围护结构采用地下连续墙加内支撑组合支护方式,地下连续墙厚度为 1.2 m,深度为 58.4 m;内支撑采用钢筋混凝土支撑和钢支撑组合使用方式,基坑深度范围内共设 8 道支撑(第一、四、七和八道为钢筋混凝土支撑其余为钢支撑)。钢筋混凝土支撑采用 C40 补偿收缩混凝土,支撑截面为 1 200 mm(宽度) \times 1 200 mm(高度),钢支撑采用 $\phi 800$ mm,厚度 $t = 20$ mm 的钢管。黄河隧道南岸工作井基坑现场照片见图 1。

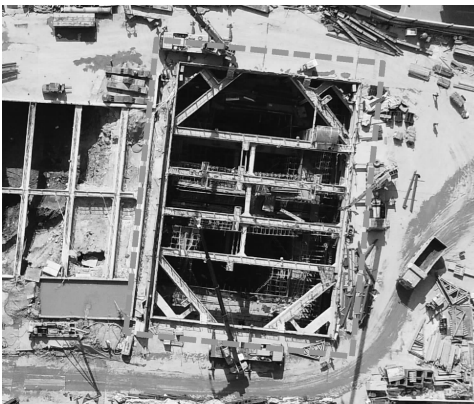


图 1 黄河隧道南岸工作井基坑现场照片
Fig. 1 Site photo of the working shaft foundation pit on the south bank of the Yellow River Tunnel

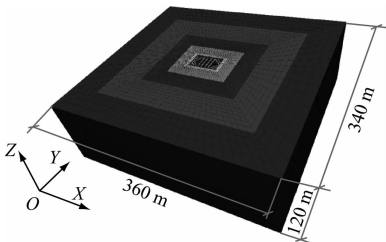
该工程位于冲积平原,根据钻探(钻孔 G1ZK04)资料:表层 0 ~ 3 m 主要为人工填土层;3 ~ 30 m 地层主要为粉质黏土层(局部为黏质粉

土),工程性质一般,透水性为弱至微弱,其承载力低,压缩性为中到高,易产生变形;深度 30 ~ 40 m 的地层,以粉质黏土为主,含 10% ~ 20% 的钙质结核,工程性质较好;基岩埋于 40 m 以下。

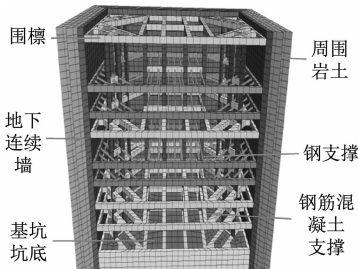
4 H-S 模型力学参数敏感性

4.1 工作井基坑模型

采用 Ansys 有限元软件建立工作井基坑三维数值计算模型,如图 2 a) 所示。考虑隧道开挖影响范围,模型建立大于基坑 6 倍开挖宽度。基坑工程三维模型范围为: X 方向 360 m, Y 方向 340 m, Z 方向 120 m。模型单元数为 43.9 万个,节点数为 44.7 万个。



a) 模型尺寸



b) 基坑支挡结构三维 FLAC^{3D} 软件数值模型

图 2 工作井基坑三维数值计算模型

Fig. 2 3D numerical calculation model working shaft foundation pit

工作井基坑数值模拟计算考虑基坑地下连续墙、支撑(钢筋混凝土支撑/钢支撑)、围檩和格构柱等围护结构。其中,地下连续墙、钢筋混凝土支撑、格构柱采用实体单元模拟,钢支撑采用结构单元梁单元模拟。工作井基坑第一、四、七和八道为钢筋混凝土支撑,第二、三和五、六道为钢支撑。基坑支挡结构三维 FLAC^{3D} 软件数值模型如图 2 b) 所示。

基坑开挖计算中,考虑地下连续墙成槽后需要在槽中加入大量的泥浆,以维持槽壁稳定。因此,施工完成后地下连续墙墙面与周围土体之间为非连续的,在基坑开挖后墙体与周围土体之间可能存在滑移错动。在数值计算分析中通过在地下连续

墙和格构柱外侧建立接触面单元,模拟基坑开挖后墙体与周围土体之间的滑移错动现象。

数值模拟计算中模型前后左右和底面固定法向方向,模型顶面设置为自由面。为模拟施工期间基坑周边行车、堆载等活动,基坑开挖周围 15 m 范围内施加 20 kPa 方向为竖直向下的荷载。

4.2 H-S 模拟物理力学参数取值

具体物理力学参数取值参考地质勘察报告中的土体物理力学参数推荐值和类似粉质黏土工程

案例;支挡结构物理力学参数取值参考相关混凝土、钢结构材料力学参数标准取值;考虑现场实际情况,对混凝土进行强度折减,弹性模量取值为试验标准值的 0.8 倍。

根据地质勘察报告,在数值计算中将地层分为黏土层和岩石层。其中,自上而下 0 ~ 40 m 为黏土层,40 m 以下为岩石层。H-S 模型物理力学参数见表 1。

表 1 H-S 模型物理力学参数表
Tab. 1 Table of physical mechanical parameters of H-S model

土层类别	弹性模量指数	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	固结系数	土层厚度/m
粉质黏土	0.4	0.2	10	20	0.7	0 ~ 40
风化辉长岩	0.4	0.2	20	40	0.7	40 ~ 120

类别	剪胀角/(°)	割线刚度/MPa	切线刚度/MPa	卸载刚度/MPa	密度/(kg/m³)
粉质黏土	5	25	25	100	1 900
风化辉长岩	0	100	100	300	2 500

根据基坑设计和实际施工基坑开挖工况,对工作井基坑采用分层开挖的方式,对不同深度开挖和架设位置设置为不同工况。

工况 1 工作井基坑架设第一道钢筋混凝土支撑,进行第一层土体开挖,开挖深度为 9 m。

工况 2 架设第二道钢支撑,进行第二层土体开挖,开挖深度为 13 m。

工况 3 架设第三道钢支撑,进行第三层土体开挖,开挖深度为 16 m。

工况 4 架设第四道钢筋混凝土支撑,进行第四层土体开挖,开挖深度为 21 m。

工况 5 架设第五道钢支撑,进行第五层土体开挖,开挖深度为 24 m。

工况 6 架设第六道钢支撑,进行第六层土体开挖,开挖深度为 28 m。

工况 7 架设第七道钢筋混凝土支撑,进行第七层土体开挖,开挖深度为 32 m。

工况 8 架设第八道钢筋混凝土支撑,进行第八层土体开挖,开挖深度为 36 m。

4.3 敏感性分析

济南黄河隧道南岸工作井基坑自 2019 年 8 月开挖,至 2019 年 12 月分层开挖至坑底,为了确保基坑开挖过程中的稳定性,分别布置了地下连续墙顶

部和深部水平位移监测点、地下连续墙竖向位移监测点、地面沉降监测点、格构柱顶部位移监测点和支撑轴力监测点等,并对整个开挖过程进行持续监测。在本次敏感性分析中选择对基坑稳定性和周边环境影 响较为重要的地下连续墙深层水平位移、地面沉降和支撑轴力 3 个因素,所选监测点位置如图 3 所示。

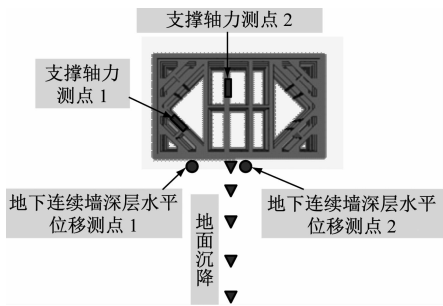


图 3 监测点分布图
Fig. 3 Layout map of measurement points

将表 1 中的 H-S 模型参数作为参数敏感性分析的基准值,将每个参数分别设计偏离度为 ±5%、±10%、±15% 和 ±20% 作为敏感性计算的参数域,分析各个参数变化对地下连续墙深层水平位移、地面沉降和支撑轴力的影响程度。土体敏感性分析计算参数表如表 2 所示。

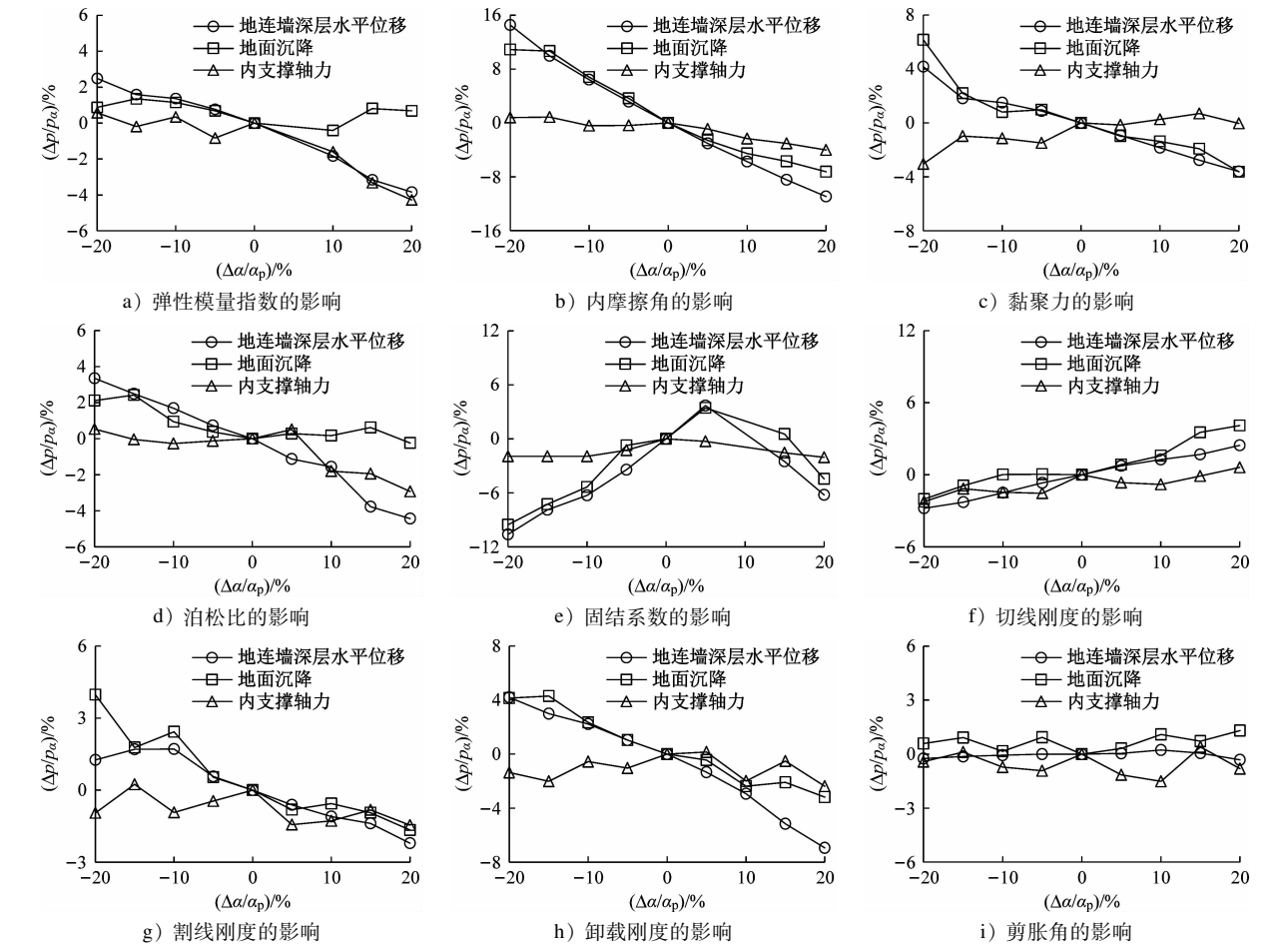
表 2 土体敏感性分析计算参数表

Tab.2 Table of calculation parameters for soil sensitivity analysis

偏离基准/%	弹性模量 指数	泊松比	内摩擦 角/(°)	黏聚力/ kPa	固结系数	剪胀角/ (°)	割线刚度/ MPa	切线刚度/ MPa	卸载刚度/ MPa
20	0.48	0.24	12.00	24.00	0.84	6.00	30.00	30.00	120
15	0.46	0.23	11.50	23.00	0.81	5.75	28.75	28.75	115
10	0.44	0.22	11.00	22.00	0.77	5.50	27.50	27.50	110
5	0.42	0.21	10.50	21.00	0.74	5.25	26.25	26.25	105
0	0.40	0.20	10.00	20.00	0.70	5.00	25.00	25.00	100
-5	0.38	0.19	9.50	19.00	0.67	4.75	23.75	23.75	95
-10	0.36	0.18	9.00	18.00	0.63	4.50	22.50	22.50	90
-15	0.34	0.17	8.50	17.00	0.60	4.25	21.25	21.25	85
-20	0.32	0.16	8.00	16.00	0.56	4.00	20.00	20.00	80

提取数值计算模型相应位置的地下连续墙深层水平位移最大值、地面沉降最大值和支撑轴力值。 $\alpha_{k,p}$ 为第 k 个土体参数的基准值, $\Delta\alpha_k$ 为第 k 个参数偏离基准参数值的差值, p_α 为土体参数取基准值时计算结果, Δp 为不同参数水平偏离基准值计算

结果的差值,分析偏离基准参数 $\pm 20\%$ 范围内各个参数对上述 3 个指标的影响规律,如图 4 所示(其中,地下连续墙深层水平位移和支撑轴力不同测点处变化规律基本一致,图中取其测点 1 和测点 2 的均值)。



注: $\Delta\alpha$ 为参数偏离基准参数值的差值; α_p 为土体参数的基准值。

图 4 土体力学参数对地下连续墙深层水平位移、地面沉降和支撑轴力影响规律

Fig.4 Influence law of soil mechanics parameters on the deep horizontal displacement of diaphragm wall, ground settlement, and support axial force of underground continuous walls

对比硬化土本构模型 9 个主要参数在偏离基准参数 $\pm 20\%$ 范围内分别对地下连续墙深层水平位移最大值、地面沉降最大值和支撑轴力值的影响程度。由图 8 可以看出:内摩擦角对 2 个指标影响程度最大,当内摩擦角偏离基准参数 20% 时,地下连续墙深层水平位移最大值变化约 $-10.94\% \sim 14.52\%$,地面沉降变化约 $-7.25\% \sim 10.9\%$;固结系数对地下连续墙深层水平位移和地面沉降敏感程度也较大,但在参数取值范围内其变化规律并不明显;弹性模量指数偏离基准参数 20% 时,地下连续墙深层水平位移最大值变化约 $-4.28\% \sim 2.50\%$;卸载刚度偏离基准参数 20% 时,地下连续墙深层水平位移最大值变化约 $-6.95\% \sim 4.14\%$;剪胀角在基坑开挖过程中对 3 个指标影响程度最小,即剪胀角取 $4^\circ \sim 6^\circ$ 范围内,地下连续墙深层水平位移最大值、地面沉降最大值和支撑轴力值几乎无变化。

基坑开挖后对地下连续墙深层水平位移和地面沉降敏感程度较大的主要参数按大小顺序先后排列有:内摩擦角,固结系数,弹性模量指数,卸载刚度。支撑轴力敏感程度较大的主要参数按大小顺序先后排列有:固结系数,割线刚度,弹性模量指数,卸载刚度,内摩擦角(其中,地下连续墙深层水平位移和支撑轴力敏感度取均值)。此外,土体参数变化对地下连续墙深层水平位移和地面沉降影响更大,对支撑轴力影响较小。

5 土体参数反演应用实例

5.1 现场监测数据选取

根据现场实际情况,分别选取工作井南侧地下连续墙深层水平位移测点 1 处开挖第三层、五层和七层土时的最大位移值和地下连续墙深层水平位移测点 2 处开挖第三层、五层和七层土时的最大位移值;工作井南侧地面沉降监测点处开挖四层和六层土时的最大沉降值;基坑开挖至第五层时第二层钢支撑斜撑测点 1 处和第三道钢支撑测点 2 处的支撑轴力值。将点位实测值与对应位置数值模拟计算结果作对比分析。

5.2 土体参数反演计算

由参数敏感性分析结果可知,对地下连续墙深层水平位移与地面沉降敏感度最大的关键参数为终摩擦角和固结系数。为了进一步提高反演的准确性,获得符合随施工过程周围土体和支挡结构的

动态变化规律和空间特征,将由地面至埋深 40 m 范围内的土体进一步划分为 4 个分层,即每 10 m 一个土体分层,如图 5 所示。每个土体分层分别取终摩擦角和固结系数 2 个关键性参数对南岸基坑土体参数进行反演分析,共计 8 个关键性参数。其他本构参数和岩石层参数取值仍取表 2 的标准值。

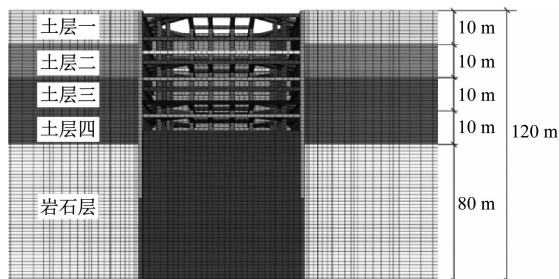


图 5 数值模拟计算土体分层图

Fig. 5 Numerical simulation calculation of soil stratification chart

将通过正交设计和均匀设计构建的计算样本进行计算分析:正交设计构建样本 50 组(其中部分参数组合无法正常计算),实际计算正交设计构建样本 42 组;采用均匀设计构建样本 10 组,共计 52 个计算样本。其中,正交设计构建的前 42 个作为训练样本,均匀设计构建的后 10 个样本作为测试样本;在反演分析计算中利用进化神经网络系统软件输入现场实测结果对其进行反分析,得到 4 个土层终摩擦角和固结系数分别为 0.60° 、 0.74° 、 0.60° 、 0.63° 和 12.75% 、 5.13% 、 5.50% 、 16.75% 。

5.3 土体参数反演结果检验

为检验反演分析结果的准确性,分别选取地面沉降、地下连续墙水平位移及支撑轴力对比不同开挖工况下数值模拟计算结果与现场实际监测数据,如图 6 所示。通过对比地下连续墙深层水平位移、地面沉降与支撑轴力反演结果与实测结果,证明了反演结果的准确性。

6 结语

依托济南地铁黄河隧道泺口街道工作井超深基坑工程,通过建立三维数值模拟计算模型,分析了 H-S 本构模型参数取值与地下连续墙深层水平位移、内支撑轴力、周边地面沉降的关系,得出以下结论。

1) 采用 H-S 本构模型,基坑开挖后对地下连续墙深层水平位移和地面沉降敏感程度较大的主要

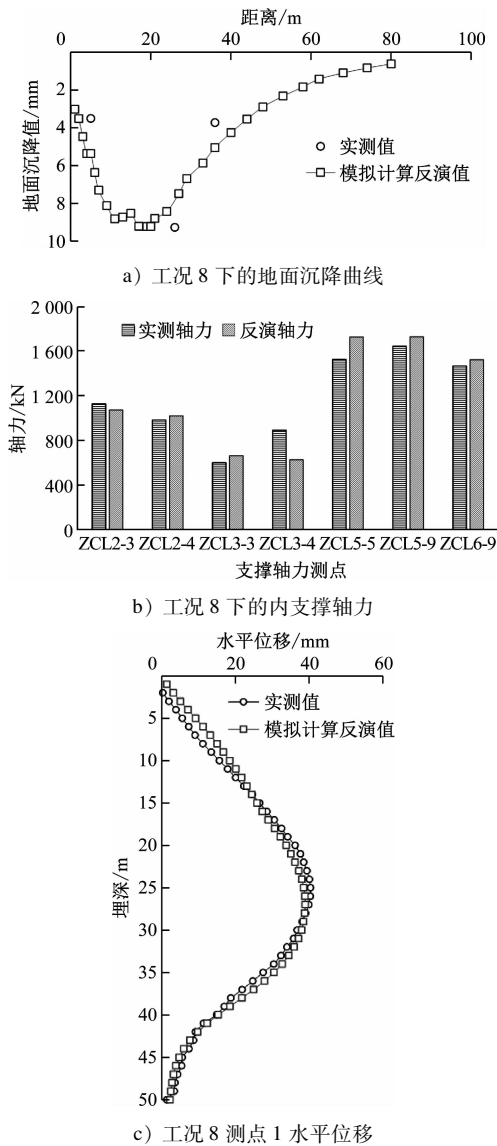


图 6 反演与实测结果对比

Fig. 6 Comparison of inverted and measured results

参数(按从大到小的顺序)有内摩擦角,固结系数,弹性模量指数,卸载刚度;支撑轴力敏感程度较大的主要参数(按从大到小的顺序)有固结系数,割线刚度,弹性模量指数,卸载刚度,终摩擦角。

2) 内摩擦角偏离基准参数 20% 时,地下连续墙深层水平位移最大值变化约 $-10.94\% \sim 14.52\%$,地面沉降变化约 $-7.25\% \sim 10.9\%$;固结系数对地下连续墙深层水平位移和地面沉降敏感程度也较大,但在参数取值范围内并无明显变化规律。

3) 通过分析建议在采用 H-S 模型进行基坑数值分析过程中,应当关注内摩擦角、固结系数、弹性模量指数和卸载刚度个关键参数,从而获得更好的

数值分析预测结果。

4) 结合敏感性分析结果及进化神经网络对土体参数进行智能反分析,反演济南地铁黄河隧道南岸工作井基坑工程关键参数,最终反演预测结果与实际监测结果基本一致,验证了反演结果的准确性。

参考文献

- [1] 张钰典. 复杂边界条件下地铁车站超深基坑开挖方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(7): 158.
ZHANG Yudian. Research on metro station super deep foundation pit excavation under complex boundary conditions[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(7): 158.
- [2] 赵香山, 陈锦剑, 黄忠辉, 等. 基坑变形数值分析中土体力学参数的确定方法[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(1): 1.
ZHAO Xiangshan, CHEN Jinjian, HUANG Zhonghui, et al. Determination of soil parameters for numerical simulation of an excavation[J]. Journal of Shanghai JiaoTong University, 2016, 50(1): 1.
- [3] 宗翔. 基坑开挖卸载引起下卧隧道隆起的控制方法[J]. 结构工程师, 2020, 36(3): 198.
ZONG Xiang. Method for controlling the uplift of underneath existing tunnel due to above deep excavation unloading[J]. Structural Engineers, 2020, 36(3): 198.
- [4] 徐中华, 王卫东. 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, 2010, 31(1): 258.
XU Zhonghua, WANG Weidong. Selection of soil constitutive models for numerical analysis of deep excavations in close proximity to sensitive properties[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 258.
- [5] 李裘鹏, 桂林, 马健, 等. 深基坑变形实测数据三维图表分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(7): 79.
LI Qiupeng, GUI Lin, MA Jian, et al. Analysis of the 3D chart of measured deformation data for deep excavation[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(7): 79.
- [6] 陈尚荣, 李通达, 梁发云, 等. 上海临港砂质粉土硬化土小应变模型参数研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 841.
CHEN Shangrong, LI Tongda, LIANG Fayun, et al. Parameters of hardening soil model with small strain of shallow sandy silt in Shanghai Lin'Gang special area[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(6): 841.
- [7] 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.
XIE Dongwu, GUAN Fei, DING Wenqi. Determination and sensitivity analysis of the parameters of hardening soil model with small strain stiffness[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(5): 898.
- [8] 张丽芬, 周谷城. 基于硬化土模型的淤泥质海堤沉降计算参数取值及灵敏度分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37(10): 85.

(下转第 102 页)