

基于HS与HSS模型的深基坑支护结构 变形与受力数值模拟分析

郭浩天^{1,2}, 孙庆林¹, 苑成旺^{1,2,3}, 李向群¹, 李继伟⁴

(1. 吉林建筑大学 测绘与勘查工程学院, 吉林 长春 130118;

2. 吉林建筑大学 季冻区岩土工程研究所, 吉林 长春 130118;

3. 吉林大学 建筑工程学院, 吉林 长春 130012;

4. 北京城建勘测设计研究院有限责任公司, 北京 100101)

摘要: 为探究应变硬化(HS)及小应变硬化(HSS)本构模型对深基坑支护结构变形与受力的影响,以长春地区某深基坑工程项目为例,通过室内试验获得HS与HSS本构模型参数,利用有限元软件midas GTS NX对其排桩支护结构水平位移及内支撑轴力进行数值模拟,并与实际监测数据进行对比分析。结果表明:长春地区粉质黏土HS与HSS本构模型的参考切线、割线及加卸载模量与压缩模量之间的关系为:参考加卸载模量约为压缩模量、参考切线模量以及参考割线模量的3.6倍;HS与HSS本构模型下排桩支护结构水平位移与实际监测数据之间的变化规律基本一致,均呈现“鱼腹型”,仅在数值上存在差异;HSS本构模型结果与实际监测值对比,排桩水平位移模拟结果误差为1.03%~10.32%,内支撑轴力模拟结果误差为6.48%~14.72%,相较于HS本构模型在反应卸荷条件下粉质黏土特性、支护结构变形与受力方面相对更为准确。

关键词: 深基坑工程;本构模型;midas GTS NX;数值模拟;粉质黏土

中图分类号: TU411.3

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2025)01—0071—09

Numerical Simulation and Analysis of Deformation and Force of Deep Foundation Pit Supporting Structure Based on HS and HSS Models

GUO Haotian^{1,2}, SUN Qinglin¹, YUAN Chengwang^{1,2,3}, LI Xiangqun¹, LI Jiwei⁴

(1. School of Geometrics and Prospecting Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun, Jilin 130118, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering in the Seasonal Frozen Zone, Jilin Jianzhu University, Changchun, Jilin 130118, China;

3. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China;

4. Beijing Urban Construction Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Beijing 100101, China)

Abstract: Hardening soil model (HS) and Hardening-soil with small strain model (HSS) constitutive models has been widely used in the numerical simulation of deep foundation pit excavation, and the investigation of their influence on the deformation and force of deep foundation pit supporting structure can provide theoretical reference and guidance for the design and construction of deep foundation pit supporting structure. By taking a deep foundation pit project in Changchun as the background, the parameters of HS and HSS constitutive models are obtained through indoor tests, and the horizontal displacement and axial force of internal support of the row pile support structure are numerically simulated by using the limited element software midas GTS NX, and compared and analyzed with the actual monitoring data. The results show that the relationship between the reference tangent line, cut line and unloading modulus and compression modulus of the HS and HSS ontological model of the silty clay in the Changchun area is $E_{ur}^{ref} \approx 3.6E_s^{1-2} \approx$

收稿日期:2024-10-09

修稿日期:2024-11-19

基金项目:吉林省科技发展计划项目(YDZJ202201ZYTS490);第七届中国科协青年人才托举工程(2021QNRC001)

作者简介:郭浩天(1991—),男,讲师,主要从事土体工程地质等方面研究工作。E-mail: guohaotian@163.com

通讯作者:孙庆林(1999—),男,硕士研究生,研究方向为土体工程地质方面。E-mail: 965980258@qq.com

3. $6E_{50}^{\text{ref}} \approx 3.6E_{\text{sed}}^{\text{ref}}$. The change rule between horizontal displacement of pile supporting structure and actual monitoring data under HS and HSS constitutive model is basically the same, showing "fish-belly type", and there are only numerical differences; comparing the results of HSS constitutive model and actual monitoring values, the error of simulation results of horizontal displacement of pile is 1.03% ~ 10.32%, and the error of simulation results of axial force is 6.48% ~ 14.72%, compared with HS constitutive model, which is relatively more accurate in responding to the characteristics of powdery clay, deformation and force of supporting structure under unloading condition. Comparing the HSS model results with the actual monitoring values, the simulation error of horizontal displacement of row piles is 1.03%~10.32%, and the simulation error of axial force of inner support is 6.48%~14.72%, which is more accurate than the HS model in the reaction to the characteristics of silty clay under unloading condition, and the deformation and force of supporting structure.

Keywords: deep foundation engineering; intrinsic model; midas GTS NX; numerical simulation; silty clay

在对以开挖卸荷为主的深基坑工程进行数值模拟时,合理选用土体本构模型,不但可以准确反应出土体的受力变形特性,且可以提供更为精确的计算分析结果。深基坑工程数值模拟较为常用的本构模型主要有 HS 本构模型和 HSS 本构模型。HS 本构模型(Hardening soil model)通过考虑应力路径,区分加卸载刚度,并结合实际土体剪切压缩硬化特性,能够较为真实的模拟出土体的力学行为。已有多名学者运用该本构模型结合当地特殊土体性质对深基坑工程进行数值模拟。刘俊城等^[1]采用 HS 本构模型探究富水砂土基坑渗水对侧墙变形和周边环境的影响进行研究,通过与实测结果对比得出误差为1.7%~1.8%,证明 HS 硬化土本构模型在富水砂土地区有很好的适用性。李宇杰等^[2]和尹利洁等^[3]均以兰州地铁为例采用 HS 硬化土本构模型对兰州特殊红砂岩地层深基坑支护进行数值模拟,前者通过对比分析模拟值与实际监测值,得出各施工阶段支护结构水平位移与数值模拟结果变化一致,后者通过对比分析地连墙顶部水平位移与实际位移,得到其变化趋势一致,证明在进行数值模拟时硬化土本构模型可以很好的反应出该地区土体特性。吴丽萍等^[4]采用 HS 本构模型对长春地区基坑支护工程进行数值模拟分析,得出计算值与实测值偏差较小,表明在一定范围内 HS 模型能够较好的反应出支护结构的位移变化情况。

为反映土体发生小变形时高模量、非线性特征, Benz^[5]基于传统硬化土 HS 本构模型,通过考虑小应变范围内土体的剪切模量的非线性变化特性,构建出了小应变硬化土 HSS 本构模型(Hardening-soil with small strain model)。该模型已有多名学者结合当地土体特征通过室内试验,经验取值等方法获得适用于当地土体的参数取值,并结合工程实例验证

了其可靠性。白时雨等^[6]通过室内试验分析了扰动度对 HSS 本构模型参数影响,并对宁波地区某基坑工程坑后土体水平位移变化进行数值模拟,得出结果与实测值接近,为扰动情况下 HSS 本构模型取值提供了参考。袁聚云等^[7]通过室内试验获得了广东阳江典型海洋砂土 HSS 本构模型参数,得出各刚度参数之间存在倍数关系。陈赵慧等^[8]通过大量土工试验以及原状土室内试验得到湖相沉积典型软土 HSS 本构模型参数取值,并对两个基坑实例的围护结构水平位移进行数值模拟,验证其取值可靠性。冯仲文等^[9]基于 HSS 本构模型对基坑群开挖进行数值模拟分析研究,其结果与实测值对比,得出 HSS 本构模型适用于以卸荷应力路径为主的基坑开挖问题。李大鹏等^[10]对深基坑数值模拟研究中不同的土体本构模型进行分析总结,给出了不同模型的适用范围与局限性。HS 及 HSS 本构模型在深基坑开挖数值模拟方面已有一定成果,且主要集中在本构模型参数选取与参数修正上。由于不同区域土体性质的差异性,相同本构模型的选择会对模拟结果产生较大影响,且通用的模型参数不能准确的反映不同区域土体物理力学特性,进而影响深基坑支护结构变形及受力分析结果的可靠性与准确性。

长春地区地质条件相对复杂,岩土类型较多,如粉土、粉质黏土、软岩等,物理力学性质差异较大,从而增大了深基坑工程的施工难度。因此,为更好反应长春地区深基坑工程中粉质黏土的特性,找到更为适用的土体本构模型,本文拟通过室内试验分别确定 HS 与 HSS 本构模型刚度参数的取值与比例关系,给出相应参数确定方法,并分别采用两种本构模型进行数值模拟分析,将两种本构模型下排桩支护结构水平位移值和内支撑轴力值与实际监测值进行对比,分析二者在长春地区典型粉质黏土深基坑工程数值模拟中的适用性,以期对长春地区粉质黏土

地层深基坑的设计、施工提供理论指导与参考。

1 模型参数取值

HSS 本构模型共有 13 个参数,较 HS 本构模型多出 2 个与小应变有关的参数。其能反应土体应变水平的刚度参数共 7 个:参考切线模量 $E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$ 、参考割线模量 E_{50}^{ref} 、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} 、卸载再加载泊松比 ν_{ur} 、正常固结条件下侧压力系数 K_0^{nc} 。能够体现土体抵抗剪破坏能力的参数共 4 个:有效黏聚力 c' ;有效内摩擦角 φ' ;破坏比 R_f ;剪胀角 ψ 。与小应变有关的共 2 个参数:参考初始剪切模量 G_0^{ref} 、剪切模量衰减到 70% 的初始剪切模量时所对应的剪应变

$\gamma_{0.7}$ 。

由于模型参数过多,通过室内试验获取五个参数 $E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$ 、 E_{50}^{ref} 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 、 c' 、 φ' ,其余参数参照文献[11],并结合经验公式进行取值。

1.1 土样来源及性质

土样取自吉林省长春市超强街站基坑工程项目,取土深度为 1.59 m~20.34 m,采用外径 108 mm 薄壁取土器取土,使用镀锌薄铁皮试样盒、保鲜膜与胶带进行封装,原状土样尺寸约 100 mm×200 mm。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[12]对土样各项基本物理力学指标进行试验和计算,结果如表 1 所示。

表 1 粉质黏土基本物理力学性质参数表

土层名称	深度/m	颜色	状态	重度/(kN·m ⁻³)	含水率/%	孔隙比	压缩模量 E_s^{1-2} /MPa
粉质黏土 2-1	1.59~5.91	褐黄色	可塑偏软	19.4	28.5	0.806	3.80
粉质黏土 2-2	5.91~12.27	黄褐色	可塑	19.7	26.9	0.756	5.00
粉质黏土 2-3	12.27~15.25	黄褐色	可塑偏硬	20.1	23.7	0.679	7.54
粉质黏土 2-4	15.25~20.34	灰褐色	可塑偏硬	20.1	24.1	0.668	6.19

1.2 试验方案及结果

1.2.1 固结试验

参考切线模量 $E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$ 是指在特定荷载(如 100 kPa)下的固结试验中应力-应变曲线的切线斜率。试验采用 KTG-GY 全自动固结仪,每组 3 个试样,加载压力分别为:50 kPa、100 kPa、200 kPa、400 kPa,每级荷载加载 24 h 或每小时压缩变形量不大于 0.01 mm 后再进行下级加载,采用双面排水,将加载完成后各点采用二次多项式进行拟合绘制应力-应变曲线。如图 1 所示,由于篇幅限制只给出粉质黏土 2-1、粉质黏土 2-3 两层土体结果(下同),拟合得出的相关系数 $R^2 > 0.99$,证明曲线拟合结果较好。

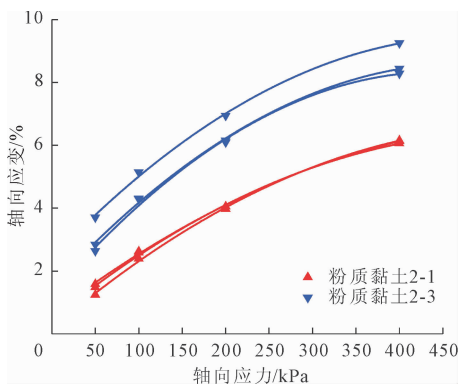


图 1 固结试验应力-应变拟合曲线

拟合曲线轴向应力为 100 kPa 时对应点处切线斜率数值即为 $E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$ 值。压缩模量 E_s^{1-2} 为应力-应变曲线 200 kPa 时对应的切线斜率,通常 $E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$ 值略小于 E_s^{1-2} 值。由图 1 可知 E_s^{1-2} 与 $E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$ 关系,粉质黏土 2-1 为 $E_s^{1-2} \approx 1.03E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$,粉质黏土 2-3 为 $E_s^{1-2} \approx 1.12E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$ 。

1.2.2 三轴固结排水剪切试验

通过 CD(三轴固结排水剪切)试验得到粉质黏土的有效黏聚力 c' 和有效内摩擦角 φ' 。由于试验在排水条件下进行固结和剪切,因此可以排除孔隙水压力对试验结果的影响,得到的抗剪强度参数能够有效反映土颗粒之间的有效应力状态。

进行试验之前,首先对试样进行真空饱和,使饱和度达到 98% 以上。进行试验时,固结时间为 36 h,围压分别为 100 kPa、200 kPa、300 kPa,剪切速率控制为 0.08 mm/min。当试样有明显的峰值或轴向应变大于 15% 时试验结束,结果如图 2 所示。

参考割线模量 E_{50}^{ref} 指在单向受力条件下材料应力-应变曲线上某一点与原点连线的斜率。需通过 CD 试验确定,试验采用 TSZ-1B 全自动三轴仪,选用 100 kPa 围压下轴向应变-应力曲线,取剪切峰值或轴向应变为 15% 对应的偏应力为 q_f 。如图 3 所示,原点与 $0.5q_f$ 对应点直线斜率为 E_{50}^{ref} 值。

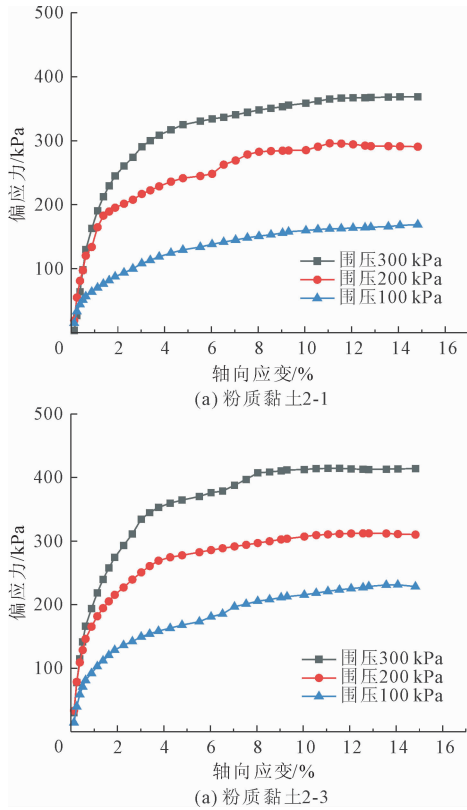


图 2 粉质黏土 CD 试验应力-应变曲线

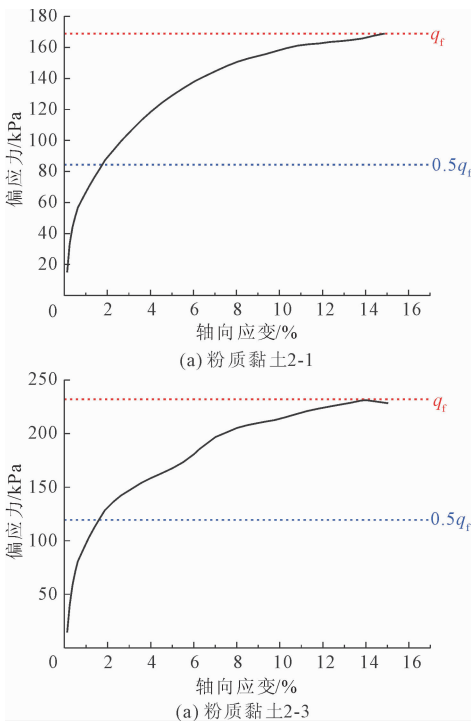


图 3 围压 100 kPa 下粉质黏土 CD 试验应力-应变曲线

通过对比与 $E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$ 值的大小,得出 E_{50}^{ref} 与 $E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$ 关系为:粉质黏土 2-1 的 $E_{50}^{\text{ref}} \approx 1.2E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$,粉质黏土 2-3 的 $E_{50}^{\text{ref}} \approx 0.9E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$ 。

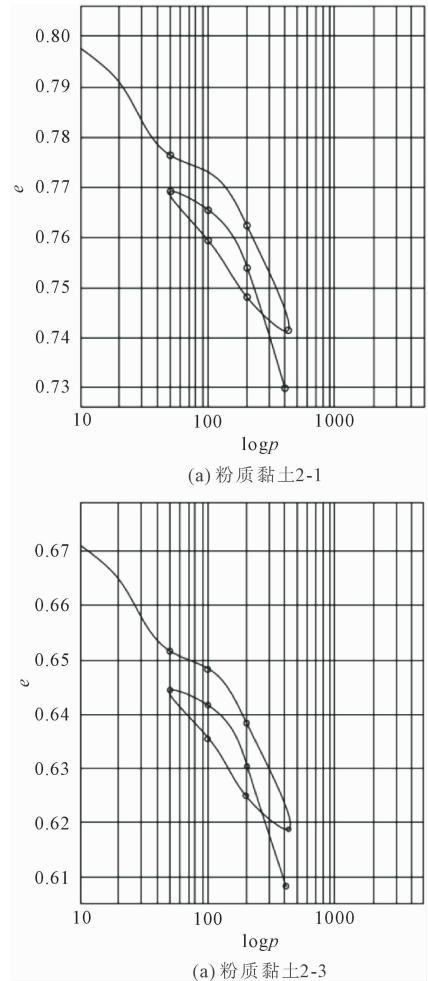
1.2.3 固结加载-卸载-再加载试验

参考加卸载模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 是指在循环加卸载试验中,材料在加载和卸载阶段所表现出的应力与应变之间的比值。通过室内固结加载-卸载-再加载试验,求得其回弹指数 C_s ,通过下式可换算得到^[11]:

$$C_s = \frac{2.3(1+e_0)(1+v_{\text{ur}})(1-2v_{\text{ur}})}{(1-v_{\text{ur}})E_{\text{ur}}^{\text{ref}}} p^{\text{ref}} \quad (1)$$

式中: e_0 为初始孔隙比; v_{ur} 为加载再卸载泊松比; p^{ref} 为参考应力; $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为参考加卸载模量。

试验采用 KTG-GY 全自动固结仪,初次加载压力为:50 kPa、100 kPa、200 kPa、400 kPa,每级加载时间为 12 h,卸载压力为:400 kPa、200 kPa、100 kPa、50 kPa,每级加载时间为 24 h,再加载压力与初次加载压力相同。得到压缩 $e-\log p$ 曲线,卸载曲线和再加载曲线斜率平均值为回弹指数 C_s 值。加载卸载再加载 $e-\log p$ 曲线如图 4 所示,最终加卸载回弹指数 C_s 值如表 2 所示。

图 4 粉质黏土加载卸载再加载 $e-\log p$ 曲线

由表 2 计算可知,参考加卸载模量 E_{ur}^{ref} 值,通过对比 E_{oed}^{ref} 值可得出以下关系。粉质黏土 2-1: $E_{ur}^{ref} \approx (2.65 \sim 6.67) E_{oed}^{ref}$, 粉质黏土 2-2: $E_{ur}^{ref} \approx (2.45 \sim 5.27) E_{oed}^{ref}$, 粉质黏土 2-3: $E_{ur}^{ref} \approx (1.45 \sim 3.09) E_{oed}^{ref}$, 粉质黏土 2-4: $E_{ur}^{ref} \approx (1.98 \sim 4.26) E_{oed}^{ref}$ 。

表 2 加卸载回弹指数值

土层名称	粉质黏土 2-1	粉质黏土 2-2	粉质黏土 2-3	粉质黏土 2-4
回弹指数	0.014~0.030	0.014~0.029	0.018~0.028	0.013~0.028

1.3 其余参数确定方法

参考初始剪切模量 G_0^{ref} 和剪应变 $\gamma_{0.7}$ 在具备试验条件时均可通过共振柱试验^[13] 和小应变三轴试验获得^[14]。当不具备试验条件时,通常采用经验方法取值,根据 Benz^[5] 对 HSS 模型参数指出 $G_0^{ref} \approx (1 \sim 2) E_{ur}^{ref}$, $\gamma_{0.7}$ 在参考应力下建议取值范围为 $(1 \sim 2) \times 10^{-4}$, 和 Hardin 等^[15] 通过多次试验总结出经验公式:

$$G_0^{ref} = 33 \times \frac{(2.97 - e_0)^2}{1 + e_0} \quad (2)$$

式中: e_0 为初始孔隙比。

Stokoe 等^[16] 指出黏土的 $\gamma_{0.7}$ 计算式为:

$$\gamma_{0.7} = \gamma_{0.7}^{ref} + 5 \times 10^{-6} I_p O_{cr}^{0.3} \quad (3)$$

式中: $\gamma_{0.7}^{ref}$ 为 $I_p = 0$ 时的剪应变,约为 1×10^{-4} ; I_p 为塑性指数; O_{cr} 为超固结比。

本文根据经验式(2)、式(3)取 G_0^{ref} 、 $\gamma_{0.7}$ 值;根据董学超等^[17] 通过压缩试验曲线对模量应力水平相关的幂指数 m 进行取值优化得出优化的 m : 在砂土中取值介于 0.6~0.75 之间,黏土取值介于 0.8~0.95 之间,本文 m 可取 0.9; p^{ref} 根据经验取 100 kPa; ν_{ur} 根据文献^[18] 取 0.2; R_r 取 0.9; ψ 根据文献^[19] 可取 0° , 对于砂土 $\varphi' > 30^\circ$, 取 $\varphi' - 30^\circ$, $\varphi' < 30^\circ$ 则取 0° , 对于黏性土,一般取为 0° ; K_0^{nc} 可按照下式^[20] 进行取值:

$$K_0^{nc} = 1 - \sin\varphi' \quad (4)$$

式中: K_0^{nc} 为正常固结条件下侧压力系数; φ' 为土的有效内摩擦角, $(^\circ)$ 。

1.4 结果统计

根据以上结果可知,长春地区粉质黏土参考切线模量 E_{oed}^{ref} 值与地勘报告中给出的 E_s^{1-2} 值大致相同,因此为取值方便可按照地勘报告中的 E_s^{1-2} 取值。参考割线模量 E_{50}^{ref} 的值在 $(0.9 \sim 1.2) E_{oed}^{ref}$ 之间。对于参考加卸载模量 E_{ur}^{ref} 取值,可塑偏软粉质黏土

在 $(2.5 \sim 6.5) E_{oed}^{ref}$ 之间,可塑偏硬粉质黏土在 $(1.5 \sim 4.0) E_{oed}^{ref}$ 之间。结合三个参考模量的取值范围,得到其对应比例关系为: $E_{ur}^{ref} \approx 3.6 E_s^{1-2} \approx 3.6 E_{50}^{ref} \approx 3.6 E_{oed}^{ref}$ 。其余参数可按照上述取值方法进行确定。

2 数值模拟分析

2.1 工程概况

车站基坑位于超强街与硅谷大街交叉口处,超强街站小里程 YK23 + 159.129 至大里程端 YK23 + 369.829,坡度为 0.2%,基坑长 210.7 m,宽度 19.9 m~24.7 m,开挖深度为 18.82 m,基坑采用坑外降水。围护结构采用 800@1300 mm 钻孔灌注桩,内支撑体系采用钢支撑,共三道,第一道采用 $\phi 609$ ($t = 16$ mm) 钢管撑位于地表 1.71 m 处,第二、三道采用 $\phi 800$ ($t = 16$ mm) 钢管撑,分别位于距地表 8.01 m 和 13.51 m 处。基坑剖面图如图 5 所示,基坑平面图如图 6 所示,地层参数取值如表 3 所示。

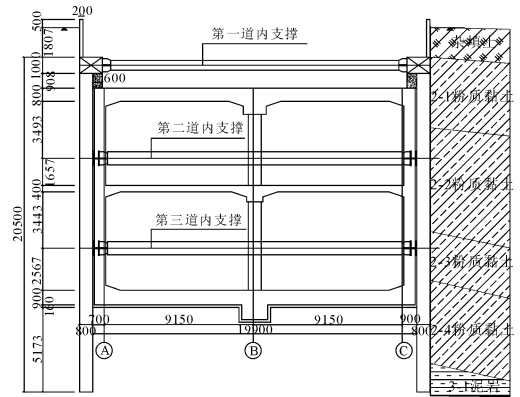


图 5 基坑剖面图(比例为 1:200)

表 3 地层参数表

地层	厚度 /m	重度 /($kN \cdot m^{-3}$)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^\circ$)
杂填土 1-1	1.0~2.2	17.5	—	—
粉质黏土 2-1	1.4~10.8	19.4	23	19
粉质黏土 2-2	1.9~10.4	19.7	35	17
粉质黏土 2-3	1.6~5.2	20.1	31	19
粉质黏土 2-4	1.5~8.4	20.1	33	17
泥岩 3-1	2.3~5.5	19.9	30	20

2.2 数值模拟计算

采用 midas GTS NX 有限元软件进行模拟计算,由于基坑开挖土体扰动宽度为开挖深度的 3~4 倍^[21],根据实际情况建立长 371 m,宽 182 m,高 60 m 计算模型,网格划分如图 7 所示,支护结构模型图如图 8 所示。

表 6 基坑开挖模拟步骤

工况	施工内容	步骤
1	初始地应力分析	激活边界荷载、自重、位移清零
2	排桩施工	排桩施工
3	开挖第 1 层土,施工围檩 1、内支撑 1	开挖至 -1.7 m 处
4	开挖第 2 层土,施工围檩 2、内支撑 2	开挖至 -8.0 m 处
5	开挖第 3 层土,施工围檩 3、内支撑 3	开挖至 -13.5 m 处
6	开挖第 4 层土	开挖至 -18.8 m 处

3 模拟结果与实际监测对比分析

3.1 排桩桩身水平位移对比分析

分别采用 HSS 本构模型和 HS 本构模型对该基坑进行模拟分析,得到开挖完成后支护结构水平位移云图如图 9 所示。桩身水平位移值与实际监测结果对比图如图 10 所示,由于排桩施工对土层位移影响较小,因此可忽略本工况。

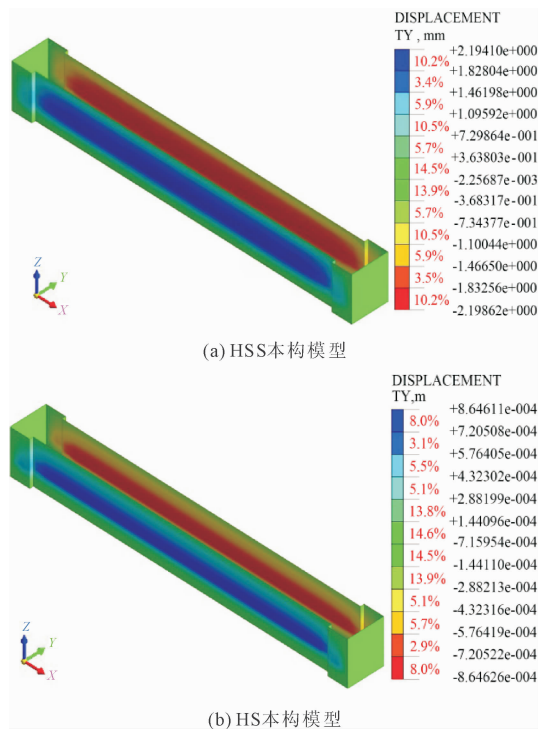


图 9 工况 6 下不同本构模型排桩水平位移云图

根据实测基坑桩体测斜数据得,当开挖完成后桩身最大位移为 2.10 mm,采用 HSS 小应变本构模型计算得出其桩身最大位移为 2.17 mm,HS 本构模型计算得出桩身位移为 0.86 mm。两个本构模型水平位移均呈现“鱼腹形”,最大位移值于桩身处,这是由于排桩在受到土体位移作用时,其两端受到支撑结构的约束,变形相对较小;而中间部分由于缺少足够的约束,变形相对较大。当支护结构中间位移

较大时,可能会增加局部破坏风险,使结构整体失稳破坏。研究结果与刘杰等^[23]研究结果相似,证明了计算结果的可靠性。在开挖深度 1.44 m ~ 2.88 m 监测值发生突变与计算结果差别较大,究其原因,由于在进行模拟时采用平均层厚建模,得到的计算结果较为平滑,而实际土层厚度分布不均匀,该处杂填土层厚度为 1.8 m。在施工时此处有大量堆载,使得杂填土压实度较高,排桩位移较小。

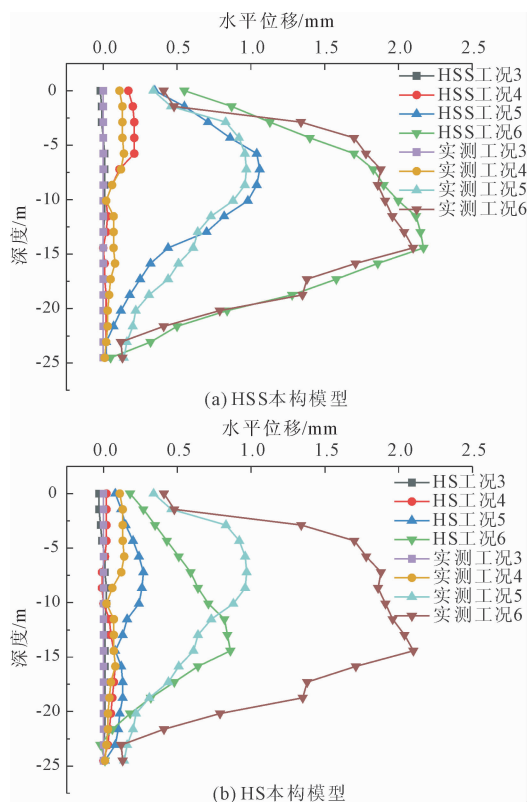


图 10 不同本构模型桩身水平位移监测对比图

通过对比两个本构模型的计算结果可知,两者位移趋势与实际监测值一致,数值大小与实际监测存在误差。HSS 本构模型最小拟合误差为 1.03%,HS 本构模型拟合最小误差为 7.62%,HSS 较 HS 本构模型拟合程度好。HS 本构模型由于计算时未考虑土体小应变特性,使得其计算结果较实际偏小。

3.2 内支撑轴力对比分析

开挖完成后得到工况 6 下 HSS 本构模型和 HS 本构模型的三道内支撑轴力图如图 11 所示。两个本构模型内支撑轴力大小与实际监测结果对比如图 12 所示。

通过两个本构模型与实际监测值对比可知两个本构模型计算结果与实际监测值大小变化一致。HSS 本构模型各层内支撑轴力大小值都较为接近实

际监测值,且各处轴力大小均大于实际监测值,而 HS 本构模型轴力均较小,这与桩身位移水平位移值变化规律一致。HSS 本构模型与实际监测值拟合误差为 14.72%,HS 本构模型误差为 66.29%,说明 HSS 本构模型较 HS 本构模型更加契合实际情况,且较 HS 本构模型能够为基坑支护设计提供较为可靠依据。

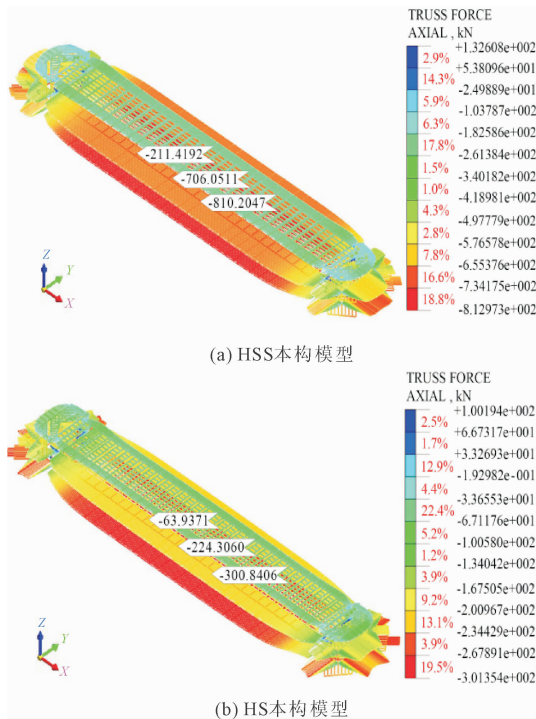


图 11 工况 6 下本构模型内支撑轴力图

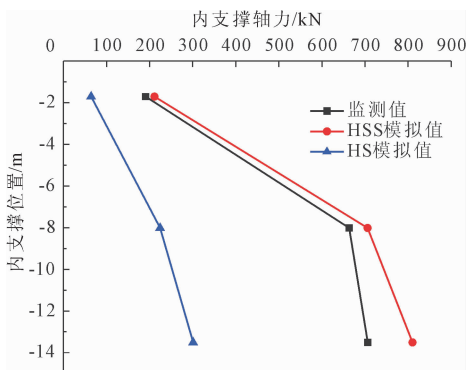


图 12 工况 6 下 HSS、HS 模型内支撑轴力监测对比图

通过以上桩身水平位移和内支撑轴力计算结果分析可知,当 HSS 本构模型参数选取合理时,得到的分析结果是合理可靠的。HS 本构模型是基于强度折减法的本构模型,在进行数值模拟计算时通常忽略土体的压缩硬化特性,而 HSS 本构模型是基于弱平面的本构模型,在计算时不仅考虑的土体的压缩硬化特性,而且在此基础上还考虑了土体在实际

工程中的小应变行为。因此,HSS 本构模型较 HS 本构模型能够更加精确反应出长春地区粉质黏土在进行卸荷工程时的土体特性。

4 结 论

基于室内试验获取 HS 和 HSS 本构模型参数,对长春市某深基坑工程排桩支护结构水平位移及内支撑轴力进行数值模拟分析,并与实际监测值进行对比分析,所得结论如下:

(1) 通过室内试验,得出了长春地区粉质黏土参考模量之间的比例关系为: $E_{ur}^{ref} \approx 3.6E_s^{1-2} \approx 3.6E_{50}^{ref} \approx 3.6E_{oed}^{ref}$,并结合经验公式给出其余参数取值。

(2) HS 和 HSS 本构模型所得桩身水平位移值和内支撑轴力值与实际监测结果在变化规律上趋势一致,均呈“鱼腹型”。由于两者本构模型部分参数通过室内试验得出,较实际工程存在误差,但 HSS 本构模型小应变参数考虑了土体在实际工程中的小应变行为。因此,HSS 较 HS 本构模型与实际监测值拟合程度高。

(3) 桩身水平位移计算时 HSS 本构模型与实际监测值拟合最小误差仅为 1.03%,HS 本构模型拟合最小误差为 7.62%。内支撑轴力计算时 HSS 本构模型与实际监测值拟合误差为 14.72%,HS 本构模型误差为 66.29%。

(4) 由于 HSS 本构模型充分考虑了土体在发生小应变时高模量、非线性特征的原因,相较于 HS 模型能够更加充分的反应出卸荷条件下长春地区粉质黏土特性,因此,HSS 模型可为长春地区粉质黏土地层深基坑数值模拟计算提供参考。

参考文献:

- [1] 刘俊城,谭 勇,宋享桦,等.富水砂土基坑渗水对侧墙变形和周边环境的影响[J].浙江大学学报(工学版),2023,57(3):530-541.
- [2] 李宇杰,冯忠居,朱彦鹏.兰州特殊红砂岩地层深基坑支护监测与数值模拟分析[J].岩土工程学报,2022,44(S1):236-240.
- [3] 尹利洁,李宇杰,朱彦鹏,等.兰州地铁雁园路站基坑支护监测与数值模拟分析[J].岩土工程学报,2021,43(S1):111-116.
- [4] 吴丽萍,刘春良,莫韬韬.基于 Midas 对长春市某基坑开挖的变形特性分析[J].现代盐化工,2020,47(6):108-109.
- [5] Benz T. Small strain stiffness of soils and its numerical consequences [D]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2006.

- [6] 白时雨,王文军,谢新宇,等. 考虑扰动影响的土体小应变硬化模型参数试验研究及其在基坑工程中的应用[J]. 岩土力学,2023,44(1):206-216.
- [7] 袁聚云,陈玺元,顾晓强,等. 广东阳江海洋砂性土小应变硬化土模型参数的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2022,50(6):852-860.
- [8] 陈赵慧,阮永芬,王 鹏,等. 湖相沉积典型软土 HSS 模型参数取值研究[J]. 地震工程学报,2023,45(1):74-85,93.
- [9] 冯仲文,杨红坡,温科伟. 紧邻基坑群坑开挖相互影响三维数值模拟[J]. 地下空间与工程学报,2024,20(S1):283-289.
- [10] 李大鹏,阎长虹,张 帅. 深基坑开挖对周围环境影响研究进展[J]. 武汉大学学报(工学版),2018,51(8):659-668.
- [11] 张雪婵. 软土地基狭长型深基坑性状分析[D]. 杭州:浙江大学,2012.
- [12] 水利部水利水电规划设计总院. 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S]. 北京:中国计划出版社出版,2019.
- [13] 罗敏敏,陈 赟,周 江. 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,2021,51(4):172-180.
- [14] 陈 赟,罗敏敏,夏能武,等. 软土 HSS 模型参数现有试验成果统计分析[J]. 岩土工程学报,2021,43(S2):197-201.
- [15] Hardin B O, Black W L. Closure to vibration modulus of normally consolidated clays [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1969, 95(6):1531-1537.
- [16] Stokoe K H, Darendeli M B, Gilbert R, et al. Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves[C] //International Workshop on Uncertainties in Nonlinear Soil Properties and Their Impact on Modeling Dynamic Soil Response, 2004.
- [17] 董学超,王水林,郭明伟,等. 基于压缩试验曲线的 HSS 模型参数优化[J/OL]. 岩土力学,2020(S2):1-9 [2023-04-03]. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2020.0015>
- [18] Janbu J. Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests[C] //Proceedings of the 3rd European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Germany: Wiesbaden, 1963:19-25.
- [19] Bolton M D. The strength and dilatancy of sands[J]. Géotechnique, 1986,36(1):65-78.
- [20] Gao D Z, Wei D D, Hu Z X. Geotechnical properties of Shanghai soils and engineering applications [J]. Marine Geotechnology and Near-shore/Offshore Structures, STP, 1986,923:161-177.
- [21] 于忠波,任 磊,皮景坤,等. 相邻深基坑开挖方式对地下管线的影响分析[J]. 公路与汽运,2012(4):239-241.
- [22] 刘建航,侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [23] 刘 杰,姚海林,任建喜. 地铁车站基坑围护结构变形监测与数值模拟[J]. 岩土力学,2010,31(S2):456-461.

(上接第 60 页)

- [10] 刘宜平. 109 国道橡皮山段砂质粉土冻胀特性试验研究[D]. 北京:北京交通大学,2009.
- [11] 王家澄,徐学祖,张立新,等. 温度和压力条件对正冻土中成冰过程和冷生组构的影响[J]. 冰川冻土,1995,17(3):250-257.
- [12] 黄 龙,盛 煜,黄旭斌,等. 不同路径下土体单向冻胀过程力与变形试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(S2):3870-3882.
- [13] 陈伟志,张莎莎,李安洪. 温度循环下压实粗粒盐渍土水盐迁移与变形响应[J]. 岩土力学,2022,43(2):74-85.
- [14] 白 冰,刘大鹏. 变热源强度温度荷载作用下非饱和土中的水分迁移规律研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006(S2):4153-4159.
- [15] 徐云山,肖子龙,孙德安,等. 土体导热系数温度效应及其预测模型[J]. 岩土工程学报,2023,45(6):1180-1189.