

珠三角地区典型淤泥质土硬化土 本构模型参数研究

王祥秋¹, 罗晓栋¹, 郑土永²

(1. 佛山大学土木与交通学院, 广东 佛山 528000;

2. 北京市政设计研究院佛山分院, 广东 佛山 528000)

摘要: 为了探讨硬化土本构模型对珠三角地区软土地下工程数值分析的适用性, 基于 4 种不同应力路径三轴试验, 分析了本地区典型淤泥质土力学性态及其硬化土本构模型参数的变化规律。研究表明, 侧向卸荷及排水条件对淤泥质土硬化土本构模型强度参数 c' 、 φ' 值以及刚度参数 E_{50}^{ref} 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 和 m 影响显著, 但对破坏比 R_f 的影响较小。对于固结不排水侧向卸荷条件, 珠三角地区典型淤泥质土硬化土本构模型主要参数为: 参考割线模量 E_{50}^{ref} 为 2.34 MPa, 参考切线模量 $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ 为 1.59 MPa, 参考加-卸载模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为 11.67 MPa, 破坏应力比 R_f 为 0.98, 刚度应力水平相关幂指数 m 为 1.84; 其中: E_{50}^{ref} 约为 $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ 的 1.47 倍, $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 约为 $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ 的 7.34 倍。珠三角地区某软土深基坑工程实践证明, 硬化土本构模型适用于模拟该地区软土力学性态。

关键词: 硬化土本构模型; 应力路径; 排水条件; 模型参数

中图分类号: U655.544; TU470

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2024)10-0044-07

doi:10.7640/zggwjs202410008

Study on constitutive model parameters of hardening soil for typical silt soil in the Pearl River Delta region

WANG Xiang-qiu¹, LUO Xiao-dong¹, ZHENG Tu-yong²

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Foshan University, Foshan, Guangdong 528000, China;

2. Foshan Branch of Beijing Municipal Design and Research Institute, Foshan, Guangdong 528000, China)

Abstract: In order to explore the applicability of the hardening soil constitutive model for numerical analysis of soft soil underground engineering in the Pearl River Delta region, and based on four different stress path triaxial tests, the mechanical properties and variation of constitutive model parameters of hardening soil were analyzed for the typical silty soil in this region. Research results have shown that lateral unloading and drainage conditions have significantly impact on the partial parameters of constitutive model, such as the strength parameters of c' and φ' , the stiffness parameters such as E_{50}^{ref} , $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ and m , but the impact on the failure ratio R_f is relatively small. For the consolidated undrained lateral unloading condition, the main parameters of the constitutive model for typical silty soil in the Pearl River Delta region are shown as the reference secant modulus E_{50}^{ref} is 2.34 MPa, with reference to tangent modulus $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$ is 1.59 MPa, with reference to the loading unloading modulus $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ is 11.67 MPa, with a failure stress ratio of R_f is 0.98, and the power exponent m related to stiffness stress level is 1.84; Among them: E_{50}^{ref} is 1.47 times of $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$, $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ is 7.34 times of $E_{\text{ocd}}^{\text{ref}}$. The practice of a deep foundation pit of soft soil in the Pearl River Delta has proven that the constitutive model of hardening soil is suitable for simulating the mechanical properties of soft soil in this region.

Key words: constitutive model of hardening soil; stress path; drainage conditions; model parameters

收稿日期: 2024-01-04 修回日期: 2024-02-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51278121); 广东省基础与应用基础研究基金项目 (2023A1515012085)

作者简介: 王祥秋 (1968—), 男, 湖南衡阳人, 博士, 教授, 主要从事岩土与地下工程科研工作。E-mail: tongji_wxq@163.com

0 引言

工程实践表明, 软黏土力学性态非常复杂, 为了更准确地模拟岩土体非线性力学特性, Schanz 等^[1]基于 Vermeer 双硬化模型提出了硬化土本构模型。之后, Surarak 等^[2], 王卫东等^[3], 杨兰强等^[4], 刘伟煌等^[5], 王祥秋等^[6], 朱旻等^[7]先后针对岩土体硬化土本模型参数以及基于大型岩土分析软件的硬化土本构模型二次开发与应用开展了若干创新性研究, 取得了若干具有工程实用价值的研究成果, 顾晓强等^[8], 白时雨等^[9], 李栋等^[10]提出了基于小应变的硬化土本构模型, 为推广和发展硬化土本构模型奠定了坚实基础。但由于硬化土本构模型参数较多, 相关参数受岩土体形成环境条件、加卸载应力路径以及排水条件等因素影响较大。因淤泥质土层在珠三角地区广泛分布, 层厚约为 1.5~20 m, 平均厚度达 13.5 m, 平均埋深约为 2.5 m, 呈流塑至软塑状态, 其对本地区地下工程设计与施工安全影响较大, 为此, 本文以珠三角地区典型淤泥质土为研究对象, 基于 GDS 应力路径三轴试验分析探讨不同应力路径及排水条件对淤泥质土力学特性及其硬化土本构模型参数的影响, 从而为完善本地区地下工程设计与计算理论提供研究基础。

1 淤泥质土硬化土本构模型参数试验

硬化土本构模型属于弹塑性本构模型, 研究经验表明, 与 Mohr-columb 模型相比其更能较为准确地模拟软土复杂的力学性态。该模型共有 11 个参数, 其中: 强度参数 3 个, 包括剪胀角 ψ_m 、有效黏聚力 c' 和有效内摩擦角 φ' , 可通过抗剪强度试验确定; 刚度参数 4 个, 包括参考切线模量 E_{oed}^{ref} 、参考割线模量 E_{50}^{ref} 、参考卸载再加载模量 E_{ur}^{ref} 和刚度应力水平相关幂指数 m , 参考切线模量 E_{oed}^{ref} 可通过标准固结试验确定, 其余 3 个参数可通过三轴试验确定; 高级参数 4 个, 包括参考应力 σ^{ref} 、卸载再加载泊松比 v_{ur} 、破坏比 R_f 和侧压力系数 k_0 , 参考应力 σ^{ref} 取为 100 kPa, 侧压力系数 $k_0=1-\sin \varphi'$, v_{ur} 、 R_f 则通过三轴试验确定。

1.1 标准固结试验及其模型参数

本文以珠三角地区典型地层<2-4>淤泥质土为研究对象, 土层基本物理参数如表 1 所示。按照土工试验方法标准, 在实验室内将原状土样加工成直径 39.1 mm, 高度 80 mm 的标准土样。通过标准固结试验可得珠三角地区典型淤泥质土压缩

模量 $E_{s1-2}=1.99$ MPa。参考切线模量 E_{oed}^{ref} 为 1.59 MPa, 其值约为压缩模型 E_{s1-2} 的 0.8 倍。

表 1 淤泥质土基本物理参数指标

Table 1 Basic physical parameters of silty clay

土层编号	土层类型	取样深度/m	重度/(g·cm ⁻³)	含水率/%	初始孔隙比	塑性指数	液性指数
<2-4>	淤泥质土	8~9	1.82	21.3	0.807	12.6	0.49

1.2 不同应力路径三轴试验及力学特性分析

1.2.1 三轴剪切试验方案

为了模拟地下工程中不同开挖与卸荷应力路径及排水条件对淤泥质土硬化土本构模型参数的影响, 分别开展了 4 种不同应力路径的三轴试验, 具体加载方式及试验条件如表 2 所示。其中: CDCTC 表示固结排水剪切试验, CUCTC 表示固结不排水剪试验, CDRTC 表示固结排水侧向卸荷试验, CURTC 表示固结不排水侧向卸荷试验。试验前采用应力比 $k=\sigma_3/\sigma_1=1.0$ 的等向固结方式对试样进行预压固结。表中: σ_1 为轴向应力; σ_3 为侧向应力; $\Delta\sigma_1$ 为轴向应力增量; $\Delta\sigma_3$ 为侧向应力增量; $\dot{\epsilon}_1$ 为轴向应变速率; $\dot{\sigma}_3$ 为侧向应变速率。

表 2 三轴剪切试验方案

Table 2 Triaxial shear test plan

试验编号	围压/kPa	应力路径	控制方式	排水条件	剪切速率
CDCTC100	100	$\Delta\sigma_3=0$ $\Delta\sigma_1>0$	应变控制	排水	$\dot{\epsilon}_1=0.010$ mm/min
CDCTC200	200				
CDCTC300	300			不排水	$\dot{\epsilon}_1=0.025$ mm/min
CUCTC100	100				
CUCTC200	200	$\Delta\sigma_3<0$ $\Delta\sigma_1=0$	应力控制	排水	$\dot{\sigma}_3=0.033$ kPa/min
CDRTC100	100				
CDRTC200	200			不排水	$\dot{\sigma}_3=0.200$ kPa/min
CDRTC300	300				
CURTC100	100				
CURTC200	200				
CURTC300	300				

1.2.2 淤泥质土力学特性分析

通过不同应力路径三轴试验, 可得珠三角地区典型淤泥质土轴向偏应力($\sigma_1-\sigma_3$)-轴向应变 ϵ_1 的关系曲线如图 1 所示。为了对比分析加载方式对试样力学性态的影响, 由试验结果可得各种试验条件下的应力路径如图 2 所示。

由图 1 可知, 不同应力路径和排水条件下, 偏应力($\sigma_1-\sigma_3$)-轴向应变 ϵ_1 关系曲线变化规律基本相似, 即随着固结压力增大, 偏应力峰值($\sigma_1-\sigma_3$)_f 同步增长, 但在 CDCTC 试验中, 当围压较低

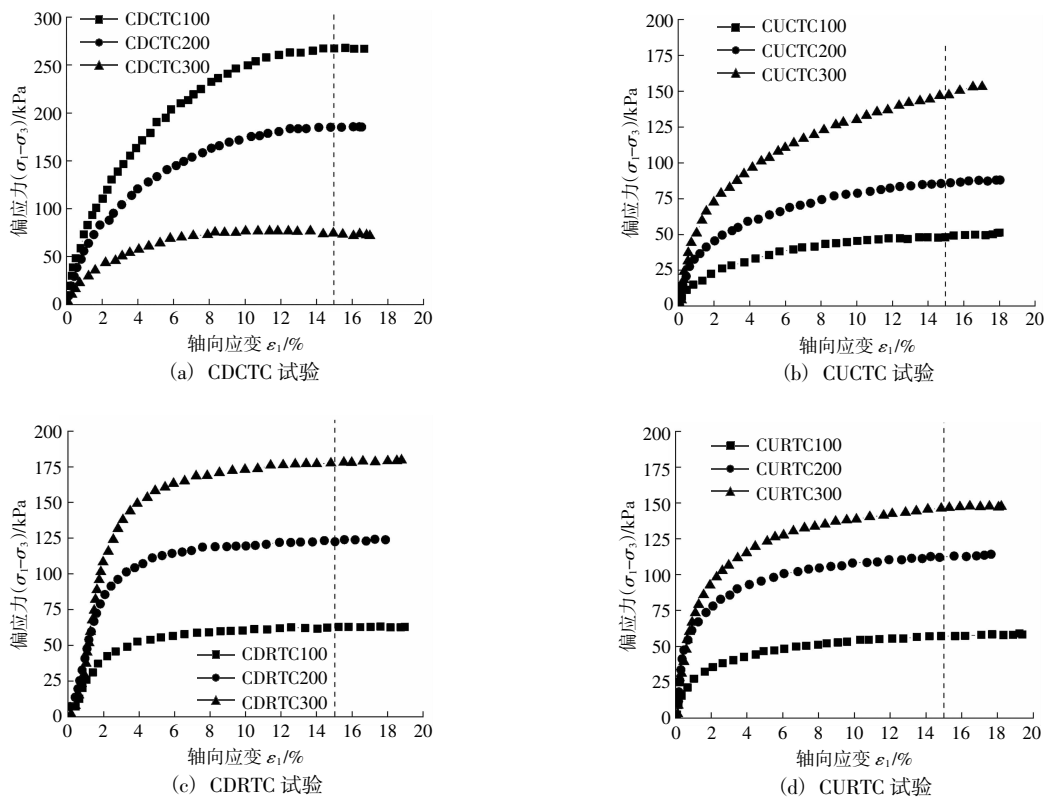


图1 不同固结压力下三轴剪切试验轴向应变-偏应力关系曲线

Fig. 1 Axial strain-deviatoric curves of triaxial shear test under different consolidation pressures

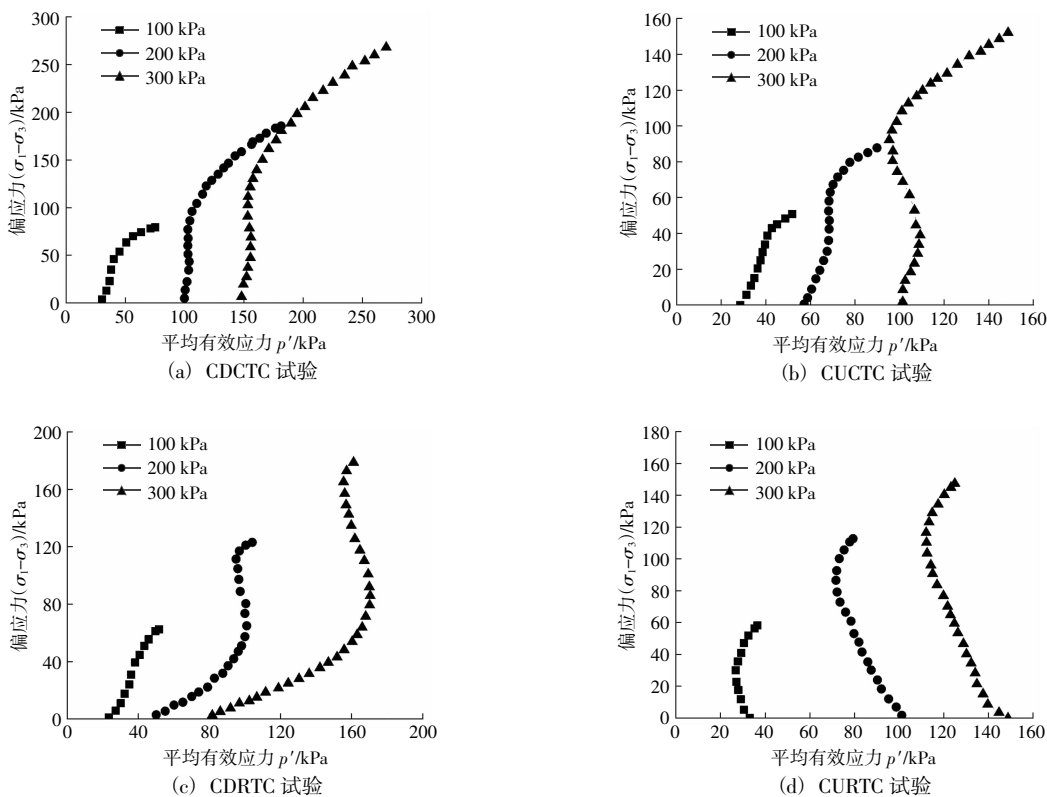


图2 不同试验条件下有效应力路径曲线

Fig. 2 Effective stress path under different test conditions

时, 土样表现出轻度应变软化特性, 当轴向应变达到峰值之后, 土样强度呈现下降趋势。

由图 2 可知, 4 种不同试验条件下的有效应力路径均呈现为相似的 s 形。其原因可能与三轴试验加载初始阶段, 孔隙水压力增长相对滞后, 试样内平均有效应力 p' 略有增加有关。但侧向卸载试验与常规三轴压缩试验的有效应力路径表现出不同的变化规律, 其原因在于常规三轴压缩试验中, 超静孔隙水压力通常表现为正孔压, 侧向卸载三轴试验中, 超静孔隙水压力主要表现为负孔压, 表明试样在试验过程中分别产生了剪缩与剪胀现象。对于固结排水侧向卸载试验(CDRTC),

试验初期负孔压增加速度大于围压减小速度, 平均有效应力增大。试验后期随着负孔压的逐渐消散, 平均有效应力总体减小。而固结不排水侧向卸载试验(CURTC)则相反, 试验初期侧向压力卸载速度大于负孔压增加速度, 平均有效应力逐渐减小。由此可见, 三轴试验加卸载方式对土样力学性态具有重要影响。

2 淤泥质土硬化土本构模型参数分析

2.1 本构模型参数确定方法

图 3 为不同试验条件下轴向应力-应力关系曲线, 图 4 为不同试验条件下三轴加载-卸载应力-应变关系曲线。

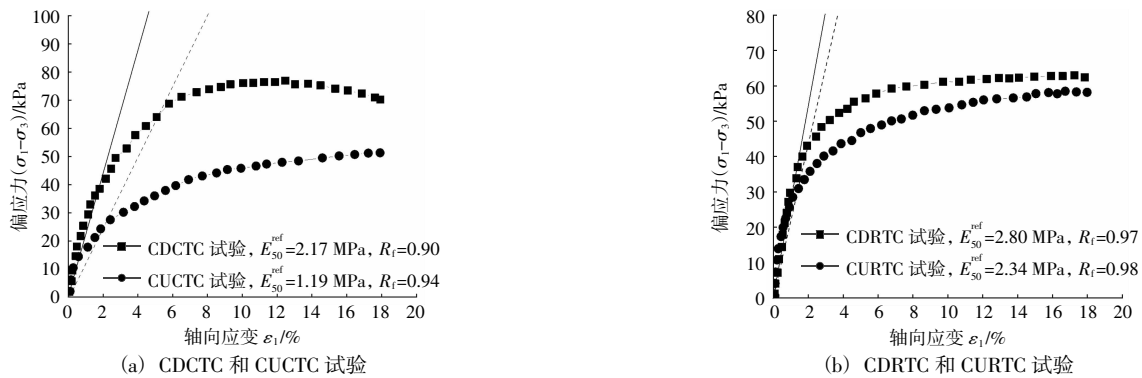


图 3 不同试验条件下轴向应力-应力关系曲线

Fig. 3 Axial stress-strain curves of triaxial shear test under different test conditions

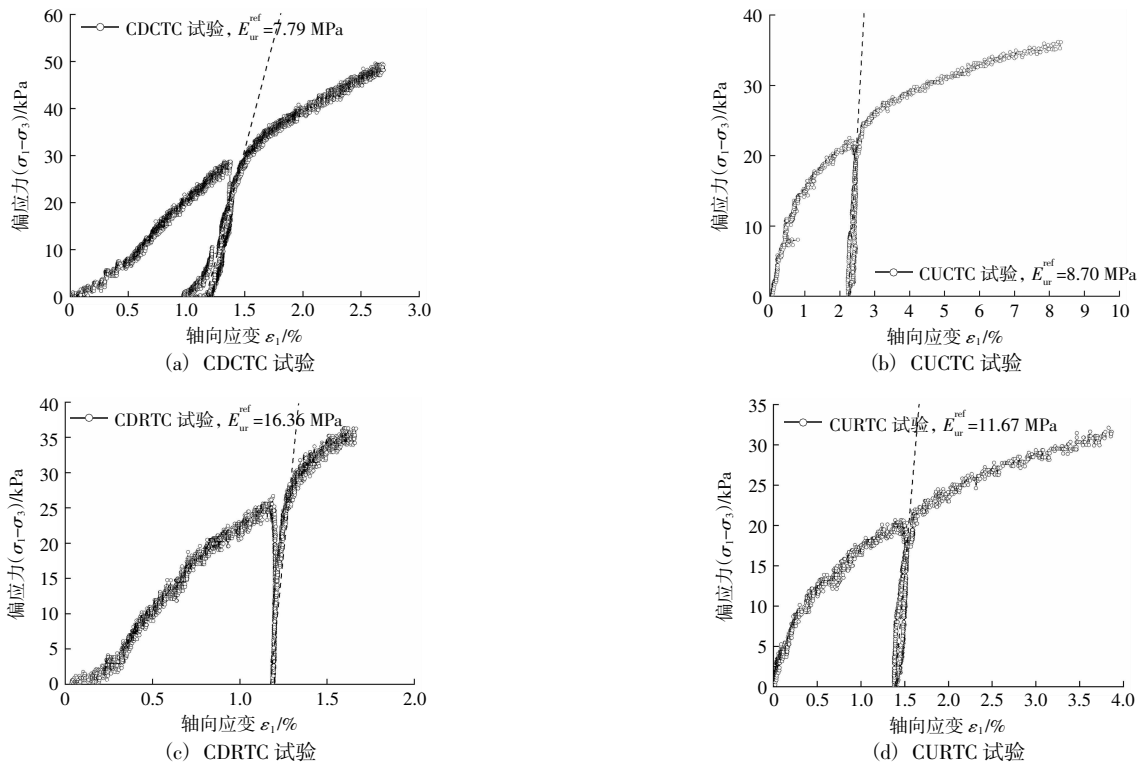


图 4 不同试验条件下三轴加载-卸载应力-应变关系曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of triaxial loading-unloading test under different test conditions

根据硬化土本构模型参数确定方法,利用如图3所示不同应力路径三轴试验偏应力 $(\sigma_1-\sigma_3)$ -轴向应变 ε_1 关系曲线,连接原点和偏应力为 $0.5\times(\sigma_1-\sigma_3)_f$ 的点所对应的直线斜率即为该试验条件下土样的割线刚度模量 E_{50}^{ref} ,由此可得珠三角地区典型淤泥质土在CDCTC、CUCTC、CDRTC以及CURTC试验条件下的割线刚度模量 E_{50}^{ref} 分别为2.17 MPa、1.19 MPa、2.80 MPa和2.34 MPa。利用不同围压三轴试验土样割线刚度模量 E_{50}^{ref} ,可获得淤泥质土在CDCTC、CUCTC、CDRTC以及CURTC试验条件下幂指数 m 的值分别为0.65、1.43、0.81和1.84。同样,利用不同应力路径条件下偏应力 $(\sigma_1-\sigma_3)$ -轴向应变 ε_1 关系曲线,可得CDCTC、CUCTC、CDRTC以及CURTC不同应力路径条件下珠三角地区典型淤泥质土的破坏比 R_f 分别为0.90、0.94、0.97和0.98。

同理,利用如图4所示不同加载路径和排水条件下的三轴加载—卸载—再加载试验偏应力 $(\sigma_1-\sigma_3)$ -应变 ε_1 关系曲线,可得珠三角地区典型淤泥质土在CDCTC、CUCTC、CDRTC及CURTC试验条件下的 E_{ur}^{ref} 值分别为7.79 MPa、8.70 MPa、16.36 MPa和11.67 MPa。与三轴压缩试验参考割线模量 E_{50}^{ref} 规律不同,不同排水及加载条件下,卸载—再加载参考割线模量 E_{ur}^{ref} 的大小满足关系:CDRTC>CURTC>CUCTC>CDCTC。

2.2 不同应力路径条件下模型参数分析

由室内标准固结试验、不同应力路径三轴试验可得珠三角地区淤泥质土硬化土本构模型参数如表3所示。

表3 不同应力路径下淤泥质土硬化土模型参数
Table 3 Parameters of hardening soil model for silty soil under different stress paths

试验类型	c'/kPa	$\varphi'/(^{\circ})$	m	R_f	$E_{\text{ref}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{ur}^{\text{ref}}/\text{MPa}$
CDCTC	9.38	15	0.65	0.90	1.59	2.17	7.79
CUCTC	5.31	10	1.43	0.94	1.59	1.19	8.70
CDRTC	7.46	12	0.81	0.97	1.59	2.80	16.36
CURTC	6.04	11	1.84	0.98	1.59	2.34	11.67

由表3可知,试验加载方式及排水条件对淤泥质土硬化土本构模型参数中的强度指标 c' 、 φ' 值以及刚度参数 E_{50}^{ref} 、 E_{ur}^{ref} 和 m 的影响较大。而对破坏比 R_f 的影响则相对较小。CDCTC试验指标

E_{50}^{ref} 约为 $E_{\text{ref}}^{\text{ref}}$ 的1.36倍、 E_{ur}^{ref} 约为 $E_{\text{ref}}^{\text{ref}}$ 的4.90倍;CUCTC试验指标 E_{50}^{ref} 值约为CDCTC试验值的0.55倍, E_{ur}^{ref} 值约为CDCTC试验指标的1.11倍;而其刚度应力水平相关幂指数 m 值约为CDCTC试验值的2.2倍。CDRTC试验强度指标 c' 、 φ' 值均较CDCTC试验小,但CDRTC试验其它模型参数均比CDCTC试验值大,其中: E_{50}^{ref} 值约为CDCTC试验值的1.29倍, E_{ur}^{ref} 值约为CDCTC试验值的2.10倍, m 值约为CDCTC试验值的1.25倍。由此可见,硬化土本构模型参数与加载路径以及排水条件密切相关,岩土工程数值分析中,应根据工程实际情况确定合理的加载应力路径与试验方案。

3 工程实例分析

3.1 工程概况

珠三角地区某深基坑工程周长879 m,基坑开挖深度为7.5 m,基坑开挖范围内土体以淤泥质土为主。本基坑拟采用灌注桩+内支撑方案。基坑北侧为待建道路和居民楼,居民楼距离基坑边线约12.37 m,居民楼为天然基础;西侧为规划城际轨道交通线路安全保护预控区,距离地下室边线约26.50 m;南侧为夏平路,距离地下室边线约20.10 m;东侧河涌距离地下室边线约47.90 m;东北角为居民楼,距离基坑支护边线约3.66 m。基坑四周地下管线分布较为复杂,基坑北侧为给水管,距离支护边线约11.43 m;基坑南侧为燃气管,距离支护边线约12.38 m。

3.2 数值计算模型

采用Midas GTS大型有限元分析软件对该基坑力学特性进行分析。因基坑东北角周边环境条件复杂,且采用了双排桩+内支撑以及单排桩+内支撑2种不同类型支护结构形式。双排桩支护段前、后排桩均采用 $\phi 1\ 200\text{ mm}@1\ 400\text{ mm}$ 的混凝土旋挖灌注桩,设计桩长27.8 m,前后排桩顶设厚度为1 000 mm混凝土板,单排桩支护段采用 $\phi 800\text{ mm}@1\ 100\text{ mm}$ 的混凝土旋挖灌注桩,设计桩长26.0 m,混凝土冠梁截面面积为1 000 mm \times 800 mm,内支撑采用截面面积为800 mm \times 800 mm的混凝土支撑,内支撑水平间距为7.0 m。土体、基坑支护双排桩及单排灌注桩均采用实体单元进行模拟,人工填土、中粗砂、强风化与中化岩采用Mohr-columb模型。为了验证硬化土本构模型的模拟效果,淤泥质土则采用硬化土本构模型进行模拟,考虑到基坑开挖过程支护桩侧向土体受

荷条件接近于固结不排水侧向卸荷, 故采用表 3 所示的 CURTC 试验指标。灌注桩则采用线弹性模型进行模拟。混凝土支撑、格构柱以及桩基视为线弹性材料, 采用梁单元进行模拟。各土层物理力学指标及本构模型参数如表 4 所示。根据工程经验, 模型计算范围取为基坑开挖深度 2~3 倍, 基坑三维有限元分析模型尺寸为 80 m×71 m×50 m, 如图 5 所示。

表 4 土层主要物理力学指标及本构模型参数
Table 4 Main physical and mechanical indicators and constitutive model parameters of soil layers

土层名称	土层厚度/ m	重度/ (kN·m ⁻³)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	泊松比	压缩模量 E_s / MPa	切线模量 $E_{\text{tcd}}^{\text{ref}}$ / MPa	割线模量 E_{50}^{ref} / MPa	加载模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ / MPa
人工填土	1.50	19.0	10.00	10.0	0.30	4.22	—	—	—
淤泥质土	8.10	16.6	6.04	11.0	0.42	1.99	1.59	2.34	11.67
中粗砂	3.10	21.0	0.00	30.0	0.28	10.00	—	—	—
强风化岩	5.30	20.5	30.00	30.0	0.23	6.52	—	—	—
中风化岩	10.00	22.0	150.00	35.0	0.20	100.00	—	—	—

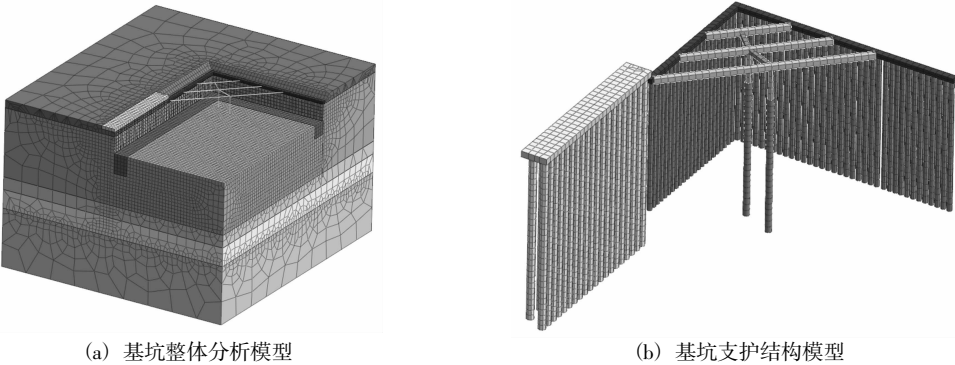


图 5 基坑三维有限元分析模型
Fig. 5 3D finite element analysis model of foundation pit

3.3 模拟结果及验证

为了验证基于硬化土本构模型的深基坑工程施工开挖力学性态数值模拟分析结果的正确性, 选取了单排桩与双排桩支护代表性剖面基坑深部位移的数值模拟结果与现场测试成果进行对比分析。支护桩水平位移对比图见图 6。

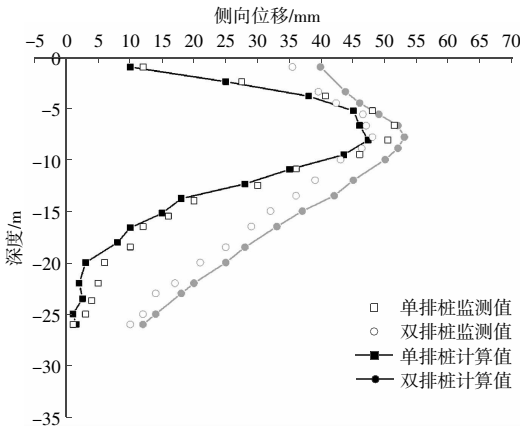


图 6 支护桩水平位移对比图
Fig. 6 Comparison of horizontal displacements of supporting piles

由图 6 可知, 当基坑开挖到坑底时, 2 种支

护结构深部位移数值模拟与监测数据变化规律基本一致, 当基坑开挖至坑底时, 单排桩支护剖面最大深层水平位移监测值为 51.4 mm, 数值模拟值为 47.3 mm, 误差为 8.6%, 最大位移发生在坑底以下 1~2 m 左右的位置。当基坑开挖至坑底时, 实际监测双排支护桩水平最大位移为 48.0 mm, 而数值模拟的结果为 53.6 mm, 误差为 11.7%。表明采用硬化土本构模型时, 基坑支护结构深部位移监测值与计算结果吻合度较高, 说明硬化土本构模型能较好地模拟珠三角地区典型软土地层的力学性态。

4 结语

1) 珠三角地区典型淤泥质土硬化土本构模型参数与三轴试验加载-卸载应力路径以及排水条件密切相关, 不同应力路径下, 硬化土本构模型参数存在显著差异。因此, 实际工程中应根据淤泥质土实际受荷与排水条件, 确定相应的模型参数试验方案。

2) 试验加载方式及排水条件对硬化土本构模型参数中的强度指标 c' 、 φ' 值以及刚度参数 E_{50}^{ref} 、

E_{ur}^{ref} 和 m 的影响较大, 但对破坏比 R_f 的影响相对较小。采用固结不排水侧向卸荷(CURTC)试验指标可较精确地模拟深基坑工程开挖力学性态。

参考文献:

- [1] SCHANZ T, VERMEER P A, BONNIER P G. The hardening soil model: Formulation and verification[C]//Proceedings of the international symposium. Amsterdam, 1999: 281–296.
- [2] SURARAK C, LIKITLERUANG S, WANATOWSKI D, et al. Stiffness and strength parameters for hardening soil model of soft and stiff Bangkok clays[J]. Soils and Foundations, 2012, 52(4): 682–697.
- [3] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2283–2290.
WANG Wei-dong, WANG Hao-ran, XU Zhong-hua. Experimental study of parameters of hardening soil model for numerical analysis of excavations of foundation pits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2283–2290.
- [4] 杨兰强, 周立波, 夏雯, 等. 宁波软土地区基坑数值计算中 HS 模型参数试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(6): 954–962.
YANG Lan-qiang, ZHOU Li-bo, XIA Wen, et al. Experimental study of parameters of HS model for numerical analysis of foundation pits in Ningbo soft soil area[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(6): 954–962.
- [5] 刘伟煌, 朱怀龙, 贺斯进, 等. 土体硬化模型参数试验研究及其在南昌地区基坑工程的应用[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(6): 38–47.
LIU Wei-huang, ZHU Huai-long, HE Si-jin, et al. Experimental study on parameters of hardening soil model for soils and its application in foundation pit engineering in Nanchang[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(6): 38–47.
- [6] 王祥秋, 杨柱, 郑土永. 珠三角典型软土硬化土模型及其工程应用研究[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2022, 36(1): 19–26, 32.
WANG Xiang-qiu, YANG Zhu, ZHENG Tu-yong. Study on the hardening soil model of typical soft soil in the Pearl River Delta and its engineering application[J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 36(1): 19–26, 32.
- [7] 朱旻, 陈湘生, 张国涛, 等. 花岗岩残积土硬化土模型参数反演及工程应用[J]. 岩土力学, 2022, 43(4): 1061–1072.
ZHU Min, CHEN Xiang-sheng, ZHANG Guo-tao, et al. Parameter back-analysis of hardening soil model for granite residual soil and its engineering applications[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(4): 1061–1072.
- [8] 顾晓强, 吴瑞拓, 梁发云, 等. 上海土体小应变硬化模型整套参数取值方法及工程验证[J]. 岩土力学, 2021, 42(3): 833–845.
GU Xiao-qiang, WU Rui-tuo, LIANG Fa-yun, et al. On HSS model parameters for Shanghai soils with engineering verification[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(3): 833–845.
- [9] 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.
BAI Shi-yu, WANG Wen-jun, XIE Xin-yu, et al. Experimental study on HS-small model parameters of soil considering disturbance and its application in foundation pit engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(1): 206–216.
- [10] 李栋, 吴宏生, 李学, 等. 珠海软土 HSS 模型参数试验研究[J]. 中山大学学报(自然科学版)(中英文), 2023, 62(2): 137–145.
LI Dong, WU Hong-sheng, LI Xue, et al. Experimental study on parameters of HSS model for soft soil in Zhuhai[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2023, 62(2): 137–145.

小贴士

计量单位——SI 基本单位

国际单位制是我国法定计量单位的基础, 一切属于国际单位制的单位都是我国的法定计量单位。在科技论文写作内容涉及到量的时候, 都应使用国际单位制(SI)。国际单位制(SI)包括 SI 单位(SI 基本单位和 SI 导出单位)和 SI 单位的倍数单位。

国际单位制以表 1 中的 7 个基本单位为基础。

表 1 SI 基本单位

量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m
质量	千克	kg
时间	秒	s
电流	安	A
热力学温度	开	K
物质的量	摩	mol
发光强度	坎	cd