

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211229002

基于离散元法的温度静力触探贯入与传热研究*

莫品强^{1,2,3}, 胡裕琛^{1,2}, 王宽君⁴, 王洪国⁵

(1. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学力学与土木工程
学院, 江苏 徐州 221116; 3. 深圳市城市公共安全技术研究院, 广东 深圳 518034; 4. 中国电建集团华东勘测设计
研究院有限公司, 浙江 杭州 310014; 5. 山东高速建设管理集团有限公司, 山东 济南 250098)

摘要: 温度静力触探是一种新型原位测试方法, 可同时获取土体的力学和热学参数, 为浅层地温能资源勘查提供技术保障。为研究温度静力触探的贯入与传热机理, 通过离散元数值模拟实现了离散元模型的建立和试样的力学和热学参数标定。研究分析了贯入过程中的贯入阻力变化、土体应力场、位移场及位移路径; 获得了加热-散热过程中探头加热段与隔热段的温度响应规律以及土体温度场演化, 并与室内模型试验进行了对比分析。采集的温度变化曲线通过数据解译反演得到了土体的导热系数, 为温度静力触探的贯入-传热机理研究及工程应用奠定了理论依据。研究表明: 贯入过程中, 贯入阻力随深度的增加而增加, 且土体颗粒位移范围在距锥身 $B/2$ 内; 传热过程中, 探头加热60 s, 加热段实现了 $5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的升温; 在加热和散热的初期, 探头的温度变化最快, 与实验结果相同; 利用探头散热温度所反演导热系数为 $0.330\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 误差为 6.5% , 优于加热数据反演结果。

关键词: 温度静力触探; 离散元法; 贯入机理; 导热系数

中图分类号: O241 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)05-0913-09

Penetration and Heat Transfer of T-CPT based on DEM Simulation

MO Pinqiang^{1,2,3}, HU Yuchen^{1,2}, WANG Kuanjun⁴, WANG Hongguo⁵

(1. State Key Laboratory for GeoMechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. R & D Center, Shenzhen Urban Public Safety and Technology Institute, Shenzhen 518034, China; 4. Power China Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310014, China; 5. Shandong Hi-Speed Group Co., Ltd., Jinan 250098, China)

Abstract: Thermal cone penetration test (T-CPT) is a new type of in-situ testing method, for obtaining both mechanical and thermal properties of soil layers, providing technical support for shallow geothermal resources exploration. To study the penetration and heat transfer mechanism of T-CPT, the numerical simulation is conducted in this study by establishing a model based on the discrete element method (DEM), followed by calibration of mechanical and thermal parameters of the soil sample. Penetration resistance, soil distributions of stresses and displacement are analyzed during the penetration process. The thermal responses of heating and insulation sections are obtained in the following

* 收稿日期: 2021-12-29; 修回日期: 2022-03-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51908546, 52178374, 52108356)、中国博士后科学基金项目(2020T130699)、浙江省自然科学基金(LQ20E090001)资助

作者简介: 莫品强(1988—), 男, 副研究员, 博士。主要从事土力学与岩土工程方面的研究。

E-mail: pinqiang.mo@cumt.edu.cn

heating and cooling processes, as well as the evolution of the temperature field in the surrounding soil. Furthermore, the numerical results are compared with the laboratory model test. The measured temperature curves are then used to interpret soil thermal conductivity. It provides a theoretical basis for insights into the mechanisms of penetration and heat transfer of T-CPT and its implications in geotechnical engineering. The results show that the penetration resistance increases with the increase of depth in the process of the penetration, and the soil particle displacement range is within $B/2$ of the cone. During the heat transfer process, the probe is heated for 60 seconds, and the heating section achieves a heating of $5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. In the early stages of heating and dissipation, the temperature of the probe changes the fastest, which is the same as in the experimental results. The thermal conductivity of the inversion using the heat dissipation temperature of the probe is $0.330\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, and the error is 6.5% , which is better than the heating data inversion result.

Keywords: thermal-cone penetration test; discrete element method; penetration mechanisms; thermal conductivity

引言

为实现“碳达峰、碳中和”宏伟目标,践行“十四五”能源高质量发展要求,我国已大力开展能源转型与清洁能源利用,确保节能减排与绿色低碳技术大规模稳定应用。浅层地温能作为一种近乎可无限开发利用的可再生清洁能源,是推动能源清洁化、实现绿色建筑的重要保障。能源桩技术结合了地下热交换管与桩基础的优势,不仅有效地利用了浅层地温能,更解决了城市地下空间不足、建设成本过高等几大问题^[1]。然而,现有的浅层地温能资源勘查精度低,缺乏系统的勘查技术体系,勘查评价滞后造成地热能市场供需矛盾日益突出^[2]。如何准确地获得待测土层的热物性参数,为地热能开发提供技术指导,仍然是开发浅层地温能所面临的主要难题。

目前,原位热测试广为流行使用的是热响应测试,但热响应技术仍存在耗时长、测试精度受时间限制、操作费时费力等问题^[3]。因此近年来,利用温度静力触探试验(Thermal Cone Penetration Test, T-CPT)获取土壤热物性参数这一方法的可能性被广泛研究。G.Akrouch等^[4]根据温度扩散和孔隙水压力消散的相似性,提出了利用温度静力触探求解土体热传导系数的计算方法。P.J.Vardon等^[5]分别采用物理法和经验法推导了热传导系数的显式表达,并结合修正系数应用于原位测试的数据解译。2017年以来,东南大学刘松玉教授、蔡国军教授团队针对温度静力触探做了大量基础研究和技

术;提出了加热型温度静力触探探头构造和相应测试步骤与热传导系数计算方法,并利用有限元软件对测试过程进行了模拟验证^[6-7]。莫品强等^[8]建立了考虑贯入扰动和热力耦合的T-CPT数值计算模型,引入机器学习分析方法,并提出了一种新的温度静力触探的数据解译方法。温度静力触探技术测试土体导热系数的有效性已被验证,且其探头克服了室内和原位测试的一些缺点,具有测试准确、耗时短等优点。然而,瞬时线热源理论忽略了静力触探的贯入扰动,且难以考虑复杂边界条件,温度静力触探的机理、贯入-传热耦合分析值得进一步研究,为新型原位测试技术奠定理论基础。因此,本研究将利用离散元法对T-CPT试验全过程进行模拟,分析贯入和传热过程中探头与土体间相互作用及热-力响应规律,探究T-CPT的贯入与传热机理,从而完善测量土体导热系数的方法,为浅层地温能资源勘查提供技术保障。

1 T-CPT模型的建立

1.1 试样模型

本研究采用MatDEM^{3D}离散元软件^[9]对T-CPT试验进行数值模拟。鉴于变粒径模型和 90° 扇形模型的有效性已被验证,在本模拟中采用内-中-外三层变粒径的 90° 扇形模型,以减少计算量并改善模拟效果^[10-11],如图1(a)所示。试样的内、中、外三层厚度比值约为 $5:2:3$,颗粒总数为 $55\ 052$ 。其中,内层颗粒级配如图1(b)所示,类似于Ottawa20-30砂,最

大粒径为 1 mm,最小粒径为 0.5 mm,平均粒径为 0.725 mm,不均匀系数 $C_u=1.13$,曲率系数 $C_c=1.01$;中间层和外层颗粒粒径分别为内层颗粒粒径的 1.5 和 2.25 倍。本模型采用重力堆积和上压力板压实的方法,生成上覆荷载为 200 kPa、初始孔隙比 $e_0=0.611$ 的土体试样。当 $\alpha_f \leq 0.01$ 、 $\beta_f \leq 0.001$ 时认为土样完成固结,其中 α_f 、 β_f 分别代表有效应力比和不平衡力比,表达式如下^[12]:

$$\alpha_f = \frac{|P - P_0|}{P_0} \quad (1)$$

$$\beta_f = \frac{\sum_{B_j \in V} |\sum_{c \in B_j} f_j^c + f_j^b|}{2 \sum_{c \in V} |f^c|} \quad (2)$$

式中, P 和 P_0 分别代表上压力板施加应力和目标上覆荷载; f_j^c 和 f_j^b 分别代表第 j 颗粒子的总接触力和体力; f^c 代表接触点 c 的接触力。

粒间接触采用线弹性接触模型,颗粒密度为 2 650 kg/m³。由于石英颗粒间的摩擦系数在 0.249 和 0.372 之间变化^[13],因此本模拟中试样颗粒间摩擦系数设为 0.3,压力板摩擦系数设为 0。颗粒的法向接触刚度和切向接触刚度均设为 3×10^5 Pa,以满足 $k_n/r_0 = k_s/r_0 = 1$ GPa(r_0 是颗粒的平均半径)的关系,且能得到与 Hertz-Mindlin 模型相似的结果^[12]。

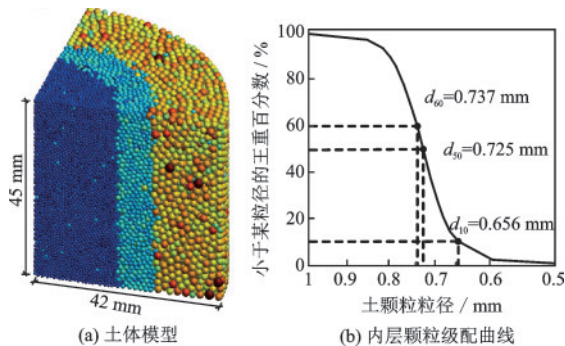


图1 土体模型及中心区域颗粒级配

Fig.1 Soil model and grain size distribution of the central region

1.2 温度静力触探模型

温度静力触探模型如图 2 所示,探头侧壁摩擦筒与加热段重合,长度为 5 mm,隔热段中心距加热段中心 2.5 mm。为了得到稳定且无偏差的锥尖贯入阻力,离散元模拟中探头锥尖与土颗粒的接触数不少于 13 个^[14],同时考虑到计算量不宜过大,圆锥直

径 B 与内层颗粒平均粒径 d_{50} 比值 B/d_{50} 约为 8.3。考虑到探头对土体的应力应变响应主要集中在 4B 范围以内^[10],为较小刚性边界对土体沿径向位移的约束,同时为了降低计算成本,本模拟中试样直径与圆锥直径的比值 D/B 为 14,具体尺寸见表 1。

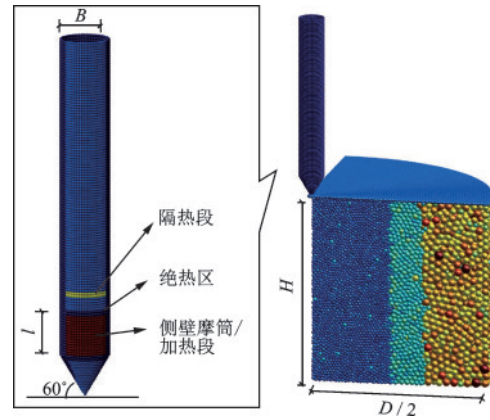


图2 温度静力触探 DEM 模型

Fig.2 DEM model of T-CPT

表 1 温度静力触探试验 DEM 模型几何参数

Table 1 Geometric parameters for DEM model of T-CPT

基本参数	大小
试样直径 D /mm	84
圆锥直径 B /mm	6
试样高度 H /mm	45
侧壁摩擦筒/加热段长度 l /mm	5
锥尖角度/ $^\circ$	60

2 试样热力学特性标定及 T-CPT 试验过程

2.1 试样力学特性标定

本模拟中采用固结不排水三轴试验来研究土体模型的力学特性。如图 3(a)所示,三轴试验采用由 5 809 个颗粒组成的 $13 \text{ mm} \times 13 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$ 立方体试样,初始孔隙比 $e_0=0.904$,颗粒材料微观参数与 T-CPT 试样相同,级配曲线与 T-CPT 试样内层颗粒一致。在固结制样时,分别设置 $\mu_p=0, 0.05, 0.1$ 三种不同的颗粒间摩擦系数,并在不同摩擦系数下分别进行围压为 100、500、1 000、1 500、2 000、3 000 kPa 的无重力作用各向同性压缩,以获得不同密实度的多组试样,固结方案及结果如图 3(b)所示。

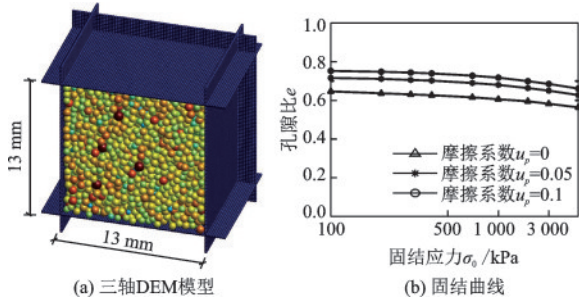


图3 三轴试验DEM模型及固结结果

Fig.3 DEM model of triaxial test and results of consolidation

考虑到计算量和模拟精度的要求,本文认为当 $\beta_f \leq 0.002$ 、 $\gamma_f \leq 0.04$ 、 $\delta_f \leq 0.04$ 时固结完成;其中, γ_f 、 δ_f 分别代表平均应力比、偏应力比,表达式如下^[15]:

$$\gamma_f = \frac{|p' - \sigma_0|}{\sigma_0} \quad (3)$$

$$\delta_f = \frac{q}{p'} \quad (4)$$

$$\sigma' = \frac{1}{V} \sum_{c \in V} f^c \otimes l^c \quad (5)$$

$$p' = \frac{1}{3} \text{tr} \sigma' \quad (6)$$

$$q = \sqrt{\frac{(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_1 - \sigma'_3)^2}{2}} \quad (7)$$

式中, p' 和 q 分别代表平均有效应力和偏应力; σ_0 为固结应力; σ' 为体积平均接触力定义的有效应力张量; V 是试样体积; f^c 是接触点 c 的接触力; l^c 是接触点 c 处连接两个接触粒子中心的分支向量; σ'_1 、 σ'_2 、 σ'_3 分别为有效大主应力、有效中主应力、有效小主应力。

为研究试样初始固结应力对其力学特性的影响,本模拟在相同初始孔隙比 $e_0 = 0.650$ 条件下,对 100、2 000、3 500 kPa 三种不同固结应力试样进行了 TE-1、TE-2、TE-3 三组不排水三轴剪切试验,以验证离散元模型及材料参数的合理性。剪切阶段,通过控制上下压力板以 0.08%/s 的应变速率相向移动,保证剪切过程为准静态过程。通过控制四周压力板的移动,保证剪切过程中体积恒定,以实现不排水剪切试验。本模拟中试样的变形可用轴向应变 ϵ_1 来量化,其表达式如下:

$$\epsilon_1 = \ln \left(\frac{H_0}{H} \right) \quad (8)$$

式中, H_0 、 H 分别代表试样初始高度和当前高度。

应力路径模拟结果如图 4(a) 所示,在剪切过程中,较大围压的 TE-3,平均应力经历了减小后再增加的过程,也就是说试样在剪切开始时发生剪缩,随后发生剪胀;在剪切的最终阶段,各组试验的偏应力均趋于同一个值;在 $q-p'$ 平面内得到试样的峰值强度线,换算得到试样内摩擦角约为 21.5° 。图 4(b) 展示的是应力比 $\eta = q/p'$ 与大主应变的关系,从图中可以看出,试样的围压越低,偏应力比的峰值越高,且峰值对应的应变越小;围压越大,峰后软化越弱,颗粒材料剪胀效应被抑制得越明显;剪切完成后,不同固结围压的三组试验的应力比趋于一个一致的稳定值,符合颗粒材料剪切后的临界状态。

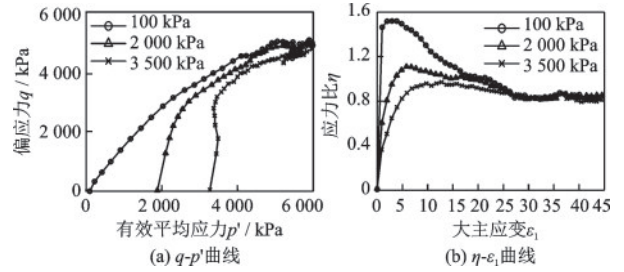


图4 三轴剪切试验的模拟结果

Fig.4 Results of triaxial shear tests

2.2 试样热学特性验证

为了研究 T-CPT 的传热规律,需要对试样的热学特性进行数值标定。将连续介质中的传热理论应用于单个颗粒上,热传导中的变量涉及温度与热流量^[16]。单位时间内高温物体传给低温物体的热量 Q 与热流截面积 A 、热源间距 L 及两热源的温度差 ΔT 成正比,即:

$$Q = -kAL\Delta T \quad (9)$$

式中, Q 的单位为 W,方向垂直于接触面; k 为材料的传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。

在颗粒间做如下基本假设:热材料以热源和热管构成一个网络。热流通过连结热管的热源传导,热管有效性与接触有关,在每次接触过程中若两颗粒有重叠则认为连结两颗粒间的热管有效。如图 5 所示,假设单元 E_1 和 E_2 的形心为热源,颗粒温度分别为 T_1 和 T_2 ,则接触面面积为热流流经的截面 A ,单元形心间的距离 L 为导热路径, n_i 为接触面的指向低温物体的法线方向。

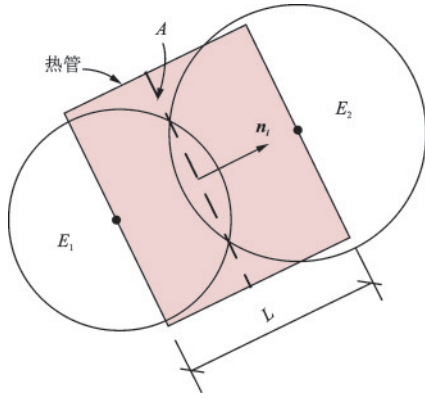


图5 两颗粒传热示意

Fig.5 Schematic of two-particle heat transfer

若定义颗粒单位热阻为 T_c , 两颗粒间所形成热管的等效单位热阻 $T_{c,eff}$ 和总热阻 R_c 分别为:

$$T_{c,eff} = \frac{2T_{c,1}T_{c,2}}{T_{c,1} + T_{c,2}} \quad (10)$$

$$R_c = \frac{T_{c,eff} \cdot L}{A} \quad (11)$$

式中, $T_{c,1}$ 、 $T_{c,2}$ 和 $T_{c,eff}$ 分别为单元 E_1 、 E_2 的单位热阻和等效单位热阻, $K \cdot m^2/W$; R_c 为热管总热阻, 单位为 $K \cdot m/W$; L 为颗粒球心之间的距离。

温度差与热阻间的关系可以表达为:

$$\Delta T \cdot n_i = R_c \cdot L \cdot q_i \quad (12)$$

式中, ΔT 为颗粒之间的温度差值; n_i 为温度传递的法向, 为单位向量; q_i 为热流密度向量。

根据傅里叶导热定律, 单位时间内通过给定截面的导热热量, 正比于垂直该方向上的温度变化率和截面面积, 方向相反, 比例系数为导热系数 λ , 则导热系数可表达为:

$$\lambda = - \frac{q_i}{\text{grad } T} \quad (13)$$

式中, $\text{grad } T$ 为温度梯度, 单位为 K/m 。

当颗粒的温度发生变化时, 相应的颗粒半径也会改变, 如下式所示:

$$\Delta R = \alpha R \Delta T_{ball} \quad (14)$$

式中, α 为线性膨胀系数; ΔR 为颗粒半径的膨胀值; ΔT_{ball} 为颗粒温度的变化值; R 为颗粒半径。

温度升高引起了颗粒的膨胀, 颗粒半径的变化导致颗粒间力和位移的改变, 以此实现热力耦合模型的建立^[17]。

在上述传热模型基础上, 采用稳态法对颗粒材料宏观导热系数 λ 均进行标定, 建立 DEM 标定模型。标定模型的样本单元数为 10 048, 颗粒级配、颗粒间接触模型与三轴试验模型试样相同。先采用

重力堆积方式将颗粒进行自然堆积, 随后给下压力板施加位移进行准静态压实, 获得 5 组不同孔隙比试样。进一步地, 对 5 组试样分别设置 10 组不同热阻 T_c , 进行共计 50 次导热系数 λ 的标定模拟。

如图 6(a) 所示, 通过控制上、下压力板温度, 实现温度梯度 $\text{grad } T$ 为 $100 K/m$ 。为保证模型达到稳态, 热传递模拟总时长为 $6 \times 10^6 s$ 。此时, 上、下压力板输出、输入热量均收敛于同一个值, 且该值与上、下压力板面积的比值即为热流密度 q_i ; 标定模型温度场如图 6(b) 所示。随后, 根据式 (13) 计算可得该试样的导热系数 λ 。试样导热系数的标定结果如图 7 所示, 该图可用于快速选取试样的微观热学参数。

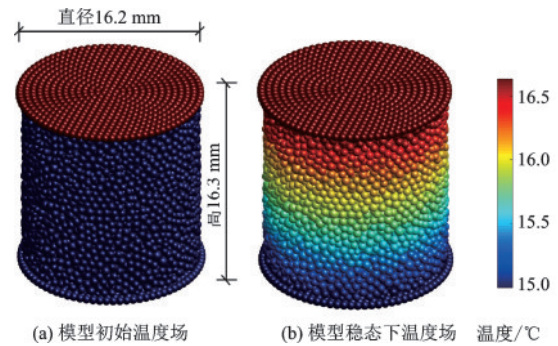


图6 标定模型温度场

Fig.6 Temperature field of the calibration model

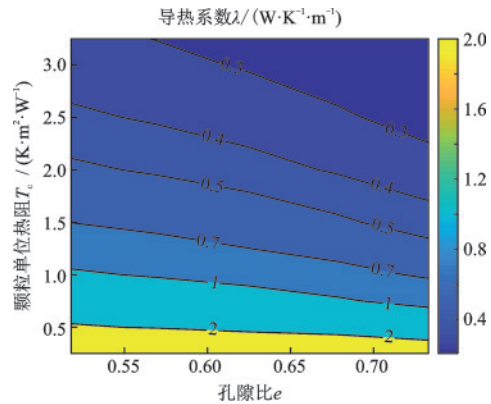


图7 不同孔隙比和热阻下的导热系数分布

Fig.7 Contour of thermal conductivity with various void ratios and thermal resistance

2.3 T-CPT 试验全过程模拟

本模拟全过程在 $1g$ 重力场下进行。贯入过程中, 上压力板保持 $200 kPa$ 上覆荷载, 探头以 $20 mm/s$ 的恒定速率贯入。当贯入深度 h 达到 $36 mm (h/B=6)$ 时, 停止贯入, 并设置模型初始温度为 $20^\circ C$ 。根

据图7标定结果,当本模型的颗粒单位热阻 T_c 定义为 $3 \text{ K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$ 时,试样导热系数约为 $0.31 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,与 Ottawa 20-30 砂的实验结果一致^[18]。为保证试样颗粒拥有与石英砂相同的热膨胀系数 $5.5 \times 10^{-7}/\text{K}$,将试样颗粒的线性膨胀系数 α 设置为 $2 \times 10^{-7}/\text{K}$ 。传热过程中,探头加热段以恒定加热功率 P 加热 60 s,随后暂停加热并自由冷却 900 s,传热过程的具体参数见表2。

表2 模型传热参数

Table2 Heat transfer parameters of the model

基本参数	大小
加热功率 P/W	0.02
比热参数 $C/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	960(探头)、460(土体)
单位热阻 $T_c/(\text{K}\cdot\text{m}^2\cdot\text{W}^{-1})$	3
线膨胀系数 $\alpha/(\text{m}\cdot\text{K}^{-1})$	2×10^{-7}
时间步 dT/s	2×10^{-4}

3 模拟结果和分析

3.1 贯入过程的结果与分析

温度静力触探垂直贯入过程中贯入阻力的计算公式如下:

$$q_c = \Sigma f_{D,z} / S_D \quad (15)$$

$$f_s = \Sigma f_{h,z} / S_h \quad (16)$$

式中, q_c 为贯入锥尖阻力; $\Sigma f_{D,z}$ 为作用在锥尖沿 z 向的合力; S_D 为 $1/4$ 锥尖截面面积; f_s 为侧壁摩阻力; $\Sigma f_{h,z}$ 为作用在侧壁摩筒沿 z 向的合力; S_h 为 $1/4$ 侧壁摩筒外表面积。

图8展示了贯入阻力随相对贯入深度 h/B 的变化情况。在贯入过程中,锥尖阻力和侧壁摩阻力拥有相似的变化趋势,均先增大后逐渐稳定。由于上覆荷载的存在,锥尖阻力和侧壁摩阻力拥有较大的稳定值。初始贯入阶段 ($h/B < 1$),由于摩擦段未完全进入土体,侧壁摩阻力几乎为零。

图9所示为归一化锥尖阻力随相对贯入深度变化趋势。由于存在上覆荷载,使得土体中的初始垂直应力较大,且随深度变化不明显。因此,通过初始垂直应力进行归一化之后贯入阻力的变化趋势无明显变化;且当贯入至 $h/B = 2.5$ 时,归一化贯入阻力趋于稳定,稳定值约为90。

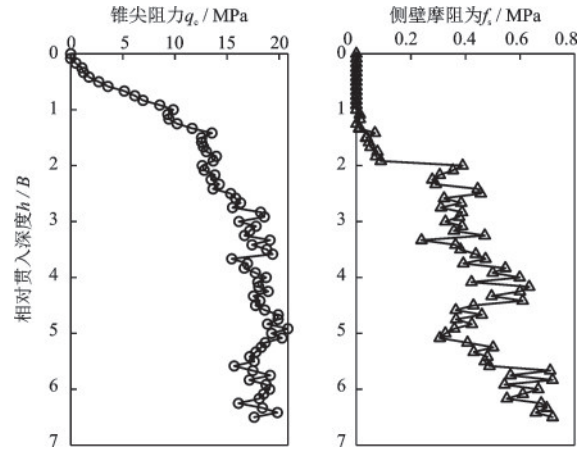


图8 贯入阻力

Fig.8 Penetration resistance

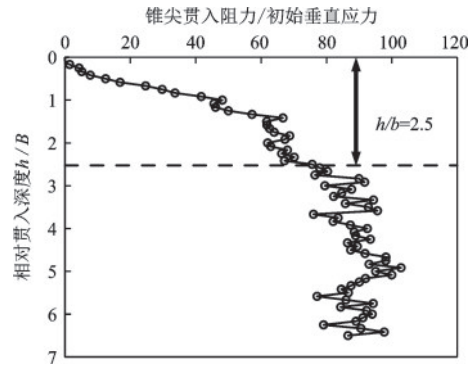


图9 归一化的锥尖贯入阻力

Fig.9 Normalized cone tip resistance

图10展示了在贯入过程中各阶段土体径向和竖向应力场的发展情况。从图中可以看出,径向应力和竖向应力均分布在锥尖位置,且越靠近锥尖,应力越大。在贯入的前期,贯入所产生的径、竖向应力影响范围较小,而后随着探头的贯入逐步扩大。此外,应力场分布给出了探头与土颗粒相互作用的细观接触力与力链分布及其演化。

图11为贯入过程中各阶段土体中颗粒位移场分布情况。由于土体受到探头的挤压作用,土体颗粒的位移随着探头贯入深度的增大而增大,且土体颗粒越靠近锥身处位移越大。值得一提的是,在距探头 $B/2$ 范围内,土体颗粒的位移衰减量达到 5 mm,该范围以外的土体位移明显减小,说明在贯入过程中探头对土体位移的扰动范围有限。

图12为贯入过程中土体中特征点颗粒位移路径和位移终值。由图中可以清楚的看到,在上覆荷载的作用下,各特征点的位移路径整体向下偏离锥身方向发展,且深度越深、距锥身越近位移路径越长;在 $\Delta r/B < 3$ 内 (Δr 为距探头中心轴的径向距离),各特征点的终止位移均在起始位移之下,这是由于上压力板的存在,限制了土体的隆起。

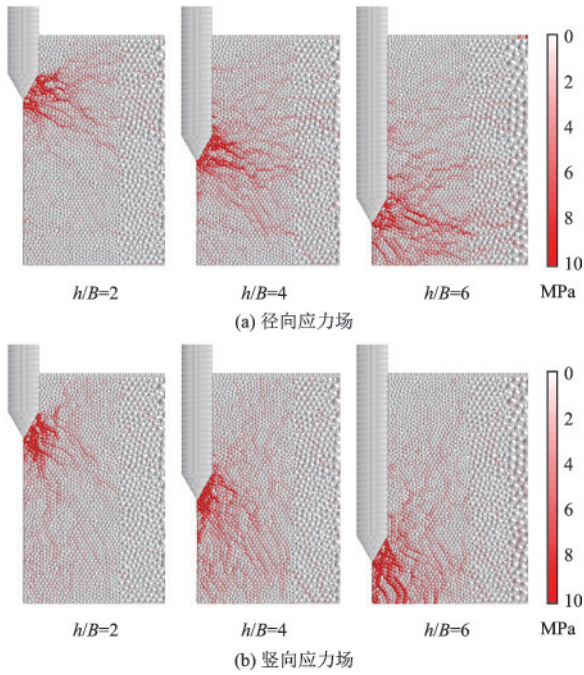


图 10 贯入过程中的土体应力场

Fig.10 Stress field of soil during penetration

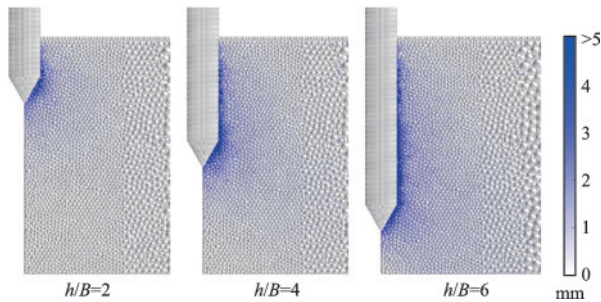


图 11 贯入过程中的土体总位移场

Fig.11 Displacement field of soil during penetration

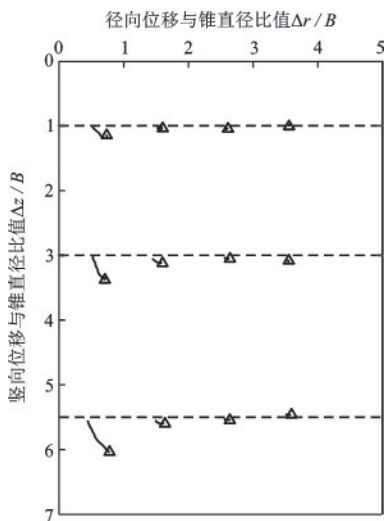


图 12 特征点颗粒位移路径

Fig.12 Displacement paths of characteristic soil elements

3.2 传热过程的结果与分析

温度静力触探试验在贯入至相应土层时需进行加热-散热试验,并记录传热全过程中探头加热段与隔热段的温度变化。图 13 给出了离散元数值模拟与室内模型实验的温度静力触探试验探头温度变化曲线。从图 13(a)中可以看出,在数值模拟中探头以 0.02 W 的恒定加热功率下加热 60 s,加热段温度升高了约 5.5 °C,隔热段温度升高约 0.4 °C,该温升由锥周土体热传导引起,且隔热段较加热段峰值温度的出现滞后了约 40 s;在传热规律上,探头在加热初期升温最快,加热效果最佳,随着时间的增加,温度增长逐渐缓慢,最后到达最值,而在散热过程中探头在初期降温速率最大,随后趋于平缓,温度逐渐趋于初始值,这与图 13(b)所展示探头加热 600 s 的室内模型实验结果相一致。这是因为在加热初期,探头与土体间的温差较小,热量消散较慢,因此探头升温迅速;随着探头温度的快速上升,探头与土温差逐渐增大,热量消散持续加快,致使探头升温速率减缓;相反,在散热阶段初期,探头与土体间温差较大,使得探头热量消散于土体更迅速,因此探头降温速率较高;而后随着探头温度的降低,热量消散减缓,探头的降温速率也随之减缓。

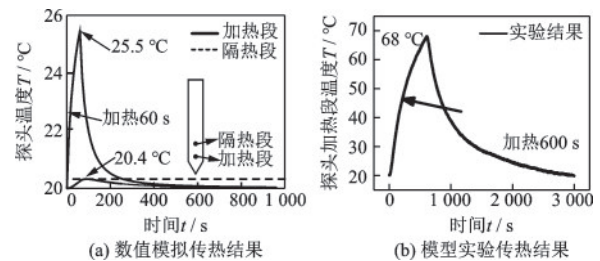


图 13 温度静力触探数值模拟与模型试验的探头温度曲线

Fig.13 Temperature curves of T-CPT probe from numerical simulation and model test

探头采集的温度数据需要进行数据解译,通过反演得到相应土层的热学参数。本文利用探头的加热和散热温度数据,根据温度静力触探数据解译方法^[5,8]对导热系数进行反演,结果如图 14 所示。在 $\Delta T - \ln(t)$ 平面处理加热数据,得到温度曲线切线斜率 $S_{\text{heating}} = 2.270$,反演得到导热系数 $k_n = 0.140 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,误差为 51.6%;在 $\Delta T - \ln[t - (t - t_1)]$ 平面处理散热数据,得到温度曲线切线斜率 $S_{\text{cooling}} = 0.966$,反演得到导热系数 $k_c = 0.330 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,误差为 6.5%, t_1 为加热时长, s;其中,加热数据反演所得导

热系数误差较大,这可能是由于加热时间过短,所得切线由早期的加热数据控制,切线斜率 S_{heating} 偏大,反演的导热系数尚未达到稳定值;而由于散热的足够长,反演的导热系数更接近稳定值,因此误差更小。

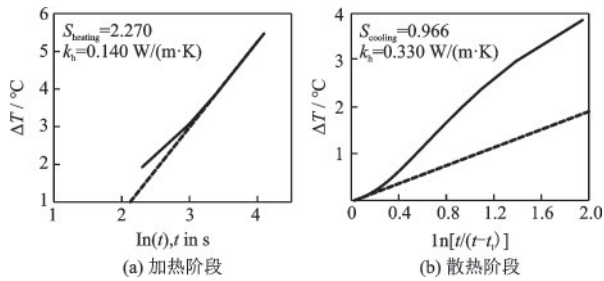


图 14 土体导热系数的数据解译

Fig.14 Interpretation of thermal conductivity of soil

图 15 所示为加、散热各阶段土体温度场分布。从图 15 中可看出,加热过程中靠近探头加热区位置的土体颗粒最先升温,升温也更快。因此温度场中高温集中在于此区域,并由此区域呈环状逐渐向四周扩散。停止加热后,探头进行自由散热,热量由加热区附近逐渐向四周传递,散热 180 s 后热量基本均匀消散于土体中,加热所形成的高温区也随之消失。

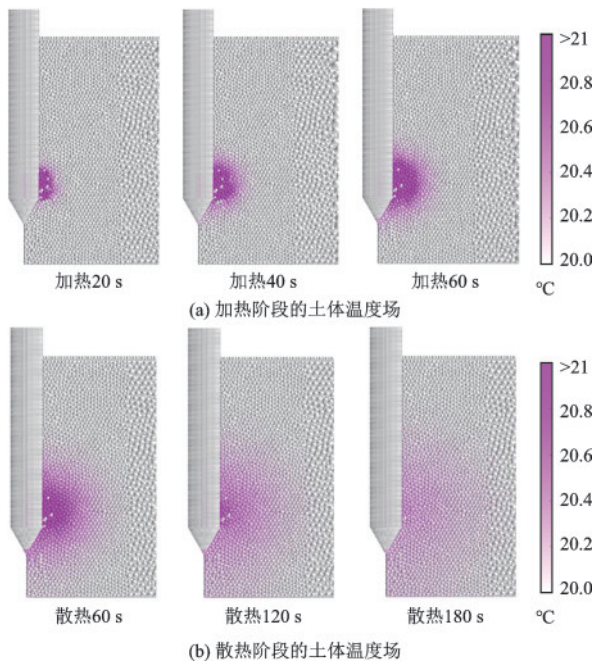


图 15 传热过程中的土体温度场演化

Fig.15 Evolution of soil temperature field during heating and cooling

4 结 论

(1)建立的 T-CPT 离散元数值模型能够完整模拟 T-CPT 试验,并获得合理的贯入及热传递结果。

(2)贯入过程中,贯入阻力随深度的增加而增加;在上覆荷载的作用下,归一化贯入阻力在相对深度 $h/B < 2.5$ 内随深度的增加而增加,且增速逐渐减缓,最后稳定于 90;土体颗粒均向下位移,未出现隆起现象,且在距锥身 $B/2$ 内,位移基本完全衰减。

(3)传热过程中,探头加热 60 s,加热段实现了 5.5 °C 的升温;探头温度变化规律与实验结果相同,在加热和散热的初期,探头的温度变化最快,并且随着时间的推移,温度变化逐渐变缓。

(4)利用探头加热温度所反演导热系数为 0.140 W/(m·K),误差为 51.6%;利用探头散热温度所反演导热系数为 0.330 W/(m·K),误差为 6.5%;散热数据反演所得导热系数更为准确。

参考文献:

- [1] Alexis C, Emmanuel A, Didier D, et al. In situ characterization of Thermopylae soil properties-Measurements and monitoring of soil water content with a thermal probe [J]. Journal of renewable and Sustainable Energy, 2012, 4:43-106.
- [2] 王贵玲,刘彦广,朱喜,等.中国地热资源现状及发展趋势[J].地学前缘,2020,27(1):1-9.
Wang G L, Liu Y G, Zhu X, et al. The status and development trend of geothermal resources in China [J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 1-9. (in Chinese)
- [3] Lutenegeger A J, Lally M J. In situ measurement of thermal conductivity in a soft clay [C]//International Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties and Case Histories. Bandung: Parahyangan Catholic University, 2001.
- [4] Akrouch G A, Briaud J L, Sanchez M, et al. Thermal cone test to determine soil thermal properties [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 2016, 142(3): 04015085.
- [5] Vardon P J, Baltoukas D. Interpreting and validating the thermal cone penetration test (T-CPT) [J]. Géotechnique, 2019, 69(7): 580-592.
- [6] 刘松玉,郭易木,张国柱,等.热传导 CPT 探头的研发与应用[J].岩土工程学报,2020,42(2):354-361.

- Liu S Y, Guo Y M, Zhang G Z, et al. Development and application of heat conduction CPT probe[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(2): 354-361.(in Chinese)
- [7] 张文伟, 蔡国军, 刘松玉. 热传导 CPTU 技术理论与工程应用研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(增2): 737-744.
Zhang W W, Cai G J, Liu S Y. Review of thermal conductivity piezocene penetration testing in geothermal engineering [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(Sup2): 737-744.(in Chinese)
- [8] Mo P Q, Ma D Y, Zhu Q Y, et al. Interpretation of heating and cooling data from thermal cone penetration test using a 1D numerical model and a PSO algorithm [J]. Computers and Geotechnics, 2021, 130: 103908.
- [9] 刘春. 地质与岩土工程矩阵离散元分析[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
Liu C. Matrix discrete element analysis of geology and geotechnical engineering [M]. Beijing: Science China Press, 2019.(in Chinese)
- [10] 邓益兵, 杨彦聘, 史旦达, 等. 三维离散元大尺度模拟中变粒径方法的优化及其应用[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(1): 62-70.
Deng Y B, Yang Y C, Shi D D, et al. Refinement and application of variable particle-size methods in 3D discrete element modelling for large-scale problems [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(1): 62-70.
- [11] 杨彦聘, 邓益兵, 史旦达, 等. 采用环向周期边界的静力触探三维离散元模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增1): 3372-3384.
Yang Y C, Deng Y B, Shi D D, et al. Three-dimensional DEM simulation of cone penetration test by using circumferential periodic boundary [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Sup1): 3372-3384.(in Chinese)
- [12] Zhao S W, Evans T M, Zhou X. Effects of curvature-related DEM contact model on the macro- and micro-mechanical behaviours of granular soils [J]. Géotechnique, 2018, 68(12): 1085-1098.
- [13] Nardelli V, Coop M R, Andrade J E, et al. An experimental investigation of the micromechanics of Eglinsand [J]. Powder Technol, 2017, 312: 166-174.
- [14] Jiang M J, Yu H S, Harris D. Discrete element modeling of deep penetration in granular soils[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2006, 30: 335-361.
- [15] Zhao S W, Zhao J D, Guo N. Universality of internal structure characteristics in granular media under shear [J]. Physical review E, 2020, 101: 012906.
- [16] 张品. 基于DEM方法的散体颗粒热传导模拟[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
Zhang P. Simulation of heat conduction of bulk particles based on DEM method [D]. Changsha: Central South University, 2011.(in Chinese)
- [17] 桑宏伟, 张丹, 刘春, 等. 基于离散元法的能源管传热过程模拟[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(4): 645-650.
Sang H W, Zhang D, Liu C, et al. Numerical simulation on heat transfer of energy PHC pile based on discrete element method [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(4): 645-650.(in Chinese)
- [18] Yun T S, Santamarina J C. Fundamental study of thermal conduction in dry soils[J]. Granular Matter, 2008, 10(3): 197-207.

(本文责编: 苏泽云)