

DOI: 10.11779/CJGE201910006

考虑温度效应的饱和土地基固结理论

邓岳保¹, 王天园¹, 孔纲强²

(1. 宁波大学岩土工程研究所, 浙江 宁波 315211; 2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 考虑温度(加热)的固结理论是当今岩土工程领域颇为关注的研究课题之一, 其在能源地下工程、核废料处置和热法地基处理等方面具有应用背景。针对现有热固结理论研究的不足, 考虑加热对土体固结压缩特性和孔隙水压的影响, 给出了荷载和加热联合作用下饱和土地基固结沉降、超静孔压和固结度的实用计算方法。基于详细的参数计算分析, 探讨了热固结理论的合理性。最后开展耦合加热的软土地基和竖井地基模型试验, 将理论解答与实测结果进行对比分析, 检验理论的准确性与可靠性。研究结果表明, 所建立的热固结理论可以分析地基在加热后的回弹与沉降, 解释加热引起的超静孔压上升和快速消散, 扩展了常温下的经典固结理论, 可供涉热岩土工程相关问题分析时参考。

关键词: 固结理论; 沉降; 超静孔隙水压力; 固结度; 温度效应

中图分类号: TU411.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)10-1827-09

作者简介: 邓岳保(1983—), 男, 湖南岳阳人, 博士, 副教授, 主要从事软土特性和软土地基处理方面的教学和研究工作。E-mail: dengyuebao@nbu.edu.cn。

Consolidation theory for saturated ground considering temperature effects

DENG Yue-bao¹, WANG Tian-yuan¹, KONG Gang-qiang²

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Ministry of Education, Nanjing 210098, China)

Abstract: The consolidation theory considering temperature effect (heating) is one of the research topics that are of great concern in geotechnical engineering today. It has its application background in thermal energy geo-structure, nuclear waste disposal and thermal ground treatment technology and so on. Aiming at overcoming the shortcomings of the existing thermal consolidation researches, the formulas for calculating the consolidation settlement, excess pore water pressure and degree of consolidation are presented on the basis of coupling the temperature effects on soil consolidation behavior and pore water pressure. The rationality of different expressions is discussed according to an example. The model tests on soft ground and vertical drained ground coupling with heating are carried out. The accuracy of the proposed method is checked through the comparison between the theoretical and measured results. The method can be used to analyze the rebound and settlement of saturated ground and the raise and dissipation of the excess pore water pressure under loading and heating. Thus the traditional classical consolidation theory is expanded and it may provide a theoretical basis for the analysis of the geotechnical problems involving heating.

Key words: consolidation theory; settlement; excess pore water pressure; degree of consolidation; temperature effect

0 引言

固结理论是土力学的重要组成部分。饱和土地基固结描述了荷载作用时饱和土中产生超孔隙水压力并随时间逐步消散, 土中有效应力逐步增大, 地基逐渐沉降的过程。1925年, Terzaghi 提出了经典的饱和土一维固结理论, 由此开创了土力学^[1]。经过90多年的发展, 固结理论研究对象从天然地基、竖井地基扩展到复合地基、桩基和地下工程等; 物理模型发展到考虑不同的土层分布、排水边界以及加载方式等; 土体

本构从线弹性扩展到非线性、弹塑性、黏性等^[2]。实际上, 加热也会引起地基土中超静孔压的产生和消散, 并影响地基的固结沉降过程。因此, 在理论上有必要对传统经典固结理论进行完善, 使其进一步考虑温度的影响。

另外, 随着地源热泵技术、能量桩、核废料埋置、

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LY17E080008); 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室开放基金项目(2018006)
收稿日期: 2019-02-18

热油回收、高温海底管道、供热管道和垃圾填埋场处治等能源、环境相关的项目建设日益增多, 涉‘热’岩土工程问题研究受到越来越多的重视^[3-5]。在饱和场地中设置或填埋热源, 将对地基土的物理力学特性和排水固结产生影响, 进而影响场地的长期变形。此外, 软土地基热排水固结处治技术的提出^[6-8], 更是促进了考虑温度效应的固结理论的研究。

饱和土地基在荷载与加热的耦合作用下, 其固结沉降和孔压消散过程涉及土体温度、应力和渗流耦合作用, 是一个复杂的热-水-力耦合问题。为了在理论上分析这一问题, 国内外学者开展了一系列研究。1956年, Biot 给出了等温条件下饱和土体热-水-力耦合方程^[9], 对热固结问题做了开创性工作。在此基础上, Laloui 等^[10]、傅少君等^[11]、郭志光等^[12]进一步推导了非等温热-水-力耦合控制方程并进行数值求解。陶海冰等^[13]利用 Comsol 软件考虑热-水-力的耦合模拟分析了热路径和荷载路径对竖井地基固结的影响。吴瑞潜等^[14]、Liu 等^[15]、郭华等^[16]基于饱和土体一维热固结问题的控制方程给出了特定情况下的孔压与固结度解答。基于已有研究发现, 对于大多数二、三维热-水-力多场耦合问题, 即便采用最简化的线性本构模型, 也很难得到解析解答。

另一种分析途径是从太沙基固结理论或经典竖井固结理论出发, 建立考虑温度效应的实用固结分析方法。Artidteang 等^[8]和 Abuel-Nagah 等^[17]分别在 Hansbo 竖井固结理论基础之上建立了考虑温度对渗透系数 k 和固结系数 C_h 影响的竖井固结理论。刘干斌等^[18]基于模型试验结合先期固结压力随温度变化的假设建立了竖井地基热排水固结沉降计算公式。范高飞等^[19]、吴佳辉等^[20]给出了考虑温度修正的理想井地基固结解答。上述方法简单易懂, 但是有些现象无法得到理论解释。比如: 在软土场地中释放热量将引起地基回弹和附加沉降; 加热引起超静孔压并在有排水边界条件下逐渐消散等; 现有热固结理论还无法进行完整分析。此外, 到目前为止, 关于考虑温度效应的固结度定义未见报道。

本文拟在经典固结理论基础上, 考虑加热对土性和固结过程的影响, 建立耦合温度的饱和土地基固结理论, 给出固结沉降、超静孔压及固结度的计算式, 丰富并拓展现有固结理论, 进而为工程中涉热岩土工程相关问题的设计和计算提供理论支撑。

1 物理模型与基本假定

1.1 物理模型

从实用角度出发, 对考虑温度效应的饱和土地基固结进行简化。图 1 给出了 3 种分析对象; 更复杂的

模型可在此基础上开展进一步研究, 此处不再赘述。

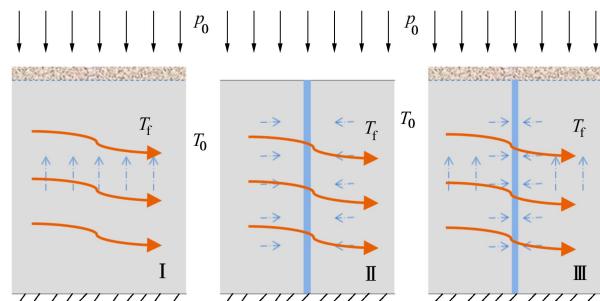


图 1 物理模型示意图

Fig. 1 Diagram of physical model

(1) 模型 I: 均质饱和地基, 顶层单面排水, 仅考虑竖向渗流固结。

(2) 模型 II: 打设了竖向排水井的饱和土地基, 仅考虑径向渗流固结。

(3) 模型 III: 打设了竖向排水井的饱和土地基, 顶面透水, 考虑径、竖向组合渗流固结。

1.2 基本假定

基本假定同太沙基一维固结理论和经典竖井固结理论^[2], 即假定土层均质、各向同性、完全饱和, 水的渗流服从达西定律, 大面积外荷载 (p_0) 骤然施加。

在图 1 中, T_0 表示场地初始温度, T_f 表示加热稳定以后场地的温度。关于加热有如下 3 点假定:

(1) 加热过程瞬时完成或者线性升温。对于弱透水的软黏土地基固结而言, 温度扩散过程较短, 因此可以按瞬时加热来分析, 即不考虑温度随空间和时间的变化。对于非瞬时加热情况, 可以先依据热传导方程计算温度扩散过程, 然后按线性增温来简化处理。

(2) 加热影响土的压缩性。根据已有土性研究结论^[21-24], 加热对土体压缩性的影响主要表现为随着温度升高, 土体先期固结压力减小。

Cekerevac 等^[21]提出的先期固结压力和温度变化之间的关系式为

$$\Delta P_{ct} = -\gamma \cdot P_{ct} \lg \left(\frac{T + \Delta T}{T} \right)。 \quad (1)$$

式中 ΔT 为温度变化量, $\Delta T = T_f - T_0$; γ 为先期固结压力的温度影响参数, 通常 γ 取 $0.3 \sim 0.4$; P_{ct} 为温度 T 时土体的先期固结压力; ΔP_{ct} 为先期固结压力变化量。

(3) 加热影响土的固结渗透性状。土体加热后渗透性增强, 固结性状得到改善。为此, 不同温度下采用不同的渗透系数 k_T 和固结系数 C_T 来描述。

2 考虑温度的固结理论

2.1 固结沉降

(1) 外荷载引起的沉降。采用考虑土体应力历史

的 $e-p$ 曲线法来计算。首先根据固结压缩试验得到土的先期固结压力, 判断土层的超固结状态, 然后根据不同的应力状态得到不同的固结沉降计算式。以正常固结土为例, 由原始压缩曲线确定压缩指数 C_c , 按下式计算固结沉降 S_c :

$$S_c = \frac{H}{1+e_0} C_c \log \frac{p_c + \Delta p_q}{p_c} \quad (2)$$

式中 H 为土层厚度; e_0 为土体初始孔隙比; C_c 为土体的压缩指数; p_c 为土体初始有效自重应力; Δp_q 为荷载引起的附加应力增量。

(2) 加热引起的沉降。考虑温度对土体先期固结压力的影响, 基于 $e-p$ 曲线法建立考虑温度影响的固结沉降计算式^[13]:

$$S_c = \frac{H}{1+e_0} \cdot C_e \cdot \log \left(\frac{p_c}{p_c + \Delta P_{ct}} \right) \quad (3)$$

式中 C_e 为土体回弹指数; ΔP_{ct} 为加热引起先期固结压力 P_c 变化量, 见式 (1)。对于正常固结或弱超固结或欠固结状态土层, ΔP_{ct} 为负值, 加热会引起地基沉降。对于强超固结土, 加热将引起土体回弹。

(3) 荷载和加热联合引起的沉降, 如下式:

$$S_c = \frac{H}{1+e_0} \left[C_e \log \left(\frac{p_c}{p_c + \Delta P_{ct}} \right) + C_c \log \left(\frac{p_c + \Delta p_q}{p_c} \right) \right] \quad (4)$$

2.2 超静孔压

(1) 初始超静孔隙水压力

根据饱和土理论, 瞬时施加的外荷载全部转换为土中超静孔压, 即

$$u_{p0} = p_0 \quad (5)$$

试验表明: 对饱和土地基加热, 将产生超静孔隙水压力, 且与外荷载、围压、排水边界和土类等有关。Campanella 等^[25]基于试验成果提出了下式来确定加热引起的超静孔隙水压力 (忽略水的压缩):

$$u_{T0} = \frac{\Delta T (n_v (\alpha_f - \alpha_s) + \alpha_{st})}{m_v} \quad (6)$$

式中 α_f 和 α_s 分别是水和土体膨胀系数; α_{st} 是由于土的结构在温度作用下产生物理化学变化而产生的体积改变系数; n_v 为孔隙率; m_v 是土的体积压缩系数。系数 α_f 随温度 T 和压力 p 变化, 近似可用下式计算:

$$\alpha_f = \alpha_0 + (\alpha_1 + \beta_1 T) \ln(m_T p) + (\alpha_2 + \beta_2 T) (\ln(m_T p))^2 \quad (7)$$

根据已有研究成果^[25], 式 (7) 中各系数值分别为:

$$\alpha_0 = 4.505 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}; \alpha_1 = 9.156 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}; \alpha_2 = 6.381 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}; \beta_1 = -1.2 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-2}; \beta_2 = -5.766 \times 10^{-8} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-2}; m_T = 15 \text{ MPa}^{-1}$$

当荷载和加热同时作用时, 初始超静孔隙水压力:

$$u_0 = u_{p0} + u_{T0} \quad (8)$$

对于变温情况, 见后文阐述, 对于变荷载情况, 可仿效太沙基变荷载固结理论进行计算。

(2) 超静孔隙水压力的消散

对于竖向渗流, 依据太沙基一维固结理论, 加载引起的超静孔压消散过程如下式:

$$u_{zt} = u_0 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4}{\pi m} \sin \frac{m\pi z}{2H} \exp \left(-\frac{m^2 \pi^2}{4} \cdot \frac{c_{vt} t}{H^2} \right) \quad (9)$$

式中 c_{vt} 为 T 温度下土体竖向固结系数; z 为深度; t 为固结时间; 双面排水时 H 为土层厚度的一半, 单面排水时 H 为土层厚度; $m=1, 3, 5, \dots$ 。

对于径向渗流, 根据经典竖井地基固结理论^[4], 结合前文基本假定, 竖井地基孔压消散过程如下式:

$$u_{ht} = u_0 \exp \left(-\frac{8c_{ht} t}{F d_e^2} \right) \quad (10)$$

式中 c_{ht} 为 T 温度下土体水平向固结系数; d_e 为单井影响范围直径; $F = F_n + F_s + F_r$; F_n , F_s 和 F_r 分别代表单井影响区、涂抹区和井阻对竖井地基固结的影响因子; 对于理想井而言, $F = F_n = \ln n - 0.75$; $n = d_e/d_w$; d_w 为竖井直径。

(3) 线性变温情况下的超静孔压

对于线性变温情况, 即初始时刻温度为 T_0 , t_1 时刻达到峰值温度 T_f , 然后保持恒定。根据式 (6) 可知, 温度引起的初始超静孔压与温度成正比。由此, 在 $0 \sim t_1$ 时间段, 温度引起的超静孔压应乘以系数 β_t :

$$\beta_t = \begin{cases} \frac{T_t - T_0}{T_f - T_0} & (0 \leq t < t_1) \\ 1 & (t \geq t_1) \end{cases} \quad (11)$$

线性变温情况下超静孔压的消散可表达为

$$u_t = u_{pt} + \beta_t u_{Tt} \quad (12)$$

当 $t_1=0$, 则 $\beta_t=1$, 上式退化为 $u_t=u_{pt}+u_{Tt}$, 即加热瞬时完成情况。其中, u_{pt} 和 u_{Tt} 分别为附加荷载和加热引起的随时间变化的超静孔隙水压力, 可由公式 (5) ~ (10) 得到。

2.3 固结度

(1) 按沉降定义的固结度

根据土力学定义, 地基固结度可以是 t 时间地基固结变形量 S_t 与地基最终固结变形量 S_c 之比, 即

$$U_t = S_t / S_c \quad (13)$$

式中, 地基最终固结沉降 S_c 计算时应考虑荷载和加热的耦合作用, 见式 (4)。

(2) 按孔压定义的固结度

固结度也可以是土层中超静孔隙水压力的消散程度。下文采用 3 种方法来定义耦合温度的固结度。

定义 I: 温度引起的孔压计入总的超静孔压, 温度等效为荷载作用。此时, 固结度由下式表示:

$$U_t = \frac{u_{p0} + u_{T0} - (u_{pt} + u_{Tt})}{u_{p0} + u_{T0}} , \quad (14)$$

该情况下固结度取值范围为[0,1]。

定义 II: 温度引起的孔压不计入总的超静孔压, 温度视为影响孔压消散的因素。此时, 固结度表示为

$$U_t = \frac{u_{p0} - (u_{pt} + u_{Tt})}{u_{p0}} . \quad (15)$$

根据式(15), 固结度取值范围为 $[-\delta, 1]$ 。其中, $\delta = u_{T0}/u_{p0}$, 其值与荷载、温度和土性参数均有关。初始时, 固结度为负数(地基回弹)。之后随着时间的发展, 土体发生固结, 超静孔压消散, 固结度最终到达 1。

定义 III: 按孔压计算固结度时, 考虑土体变形参数在回弹与压缩时的区别, 即

$$U_t = \lambda \frac{u_{p0} - (u_{pt} + u_{Tt})}{u_{p0}} , \quad (16)$$

式中

$$\lambda = \begin{cases} a_r / a_c & \text{当 } u_{p0} - (u_{pt} + u_{Tt}) < 0 , \\ 1 & \text{当 } u_{p0} - (u_{pt} + u_{Tt}) \geq 0 . \end{cases} \quad (17)$$

式中, a_r 和 a_c 分别为土体考虑温度影响的回弹变形系数和压缩变形系数。在无实测数据时, a_r/a_c 可近似按 C_r/C_c 的比值取值, 取值范围 $1/5 \sim 1/10$ 。

式(14)~(16) 定义的固结度不同, 后文算例中将对三者进行对比分析。

(3) 按理论得到的固结度

在不考虑热流固耦合效应仅考虑加热对土性影响时, 对于物理模型 I, 坚向平均固结度 U_z 计算公式为

$$U_z = 1 - \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 c_{vt} t}{4H^2}\right) . \quad (18)$$

对于物理模型 II, 耦合温度的坚井地基径向平均固结度的表达式为

$$U_r = 1 - \exp\left(-\frac{8c_{ht} t}{Fd_e^2}\right) . \quad (19)$$

对于模型 III, 土层中的渗流既有径向, 也有坚向。根据 Carrillo 理论, 地基总的固结度 U_e 有

$$U_e = 1 - \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 c_{vt} t}{4H^2} - \frac{8c_{ht} t}{Fd_e^2}\right) , \quad (20)$$

式(18)~(20) 与常温下的对应表达式区别在于固结系数, 上述各式中的固结系数为土层在加热条件下的参数。

对于选用何种表达式来计算固结度说明如下: 有实测沉降值情况, 可以根据式(13) 得到固结度; 对于有实测孔压值, 可以按孔压定义的固结度式(14)~(16) 进行计算; 如果没有实测值, 可以采用固结理

论式(18)~(20) 进行计算。

3 参数计算与分析

3.1 计算参数

竖井地基 $H=0.5$ m, 单井影响范围 $d_e=1.05$ m, 坚井直径 $d_w=0.07$ m。大面积外荷载瞬时施加, $p_0=100$ kPa。土层均质, 土性参数及取值如表 1 所示。

表 1 算例分析参数取值

Table 1 Values of parameters for example							
e_0	p_c /kPa	C_c	C_e	γ	α_s /($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	α_{st} /($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	n_v /(MPa $^{-1}$)
1.10	10	0.375	0.037	0.4	3.0×10^{-5}	3.0×10^{-5}	0.55
							0.5

土体渗透系数和固结系数随温度变化而变化, 并假设满足下式^[15]:

$$k_T = (0.471T/T_0 + 0.529)k_0 , \quad (21)$$

$$c_{ht} = (0.471T/T_0 + 0.529)c_{h0} , \quad (22)$$

式中, k_0 和 c_{h0} 分别为常温 20°C 时的渗透系数和固结系数。根据式(21) 和 (22) 得到不同温度下的渗透系数和固结系数; 根据式(4), (6)~(8) 分别得到不同温度下固结沉降 S_c 、系数 α_f 、孔压 u_{T0} 和 u_0 , 如表 2 所示。

表 2 算例分析中与温度有关的参数

Table 2 Temperature-dependent parameters for example

T / $^{\circ}\text{C}$	k_T /(m \cdot s $^{-1}$)	c_{ht} /(m $^2 \cdot$ s $^{-1}$)	S_c /mm	α_f	u_{T0} /kPa	u_0 /kPa
20	2×10^{-8}	1×10^{-8}	92.89	2.243×10^{-3}	0	100
40	2.94×10^{-8}	1.48×10^{-8}	93.47	1.792×10^{-3}	22.25	122.25
60	3.88×10^{-8}	1.94×10^{-8}	93.79	1.278×10^{-3}	34.07	134.07
80	4.83×10^{-8}	2.42×10^{-8}	94.04	0.735×10^{-3}	35.45	135.45

3.2 计算结果及分析

(1) 超静孔压

根据式(10) 得到不同温度情况下的超静孔压变化曲线, 如图 2。由图 2 可见: 温度越高, 初始超静孔压越大, 孔压消散速率越快; 在 60°C 之前, 温度升高对初始孔压值的影响较为明显, 其后变得不明显; 随着温度的提高, 孔压消散速率的温度效应逐渐减弱。

(2) 固结度

根据式(14) 得到的固结度(定义 I) 如图 3(a) 所示。由图 3(a) 可见: 随着温度升高, 固结速率越快; 所有固结度曲线都是从零开始, 最后达到 1, 这与传统固结理论相同。根据式(15) 得到的固结度(定义 II) 如图 3(b) 所示。由图 3(b) 可见, 加热后地基初始固结度小于零, 这和传统的固结理论不同, 可以解释地基加热初期的回弹现象。根据式(16) 得到的固结度(定义 III) 如图 3(c) 所示。加热后地基初

始固结度略小于零, 地基加热后的回弹效应没有定义 II 得到的回弹效应显著。

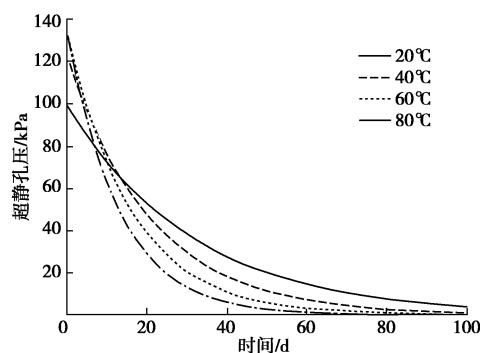


图 2 算例分析的孔压消散曲线

Fig. 2 Dissipation curves of excess pore water pressure for example

(3) 沉降过程

在得到固结沉降 S_c 和固结度 U_t 的基础之上, 可以根据式 (13) 得到沉降随时间变化曲线。由于 U_t 有 3 种表达式, 因此相应的可以得到 3 种 S_t 曲线, 分别如图 4 (a), (b), (c) 所示。

由图 4 (a) 可以看出: 温度越高, 最终固结沉降越大; 随着温度的升高, 沉降曲线越来越接近, 说明

温度效应会随着温度的升高而减弱; 沉降最初都是从 0 开始, 无法反映加热回弹现象。

由图 4 (b) 可以看出: 温度越高, 最终沉降越大; 沉降最初为负数, 可以反映地基加热回弹现象; 加热引起的回弹效应和对最终沉降的影响都随温度升高而减弱; 由于没有考虑土体在回弹与压缩时变形参数的不同, 定义 II 放大了地基的回弹效应。

由图 4 (c) 可以发现: 定义 III 得到沉降曲线能反映回弹效应; 地基回弹量远小于压缩量, 与实际情况较为吻合。

综上可以得到 3 种由孔压定义的固结度表达式的优劣。定义 I 得到的固结度符合经典固结理论, 但不能反映加热回弹。定义 II 得到的固结度可以解释加热回弹, 但放大了回弹效应。在引入比例系数 λ 后, 定义 III 得到的固结度与已有试验成果最为吻合^[13, 18], 固结度值初始略小于 0 (回弹), 最后趋于 1。

4 模型试验及分析

4.1 软土地基模型试验

开展了软土地基一维热固结模型试验, 如图 5 所示。试验设备及试验步骤介绍见已有相关文献[26]。试验土样为宁波海相沉积软黏土, 塑限 24.2%, 液限

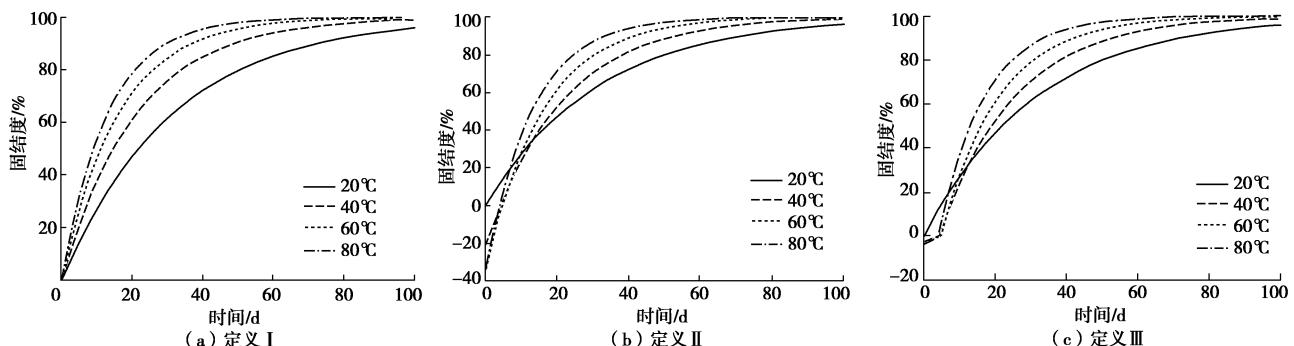


图 3 算例分析的固结度曲线

Fig. 3 Degrees of consolidation for example

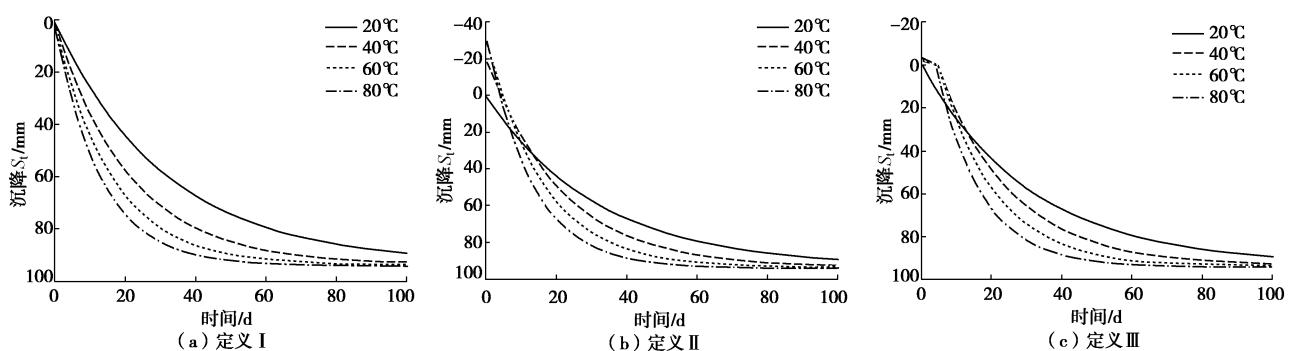


图 4 算例分析的沉降曲线

Fig. 4 Settlement curves for example

43.8%。模型地基初始厚度为 0.4 m。在 1 kPa 的预压荷载和自重作用下, 模型地基沉降在 1 周后基本达到稳定, 地基厚度 0.36 m。取土样进行物理力学特性基本测试, 结果如表 3 所示。模型地基顶部铺设 10 cm 砂垫层作为透水边界。然后开展两组对比试验, 一组试验在 50 kPa 荷载下排水固结, 另一组试验在 50 kPa 荷载和加热条件耦合作用下排水固结, 记录地基中的温度、孔压和地基顶部沉降随时间发展过程。

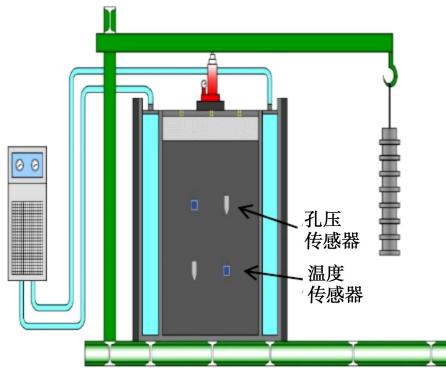


图 5 软土地基模型试验

Fig. 5 Diagram of soft ground model tests

表 3 软土地基一维热固结模型试验土体参数

Table 3 Values of parameters for model soft ground

参数	取值范围
密度 ρ /(g·cm ⁻³)	1.752~1.781
含水率 w /%	43.8~46.0
孔隙比 e	1.223~1.227
先期固结压力 p_c / kPa	3.5~6.8
压缩指数 C_c	0.30~0.34
回弹指数 C_e	0.03~0.045

采用前述热固结理论进行计算, 计算参数取值如下: $H=0.36$ m, $e_0=1.226$, $C_c=0.3$, $C_r=0.035$, $\Delta p=50$ kPa, $\gamma=0.4$, $P_{cr0}=6$ kPa; $n_v=0.55$; $m_v=0.25$ MPa⁻¹。初始温度 $T_0=21$ °C; 目标温度 $T_f=60$ °C; 温度扩散过程 $t_l=10$ h。

在固结沉降计算时, 为了抵消桶壁摩擦效应, 将测试的 C_c 值缩小到 0.85 倍^[3]。然后根据式(2)~(4), 得到常温下固结沉降 40 mm, 升温下固结沉降 44 mm。

根据式(18)和式(13)得到沉降过程曲线, 如图 6(a)所示。图 6(b)所示为根据实测和计算得到固结度曲线对比。根据反演计算: 常温下 $C_{vR}=1.63 \times 10^{-7}$ m²/s; 加热到 60 °C之后 $C_{vT}=2.02 \times 10^{-7}$ m²/s; 土体固结系数提高了 24%。

根据式(5)~(8), 得到 $u_0=108$ kPa。然后, 根据式(9)和式(12), 得到超静孔隙水压力随时间的变化过程。图 6(c)所示为超静孔压计算结果与实

测结果对比, 由图可知, 初始超静孔压计算值略大于实测值, 其后孔压消散规律近似一致。

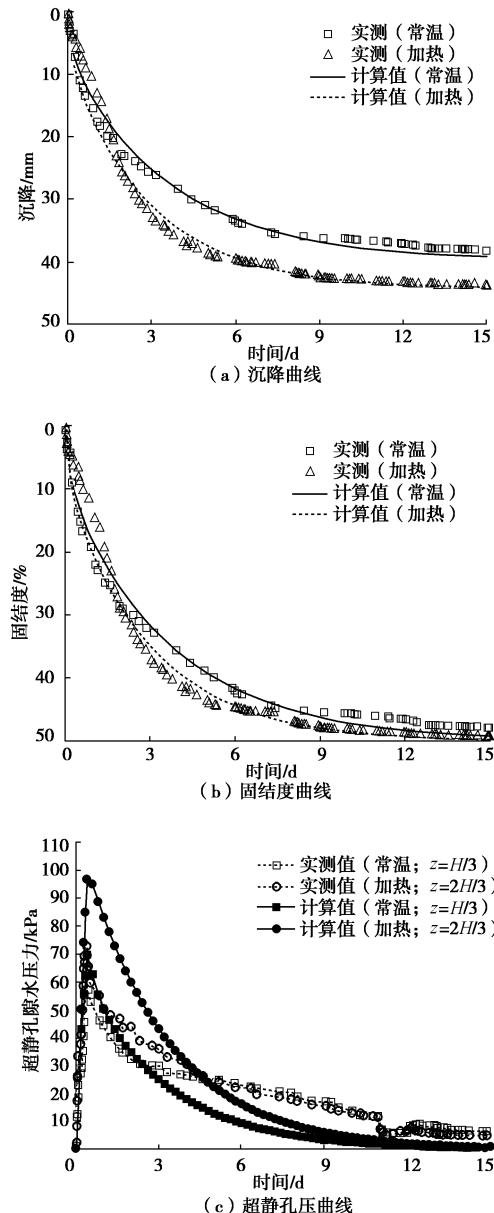


图 6 软土地基模型试验理论与实测结果对比分析

Fig. 6 Comparison between theoretical and measured results for soft ground model tests

4.2 坚井地基模型试验

开展了温控竖井地基模型试验(图 7)。模型地基在 1 kPa 荷载预压一周后厚度 $H=0.36$ m。塑料排水板打设在地基中心处, 且穿透软土地基。竖井影响范围 $d_e=0.40$ m; 排水板宽度和厚度分别为 100 mm 和 0.35 mm; 等效后的竖井直径 $d_w=0.05$ m^[2]。两个孔压传感器分别埋设在 $H/3$ 和 $2H/3$ 深度处。通过循环热水对模型地基加热, 使地基土从初始温度 24 °C 加热至 60 °C; 温度扩散过程 $t_l=7.5$ h; 荷载 10 kPa 瞬时施加; 记录地基温度、孔压和地表沉降随时间变化过程。试验一

共进行了 7 d, 期间得到了明显的回弹现象。



图 7 竖井地基模型试验

Fig. 7 Photo of vertical drained ground model test

竖井地基模型试验采用的是重塑土, 因此可以忽略涂抹效应; 又因为竖井长度较短, 根据井阻定义可知井阻效应很小, 可以忽略^[2]。由此, 下文基于理想井热固结理论进行计算。根据土工试验和前一节的计算成果, 参数取值如表 4 所示。计算过程如下:

(1) 根据式(4)计算固结沉降, 得到 $S_c=20.9$ mm。

(2) 根据式 (6) ~ (8), 得到 10 kPa 附加荷载和 60°C 温度引起的超静孔压为 44 kPa。

(3) 根据式 (10) ~ (12), 得到超静孔压的消散过程曲线 u_t 。图 8 所示为超静孔压的理论值与实测值对比, 由图可知, 理论值与实测值接近。

表 4 竖井地基模型试验计算参数

Table 4 Values of parameters for vertical drained ground model tests

参数	取值
温度影响系数 γ	0.4
固结系数 $C_{ht}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	3.0×10^{-3}
孔隙比 e	1.25
先期固结压力 p_c/kPa	6
压缩指数 C_c	0.30
回弹指数 C_e	0.035

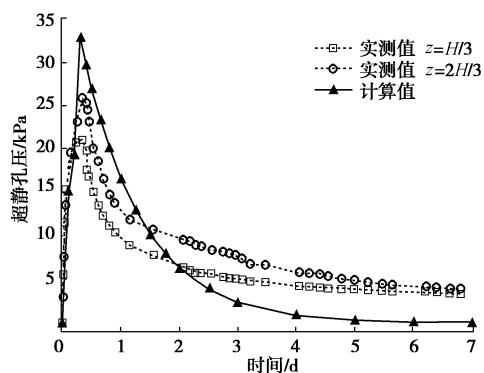


图 8 超静孔压对比曲线

Fig. 8 Comparison of excess pore water pressures for vertical drained ground model tests

(4) 根据式 (14) ~ (16), 得到由超静孔压定义的固结度; 根据式 (19) 得到竖井理论固结度。

(5) 根据固结度 U_t 和固结沉降 S_c , 得到沉降过程 S_t 。由各固结度各表达式得到的沉降曲线与实测沉降过程对比如图 9 所示。由图 9 可见: 定义 I 和式(19)无法分析地基加热后的回弹效应; 定义 II 由于没有考虑土体在回弹与压缩时变形特性的不同, 理论回弹量远大于实测值; 定义 III 得到的固结度与实测情况较为接近, 且能分析回弹。

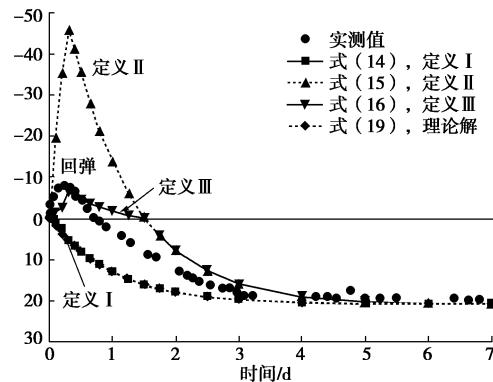


图 9 竖井地基模型试验沉降对比

Fig. 9 Comparison of settlements for vertical drained ground model tests

5 结 论

(1) 通过引入加热对土体先期固结压力的影响表达式, 得到了饱和土地基固结沉降计算式; 该式可以分析地基加热后的回弹与沉降。

(2) 通过引入超静孔压与加热温度之间的计算式, 在经典固结理论基础之上得到了饱和土地基加热和荷载联合作用下的超静孔压的产生及消散计算式; 该式可以分析加热引起的超静孔压上升, 也可以解释加热后超静孔压消散速率的增快。

(3) 基于超静孔压给出了 3 种耦合温度的固结度表达式。通过比较分析, 将加热视为影响超静孔压消散速率快慢的因素, 并考虑土体在回弹与压缩时变形特性的不同, 由此得到的固结度和沉降过程与实际情况最为吻合。

(4) 参数计算分析和模型试验分析均表明, 新的热固结理论可以解释荷载与加热联合作用下超静孔压的产生与消散、地基的回弹与沉降、固结速率的快与慢等现象, 较好地弥补了现有固结理论的不足, 可供涉热岩土工程相关问题理论分析时参考。

参考文献:

- [1] TERZAGHI K, PECK R, MESRI G. Soil mechanics in

- engineering practice[M]. 3rd ed. New York: Wiley-Interscience, 1996.
- [2] 邓岳保. 竖井地基固结解析理论与有限元分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. (DENG Yue-bao. Analytical theory and finite element analysis of soft soils by vertical drain[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese))
- [3] 陶海冰. 热流固作用下软土静动力学特性及应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2015. (TAO Hai-bing. The thermo-hydro-mechanical effect on static and dynamic properties of soft soil and its application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese))
- [4] 吕塞·拉卢伊, 何莉塞·迪·唐纳. 能源地下结构[M]. 孔纲强, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016. (LALOUI L, DI DONNA A. Energy geostructures: innovation in underground engineering[M]. KONG Gang-qiang, tran. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese))
- [5] 王宽君. 软土性状的温度效应[D]. 杭州: 浙江大学, 2017. (WANG Kuan-jun. Time dependent behavior of soft soils[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese))
- [6] ABUEL-NAGA H M, BERGADO D T, CHAIPRAKAIKEOW S. Innovative thermal technique for enhancing the performance of prefabricated vertical drain system[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006, **24**(6): 359 – 370.
- [7] POTHIRAKSANON C, BERGADO D T, ABUEL-NAGA H M. Full scale embankment consolidation test using prefabricated vertical thermal drains[J]. Soils and Foundations, 2010, **50**(5): 579 – 588.
- [8] ARTIDTEANG S, BERGADO D T, SAOWAPAKPIBOON J, et al. Enhancement of efficiency of prefabricated vertical drains using surcharge, vacuum and heat preloading[J]. Geosynthetics International, 2011, **18**(1): 35 – 47.
- [9] BIOT M A. Thermo elasticity and irreversible thermodynamics[J]. Journal of Applied Physics, 1956, **27**(3): 240 – 253.
- [10] LALOUI L, CEKEREVAC C. Numerical simulation of the non-isothermal mechanical behaviour of soils[J]. Computers and Geotechnics, 2008, **35**(5): 729 – 745.
- [11] 傅少君, 吴秋军, 黄振科. 考虑温度效应的固结问题有限元分析[J]. 土木工程学报, 2009, **42**(1): 95 – 100. (FU Shao-jun, WU Qiu-jun, HUANG Zhen-ke. Finite element analysis of thermal consolidation[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, **42**(1): 95 – 100. (in Chinese))
- [12] 郭志光, 白冰. 描述饱和土热固结过程的一个非线性模型及数值分析[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(11): 2061 – 2067. (GUO Zhi-guang, BAI Bing. Nonlinear model and numerical simulation of thermal consolidation process of saturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(11): 2061 – 2067. (in Chinese))
- [13] 陶海冰, 刘干斌, 谢康和, 等. 竖井地基热排水固结本构模型及试验验证[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(6): 1077 – 1085. (TAO Hai-bing, LIU Gan-bing, XIE Kang-he, et al. A constitutive model for thermal consolidation with vertical drains and its experimental verification[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(6): 1077 – 1085. (in Chinese))
- [14] 吴瑞潜, 谢康和, 沈建明. 地表温度周期波动的饱和土一维热固结解析解[J]. 工业建筑, 2010, **40**(8): 86 – 90. (WU Rui-qian, XIE Kang-he, SHEN Jian-ming. Analytical solutions of one-dimensional thermal consolidation of saturated soil under periodic fluctuation of surface temperature[J]. Industrial Construction, 2010, **40**(8): 86 – 90. (in Chinese))
- [15] LIU Q, DENG Y B, WANG T Y. One-dimensional nonlinear consolidation theory for soft ground considering secondary consolidation and the thermal effect[J]. Computers and Geotechnics, 2018, **104**: 22 – 28.
- [16] 郭华, 刘干斌, 郑荣跃, 等. 基于 Merchant 模型的饱和土体热固结理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(6): 1489 – 1495. (GUO Hua, LIU Gan-bin, ZHENG Rong-yue, et al. Thermal consolidation theory of saturated soils based on Merchant model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(6): 1489 – 1495. (in Chinese))
- [17] ABUEL-NAGAH M, LORENZOG A, BERGADOD T. Current state of knowledge on thermal consolidation using prefabricated vertical drains[J]. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, 2013, **44**(4): 132 – 141.
- [18] 刘干斌, 范高飞, 陶海冰, 等. 竖井地基热排水固结模型试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, **48**(2): 448 – 456. (LIU Gan-bin, FAN Gao-fei, TAO Hai-bing, et al. Model test on thermal drainage consolidation of foundation with vertical drain[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, **48**(2): 448 – 456. (in Chinese))
- [19] 范高飞, 刘干斌, 黎明, 等. 基于非等温管道流竖井地基热排水固结模拟[J]. 岩土力学, 2015, **36**(增刊 1): 614 – 618. (FAN Gao-fei, LIU Gan-bin, LI Ming, et al. Simulation

- of consolidation by vertical thermal drain based on non-isothermal conduit flow[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(S1): 614 - 618. (in Chinese)
- [20] 吴佳辉, 郑荣跃, 刘干斌, 等. 考虑温度效应的单井固结解析解[J]. 水文地质工程地质, 2018, **45**(2): 1 - 6. (WU Jia-hui, ZHENG Rong-yue, LIU Gan-bin, et al. Analytical solution for single well consolidation considering the temperature effect[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, **45**(2): 1 - 6. (in Chinese))
- [21] CEKEREVAC C, LALOUI L. Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2004, **28**: 209 - 228.
- [22] 陈卫忠, 龚哲, 于洪丹, 等. 黏土岩温度-渗流-应力耦合特性试验与本构模型研究进展[J]. 岩土力学, 2015, **36**(5): 1217 - 1238. (CHEN Wei-zhong, GONG Zhe, YU Hong-dan, et al. Review of thermo-hydro-mechanical coupled tests and constitutive models of clays[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(5): 1217 - 1238. (in Chinese))
- [23] 白冰, 张鹏远, 闫瑜龙, 等. 内外边界施加温度荷载的中空圆柱试样热固结试验[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(1): 67 - 74. (BAI Bing, ZHANG Peng-yuan, YAN Yu-long, et al. Consolidation tests on saturated soils subjected to thermal loading on inner and outer surfaces of hollow cylindrical specimens[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(1): 67 - 74. (in Chinese))
- [24] 杨光昌, 白冰. 考虑超固结效应的不同温度路径下饱和粉质黏土的热固结[J]. 岩土力学, 2018, **39**(1): 71 - 77. (YANG Guang-chang, BAI Bing. Thermal consolidation of saturated silty clay considering overconsolidation effect with different heating-cooling paths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(1): 71 - 77. (in Chinese))
- [25] CAMPANELLA R G, MITCHELL J K. Influence of temperature variations on soil behavior[J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, Proceedings of American Society of Civil Engineers, 1968, **94**(SM3): 709 - 734.
- [26] 邓岳保, 陈菲, 刘铨, 等. 温控软土地基模型试验装置研发及其应用[J]. 水道港口, 2018, **39**(2): 223 - 229. (DENG Yue-bao, CHEN Fei, LIU Quan, et al. Development and application of a temperature controlled model test device for soft soil ground[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2018, **39**(2): 223 - 229. (in Chinese))

第29届全国土工测试学术研讨会通知

(2020年7月18, 19日, 呼和浩特) 第1号通知

主办单位: 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会, 中国水利学会岩土力学专业委员会。

承办单位: 内蒙古工业大学等。

协办单位: 《岩土工程学报》编委会等。

大会邀请及主题: 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会, 中国水利学会岩土力学专业委员会拟定于2020年7月在呼和浩特召开“第29届全国土工测试学术研讨会”, 会议主题:“岩土工程勘察技术及土工测试新技术、新方法”。中国土木工程学会土力学及岩土工程分会, 中国水利学会岩土力学专业委员会邀请全国相关学科的专家、学者、科技工作者与工程技术人员, 特别是青年岩土工程工作者踊跃投稿, 集聚呼和浩特, 围绕会议主题探讨与交流土工测试最新研究成果与实践经验。

会议要点: 本次学术研讨会组织委员会、学术委员会由承办、协办单位, 学会专委会专家组成。会议将邀请国内著名土工测试专家进行特邀报告和主题报告, 并进行新编《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019) 宣贯。

会议专题: ①岩土工程勘察技术; ②土基本性质测试; ③

土工物理模型试验; ④土工原测试技术; ⑤现场土工监测技术; ⑥环境土工测试技术; ⑦特殊土性质测试技术; ⑧土工微观测试新技术; ⑨土工测试新型技术设备。

会议论文与出版: 会议投稿论文要求为原创、未公开发表的内容, 论文篇幅一般在5页以内, 格式请参考《岩土工程学报》。会议期间将通过投票遴选优秀论文推荐到《岩土工程学报》(增刊)(EI收录)、《地下空间与工程学报》、《内蒙古农业大学学报》、《内蒙古科技大学学报》、《内蒙古工业大学学报》其他论文将在论文集中刊出。

投稿邮箱: geotest2020@163.com。

重要日期: ①2019年12月30日前提交论文全文; ②2020年2月15日前返回论文录用通知; ③2020年3月15日前返回修改后论文。

会议联系方式: 地址: 内蒙古呼和浩特市新城区爱民街49号内蒙古工业大学土木工程学院, 邮政编码: 010051, 联系人: 刘俊芳: 18647964316; 杜强: 15560924010; 马建国: 18847187706。

(大会组委会 供稿)