

基于FLAC3D的季节性冻土区热力管道周围土体热力耦合分析

于晓杰 孔令杰 田宇婷 王明 郭宏宇

内蒙古北疆交通建设开发有限公司

DOI:10.32629/btr.v8i5.4778

[摘要] 文章基于FLAC3D数值模拟平台,构建考虑热传导、相变与力学响应的热-力耦合模型,对季节性冻土区热力管道运行条件下土体温度场与应力场的演化规律进行研究。结果表明,管道散热显著改变局部土体热状态与冻融边界位置,导致冻结深度缩减与应力集中区迁移;温度变化引发土体强度与变形参数非线性变化,从而产生冻胀、融沉及附加应力。研究为寒区热力管道设计及冻土防护提供了理论依据与技术参考。

[关键词] FLAC3D; 季节性冻土区; 热力管道; 热-力耦合; 数值模拟

中图分类号: U174 **文献标识码:** A

Thermo-Hydro-Mechanical Coupling Analysis of Soils Around Heat Pipes in Seasonally Frozen Soil Regions Based on FLAC3D

Xiaojie Yu Lingjie Kong Yuting Tian Ming Wang Hongyu Guo

Inner Mongolia Beijiang Transportation Construction and Development Co., Ltd.

[Abstract] Based on the FLAC3D numerical simulation platform, this study establishes a thermo-mechanical coupling model that considers heat conduction, phase change, and mechanical response, to investigate the evolution of the temperature and stress fields in soils surrounding thermal pipelines operating in seasonally frozen ground regions. The results indicate that heat dissipation from the pipeline significantly alters the local thermal state of the soil and the position of the freeze-thaw boundary, leading to a reduction in freezing depth and migration of stress concentration zones. Temperature fluctuations cause nonlinear variations in soil strength and deformation parameters, resulting in frost heave, thaw settlement, and additional stresses. The study provides theoretical support and technical guidance for the design of thermal pipelines and frost protection in cold-region engineering.

[Key words] FLAC3D; seasonally frozen ground; thermal pipeline; thermo-mechanical coupling; numerical simulation

季节性冻土区广泛分布于我国东北及西北地区,地温年周期变化显著,导致地下结构易受冻胀与融沉影响。热力管道在运行过程中不断释放热量,改变周围土体的温度场与应力场分布,易引发地基变形与结构失稳问题。传统解析方法难以准确描述这种非线性热-力耦合行为,因此有必要借助数值模拟手段进行系统研究。基于FLAC3D的分析方法能够实现温度场与应力场的动态交互计算,为寒区热力管道工程的设计与安全评估提供可靠技术途径。

1 季节性冻土区热-力相互作用机理分析

1.1 冻土热传导与相变特性

季节性冻土的热传导与相变过程是热-力耦合行为的核心。土体由固体颗粒、水和气体组成,具有显著的非均质性。当地表温度降至0℃以下时,孔隙水逐渐冻结,释放潜热并改变土

体热导率与比热容量,使传热过程呈非线性特征。冻结阶段,冰的导热系数较高,增强了垂向传热能力;融化阶段,液态水增多,传热速率减缓。不同颗粒与含水量导致相变区温度范围在-0.5~-1.5℃之间,形成“模糊冻结带”,其厚度直接影响冻结界面的稳定性与迁移速度。在传热机制上,导热、对流及相变潜热传递共同作用。地表温度变化引起热流向下传导,地下温度场呈现季节性周期波动。冻结层厚度随温度振幅、导热系数及潜热参数变化而调整。当热力管道作为稳定热源存在时,局部热通量增强,0℃等温面被抬升或消失,形成未冻区。若热输入过大,可能引起长期热扰动,造成地基承载力下降与沉降不均。因而,正确刻画热传导与相变耦合关系,是建立热-力计算模型的理论前提。

1.2 温度-力学耦合效应与土体响应机理

温度变化不仅影响土体热状态, 还通过相变过程改变其力学性质。冻结过程中, 水结冰膨胀导致体积增大, 形成冻胀应力; 融化阶段冰晶消失、孔隙塌陷, 引起融沉。两者交替循环使土体产生累积塑性变形。冻结状态下, 土体黏聚力和弹性模量显著提高, 而融化后强度迅速降低, 表现出明显的“强度波动性”^[1]。热-力耦合机理主要包括三方面: 一是热应变效应, 温度梯度导致土颗粒体积变化及应力重分布; 二是冻胀水迁移效应, 毛细水在温度场驱动下向冻结前沿聚集, 形成冰透镜体; 三是相变滞后效应, 冻结与融化并非同步完成, 造成应力滞后与残余变形。热源存在时, 这些效应叠加放大, 使管道上方形成应力集中区与差异变形带。热扰动还可能致冻结界面非对称迁移, 从而破坏结构对称性。

2 基于FLAC3D的热力管道-冻土耦合模型构建与模拟方法

2.1 数值模型总体设计

为准确反映热力管道运行对周围冻土的热-力响应规律, 研究采用FLAC3D建立三维耦合模型, 模型区域选取典型季节性冻土层地段, 包含地表层、回填层、热力管道、冻结土层及下部未冻层。模型水平尺寸为管道外径的30倍, 以避免边界效应; 深度取冻结深度的3倍, 保证温度与应力分布的稳定延展性。水平两侧边界约束水平位移, 底部固定竖向与水平位移, 上表面为地表自由边界, 施加年周期变化的温度边界条件。网格划分采用六面体单元, 管道与其周围5倍管径范围内采用加密网格, 以提高计算精度。土体区域网格逐渐稀疏过渡, 保证热流与应力场梯度变化的连续性。管道外壁与土体之间设置接触面单元, 用以模拟管壁与土体间摩擦滑移效应及热传导耦合关系。模型建立后, 进行几何校核与边界合理性验证, 以确保整体数值稳定性。

2.2 热-力耦合计算设置

FLAC3D支持“热力双场”耦合计算模块, 通过命令model configure thermal mechanical启用热传导与力学求解的同步运算。在计算流程中, 每一时间步分为两个阶段: 首先求解温度场, 根据热传导方程更新单元温度; 其次将温度变化引入力学方程中, 计算热应变与应力调整, 实现热场对力学响应的驱动。热传导方程采用显式差分格式离散, 时间步长依据Courant稳定条件确定, 以保证计算精度与效率。冻结-融化相变通过等效比热法处理, 即在相变温度区间内引入附加热容, 使冰-水转化潜热以能量形式参与计算, 从而实现温度与相变的连续变化^[2]。

在力学计算中, 土体采用Mohr-Coulomb弹塑性模型描述, 考虑温度对材料参数的影响。弹性模量 $E(T)$ 、黏聚力 $c(T)$ 、内摩擦角 $\phi(T)$ 按经验关系式随温度变化调整:

$$E(T) = E_0[1 + \beta(T_f - T)]$$

$$c(T) = c_0 + \gamma(T_f - T)$$

其中, E_0 、 c_0 为常温参考值, β 、 γ 为温度影响系数, T_f 为冻

结温度。通过内嵌FISH语言实现温度依赖参数的自动更新, 使热-力响应在计算过程中动态耦合。

2.3 模型参数与工况设置

本研究模型选取典型季节性冻土区的地质结构, 自上而下依次为地表填土层、冻土层及未冻土层。各层土体参数依据实测资料与相关规范取值: 地表填土密度约1800kg/m³、热导率1.1W/(m·K)、比热900J/(kg·K); 冻土层密度1900kg/m³、热导率1.7W/(m·K); 未冻层密度2000kg/m³、热导率2.0W/(m·K)。冻结状态下土体弹性模量约45MPa、黏聚力35kPa, 未冻状态分别约25MPa和15kPa, 以体现强度的温度依赖性。热力管道外径0.4m, 钢制管壁厚度8mm, 外覆聚氨酯保温层导热系数为0.03W/(m·K), 密度约60kg/m³, 其与周围回填土之间定义接触热阻15W/(m²·K)。地表温度边界采用年周期性正弦函数表示:

$$T_s(t) = T_{avg} + A \sin\left(\frac{2\pi}{365}t - \phi\right)$$

其中 $T_{avg} = -2^\circ\text{C}$, 振幅 $A = 18^\circ\text{C}$, 相位 ϕ 对应冻结期起始。底部为恒温 4°C , 侧向边界为绝热, 确保能量平衡与热通量方向合理。

为揭示运行条件对冻土响应的影响, 设置多组模拟工况。运行温度设为 50°C 、 70°C 和 90°C 三类, 以比较热源强度差异; 保温层厚度设为20mm、40mm和60mm, 分析隔热性能对温度场与应力场的调控作用; 回填材料选取砂土、粉质黏土和泡沫混合土三类, 热导率依次降低, 用于研究导热差异的影响。每组工况的时间尺度为一年(365天), 时间步长1小时, 地表温度周期变化模拟冻结-融化全过程。另设置无管道与无保温层两种对照模型, 以量化热源存在及保温性能对地温扰动和结构应力的贡献。模型初始化时通过稳态热传导计算确定初始地温场, 地温梯度约 $0.03^\circ\text{C}/\text{m}$, 地表温度 -1°C 、深层温度 4°C 。自重应力场按各层密度计算, 底部固定、侧向约束、上表面自由。经过多轮调试后, 模型在初始时刻达到热-力平衡, 为后续动态模拟提供稳定基础。

3 热-力耦合效应分析

3.1 温度场与冻结界面演化规律

模拟结果表明, 热力管道运行引起的温度场扰动具有明显的时空非对称性。由于管道长期处于高温状态, 周围土体形成向外扩散的热晕区, 其等温线呈椭圆状分布, 沿水平方向延伸大于竖向方向, 表明热量在地表层和冻土层中的传导阻力不同。管道温度越高, 热晕区范围越大。当管道运行温度由 50°C 提高至 90°C 时, 受影响半径由1.2m扩大至2.4m, 冻结界面向下迁移深度减少约30%, 显示出强烈的热解冻效应。冻结界面随季节性变化呈周期性波动。冬季冻结期, 地表温度持续下降, 冻结前沿逐步向下推进; 但在管道热源影响下, 冻结速度明显减缓, 局部甚至形成稳定的未冻区^[3]。春融期时, 管道周围土体温度仍高于 0°C , 融化带扩大, 冻结层厚度显著减小。地表温度变化与地下温度分布之间存在时间滞后, 滞后期约为30-40天, 主要由潜热释放与导热系数变化引起。

保温层厚度对温度场的调控作用明显。模拟结果显示,当保温层由20mm增加至60mm时,管道外壁温度降幅达8-10℃,热影响半径减小约45%,冻结层厚度几乎恢复至无管道条件下的自然状态。由此可见,提高保温性能是减轻热扰动最有效的技术途径。回填材料热导率的差异亦会显著影响热场分布:采用泡沫混合土(热导率约0.5W/m·K)可将冻结界面下移深度降低约20%,相较于砂土具有更好的隔热效果。

3.2 土体变形与应力响应特征

温度场扰动直接引起土体变形与应力分布的时空演化。冻结期内,地表降温导致上部土体体积膨胀,管道上方形成冻胀区;而下部受热膨胀减弱、体积收缩,表现为“上隆下陷”的不均变形。模拟结果显示,冻胀最大值出现在管道上方约0.3m处,垂向位移约4-5mm。融化期内,冰晶消失使孔隙塌陷、体积收缩,形成融沉,且累积塑性变形逐渐增强,地表沉降量约为冻胀峰值的1.2倍,呈现“胀小沉大”的特征。应力场分析表明,热应力与自重应力叠加后,在管道顶部及两侧形成明显应力集中区^[4]。冻结阶段上部约束增强,顶端出现压应力峰值约150kPa;融化阶段应力反向为拉应力,易诱发裂隙扩展。运行温度越高,应力集中越显著,当温度升至90℃时,顶侧拉应力较基础工况增幅约40%,表明高温运行将加剧土体抗剪强度衰减与变形风险^[5]。此外,管道与土体接触面的应力呈周期性变化。冻结期冰晶生长提高接触刚度,压力升高;融化期界面滑移增强,摩阻力下降。高含水率条件下,该循环作用更强,放大热-力响应。由此可见,长期冻融交替导致接触状态与应力模式不断变化,是寒区热力管道产生累积变形的主要机理之一。

4 结语

通过基于FLAC3D的数值模拟分析,揭示了季节性冻土区热力管道运行过程中土体的温度变化、应力响应与变形特征。研

究表明,管道散热显著影响冻结层厚度及地温分布,热-力耦合效应导致局部应力集中与冻胀融沉交替。保温层厚度、回填材料导热性能及运行温度是决定系统稳定性的关键因素。研究结果为寒区热力管网设计、保温结构优化及地基变形控制提供了科学依据和理论支撑。

[参考文献]

- [1]董旭光,董建华,何天虎.多年冻土边坡的水热力耦合分析及软件开发[J].中国地质灾害与防治学报,2020,31(4):77-84.
- [2]魏道凯,荆皓,陈琦,等.寒区土体一维水-热-力耦合模型与数值分析[J].自然灾害学报,2022,31(05):150-157.
- [3]刘松涛.直埋供热管及土体系统的热力耦合分析[D].黑龙江大学,2023.
- [4]刘建平.冻土融沉时管道应力预测与环焊缝适用性评价方法研究[D].中国石油大学(北京),2022.
- [5]王飞,李国玉,马巍.多年冻土区输油管道-管周冻土热力相互作用研究进展[J].冰川冻土,2022,44(01):217-228.

作者简介:

于晓杰(1972--),男,汉族,内蒙古四子王旗人,本科,副高级工程师,研究方向:公路工程。

孔令杰(1978--),男,汉族,河北南宫人,本科,工程师,研究方向:公路工程。

田宇婷(1994--),女,汉族,内蒙古巴彦淖尔人,硕士,助理工程师,研究方向:建筑设计及其理论。

王明(1992--),男,满族,河北人,本科,工程师,研究方向:土建工程。

郭宏宇(1992--),男,汉族,内蒙古和林格尔人,本科,工程师,研究方向:工程技术。