

基于规范考虑水分迁移下饱和正冻土的各向异性冻胀系数研究

葛 辉,郭春香,张 蕾

Anisotropic frost heaving coefficient of saturated permafrost considering moisture migration process based on standards GE Hui, GUO Chunxiang, and ZHANG Lei

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202312037

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冷端温度及解冻条件对原状海相软土冻融前后物理特性影响研究

A study of the influences of freezing temperature and thawing conditions on physical properties of marine soft soil before and after freezing-thawing

杨平, 刁鹏程, 张婷, 杨国清 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 96-104

地下水位波动带三氮迁移转化过程研究进展

Advances in researches on ammonia, nitrite and nitrate on migration and transformation in the groundwater level fluctuation zone 刘鑫, 左锐, 王金生, 何柱锟, 李桥 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 27–36

水位波动下包气带透镜体影响LNAPL迁移的数值模拟研究

A numerical simulation study of the effect of the vadose zone with lenses on LNAPL migration under the fluctuating water table 潘明浩, 时健, 左锐, 赵晓, 刘嘉蔚, 薛镇坤, 王金生, 胡立堂 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 154–163

"引哈济党"工程对敦煌盆地地下水位影响的数值模拟研究

Numerical simulation studies of the influences of water transferring project from the Haerteng River to the Dang River on groundwater levels in the Dunhuang Basin

何剑波,李玉山,胡立堂,尹政,胡彦斌 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 34-43

永定河生态补水的地下水位动态响应

Response of groundwater regime to ecological water replenishment of the Yongding River 胡立堂, 郭建丽, 张寿全, 孙康宁, 杨郑秋 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 5-11

半干旱地区地表--地下水系统水热运移与裸土蒸发研究

Hydrothermal transfer and bare soil evaporation in surface-groundwater systems in semi-arid areas 马稚桐, 王文科, 赵明, 黄金廷, 卢艳莹, 侯昕悦, 王一 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 7-14



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202312037

葛辉,郭春香,张蕾.基于规范考虑水分迁移下饱和正冻土的各向异性冻胀系数研究 [J].水文地质工程地质,2025,52(4):255-263.

GE Hui, GUO Chunxiang, ZHANG Lei. Anisotropic frost heaving coefficient of saturated permafrost considering moisture migration process based on standards[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(4): 255-263.

基于规范考虑水分迁移下饱和正冻土的各向异性 冻胀系数研究

葛 辉¹,郭春香¹,张 蕾²

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070;2. 陕西省水利电力勘测设计研究院, 陕西 西安 710001)

摘要: 正冻土冻胀是寒区工程产生冻害的关键因素,其冻胀过程是水热力相互耦合的动态作用结果,在开放系统中,温度、 温度梯度、含水率、水分补给强度等都是影响正冻土冻胀变形的重要因素。冻土冻胀是水分迁移产生的竖直方向分凝冻 胀和原位冻胀的共同作用,其冻胀力学特性属于各向异性。参考规范内土体含冰量随冻结的变化过程,考虑泊松比、地下 水位深度、降温速率等因素,得到正冻土的在冻结过程中水平与竖直方向的冻胀系数的计算方法,通过对比粉土和粉质黏 土的冻胀系数,计算结果与试验结果吻合较好。案例中粉土在-0.2 ~ -3.0 ℃、0.2 ~ 1.0 m范围内竖向冻胀系数为-1.37× 10⁻³ ~ -7.67×10⁻³,水平向冻胀系数为-0.81×10⁻³ ~ -4.85×10⁻³,差值百分比为 10.4% ~ 77.7%,说明考虑分凝冻胀产生的各向异 性是必要的。研究提出的水平与竖直方向的冻胀系数计算方法,可以为科研和设计工作提供参考依据。 关键词: 正冻土;水分迁移;温度;地下水位深度;冻胀系数

中图分类号: TU445 文献标志码: A 文章编号: 1000-3665(2025)04-0255-09

Anisotropic frost heaving coefficient of saturated permafrost considering moisture migration process based on standards

GE Hui¹, GUO Chunxiang¹, ZHANG Lei²

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Shaanxi Province Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design,

Xi'an, Shaanxi 710001, China)

Abstract: Frost heave in positive permafrost is a critical factor leading to frost damage of engineering in the cold region. The frost heave process results from the dynamic interaction of hydro-thermal forces. In an open system, factors such as temperature, temperature gradient, water content, and water supply intensity significantly influence the deformation of positive permafrost frost heave. Frost heave in permafrost is the combined effect of vertical segregated frost heave due to moisture migration and in-situ frost heave, and its mechanical characteristics of frost heave are anisotropic. This study, referencing the standard process of ice content variation in soils during freezing,

收稿日期: 2023-12-22; 修订日期: 2024-06-19 投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41902272);甘肃省自然科学基金项目(20JR10RA235)

第一作者: 葛辉(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事冻土工程研究。E-mail: 645459556@qq.com

通讯作者:郭春香(1978—),女,博士,副教授,主要从事冻土工程研究、寒区工程数值计算研究。E-mail:guocx@mail.lzjtu.cn

takes into account factors such as Poisson's ratio, groundwater table depth, and cooling rate. the calculation methods for the frost heave coefficients in the horizontal and vertical directions during the freezing process of positive permafrost were derived. By comparing the frost heave coefficients of silt and silty clay, the results show good agreement with experimental data. In the case study, the vertical frost heave coefficient of silt ranges from -1.37×10^{-3} to -7.67×10^{-3} , and the horizontal frost heave coefficient ranges from -0.81×10^{-3} to -4.85×10^{-3} within the temperature range of -0.2 °C to -3.0 °C and a depth range of 0.2 m to 1.0 m. The percentage difference ranges from 10.4% to 77.7%, indicating the necessity of considering the anisotropy resulting from segregated frost heave. The calculation methods for horizontal and vertical frost heave coefficients in this study can provide valuable information for frost damage of engineering in the cold region.

Keywords: permafrost; moisture migration; temperature; depth of water table; frost heaving coefficient

冻土是一种温度在0℃以下,且土颗粒被冰所胶 结的特殊岩土^[1],是由气体、水、冰、土颗粒组成的各 向异性非均质四相复合体。在开放系统中土的冻胀 是土体中的液态水、气态水以及迁移水分相变成冰体 积膨胀的过程,土颗粒、冰以及未冻水在水、热、力等 各项因素的作用下相互影响^[2-3],在这个过程中水分 迁移是影响土体冻胀量的重要因素^[4-5]。冻胀系数是 描述土体在冻结过程中膨胀程度的参数,是材料的基 本属性。

按照温度、含冰状况和水热输运特征, 冻土可分为已冻土、正冻土、融土等三个互相联系的子系统⁶⁶。 正冻土是指土体温度处于0°C以下, 且在冷却过程中 有冰晶形成和生长(冻融界面移动)的冻土。

20世纪30年代, Taber等^[7]用苯代替水在试验中 证明了水分迁移是土体冻胀的主要因素, 否定了早期 对冻胀机理的理解, 开辟了冻胀研究的新方向。在此 基础上, 国内外学者对土体冻胀过程中的水分迁移量 以及影响水分迁移的因素进行了研究, 例如毛细冻胀 理论^[8]将冻胀过程中毛细吸力作为水分迁移的主要驱 动力, 对水分迁移引起的冻胀量作出了定量解释; 分 凝冻胀理论^[9]认为温度梯度是未冻水向已冻区迁移的 主要原因; 分凝势理论^[10]将热状况达到稳定的正冻土 外界水分迁移入流通量与温度梯度的比值定义为分 凝势, 认为水分迁移速率与温度梯度成正比。

基于不同的冻胀理论模型,考虑不同因素对土体 冻胀的影响,郭富强等^[11] 通过分析不同地下水位冻胀 观测数据提出地下水位降低 0.5~1.0 m,冻胀率减小 71%~83.8%;杨自友等^[12]考虑冻土冻融循环及不均匀 冻胀特性,研究了非静水压力作用下不均匀冻胀系 数、体积冻胀率对应力场的影响。由于分凝冻胀中的 水分迁移方向以及土体围压作用,土体冻胀变形为各 向异性,蔡海兵等^[13] 基于冻土正交各向异性变形特 征,得到了考虑各向异性的热应变分量,建立了地层 冻胀的弹塑性热力耦合数学模型,并验证了考虑冻胀 各向异性的必要性;王贺等^[14] 仅考虑原位冻胀产生的 冻胀变形,通过弹性力学方法引入土的泊松比,得到 了正冻土的冻胀系数与冻胀率之间的关系。

开放系统中正冻土冻结过程由于地下水位深度、 水分迁移强度、冻胀的各向异性等影响因素,目前仍 无法对冻胀量进行准确的定量表示,由于土体参数的 复杂性,这些理论中涉及的土体参数较难确定,且计 算过程复杂,在工程实际中应用较为局限。大部分理 论模型在计算冻胀量时仅考虑分凝冻胀,影响了计算 结果的准确性。为解决以上问题,本文基于《冻土地 区建筑地基基础设计规范》(JGJ 118—2011)^[15]引入地 下水位深度、降温速率等影响因素,通过对开放系统 中饱和正冻土的原位冻胀量和分凝冻胀量累加得到 较为准确的冻胀量计算公式,推导出开放系统中饱和 正冻土冻胀系数与冻胀率、地下水位深度的关系,以 便工程应用。

1 开放系统中饱和正冻土冻胀计算方法

在开放系统中,土的冻胀根据水分来源可以分为 原位冻胀和分凝冻胀,未冻水在温度梯度作用下会产 生可观的水分迁移,从而形成分凝冻胀^[16-18],水分迁 移过程中水由高势能处向低势能处转移,水势差越 大,水分迁移的速率越大^[19-20]。天然条件下由于外界 水分补给及水分迁移的作用,分凝冻胀是构成土体冻 胀的主要分量,很多学者在研究冻胀时通常会忽略原 位冻胀引起的体积变化。研究表明在单向冻结模式 下,有外界水源补给的冻胀率是无水源补给的3~15 倍,原位冻胀量占总冻胀量的 6.25%~25.00%^[21],是一 个区间,因此在某些情况下原位冻胀并不能被忽略, 为了更准确地计算冻胀量,应同时考虑原位水分冻结 及迁移水分冻结引起的体积变化。假设土体为各向 同性的线弹性体,图1为土体发生原位冻胀和分凝冻 胀的微元体示意图,图中 ε_0 为原位冻胀引起的变形 量, ε_r 为外界水分补给后相变引起的变形量。



图 1 土体冻胀弹性微元体示意图 Fig. 1 Schematic diagram of soil frost heave elastic element

开放系统中, 土体 z 方向的变形量为 $\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_f$, 即 土体的总冻胀率(η)等于土体的原位冻胀率(η_0)和分 凝冻胀率(η_f)的总和:

$$\eta = \eta_0 + \eta_f \tag{1}$$

根据冻胀系数(α)的定义α(T)=η/ΔT,其中ΔT为 温度变化量,引入泊松比,得到考虑围压的原位冻胀 率与冻胀系数的关系。分凝冻胀量的计算是建立在 外界水源流入后全部相变为冰的假定上,考虑外界水 分渗透强度和地下水深度得到单位时间外界水源的 入流通量,对入流通量进行累积得到分凝冻胀引起的 土体冻胀变化量。将原位冻胀量和分凝冻胀量累加 得到土体总冻胀量,根据定义得到冻胀系数与冻胀率 的关系式。选取文献中的试验进行同参数计算,将计 算值与试验值进行对比,验证关系式的可靠性。

2 开放系统中饱和正冻土冻胀系数与冻胀 率间的关系

冻土冻胀系数α(T),量纲为Θ⁻¹,是衡量冻土状态 及性质的主要参数之一。冻胀系数是指土体在含水 率不变的情况下,冻结时体积膨胀的比例,是土体体积 增大率与温度下降率之间的比值,与温度变化率呈正比。

冻胀率为土体冻胀总量与冻结深度(不包括冻胀量)的比值^[22],是土体冻结前后体积之差与冻结前土体体积之比,以百分数表示。一般以土体试样冻结前后的高度差(Δz)与冻结前试样高度(h)之比表示,按照式(2)计算^[15]:

$$\eta = \frac{\Delta z}{h' - \Delta z} \times 100\% \tag{2}$$

$$\Delta z$$
——地表冻胀量/mm;

h'——冻层厚度/mm。

在封闭系统中,即没有地下水补给的条件下,η与 含水率(w)间的关系可以按下式计算^[15]:

$$\eta = \frac{1.09\rho_{\rm d}}{2\rho_{\rm w}} (w - w_{\rm p}) \approx 0.8 (w - w_{\rm p}) \tag{3}$$

式中: ρ_d——土的干密度, 取 1.5 g/cm³;

*ρ*_w——水的密度,取 1.0 g/cm³;

wp——塑限含水率/%。

按照实际情况, 土的微元体在 xz、yz 平面受到围 压约束, 只在 z 方向发生变形, 根据弹性力学中按位移 求解温度应力的平面应变问题, 推导出η₀与α(T)之间 的关系^[14]:

$$\eta_{0} = \begin{cases} 0 & T > T_{u} \\ \int_{T_{f}}^{T_{u}} \frac{1+\mu}{1-\mu} \alpha(T) dT & T_{f} \le T \le T_{u} \\ 0 & T < T_{f} \end{cases}$$
(4)

式中: T_f——初始冻结温度/°C;

T_u──完全冻结温度/°C;

μ——泊松比。

相对含冰率指冻土中冰与全部水的质量比,对不同温度(*T_j*)下的相对含冰率进行线性插值得到不同 温度下原位冻胀系数与冻胀率的关系:

$$\alpha_0(T_j) = \frac{\theta_{i(j+1)} - \theta_{ij}}{\theta_i} \frac{\eta_0(1-\mu)}{1+\mu}$$
(5)

式中: $\alpha_0(T_j)$ —温度 T_j 下的原位冻胀系数;

 θ_{ij} 、 $\theta_{i(j+1)}$ — T_j 、 T_{j+1} 下的相对含冰率。

表1为不同类型正冻土在不同温度下的相对含冰量和温度修正系数值^[15],在土体冻结过程中可以通过 相对含冰率判断正冻土的冻结状态,根据此表中的温 度修正系数可以计算土体冻结过程中不同温度下的 相对含冰率:

$$\theta_{ij} = 1 - K_j \quad (j = 1, 2, 3, \cdots)$$
(6)

式中: K_j——不同温度对应的温度修正系数,取值见表1。

表 2 为《冻土地区建筑地基基础设计规范》(JGJ 118—2011)^[15]中的季节冻土冻胀性分类表,根据此表 可以计算不同含水率对应的冻胀率,例如可以采用线 性插值法计算得到:

$$\eta = \eta_1 + \frac{w - w_2}{w_1 - w_2} (\eta_1 - \eta_2) \tag{7}$$

	Table 1	Temperature	correction coe	fficient under o	lifferent soil ty	pes and temper	ratures	
上氏	塑性指标							
工灰		−0.2 °C	−0.5 °C	−1.0 °C	−2.0 °C	−3.0 °C	−5.0 °C	-10.00 °C
砂土	_	0.35	0.22	0.15	0.08	0.07	0.05	0.02
粉土	$I_{\rm p} \leq 10$	0.70	0.50	0.30	0.20	0.15	0.15	0.10
粉质黏土	$10 < I_p \le 13$	0.90	0.65	0.50	0.40	0.35	0.30	0.25
	$13 < I_p \le 17$	1.00	0.80	0.70	0.60	0.50	0.45	0.40
黏土	$17 < I_{p}$	1.10	0.90	0.80	0.70	0.60	0.55	0.50

注:I_p为塑性指数;一表示不适用。

表 2 季节冻土冻胀性分类

Table 2Frost heaving classification of seasonal frozen soil							
土质	w ₀ /%	h _w /m	$\eta/\%$	冻胀等级	冻胀类别		
		>2.0	$\eta \leq 1.0$	Ι	不冻胀		
	$W_0 \cong W_p + 2$	≤2.0	1.0<η≤3.5	Π	起太阳		
	$w_{\rm p}$ +2< $w_{\rm 0}$ < $w_{\rm p}$ +5	>2.0		Ш	初休瓜		
悉 井		≤2.0	35-7560	ш	本叱		
细注土	$w_p + 5 < w_0 \le w_p + 9$	>2.0	5.5<¶≤0.0	ш	0不加K		
		≤2.0	$6.0 \le \eta \le 12.0$	W	强広比		
	$w_{\rm p}$ +9< $w_{\rm 0}$ \$< $w_{\rm p}$ +15	>2.0		IV	班仍不加		
		≤2.0	$\eta > 12.0$	V	特强冻胀		
	$w_0 \leq 19$	>1.5	$\eta \leq 1.0$	Ι	不冻胀		
		≤1.5	$1.0 \le \eta \le 3.5$	Π	弱冻胀		
	$19 < w_0 \le 22$	>1.5	$1.0 \le \eta \le 3.5$	Π	弱冻胀		
粉土		≤1.5	25-7-60	ш	太叱		
初上	$22 < w_0 \le 26$	>1.5	5.5 <i>≤</i> η ≈0.0	ш	0不加K		
		≤1.5	$60 < \pi < 120$	N 7	强広ル		
	$26 < w_0 \le 30$	>1.5	$0.0 \le \eta \le 12.0$	IV	四小小爪		
		≤1.5	$\eta > 12.0$	V	特强冻胀		

注:w₀为冻前天然含水率。

式中:w1、w2--含水率上、下限;

 η_1 、 η_2 ——冻胀率上、下限。

分凝冻胀量为水分迁移产生的聚冰作用引起的 体积增大:

$$\alpha_{\rm f}(T)\Delta T = \eta_{\rm f} = \int_{T_{\rm f}}^{T_{\rm u}} \varepsilon_z \mathrm{d}z = 1.09 \int_0^t q_t \mathrm{d}t \qquad (8)$$

$$\eta_{\rm f} = \eta - \eta_0 \tag{9}$$

式中:
$$\alpha_{f}(T)$$
——分凝冻胀系数;

$$t$$
——水分迁移时间/s。
 $\eta_0 = 0.09n$ (10)

式中:n——孔隙率。

徐学祖等间通过统计分析方法得到入流通量计算

公式:

$$q_t = \frac{KP(t)}{100(h_w + h_f - h_f(t_1))}$$
(11)

式中: *h*_w — 冻前地下水位距设计冻深的最小距离/m; *h*_f — 设计冻深/m; *t*₁ — 冻结温度 *T*_u ~ *T*_f的历时/s;

KP(t)—参透强度,定义为渗透强度与压差的 乘积,可以取最大值(KP)_{max} = 2.872× 10⁻⁵e^{-0.01494P}, P 为外荷载/kPa。

 q_t 可以不考虑外荷载作用、时间因素, $h_f(t)$ 取设计冻深。

入流通量:

$$q_t = \frac{2.872 \times 10^{-5}}{100h_{\rm w}} \tag{12}$$

入流量:

$$Q = q_t \cdot t \tag{13}$$

联立式(7)(8)(11)(12)得:

$$1.09 \cdot \frac{2.872 \times 10^{-5}}{100h_{\rm w}} \cdot t = \eta - \eta_0 = \eta_{\rm f} \tag{14}$$

根据第1节中冻胀系数的定义,将其代入式(14)得:

$$1.09 \cdot \frac{2.872 \times 10^{-5}}{100h_{\rm w}} \cdot t/\Delta T = \alpha_{\rm f}$$
(15)

其中: $t/\Delta T = 1/V_c$, V_c 为降温速度/(°C·h⁻¹)。

联立式(3)(4)(5)(15),得到不同温度下原位冻胀 及水分迁移作用下 x、y、z 三个方向冻胀系数与冻胀 量之间的关系:

$$\begin{cases} \alpha_{x} = \frac{\theta_{i(j+1)} - \theta_{ij}}{\theta_{i}} \frac{\eta_{0}(1-\mu)}{1+\mu} \\ \alpha_{y} = \frac{\theta_{i(j+1)} - \theta_{ij}}{\theta_{i}} \frac{\eta_{0}(1-\mu)}{1+\mu} \\ \alpha_{z} = \frac{\theta_{i(j+1)} - \theta_{ij}}{\theta_{i}} \frac{\eta_{0}(1-\mu)}{1+\mu} + 1.09 \cdot \frac{2.872 \times 10^{-5}}{100h_{w}V_{c}} \end{cases}$$
(16)

3 算例分析

根据文献 [23] 中开放系统中庄河灌区土样单向冻 结试验 1,冻结在低温冻融循环机中进行,土样中大部 分为细粒土,属于低液限粉土,采取底部补水模拟地下 水补给,土样下部铺设透水石。试验 2^[11] 为室外试验, 土样为粉质黏土,采用不同高度的台座模拟不同地下 水位补给。采用试验中的土样参数及边界条件(表 3) 计 算理论冻胀系数,与试验值比较,验证公式的可靠性。

表 3 土体参数及边界条件 Table 3 Soil parameters and boundary conditions

		-
参数	试验1	试验2
土质	粉土	粉质黏土
降温速率/(°C·h-1)	-2.00	-0.07
初始含水率/%	22.00	23.45
泊松比	0.25	0.33
孔隙率	0.30	0.20
塑限含水率/%	21.70	18.50

孔隙率n = 0.3,由式(10)可以得到饱和土在完全 冻结下的原位冻胀量 $\eta_0 = 2.7\%$ 。根据表1可知粉土在 -10~0℃发生冻胀,将温度修正系数代入式(6)得到 完全冻结时的相对含冰率 $\theta_i = 1.0 - 0.1 = 0.9$ 。

采用试验 1 的参数进行试算: 当 h_w =0.5 m, 温度 T_1 =-0.2 °C 时, 相对含冰率 θ_{11} =1.0-0.7=0.3, 在温度 T_0 = 0 °C 时, 土体处于临界状态, 相对含冰率 θ_{10} =0, 计算得 到冻胀系数:

 $\alpha(T_0) = \frac{\theta_{i1} - \theta_{i0}}{\theta_i} \frac{\eta_0(1-\mu)}{1+\mu} + 1.09 \cdot \frac{2.872 \times 10^{-5}}{100h_w V_c} = -5.98 \times 10^{-3}$ (17)

温度 T_2 =-0.5 °C 时,相对含冰率 θ_{i2} =1.0-0.5=0.5,同 样可计算得到冻胀系数 $\alpha(T_1)$ = -4.36×10⁻³。

同理,通过试验1参数得到不同*h*_w、不同温度下 z方向的冻胀系数(a.),计算结果见表4。

表 4 不同 h_w 、不同温度下的 α_z Table 4 α_z at different water table depths and temperatures

温度	$\alpha_z / 10^{-3}$						
/°C	<i>h</i> _w =0.2 m	<i>h</i> _w =0.4 m	<i>h</i> _w =0.5 m	<i>h</i> _w =0.6 m	<i>h</i> _w =0.8 m	$h_{\rm w}=1$ m	
0	0	0	0	0	0	0	
-0.2	-7.67	-6.26	-5.98	-5.79	-5.55	-5.41	
-0.5	-6.05	-4.64	-4.36	-4.17	-3.93	-3.79	
-1.0	-6.05	-4.64	-4.36	-4.17	-3.93	-3.79	
-2.0	-4.44	-3.03	-2.75	-2.56	-2.32	-2.18	
-3.0	-3.63	-2.22	-1.94	-1.75	-1.51	-1.37	
-5.0	_	_	_	_	—	_	
-10.0	-3.63	-2.22	-1.94	-1.75	-1.51	-1.37	

根据试验 1, *h*_w=0 m、*w*₀ = 22%粉土在开放系统单 向冻结试验中不同温度下的η及 *α*. 见表 5。

表 5 不同温度下的 η 及 α_z 试验值 Table 5 Experimental values of η , α_z at different temperatures

-		-
温度/°C	$\eta / \%$	$\alpha_{z}/10^{-3}$
0	0	0
-0.5	0.2	-4.00
-1.8	1.6	-8.89
-3.5	2.2	-6.29
-5.0	2.9	-5.80
-7.5	3.4	-4.53
-9.4	3.6	-3.83
-11.5	3.8	-3.30

试验2计算方法相同,此处不再赘述。 3.1 冻胀系数计算值与试验值对比

对 h_w=0.2 m 冻胀系数计算值与 h_w=0 m 试验值对 比,验证公式的有效性。对比值见图 2,计算值与试验 值随温度的变化趋势一致, h_w=0.2 m 计算值小于 h_w= 0 m 试验值,随着地下水位的降低,冻胀系数减小,说 明 h_w与冻胀系数呈反比,与实际相符。



图 2 冻胀系数 h_w=0.2 m 计算值与 h_w=0 m 试验值对比图 Fig. 2 Comparison between the calculated value of frost heave coefficient h_w=0.2 m and the experimental value h_w=0 m

冻胀系数计算值在-0.2~0℃时变化率较大,呈 上升趋势,温度 *T*=0.2℃时达到峰值,-3.0~-0.2℃ 时呈下降趋势,-10~-3℃时随着温度的下降趋于平 缓。在开放系统单向冻结试验中,水源距试样距离 *h*_w=0 m,冻胀系数试验值大于*h*_w=0.2 m 计算值,地下水 位降低,渗透强度随之减小,冻胀系数减小。冻胀系 数试验值在-1.8~0℃时变化率较大,呈上升趋势,温 度 *T*=-1.8℃时达到峰值,-3.5~-1.8℃时呈下降趋 势,-11.5~-3.5℃时随着温度的下降趋于平缓,试验 值与计算值总体趋势相同。冻胀系数试验峰值滞后 于计算值,这是因为试验土样大部分为细粒土,存在 由于未冻水含量与温度变化密切相关,正冻土在 冻结过程中,不同温度下冻结强度不同,崔托维奇^[24] 将正冻土划分为剧烈相变区(下降1℃含冰量变化≥ 1.0%)、过渡相变区(下降1℃含冰量变化0.1%~1.0%)、 已冻结区(下降1℃含冰量变化≤0.1%)。

冻胀系数随温度变化的三个阶段符合崔托维奇 按照温度划分的剧烈相变区、过渡相变区、已冻结区。

试验 2 在室外进行,采用 0.5, 1.0 m 台座模拟 0.5, 1.0 m 地下水位高度,土样为粉质黏土,降温速率通过 日平均气温计算得到,为 0.07 °C/d,具体计算参数见 表 3 中试验 2 参数。通过式(16)计算得到 h_w=0.5, 1.0 m 冻胀系数值,与试验值对比见图 3。



图 3 相同地下水位高度冻胀系数计算值与试验值对比图 Fig. 3 Comparison between calculated and experimental values of frost heave coefficient at the same groundwater level

从图中可以看到在相同地下水位条件下,计算值 与试验值变化趋势一致, h_w =0.5 m冻胀系数值在 $-0.2 \,^{\circ}$ C达到峰值 -15.0×10^{-3} ,试验值在 $-0.35 \,^{\circ}$ C达到 峰值 -14.5×10^{-3} ,峰值相差 0.5×10^{-3} 。 h_w =1.0 m冻胀系 数值在 $-0.2 \,^{\circ}$ C达到峰值 -4.1×10^{-3} ,试验值在 $-0.35 \,^{\circ}$ C 达到峰值 -3.5×10^{-3} ,峰值相差 0.6×10^{-3} 。冻胀系数试 验值整体低于计算值,这是因为计算值采用日平均气 温,而室外日气温处于昼夜波动状态,冻胀相对较 弱。冻胀系数变化趋势与试验1相同,符合剧烈相变 区、过渡相变区、已冻结区的划分。随着地下水位的 降低,冻胀系数值减小, h_w =0.5 m 与 h_w =1.0 m冻胀系数 计算值差值达到 72.7%,试验值差值为 75.9%,进一步 验证了不同地下水位条件公式的有效性。

3.2 冻胀系数各向异性必要性

对比不同温度不同地下水位深度各方向通过试验1参数计算得到的冻胀系数值,定义冻胀系数差值 百分比为(*a_{xy}*-*a_z*)/*a_z*,来描述不同方向冻胀系数值的 差异情况。不同温度不同地下水位深度各向异性冻 胀系数计算对比值见表 6。

表 6 不同温度不同地下水位深度各向异性冻胀系数比较 Table 6 Comparison of anisotropic frost heave coefficients at different temperatures and different groundwater depths

1 /	冻胀系数	计算值					
h _w /m		−0.2 °C	−0.5 °C	−2.0 °C	−3.0 °C		
	$\alpha_{2}/10^{-3}$	-7.67	-6.05	-4.44	-3.63		
0.2	$\alpha_{x,y}/10^{-3}$	-4.85	-3.23	-1.62	-0.81		
	差值百分比	36.8%	46.6%	63.5%	77.7%		
	$\alpha_{2}/10^{-3}$	-6.26	-4.64	-3.03	-2.22		
0.4	$\alpha_{x,y}/10^{-3}$	-4.85	-3.23	-1.62	-0.81		
	差值百分比	22.5%	30.4%	46.5%	63.5%		
	$\alpha_{2}/10^{-3}$	-5.98	-4.36	-2.75	-1.94		
0.5	$\alpha_{x,y}/10^{-3}$	-4.85	-3.23	-1.62	-0.81		
	差值百分比	18.9%	25.9%	41.1%	58.2%		
	$\alpha_{2}/10^{-3}$	-5.79	-4.17	-2.56	-1.75		
0.6	$\alpha_{x,y}/10^{-3}$	-4.85	-3.23	-1.62	-0.81		
	差值百分比	16.2%	22.5%	36.7%	53.7%		
0.8	$\alpha_{2}/10^{-3}$	-5.55	-3.93	-2.32	-1.51		
	$\alpha_{x,y}/10^{-3}$	-4.85	-3.23	-1.62	-0.81		
	差值百分比	12.6%	17.8%	30.2%	46.4%		
1.0	$\alpha_{2}/10^{-3}$	-5.41	-3.79	-2.18	-1.37		
	$\alpha_{x,y}/10^{-3}$	-4.85	-3.23	-1.62	-0.81		
	差值百分比	10.4%	14.8%	25.7%	40.9%		

由表6可知,给定温度条件,随 h_w的增大,冻胀系 数差值百分比减小,在-3.0~-0.2 ℃,0.2~1.0 m 范围 内冻胀系数差值百分比为 10.4%~77.7%,不同方向的 差值并不能被忽略,这说明了研究冻胀系数各向异性 的必要性;温度为-0.2 ℃时,冻胀系数差值百分比为 10.4%,这说明在剧烈相变区,地下水位较深,水分补 给较弱时, a_{xy}也不能被忽略。

图 4 为不同温度下冻胀系数差值百分比随地下水 位深度变化图,给定地下水位深度,随温度的降低,冻 胀系数差值百分比增大,这是因为在剧烈相变区孔隙 内原有水分相变成冰,原位冻胀作用明显,冻胀系数 差值百分比较小, *a*_{xy}被忽略后对结果准确性影响较 大;随着温度的降低,原位冻胀作用减弱,外界水分依 然在温度梯度的作用下向上迁移相变成冰,不同方向 冻胀系数差值百分比增大,这与 Konrad^[10]提出的当正 冻土的热状况达到稳定时,冻结缘附近水分迁移入流 通量与温度梯度呈一个比值相符合。

3.3 冻胀系数与地下水位深度的关系

水源补给是冻结时水分迁移及由此所产生冻胀 的持续性与强弱的直接原因,而地下水位深度是水源 补给强度的重要因素。大量试验数据和文献^[24-28]表明,





在相同土体参数、边界条件下,地下水位深度与冻胀 率呈负指数关系:

$$\eta = a \mathrm{e}^{-bh_{\mathrm{w}}} \tag{18}$$

式中:a、b——与当地气候、土质等因素有关的经验系数。

根据本文推导的冻胀系数计算公式采用试验1参数分别计算不同温度下地下水位深度 h_w=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 m 时 z 方向冻胀系数 a_z, 如图 5 所示。





随着地下水位深度的增加,冻胀系数值减小,由 于室内冻胀试验水位深度为0,试验值大于计算值。 这是由于当地下水埋深较浅时,土体在冻胀变形过程 中水分补给量较大,整体冻胀较为剧烈。

对比冻胀趋于稳定时相邻地下水位深度的冻胀 系数值,0.2~0.4 m时冻胀系数值减小38.8%;0.4~0.6 m 时减小21.2%;0.6~0.8 m时减小13.7%;0.8~1.0 m时 减小9.3%。

冻胀系数计算值α₋随地下水位深度变化见图 6, 随着地下水位的降低,α₋减小且变化率呈降低趋势, 其变化并不是线性的,这表明地下水位降低到一定高 度后,水分补给变化减小,趋于稳定,地下水位深度对 冻胀系数的影响削弱,α₂与地下水位呈负指数关系, 这与式(18)得到的结论相同,进一步印证了本文提出 公式的准确性。



图 6 z 方向冻胀系数随地下水位深度变化图 Fig. 6 Variation of frost heaving coefficient in the z direction

通过线性插值得到 0, -1, -2, -3, -5, -10 ℃ 冻胀 系数试验值, 与 h_w=1 m 的冻胀系数计算值进行差值比 较。土的冻胀稳定后, 地下水位高度降低 1 m 冻胀系 数减小 62.8% ~ 80.6%, 不同温度下冻胀系数减小百分 率见表 7, 与郭富强等^[7] 通过试验得到当地下水位高 度降低 0.5 ~ 1.0 m 后, 冻胀率将减小 71.0% ~ 83.8% 的 结论基本吻合。

表 7 不同温度下地下水位深度对冻胀系数影响 Table 7 Influence of groundwater depth on frost heave coefficient at different temperatures

温度/℃ a₂	$(h_{\rm w} = 0 {\rm ~m}) / 10^{-3}$	$\alpha_z~(h_{\rm w}=1~{\rm m})~/10^{-3}$	冻胀系数减小百分率/%
0	0	0	0
-1	-5.88	-3.79	35.5
-2	-8.58	-2.18	74.6
-3	-7.05	-1.37	80.6
-5	-5.80	—	—
-10	-3.68	-1.37	62.8

4 结论

(1)通过试验对照,本文冻胀系数理论计算结果 与试验值在不同温度下变化趋势相同,在计算值中也 可以体现土体冻胀剧烈相变区、过渡相变区、已冻结 区,不同地下水位深度对冻胀系数的影响与试验值基 本一致,验证了关系式的准确性。

(2)通过不同方向冻胀系数差值百分比对比,不同方向冻胀系数的差值不能被忽略,冻胀系数各向异性具有必要性。不同方向冻胀系数的差值百分比与地下水位距设计冻深的最小距离 h_w呈反比,越靠近剧烈相变区、地下水位距离设计冻深越远,不同方向冻

胀系数差值越小,原位冻胀在冻胀过程中的占比就越 大,产生的冻胀作用明显, *α*_{xy}不能被忽略。

(3)z方向冻胀系数 a_z与地下水位距设计冻深的 最小距离 h_w呈负指数关系,土体冻胀稳定后,地下水 位降低 1 m, a_z减小 62.8% ~ 80.6%。在开放系统中地 下水深度是影响土体冻胀率、冻胀系数的重要因素。

由于土体冻胀是多物理场耦合的结果,且土体冻 胀影响因素具有复杂性,进一步的研究还需要增加补 水条件中的外部压力条件和外界降水条件,以及考虑 在水分迁移过程中水热力相互耦合的影响。

参考文献(References):

- [1] 马巍,王大雁.冻土力学 [M].北京:科学出版社,
 2014. [MA Wei, WANG Dayan. Mechanics of frozen soil[M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)]
- [2] 陈佩佩,尚智,王熳祺,等.寒区高速铁路冻土路基的水热耦合响应特性分析[J].水文地质工程地质,2025,52(3):153-162.
 [CHEN Peipei, SHANG Zhi,WANG Manqi, et al. Analysis of hydrothermal coupling response characteristics of frozen soil subgrade of high-speed railway in cold region[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(3): 153 162. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 温智,邓友生,冯文杰,等.冻土水分迁移机理研究: 评述与展望[J].冰川冻土,2023,45(2):588-598.
 [WEN Zhi, DENG Yousheng, FENG Wenjie, et al. Study on the mechanism of moisture migration in freezing soils: Review and prospect[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(2):588-598. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 胡建华, 汪稔, 胡明鉴, 等. 多年冻土路堤水平排水板的作用机理与试验研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(5): 1451 1456. [HU Jianhua, WANG Ren, HU Mingjian, et al. Test and mechanism of horizontal plastic drain in permafrost regions embankment[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2009, 40(5): 1451 1456. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 沈凌铠,周保,魏刚,等.气温变化对多年冻土斜坡稳定性的影响——以青海省浅层冻土滑坡为例[J].中国地质灾害与防治学报,2023,34(1):8-16.[SHENLingkai, ZHOU Bao, WEI Gang, et al. Influence of air temperature change on stability of permafrost slope: A case study of shallow permafrost landslide in Qinghai Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(1):8-16. (in Chinese with English abstract)]

[6] 徐学祖,王家澄,张立新.冻土物理学[M].北京:科

学出版社, 2001. [XU Xuezu, WANG Jiacheng, ZHANG Lixin. Permafrost physics [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)]

- [7] TABER S. The mechanics of frost heaving [J]. the Journal of Geology, 1930, 38(4): 303 317.
- [8] EVERETT D H. The thermodynamics of frost damage to porous solids[J]. Transactions of the Faraday Society, 1961, 57: 1541 – 1551.
- [9] TAKAGI S. Segregation freezing as the cause of suction force for ice lens formation[J]. Engineering Geology, 1979, 13(1/2/3/4): 93 - 100.
- [10] KONRAD J M, MORGENSTERN N R. The segregation potential of a freezing soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1981, 18(4): 482 - 491.
- [11] 郭富强, 史海滨, 程满金, 等. 不同地下水位下渠基冻 胀规律与保温板适宜厚度确定[J]. 农业工程学报, 2018, 34(19): 95 - 103. [GUO Fuqiang, SHI Haibin, CHENG Manjin, et al. Law of frost heave of canal foundation and appropriate thickness of insulation board under different groundwater levels[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(19): 95 - 103. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 杨自友,高鹏,尚阳光,等.考虑冻融循环效应的非静水压寒区隧道应力场弹性分析[J].隧道建设(中英文),2023,43(增刊2):48-58. [YANG Ziyou, GAO Peng, SHANG Yangguang, et al. Elastic analysis of tunnel stress field in cold zone under non-hydrostatic pressure considering freeze-thaw cycle effect[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(Sup2):48-58. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 蔡海兵,程桦,姚直书,等.基于冻土正交各向异性冻 胀变形的隧道冻结期地层位移数值分析 [J].岩石力 学与工程学报,2015,34(8):1667-1676. [CAI Haibing, CHENG Hua, YAO Zhishu, et al. Numerical analysis of ground displacement due to orthotropic frost heave of frozen soil in freezing period of tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(8): 1667 - 1676. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 王贺,郭春香,吴亚平,等.基于弹性力学考虑冰水相变过程下多年冻土冻胀系数与冻胀率之间的关系
 [J].岩石力学与工程学报,2018,37(12):2839-2845.
 [WANG He, GUO Chunxiang, WU Yaping, et al. Relationship between the frost-heaving coefficient and the frost-heaving rate of permafrost soils considering the ice water phase transformation based on elastic mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(12): 2839 2845. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 冻土地区建筑 地基基础设计规范: JGJ 118—2011[S]. 北京: 中国建

筑工业出版社, 2012. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of soil foundation of building in frozen soil region: JGJ 118—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)]

- [16] 周家作, 韦昌富, 李东庆, 等. 饱和粉土冻胀过程试验研究及数值模拟 [J]. 岩石力学与工程学, 2017, 36(2):485-495. [ZHOU Jiazuo, WEI Changfu, LI Dongqing, et al. Experimental study and numerical simulation to the process of frost heave in saturated silt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(2):485-495. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 刘泉声,黄诗冰,康永水,等.低温饱和岩石未冻水含量与冻胀变形模型研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(10):2000-2012.[LIU Quansheng, HUANG Shibing, KANG Yongshui, et al. Study of unfrozen water content and frost heave model for saturated rock under low temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(10): 2000 2012. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 周洁,李泽垚,唐益群,等.软黏土三维水-热-力耦合 冻融模型及应用[J].哈尔滨工业大学学报,2022,54(2):117 125. [ZHOU Jie, LI Zeyao, TANG Yiqun, et al. Three-dimensional thermal-hydraulic-mechanical coupling frost thaw model of soft clay and its application[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(2): 117 125. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 于钱米,部博文,牛吉强,等.细粒土空间不均匀分布 对水分迁移的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2020,51(12):3503 - 3514. [YU Qianmi, TAI Bowen, NIU Jiqiang, et al. The effect of unevenly distributed fine-grained soil in space on moisture migration[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2020, 51(12): 3503 - 3514. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 李奇龙,周佳庆,李长冬,等.气候变化环境下青藏高原含冰冰碛土斜坡水热力耦合特性与长期稳定性[J].地质科技通报,2025,44(1):112-125.[LIQilong,ZHOU Jiaqing,LI Changdong, et al. Coupling characteristics and stability evolution of ice-rich moraine soil slopes on the Tibetan Plateau under climate change[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(1): 112 125. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 王天亮, 王海航, 宋宏芳, 等. 人工冻结粉质黏土力学性能演化规律研究 [J]. 中国铁道科学, 2019, 40(1): 1 - 7. [WANG Tianliang, WANG Haihang, SONG Hongfang, et al. Evolution laws of mechanical properties of artificially frozen silty clay[J]. China Railway Science, 2019, 40(1): 1 - 7. (in Chinese with English abstract)]

- [22] 唐益群,洪军,杨坪,等.人工冻结作用下淤泥质黏土 冻胀特性试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2009, 31(5): 772 - 776. [TANG Yiqun, HONG Jun, YANG Ping, et al. Frost-heaving behaviors of mucky clay by artificial horizontal freezing method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(5): 772 - 776. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 孙忠臣. 庄河灌区渠基土冻胀试验研究及保温板防 冻厚度数值模拟分析 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020. [SUN Zhongchen. Experimental study on frost heave of canal subsoil in Zhuanghe Irrigation Area and numerical simulation analysis of anti-frost thickness of insulation board[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 崔托维奇. 冻土力学 [M]. 张长庆, 朱元林, 译. 北京: 科学出版社, 1985. [TSYTOVICH H A. The mechanics of frozen ground [M]. ZHANG Changqing, ZHU Yuanlin, trans. Beijing: Science Press, 1985. (in Chinese)]
- [25] 陈肖柏,刘建坤,刘鸿绪,等.土的冻结作用与地基
 [M].北京:科学出版社,2006. [CHEN Xiaobai, LIU Jiankun, LIU Hongxu, et al. Frost action of soil and foundation engineering[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)]
- [26] 肖旻,王正中,刘铨鸿,等.考虑冻土与结构相互作用的梯形渠道冻胀破坏弹性地基梁模型[J].水利学报,2017,48(10):1229-1239. [XIAO Min, WANG Zhengzhong, LIU Quanhong, et al. Elastic foundation beam model of frost heave damage of trapezoidal canal considering interaction between frozen soil and lining stucture[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(10): 1229 1239. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 何鹏飞, 候光亮, 董建华, 等. 梯形渠道衬砌冻胀破坏 弹性地基板模型 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(23):
 91 100. [HE Pengfei, HOU Guangliang, DONG Jianhua, et al. Elastic foundation plate model for the frost heave damage of trapezoidal canal lining[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(23): 91 100. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 王正中,孙涛,郑艾磊,等.水-热-力耦合作用下寒区 弧底梯形渠道结构优化设计 [J].中南大学学报(自 然科学版), 2023, 54(5): 1916 - 1929. [WANG Zhengzhong, SUN Tao, ZHENG Ailei, et al. Structural optimization design for trapezoidal canal with arc-bottom during thermal-moisture-mechanical coupling in cold regions[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(5): 1916 - 1929. (in Chinese with English abstract)]