

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.032



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



季冻黄土地区框锚边坡预应力锚杆内力计算方法

李伟^{1a}, 李元勋^{1a,1b}, 李辉^{1a,1b}, 董勤喜², 向田^{1a}

(1. 青海大学 a. 土木水利学院; b. 青海省建筑节能材料与工程安全重点实验室, 西宁 810016;

2. 海南大学 土木建筑工程学院, 海口 570228)

摘要: 冻融土体与锚杆之间相互作用机理研究的不足, 导致工程实践中未能充分考虑土体冻融对锚杆内力的影响。针对该问题, 基于西宁市季冻湿陷性黄土冻融循环三轴剪切试验, 建立考虑冻融次数影响的湿陷性黄土黏聚力经验关系式; 根据锚固体与周围土层的变形协调关系, 推导冻融条件下框架预应力锚杆锚固段轴力和剪应力的解析式, 将理论计算结果与现场试验结果进行对比验证, 并分析冻融次数对锚固段轴力和剪应力的影响。结果表明: 随冻融次数的增加, 土体黏聚力呈指数型下降, 锚固段轴力和剪应力在前3次冻融循环中急剧增大, 冻融次数达到7次后趋于稳定; 相较锚固段末端, 锚固段始端轴力受冻融次数的影响更大, 但锚固段始端至末端的剪应力随冻融次数的变化规律基本相同; 现场试验结果验证了计算方法的合理性。

关键词: 土体冻融; 框锚边坡; 湿陷性黄土; 黏聚力; 锚杆内力

中图分类号: TU444 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2024)04-0075-07

Calculation and analysis of internal forces of prestressed anchor on frame anchors supporting slope in the seasonal freeze-thaw loess area

LI Wei^{1a}, LI Yuanxun^{1a,1b}, LI Hui^{1a,1b}, DONG Qinx², XIANG Tian^{1a}

(1a. School of Civil and Water Engineering; 1b. Qinghai Key Laboratory of Building Energy Saving Materials and

Engineering Safety, Qinghai University, Xining 810016, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Hainan

University, Haikou 570228, P. R. China)

Abstract: Due to insufficient research on interaction mechanism between freeze-thaw soil and anchor, the influence of freeze-thaw of soil on the internal force of anchor cannot be fully considered in engineering practice. Therefore, development of an empirical relationship of collapsible loess cohesion considering the influence of freeze-thaw cycles based on the triaxial shear test on collapsible loess in Xining City is essential. Based on the deformation coordination relationship between the anchor body and the surrounding soil layer, the analytical formula of the axial force and shear stress of the anchorage section of the frame prestressed anchor under freeze-thaw conditions is deduced, and the results of the theoretical calculation are compared with field tests, and the influence is analyzed. Results show that the cohesion of the soil decreases exponentially with increase of freeze-

收稿日期: 2021-12-30

基金项目: 青海省科技厅项目(2020-ZJ-718)

作者简介: 李伟(1996-), 男, 主要从事寒区边坡支护结构研究, E-mail: Liw0215@163.com。

李元勋(通信作者), 男, 副教授, 博士, E-mail: lyx2017@qhu.edu.cn。

Received: 2021-12-30

Foundation item: Qinghai Department of Science and Technology Project (No. 2020-ZJ-718)

Author brief: LI Wei (1996-), main research interest: support structure of cold geotechnical slope, E-mail: Liw0215@163.com.

LI Yuanxun (corresponding author), associate professor, PhD, E-mail: lyx2017@qhu.edu.cn.

thaw cycles, and the axial force and shear stress of the anchorage section increase sharply in the first 3 cycles, and then become stable after 7 cycles. The axial force at the anchorage front section is more influenced by freeze-thaw cycles than the back end. However, the variation pattern of shear stress along the anchorage with freeze-thaw cycles is same. Results of the field tests proved the rationality of the calculation method, which can provide a reference for design and calculation of frame supporting structure in such areas.

Keywords: soil freeze-thaw; frame anchors slope; collapsible loess; cohesion; internal force of anchor

因地处季节性冻土区,中国西北地区气候环境和地质条件特殊,由土体冻融引起的框架边坡破坏时有发生。究其原因,主要在于对冻融土体与框架锚杆之间的相互作用机理研究不足,工程实践中未能充分考虑土体冻融对锚杆内力的影响,造成一系列工程事故发生。因此,有必要对冻融条件下锚杆内力变化做进一步研究。

目前,冻融条件下锚杆内力的研究主要分为两类,一类是试验研究,另一类是数值模拟研究。高鹏飞^[1]基于现场试验研究了锚杆轴力随外界温度、时间的变化规律,指出外界温度越低,锚杆轴力越大,且轴力在整个冬季随时间呈先增大后减小的趋势;周艳生^[2]、代涛^[3]采用数值模拟的方法研究了锚杆轴力随时间的变化,得到了与文献[1]相同的结论;柳珂^[4]从冻胀力的角度研究了冻结深度对锚杆轴力的影响,指出冻结深度越大,锚杆轴力越大;李亭等^[5]基于模型试验对文献[4]锚杆轴力随冻结深度变化的结论进行了验证,并指出锚杆在冻结初期存在冻缩现象;Yuan等^[6]通过数值模拟的方法,得到了锚杆锚固力随冻融次数的变化规律;Xiang等^[7]利用MATLAB研究了冻融条件下锚杆的轴力变化,得到了初始、冻结、融化3种状态下的锚杆轴力关系;石冬梅等^[8]和高欣亚等^[9]基于室外试验,得到了冻融条件下锚杆的应力变化与分布规律。

现有成果多是以试验和数值模拟的方法研究土体冻融对锚杆内力的影响,以试验结合理论推导的方法研究冻融次数对锚杆内力影响的文献甚少。笔者在冻融循环三轴剪切试验的基础上,建立考虑冻融次数影响的框架预应力锚杆内力计算方法,并将现场试验与计算方法进行对比验证。

1 冻融条件下框架锚杆内力计算分析

1.1 冻融湿陷性黄土黏聚力经验关系式

相关研究表明,冻融条件下土体内摩擦角的变化不明显^[10],而黏聚力总体上呈减小趋势,最后趋于稳定^[11]。因此,将黏聚力作为主要影响因素来考虑冻融作用对黄土的影响。取现场试验场地深0.5~2.0 m的原状湿陷性黄土土样,制备含水率为18.34%的三轴试样,在冻结温度为-5、-10、

-15℃,融化温度为10、15℃的恒温恒湿环境下分别进行0、1、3、5、10、15、20次冻融循环试验,由青海省西宁市近10年冬季月份每日温度数据可知,除去最高温度低于0℃的天数,95%以上的天数为12 h正温、12 h负温,故确定冻融循环试验的一个冻融循环周期为24 h,冻结和融化时间各为12 h。对冻融循环后的试样进行三轴剪切试验,得到如图1所示的黏聚力与冻融次数的关系,由图1可知,在不同的冻融温度梯度下,黏聚力随冻融次数的增加呈指数型分布。因此,采用式(1)的指数函数拟合黏聚力与冻融次数的关系。

$$c = ae^{-\frac{n}{t}} + b \quad (1)$$

式中: c 为土体经历 n 次冻融后的黏聚力, $n \geq 0$; a 、 b 、 t 为拟合参数。

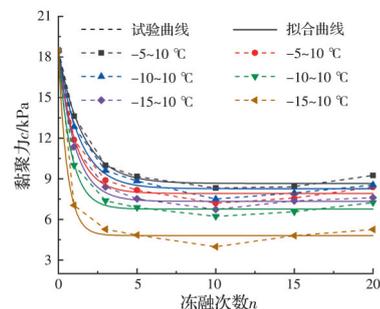


图1 不同温度梯度下黏聚力与冻融次数的关系

Fig. 1 The relationship between cohesion and freeze-thaw cycles under different temperature gradients

由文献[12]可知,青海省西宁市2007—2017年冬季月份平均最低温度在 $-5^\circ\text{C} > T \geq -10^\circ\text{C}$ 的占比最大,冬季月份平均最高温度在 $5^\circ\text{C} < T \leq 10^\circ\text{C}$ 的占比最大。因此,选取冻融温度梯度为-10~10℃时的黏聚力经验关系式,研究土体冻融对框架预应力锚杆内力的影响。黏聚力表达式为

$$c = 10.15e^{-\frac{n}{1.35}} + 8.24 \quad (2)$$

1.2 框架预应力锚杆内力计算分析

1.2.1 框锚挡土墙土压力

框锚挡土墙所受土压力水平分力强度标准值 e_{hk} 可按图2所示土压力分布模型进行计算^[13]。具体表达式为

$$e_{\text{hk}} = \frac{E_{\text{hk}}}{0.875H} \quad (3)$$

式中: e_{hk} 为侧向土压力水平分力标准值; H 为挡土墙高度; E_{hk} 为侧向土压力水平分力标准值的合力,可按库仑土压力理论计算,计算时用等效内摩擦角 φ_D 代替库仑主动土压力系数 K_a 中的黏聚力 c 和内摩擦角 φ ,计算方法为

$$E_{hk} = E_k \cos(\alpha + \delta) \quad (4)$$

式中: α 为墙背倾角; δ 为填土与墙面的摩擦角; E_k 为总的主动土压力,其计算式为

$$E_k = \frac{1}{2} \gamma \left(H + \frac{\gamma}{q} \right)^2 K_a \quad (5)$$

式中: γ 为土体重度; q 为地面附加荷载或邻近建筑物基础底面的附加荷载; K_a 为库仑主动土压力系数,计算方法为

$$K_a = \frac{\cos^2(\varphi_D - \alpha)}{\cos^2 \alpha \cos(\alpha + \delta) \left[\frac{\sin(\varphi_D + \delta) \sin(\varphi_D - \beta)}{\cos(\alpha + \delta) \cos(\alpha - \beta)} \right]^2} \quad (6)$$

式中: β 为填土面与水平面之间的倾角; φ_D 为等效内摩擦角,可根据有黏聚力的库仑主动土压力与按等效内摩擦角计算的库仑主动土压力相等进行计算,求得等效内摩擦角的表达式为

$$\varphi_D = 2 \left\{ 45^\circ - \arctan \left[\tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - \frac{2c}{\gamma H} \right] \right\} \quad (7)$$

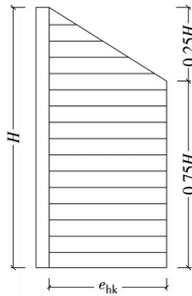


图 2 框架预应力锚杆挡土墙土压力分布模型
Fig. 2 Earth pressure distribution model of frame prestressed anchor retaining wall

联立式(2)~式(7)即可得到冻融条件下作用于框锚挡土墙上的土压力的水平分力标准值 e_{hk} 。

1.2.2 框架锚杆拉力

作用于框锚挡土墙上的土压力,最终以拉力的形式传递给锚杆,该拉力即为框架横梁和立柱在锚头处水平支座反力的合力^[14],其表达式为

$$T_j = \frac{R_j}{\cos \alpha_j} \quad (8)$$

式中: T_j 为第 j 排锚杆所受轴向拉力; α_j 为第 j 排锚杆与水平面的倾角; R_j 为横梁和立柱在第 j 排锚杆作用位置处水平支座反力的合力,即

$$R_j = R_{jx} + R_{jy} \quad (9)$$

式中: R_{jy} 为第 j 排锚杆作用位置处立柱的水平支座反力,由于锚杆施加了预应力,可以假定立柱和锚杆连接处为一定向铰支座,因此,可将立柱看作如图3所示的多跨连续梁,并采用力法求解其支座反力,具体步骤参考文献[14]中锚杆拉力求解步骤。 R_{jx} 为第 j 排锚杆作用位置处横梁的水平支座反力,一般情况下,作用于横梁上的荷载可简化为均布线荷载,并根据土压力模型可得

$$R_{jx} = 0.25 e_{hk} s_x s_y \quad (10)$$

式中: e_{hk} 为侧向土压力水平分力标准值; s_x 为锚杆水平间距; s_y 为锚杆竖向间距。

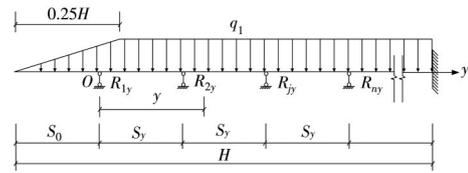


图 3 立柱计算模型
Fig. 3 Calculation model of erect column

1.2.3 锚固段轴力与剪应力

选取如图4所示锚固体微段进行分析,以锚固段始端为零点建立 z 轴,并假定锚固体与周边土体满足变形协调关系,由胡克定律可得锚固体轴向应变 $u(z)$ 与锚固体轴力 $P(z)$ 的关系为

$$\frac{du(z)}{dz} = \frac{P(z)}{E_a A_a} \quad (11)$$

式中: $E_a = (E_s A_s + E_c A_c) / A_a$, E_a 为锚固体等效弹性模量, A_s 为锚杆截面面积, E_s 为锚杆弹性模量, A_c 为灌浆体截面面积, E_c 为灌浆体弹性模量, A_a 为锚固体截面面积, $A_a = A_c + A_s = \pi r^2$, r 为锚固体半径。

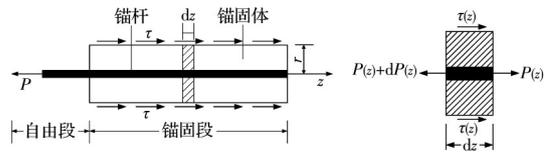


图 4 锚固段受力分析模型

Fig. 4 Mechanical analysis model of anchorage section

由锚固段微元体的静力平衡条件可得锚固体轴力 $P(z)$ 与锚固体界面处剪应力 $\tau(z)$ 的关系

$$\frac{dP(z)}{dz} = -2\pi r \tau(z) \quad (12)$$

联立式(11)、式(12)可得

$$\frac{d^2 u}{dz^2} = \frac{2\tau(z)}{r E_a} \quad (13)$$

由锚固体与周围土体的变形协调关系,可得锚固体轴向应变 $u(z)$ 与界面处剪应力 $\tau(z)$ 的关系

$$\tau(z) = ku(z) \quad (14)$$

式中: k 为弹性比例系数,根据Randolph等^[15]的剪切

位移法进行计算得

$$k_1 = \frac{\tau_1}{u_1} = \frac{G_s}{r \ln(r_m/r)} \tau(z) \quad (15)$$

式中: G_s 为锚固体周围土体剪切模量, 按 $G_s = E/[2(1+\nu)]$ 计算, E 、 ν 分别为土体弹性模量与泊松比; r 为锚固体半径; r_m 为锚固体对周围土体的最大影响半径, 当 $r_m > 20r$ 时, 土体剪切变形可忽略不计^[16], 故取 $r_m = 20r$ 。

将式(14)代入式(13)得

$$\frac{d^2 u}{dz^2} - \frac{2ku(z)}{rE_a} = 0 \quad (16)$$

令 $\lambda^2 = 2k/(rE_a)$, 并求解式(16)的微分方程得

$$u(z) = c_1 e^{\lambda z} + c_2 e^{-\lambda z} \quad (17)$$

$$\text{代入 } \left. \frac{du(z)}{dz} \right|_{z=0} = -\frac{P}{E_a A_a} \text{ 和 } \left. \frac{du(z)}{dz} \right|_{z=l_a} = 0 \text{ 两个边界条件可得}$$

$$P(z) = \frac{P \sinh[\lambda(l_a - z)]}{\sinh(\lambda l_a)} \quad (18)$$

联立式(12)、式(18)得

$$\tau(z) = \frac{\lambda P \cosh[\lambda(l_a - z)]}{2\pi r \sinh(\lambda l_a)} \quad (19)$$

式中: l_a 为锚固段长度; P 为锚杆所受外力, 即冻融条件下框架梁传递给锚杆的拉力 T_j 与锚杆预应力 P_0 的合力。

综上所述, 考虑冻融次数影响的框架预应力锚杆锚固段轴力与剪应力计算解析式为

$$P(z) = \frac{(T_j + P_0) \sinh[\lambda(l_a - z)]}{\sinh(\lambda l_a)} \quad (20)$$

$$\tau(z) = \frac{\lambda(T_j + P_0) \cosh[\lambda(l_a - z)]}{2\pi r \sinh(\lambda l_a)} \quad (21)$$

2 冻融条件下锚杆内力计算方法验证

试验边坡位于西宁市城北区, 为框锚支护黄土边坡, 阳面坡向。锚杆选用直径为 14 mm 的 HRB400 级钢筋, 弹性模量 $E_s = 2.0 \times 10^5$ MPa, 预应力为 10 kN。锚孔直径为 80 mm, 采用强度等级为 M20, 弹性模量 $E_c = 2.55 \times 10^4$ MPa 的水泥砂浆灌浆, 框锚边坡剖面及其他参数见图 5。

根据上述参数, 以图 6 中第 1 排最左侧节点 4 锚杆为例, 对比分析锚固段轴力的实测值与计算值, 得到如图 7、图 8 所示结果。由图 7 可知, 计算值与实测值吻合较好, 且具有相同的变化趋势, 但仍存在一定的误差, 这可能是由于该计算方法没有考虑温度梯度及含水率变化对锚杆轴力的影响, 而实际情况下温度梯度和含水率是变化的; 此外, 理论计算时视一天为一次冻融循环, 而实际上一天可能不

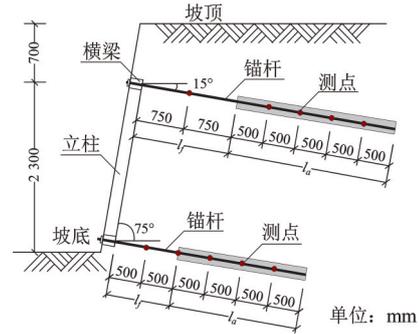


图 5 框锚边坡剖面图

Fig. 5 Profile of slope supported by frame anchors



图 6 框锚边坡现场试验

Fig. 6 Field test of slope supported by frame anchors

发生或发生多次冻融循环, 由黏聚力与冻融次数的关系式可知, 理论计算时冻融次数偏大, 则黏聚力偏小, 土体抗剪强度偏小, 导致挡土墙所受土压力及其传递给锚杆的拉力偏大, 因此, 轴力计算值大于实测值; 反之, 冻融次数偏小, 黏聚力偏大, 轴力计算值小于实测值。

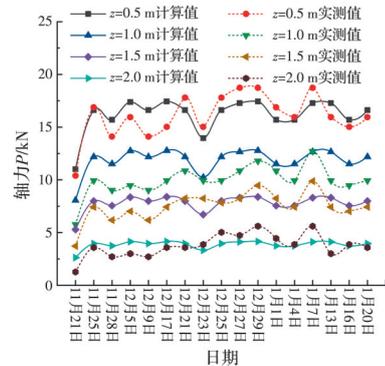


图 7 不同测点处锚固段轴力变化对比

Fig. 7 Comparison of axial force changes of anchorage section at different measurement points

图 8 分别选取了实际温度变化范围与理论计算温度梯度较为接近的 2 个自然天及计算值和实测值误差较大的 2 个自然天对比分析锚固段轴力变化, 由 8(a)、(b) 中计算值与实测值的误差较小, 主要是由于所选 2 个自然天的正温较高, 边坡土体表面积雪融化, 土体含水率增大并接近理论计算时的含水率, 故轴力计算值与实测值的误差较小; 图 8(c)、(d) 中计算值大于实测值, 主要是由于所选 2 个自然天之前连续几日为晴天, 且边坡土体表面无积雪,

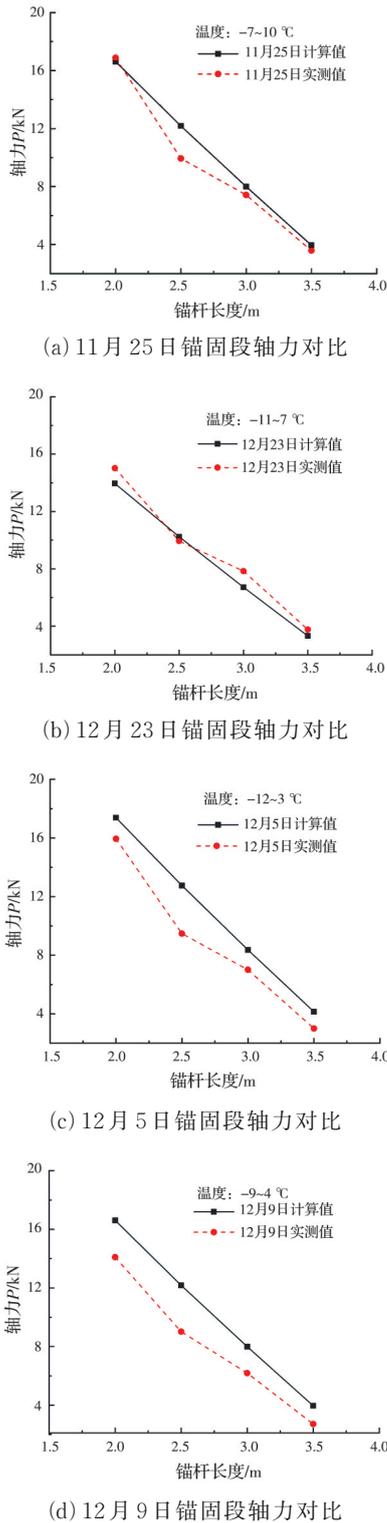


图 8 不同日期锚固段轴力对比

Fig.8 Comparison of axial force of anchorage section under different dates

土体含水率因蒸发作用而下降,致使理论计算含水率大于土体含水率,而土体含水率越大,计算得到的轴力越大,又由于实际温度变化范围与理论计算温度梯度相差较大,因此,轴力计算值大于实测值。

综上所述,建立的冻融次数影响下框架预应力锚杆内力计算方法的计算值与实测值吻合较好,客

观反映了季冻黄土地区锚杆锚固段轴力随土体冻融的变化规律,可为此类地区框锚支护结构的设计与计算提供参考依据。

3 冻融次数对锚固段内力的影响

3.1 冻融次数对锚固段轴力的影响

图 9 为节点 4 锚杆锚固段不同测点处轴力与冻融次数的关系图,由图 9 可知,随冻融次数的增加,锚固段轴力呈先增大后稳定的趋势,这是由于在前 3 次冻融中,土颗粒结构形态及排列方式受冻融循环影响较大,随冻融次数的增加,土体黏聚力急剧下降,导致土体抗剪强度下降,边坡土体呈现往临空侧位移的趋势,挡土墙所受土压力增大,挡土墙传递给锚杆的拉力随之增大,进而表现为锚固段轴力急剧增大;当冻融次数达到 7 次后,土体内部结构受冻融循环的影响较小,土体黏聚力和抗剪强度随冻融次数的增加而逐渐减小并趋于稳定,则挡土墙所受土压力及其传递给锚杆的拉力趋于稳定,进而表现为锚固段轴力趋于稳定;锚固段始端轴力增加幅度大于锚固段末端,说明锚固段始端轴力较锚固段末端轴力受冻融次数的影响更大。

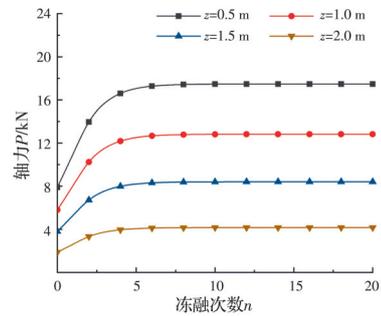


图 9 不同测点处轴力与冻融次数的关系

Fig. 9 The relationship between axial force and freeze-thaw cycles at different measurement points

3.2 冻融次数对锚固段剪应力的影响

图 10 为节点 4 锚杆锚固段不同测点处剪应力与冻融次数的关系图,由图 10 可知,剪应力随冻融次数的增加呈先增大后稳定的趋势,这是由于随冻融次数的增加,土体黏聚力和抗剪强度呈指数型减小,挡土墙所受土压力及其传递给锚杆的拉力呈先增大后稳定的趋势,又由于锚杆所受拉力是通过锚固段及其周围土体之间的摩阻力传递到稳定土层,因此,锚固段剪应力与锚杆所受拉力的变化规律一致,从而表现为锚固段剪应力随冻融次数的增加呈先增大后稳定的趋势;锚固段始端至末端的剪应力增加幅度略微减小,说明锚固段始端至末端的剪应力随冻融次数的变化规律基本相同。

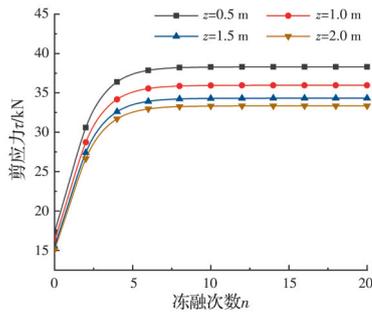


图 10 不同测点处剪应力与冻融次数的关系

Fig. 10 The relationship between shear stress and freeze-thaw cycles at different measurement points

4 结论

1) 基于冻融循环三轴剪切试验及锚固体与周围土体的变形协调关系,建立了冻融条件下框架预应力锚杆锚固段轴力与剪应力计算方法,经验证得知计算值与实测值吻合较好,且具有相同的变化趋势,因此,该计算方法可为此类地区框锚支护结构的设计与计算提供参考。

2) 随冻融次数的增加,土体黏聚力呈指数型下降,锚固段的轴力和剪应力在前 3 次冻融循环中急剧增大,冻融次数达到 7 次后趋于稳定。

3) 锚固段始端轴力较锚固段末端轴力受冻融次数的影响更大,锚固段始端至末端的剪应力随冻融次数的变化规律基本相同。

4) 模型仅考虑了冻融次数对框架预应力锚杆内力的影响,未考虑冻融温度梯度和含水率对其内力的影响,得到的结果存在一定的局限性。因此,在后续工作中应进一步对冻融次数、冻融温度梯度、土体含水率及三者耦合作用下锚杆内力的变化进行研究。

参考文献

- [1] 高鹏飞. 包头某越冬基坑桩锚支护结构的受力变形监测及研究[D]. 内蒙古 包头: 内蒙古科技大学, 2014.
GAO P F. The monitoring and research on the force and deformation of pile-anchor supporting structure of a overwintering foundation pit in Baotou [D]. Baotou, Inner Mongolia: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2014. (in Chinese)
- [2] 周艳生. 冻融作用对季冻区基坑排桩影响研究[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2016.
ZHOU Y S. Study on impact of freeze-thaw to piles of foundation pit in seasonal frozen zone [D]. Changchun: Jilin Jianzhu University, 2016. (in Chinese)
- [3] 代涛. 框架锚杆支护冻土边坡的多场耦合分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.
DAI T. Analysis on coupling model of permafrost slope supported by frame structure with anchors [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [4] 柳珂. 寒区框架锚杆边坡支护结构的冻胀效应计算方法及试验研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
LIU K. Study on calculation method and experiment of frame supporting structure with anchors in cold regions under frost heave effect [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [5] 李亭, 周国庆, 刘书幸, 等. 桩锚支护体系中锚杆冻胀响应规律试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(4): 754-759.
LI T, ZHOU G Q, LIU S X, et al. Experimental study of frost heaving response of bolt in pile-anchor supporting system [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(4): 754-759. (in Chinese)
- [6] YUAN J K, YE C W, YANG J F, et al. Experimental and numerical investigation on the deterioration mechanism for grouted rock bolts subjected to freeze-thaw cycles [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(7): 5563-5574.
- [7] XIANG T, LI Y X, YE S H, et al. Coupling effect of heat-moisture-stress on the freeze-thaw characteristics of slope supported with framed anchor [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 15(1): 1-15.
- [8] 石冬梅, 李元勋, 李双好, 等. 土体冻融对西北地区深基坑桩锚支护内力影响试验研究[J]. 建筑科学, 2021, 37(5): 44-50.
SHI D M, LI Y X, LI S H, et al. Experimental study on the influence of soil freezing and thawing on the internal force of pile anchor foundation pit in Northwest China [J]. Building Science, 2021, 37(5): 44-50. (in Chinese)
- [9] 高欣亚, 李元勋, 石冬梅, 等. 土体冻胀对桩锚支护结构影响试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(3): 692-697.
GAO X Y, LI Y X, SHI D M, et al. Experimental study on the effect of soil frost heave on pile-anchor supporting structure [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(3): 692-697. (in Chinese)
- [10] XU J, WANG Z, REN J, et al. Mechanism of shear strength deterioration of loess during freeze-thaw cycling [J]. Geomechanics and Engineering, 2018, 14(4): 307-314.
- [11] 郑方, 邵生俊, 王松鹤. 复杂应力条件下冻融作用对黄土强度的影响[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(Sup1): 224-228.
ZHENG F, SHAO S J, WANG S H. Influences of freeze-thaw on strength of loess under complex stress path [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,

- 2021, 43(Sup1): 224-228. (in Chinese)
- [12] 李双好, 李元勋, 高欣亚, 等. 冻融作用对原状黄土抗剪强度的影响规律[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(1): 48-55.
- LISHI, LIYX, GAOXY, et al. Effect of freezing and thawing on shear strength of intact loess [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(1): 48-55. (in Chinese)
- [13] 朱彦鹏, 罗晓辉, 周勇. 支挡结构设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- ZHUY P, LUOX H, ZHOUY. Design of supporting structure [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. (in Chinese)
- [14] 周勇, 朱彦鹏. 黄土边坡框架预应力锚杆支挡结构的理论分析与工程实践[J]. 建筑科学, 2006, 22(6): 48-53.
- ZHOUY, ZHUY P. Theoretical analysis and engineering practice of grillage supporting structure with pre-stressed anchor bars on loess slope [J]. Building Science, 2006, 22(6): 48-53. (in Chinese)
- [15] RANDOLPH M F, WROTH C P. Analysis of deformation of vertically loaded piles [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1978, 104(12): 1465-1488.
- [16] COOKE R W, PRICE G, TARR K. Jacked piles in London Clay: A study of load transfer and settlement under working conditions [J]. Géotechnique, 1979, 29(2): 113-147.

(编辑 王秀玲)