



漠河冻土模拟岩样三轴力学试验及强度多元回归分析

牛成成 侯绪田 李阳

Triaxial Mechanical Tests and Multiple Regression Strength Analysis of Simulated Frozen Soil Sample from Mohe

NIU Chengcheng, HOU Xutian, LI Yang

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021049>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同加载方式下页岩强度与变形的尺度效应规律试验研究

Experimental Study on the Scale Effect Law of Shale Strength and Deformation under Different Loading Modes

石油钻探技术. 2020, 48(5): 39–48 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020075>

拉扭复合载荷条件下V150钻杆的力学性能研究

The Mechanical Performance of V150 Drill Pipe under Combined Tension–Torsion Loading

石油钻探技术. 2019, 47(2): 68–73 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018140>

压裂井组非线性渗流模型求解

Solution of Nonlinear Seepage Model for Fracture Well Group in Low Permeability Reservoirs

石油钻探技术. 2019, 47(6): 96–102 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019078>

基于损伤力学的HL级抽油杆疲劳分析研究

Fatigue Analysis of HL Rod Based on Damage Mechanics

石油钻探技术. 2019, 47(4): 47–53 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019041>

S形水泥浆强度发展曲线成因分析及消除方法

Origin Analysis and Elimination of the S-Shaped Strength Development Curve of Cement Slurry

石油钻探技术. 2018, 46(3): 39–43 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018064>

高钢级钻杆强度塑性试验研究

Study on Strength and Plasticity of High Steel Grade Drill Pipe

石油钻探技术. 2017, 45(5): 53–59 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201705010>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀ 极地冷海 ▶

doi:10.11911/syztjs.2021049

引用格式: 牛成成, 侯绪田, 李阳. 漠河冻土模拟岩样三轴力学试验及强度多元回归分析 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(3): 27-34.

NIU Chengcheng, HOU Xutian, LI Yang. Triaxial mechanical tests and multiple regression strength analysis of simulated frozen soil sample from Mohe [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(3): 27-34.

漠河冻土模拟岩样三轴力学试验及强度多元回归分析

牛成成¹, 侯绪田¹, 李 阳²

(1. 中国石化石油工程技术研究院, 北京 102206; 2. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580)

摘 要: 在冻土地层钻探过程中, 不合理的作业方案可能引发井壁坍塌、井口沉降等一系列工程问题, 而弄清深层冻土力学演化规律是施工设计的基础。为此, 用漠河冻土重塑了不同深度冻土的模拟岩样, 开展了不同围压、温度条件下的冻土三轴力学试验, 分析了不同条件下的冻土应力-应变曲线特征。通过多元回归方法对冻土强度进行了统计分析, 进一步构建了冻土强度准则。研究发现: 模拟岩样的应力-应变曲线整体呈非线性变形特征, 在冻结状态下, 温度、围压对土体强度起主要作用; 非冻结状态下, 其强度由围压和土体深度决定; 冻土强度由土体骨架强度和孔隙中冰的胶结强度构成, 其骨架强度满足 Mohr-Coulomb 强度准则, 内聚力、内摩擦角随深度增加而增大; 孔隙中冰的胶结强度随环境温度降低而增强, 随围压增加呈先增强后减弱的趋势。基于此构建了漠河冻土强度准则, 验证结果表明, 可以较好地表征漠河冻土融化-冻结状态下的强度分布。

关键词: 深层冻土; 低温力学试验; 非线性变形; 多元回归分析; 强度准则; 漠河

中图分类号: TE21

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2021)03-0027-08

Triaxial Mechanical Tests and Multiple Regression Strength Analysis of Simulated Frozen Soil Sample from Mohe

NIU Chengcheng¹, HOU Xutian¹, LI Yang²

(1. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 102206, China; 2. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong, 266580, China)

Abstract: Improper drilling schemes may cause engineering problems such as wellbore collapse and wellhead subsidence during the drilling of permafrost. The research on mechanical evolution of deep frozen soil paves the way for construction design. In this paper, soil samples at different depths were remolded with the frozen soil from Mohe, and triaxial mechanical tests were carried out under different confining pressures and temperatures to analyze the characteristics of stress-strain curves of frozen soil under different conditions. The strength of frozen soil was statistically studied by multiple regression analysis, and the strength criterion for it was further established. The research results showed that the stress-strain curves of the frozen soil samples presented nonlinear deformation behavior on the whole. In its frozen state, soil strength was controlled mainly by temperature and confining pressure while it was dominated by confining pressure and soil depth in its non-frozen state. In addition, frozen soil strength was composed of the strength of soil skeleton and the cementing strength of ice in pores. The strength of soil skeleton satisfies the Mohr-Coulomb criteria, and the cohesion and internal friction angle increases with soil depth. The cementing strength of ice in pores grows with the decline of ambient temperature, and increases and then decreases as the confining pressure increases. On this basis, the strength criterion for Mohe frozen soil was established, and the verification results proved that it can well characterize the strength distribution of Mohe frozen soil in the melt and frozen state.

Key words: deep frozen soil; low-temperature mechanical test; nonlinear deformation; multiple regression analysis; strength criteria; Mohe

冻土地层(地层温度低于 0℃)的岩土力学性质与常规地层有很大不同。冻土中的地层水以冰的形式存在于岩石或土体孔隙中, 充当骨架的一部分^[1-3]。

因此, 冻土的土体强度除了与其原始骨架的压实强度有关外, 还取决于孔隙中冰的强度^[4]。当地层温度低于 0℃ 时, 孔隙中冰的强度会随温度降低而升

收稿日期: 2020-10-28; 改回日期: 2021-04-02。

作者简介: 牛成成(1986—), 男, 山东临沂人, 2009年毕业于中国石油大学(北京)石油工程专业, 2012年获中国石油大学(北京)油气井工程专业硕士学位, 副研究员, 主要从事钻井技术研究。E-mail: niucc.sripe@sinopec.com。

基金项目: 国家重点研发计划课题“钻井工艺及井筒工作液关键技术研究”(编号: 2016YFC0303303)资助。

高;当温度高于 0 ℃ 时,孔隙中的水将不再具备骨架功能,导致冻土强度骤降^[5]。在冻土区进行工程施工时,工程扰动必然导致地层温度场发生变化,而土体强度对温度的依赖性会导致施工风险大大增加。因此,研究冻土地层强度具有现实意义。

由于永久冻土带的工程施工涉及隧道开挖^[6-7]、路基施工^[8-9]、房屋建设^[10]等领域,前人已对冻土基础力学开展了一系列研究。已有研究表明,冻土的力学性质会受到围压、环境温度、含水率、应变速率等因素的影响:当围压较低时,土体强度会随着围压升高而升高,其应力-应变曲线特征会由应变软化向着无峰值强度变化^[11-12];在围压较高时,会出现孔隙中冰被压碎、压融现象,土体强度会随围压升高出现降低的趋势^[11-13];围压相同时,环境温度越低,孔隙中冰的强度越高,冻土的整体强度越高^[14];随含水率升高,冻土强度会呈现先线性升高后降低的变化曲线^[15];冻土的峰值强度会随加载时间增长出现降低的趋势,应变速率越大冻土的强度越高^[1, 11-16]。总体而言,冻土强度受环境温度、地层孔隙度、土体应力状态、孔隙中含水饱和度等多因素的影响,但已有研究大多只聚焦地表工程,忽略地层本身在深度上的差异性。

在油气钻探中,通常需要钻穿整个冻土层,与浅部冻土层相比,深部冻土层的温度要高,承受的压实作用更大、应力更高,孔隙度更低,而这些都是会影响冻土的力学性能。浅部冻土层力学性能的研究方法,可以为研究深部冻土层力学性能提供参考,但研究成果不能完全表征深部冻土层的力学性能。因此,开展深部冻土层力学性能研究是开发极地油气资源的重要基础。基于此,笔者对漠河永久冻土进行二次压制,制备了不同深度的模拟岩样,进行了不同温度、围压条件下的冻土低温三轴力学试验,并采用多元回归分析方法分析了压实程度、温度及应力状态等因素对冻土强度的影响,构建了漠河冻土强度计算模型,以期为极地永久冻土层下油气资源的开发提供依据。

1 漠河冻土试验方案与试验结果

1.1 漠河冻土粒径特征与力学试验方案

用取自中国黑龙江省漠河市的冻土土样进行试验。该土样的全岩矿物成分为:石英 30%(体积分数,下同),长石 42%,铁白云石 2%,闪石 1%,黏土 25%;矿物颗粒的粒径分布为:粒径<0.357 μm 的占

0%(体积分数,下同),粒径在 0.357~4.000 μm 的占 23.51%,粒径在 4.000~21.000 μm 的占 42.68%,粒径在 21.000~186.000 μm 的占 33.81%,粒径>186.000 μm 的占 0%。由此可知,漠河冻土的主要矿物成分为长石、石英和黏土,含有少量铁白云石和闪石,所有成分颗粒的粒径在 0.357~186.000 μm 之间。

进行冻土试样重塑,即制备不同深度的冻土模拟岩样时,将原冻土烘干、捣碎并加入适量水进行混合,待搅拌均匀后放进内径 25.0 mm 的刚性圆柱岩心制备装置进行压制,保持初始填充高度 60.0 mm,沿轴向加不同载荷(保持加载时间 1 h)来模拟不同地层深度的地应力,然后对压制好的模拟岩样烘干处理,称取前后质量差计算所制岩样的孔隙度、密度等参数。模拟不同深度冻土所需压制力及所得岩样的基础参数见表 1。

表 1 模拟不同深度冻土的压制力及所得岩样的基础参数
Table 1 Simulation of compression pressure on frozen soil at different depths and corresponding basic sample parameters

地层深度/m	压制力/kN	孔隙度, %	含水率, %	含水饱和度, %
50.00	0.480	35.8	19.5	98.85
300.00	2.885	34.3	18.8	95.90
600.00	5.770	33.6	18.3	96.64
800.00	7.693	33.0	17.5	95.14
1 000.00	9.616	32.3	17.2	96.43

将制备的模拟岩样分别置于设定温度环境下进行冷冻处理(冷冻时间在 48 h 以上),随后置于低温三轴试验机进行不同围压条件下的低温三轴力学试验。为此,进行了试验方案设计,结果见表 2。

表 2 漠河冻土三轴力学试验方案
Table 2 Triaxial mechanical test protocol of Mohe frozen soil

地层深度/m	温度/℃	围压/MPa
50.00	20/-5/-10/-15/-25	0/1/3
300.00	20/-5/-10/-15/-25	0/3/5
600.00	20/-5/-10/-15/-25	3/5/8
800.00	20/-5/-10/-15/-25	5/8/12
1 000.00	20/-5/-10/-15/-25	5/10/15

1.2 冻土应力-应变曲线与冻土强度分布

通过低温三轴力学试验,可以获得冻土模拟岩样的应力-应变曲线。由于试验数量较大,这里仅以模拟 600.00 m 深处冻土的岩样,在-5 和-15 ℃ 温

度、5 MPa 围压条件下得到的曲线(见图 1)为例进行分析。

从图 1 可以看出, 试验过程中, 冻土模拟岩样的应力-应变曲线未出现峰值强度。根据土力学知识, 土体变形达到 15%~20% 时存在严重的坍塌风险, 因此, 取应变 15% 对应的差应力作为该温度、围压条件下的冻土峰值强度, 得到环境温度-5℃ 下, 600.00 m 深处冻土模拟岩样在 5 MPa 围压下的强度为 6.40 MPa, 环境温度-15℃ 下的强度为 11.35 MPa。利用该方法, 可以得到不同深度、温度和围压条件下的土体强度, 如图 2 所示; 与之相对应, 常温条件下的土体强度如图 3 所示。

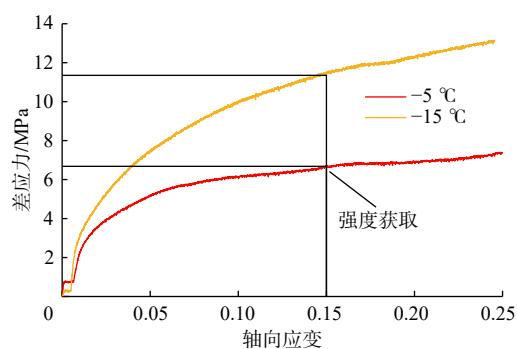


图 1 600.00 m 深处冻土模拟岩样的应力-应变曲线
Fig.1 Stress-strain curves of frozen soil samples at a depth of 600.00 m

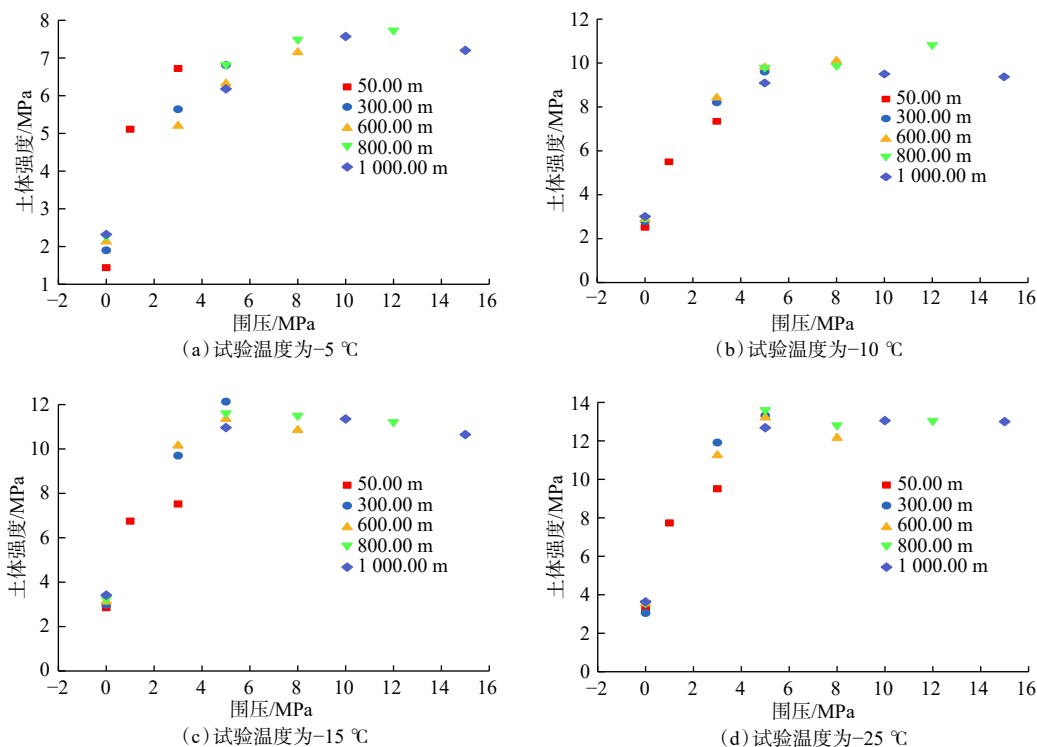


图 2 冻土低温三轴力学试验强度散点分布

Fig.2 Scatter plots of frozen soil strength based on low-temperature triaxial mechanical test

由图 2 和图 3 可知: 漠河冻土在非冻结状态下, 其强度随深度、围压呈明显的正相关关系; 在冻结状态下, 其强度与环境温度、围压和土体深度有一定相关性。

2 冻土强度多元回归分析

基于漠河冻土三轴力学试验结果, 利用 SPSS 数据统计软件, 采用多元回归分析法分析漠河常温土和冻土的强度与各因素的相关性。

2.1 多元回归模型

冻土的强度受多因素影响, 如土体埋深、温度、

围压等, 假设漠河冻土的强度是各个影响因素的连续光滑函数, 其表达式为^[17]:

$$y = f(x^1, x^2, \dots, x^n) \quad (1)$$

将式(1)在 x_k 处进行泰勒展开:

$$\begin{aligned} f(x^1, x^2, \dots, x^n) &= f(x_k^1, x_k^2, \dots, x_k^n) + \\ &\sum_{i=1}^n (x^i - x_k^i) f_{x^i}^1(x_k^1, x_k^2, \dots, x_k^n) + \\ &\frac{1}{2!} \sum_{i,j=1}^n (x^i - x_k^i)(x^j - x_k^j) f_{x^i x^j}^2(x_k^1, x_k^2, \dots, x_k^n) + \dots + o^n \end{aligned} \quad (2)$$

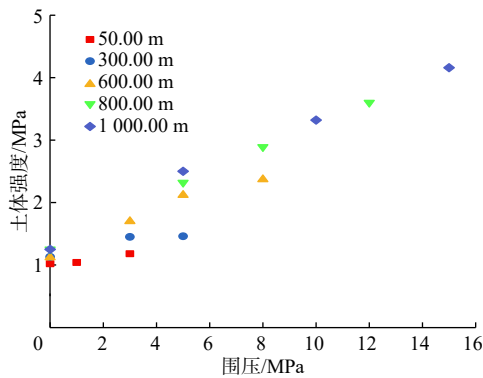


图3 冻土常温三轴力学试验强度散点分布

Fig. 3 Scatter plots of frozen soil strength based on triaxial mechanical test at room temperature

式中: $y = f(x^1, x^2, \dots, x^n)$ 表征土体强度与各因素的函数关系; x^i 为第 i 个影响因素; o^n 为泰勒展开后的高阶余项。

任意多元函数都可通过泰勒展开为一系列包含线性相和多次相的多项式, 而多元回归模型是一个变量受多个因素影响时, 通过假设变量与各因素之间呈现函数关系而建立的分析模型。多元回归模型分为线性回归模型和非线性回归模型。当采用线性回归模型描述时, 表明忽略各因素非线性项和交叉项的影响而对模型进行简化, 获得各因素与强度之间的近似规律。

先假设冻土强度与温度、围压、深度之间均满足线性关系, 可直接得到线性回归模型(否则, 剔除这一因素), 此时多元线性回归模型的一般形式为:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_k x_{ki} + \mu_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中: y_i 为因变量; k 为影响因素的数目; β_1, \dots, β_k 为回归系数; x_{1i}, \dots, x_{ki} 为影响因素自变量; β_0 为截距; μ_i 为残差。

2.2 漠河冻土强度多元回归分析

分析中, 首先确定因变量为强度, 自变量为深度、环境温度和围压, 然后进行因素无关性检验, 再进行多元线性回归模型构建和假设性检验。所构建的线性模型为:

$$\sigma_p = a_1 H + a_2 \theta + a_3 p_c + f \quad (4)$$

式中: σ_p 为冻土强度, MPa; p_c 为围压, MPa; θ 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$; H 为冻土深度, m; a_1, a_2 和 a_3 为回归系数; f 为截距, m。

初次回归结果显著性分析结果见表3。

表3 初次回归结果显著性分析结果

Table 3 Significance analysis of the initial regression results

因素	标准化系数	t 值 ¹⁾	显著性
截距		3.136	0.002
深度	-0.048	-0.594	0.554
温度	-0.379	-5.666	0
围压	0.744	9.246	0

注: 1) 指 t 检验中的 t 值, 下同。

从表3可以看出, 温度、围压的显著性结果均小于 0.050, 表明二者与强度之间呈明显的线性相关性, 而深度显著性结果为 0.554, 远大于 0.050, 表明漠河土在冻结状态, 其深度对冻土强度的影响远低于温度和围压, 在实际建模中可以忽略深度的影响。

因此, 可进一步将线性模型构建为:

$$\sigma_p = b_1 \theta + b_2 p_c + f \quad (5)$$

式中: b_1, b_2 为回归系数。

即在原有数据中剔除深度, 并重新进行多元线性回归分析, 结果见表4(其中, 调整后的决定系数 R^2 为 0.659)。

表4 线性回归结果显著性分析结果

Table 4 Significance analysis of linear regression results

因素	标准化系数	t 值	显著性
截距		3.280	0.002
温度	-0.379	-5.690	0
围压	0.718	10.780	0

该模型可解释为, 环境温度对强度影响系数为 -0.379, 即温度每升高 1°C , 冻土强度降低约 0.379 MPa; 围压对强度影响系数为 0.718, 围压每增加 1 MPa, 冻土强度增加约 0.718 MPa; 其多元决定系数 R^2 为 0.659, 表明线性模型的解释程度为 65.9%。可见, 用此模型可在一定程度上解释 2 个因素对强度的影响规律。

然后采用多元非线性回归模型回归漠河冻土强度与环境温度及围压的关系, 得到回归关系式:

$$\sigma_p = c_1 p_c + c_2 p_c^2 + c_3 t + c_4 \theta^2 + c_5 p_c \theta + f \quad (6)$$

式中: c_1, c_2, c_3, c_4 和 c_5 为回归系数。

漠河冻土非线性回归参数估算值见表5(其中, 决定系数 R^2 为 0.923)。

表 5 漠河冻土非线性回归参数估算值

Table 5 Estimated values of nonlinear regression parameters of Mohe frozen soil

参数	估算值	标准误差
c_1	1.534	0.092
c_2	-0.092	0.101
c_3	-0.412	0.004
c_4	-0.009	0.006
c_5	-0.016	0.003
f	-0.187	0.645

R^2 为 0.923, 表明该模型可以解释程度为 92.3%, 具有较高的冻土强度预测精度。

2.3 漠河非冻结土强度多元回归分析

冻土强度与各因素之间具有很强的非线性关系, 因此尝试采用多元非线性回归分析方法建立漠河非冻结土强度与围压、深度的相关关系, 得到了其多元回归方程:

$$\sigma_p = d_1 H + d_2 H^2 + d_3 p_c + d_4 p_c^2 + d_5 p_c H + f \quad (7)$$

式中: d_1, d_2, d_3, d_4 和 d_5 为回归系数。

漠河非冻结土非线性回归参数估算值见表 6 (其中, 决定系数 R^2 为 0.989)。

表 6 漠河非冻结土非线性回归参数估算值

Table 6 Estimated values of nonlinear regression parameters in Mohe non-frozen soil

参数	估算值	标准误差
d_1	0.001	0
d_2	-4.186×10^{-7}	0.031
d_3	0.076	0
d_4	-0.004	0
d_5	0	0
f	0.911	0.087

从表 6 可以看出, 对于漠河非冻结土来说, 围压和土体的深度会显著影响土体强度; 采用非线性回归模型可以定量解释强度与各因素的相关关系, 解释程度为 98.9%。

3 漠河冻土强度准则

根据前文的多元回归分析结果, 当土体处于融化状态时, 其强度只存在骨架强度而没有孔隙中冰的胶

结作用, 为围压、深度的函数。而当土体处于冻结状态时, 其强度由骨架强度与孔隙中冰的胶结作用共同决定。这里可以假设冻结土的骨架强度与土体融化时的骨架强度相同, 冻结土强度高出融化土的部分由孔隙中冰的胶结作用产生, 即孔隙中冰的胶结强度是围压、温度的函数。因此, 漠河冻土强度可表示为:

$$\sigma_p = \sigma_{p1}(H, \sigma_3) + \sigma_{p2}(\theta, \sigma_3) \quad (8)$$

式中: σ_p, σ_{p1} 和 σ_{p2} 分别为冻土强度、融化土强度和孔隙冰的胶结强度, MPa。

当土体处于融化状态时, 可利用 Mohr-Coulomb 强度准则进行描述, 其数学表达式为:

$$|\tau_f| = C + \sigma_n \tan \varphi \quad (9)$$

式中: τ_f 为地层的抗剪强度, MPa; C 为地层的内聚力, MPa; φ 为地层的内摩擦角, ($^\circ$); σ_n 为剪切面上的正应力, MPa。

用主应力 σ_1 和 σ_3 对 Mohr-Coulomb 准则进行描述, 并考虑孔隙压力的影响, 可得:

$$\sigma_{p1} = \frac{2 \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} C + \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 \quad (10)$$

图 4 为漠河不同深度融化土的莫尔圆。采用莫尔圆法可以获得不同深度土体融化状态下的内聚力和内摩擦角, 结果如图 5 所示。

由图 5 可知, 随着冻土埋藏深度增加, 土体的内聚力、内摩擦角增大。这是因为土体处于融化状态时, 其强度完全由土体颗粒间的胶结及摩擦作用决定, 深度越深, 土体的初始固结压力越大, 颗粒间的胶结及摩擦作用越强, 由此导致内聚力、内摩擦角随之增大。对图 5 中的数据进行拟合, 得到内聚力、内摩擦角与深度的关系式:

$$C = 0.000\,3H + 0.483\,5 \quad (11)$$

$$\varphi = 1.467e^{0.001\,3H} \quad (12)$$

对同一温度、围压下不同深度的结果取平均值, 表征不同温度孔隙中冰的胶结强度随围压的变化, 结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出, 随着试验温度降低, 孔隙中冰的胶结强度随之增高; 随着围压升高, 孔隙中冰的胶结强度呈先升高后降低的趋势, 这是因为, 孔隙中冰的胶结强度主要由冰自身的强度决定, 温度越低, 冰自身的强度越高。低围压下, 随着围压升高, 孔隙中冰的胶结强度增高, 这是围压对整体结构的保护作用引起的, 与常规土体类似。但在高围压下, 高应力状态会导致孔隙中冰出现压融现象而使其强度降低, 因此可以采用三次函数表征此现象:

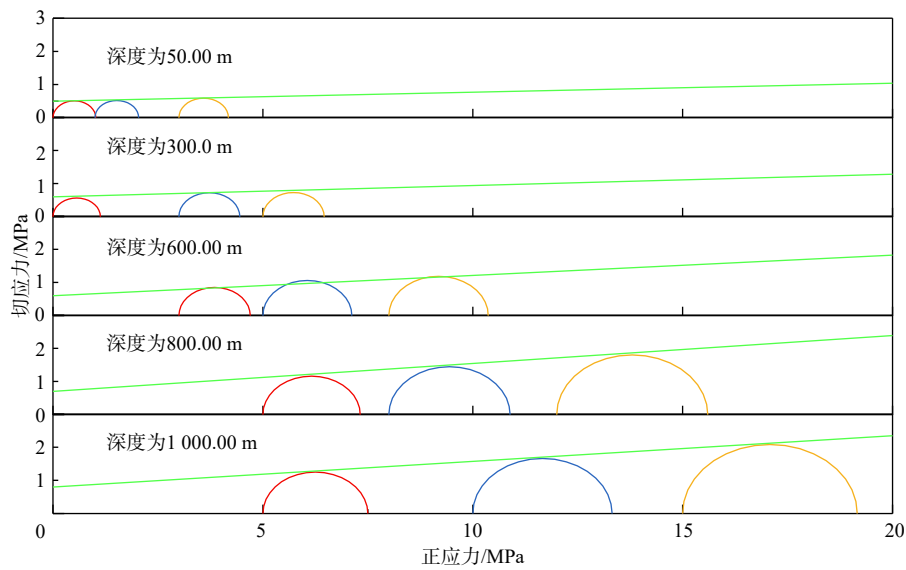
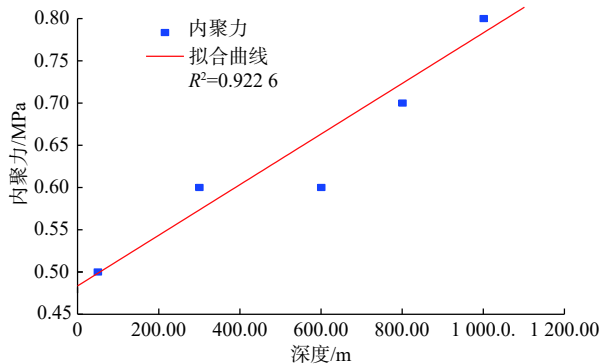
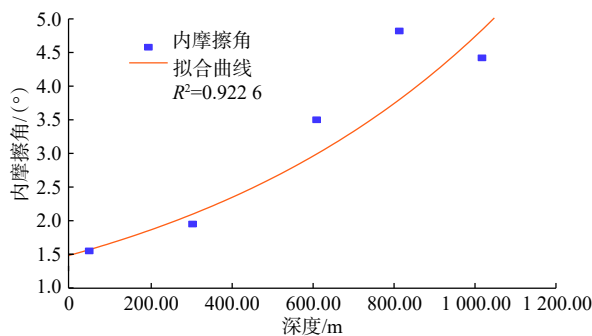


图4 不同深度融化土的莫尔圆

Fig.4 Mohr circles of melt soil at different depths



(a) 内聚力随深度的变化



(b) 内摩擦角随深度的变化

图5 不同深度土体的内聚力和内摩擦角

Fig.5 Cohesion and internal friction angles in soil at different depths

$$\sigma_{p2} = A(\theta)\sigma_3^3 + B(\theta)\sigma_3^2 + C(\theta)\sigma_3 + D(\theta) \quad (13)$$

式中: $A(\theta)$, $B(\theta)$, $C(\theta)$ 和 $D(\theta)$ 为拟合参数,可表征为温度的函数,具体为 $A(\theta) = -0.000\ 5\theta + 0.002\ 5$, $B(\theta) = 0.012\ 1\theta - 0.098\ 8$, $C(\theta) = -0.094\ 8\theta + 0.954\ 4$, $D(\theta) = -0.060\ 7\theta + 1.521\ 4$ 。

为了验证建立的漠河冻土强度计算模型的准确性,将800.00 m深处漠河冻土模拟岩样分别在-15、-5和20℃温度下的强度的计算结果与试验结果进行了对比,结果如图7所示。

从图7可以看出,计算结果与试验结果最大相差1.04 MPa,对应的相对误差为22%。可见,所建模型具有一定的精度,可以较好地表征漠河冻土融化-冻结状态下的强度。

4 结 论

1)通过全岩矿物试验和粒径分析试验,可知漠河永冻土体的主要矿物成分为长石、石英和黏土,并含有少量铁白云石和闪石,所有成分颗粒粒径在0.357~186.000 μm之间。由漠河冻土三轴力学试验结果可知,冻土试样的应力-应变曲线整体呈非线性变形特征,可取应变的15%作为其峰值强度。

2)多元回归分析结果表明,在土体冻结状态下,深度对漠河永冻土体强度的影响较小,围压、环境温度为主要影响因素。围压每增加1 MPa,冻土强度约升高0.718 MPa;温度每降低1℃,冻土强度约升高0.379 MPa。当土体处于融化状态时,围压和埋深共同决定土体的强度。

3)冻土的强度可视为由土体骨架强度与孔隙中冰的胶结强度共同构成,其中土体骨架强度可采用Mohr-Coulomb强度准则进行描述,其内聚力和内摩擦角随深度增加而增大;孔隙中冰的胶结强度随环

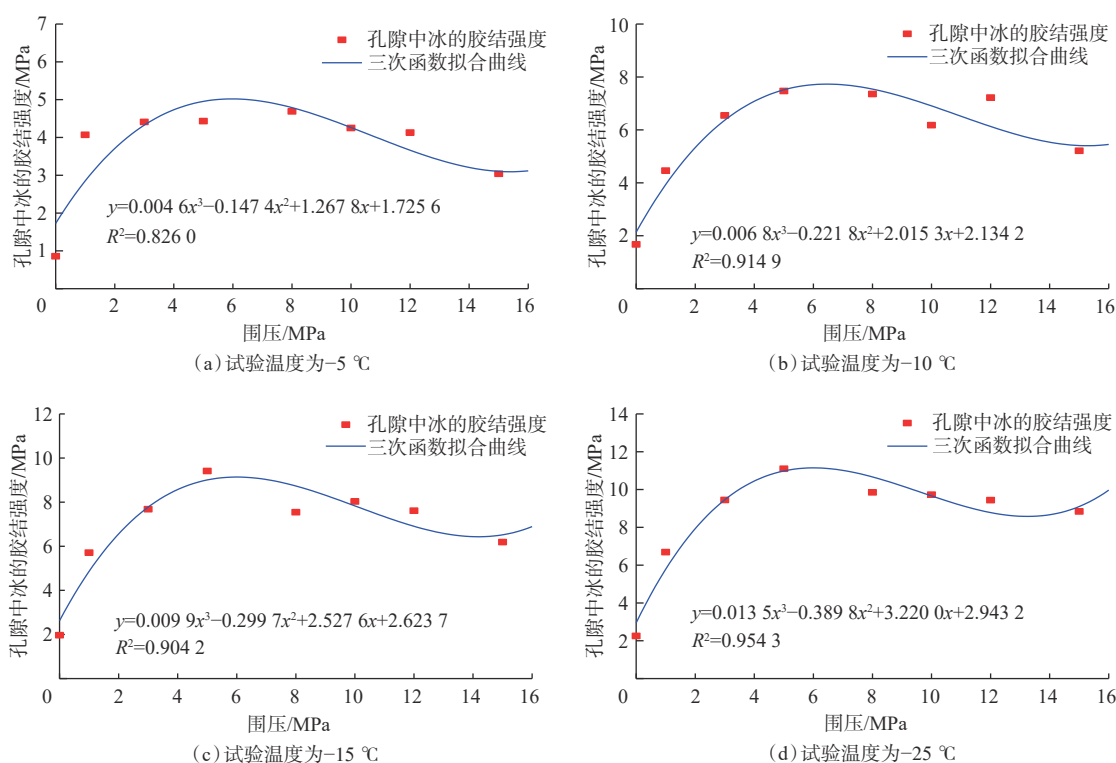


图 6 不同温度、围压下孔隙中冰的胶结强度分布

Fig.6 Cementing strength distribution of ice in pores under different temperatures and confining pressures

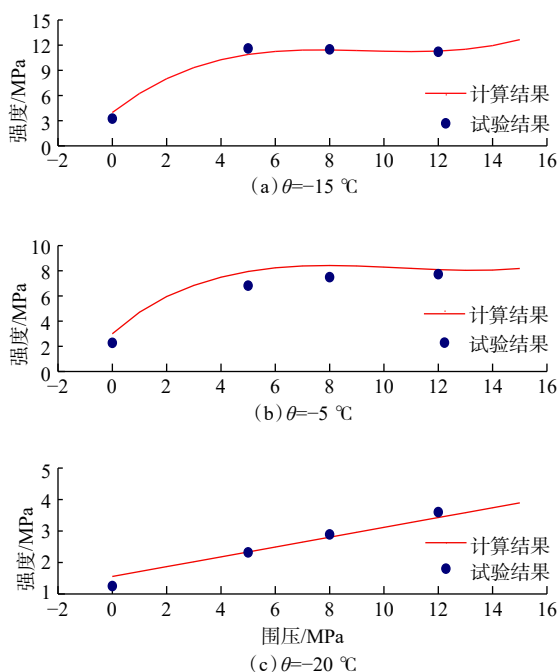


图 7 土体强度计算结果与试验结果对比

Fig.7 Comparison between calculated results and test results of soil strength

境温度降低而升高,随围压增加先升高后降低,可采用三次函数进行描述。

4)构建了漠河冻土强度计算模型,计算结果相

对于试验结果的最大相对误差为 22%,具有一定的精度,可以较好地表征漠河冻土融化-冻结状态下的强度,可为极地冻土力学特性研究提供参考。

参 考 文 献

References

- [1] 肖东辉, 马巍, 赵淑萍, 等. 冻土动力学参数研究的成果综述与展望[J]. 冰川冻土, 2015, 37(6): 1611-1626.
XIAO Donghui, MA Wei, ZHAO Shuping, et al. Study of the dynamic parameters of frozen soil: achievements and prospects[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(6): 1611-1626.
- [2] 苏文德, 周建军. 厦门地区含盐地层冻土力学性能试验研究[J]. 隧道建设, 2016, 36(1): 27-31.
SU Wende, ZHOU Jianjun. Experimental study on mechanical properties of salt-bearing frozen soil in Xiamen, China[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(1): 27-31.
- [3] 王海新, 吴亚平, 孙安元, 等. 循环荷载下冻土桩基力学特性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(10): 2111-2117.
WANG Haixin, WU Yaping, SUN Anyuan, et al. Mechanical properties research about frozen soil pile foundation under cyclic loading[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(10): 2111-2117.
- [4] 栗晓林, 王红坚, 邹少军, 等. 振动荷载作用下冻结砂土强度及破坏特性试验研究[J]. 振动工程学报, 2018, 31(6): 1068-1075.
LI Xiaolin, WANG Hongjian, ZOU Shaojun, et al. The strength and failure properties of frozen sand under vibrating load[J]. Journal of Vibration Engineering, 2018, 31(6): 1068-1075.

- [5] 路贵林. 多年冻土区高温冻土力学特性试验研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- LU Guilin. Experimental study on mechanical properties for warm frozen soils in permafrost regions[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015.
- [6] 张德华, 王梦恕, 任少强. 青藏铁路多年冻土隧道围岩季节活动层温度及响应的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 614-619.
- ZHANG Dehua, WANG Mengshu, REN Shaoqiang. Experimental study on temperature and response of seasonal active layer of tunnel's surrounding rock in permafrost region on Qinghai-Tibet Plateau[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 614-619.
- [7] 杨旭, 严松宏, 马丽娜. 季节性冻土区隧道温度场分析与预测 [J]. 隧道建设, 2012, 32(1): 57-60.
- YANG Xu, YAN Songhong, MA Lina. Analysis on and prediction of temperature field of tunnels located in seasonal frozen area[J]. Tunnel Construction, 2012, 32(1): 57-60.
- [8] 王铁行, 胡长顺, 王秉纲, 等. 考虑多种因素的冻土路基温度场有限元方法 [J]. 中国公路学报, 2000, 13(4): 8-11.
- WANG Tiexing, HU Changshun, WANG Binggang, et al. A finite element method for thermal field analysis of frozen soil subgrade on the consideration of all field-factors[J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(4): 8-11.
- [9] 马巍, 刘端, 吴青柏. 青藏铁路冻土路基变形监测与分析 [J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 571-579.
- MA Wei, LIU Duan, WU Qingbai. Monitoring and analysis of embankment deformation in permafrost regions of Qinghai-Tibet Railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3): 571-579.
- [10] 吴玉林. 青藏铁路多年冻土地区房屋体系研究 [J]. 冰川冻土, 2003, 25(增刊1): 108-111.
- WU Yulin. Study of building system in permafrost regions along the Qinghai-Tibet Railway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(supplement 1): 108-111.
- [11] 袁伟. 冻结砂土三轴抗压强度和变形机理研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- YUAN Wei. Triaxial compressive strength and deformation mechanism of frozen sand[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.
- [12] 马冬冬, 马芹永, 袁璞, 等. 主动围压状态人工冻结砂土 SHPB 试验与分析 [J]. 岩土力学, 2017, 38(10): 2957-2961, 2972.
- MA Dongdong, MA Qinyong, YUAN Pu, et al. SHPB tests on artificial frozen sand and its analysis under active confining pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(10): 2957-2961, 2972.
- [13] 常小晓, 马巍, 王大雁. 高围压下冻结粘土的抗压强度试验研究 [J]. 冰川冻土, 2007, 29(4): 636-639.
- CHANG Xiaoxiao, MA Wei, WANG Dayan. Study on the strength of frozen clay at high confining pressure[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(4): 636-639.
- [14] 黄星, 李东庆, 明锋, 等. 冻结粉质黏土声学特性与物理力学性质试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(7): 1489-1496.
- HUANG Xing, LI Dongqing, MING Feng, et al. Experimental study on acoustic characteristics and physico-mechanical properties of frozen silty clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(7): 1489-1496.
- [15] 黄星, 李东庆, 明锋, 等. 冻土的单轴抗压、抗拉强度特性试验研究 [J]. 冰川冻土, 2016, 38(5): 1346-1352.
- HUANG Xing, LI Dongqing, MING Feng, et al. Experimental study of the compressive and tensile strengths of artificial frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(5): 1346-1352.
- [16] 袁伟, 姚晓亮, 王文丽. 基于离散元的冻结砂土三轴力学特性研究 [J]. 冰川冻土, 2019, 41(6): 1388-1396.
- YUAN Wei, YAO Xiaoliang, WANG Wenli. Study on triaxial mechanical behaviors of frozen sand based on discrete element method[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(6): 1388-1396.
- [17] 白瑞强, 徐湘田, 华树广, 等. 基于多元线性回归模型的冻土强度影响因素显著性分析 [J]. 冰川冻土, 2019, 41(2): 416-423.
- BAI Ruiqiang, XU Xiangtian, HUA Shuguang, et al. Significant analysis of the influence factors on strength of frozen soil base on multivariable linear regression model[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(2): 416-423.

[编辑 令文学]