

冻结水泥砂土单轴抗压力学特性研究

黄建华^{1,2}, 贾敏智^{1,2}

(1. 地下工程福建省高校重点实验室, 福建 福州 350118;

2. 福建理工大学 土木工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 为研究冻结水泥砂土的单轴抗压力学性能特征, 利用微机控制电子万能试验机分别进行冻结温度为-5、-10、-15、-20℃和 $w_{\text{水泥}}$ 为0%、5%、10%、15%的冻结水泥砂土试样单轴压缩试验, 得到了冻结水泥砂土在不同冻结温度和水泥掺量条件下的应力-应变及弹性模量变化曲线。研究表明, 单轴压缩试验条件下, 冻结水泥砂土的破坏程度随着冲击气压的增加而加大, 随着冻结温度的降低而减小。其单轴抗压强度和弹性模量等力学参数均随着水泥掺量的增加呈正比例增大, 该研究成果可为地下暗挖掘进工程的冻结围护加固技术提供理论基础。

关键词: 冻结水泥砂土; 单轴抗压强度; 弹性模量; 冻结; 单轴压缩试验

中图分类号: TU445

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2025)04-0338-06

Study on uniaxial compressive properties of frozen sand cement

HUANG Jianhua^{1,2}, JIA Minzhi^{1,2}

(1. Key Laboratory of Underground Engineering for Colleges and Universities of Fujian Province, Fuzhou 350118, China;

2. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: In order to study the uniaxial compressive mechanical properties of frozen sand cement, uniaxial compression tests of frozen sand cement specimens at different freezing temperatures (-5, -10, -15, -20℃) and different cement dosages (0%, 5%, 10%, 15%) were carried out by using a microcomputer-controlled electronic universal testing machine respectively. The stress-strain curves and modulus of elasticity curves of frozen sand cement at different freezing temperatures and cement dosages were obtained. Results show that under the uniaxial compression test conditions, the damage degree of frozen sand cement increases with the increase of impact air pressure and decreases with the decrease of freezing temperature. The mechanical parameters such as uniaxial compressive strength and modulus of elasticity increase proportionally with the increase of cement dosage, and the research results can provide a theoretical basis for the freezing enclosure reinforcement technology of underground concealed excavation project.

Keywords: frozen sand cement; uniaxial compressive strength; elastic modulus; freezing; uniaxial compression test

富水软弱地层土体加固和抑制冻结施工过程中, 容易出现土体的冻胀融沉等问题, 国内外专家提出将水泥改良土与人工冻结相结合的联合加固方法^[1], 联合加固后的冻结水泥土密实度增高, 孔隙率降低, 稳定性和强度显著增强^[2], 水泥的固化作用进一步抑制了土体在施工过程中发生冻胀融沉变形^[3-4]。

目前, 已有学者通过试验研究了不同影响因素下冻土的力学特性。王升福等^[5]以冻结水泥改良黏土为研究对象, 通过单轴试验得出不同冻融状态下改良土的强度变化规律。姚兆明等^[6]基于单轴抗压试验与蠕变试验建立修正模型, 探究不同冻结温度和应力加载等级下冻结黏土的蠕变和强度规律, 发现冻土的强度随冻结温度的降低而提高。陈

收稿日期: 2024-09-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678153)

第一作者简介: 黄建华(1969—), 男, 福建莆田人, 教授, 博士, 研究方向: 岩土与地下工程。

雨漫等^[7]通过单轴抗压强度试验和三轴剪切强度试验对比,分析不同冻结温度条件下冻土的强度特性。张亚欣等^[8]则对不同深度原状冻土开展单轴压缩试验,研究发现冻土的抗压强度均随着土层深度的增加呈先减小后增大的变化规律。也有部分学者以冻土为研究对象,通过单轴压缩试验研究不同冻结温度、掺砾量以及含盐量等因素对冻土单轴抗压强度的影响规律^[9-13]。

这些成果为冻土力学特性及其影响因素的研究提供了基础,但在冻结水泥砂土力学特性方面的研究相对匮乏。本文以福州某滨海地区冻结水泥砂土为研究对象,利用电子万能试验机开展单轴压缩试验,以探讨不同冻结温度及水泥掺量条件下冻结水泥砂土的单轴抗压强度等力学特性,为冻结水泥土加固技术提供理论基础。

1 冻结水泥砂土的单轴压缩试验

1.1 冻结水泥砂土单轴试样制备

试验用滨海地区砂土,密度为 1.86 g/cm^3 ,黏聚力 0.2 kPa ,内摩擦角 16° ,含水率 35.31% ,该类土具有含水量高、压缩性大、渗透性差等特点^[14],土体干密度较高且颗粒间排列紧密。

采用 P · O42.5 普通硅酸盐水泥,制备及试验方法按照《人工冻土物理力学性能试验规程》(MT/T593.4-2011)执行,流程如下:

(1)如图 1(a)、(b)所示,将原状土用木锤击碎为体积较小的土块,将小土块放入研磨器中研磨后,再放入直径为 0.5 mm 的筛网中过滤,以筛除原状土中含有的部分石粒、大粒径土颗粒以及其他杂物。

(2)将筛分后的土样置于烘箱中,调节烘箱温度为 $105\text{ }^\circ\text{C}$,持续烘干 24 h 后取出。依据预设比例(干土质量的 $0\%、5\%、10\%、15\%$),分别向土样中加入水泥,将水泥与土样混合均匀后,分次加入一定质量的蒸馏水。

(3)在制备单轴压缩试样时,选用 $\Phi 50\text{ mm}$ 、高 100 mm 的塑料套筒模具。操作前,在冻结水泥土所用模具内壁轻涂一层凡士林。随后将土样分层填入套筒内,并对其分层击实、凿毛处理,填充完成后用刮刀将套筒两端的土体磨平,用保鲜膜包裹土样,而后对制作完成的试样进行为期 4 周的养护,如图 1(c)。

(4)将养护并脱模后的试样分别放入冻结温

度为 $-5、-10、-15$ 和 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 的全自动低温冻融试验机内冷冻处理 24 h ,见图 1(d),每组准备 3 个试样进行平行试验。

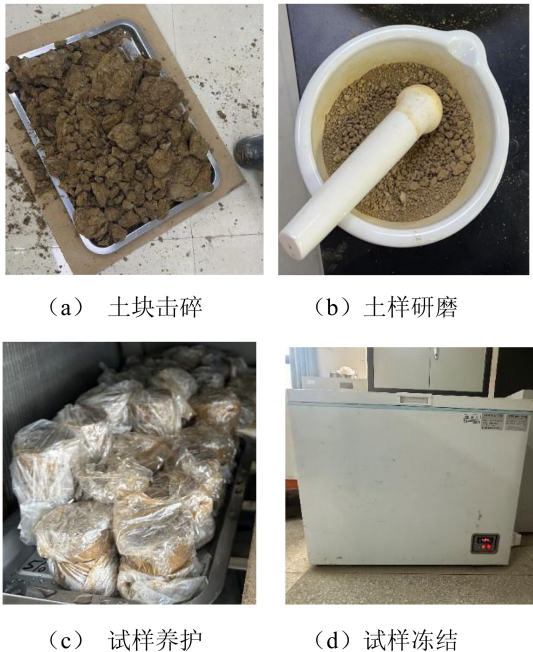


图 1 冻结水泥砂土单轴试样制备图
Fig.1 Diagram of uniaxial specimen preparation for frozen sand cement

1.2 冻结水泥砂土单轴压缩试验

1.2.1 试验方案

采用 ETM205D 型微机控制冻土综合试验系统进行冻结水泥砂土的单轴压缩试验,共设定 4 种冻结温度($-5、-10、-15、-20\text{ }^\circ\text{C}$)以及 4 种 $w_{\text{水泥}}$ ($0\%、5\%、10\%$ 和 15%)的水泥。

1.2.2 试验步骤

(1)做冻结水泥砂土的单轴压缩试验前,将恒温箱沿滑轨移到规定位置处并启动温控系统,设定试验目标温度。

(2)待恒温箱温度达到标定冻结温度条件后,将试样平放于压力机上、下压盘间。放置试样时应尽量保证试样中心与压盘中心对齐,以减少试样偏心概率。

(3)按照规范将电子万能试验机加载速率设定为 $1\text{ }^\circ/\text{min}$,对应的加载速度为 1 mm/min ,启动压力机开始试验,待试样应力达到峰值及稳定状态时停止试验;若应力持续增大,则当轴向应变达到或大于 20% 时停止加载。保存试验数据,取出破坏后的冻结水泥砂土试样拍照记录,如图 2 所示。



图 2 冻结水泥砂土压缩试验过程图

Fig.2 Schematic diagram of compression test process for freezing sand cement

2 冻结水泥砂土单轴压缩结果分析

2.1 冻结水泥砂土的单轴抗压力学特性

2.1.1 冻结温度对单轴抗压力学特性的影响

试验过程中的单轴抗压强度应力计算公式：

$$\sigma = \frac{F}{A}$$
 (1)

式中， σ 为试样的单轴抗压强度应力，MPa； F 为单轴静荷载，N； A 为试样的横截面面积， mm^2 。

应变计算公式：

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0}$$
 (2)

式中， ε 为试样的单轴轴向应变； Δh 为试样的单轴轴向变形，mm； h_0 为试样高度，mm。

根据公式(1)和公式(2)计算得到冻结水泥砂土单轴抗压试验的抗压强度值，如表 1 所示。

图 3 为 $w_{\text{水泥}} = 10\%$ 时，不同冻结温度条件下冻结水泥砂土的应力-应变曲线。由图 3 可知，不同冻结温度条件下冻结水泥砂土试样的应力-应变曲线大致可分为压密、弹性变形、塑性屈服和峰后 4 个阶段。

在压密阶段，试样内部的微裂纹发生闭合，曲线的斜率也随其应变的增大而增加。随着冻结水泥砂土试样被持续压密，应力-应变曲线开始出现屈服点。低冻结温度条件 ($T = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下试样的应力-应变曲线在达到屈服点后，应力下降迅速，出现较明显的峰后变形现象，宏观表现为试样结构破坏，即裂纹贯穿试样整体。在冻结水泥砂土

的单轴压缩试验中，冻结温度的降低，使得试样整体强度增大的同时也增加了试样的脆性，从而改变了试样在极限承载状态下的形变程度。

表 1 水泥土冻土单轴压缩试验数据结果汇总

Tab.1 Results of uniaxial compression test data of frozen sand cement

试验 编号	冻结 温度 / $^{\circ}\text{C}$	$w_{\text{水泥}}$ /%	单轴抗压 强度平均值 /MPa	弹性模量 平均值/MPa
S-05	-5	0	3.96	43.57
S-55		5	5.39	143.48
S-105		10	6.79	230.26
S-155		15	9.28	360.57
S-010	-10	0	5.96	150.37
S-510		5	9.83	214.34
S-1010		10	14.91	596.28
S-1510		15	17.19	803.52
S-015	-15	0	7.03	180.98
S-515		5	13.91	600.37
S-1015		10	18.07	851.95
S-1515		15	19.91	923.01
S-020	-20	0	8.97	230.67
S-520		5	14.99	756.93
S-1020		10	20.07	912.14
S-1520		15	22.21	1 125.02

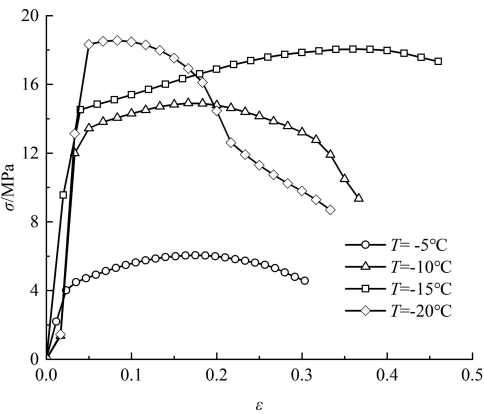


图 3 不同冻结温度冻结水泥砂土-应力应变曲线

Fig.3 Stress-strain curve of frozen sand cement with different freezing temperatures

图 4 为冻结水泥砂土单轴抗压强度值随冻结温度的变化曲线。由图 4 可知,在水泥掺入量一定的条件下,冻结水泥砂土的抗压强度值随着冻结温度的降低而升高,当冻结温度降低至 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,抗压强度达到最大值,且抗压强度与冻结温度之间具有较强的线性相关性。造成上述现象的原因 为冻土是由土颗粒、液态水、冰颗粒以及气体形成的四相体,由于冰的存在使得冻土与常规土强度及变形性能存在较大的差异,而在微观角度下,冻土强度是由范德华力、结构构造联结以及冰胶结联结组成,其中冰胶结联结对冻土强度和变形特征起关键作用^[11]。随着冻结温度的降低,试样内部有越来越多的未冻水相变为冰,使得试样的力学特性逐渐由塑性向脆性转化,进而增强试样的整体性及抗压强度。

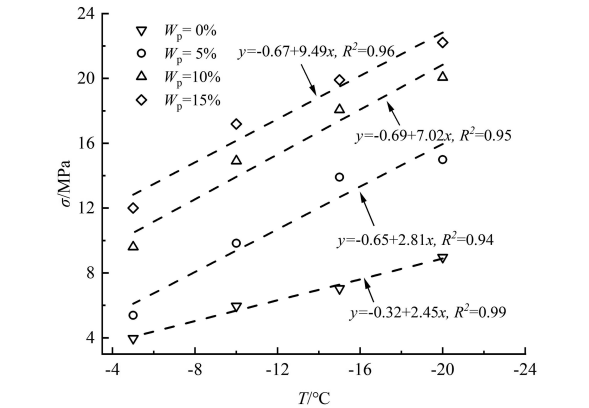


图 4 不同冻结温度冻结水泥砂土单轴抗压强度变化图
Fig.4 Variation of uniaxial compressive strength of frozen sand cement with different freezing temperatures

2.1.2 水泥掺入量对单轴抗压力学特性的影响

图 5 为冻结温度 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,不同 $w_{\text{水泥}}$ 条件下,冻结水泥砂土的应力-应变曲线。由图 5 可知,不同 $w_{\text{水泥}}$ 条件下,冻结水泥砂土试样的应力-应变曲线同样可划分为压密、弹性变形、塑性屈服以及峰后 4 个阶段。不同 $w_{\text{水泥}}$ 条件下,冻结水泥砂土的应力-应变曲线走势相同,均呈先急速上升,上升至屈服点时缓慢下降的变化趋势, $w_{\text{水泥}}=5\%$ 与 $w_{\text{水泥}}=15\%$ 条件下的冻结水泥砂土应力-应变曲线存在明显差异。 $w_{\text{水泥}}=15\%$ 时,试样的应力-应变曲线到达应力峰值点后迅速下降,即峰后软化现象更为明显,且曲线弹性阶段时程较短,其弹性阶段的斜率值也会随着水泥掺量增加而增大。

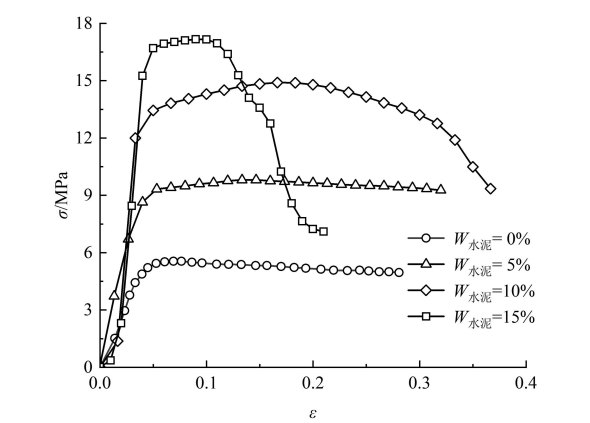


图 5 不同水泥掺量冻结水泥砂土应力应变曲线
Fig.5 Stress-strain curves of frozen sand cement with different cement dosages

图 6 为冻结水泥砂土单轴抗压强度随 $w_{\text{水泥}}$ 的变化曲线,由图 6 可知,当冻结温度一定时,冻结水泥砂土的抗压强度随 $w_{\text{水泥}}$ 的增大而增加;当 $w_{\text{水泥}}$ 为 $5\% \sim 10\%$ 时,抗压强度值的增幅最大;当 $w_{\text{水泥}}$ 增加至 15% 时,抗压强度达到最大值,即 $w_{\text{水泥}}$ 对试样抗压强度的提高有显著作用。

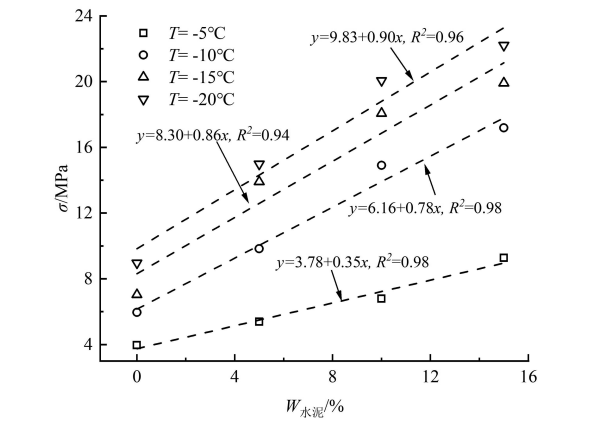


图 6 不同水泥掺量冻结水泥砂土单轴抗压强度变化图
Fig.6 Variation of uniaxial compressive strength of frozen sand cement with different cement dosages

2.1.3 冻结水泥砂土的弹性模量

图 7 为不同冻结温度条件下,冻结水泥砂土的弹性模量随 $w_{\text{水泥}}$ 变化的特征曲线,分析图 7 可知,图示拟合函数大致走势一致,即弹性模量值均随着冻结温度的降低呈线性增大趋势。当冻结温度降低至 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,试样的弹性模量值最大,且随着冻结温度逐渐降低,对应弹性模量增加速率逐渐增大。这是因为随着冻结温度的逐渐降低,试样内部越来越多的未冻水相变为冰,在该过程

中水泥土内部会产生较大的冻胀力。未冻水相变为冰的过程产生的冻胀力越大,试样内部土颗粒、冰颗粒以及水泥水化胶结物颗粒间的相互作用越大,试样的弹性模量也就越大。

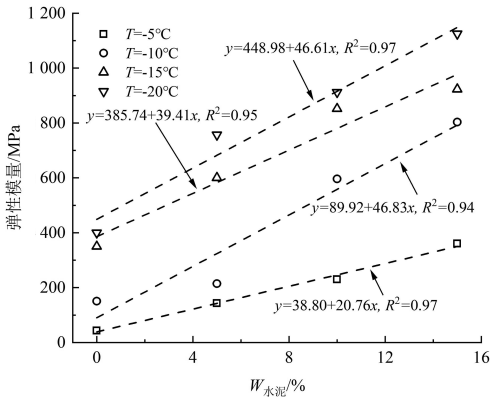


图 7 不同冻结温度条件下冻结水泥砂土弹性模量变化曲线

Fig.7 Change curves of elastic modulus of frozen sand cement under different freezing temperature conditions

图 8 为不同水泥掺量条件下冻结水泥砂土弹性模量值随冻结温度的变化曲线,分析图 8 可知,图示拟合函数走势基本一致,即冻结水泥土的弹性模量值均随着水泥掺量的增加呈线性增加趋势。当 $w_{\text{水泥}}$ 增加至 15% 时,对应试样的弹性模量值最大。冻结水泥土弹性模量随 $w_{\text{水泥}}$ 的变化规律可解释为:随着水泥掺量逐渐增加,试样内部水泥水化胶结物也就越多,水泥水化胶结物颗粒与土颗粒、冰颗粒构成的内部骨架结构就更加稳定,试样的整体强度和抗变形能力增大,宏观表现为弹性模量随水泥掺入量的增加而增大。

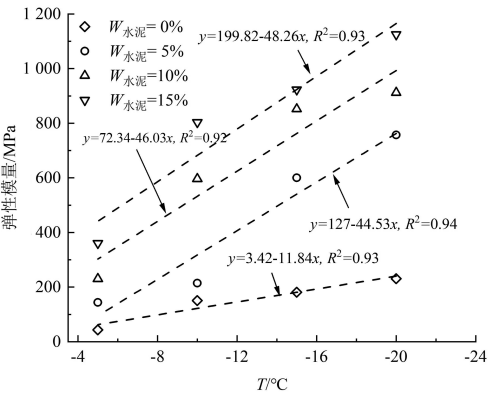


图 8 不同水泥掺量条件下冻结水泥砂土弹性模量变化曲线

Fig.8 Change curves of elastic modulus of frozen sand cement under different cement dosing conditions

2.2 冻结水泥砂土的破坏特征

图 9 为冻结温度 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,不同 $w_{\text{水泥}}$ 条件下冻结水泥砂土试样的破坏图。分析该图可知,当 $w_{\text{水泥}}$ 在 0% ~ 10% 范围内变化时,冻结水泥砂土在单轴压缩过程中呈“侧鼓状”变形,随着 $w_{\text{水泥}}$ 逐渐增加至 15%,试样开始出现断裂面,即在单向压缩条件下,试样四周出现劈裂碎块且碎块的几何形状为片状。随着 $w_{\text{水泥}}$ 增加,试样内部水泥水化的胶结产物增多,水泥水化胶结物、土颗粒以及冰晶等混合物间的整体结构更稳定,试样的整体抗压强度更强。

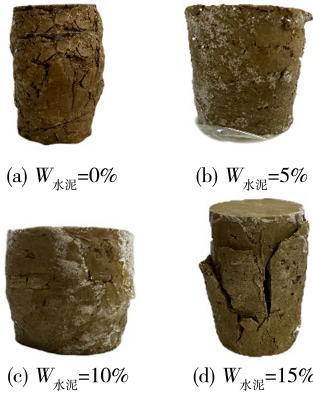


图 9 $T = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时不同 $w_{\text{水泥}}$ 冻结水泥砂土破坏图

Fig.9 Failure diagram of frozen sand cement with different $w_{\text{水泥}}$ at $T = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$

图 10 为 $w_{\text{水泥}} = 5\%$ 时,不同冻结温度条件下,冻结水泥砂土试样的破坏特征图,分析图 10 可知,随着冻结温度降低,冻结水泥砂土试样的破坏程度逐渐增大,碎块数量增多。

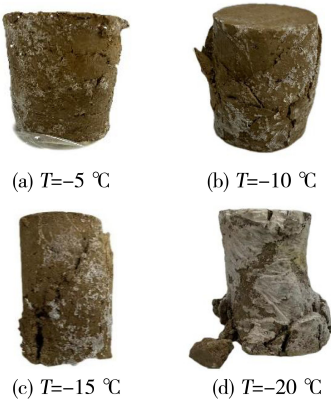


图 10 $w_{\text{水泥}} = 5\%$ 时不同冻结温度冻结水泥砂土破坏图

Fig.10 Failure diagram of frozen sand cement at different freezing temperatures with $w_{\text{水泥}} = 5\%$

3 结论

- 1)低 $w_{\text{水泥}}$ 条件下,冻结水泥砂土的破坏主要发生在试样中部,以“侧鼓式”破坏为主;随着 $w_{\text{水泥}}$ 的增大,冻结水泥砂土试样开始向“劈裂式”破坏演化,且其破坏程度随着冻结温度的降低而增大。
- 2)冻结水泥砂土的单轴抗压强度值随着 $w_{\text{水泥}}$ 的增大而增加,水泥的掺入有效提高了冻结水泥砂土的整体抗压强度,当 $w_{\text{水泥}}$ 从 0%增加至 15% 时,其抗压强度达到峰值,且随着 $w_{\text{水泥}}$ 的增

- 加,试样的力学特性逐渐由塑性向脆性转变。
- 3)随着冻结温度逐渐降低,冻结水泥砂土试样内部未冻水的相变程度增大,试样的整体性增强,其单轴抗压强度值随着冻结温度的降低而增大,当冻结温度从 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低至 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,对应冻结水泥砂土的抗压强度值最大。
- 4)冻结水泥砂土的弹性模量值随着冻结温度的降低和 $w_{\text{水泥}}$ 的增加而呈逐渐增大趋势,其弹性模量与冻结温度和 $w_{\text{水泥}}$ 具有较强的线性相关性,该结论可为相关工程提供理论参考与施工依据。

参考文献:

[1] 黄建华,严耿明,杨鹿鸣. 水泥改良土地层联络通道冻结温度场分析[J]. 土木工程学报,2021,54(5):108-116.

[2] 陈晓鹏. 人工冻结水泥改良土力学性能及其冻胀融沉特性研究[D]. 抚州:东华理工大学,2022.

[3] 马巍,王大雁. 深土冻土力学的研究现状与思考[J]. 岩土工程学报,2012,34(6):1123-1130.

[4] WANG B,RONG C X,CHENG H,et al. Experimental investigation on heat transfer law of multiple freezing pipes in permeable stratum with high seepage velocity[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2022,182:121868.

[5] 王升福,张祥荣,周彪,等. 人工冻结水泥改良软黏土冻融及强度特性研究[J]. 东华理工大学学报(自然科学版),2024,47(4):370-380.

[6] 姚兆明,赖龙辉,汤海东,等. 冻结黏土非整数阶修正 S-M 损伤蠕变模型研究[J]. 人民长江,2025,56(1):180-186.

[7] 陈雨漫,林斌. 冻结黏土的强度与变形特性及参数研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版),2021,41(5):49-54.

[8] 张亚欣,林斌. 深部人工冻结土力学性质研究[J]. 低温建筑技术,2024,46(3):117-120.

[9] 毕贵权,熊猛,柴明堂,等. 多年冻土区不同深度原状土的力学试验研究[J]. 兰州理工大学学报,2023,49(3):109-114.

[10] 张勇敢,鲁洋,刘斯宏,等. 温度和掺砾量对冻结掺砾黏土单轴压缩特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(11):2357-2364.

[11] 平永庆,王俊,韩翔. 含盐冻结砂土单轴压缩试验研究[J]. 山西建筑,2019,45(21):67-68.

[12] 刘昶,靳绍虎,赵文强,等. 人工冻结淤泥质黏土单轴抗压强度试验研究[J]. 价值工程,2024,43(24):122-124.

[13] 解北京,刘天乐,栾铮,等. 冻结黏土单轴动态力学特性及本构模型研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2024,56(2):183-191.

[14] 王明磊. 滨海相沉积软土地基处理及沉降预测研究[D]. 北京:北京交通大学,2017.

(责任编辑:陈雯)