



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403343

引用格式:袁昌,钟天乾,马起涛,等.冻结水泥砂土应力应变关系及其影响因素[J].科学技术与工程,2025,25(8):3359-3371.

Yuan Chang, Zhong Tianqian, Ma Qitao, et al. Stress-strain relationship and its influencing factors of frozen cement-sand soil[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(8): 3359-3371.

冻结水泥砂土应力应变关系及其影响因素

袁昌^{1,2,3}, 钟天乾¹, 马起涛¹, 陈鑫^{1,2}, 李栋伟⁴, 赖远明^{3,5}

(1. 东华理工大学土木与建筑工程学院, 南昌 330013; 2. 江西省地质环境与地下空间工程研究中心, 南昌 330013;
3. 中国科学院西北生态环境资源研究院冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000; 4. 大连大学建筑工程学院, 大连 116622;
5. 重庆交通大学土木工程学院, 重庆 400074)

摘要 在强渗流砂土地层中,常规的地层注浆法难以达到理想的加固、封水效果。为了研究富水砂土地层冻结-注浆联合体的力学特性,通过三轴试验对人工冻结水泥砂土的应力应变关系及其影响因素开展研究,探讨不同冻结环境温度、养护龄期和围压等条件下试样应力应变关系变化规律及强度机理。结果表明:冻结水泥砂土应力应变曲线具有一定应变强化的非线性延性阶段,整体包括密实阶段,线弹性阶段,非线性延性阶段,破坏阶段,呈应变软化型。冻结环境温度的降低、养护龄期的增加使得土体黏聚力和内摩擦角呈非线性增长趋势,提高了冻结水泥砂土抗剪强度,减少了非线性延性阶段应变占比,增强了冻结水泥砂土的脆性;围压的增大提高了冻结水泥砂土抗剪强度,增加了非线性延性阶段应变占比,提高了冻结水泥砂土的延性。基于莫尔-库伦强度准则,建立考虑冻结环境温度和养护龄期综合影响的冻结水泥砂土强度非线性预测模型,预测结果与实测值误差小于5%。研究成果可为富水砂土地层冻结-注浆联合加固方案精细化设计提供参数支持。

关键词 冻土工程; 应力-应变; 冻结水泥砂土; 抗剪强度

中图分类号 TU444; **文献标志码** A

Stress-strain Relationship and Its Influencing Factors of Frozen Cement-sand Soil

YUAN Chang^{1,2,3}, ZHONG Tian-qian¹, MA Qi-tao¹, CHEN Xin^{1,2}, LI Dong-wei⁴, LAI Yuan-ming^{3,5}

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Donghua University of Technology, Nanchang 330013, China;
2. Jiangxi Geological Environment and Underground Space Engineering Research Center, Nanchang 330013, China;
3. State Key Laboratory of Frozen soil Engineering of Northwest Institute of Ecological Environment and Resources,
Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 4. School of Architectural Engineering, Dalian University, Dalian 116622, China;
5. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

[Abstract] Reinforcement and water sealing effect difficult to achieve by conventional stratum grouting method in strong seepage sandy soil stratum. In order to study the mechanical characteristics of freezing-grouting combination in water-rich sand stratum, the stress-strain relationship and its influencing factors of artificially frozen cement sand were studied by triaxial tests, and the variation law and strength mechanism of stress-strain relationship of samples under different freezing temperature, curing age and confining pressure were discussed. The results show that the stress-strain curve of frozen cement-sand has a certain strain-hardened nonlinear ductility stage including compaction stage linear elasticity stage nonlinear ductility stage and strain-hardening stage. The non-linear increase of cohesion and internal angle of frozen cement-sand due to the curing age of freezing temperature increases the shear strength of frozen cement-sand, and the non-linear ductility phase strain ratio enhances the brittleness of frozen cement-sand. The increase of confining pressure increases the shear strength of frozen cement-sand, and the proportion of strain in nonlinear ductility stage improves the ductility of frozen cement-sand. Based on Mohr-Coulomb strength criterion, a non-linear strength prediction model of frozen cement sand was established, which considered the influence of freezing temperature and curing age. The error between the predicted results and the measured values is less than 5%. The research results can provide parameter support for the fine design of freezing-grouting combined reinforcement scheme for water-rich sandy soil stratum.

[Keywords] frozen soil engineering; stress-strain; frozen cement-sand soil; shear strength

收稿日期: 2024-05-07; 修订日期: 2024-12-29

基金项目: 国家自然科学基金(42107203, 42061011, 41977236); 冻土工程国家重点实验室开放基金(SKLFSE202012); 江西省自然科学基金(2023BAB214077; 2022BBG71W01; 20232BBE50025); 东华理工大学自然科学基金(DHBK2019251)

第一作者: 袁昌(1990—), 男, 汉族, 江西南昌人, 博士, 讲师。研究方向: 冻土工程理论与技术。E-mail: yuanchang@lzb.ac.cn。

中国东南沿海及中东部城市普遍存在承压性富水砂土地层,超过70%城市存在地铁线路下穿江河、湖泊等情况。在强渗流砂土地层中,常规的地层注浆法往往难以达到理想的加固、封水效果。韩晓明等^[1]、田海洋^[2]在穿越江底隧道、地铁隧道施工中,应用人工冻结法为隧道联络通道开挖提供有效的加固、止水帷幕,降低涌水、涌砂风险。奚家米等^[3]、王书磊等^[4]研究表明,冻结法在地铁联络隧道中加固治理、抢险抢险起到了非常好的效果,但是在工况较复杂和距离较长的联络通道中,冻结法投入资金量大,且融沉量大,融沉周期长。孙立建等^[5]、赵向锋等^[6]选择冻结-注浆联合施工法对隧道富水软弱地层进行加固,能够更好地控制融沉现象,在保障施工安全的前提下极大节约了施工成本。冻结注浆砂土固结体力学特性是影响方案设计的关键因素,因此要对其变形和强度特性进行深入分析。徐学祖等^[7]、雷乐乐等^[8]研究表明,冻土的热物理力学性质主要取决于温度、含水率、含盐量、围压、冻融循环作用等。李顺群等^[9]对不同的影响因素进行显著性分析,认为在研究冻土强度等力学行为时,应综合考虑各主要因素及因素之间的交互作用影响。郜新军等^[10]在对富水粉质黏土地层的研究中发现,土体冻结分为4个阶段:快速降温、水潜热释放、稳定降温、冻结维护。王彬等^[11]基于4种冻土强度准则对不同流速条件下冻结壁的力学特性进行了计算分析,发现冻结壁的承载力随着水流速度的增大而减小。陈鑫等^[12]、刘欣等^[13]研究发现,冻结水泥土为剪切破坏,其强度受冻结温度影响较大,且随着养护龄期的增加其强度随之增大并且脆性破坏特征越明显。于学敏^[14]通过试验发现,注浆、冻结粉细沙的抗剪强度要大于注浆、不冻结的粉细沙。徐湘田等^[15]、赖远明等^[16]、张鸿朋等^[17]通过三轴试验对不同围压和应力路径的冻结砂土应力应变曲线分析得出,围压小于3 MPa时为应变软化型,当围压超过3 MPa后表现为应变硬化。许胜才等^[18]通过试验分析出水泥土试样三轴试验的应力-应变曲线呈应变软化型,并且在水泥土发生破坏后,伴随有围压对水泥土的膨胀效应。

基于此,通过对冻结水泥砂土进行三轴试验,探讨不同冻结温度、养护龄期、围压等影响因素下冻结水泥砂土应力-应变关系及强度变化规律,为冻结-注浆联合施工方案设计提供理论支持。

1 试样基本物理性质与试验方法

1.1 砂土基本物理性质

本试验采用南昌地区富水砂层砂土。在此状

态下,砂土呈饱和状态。参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123 - 2019)^[19],进行常规土工试验得到砂土的基本物理参数和颗粒级配曲线分别如表1、表2和图1所示。试验所用普通硅酸盐水泥化学成分如表3所示。

表1 富水砂土的基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties indexes of water-rich sand soil

土样	含水率	比重	干密度/(g·cm ⁻³)	孔隙率/%
砂	饱和	2.64	1.71	35.10

表2 砂土粒径

Table 2 Grain size of sand soil

有效粒径/ mm	中值粒径/ mm	限制粒径/ mm	不均匀 系数	曲率 系数	细度 模数
0.184	0.420	0.940	5.11	1.02	2.71

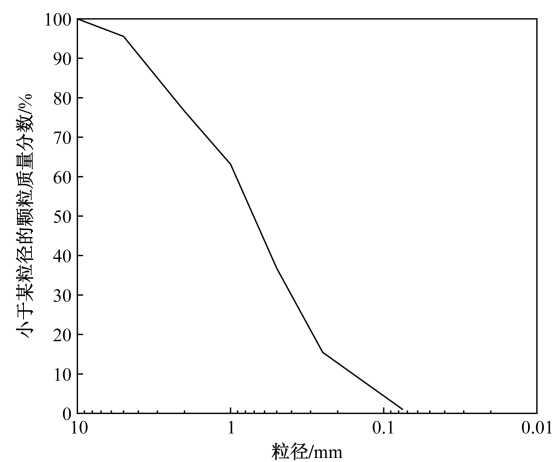


图1 砂土颗粒级配

Fig. 1 Grading of sand and soil particles

表3 水泥化学成分

Table 3 Chemical composition of cement

型号	质量分数/%						烧矢量/ %
	S ₁ O ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	
P.O 42.5	24.3	4.8	3.8	55.3	4.2	2.2	2.4

1.2 试验方案及方法

取水泥掺入比为12%,考虑冻结环境温度、围压、养护龄期等影响因素,开展冻结水泥砂土三轴剪切试验,试验方案如表4所示。

表4 试验方案

Table 4 Test protocol

序号	冻结环境温度/°C	围压/kPa	养护龄期/d
1	0	100	3
2	-5	200	7
3	-10	300	14
4	-15	400	28
5	-20	500	—

采用 GDS 三轴仪开展三轴压缩试验,具体试验步骤如下。

步骤 1 备料。试样制备尽可能模拟施工实际土质情况。由于是在富水砂层的施工条件下,所以试样取为饱和状态,然后按照 0.55 的水灰比,配制 12% 水泥掺入比的试样,进行搅拌,制成水泥砂土土料。

步骤 2 制样。用配制好的土料分层填装至 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的试模中并充分振捣,进行标准养护至相应龄期。

步骤 3 养护。将养护至龄期的水泥砂土试样放入恒温箱中,在试验负温下恒温 24 h 以上。

步骤 4 预处理。利用试验机对恒温 24 h 后的冻结水泥土样进行试验,为保证试样与压力机上下面充分接触,将试样表面用砂纸打磨平整,并进行预压处理。

步骤 5 试验。以 1 mm/min 的速率进行加载,直至试样破坏。取峰值强度为极限抗压强度,为确保数据的准确性消除试验误差,每组试验设 3 个平行试样,剔除异常数据后,最终强度值取其平均值。

2 冻结水泥砂土应力-应变关系变化规律

2.1 冻结水泥砂土应力-应变曲线形态特征

在低应力围压条件下,冻结水泥砂土应力应变曲线主要表现为应变软化型,图 2 为 $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下冻结水泥砂土和冻结砂土应力-应变曲线,总体可分为 4 个变化阶段:①压密阶段:制样完成后,土体颗粒之间仍然存在孔隙未被完全填充,在试验加载初期,试样产生了一小段压缩密实过程,曲线中主要表现为应变增加,应力增长幅度较小;②线弹性阶段:偏应力水平较低时,应力随应变呈近似线性增长,压缩模量 E_s 保持不变,试样未发生屈服、破坏;③非线性延性阶段:试样发生屈服,随着应变增加,试样偏应力值趋于平缓、稳定,应力应变曲线出现一定应变跨度的平台阶段。在该阶段内,偏应力达到峰值,并以此作为试样抗剪强度;④破坏阶段:试样偏应力随着应变增加呈快速减小趋势,并最终趋于稳定。在该阶段内,将偏应力最终趋于稳定值作为残余强度。

相比冻结砂土,冻结水泥砂土抗剪强度值显著增大,线弹性变化斜率大幅度增大,非线性延性阶段显著缩短,表现出更明显的脆性特征。对比图 2 中 $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ 、围压 500 kPa 条件下两者应力应变曲线,由于水泥的掺入,冻结水泥砂土抗剪强度约上冻结砂土的 3 倍,由 2.7 MPa 增加到 8.4 MPa;线弹性阶

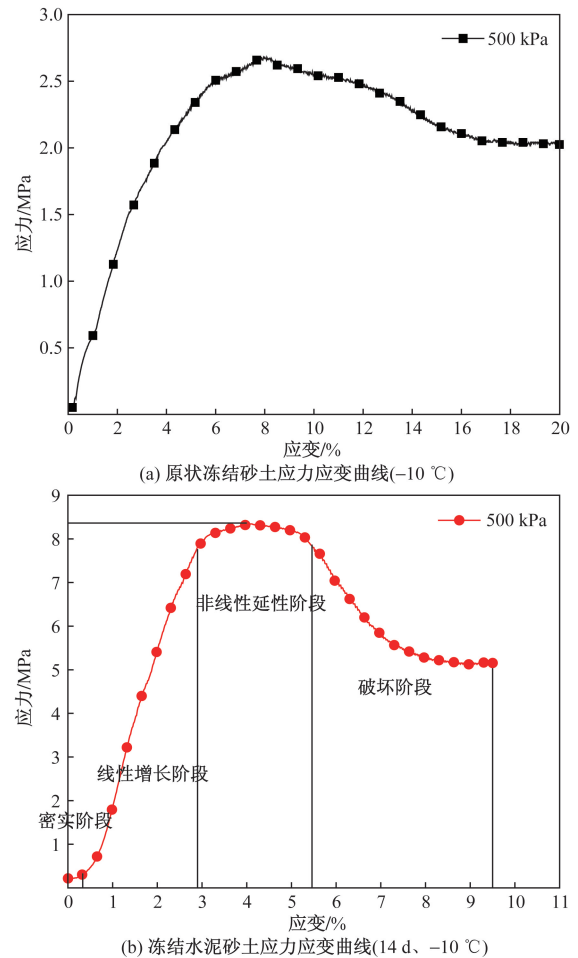


图 2 冻结水泥砂土和冻结砂土应力应变曲线
Fig. 2 Stress and strain curves of frozen cement sand and frozen sand

段变化斜率(即压缩模量 E_s)约是冻结砂土的 5 倍,从 0.53 MPa 增加到 2.6 MPa;非线性延性阶段占比由 40% 缩短到 27.2%。

在整个压缩剪切试验过程中,由于处于负温条件下,土体微小孔隙内的自由水逐渐冻结成冰,增加了与水泥砂土之间的密实程度,同时,水泥砂土的强度大于土体内部微小孔隙中冰的强度,随着荷载的增大,土体内部微小孔隙中的冰率先破坏,此时试样出现细微裂缝,但整体并未破坏。与此同时,由于围压的影响,对土体有一定的紧固作用,使得土体并未快速的进入破坏阶段,由此引入非线性延性阶段。

为了量化描述在不同影响因素下冻结水泥砂土应力应变曲线的延性特征,定义非线性延性阶段占比为

$$\eta = \frac{\varepsilon_{E_s} - \varepsilon_{E_s}}{\varepsilon} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中: ε 为应变; ε_{E_s} 为压缩模量 E_s 开始变化时

所对应的应变,即非线性延性阶段的开始; ϵ_{E_s} 为结束非线性延性阶段时,对应的应变。

2.2 不同冻结环境温度影响下冻结水泥砂土的应力应变关系

以养护龄期为 14 d 的冻结水泥砂土为代表,不同冻结环境温度条件下冻结水泥砂土应力应变曲线如图 3 所示,在不同围压下,其应力应变曲线规律

基本相同,但是,非线性延性阶段占比、强度和残余应力存在差异。

2.2.1 冻结环境温度对非线性延性阶段占比的影响

随着冻结环境温度的降低,其非线性延性阶段占比减小,试样脆性破坏特征越显著。以养护期为 14 d 的冻结水泥砂土为代表,图 4 为非线性延性阶

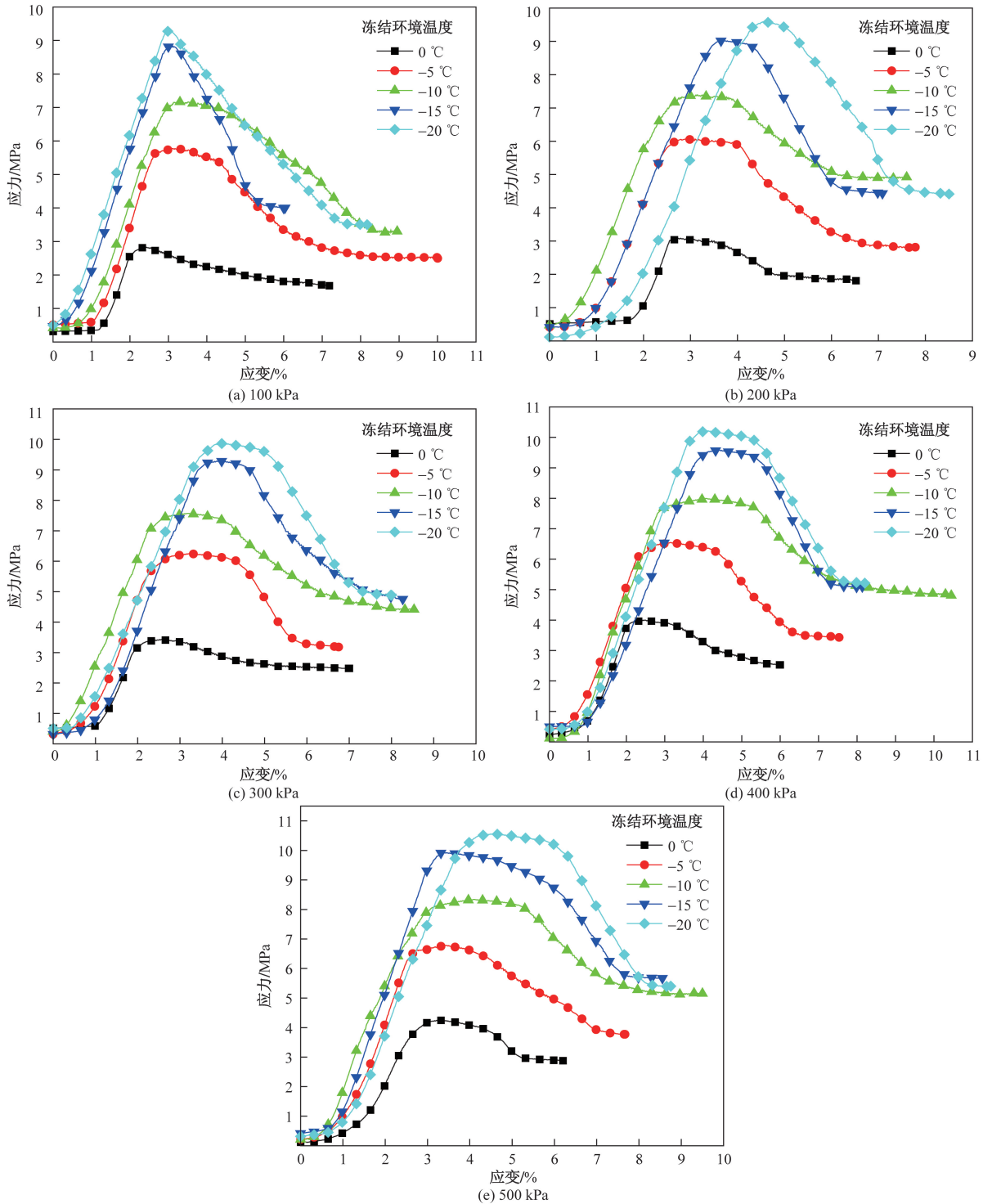


图 3 不同冻结环境温度下冻结水泥砂土应力应变曲线(14 d)

Fig. 3 Stress and strain curves of frozen cement sand at different freezing ambient temperatures(14 d)

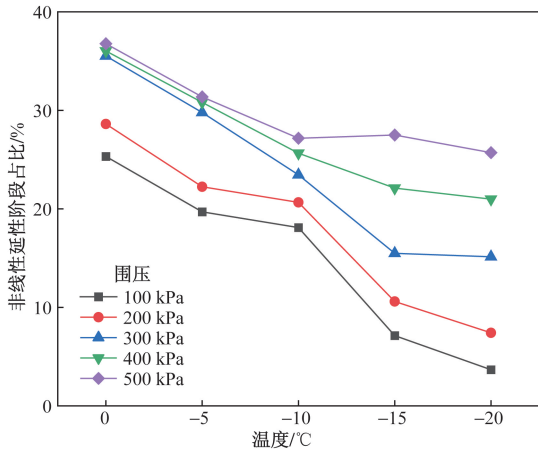


图4 非线性延性阶段随冻结环境温度的变化曲线(14 d)
Fig. 4 Change curve of nonlinear ductility stage with freezing ambient temperature (14 d)

段占比随冻结环境温度变化曲线,在不同围压应力条件下,应力应变曲线的非线性延性阶段占比随着冻结环境温度降低呈单向减小,各围压条件下非线性延性阶段占比减小率为 0.618 ~ 1.21%/°C。产生该现象的原因是:在 0 °C 时,由于温度较低,水泥的水化反应进行的不够充分,但是此时土体内部微小孔隙内仍有一定量液态水,在三轴剪切试验过程中,土体内孔隙可以进一步被压缩;随着温度继续降低,土体内部孔隙中的液态水含量继续降低,孔隙内冰填充的体积进一步增大,从而减小了土体的延性。如图 4 所示,围压为 500 kPa 的曲线中在 -15 °C 时非线性延性阶段占比略微增大,但是从具体量值上看,其相对 -10 °C 时仅增大了 0.33%,其误差在合理范围内。在较低围压条件下(100 ~ 200 kPa),-10 °C 温度的冻结水泥砂土仍然具有一定的延性特征。

2.2.2 冻结环境温度对冻结水泥砂土强度的影响

取应力应变曲线峰值应力代表冻结水泥砂土的强度值,图 5 为冻结水泥砂土峰值应力随冻结环境温度变化曲线,随着温度的降低,峰值应力呈非线性增长,并趋于稳定,当冻结温度从 0 °C 下降到 -20 °C 时,冻结水泥砂土强度增长了 60% ~ 70%。可近似描述为

$$y = y_0 + A_1 e^{-\frac{x}{t_1}} \quad (2)$$

式(2)中: y_0 、 A_1 、 t_1 为拟合参数。

不同冻结环境温度条件下的拟合参数以及拟合度 R^2 如表 5 所示。可以看出,该函数对于不同围压下土体抗剪强度与冻结环境温度之间的关系拟合效果较好,对于工程实践中参数设定具有一定的指导意义。

为了探究冻结水泥砂土强度增长的原因,分析试样黏聚力和内摩擦角变化规律,如图 6 所示,黏聚力和内摩擦角均随冻结温度降低呈非线性增大后趋于平缓的趋势。当冻结环境温度从 0 °C 降到 -10 °C,其黏聚力增长了 52.6%,内摩擦角增大了 9.4°;温度从 -10 °C 降到 -20 °C,其黏聚力增长了 22.7%,内摩擦角增大了 2.7°。

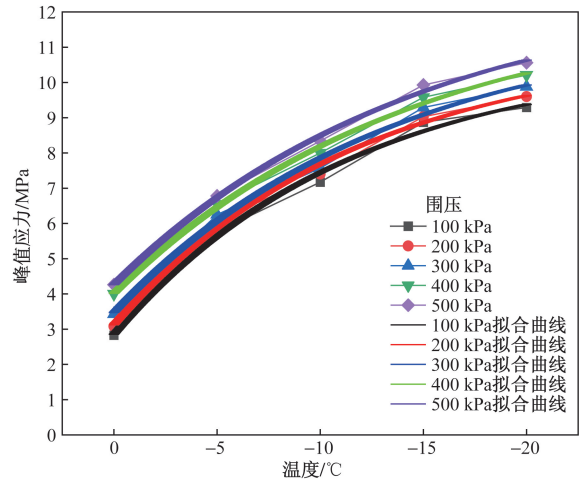


图5 冻结环境温度对冻结水泥砂土峰值应力的影响(14 d)
Fig. 5 Effect of freezing ambient temperature on peak stress of frozen cement sand (14 d)

表 5 拟合参数与拟合度 R^2 数据

Table 5 Fitting parameters and degree of fit R^2 data sheet

围压/ kPa	拟合参数 y_0 /MPa	拟合参数 A_1 /MPa	拟合参数 t_1	R^2
100	10.777 78	-7.924 53	-11.544 67	0.987 9
200	11.076 10	-7.952 98	-11.734 97	0.989 2
300	11.776 28	-8.307 02	-13.297 46	0.988 0
400	12.339 35	-8.323 70	-14.376 16	0.993 9
500	12.827 90	-8.565 96	-14.678 93	0.994 9

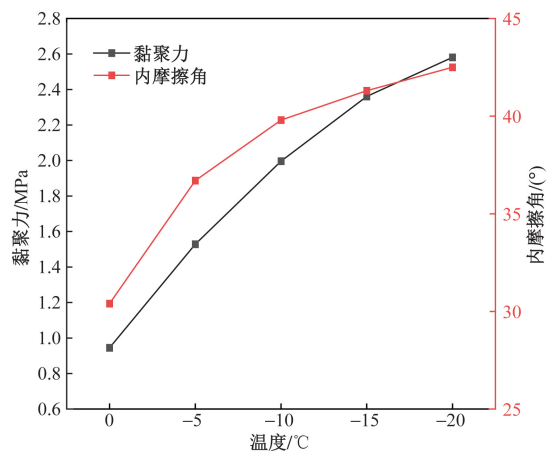


图6 黏聚力、内摩擦角随温度变化曲线(14 d)
Fig. 6 Curve of cohesion and internal friction angle with temperature (14 d)

黏聚力的增加一方面是由于水泥水化反应产生的水化产物与砂颗粒之间紧密胶结;另一方面随着温度的降低,土体内部微小孔隙中的自由水冻结成冰使得土体内部的微小孔隙进一步填充,并且在围压的紧固作用下,使得其黏聚力增大。当冻结温度较高时,由于水化热的影响,土体内部微小孔隙中的自由水并未完全冻结,孔隙中的自由水降低了砂土颗粒之间的相对摩擦,使得土体内摩擦角相对较小,而随着冻结环境温度的继续降低,土体孔隙中的自由水逐渐冻结,土体更加密实,其内摩擦角也随之增大。但是,当冻结环境温度继续降低到 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,其黏聚力和内摩擦角的增长幅度逐渐减小,这是由于土体颗粒之间已经紧密胶结,其黏聚力和内摩擦角的增长幅度也逐渐减小。因此,随着冻结环境温度的降低,在黏聚力和内摩擦角的共同影响下,其强度也呈现出先增大后趋于平缓的趋势。

2.2.3 冻结环境温度对冻结水泥砂土残余应力的影响

冻结水泥砂土残余应力随温度变化降低呈现先增大后减小或稳定趋势,如图7所示,当温度从 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低至 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,残余应力近似呈线性增大,增大幅度为 $50\% \sim 60\%$ 。这是由于随着温度的降低,土体的抗压强度有所增大,在围压对土体的紧固作用下,其残余应力也随之增大。但是,在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低到 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 这一阶段,其残余应力的变化幅度基本不变,甚至略微有些减小,这是由于随着温度的继续降低,土体抗压强度增长幅度逐渐减小,而围压对土体的紧固作用有限,土体抵抗破坏的能力也有限,因此在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之后,其残余应力基本不变或略微减小。

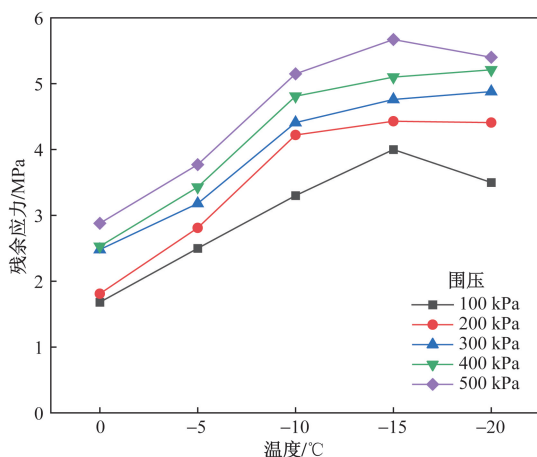


图7 冻结水泥砂土残余应力随冻结环境温度变化曲线(14 d)

Fig. 7 Curve of residual stress of frozen cement sand with freezing ambient temperature (14 d)

2.3 不同养护龄期下冻结水泥砂土的应力应变关系

以围压 300 kPa 的试验结果为例,不同养护龄期冻结水泥砂土应力应变曲线如图8所示,在不同冻结环境温度条件下,随养护龄期增加,冻结水泥砂土应力值呈增大趋势,试样脆性破坏特征越明显。

2.3.1 非线性延性阶段随养护龄期的变化曲线

冻结水泥砂土应力应变曲线的非线性延性阶段占比随养护龄期增加呈减小趋势,减小幅度逐渐减小,如图9所示。以围压为 300 kPa 试验结果为例,在不同冻结环境温度下,养护龄期从 3 d 增加至 14 d ,相较于从 14 d 增加至 28 d ,其非线性延性阶段占比降低的幅度更大。养护龄期从 3 d 增加至 14 d ,其非线性延性阶段占比减小率为 $1.54\%/d \sim 0.31\%/d$;从 14 d 增加至 28 d ,其非线性延性阶段占比减小率为 $0.58\%/d \sim 0.14\%/d$ 。图9冻结环境温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的曲线在 $7 \sim 14\text{ d}$ 时,其非线性延性阶段占比出现小幅度的增长,但是从量值上看,在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冻结环境温度下,冻结水泥砂土的强度较高,脆性破坏较显著,养护龄期从 $3 \sim 14\text{ d}$,其非线性延性阶段占比分别为 $14.04\%、13.49\%、15.13\%$ 。增长幅度仅为 1.64% ,在合理误差范围内。

在冻结水泥砂土养护初期,水泥水化反应不充分,砂土颗粒之间的胶结强度较小,其非线性延性阶段占比较大。随着养护龄期的增加,水泥水化反应程度逐渐加大,砂土颗粒之间的胶结作用加强,非线性延性阶段占比降低,表现出更明显的脆性,试样更快进入破坏阶段。水泥水化反应在养护龄期 14 d 内最剧烈,之后水化反应减缓,导致养护前 14 d 试样的非线性延性阶段占比下降最快,脆性增长最快,之后脆性增长缓慢,并趋于稳定。

2.3.2 养护龄期对冻结水泥砂土强度的影响

冻结水泥砂土强度随养护龄期增长呈非线性增长趋势,图10为不同冻结温度条件下试样的峰值应力随养护龄期变化规律。在不同冻结环境温度下,在养护龄期 14 d 前,其强度增长了 $18\% \sim 50\%$; 14 d 之后其强度增长了 $5\% \sim 30\%$ 。由此可见,在养护龄期前 14 d ,冻结水泥砂土试样强度增长较大, 14 d 之后增长较缓慢。但是其中 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的曲线中在 $14 \sim 28\text{ d}$ 这一养护龄期内,其峰值应力增长幅度较大,这是由于在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冻结环境温度下,且养护龄期达到 28 d ,其土体强度较大,其脆性破坏特征显著,产生一定的误差。

冻结水泥砂土的黏聚力和内摩擦角均随养护龄期增长呈非线性增大趋势,表现为先增大后平缓,如图11所示。在养护龄期 $3 \sim 14\text{ d}$,冻结水泥

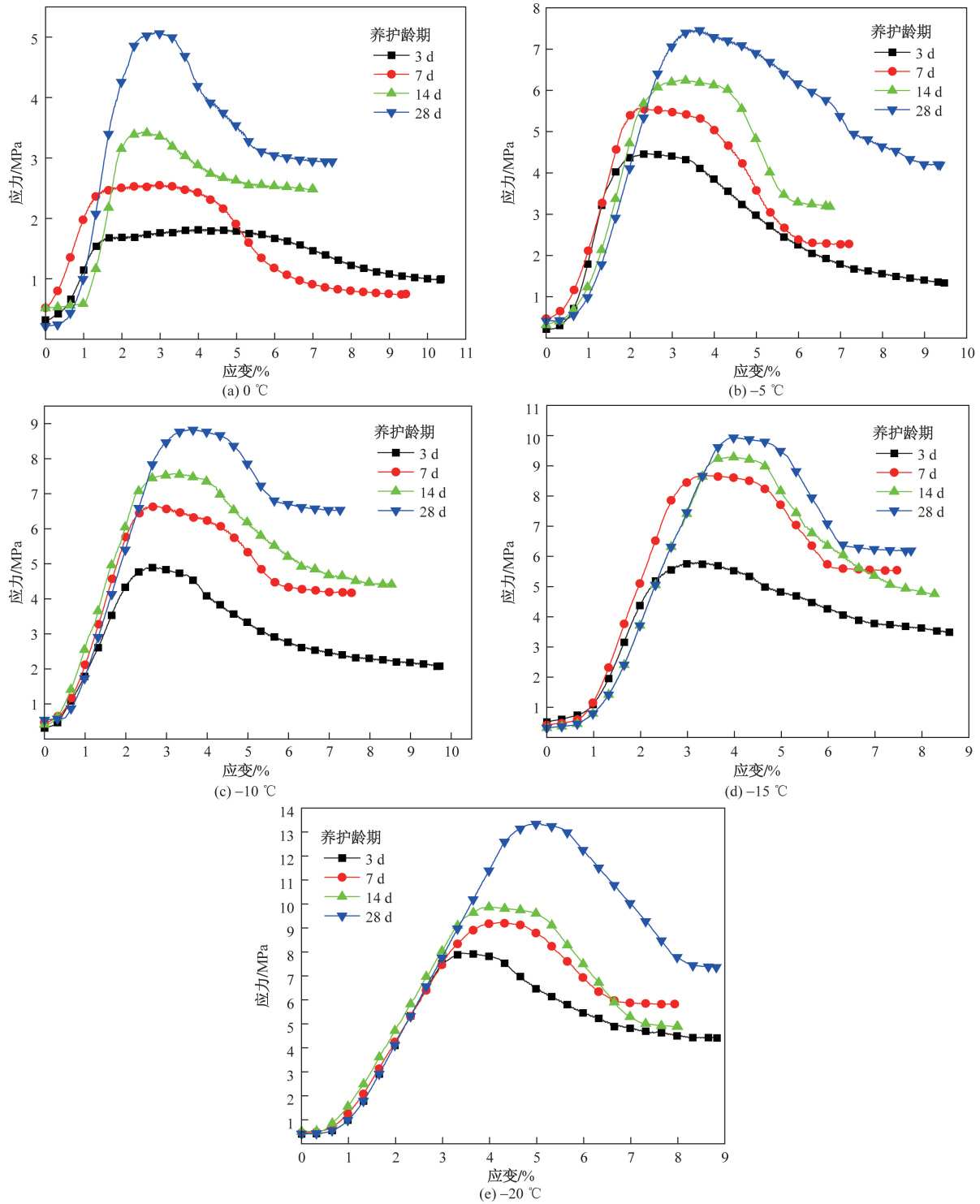


图 8 不同养护龄期条件下冻结水泥砂土应力应变曲线

Fig. 8 Stress and strain curve of frozen cement sand under different curing age conditions

砂土黏聚力增长了 32.4%，内摩擦角增大了 8.4°；在养护龄期 14~28 d，试样黏聚力增长了 11.3%，内摩擦角增大了 2°。可见，冻结水泥砂土的强度指标在养护龄期前 14d 增长幅度较大，在 14~28 d 增长幅度较小。产生该现象的原因是：①在冻结水泥砂土养护期间，水泥水化反应产生的胶结物增加了

砂土颗粒之间的黏结作用，强度指标表现为黏聚力和内摩擦角增大；②在养护龄期前期 14 d 内，水泥水化反应较剧烈，水泥水化胶结物产生较快，土体的黏聚力和内摩擦角增长较快，增加幅度较快。同理，在养护龄期后期 14~28 d，水泥水化反应较缓慢，水泥水化胶结物产生较慢，土体的黏聚力和内

摩擦角增长较慢,增加幅度较小。

结合其非线性延性阶段占比的变化趋势,冻结

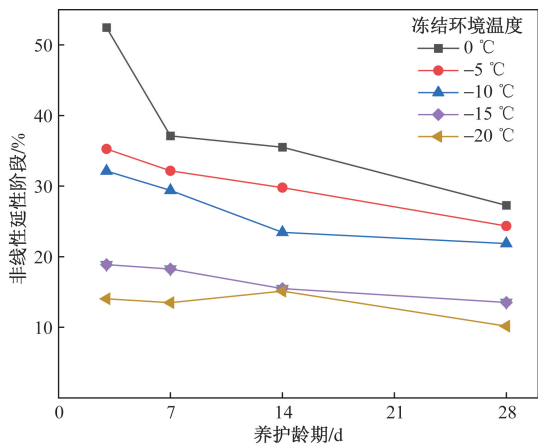


图9 非线性延性阶段随养护龄期的变化曲线(300 kPa)

Fig. 9 Change curve of nonlinear ductility stage with maintenance age (300 kPa)

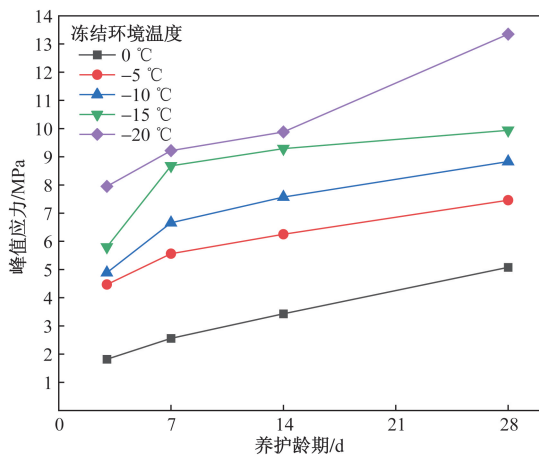


图10 养护龄期对冻结水泥砂土峰值应力的影响(300 kPa)

Fig. 10 Effect of curing age on peak stress of frozen cement sand (300 kPa)

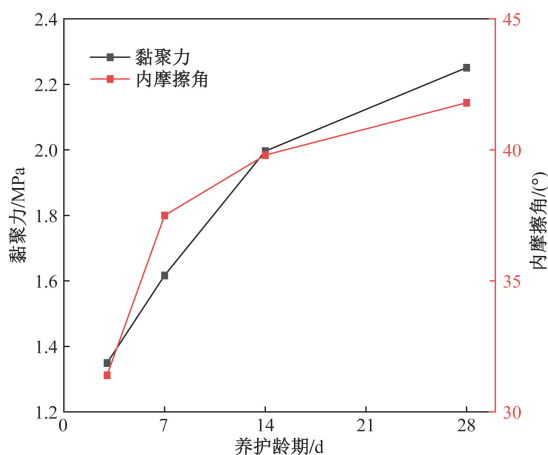


图11 黏聚力、内摩擦角随养护龄期变化曲线(-10 °C)

Fig. 11 Change curve of cohesion and internal friction angle with maintenance age (-10 °C)

水泥砂土的强度在14 d之后增长幅度较小,所以选取养护龄期14 d,更加符合实际工程中安全、经济、节约的理念。

2.3.3 养护龄期对冻结水泥砂土残余应力的影响

冻结水泥砂土残余应力随养护龄期变化规律如图12所示,随着养护龄期的增加,不同冻结温度条件下冻结水泥砂土残余应力呈不同程度的增长趋势。在不同冻结环境温度下,养护龄期3~28 d,其残余应力增大了40%~70%。产生该现象的原因是,随着养护龄期的增加,水泥水化程度越高,砂土颗粒之间胶结力增加的同时,也同步提高了土体的残余应力。在冻结环境温度为0 °C的曲线中,在3~7 d这一养护龄期内,其残余应力出现小幅的降低,这是由于随着养护龄期的增加,土体强度也随之增加,但是图8所示的在0 °C的冻结环境温度下,其3 d的非线性延性阶段相较于7 d占比较大,在破坏后没有快速进入破坏阶段,在7 d后其脆性破坏的特征愈发显著,并且在3 d和7 d时,其峰值应力分别为1.82、2.56 MPa,其峰值应力增长较小,所以使得其在7 d时残余应力出现小幅的下降。

2.4 不同围压影响下冻结水泥砂土的应力应变关系与破坏形态

不同围压下冻结水泥砂土应力应变曲线呈递变规律,如图13所示。试验结束后,冻结水泥砂土试样破坏形态如图14所示,产生55°~62°的剪切断面,低围压条件下剪切面完全断开,随着围压增大,试样逐渐产生较明显的鼓胀现象,剪切面夹角逐渐减小,且剪切面趋于完整。

2.4.1 非线性延性阶段随围压变化

冻结水泥砂土延性随着围压增加呈增大趋势,图15为冻结水泥砂土应力应变非线性延性阶段占比随围压的变化曲线,随着围压的增大,各养护龄

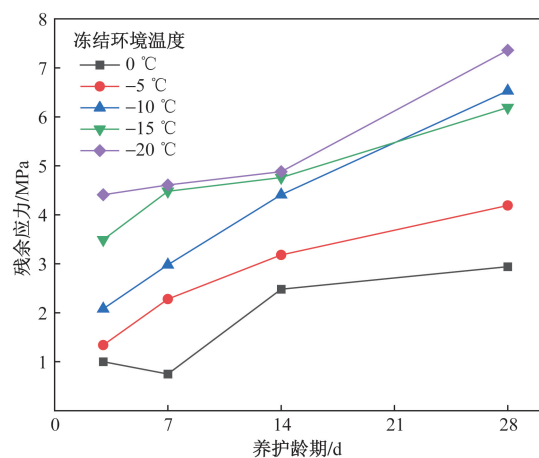


图12 养护龄期对冻结水泥砂土残余应力的影响(300 kPa)

Fig. 12 Effect of maintenance age on residual stress of frozen cement sand (300 kPa)

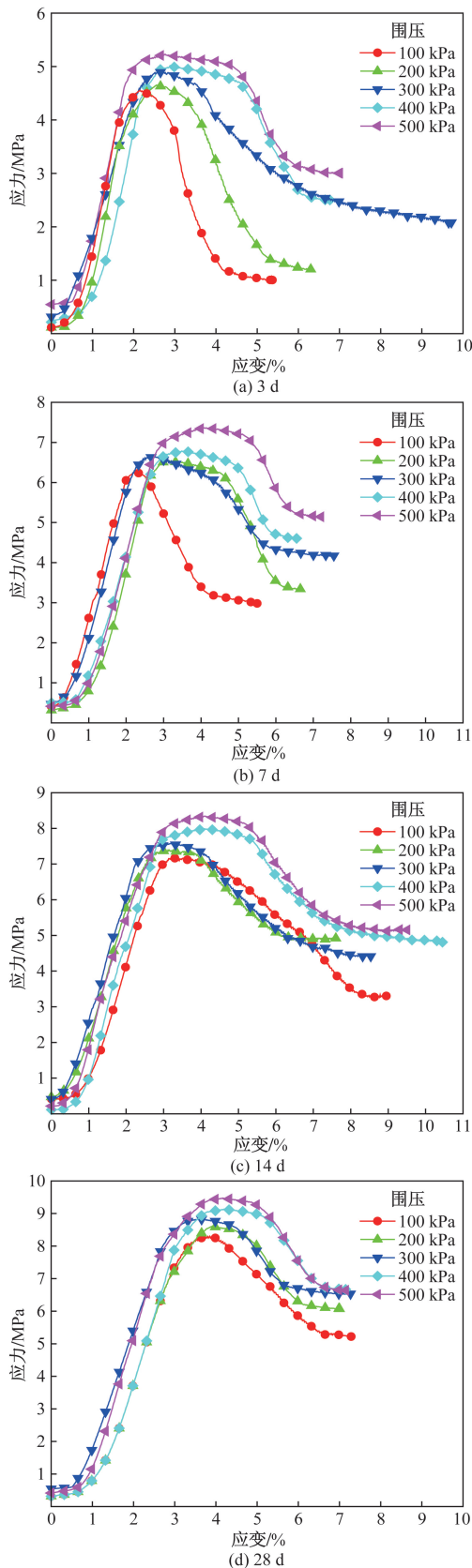


图 13 围压对冻结水泥砂土应力应变曲线的影响
(冻结环境温度 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig. 13 Effect of enclosure pressure on stress and strain curve of frozen cement sand (freezing temperature $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$)

期的冻结水泥砂土应力应变非线性延性占比近似呈线性增大。围压从 100 kPa 增加到 500 kPa,其非线性延性阶段占比的增长率为 $2.27\%/\text{kPa} \sim 4.43\%/\text{kPa}$ 。产生该现象的原因在于:①水泥水化胶结物和冰晶体共同填充了砂土颗粒之间的孔隙,共同承担砂土试样承受的荷载作用;由于水泥胶结物的强度大于孔隙冰的强度,随着偏应力增大,土体内冰晶体率先产生破坏,之后水泥胶结物剪切破坏,最终发生剪切断裂,两阶段破坏过程增加了冻结水泥砂土固结体的延性特征;②围压对冻结水泥砂土具有一定的紧固作用,围压的增加提高了试样内土颗粒、胶结物、冰晶体之间的摩擦力和相互嵌固作用,从而提高了试样的抗剪强度和延性。可见,在负温条件下,围压的增加提高了冻结水泥砂土抵抗破坏的能力,在一定程度上减缓了冻结水泥砂土脆性破坏趋势。

2.4.2 围压对冻结水泥砂土强度的影响

冻结水泥砂土强度随着围压增加呈近似线性增大,如图 16 所示,试验围压从 0 增加到 500 kPa,其强度增长了 $15\% \sim 20\%$ 。产生该现象的原因是:本试验的围压值相对较低,围压的增加提高了土体内部密实程度,增大了砂土颗粒、水泥胶结物和孔隙冰之间的摩擦力和相互嵌固作用,从而提高了冻结水泥砂土试样的抗剪强度。

2.4.3 围压对冻结水泥砂土残余应力的影响

冻结水泥砂土残余应力随围压增大呈不同程度的增长趋势,如图 17 所示,可以看出:从无围压状态到有围压状态,冻结水泥砂土残余应力增长幅度较大,且增长幅度随养护龄期增加而增大。当冻结水泥砂土试样承受的围压由 0 增加到 100 kPa 时,养护龄期 3、7、14、28 d 的试样残余应力分别增大了 0.7、2.34、2.3、4.66 MPa,增长率分别为 70%、78.5%、69.7%、89.3%。随着养护龄期增加,冻结水泥砂土残余应力由随围压增大呈线性增大转变为非线性增长。养护龄期为 3 d 的冻结水泥砂土试样残余应力随围压增大呈近似线性增大趋势,随着养护龄期增加到 7、14、28 d,试样残余应力增长趋势转变为非线性,尤其是在 100 ~ 500 kPa 围压区间增长幅度减小,养护龄期 3、7、14、28 d 的试样增长率分别为 66.7%、42%、35.9%、21.4%。产生该现象的原因是:在无围压状态下,试样达到峰值应力时,没有侧向围压对其产生的紧固作用,较快进入破坏阶段,破坏程度较大,残余应力较小;在有围压的状态下时,试样达到峰值应力后,随着围压的增大,试样受到的紧固作用越显著,使其破坏程度相对更小,其残余应力相对较大。其中 14 d 的曲线在围压

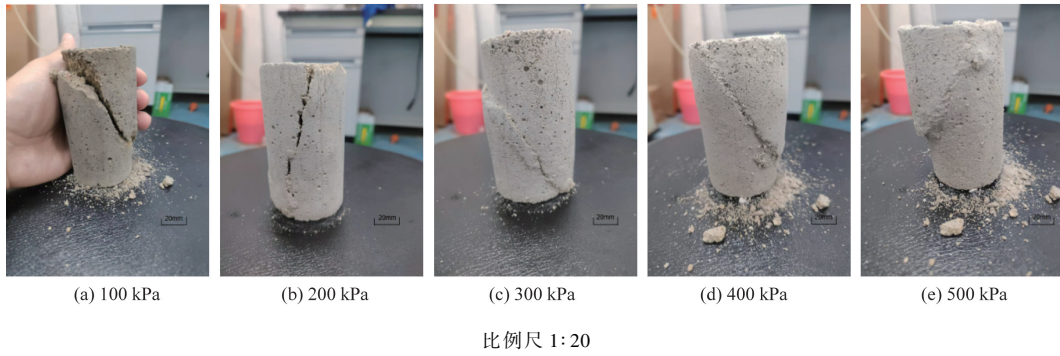


图 14 不同围压下冻结水泥砂土破坏形态

Fig. 14 Failure pattern of frozen cement sand under different pressure

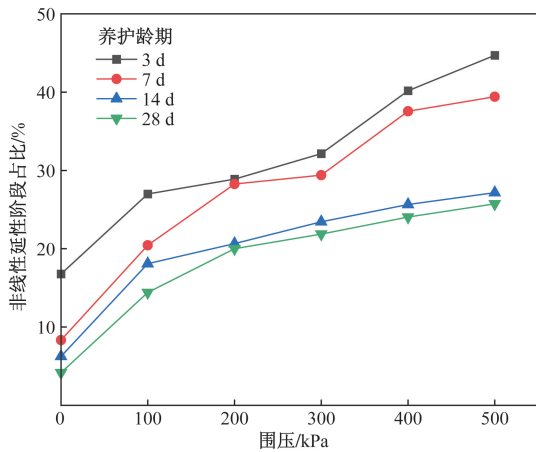


图 15 非线性延性阶段随围压的变化曲线 (-10 °C)
Fig. 15 Change curve of nonlinear ductility stage with circumference pressure (-10 °C)

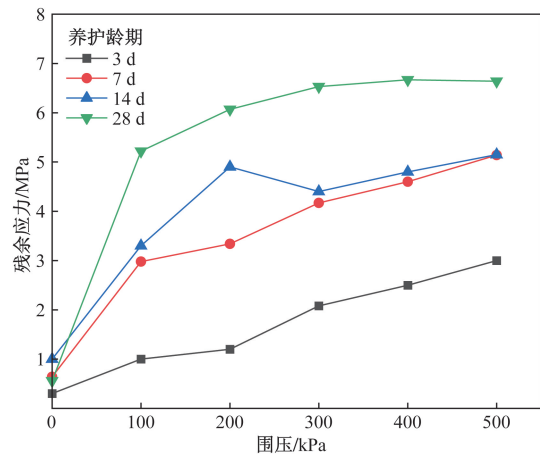


图 17 围压对冻结水泥砂土残余应力的影响 (-10 °C)
Fig. 17 Effect of surpressure on residual stress of free frozen cement sand (-10 °C)

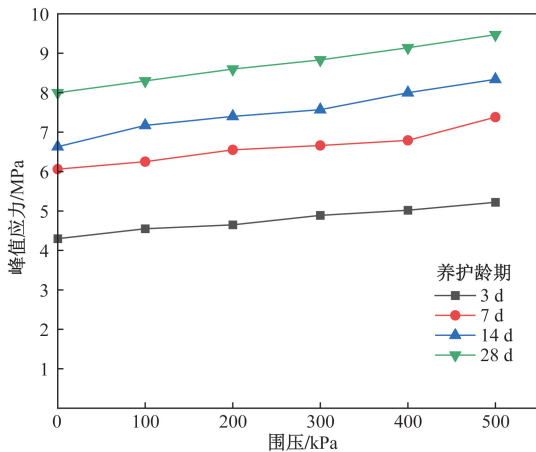


图 16 围压对冻结水泥砂土峰值应力的影响 (-10 °C)
Fig. 16 Effect of surpressure on peak stress of frozen cement sand (-10 °C)

为 100 ~ 300 kPa 中,其残余应力的变化出现误差波动,这是由于在 14 d 的养护龄期下,其土体强度较大,脆性破坏较显著,在较低的围压下,围压对其产生的紧固作用相对更小,在破坏时,对残余应力有一定的误差,其误差在合理范围内。

3 冻结水泥砂土强度回归模型建立与验证

冻结水泥砂土应力应变关系和强度特征受养护龄期、冻结温度等多因素共同影响,图 18 为不同养护龄期的冻结水泥砂土试样抗剪强度及指标随温度变化规律。可以看出,冻结水泥砂土强度及强度指标(黏聚力、内摩擦角)均随温度降低呈增大趋势,随着养护龄期的增大呈递增趋势。

为了量化冻结温度、养护龄期等因素的影响,基于莫尔-库伦强度准则,建立冻结水泥砂土抗剪强度预测模型为

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \tau = c + \sigma_3 \tan \varphi \quad (3)$$

$$c = c(T, d) \quad (4)$$

$$\varphi = \varphi(T, d) \quad (5)$$

式中: $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ 为抗剪强度,其中, σ_1 为最大主应力; σ_3 为最小主应力; τ 为剪切应力; c 为冻结水泥砂土等效黏聚力, MPa; d 为养护龄期, d; T 为冻结温度,

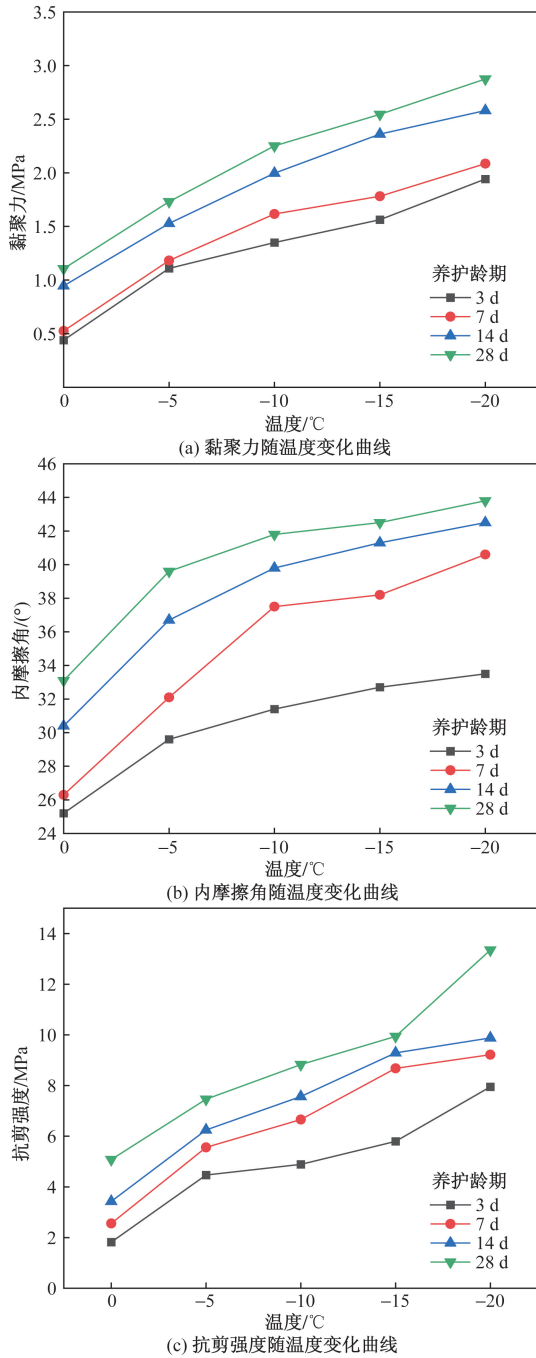


图 18 黏聚力、内摩擦角、抗剪强度随温度变化规律
Fig. 18 Changes of cohesion, internal friction Angle and shear strength with temperature

℃; φ 为冻结水泥砂土等效内摩擦角, (°)。

根据试验结果进行二元非线性回归拟合, 即

$$c = a_1 + b_1d + b_2T + b_3d^2 + b_4T^2 + c_1dT \quad (6)$$

$$\varphi = a_2 + b_5d + b_6T + b_7d^2 + b_8T^2 + c_2dT \quad (7)$$

式中: $a_1, a_2, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, c_1, c_2$ 为拟合参数。

可得

$$c = 0.21393 + 0.07224d - 0.11528T - 0.00144d^2 - 0.0023T^2 - 6.89597 \times 10^{-4}dT, \quad R^2 = 0.98839 \quad (8)$$

$$\varphi = 20.77302 + 1.09964d - 1.1589T - 0.0233d^2 - 0.03064T^2 - 6.57459 \times 10^{-4}dT, \quad R^2 = 0.96303 \quad (9)$$

抗剪强度指标与温度、养护龄期关系如图 19 所示。

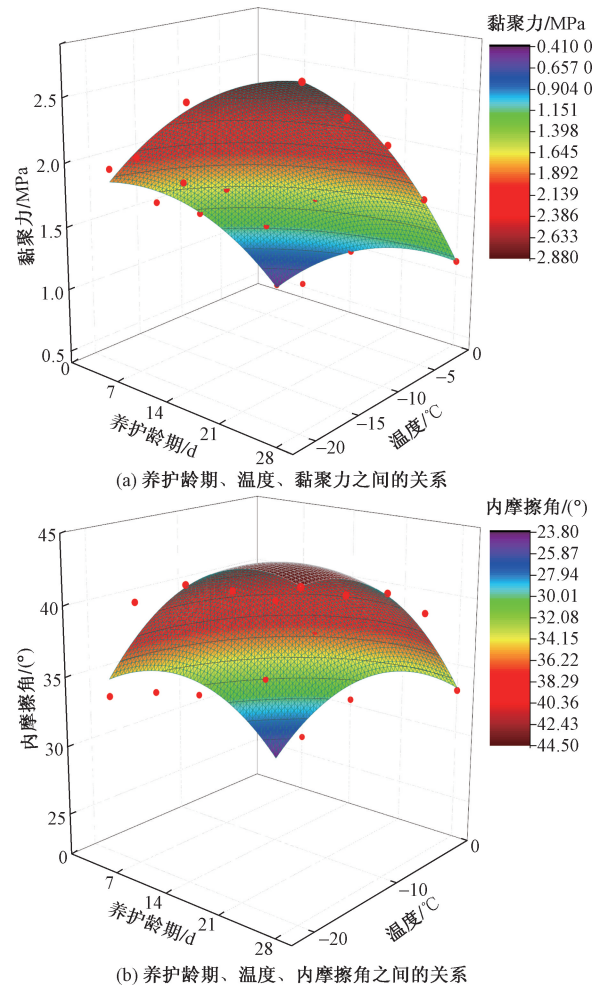


图 19 抗剪强度指标-养护龄期-温度回归方程图
Fig. 19 Shear strength index-curing age-temperature regression equation diagram

为进一步检验强度回归方程的准确性, 将回归方程的预测值与实测值进行比较, 如图 20 所示, 为通过非线性回归方程得到的计算值与试验值的对比, 经比较可以发现, 非线性回归抗剪强度预测值与实测值平均误差在 5% 以内, 准确度良好。

4 结论

结合工程实际, 通过三轴试验考虑冻结温度、养护龄期、围压等因素对冻结水泥砂土的应力应变关系和力学特性进行研究和分析, 得出以下结论。

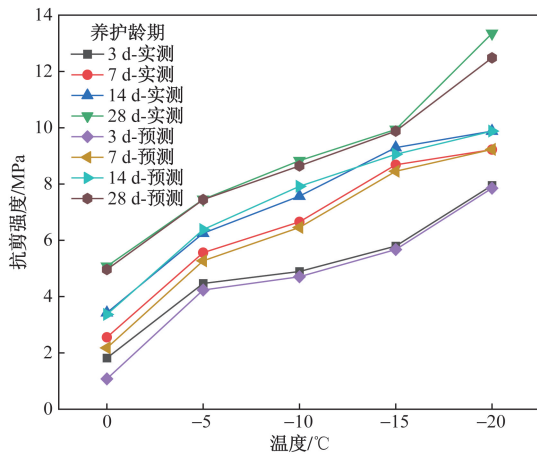


图 20 抗剪强度实测值与预测值对比

Fig. 20 Compare measured and predicted values of shear strength

(1) 相较于冻结砂土, 冻结水泥砂土仍保留一定的延性特征, 其应力应变曲线经过密实阶段、线性增长阶段、非线性延性阶段、破坏阶段四个阶段, 呈现为应变软化型。

(2) 随着冻结温度的降低和养护龄期的增加, 冻结水泥砂土的脆性破坏特征越显著, 其抗剪强度和残余应力随之增大; 随着围压的增大, 冻结水泥砂土的抗剪强度和残余应力有所增大, 同时其抵抗破坏的能力有所增加, 从而在一定程度上减缓了冻结水泥砂土的脆性破坏趋势。

(3) 随着冻结温度的降低, 非线性延性阶段占比在 $0 \sim -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-10 \sim -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 两个阶段内下降幅度先增大后趋于平缓, 取 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为最佳冻结温度; 随着养护龄期的增加, 在 $3 \sim 14\text{ d}$ 和 $14 \sim 28\text{ d}$, 其强度的增大幅度和非线性延性阶段占比的降低幅度, 都呈现出先增大后趋于平缓, 取 14 d 为最佳养护龄期。

(4) 揭示了冻结温度和养护龄期等因素影响下的强度机理。冻结水泥砂土的抗剪强度指标, 黏聚力和内摩擦角都随着冻结温度的降低和养护龄期的增加而增大, 取冻结温度 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、养护龄期 14 d 时, 其强度增长效率最佳。

(5) 基于莫尔-库伦强度准则, 构建了冻结水泥砂土抗剪强度二元非线性回归模型, 该模型计算值与实测值对比平均误差在 5% 以内, 准确度较好, 可为工程实践提供一定参考。

参 考 文 献

[1] 韩晓明, 何源, 张飞雷. 富水粉细砂层大直径盾构隧道联络通道施工关键技术研究——以孟加拉卡纳普里河底隧道为例[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(3): 227-235.
Han Xiaoming, He Yuan, Zhang Feilei. Study on the key construc-

tion technologies of large-diameter shield tunnel connection channel in water-rich silty fine sand layer: taking the under-river tunnel of Karnaphuli River in Bangladesh as an example[J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(3): 227-235.

[2] 田海洋. 冻结法加固技术在富水粉细砂层联络通道施工中的应用[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(S2): 214-222.
Tian Haiyang. Application of freezing method reinforcement technology in the construction of connection channels in water-rich silty fine sand layers[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(S2): 214-222.

[3] 奚家米, 熊元林, 马新民, 等. 地铁联络通道冻结法施工研究现状[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(17): 6720-6728.
Xi Jiami, Xiong Yuanlin, Ma Xinmin, et al. Research status of freezing method for construction of subway connection channels[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(17): 6720-6728.

[4] 王书磊, 丁国胜, 吴强. 复杂工况下超长联络通道冻结法设计与施工[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(6): 1894-1905.
Wang Shulei, Ding Guosheng, Wu Qiang. Design and construction of freezing method for ultra-long connection channel under complex conditions[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(6): 1894-1905.

[5] 孙立建, 张德文, 乔晓磊, 等. 软弱地层地铁联络通道冻结加固与融沉注浆研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(S1): 1002-1006.
Sun Lijian, Zhang Dewen, Qiao Xiaolei, et al. Research on freezing reinforcement and thawing settlement grouting of subway connection channels in weak strata[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1): 1002-1006.

[6] 赵向锋, 盛俊云, 庄昭斌, 等. 冻结与注浆联合加固技术在富水软弱浅埋暗挖隧道中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2022(15): 106-110.
Zhao Xiangfeng, Sheng Junyun, Zhuang Zhaobin, et al. Application of combined freezing and grouting reinforcement technology in water-rich, weak, shallow-buried and under-excavated tunnels[J]. China New Technologies and Products, 2022(15): 106-110.

[7] 徐学祖, 王家澄, 张立新, 等. 冻土物理学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2010: 39-96.
Xu Xuezu, Wang Jiacheng, Zhang Lixin, et al. Permafrost physics[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2010: 39-96.

[8] 雷乐乐, 谢艳丽, 王大雁, 等. 冻土静力学室内试验研究进展[J]. 冰川冻土, 2018, 40(4): 802-811.
Lei Lele, Xie Yanli, Wang Dayan, et al. Research progress in static laboratory tests of frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(4): 802-811.

[9] 李顺群, 高凌霞, 柴寿喜. 冻土力学性质影响因素的显著性和交互作用研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1173-1177.
Li Shunqun, Gao Lingxia, Chai Shouxi. Study on the significance and interaction of influencing factors on the mechanical properties of frozen soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 1173-1177.

[10] 部新军, 李铭远, 张景伟, 等. 富水粉质黏土中地铁联络通道冻结法试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(6): 1267-1276.
Gao Xinjun, Li Mingyuan, Zhang Jingwei, et al. Experimental study on freezing method for subway connection channel in water-rich silty clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(6): 1267-1276.

- [11] 王彬, 荣传新, 程桦, 等. 定向渗流诱导的非均质冻结壁力学特性分析[J]. 冰川冻土, 2022, 44(3): 1011-1020.
Wang Bin, Rong Chuanxin, Cheng Hua, et al. Analysis of mechanical properties of heterogeneous frozen wall induced by directional seepage[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(3): 1011-1020.
- [12] 陈鑫, 张泽, 李东庆, 等. 软弱夹层对水泥土单轴压缩影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(2): 398-412.
Chen Xin, Zhang Ze, Li Dongqing, et al. Study on the effect of weak interlayers on uniaxial compression of cement-soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(2): 398-412.
- [13] 刘欣, 杨平, 王怀东, 等. 冻结 MJS 水泥土强度与冻融特性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(12): 3088-3096.
Liu Xin, Yang Ping, Wang Huaidong, et al. Study on the strength and freeze-thaw properties of frozen MJS cement-soil[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(12): 3088-3096.
- [14] 于学敏. 含水量对先注浆后冻结粉细砂剪切强度的影响[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(8): 25-30.
Yu Xuemin. The effect of water content on the shear strength of fine sandy soil subjected to grouting before freezing[J]. Journal of Railway Engineering, 2015, 32(8): 25-30.
- [15] 徐湘田, 王继伟, 张明义. 冻结和林黄土力学性质的试验研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(3): 685-691.
Xu Xiangtian, Wang Jiwei, Zhang Mingyi. Experimental study on mechanical properties of freezing and forest loess[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(3): 685-691.
- [16] 赖远明, 程红彬, 高志华, 等. 冻结砂土的应力-应变关系及非线性莫尔强度准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(8): 1612-1617.
Lai Yuanming, Cheng Hongbin, Gao Zhihua, et al. Stress-strain relationship and nonlinear mohr strength criterion of frozen sandy soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(8): 1612-1617.
- [17] 张鸿朋, 马芹永, 黄坤, 等. 冻结砂不同应力路径三轴试验强度和变形分析[J]. 岩土力学, 2023, 44(5): 1477-1486.
Zhang Hongpeng, Ma Qinyong, Huang Kun, et al. Analysis of strength and deformation of frozen sand in triaxial tests under different stress paths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(5): 1477-1486.
- [18] 许胜才, 蔡军, 甘彬宏. 水泥土剪胀特性三轴试验与数值模拟验证[J]. 应用力学学报, 2023, 40(3): 643-653.
Xu Shengcai, Cai Jun, Gan Binhong. Verification of triaxial test and numerical simulation of the shear dilatancy characteristics of cement-soil[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2023, 40(3): 643-653.
- [19] 水利部水利水电规划设计总院. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
General Water Resources and Hydropower Planning and Design Institute of the Ministry of Water Resources. Standard for geotechnical test methods: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.