

DOI: 10.11779/CJGE2016S2032

冻结改良黄土三轴强度和变形特性试验研究

牛亚强^{1, 2, 3}, 王旭¹, 廖孟柯⁴, 蒋代军¹, 刘德仁¹

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室 兰州 730070; 3. 道桥工程灾害防治技术国家地方联合工程实验室, 甘肃 兰州 730070; 4. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 通过对-6℃的冻结黄土及冻结改良黄土在1~15 MPa的围压范围内进行一系列的三轴试验, 分析其变形和三轴强度特性。研究发现: 随着围压的增大, 冻土的应力-应变曲线相继体现出应变软化和应变硬化特征, 初始切线模量随围压的增大呈现出先增大后减小的趋势; 冻结黄土和冻结改良黄土的三轴强度随围压的增大表现出先增大后减小的趋势, 改良后冻结黄土的强度得到明显的提高, 且水泥比石灰的改良效果更为显著。基于莫尔-库仑强度准则, 得到冻结黄土和冻结改良黄土的广义黏聚力和广义内摩擦角随围压的变化规律。同时, 建立非线性莫尔-库仑强度准则, 用以描述冻结黄土及冻结改良黄土的强度随围压非线性变化的现象。

关键词: 冻结黄土; 冻结改良黄土; 变形规律; 强度特性; 试验研究

中图分类号: TU445 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)S2-0198-06

作者简介: 牛亚强(1988-), 男, 博士研究生, 助教, 主要从事路基工程、岩土工程等方面的研究。E-mail: niuyq_1377@163.com。

Experimental study on triaxial strength and deformation characteristics of frozen-improved loess

NIU Ya-qiang^{1, 2, 3}, WANG Xu¹, LIAO Meng-ke⁴, JIANG Dai-jun¹, LIU De-ren¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Road & Bridge and Underground Engineering of Gansu Province, Lanzhou 730070, China; 3. National and Provincial Joint Engineering Laboratory of Road & Bridge Disaster Prevention and Control, Lanzhou 730070, China; 4. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to study the deformation and triaxial strength behaviors of frozen loess and frozen-improved loess, a series of triaxial compression tests are conducted under confining pressure varying from 1 to 15 MPa at -6 °C. The results show that the shape of stress-strain curves presents strain softening and strain hardening successively. Both the initial tangent modulus and the volumetric strain increase at first then decrease with the increase of confining pressure. The triaxial strength of frozen loess and frozen-improved loess increases at first then decreases with the increase of confining pressure. The strength of frozen loess is enhanced after being improved, and the improvement effect of cement is more significant. Based on the Mohr-Coulomb criterion, the variation laws of generalized cohesion and internal friction angle with confining pressures of frozen loess and frozen-improved loess are obtained. Meanwhile, a nonlinear Mohr-Coulomb strength criterion for frozen loess and frozen-improved loess is proposed, which reflects the phenomenon that the triaxial strength changes nonlinearly with the increase of the confining pressure.

Key words: frozen loess; frozen-improved loess; deformation law; strength characteristic; experimental study

0 引言

伴随着中国西部大开发战略的进一步深化实施, 各类大型工程如高速公路、高速铁路及筑坝等工程正在这片黄土地上如火如荼的兴建。然而, 在我国中西部地区, 湿陷性黄土分布非常广泛, 部分地区的强湿陷性黄土层厚度甚至超过50 m^[1]。在湿陷性黄土层上进行工程建设时, 必须采取措施进行地基处理, 消除

湿陷性, 提高地基的承载力及稳定性。近几十年来, 化学改良黄土的方法在黄土地区的工程建设中应用越来越广泛, 同时对于改良黄土物理力学性质的研究也

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2012CB026102); 国家自然科学基金重点资助项目(41230630); 国家自然科学基金项目(51268033); 中国中铁重点课题(302566); 长江学者和创新团队发展计划滚动资助(IRT_15R29)”
收稿日期: 2016-05-19

已取得较为成熟的理论成果^[2-7], 且被广泛应用于工程实践中。然而, 在我国西部地区, 冬季的长期严寒及昼夜大幅温差使多处改良黄土处于冻融循环或冻结状态。近年来, 围绕冻融循环对改良土物理力学性质的影响方面进行了较多研究。王银梅等对 SH 改良黄土进行了一系列抗冻性试验, 得到不同冻融循环次数下改良黄土无侧限抗压强度的变化规律^[8]。王天亮等通过试验发现改良土的峰值强度随围压的增大而增大, 黏聚力随冻融次数的增加而逐渐减小^[9]。马巍等通过试验得到冻融循环对石灰粉土剪切强度特性的影响规律^[10]。吕擎峰等通过研究冻融循环前后不同配比改性黄土物理力学参数的变化, 提出改性黄土改性剂的最优配比^[11]。战高峰等通过室内静三轴试验, 研究了冻融循环对石灰改性粉质黏土强度的影响规律^[12]。

目前, 针对冻融循环对改良黄土工程性质的影响方面, 已取得一些理论性的成果, 而对处于冻结状态的改良黄土力学性质的研究却较为少见。众所周知, 处于冻结状态的黄土及改良黄土, 其强度和稳定性对于实际工程而言均比非冻土的更为有利。然而从理论层面来讲, 冻结黄土及改良黄土的力学性质仍然值得去深入探究。因此, 本文以黄土、石灰改良黄土及水泥改良黄土为对象进行一系列低温三轴试验, 研究其在不同围压作用下的变形规律和强度特性, 为改良黄土在寒区工程中的应用提供可靠的理论参考。

1 三轴试验

1.1 试样制备

试验土样分别采用兰州黄土, 石灰改良黄土(石灰和黄土体积比为 3:7)及水泥改良黄土(水泥掺量为 10%), 试验黄土颗粒粒径分布见表 1。试样制备前, 对所选土样进行击实试验, 测得其最大干密度, 同时以最优含水率制备试样。试样直径为 61.8 mm、高度为 125 mm, 试样的物理参数如表 2 所示。将制备好的试样放置于-30℃的负温下快速冻结 48 h, 随后将试样脱模, 放置于-6℃的低温环境下恒温 48 h 后进行低温三轴试验。

表 1 兰州黄土的粒径分布

Table 1 Partical-size distribution of Lanzhou loess

<0.005 mm	0.005~0.05 mm	0.05~0.075 mm	0.075~0.1 mm	0.1~0.25 mm	>0.25 mm
10.54	65.74	16.02	5.65	2.05	0

表 2 土样的物理参数

Table 2 Physical parameters of specimens

试样类别	黄土	石灰改良黄土	水泥改良黄土
含水率/%	16.1	17.8	18.5
干密度/(g·cm ⁻³)	1.58	1.49	1.66

1.2 试验条件和试验方法

本次试验是在 MTS-810 材料试验机上进行的。该仪器最大轴向位移为 50 mm, 最大轴向力为 250 kN, 最大围压 20 MPa。试验围压范围为 1~15 MPa, 施加围压后试样在低温条件下固结 2 h, 随后以 1.25 mm/min 的应变速率施加轴向荷载, 当试样产生 20% 应变时终止试验。

1.3 三轴试验结果

图 1 为冻结黄土和冻结改良黄土的应力-应变曲线。从图中可以看到, 当围压为 1 MPa 时, 冻结黄土及冻结改良黄土的应力-应变曲线由以下三个阶段组成。第一阶段, 当轴向应变较小时, 应力随着应变的增大近似线性增大。第二阶段, 随着轴向应变的发展, 应力-应变曲线逐渐从线性过渡为非线性, 意味着此时冻土试样已产生不可恢复的塑性变形, 冻土内部土产生损伤, 冻土的抗变形能力下降, 但在应力峰值出现之前, 应力-应变曲线斜率始终大于 0。第三阶段, 当应力达到峰值后, 曲线斜率减小到 0 并开始出现负值, 应力随应变的发展逐渐减小直至试样破坏。

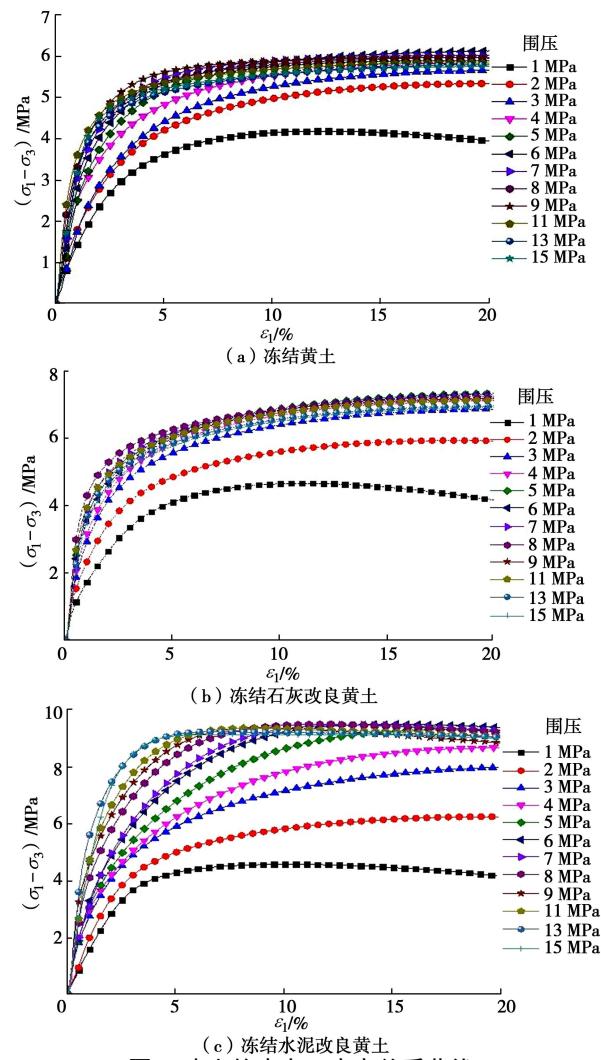


图 1 冻土的应力-应变关系曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of frozen soils

就曲线形态而言,当围压较小时,冻结黄土和冻结石灰改良黄土的应力-应变曲线较为相似,均表现为应变软化的现象,而随着围压的增大又逐渐表现出应变硬化特征。对于冻结水泥改良黄土,其应力-应变曲线形态在1~6 MPa的围压范围内与冻结黄土和冻结石灰改良黄土的类似,区别在于当围压大于6 MPa时,随着围压的进一步增大,硬化程度逐渐减弱,在高围压下甚至表现出应变软化的现象。

针对冻结黄土及冻结改良黄土的应力-应变曲线随围压的增大表现出既有硬化又有软化的特征,修正的Duncan-Chang双曲线模型能够精确的模拟冻土的应力-应变行为^[13],该模型表达式为

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{l\varepsilon_1^2 + m\varepsilon_1 + n} , \quad (1)$$

式中, l , m , n 为与围压相关的材料参数,量纲均为 MPa⁻¹。

初始切线模量是一个表征应力-应变曲线形态的量,反映了材料的变形特征。由初始切线模量的定义可得

$$E_0 = \left(100 \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{d\varepsilon_1} \right)_{\varepsilon_1=0} = \frac{100}{n} , \quad (2)$$

由式(1)、(2)计算得到冻结黄土及冻结改良黄土的初始切线模量,如图2所示。

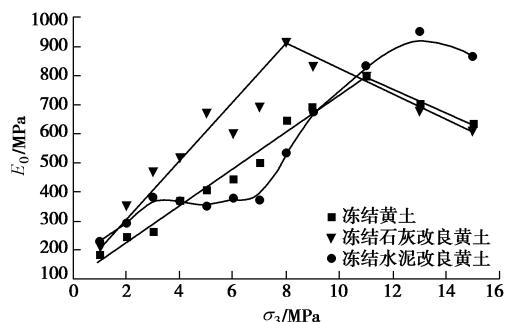


图2 E_0 随 σ_3 的变化关系

Fig. 2 Relationship between E_0 and σ_3

图2可见冻结黄土及冻结改良黄土初始切线模量与围压之间的关系。从图2可以看到,围压对冻结黄土和冻结石灰改良黄土初始切线模量的影响甚为相似,其初始切线模量随围压都表现为先增大后减小的形式,区别在于冻结黄土的初始切线模量峰值所对应的围压为11 MPa,而冻结水泥改良黄土的为8 MPa。冻结水泥改良黄土的初始切线模量随围压的变化关系与上述二者的略有不同,当围压小于3 MPa时,初始切线模量随围压的增大迅速增大,当围压大于3 MPa后,初始切线模量逐渐趋于稳定;当围压超过7 MPa后,初始切线模量随围压的增大又表现出先增大后减小的趋势,初始切线模量的峰值所对应的围压为13 MPa。

总体来说,不论是冻结黄土还是冻结改良黄土,其初始切线模量随围压的变化趋势大体均表现为先增后减的形式,造成这种现象的原因在于,随着围压的增加,冻土在压力的作用下变的更加致密,从而使初始切线模量增大。而随着围压的继续增大,冻土中冰介质开始被压碎甚至融化,冻土的抗变形能力减弱,导致初始切线模量降低。

2 三轴强度特性

2.1 强度特性

根据《土工试验方法标准》^[14]对强度取值的规定,由本文三轴试验结果得出冻结黄土和冻结改良黄土的强度随围压的变化关系,如图3所示。

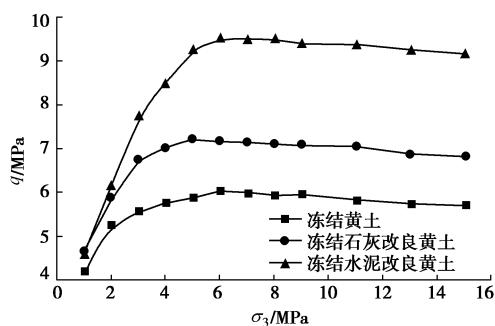


图3 强度随围压的变化曲线

Fig. 3 Variation of strength with confining pressure

图3为冻结黄土和冻结改良黄土强度随围压的变化规律。从图中可以看到,冻结黄土和冻结改良黄土的强度随围压的增大迅速增大,当围压分别超过某一特定值后,强度不再增大,反而有所降低。造成这种现象的原因在于,当围压增大到某个值后,在压力作用下冻土中产生压融,同时在冻土内部出现冰晶的破裂、滑移等现象,造成冻土强度随围压的增大不增反降^[15]。同时,从图中可以明显看到,采用石灰和水泥对黄土进行改良后,在-6℃的低温条件下,冻土的强度得到了明显的提高,且随着围压的增大,这种现象愈加明显。例如,当围压为5 MPa时,冻结黄土、冻结石灰改良黄土及冻结水泥改良黄土的强度分别为5.9, 7.2, 9.3 MPa,由此可以得知,水泥对黄土的改良效果较石灰更好。

2.2 莫尔-库仑强度参数

从上节可知,线性莫尔-库仑准则不能体现冻结黄土及冻结改良黄土强度随围压的非线性变化关系。而当围压在小范围内变化时,冻土强度随围压的变化可以认为符合线性莫尔-库仑准则,由此方法所得到的莫尔-库仑强度参数称为广义黏聚力和广义内摩擦角^[16]。当冻结黄土及冻结改良黄土发生剪切破坏时,根据莫尔-库仑准则,轴压 σ_1 和围压 σ_3 可用下式描述:

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 \tan^2(45^\circ + \varphi/2) - 2c \tan(45^\circ + \varphi/2) = 0 \quad (3)$$

可将式(3)简写为

$$\sigma_1 = M\sigma_3 + N \quad (4)$$

根据三轴试验结果, 由式(4)对相邻3个围压下的剪切破坏应力点进行拟合, 并由式(3)计算得出冻结黄土及冻结改良黄土在不同围压下的广义黏聚力和广义内摩擦角, 结果如图4、5所示。

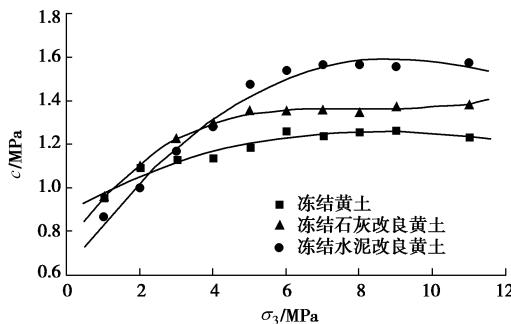


图4 广义黏聚力与围压的关系

Fig. 4 Relationship between generalized cohesions and confining pressure

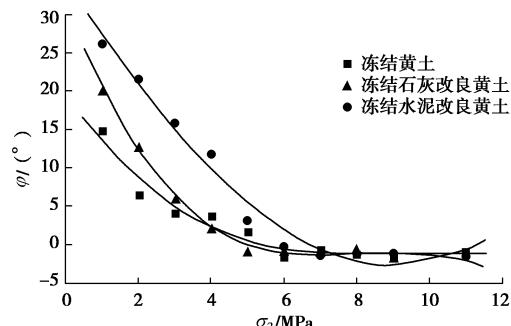


图5 广义内摩擦角与围压的关系

Fig. 5 Relationship between generalized internal friction angles and confining pressure

从图4、5可以看出, 莫尔-库仑强度参数与围压的大小密切相关。在1~15 MPa的围压范围内, 广义黏聚力随围压的增大总体呈现出非线性增大的趋势, 冻结黄土和冻结石灰改良黄土的曲线斜率呈现出先减小再增大的趋势, 而冻结水泥改良黄土的曲线斜率随着围压的增大而逐渐减小。相反, 广义内摩擦角随围压的增大总体呈现出非线性减小的趋势。同时, 对冻结黄土和冻结改良黄土, 当围压分别增大到某一特定值时, 广义内摩擦角产生负值, 说明冻土中冰介质被压融, 造成强度降低。

2.3 非线性莫尔强度准则

通过对试验数据的分析, 本文认为冻结黄土和冻结改良黄土试样破坏时, σ_1 和 σ_3 满足以下函数关系:

$$\frac{\sigma_1}{p_a} = K^{\frac{\sigma_3}{p_a}} \cdot m \cdot \left(1 + \frac{\sigma_3}{p_a}\right)^b \quad (5)$$

式中, p_a 为标准大气压, 其值为 0.10133 MPa, K , m 和 b 为材料拟合参数。用式(5)对冻结黄土及冻结改良黄土的三轴试验结果进行拟合, 拟合参数见表 3, 拟合结果如图 6 所示。

表3 拟合参数计算值

Table 3 Calculated values of fitting parameters

冻土种类	K	m	b	R^2
黄土	1.00187	19.093	0.418	0.99
石灰改良黄土	1.00119	20.672	0.432	0.99
水泥改良黄土	0.9993	14.857	0.575	0.99

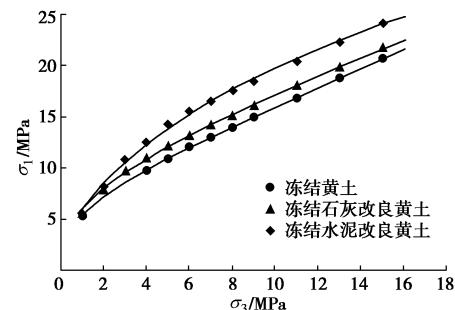


图6 大、小主应力之间的关系

Fig. 6 Relationship between σ_1 and σ_3

由莫尔-库仑强度理论可知, 冻土试样破坏时的莫尔应力圆应满足:

$$f(\sigma, \tau, \sigma_1, \sigma_3) = \left(\sigma - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\right)^2 + \tau^2 - \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right)^2 = 0 \quad (6)$$

将式(5)改写为

$$g(\sigma_1, \sigma_3) = \frac{\sigma_1}{p_a} - K^{\frac{\sigma_3}{p_a}} \cdot m \left(1 + \frac{\sigma_3}{p_a}\right)^b = 0 \quad (7)$$

根据包络线理论有

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(\sigma, \tau, \sigma_1, \sigma_3)}{\partial \sigma_1} \cdot \frac{\partial g(\sigma_1, \sigma_3)}{\partial \sigma_3} - \frac{\partial f(\sigma, \tau, \sigma_1, \sigma_3)}{\partial \sigma_3} \cdot \frac{\partial g(\sigma_1, \sigma_3)}{\partial \sigma_1} &= 0 \\ \frac{\partial g(\sigma_1, \sigma_3)}{\partial \sigma_1} &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

分别对式(6)、(7)进行微分得:

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma_1} = \sigma_3 - \sigma \quad , \quad (9)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma_3} = \sigma_1 - \sigma \quad , \quad (10)$$

$$\frac{\partial g}{\partial \sigma_1} = \frac{1}{p_a} \quad , \quad (11)$$

$$\frac{\partial g}{\partial \sigma_3} = -\frac{m}{p_a} K^{\frac{\sigma_3}{p_a}} \left[\left(1 + \frac{\sigma_3}{p_a}\right)^b \cdot \ln K + b \left(1 + \frac{\sigma_3}{p_a}\right)^{b-1} \right] \quad (12)$$

将式(9)~(12)代入式(8), 可以得到冻结黄土和冻结改良黄土试样剪切面上法向应力 σ 和切应力 τ 的解析表达式:

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + m\sigma_3 K^{\frac{\sigma_3}{p_a}} \left[\ln K \left(1 + \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^b + b \left(1 + \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{b-1} \right]}{1 + mK^{\frac{\sigma_3}{p_a}} \left[\ln K \left(1 + \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^b + b \left(1 + \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{b-1} \right]}, \quad (13)$$

$$\tau = \left\{ \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right)^2 - \left[\left[\sigma_1 + m\sigma_3 K^{\frac{\sigma_3}{p_a}} \left(\ln K \left(1 + \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^b + b \left(1 + \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{b-1} \right) \right] \right] \right\}^{\frac{1}{2}} / \left[1 + mK^{\frac{\sigma_3}{p_a}} \left(\ln K \left(1 + \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^b + b \left(1 + \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{b-1} \right) - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (14)$$

联立式 (5)、(13) 和 (14)，可以给出冻结黄土和冻结改良黄土的强度包络线，如图 7 所示。

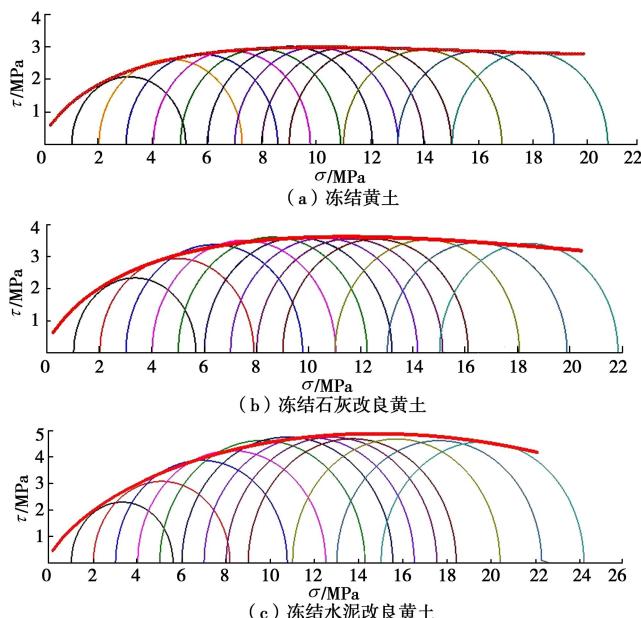


图 7 冻土莫尔圆及强度包络线

Fig. 7 Mohr's circles and strength envelopes of frozen soils

从图 7 可以看到，由式 (5)、(13) 和 (14) 计算得到的包络线与莫尔应力圆吻合很好，可知本文所建立的非线性莫尔-库仑强度准则可精确的描述冻结黄土及冻结改良黄土强度随围压的非线性变化关系。

3 结 论

通过对-6℃的黄土及改良黄土在1~15 MPa围压范围内的三轴试验结果分析，得到以下初步结论：

(1)围压对冻结黄土及冻结改良黄土的变形和强度影响较为明显。

(2)随围压的增大，冻结黄土及冻结改良黄土的应力-应变曲线形态由应变软化型逐渐过渡为应变硬化型。冻结黄土及冻结改良黄土的初始切线模量随围压的增大总体均呈现出先增大后减小的趋势。

(3)采用水泥和石灰改良后的冻结黄土，其强度

得到明显提高，且水泥比石灰的改良效果更好。

(4)冻结黄土和冻结改良黄土的强度随围压的增大迅速增大，当围压分别超过某一特定值后，强度不再增大，反而有所降低。冻结黄土和冻结改良黄土的广义黏聚力随围压的增大非线性增大，广义内摩擦角随围压的增大非线性减小。

(5)针对高围压下冻结黄土和冻结改良黄土存在“压融”及内部冰胶结体的破裂、滑移现象而造成的强度降低，基于包络线理论建立非线性莫尔-库仑强度准则，采用该模型可以很好的反映冻结黄土和冻结改良黄土在围压大于一定值后强度随围压进一步增大而降低的特征。

参 考 文 献：

- [1] 牛亚强, 王旭, 郑静, 等. 侧向约束防渗路基新结构防渗效果试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊2): 252~258. (NIU Ya-qiang, WANG Xu, ZHENG Jing, et al. Experimental research on anti-seepage effect of new embankment structure of lateral-constraint and seepage control[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S2): 252~258. (in Chinese))
- [2] 郭婷婷, 张伯平, 田志高, 等. 黄土二灰土工程特性研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(5): 719~721. (GUO Ting-ting, ZHANG Bo-ping, TIAN Zhi-gao, et al. Study on engineering characteristic of lime-flyash loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(5): 719~721. (in Chinese))
- [3] 夏琼, 杨有海, 耿煊. 粉煤灰与石灰、水泥改良黄土填料的试验研究[J]. 兰州交通大学学报, 2008, 27(3): 40~46. (XIA Qiong, YANG You-hai, GEN Xuan. Experimental study on flyash-lime or flyash-cement loess filling[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2008, 27(3): 40~46. (in Chinese))
- [4] 徐实, 杨有海, 耿煊, 等. 石灰改性黄土的强度特性试验研究[J]. 兰州交通大学学报, 2006, 25(6): 97~100. (XU Shi, YANG You-hai, GENG Xuan, et al. Experimental study on strength property of lime improved loess[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2006, 25(6): 97~100. (in Chinese))
- [5] 杨有海, 梁波, 丁立. 粉煤灰与石灰、水泥拌合料强度特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 227~230. (YANG You-hai, LIANG Bo, DING Li. Experimental study on the strength behaviors of flyash-lime or flyash-cement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(2): 227~230. (in Chinese))
- [6] 李志清, 余文龙, 范林峰, 等. 改良黄土强度特性与工程处

- [置试验研究[J]. 工程地质学报, 2011, **19**(1): 116 – 121. (LI Zhi-qing, YU Wen-long, FAN Lin-feng, et al. Experimental research on strength characteristics and engineering treatment of improved loess soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, **19**(1): 116 – 121. (in Chinese))]
- [7] 张向东, 曹启坤, 潘宇. 二灰改良土动力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(8): 2560 – 2564. (ZHANG Xiang-dong, CAO Qi-kun, PAN Yu. Experiment research of lime-fly ash soil's dynamics characteristics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(8): 2560 – 2564. (in Chinese))]
- [8] 王银梅, 程佳明, 高立成. 冻融循环对化学改良黄土性能的影响[J]. 太原理工大学学报, 2013, **44**(4): 536 – 538. (WANG Yin-mei, CHENG Jia-ming, GAO Li-cheng. Influence of freeze-thaw cycles on properties of chemical improved loess[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2013, **44**(4): 536 – 538.)
- [9] 王天亮, 刘建坤, 田亚护. 冻融循环作用下水泥及石灰改良土静力特性研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(1): 193 – 198. (WANG Tian-liang, LIU Jian-kun, TIAN Ya-hu. Static properties of cement-and lime-modified soil subjected to freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(1): 193 – 198. (in Chinese))]
- [10] 马巍, 徐学祖, 张力新. 冻融循环对石灰粉土剪切强度特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(2): 158 – 160. (MA Wei, XU Xue-zu, ZHANG Li-xin. Influence of frost and thaw cycles on shear strength of lime silt[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(2): 158 – 160. (in Chinese))]
- [11] 吕擎峰, 李晓媛, 赵彦旭, 等. 改性黄土的冻融特性[J]. 中南大学学报, 2014, **45**(3): 819 – 825. (LÜ Qing-feng, LI Xiao-yuan, ZHAO Yan-xu, et al. Properties of modified loess under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Central South University, 2014, **45**(3): 819 – 825. (in Chinese))]
- [12] 戴高峰, 张群, 朱福, 等. 冻融循环对石灰处置粉质黏土静强度影响研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(增刊 2): 351 – 356. (ZHAN Gao-feng, ZHANG Qun, ZHU Fu, et al. Research on influence of freeze-thaw cycles on static strength of lime-treated silty clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(S2): 351 – 356. (in Chinese))]
- [13] 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, **26**(8): 1612 – 1617. (LAI Yuan-ming, CHENG Hong-bin, GAO Zhi-hua, et al. Stress-strain relationships and nonlinear Mohr strength criteria of frozen sand clay[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(8): 1612 – 1617. (in Chinese))]
- [14] GB/T50123 — 1999 土工试验方法标准 [S]. 1999. (GB/T50123—1999 Standard for soil test method[S]. 1999. (in Chinese))]
- [15] 马巍, 吴紫汪, 盛煌. 围压对冻土强度特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1995, **17**(5): 7 – 11. (MA Wei, WU Zi-wang, SHENG Huang. Effect of confining pressure on strength behaviour of frozen soil[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **17**(5): 7 – 11. (in Chinese))]
- [16] YANG Yu-gui, LAI Yuan-ming, CHANG Xiao-xiao. Laboratory and theoretical investigations on the deformation and strength behaviors of artificial frozen soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, **64**(1): 39 – 45.

(责任编辑 胡海霞)