

Experimental Research on Mechanical Property of Artificial Freezing Construction Road

Zhaoqing Zhu, Shijun Ding, Siyu Ji, Pei Chen

China Electric Power Research Institute Co. Ltd., Beijing

Email: zhuzhaoqing@epri.sgcc.com.cn, dingsj@epri.sgcc.com.cn, 1585856640@qq.com, chenp@epri.sgcc.com.cn

Received: Jan. 24th, 2020; accepted: Feb. 10th, 2020; published: Feb. 17th, 2020

Abstract

At present, the artificial freezing method is widely used to temporarily reinforce the strength of the soil so that the soil layer strength is greatly increased during the freezing period to meet the engineering needs. After melting, it can be restored to its original condition, reducing pollution and damage to the environment. In order to explore the application prospect of artificial freezing method in construction access road of transmission line, the physical mechanics performance tests of the ice and frozen soil have been developed. And the model experiment has been carried on to study the mechanical property of the artificial freeze roadbed. The results of the experiment show that: as the temperature decreases, the uniaxial compressive strength of ice specimen increases gradually, and the cohesive strength and internal friction angle of frozen soil have the tendency which increases; the compressibility of backfill soil in frozen state is significantly lower than that at normal temperature; and under the same load, the overall displacement of the frozen road decreases with the increase of the artificial water flooding freeze pavement thickness, and small construction machines can pass through pavements with a thickness more than 10 cm.

Keywords

Artificial Freezing, Transmission Line, Construction Access Road, Model Experiment

人工冻结施工便道力学性能试验研究

朱照清, 丁士君, 姬思宇, 陈培

中国电力科学研究院有限公司, 北京

Email: zhuzhaoqing@epri.sgcc.com.cn, dingsj@epri.sgcc.com.cn, 1585856640@qq.com, chenp@epri.sgcc.com.cn

收稿日期：2020年1月24日；录用日期：2020年2月10日；发布日期：2020年2月17日

摘要

目前人工冻结法被广泛用于临时土体强度加固，使土层在冻结期间强度大大提高，满足工程需求，融化后可恢复原状，降低对环境的污染和破坏。为探索人工冻结法在输电线路施工便道中的应用前景，开展了冰、冻土试样的物理力学性能试验，并对人工冻结路基力学性能进行了模型试验。试验结果表明：随着温度降低，冰试样的单轴抗压强度逐渐增加，冻土的粘聚力和内摩擦角有增大的趋势；回填土在冻结状态下压缩性较常温时显著降低；人工注水冻结路面厚度越大，在相同荷载作用下，冻结路面和路基的整体位移越小，厚度大于10 cm的冻结路面可以通过小型施工机械。

关键词

人工冻结，输电线路，施工便道，模型试验

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在我国城市地铁、建筑地基、海底隧道等工程的建设中，土层人工冻结法被经常用来临时加固土体强度[1] [2] [3]。土层可以在冻结期间内大大提高其强度，满足工程需求，在冻结结束融化后可恢复原状，降低对环境的污染和破坏[4] [5] [6] [7] [8]。将冻结法施工引入到输电线路临时道路修建中，可以采用两种方式：1) 针对河网泥沼地区等土质软弱地区，可以通过直接布设冻结管，对土体进行冻结，提高土体强度，形成临时道路；2) 针对于环保要求高的地区，可以在地面上架设冻结层，通过人工注水冻结，在保护地表上形成临时道路。通过人工冻结法形成的临时道路，在车辆通过后可立即在短时间内恢复原状，在下一次车辆通过时可提前1~2天进行冻结，通过后又可恢复原状，施工灵活度和成本都可以很好的控制。

为了探索输电线路施工便道人工冻结路基承载特性，开展了人工冻结路基力学性能模型试验，并对冰及冻土试样的物理力学性能进行了试验研究。

2. 试验概况

2.1. 冰和冻土试样试验

开展了冰单轴抗压强度试验和冻土三轴剪切强度试验。试验所采用的试样规格与数量见表1。

Table 1. Specimen size and quantity

表1. 试样规格与数量

序号	试验项目	试样规格/mm	试样数量	试验温度/℃
1	冰单轴抗压强度试验	Φ70 × 150	9	-5、-10、-15
2	冻土三轴剪切试验	Φ61.8 × 150	12	-3、-5、-8、-10

根据天然含水率(15%)和天然密度(2 g/cm³)加工制成试验所需的重塑土试样，误差分别不超过±1.0%。

和 0.3 g/cm^3 。冰试样采用直径 70 mm 的 PVC 排水管灌水在冷库内冻结后切割的方法制备, 试样长度 150 mm。

冰单轴抗压试验采用恒应变速率控制加载方式, 应变速率为 $1\%/\text{min}$ 。使用 WDT-100 冻土试验机对冰试样进行无围压单轴抗压强度试验。

冻土三轴剪切强度试验采用恒应变速率控制加载方式多试样分级加载, 在 WDTS-200 型三轴仪上进行的试验。

2.2. 人工冻结模型试验

对常温和低温冻结状态下的路基模型进行了抗压试验。同时, 开展了人工注水冻结路面模型试验, 将与路基同横截面尺寸的冰块置于路基模型上, 开展了不同厚度冰块的抗压试验。试验工况、模型尺寸、温度条件见表 2。

Table 2. Model experiment conditions

表 2. 模型试验工况

序号	试验项目	模型平面尺寸/cm	厚度/cm	试验温度
1	冻结路基模型试验	100×50	30	-20°C 、 15°C
2	人工注水冻结路面模型试验	100×50	2、5、10、30	-20°C

3. 试验结果和分析

3.1. 冰试样单轴抗压强度

冰试样在每个温度等级(-5°C 、 -10°C 、 -15°C)下至少采取 3 个以上的试样进行平行试验, 以提高试验结果的准确性。冰试样的抗压强度结果见表 3。冰的强度与温度的关系密切相关, 随着温度的降低, 强度增大。

由试验结果不难看出, 随着温度的降低, 冰试样的单轴抗压强度逐渐增加。试验温度较为接近, 本次试验中每降低 5°C , 强度增加约 20%。随着温度降低, 冰中水分子结合更为紧密, 故在本次试验的温度范围内, 冰试样的强度随着温度降低而提高。

Table 3. Test results of uniaxial compressive strength experiment

表 3. 单轴抗压强度试验结果

温度($^\circ\text{C}$)	单轴抗压强度/Mpa	
	分值	均值
-5	2.77	2.1
	2.04	
	1.58	
	2.01	
-10	1.89	2.46
	3.76	
	3.02	
	1.81	
-15	1.8	2.96
	1.82	
	2.43	
	3.92	
	3.66	

不同温度下冰的单轴抗压强度应力应变试验曲线见图1。

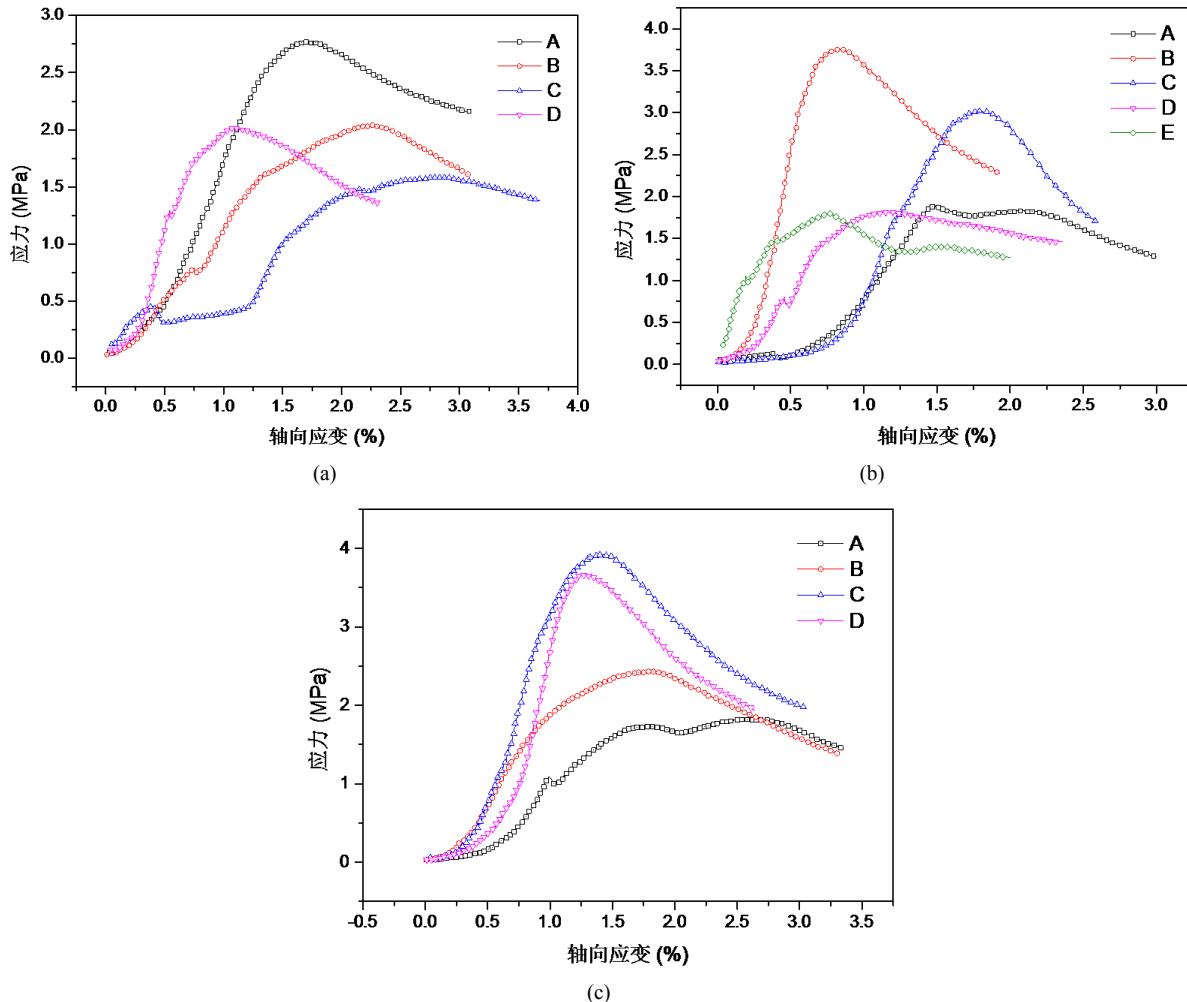


Figure 1. Curves: stress-strain result of uniaxial compressive strength experiment. (a) Curves: stress-strain result of uniaxial compressive strength experiment at -5°C ; (b) Curves: stress-strain result of uniaxial compressive strength experiment at -10°C ; (c) Curves: stress-strain result of uniaxial compressive strength experiment at -15°C

图1. 单轴抗压强度应力应变试验曲线。(a) -5°C 单轴抗压强度试验曲线; (b) 冰 -10°C 单轴抗压强度试验曲线; (c) 冰 -15°C 单轴抗压强度试验曲线

试验中，各试样均在应变很小的情况下就达到了应力最大的状态。在达到最大应力后继续保持原有的应变速率继续加载，则应力下降的速度小于峰值前的上升速度。由于试样最终破坏时的应变依然较小，在3.5%左右，因此，在达到最大应力后试样即失去了承载能力。

3.2. 冻土试样三轴剪切试验

本次试验对粘土试样在 -3°C 、 -5°C 、 -8°C 、 -10°C 条件下进行冻土三轴剪切试验。试验结果见表4，土层的三轴剪切强度特征可以用莫尔强度准则来描述：

$$\sigma_1 = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 + 2c \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (1)$$

其中， σ_1 —最大主应力，MPa； σ_3 —最小主应力，MPa； φ —内摩擦角， $^{\circ}$ ； c —粘聚力，MPa。

Table 4. Triaxial shear test results of frozen soil
表 4. 冻土三轴剪切试验结果

试验温度℃	强度指标		强度拟合公式
	粘聚力 c (MPa)	内摩擦角 φ (°)	
-3	0.94	26.59	$\sigma_1 = 2.62\sigma_3 + 3.04$
-5	0.56	31.72	$\sigma_1 = 3.22\sigma_3 + 2.01$
-8	0.68	33.32	$\sigma_1 = 3.44\sigma_3 + 2.52$
-10	1.19	26.07	$\sigma_1 = 2.57\sigma_3 + 3.81$

由于本次试验选取的温度较为接近，冻土三轴剪切试验的结果规律性并不明显，但从试验结果可看出，随着温度降低，冻土的粘聚力和内摩擦角还是有增大的趋势。这主要是由于随着温度降低，土中液态水逐渐转化为固态水，且液态水的含量会随着温度的降低而减少，土的微观结构会产生一定的变化，导致土的粘聚力和内摩擦角也随着温度的降低而有增大的趋势。

3.3. 人工注水冻结路面模型试验

在室温和-20℃的环境中，分别对土箱中的回填土进行了抗压试验，载荷板直径为30 cm，位移-荷载曲线如图2所示。

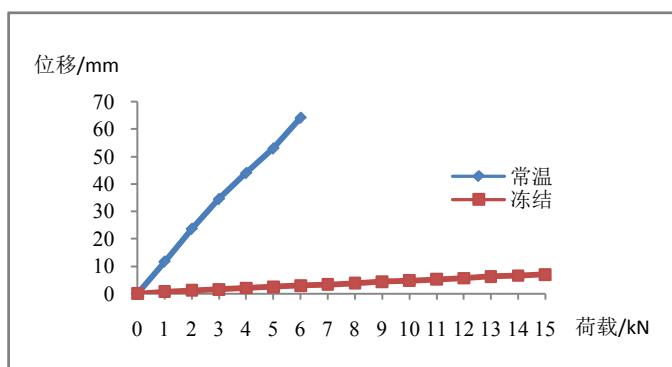


Figure 2. Curves: load-displacement result of frozen roadbed model experiment

图 2. 冻结路基模型试验

通过试验结果可知，由于试验采用的为回填黏性土，压缩性较大，但在冻结状态下压缩性显著降低，在试验荷载范围内，冻结路基模型处于弹性变形状态。按照浅层平板载荷试验变形模量的计算方法，得到在室温和-20℃的环境中，回填土的变形模量分别为0.26 MPa和5.71 MPa，由于模型试验与原位试验在边界条件、荷载板面积的方面存在差异，计算出的变形模量与实际值有差别，但可用作比较分析。由结果不难看出，在-20℃时，土体的变形模量较常温下提高了20倍，土的压缩性大大降低。

回填土并未作夯实处理，土体中空隙大，故压缩性较大。冻结温度为-20℃，冻结后土中水基本都为固态，由于水在固态下的体积大于液态，土中空隙被冰填充，整体压缩性得到极大提高。

人工注水冻结路面模型试验结果如图3所示，试验时环境温度均为-20℃。

通过试验结果可知，人工注水冻结路面的抗压特性与冰的厚度紧密相关，厚度越大，在相同荷载作用下，冻结路面和路基的整体位移越小。根据冰试样抗压试验结果可知，未破坏时冰自身变形较小，整体位移主要来自冻结土，由于冰厚度的增加，传递到土体的附加应力降低，故冰厚度越大，整体位移越

小。厚度为 2 cm 和 5 cm 的人工冻结路面分别在加载达到 2.4 kN 和 3 kN 时发生破坏, 而厚度为 10 cm 和 30 cm 的人工冻结路面在加载到 15 kN 时均未发生破坏。大部分小型施工机械重量为 2~5 吨, 这说明厚度为 10 cm 的人工冻结路面基本可以承受小型施工机械通过。

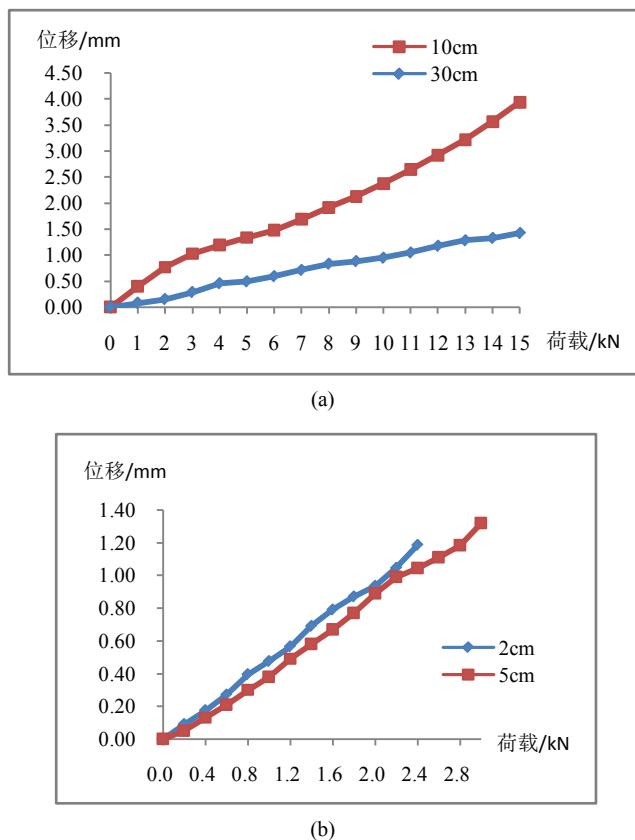


Figure 3. Curves: load-displacement result of artificial water flooding freeze pavement experiment. (a) Ice thickness: 10 cm and 30 cm; (b) Ice thickness: 2 cm and 5 cm

图 3. 人工注水冻结路面模型试验。(a) 冰厚度为 10 cm 和 30 cm; (b) 冰厚度为 2 cm 和 5 cm

4. 小结

- 1) 对于土体和冰试件, 强度指标和温度有直接对应关系。随着温度的降低, 强度有进一步提高的趋势。
- 2) 回填土的压缩性在低温冻结状态下显著降低, 模型试验结果显示变形模量可提高 20 倍。
- 3) 在相同荷载作用下, 人工注水冻结路面厚度越大, 路面和路基的整体位移就越小, 厚度大于 10 cm 的路面可以通过小型施工机械。

基金项目

中国电科院创新基金, 输电线路施工便道人工冻结路基承载特性研究(GC83-18-003)。

参考文献

- [1] 陈湘生. 地层冻结技术 40 年[J]. 煤炭科学技术, 1996, 24(1): 13-15.

- [2] 王宁, 薛绍祖. 人工地层冻结法在地铁联络通道中的应用[J]. 隧道建设, 2007, 27(z2): 494-497.
- [3] 何淑梅. 沿海地区地铁隧道冻结工程中土体冻胀融沉特性研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.
- [4] 陈朝巧. 冻结凿井技术研究进展与存在的问题[J]. 建井技术, 2007(3): 28-31.
- [5] 陈瑞杰, 等. 人工地层冻结应用研究进展和展望[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 40-44.
- [6] 蔡海兵. 地铁隧道水平冻结工程地层冻胀融沉的预测方法及工程应用[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [7] 王建平, 许舒荣. 深厚冲积层冻结设计两个问题的讨论[J]. 建井技术, 2011(3): 37-39.
- [8] 薛玉庭, 李向阳, 等. 井筒冻结法施工的常见问题及防治措施[J]. 中国西部科技, 2009(10): 35-36.