

青藏直流输变电工程基础冻结强度试验研究

温智¹, 俞祁浩¹, 张建明¹, 董盛时², 马巍¹, 牛富俊¹, 赵淑萍¹, 杨振¹

(1. 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, 兰州 730000; 2. 兰州大学土木工程与力学学院, 兰州 730000)

摘要: 土与基础接触面间的冻结强度是评价冻土区基础工程抗拔性能, 分析构筑物与冻土相互作用的基础和关键。通过不同含水率和不同温度青藏粉土与混凝土接触面的直剪试验, 研究了冻结强度变化规律。结果表明, 温度、含水率和法向应力均对冻结强度和冻结强度恢复有显著的影响。冻土沿接触面的剪切滑移会导致冻结强度损失, 冰胶结能力的破坏导致接触面黏聚力减小, 表面粗糙程度的增加导致内摩擦角增大, 内摩擦角增加对冻结强度增加的贡献远远小于黏聚力减小导致的冻结强度降低。由于含水率、温度和法向应力对冻结强度有显著的影响, 冻结强度对于评估基础所受的切向冻胀力以及评价基础的冻拔安全性具有重要的意义。但是, 现行规范中冻土区基础切向冻胀力设计值主要依据土体冻胀敏感性确定, 并未考虑含水率、温度和法向应力的影响, 可能导致切向冻胀力设计值与基础实际受到的冻胀力存在较大的差异, 引起基础冻胀失稳或经济浪费。

关键词: 青藏粉土; 接触面; 直剪试验; 冻结强度

中图分类号: TU 443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)12-2262-06

作者简介: 温智(1976-), 男, 内蒙古武川人, 博士, 研究员, 主要从事冻土物理学与寒区工程研究。E-mail: wenzhi@lzb.ac.cn.

Experimental study on adfreezing bond strength of interface between silt and foundation of Qinghai-Tibetan transmission line

WEN Zhi¹, YU Qi-hao¹, ZHANG Jian-ming¹, DONG Sheng-shi², MA Wei¹, NIU Fu-jun¹, ZHAO Shu-ping¹, YANG Zhen¹

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, CAREERI, CAS, Lanzhou 730000, China; 2. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The adfreezing bond strength between soils and foundation surface plays an important role in general stability concerns of foundations in frozen ground. A series of laboratory direct shear tests on the adfreezing interface between silt and concrete are performed to understand the mechanical behaviors of the foundation-frozen soil interface. The results show that the temperature, moisture content and normal stress significantly affect the adfreezing strength and its bond healing. The small displacements between foundation and frozen soils may result in dramatically less loss in the adfreezing strength. The breaking of ice bond decreases the cohesion, and the increasing surface roughness results in the increase in the internal frictional angle. The increase in the adfreezing strength due to the increasing internal frictional angle is significantly smaller than the loss of the adfreezing strength resulting from the decrease in cohesion. The adfreezing bond is an important parameter to reasonably design and construct the frozen ground foundation. The temperature, moisture content and normal stress can also affect the tangential frost heave force via the influence on the adfreezing bond. However, the Chinese standard for the foundation design in frozen ground does not consider the influence of these factors, which may lead to the instability of foundation or economic loss.

Key words: Qinghai-Tibetan silt; interface; direct shear test; adfreezing strength

0 引言

土的冻结过程中, 冰胶结作用使周围土体颗粒与建(构)筑物基础联成一体, 这种胶结力称为土与基础间的冻结强度, 通常采用冻土沿基础材料表面的剪切强度来度量^[1]。冻土与基础侧表面间的冻结强度是土冻结过程中导致基础产生切向冻胀力作用的原因和

关键, 同时也是多年冻土区基础承载力的主要组成部分。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2012CB026101); 国家自然科学基金创新群体项目(41121061); 中科院“百人计划”项目(Y251561001); 国家电网公司科技项目(SGJSJS-2010-935-936)
收稿日期: 2013-04-28

随着土体自上而下逐层冻结, 土与基础冻结在一起而产生冻结强度。下层土体冻结过程中形成的切向冻胀力超过冻结强度时, 土与基础将发生相对滑移, 不可避免地破坏冻土与基础之间的胶结作用。由于冻土中未冻水的存在以及未冻水随外界温度、压力等变化而动态变化, 土颗粒与基础将由于未冻水的重新冻结而再次胶结在一起, 冻结强度得到部分恢复。这一过程释放了切向冻胀力, 冻土与基础体系将形成新的冻结强度和应力分布。不过, 相比于未冻状态的初始含水量, 由于未冻水含量的显著减小, 土与基础的冻结强度将不可避免地下降。另外, 由于基础接触点冰晶的部分破坏, 以及再结晶时晶体的方向向着使冻土层对基础位移的阻力降低的方向改变, 将减小切向冻胀力的大小^[2]。实践表明, 土冻结过程中土与基础极易发生相对滑移, 且微弱的冻土与基础相对位移也能破坏冰胶结联结和冻结强度^[3]。

20 世纪 30 年代开始, 国内外陆续开展了冻土与基础间冻结强度的试验研究, 包括切向冻胀力与冻结强度关系、长期冻结强度、冻结强度影响因素等诸多方面^[3-4]。过去的研究主要关注初次冻结强度的大小及其变化, 很少关注土逐层冻结过程中冻结强度的损失和恢复^[5-6]。俄罗斯在冻土区基础工程实践中通常不考虑冻结强度的恢复, 认为冰胶结破坏后不可恢复, 切向冻胀力只取决于土与基础的摩擦作用。北美地区冻土基础设计中通常不考虑冻结强度的损失, 认为切向冻胀力的最大值等同于长期冻结强度^[3]。目前, 中国在冻土区基础稳定性核算中, 通常采用土体冻胀敏感性去确定基础侧表面受到的切向冻胀力, 也未考虑重新胶结过程中的强度损失和冻结强度削弱^[7]。因此, 正确地评估冻土与基础重新胶结后冻结强度恢复和强度损失情况, 对于科学合理地设计和评价冻土区基础稳定性具有重要的意义。

为了支持西藏经济社会发展, 保障能源供给, 将修建青海—西藏±400 kV 直流联网工程。该工程北起青海格尔木市, 南至西藏拉萨, 将跨越青藏高原 1100 余公里的多年冻土和深季节冻土区。其中多年冻土区长度约 630 km, 季节冻土区长度约 470 km^[8]。北美、俄罗斯和中国冻土区的工程实践表明, 冻土区的输变电基础受到风荷载作用引起的上拔力和切向冻胀力的双重作用, 容易发生基础冻拔病害, 影响冻土区输变电基础的稳定性^[9-11]。冻结强度是评价基础所受切向冻胀力和承载力的重要参数, 较大的冻结强度偏差可能会危害基础安全, 或者造成显著的经济浪费。本研究通过不同含水率、不同温度青藏粉土与混凝土接触面的直剪试验, 详细研究了混凝土—粉土接触面的冻结强度、内摩擦角、黏聚力随含水率和温度改变的变

化规律, 研究了冻结强度和 8 h 冻结强度恢复的变化规律及其影响因素, 分析了温度和含水率对混凝土—青藏粉土接触面强度影响的影响机制, 并初步探讨了冻土基础设计规范中切向冻胀力的取值问题。

1 接触面直剪试验

1.1 试样制备

试验用土选用青藏输变电工程沿线典型土类—粉土, 利用光电式液塑限联合测定仪测得其塑限含水率 14.6%, 液限含水率 21.9%。该粉土的粒径级配累计曲线见图 1 所示。试验中首先采用 425 水泥砂浆制成直径 61.8 mm 和高 20 mm 的混凝土试块, 控制各混凝土试块表面粗糙程度尽量一致。然后将 2 个直径 61.8 mm, 高 20 mm 环刀连接在一起制成 40 mm 高样品仓, 将样品仓的表面抹上凡士林以减小试样与样品仓间的胶结强度。最后将 20 mm 厚混凝土试块放入样品仓中, 按照设定含水率配制土样, 并按照干密度为 1.68 g/cm³ 将土样分层置入样品仓。土样填满后表面覆盖玻璃片, 再用保鲜膜整体包裹, 在 -30℃ 环境下快速冻结 24 h, 待样品完全冻结后, 用油压千斤顶将试样从样品仓中顶出, 即可制成混凝土—青藏粉土接触面直剪试验样品。

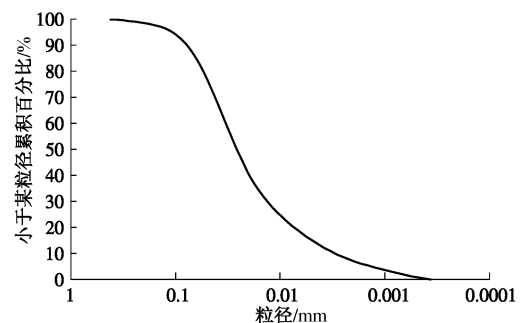


图 1 试验土粒径级配累计曲线

Fig. 1 Grain-size distribution of Qinghai-Tibet silt

1.2 试验设计

试验采用南京土壤仪器厂生产的 ZJ 四联应变控制式直剪仪测定粉土—混凝土接触面的抗剪强度, 试验法向应力分别设为 50, 100, 200, 400 kPa, 剪切速度为 0.3 mm/min。采用 4 个试样在不同的法向应力下, 施加剪切力进行剪切, 求得破坏时的剪应力, 获得接触面的冻结强度, 并根据库仑公式确定接触面的内摩擦角和黏聚力。试验中粉土含水率分别为 15.5%, 17.5%, 19% 和 21.5%, 试验温度分别为 -0.8℃, -1.9℃, -3.0℃。试验在冻土工程国家重点实验室低温实验室进行, 低温实验室内环境温度可自动控制, 控温精度 ±0.5℃。试验中采用电子温度计实时测定环境温度和直剪仪温度, 并人工调节低温室环境温度, 使环境温

度尽可能接近试验温度。试样在恒温箱按照试验温度恒温 24 h 后, 移入低温实验室开展试验, 并控制低温实验室的环境温度与试验温度相同。为了测定粉土与混凝土接触面发生剪切位移而破坏原有胶结后, 粉土与混凝土重新胶结后冻结强度值恢复情况, 在完成直剪试验后, 反向推移剪切盒使上下剪切盒完全重合, 放置 8 h 后再次剪切, 获得冻结强度 8 h 恢复值。

2 试验结果分析

2.1 冻结强度

图 2 是不同法向应力作用下混凝土基础与冻土界面冻结强度变化图。从图 2 可以看出, 随着温度降低, 冻结粉土与基础间的冻结强度显著增大。当含水率从 15.5% 增加到 19% 时, 随着土体含水率的增大, 温度对接触面抗剪强度的影响更加显著, 即含水率较高时相同的温度降低会导致更大的强度增加。这主要是源于温度对接触面强度的影响主要是通过影响土体中的未冻水含量而实现的。当温度降低时, 直接导致了接触面附近未冻水含量的下降以及冰胶结量和胶结强度的增加。因此随着含水率的增加, 温度对其影响亦更显著。当含水率从 19% 增加到 21.5% 时, 随着含水率增加, 温度对接触面抗剪强度的影响不显著, 即相同温度降低导致的冻结强度增加相近(图 2)。这表明土体近饱和, 孔隙完全被水和冰晶填充, 冰胶结能力达到了最大值, 含水率的进一步增加并不能继续增强冰胶结能力。

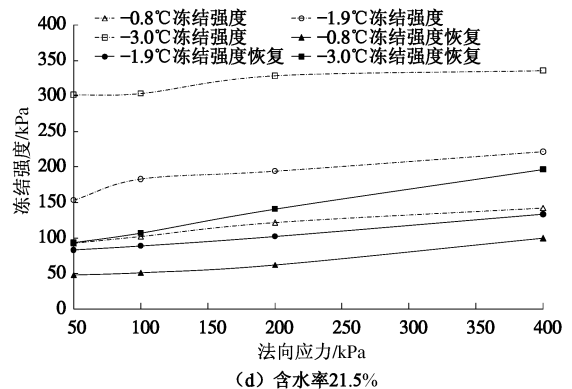
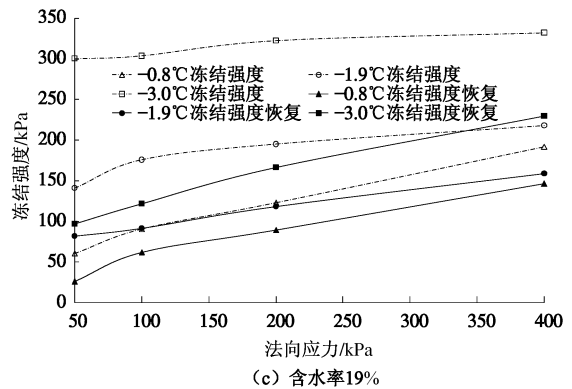
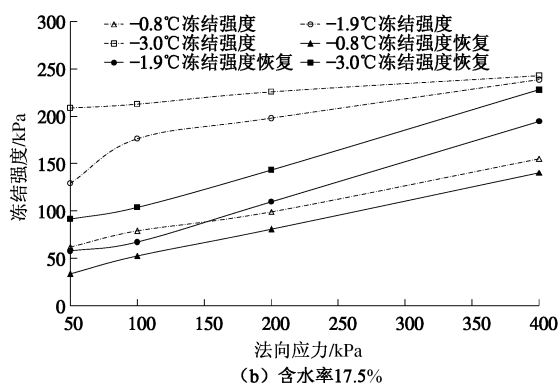
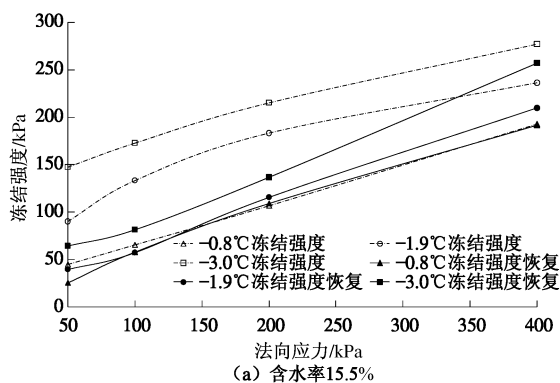


图 2 不同法向应力接触面冻结强度变化过程

Fig. 2 Variation of adfreeze strength with temperature

试验结果表明, 相同温度情况下, 法向压力较小时, 随着土体含水率的增加, 粉土与基础间的冻结强度显著增大。随着法向压力的增大, 含水率对冻结强度的影响变小。在 400 kPa 法向应力时, 含水率和冻结强度相关性不显著。冻结强度由接触面黏聚力和摩擦力两部分构成。较大的含水率在冻结时产生显著的黏聚力, 但冰晶和未冻水填充了接触面孔隙, 其润滑作用会减小接触面摩擦力。在较高法向应力作用下, 含水率增加导致的摩擦力减小效应逐渐增强。上述两者的共同作用使 400 kPa 法向应力时, 含水率和冻结强度相关性不显著。

2.2 冻结强度恢复

从图 2 可以看出, 8 h 冻结强度恢复值总体要显著小于冻结强度, 冻土与基础接触面的相对位移可以显著降低冻结强度, 特别是法向应力较小和含水率较高条件下冻结强度值减小更为显著, 可达 50% 以上。

从图 2 可以看出, 温度仍是影响冻结强度恢复的重要因素。试验温度越低, 不同法向应力水平下的冻结强度恢复值越小, 冻结强度损失越大。相同含水率时, 不同温度间冻结强度相差较大, 但不同温度间冻结强度恢复值差距显著减小。温度较低时, 未冻水含量相应较低, 因而重新恢复的冰胶结也较少, 导致其冻结强度损失较大。低温时冻结强度恢复较少, 而温

度较高时冻结强度恢复相对较多, 这导致不同温度水平冻结强度恢复值差距显著变小。

试验结果表明, 随着含水率增加, 冻土与基础接触面剪切位移对冻结强度损失影响更加显著, 这主要是由于高含水率时冰胶结能力强, 位移造成的冰胶结联结破坏导致了冻结强度减小明显。

随着法向应力增大, 冻结强度恢复逐渐增强。试验结果表明, 当冻土与基础接触面发生剪切错动时, 高含水率和低法向应力情况下的冻结强度损失最为显著, 低应力高含水率导致的冻结强度降低相对较大, 而高应力和低含水率导致的冻结强度降低相对较小。

2.3 冻结强度变化机制

图 3 是接触面抗剪强度指标随温度和含水率变化过程图。从图 3 中可以看出, 冻土沿接触面的剪切滑移导致接触面黏聚力减小和内摩擦角增大。随着温度降低, 接触面黏聚力和黏聚力恢复值之间的差距变大 (图 3 (a))。温度降低一方面使试样中未冻水含量减小, 冰晶含量增加^[12]。从图 4 可以看出, 0℃到-3℃是粉土的剧烈相变区, 在此温度区间内, 随温度下降, 未冻水含量急剧减少。另一方面, 温度降低也使冰晶的强度增大^[13]。因此, 低温时黏聚力相对较大。当冰胶结破坏后, 其恢复主要是由于未冻水的存在和冰、未冻水的动力平衡状态的重新建立。温度较低时未冻水含量相对较少, 因而其黏聚力恢复程度也较低。因此, 温度较低时, 冻土沿接触面的剪切滑移导致了更显著的黏聚力损失。随着土体含水率的增加, 土中未冻水含量相对较多, 黏聚力及其恢复值均相对增大。

图 3 (b) 是内摩擦角及其 8 h 恢复值随温度和含水率变化过程图。从图中可以看出, 内摩擦角及其恢复值均随试样含水率的增加而减小。随着含水率增大, 冰晶和未冻水逐渐充填接触面和接触面附近孔隙, 导致土颗粒与混凝土的接触面积减小, 产生的摩擦力也相应减小。另外, 冰晶和未冻水的充填效应降低了接触面粗糙度, 减小了土颗粒与混凝土表面颗粒相互嵌入和联锁作用产生的咬合力, 从而也导致内摩擦角随含水率的增大而较小。试验结束后观察接触面也发现, 随着含水率的升高, 混凝土表面冰膜更为显著, 且分布更均匀, 冻土表面的粗糙程度也会随着含水率的增大而趋于光滑。

温度对接触面内摩擦角及其恢复有显著的影响, 试验温度越低, 内摩擦角增加的幅度越大。这可能主要是由于低温时破碎冰晶强度大, 造成接触面粗糙程度增加, 因而导致其内摩擦角增加。

总体而言, 内摩擦角增加对冻结强度增加的贡献远远小于黏聚力减小带来的冻结强度减小, 接触面发

生错动位移后, 冻结强度显著降低。粉土与接触面的冻结强度主要取决于黏聚力, 特别当土体含水率较高时。从图 3 (a) 可以看出, 接触面发生相对位移后, 不同含水率水平的黏聚力恢复值相近。因此, 混凝土与粉土冻结强度恢复值主要取决于内摩擦角, 而内摩擦角对冻结强度的贡献随法向应力的增加而增加。

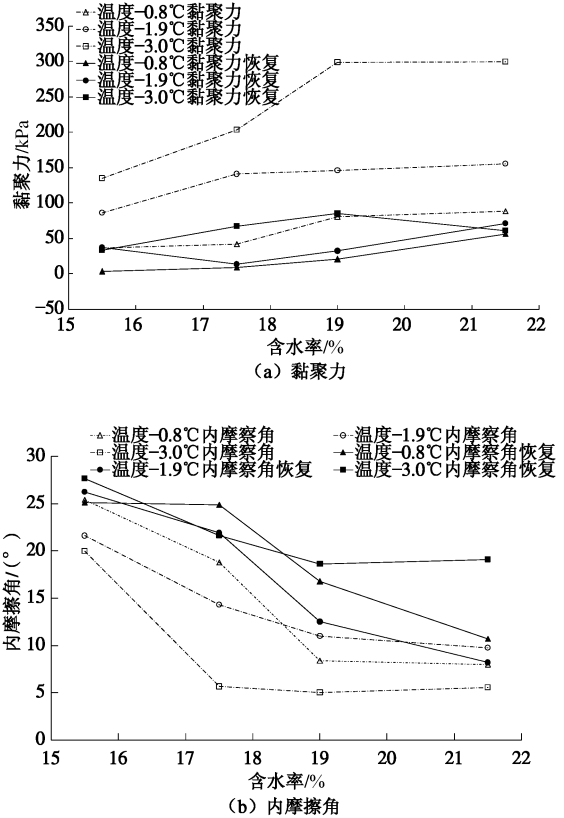


图 3 接触面抗剪强度指标随温度和含水率变化过程

Fig. 3 Variation of shear strength parameters with temperature and moisture content

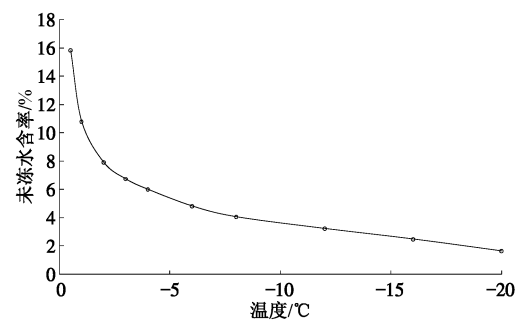


图 4 青藏粉土未冻水含量随温度变化

Fig. 4 Variation of unfrozen water content with temperature

由于冻结强度恢复值主要取决于内摩擦角, 因而随着法向应力增大, 冻结强度恢复逐渐增强。由于基础接触面发生剪切错动后, 高含水率样品的黏聚力损失较大, 而较低法向应力也使摩擦力增加有限, 因而, 低应力高含水率导致的冻结强度降低相对较大, 而高

应力和低含水率导致的冻结强度降低相对较小。

3 讨 论

土冻结过程中,通过冰胶结作用使冻土与基础构成一个整体,土中水分冻结向上膨胀,并通过土与基础间的冻结强度产生了一个作用于基础表面导致基础上移的作用力,即切向冻胀力^[1]。冻土能对基础产生切向冻胀力的原因在于冻土与基础间的冻结强度。冻胀力的大小与受到的约束有关,束缚力越大,冻胀力越大。也就是说,接触面发生相对位移时刻的切向冻胀力在数值上等于冻结强度。因此,冻结强度可以作为基础所受最大切向冻胀力的等效值,用于基础的冻拔安全性评价。

现行冻土区基础切向冻胀力设计值主要依据土体冻胀敏感性确定^[7]。土体冻胀敏感性主要根据室内开放系统补水冻胀试验确定^[12],土质和粒度分布是确定冻胀敏感性的决定因素。青藏高原表层冻结过程表明,0~1 m深度范围内土体温度较低,1~2 m范围内土体温度较高,上限附近土体在整个回冻期温度和当地年平均地温相近(图5)。由于温度和法向应力的不同,土体与基础间的冻结强度会有显著的不同,必然造成不同深度处单位切向冻胀力的不同。当土体温度低于-5℃后,其未冻水含量大幅减小(图4)。土体回冻过程中浅部土体温度较低,其较少的未冻水含量会导致冻结强度恢复不明显。如果场地土冻胀性强,且含水丰富,浅层土冻结强度损失较大。现行规范切向冻胀力设计值并未考虑冻结强度损失,可能高估基础的切向冻胀力,使设计偏于安全,造成经济浪费。另外,含水率是控制冻结强度的主要影响因素之一。即使是特强冻胀土,含水率较低时冻结强度和冻结强度恢复值均较小,必然造成切向冻胀力也较小。现行规范仅考虑土质冻胀敏感性,对于含水率较小地区基础设计,也可能高估基础所受的切向冻胀力。

过去的经验也表明,粗粒土的冻结强度要比细粒土大^[1]。由于冻胀力大小和约束有关,弱冻胀粗粒土场地也可能导致较高的切向冻胀力。如果场地上层为粗粒土,而下层为冻胀敏感性土,该场地产生的冻胀力可能比细粒土场地的冻胀力还要大。但是,如果按照现行规范,由于粗粒土冻胀敏感性较低,基础切向冻胀力要比细粒土小得多,这可能导致低估基础所受的切向冻胀力,导致基础冻拔失稳破坏。

上述分析表明,控制冻胀力的因素是冻结强度及其恢复值,即约束,而含水率和温度是控制冻结强度的主要影响因素,土质冻胀敏感性和切向冻胀力大小

并不具有显著的相关关系。因此,采用现行规范确定的切向冻胀力可能与基础实际受到的冻胀力存在较大的差距,并由此而引起基础失稳或经济浪费。所以,在冻土区场地冻胀力评估和基础稳定性评价时,也应考虑含水率、温度对冻结强度和冻结强度恢复的影响,以及由此而引起的基础所受切向冻胀力的变化。

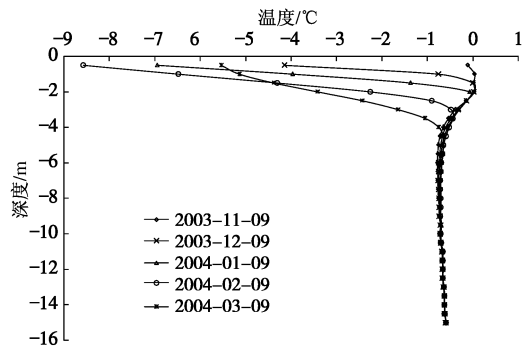


图5 青藏高原活动层回冻过程曲线

Fig. 5 Freezing process of active layer on Qinghai-Tibetan Plateau

4 结 论

本文采用直剪仪进行了青藏粉土与混凝土接触面冻结强度试验研究,总结了温度、含水率和法向应力对冻结强度和冻结强度恢复的影响,分析了冻结强度变化的内在机制,并基于试验结果探讨了现行规范中冻土区基础切向冻胀力取值标准问题,初步得到以下3点结论。

(1) 随温度降低,青藏粉土与基础间的冻结强度逐渐增大。土体含水率的增大会导致温度对接触面抗剪强度的影响更加显著。随着法向压力增大,冻结强度随含水率增大而增大的趋势变缓。

(2) 冻土与基础接触面的相对位移可以显著降低冻结强度,特别是法向应力较小和含水率较高条件下的冻结强度值减小更为显著,可达50%以上,温度较低时冻结强度损失增大。

(3) 冻土沿接触面的剪切滑移导致接触面黏聚力减小和内摩擦角增大。黏聚力损失随温度降低而显著增大,随土体含水率的增大而减小。内摩擦角及其恢复值均随试样含水率的增加而减小。试验温度越低,内摩擦角增加的幅度越大。

参考文献:

- [1] 童长江,管枫年. 土的冻胀与建筑物冻害防治[M]. 北京: 水力电力出版社, 1985. (TONG Chang-jiang, GUAN Feng-nian. Frost heaving and the prevention of freezing damage[M]. Beijing: China Water Power Press, 1985. (in

- Chinese))
- [2] 刘鸿绪. 对切向冻胀力沿桩侧表面分布的探讨[J]. 冰川冻土, 1993, **15**(2): 289 - 292. (LIU Hong-xu. Discussion on the distribution of tangential frost heaving forces along the lateral surface of pile[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1993, **15**(2): 289 - 292. (in Chinese))
- [3] NIDOWICZ B, SHUR Y. Russia and North American approaches of pile design in relation to frost action[C]// Proceeding of 7th International Permafrost Conference. Yellowknife, 1998: 803 - 809.
- [4] PERAMESWARAN V R. Adfreeze strength of frozen sand to model piles[J]. Canada Geotechnique Journal, 1978, **15**(4): 494 - 500.
- [5] WEAVER J S, MORGENSTERN N R. Simple shear creep tests on frozen soils[J]. Canada Geotechnique Journal, 1981, **18**(2): 217 - 229.
- [6] LADANYI B, FORIERO A. Evolution of frost heaving stresses acting on a pile[C]// Proceeding of 7th International Permafrost Conference. Yellowknife, 1998: 623 - 633.
- [7] JGJ118—98 冻土地区建筑地基基础设计规范[S]. 1998. (JGJ118—98 Code for design of soil and foundation of building in frozen soil region[S]. 1998. (in Chinese))
- [8] 钱 进, 刘厚建, 俞祁浩, 等. 青藏高原冻土工程地质特征与选线原则探讨[J]. 工程地质学报, 2009, **17**(4): 508 - 515. (QIAN Jin, LIU Hou-jian, YU Qi-hao, et al. Permafrost engineering geological characteristic and discussion of route selection in Qinghai-Tibetan Plateau. Journal of Engineering Geology, 2009, **17**(4): 508 - 515. (in Chinese))
- [9] LYAZGIN A L, LYASHENKO V S, OSTROBORODOV S V, et al. Experience in the prevention of frost heave of pipe foundations of transmission towers under northern conditions[J]. Power Technology and Engineering, 2004, **38**(2): 124 - 126.
- [10] 姜和平, 刘兆瑞. 冻土地区±500 kV 直流输电线路地基与基础设计[J]. 内蒙古电力技术, 2006, **24**(4): 1 - 4. (JIANG He-ping, LIU Zhao-rui. ±500 kV direct current transmission line ground and foundation design in frozen earth area[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2006, **24**(4): 1 - 4. (in Chinese))
- [11] WYMAN G E. Building transmission in subarctic Alaska[J]. Line Design, 2010(3): 104 - 110.
- [12] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001. (XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin. Frozen soil physics[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))
- [13] 沈乐天, 赵士达, 卢锡年, 等. 天然淡水冰单轴压缩强度及其温度和应变率效应[J]. 冰川冻土, 1990, **12**(2): 141 - 146. (SHEN Le-tian, ZHAO Shi-da, LU Xi-nian, et al. Effects of temperature and strain rate on uniaxial compressive strength of natural fresh water ice[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1990, **12**(2): 141 - 146. (in Chinese))